

ENCYCLOPÉDIE DES TRAVAUX PUBLICS

FONDÉE PAR **M.-C. LECHALAS**, INSPECTEUR GÉNÉRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES

Médaille d'or à l'Exposition Universelle de 1889

COURS DE PONTS DE L'ÉCOLE DES PONTS & CHAUSSÉES

EMPLACEMENTS, DÉBOUCHÉS
FONDACTIONS
PONTS EN MAÇONNERIE

PAR

JEAN RÉSAL

INGÉNIEUR EN CHEF DES PONTS ET CHAUSSÉES

PARIS

LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE

BAUDRY & C^{IE}, LIBRAIRES-ÉDITEURS

15, RUE DES SAINTS-PÈRES, 15

MÊME MAISON A LIÈGE

piles ou culées, ce qui est très pratique et très économique pour les petites et moyennes ouvertures, où l'on peut se contenter de deux ou trois arbalétriers, quatre au maximum. Mais ce genre de charpente ne convient guère aux voûtes de grande portée. On ne peut, en pareil cas, se limiter à quatre arbalétriers, parce qu'il faudrait employer des pièces de bois de grande longueur et de fort équarrissage, par suite lourdes et coûteuses. D'autre part, si on augmente le nombre de ces éléments, les arbalétriers consécutifs se rencontrent sous des angles très ouverts, et, dans ces conditions, la charge du cintre détermine dans ces pièces des efforts de compression excessifs ; de plus, la charpente manque de rigidité et éprouve des déformations considérables sous le poids de la voûte.

Si, ayant à construire un ouvrage de grande ouverture, on ne dispose que des deux appuis de naissance, il faut recourir à l'emploi des cintres *retroussés*, dont il sera parlé plus loin.

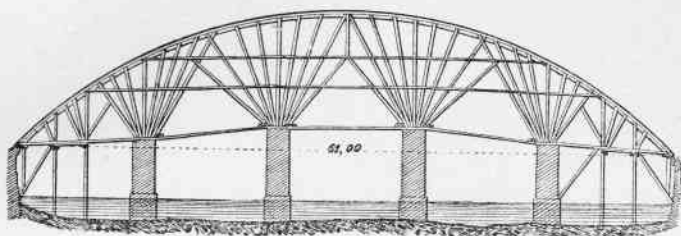
99. Cintres à contrefiches isolées. — Pour les voûtes de quelque importance, on cherche toujours à se procurer des appuis intermédiaires entre les naissances : ces appuis sont fournis par le terrain naturel, par des massifs de maçonnerie, par des poteaux, des pieux, etc. On dispose, s'il est possible, les appuis de façon à diviser l'ouverture en parties égales.

On peut soutenir chaque sommet du polygone des vaux par une *contrefiche* ou pièce inclinée, qui vient buter sur un appui. Chacun des points d'appui est ainsi le sommet d'un faisceau de bois en éventail, qui aboutissent aux sommets successifs du polygone.

Cette charpente est simple et économique ; mais elle a l'inconvénient de ne pas solidariser suffisamment les appuis, qui restent indépendants, abstraction faite de la liaison établie entre eux par la traverse horizontale que l'on intercale d'habitude entre les pieux de support et l'ossature proprement dite du cintre. Si l'un des pieux vient à se rompre, à tasser ou à se déverser, il n'est pas suppléé par ses voisins, et, par suite, le cintre s'affaisse dans la région qui a cessé d'être soutenue.

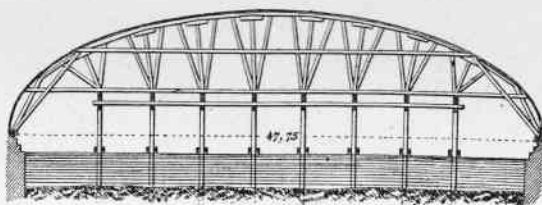
Cette disposition oblige, d'autre part, à relier solidement entre eux les vaux, de façon qu'ils constituent une pièce courbe

épousant la forme de la voûte. Toute charge verticale portée par le cintre se décompose en effet en deux forces obliques dont l'une agit sur la contrefiche isolée, tandis que l'autre est transmise au vau : d'où la nécessité d'établir entre les abouts en

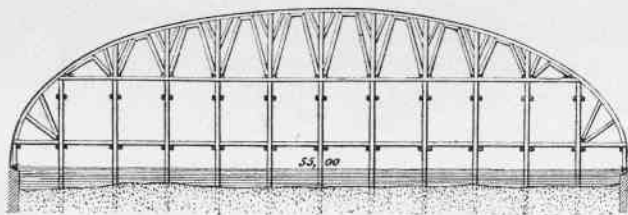


contact de deux vau consécutifs un assemblage assez résistant pour assurer la transmission d'efforts dirigés suivant les axes de ces pièces.

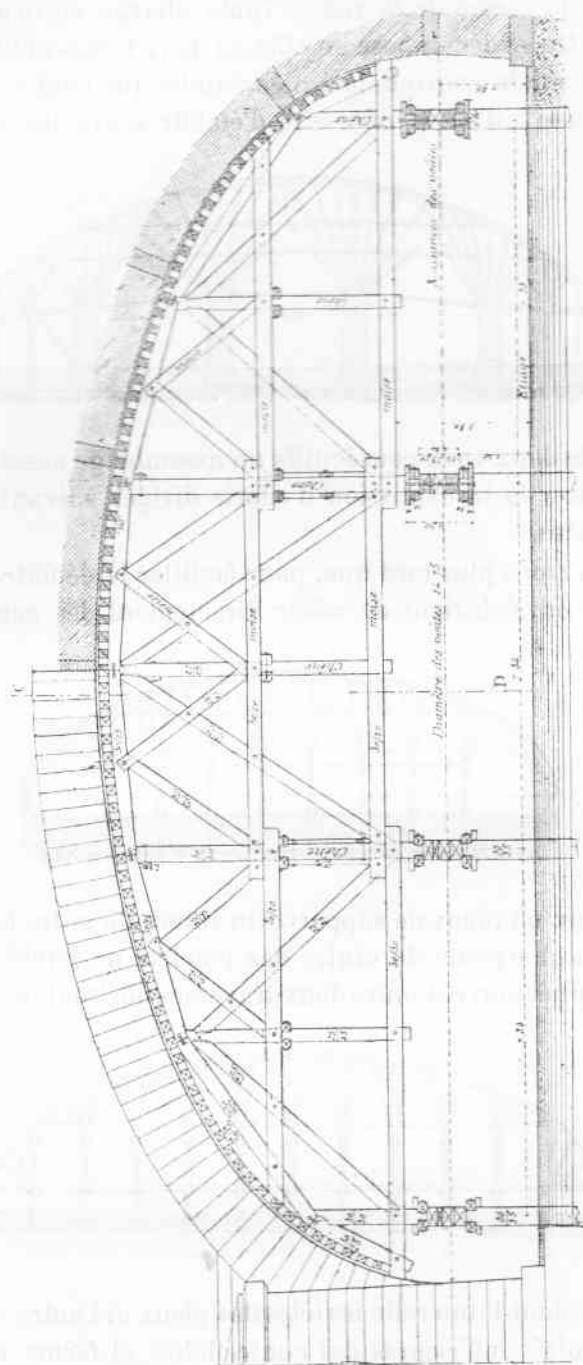
Nous verrons plus tard que, pour faciliter le décentrement de la voûte, on s'abstient de relier directement les contrefiches



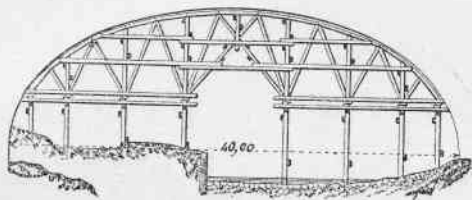
aux poteaux ou pieux de support. On intercale entre les appuis fixes et la charpente du cintre des potelets de faible hauteur, placés le plus souvent entre deux traverses horizontales (poutres



ou moises) dont l'une relie les têtes des pieux et l'autre solidarise les extrémités inférieures des contrefiches et ferme à sa base le polygone du cintre.



100. Cintres à contrefiches arc boutées. — Chaque sommet du polygone des vaux est maintenu par deux contrefiches aboutissant à deux appuis consécutifs. Dans ces conditions, le tassement d'un appui ne peut compromettre de façon irrémédiable l'équilibre de la voûte en construction, à moins que les



appuis qui encadrent celui-ci ne subissent un pareil mouvement. D'autre part, les vaux ne sont plus soumis à des efforts de compression ou d'extension dirigés suivant leurs axes, et il n'y a pas lieu de se préoccuper de la solidité de leurs assemblages de jonction. Toutefois, on admet toujours que la contrefiche verticale, qui forme le prolongement du pieu de support, n'a pas besoin d'être arc boutée : comme elle transmet directement la charge totale portée par le cintre, une pièce oblique auxiliaire ne remplirait aucun rôle, le calcul indiquant qu'elle n'a aucun effort à supporter.

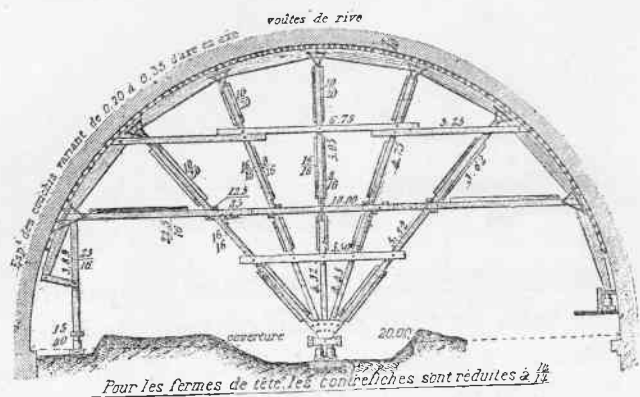
Le type du cintre à contrefiches arc boutées est celui qui a reçu les plus nombreuses applications pour la construction des grandes voûtes de ponts.

101. Cintres à contrefiches radiales. — M. Séjourné, qui a construit récemment dans le Midi de la France de très grands et très beaux ouvrages en maçonnerie, a fait grand emploi de contrefiches *radiales*, dirigées suivant les normales à l'intrados. L'avantage de ce dispositif est que les contrefiches isolées, rencontrant les vaux à angle droit, se prêtent à l'exécution d'assemblages très simples, très solides et indéformables, réunissant à la fois les abouts de la contrefiche et des deux vaux adjacents.

L'ossature est peu compliquée, s'exécute facilement et avec une grande précision, puisque toutes les pièces sont arrêtées à leurs extrémités par des plans normaux aux fibres ; es calculs

sont simples, et les déformations dues à la charge sont réduites au minimum.

Avec un intrados circulaire, on peut, si l'ouverture est médiocre, faire aboutir toutes ces contrefiches radiales à un seul



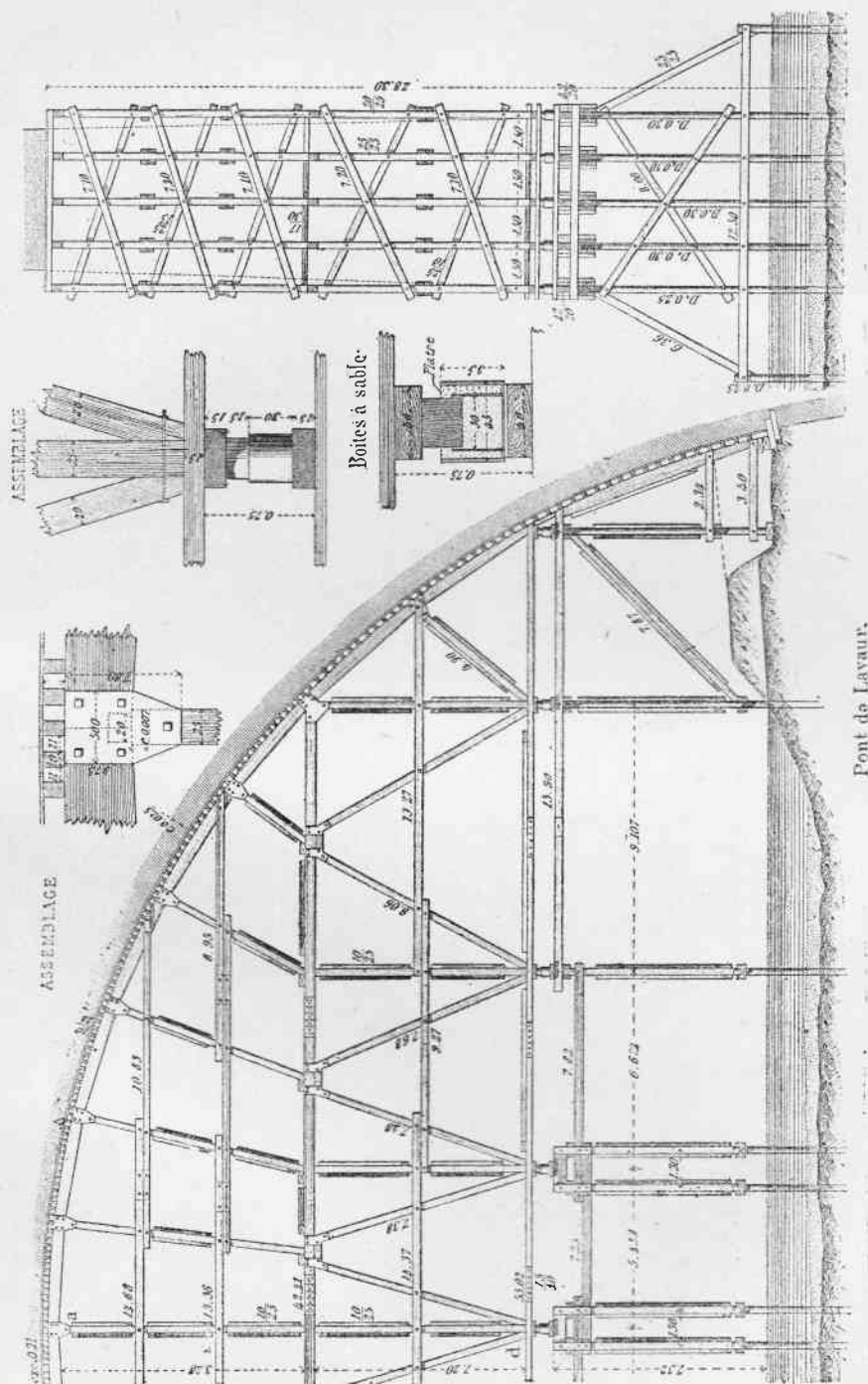
Pont de Saint-Waast.

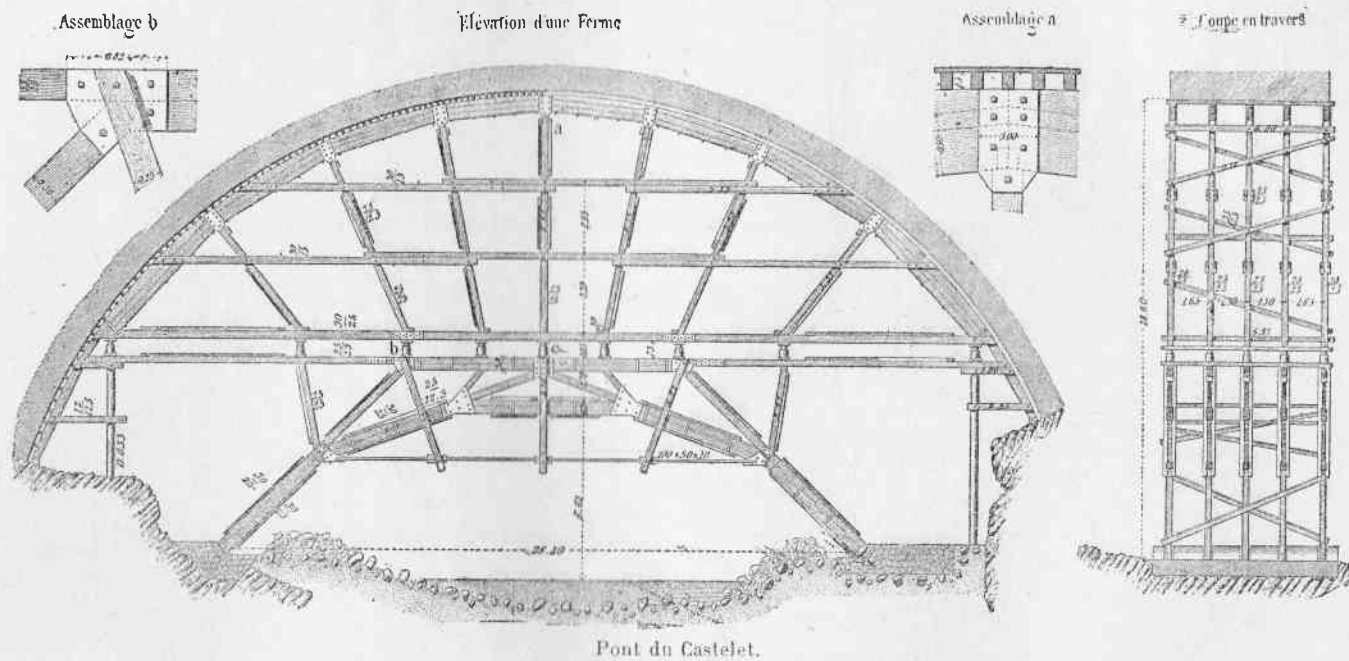
support placé au centre du cercle d'intrados : Pont de *Saint-Waast*.

Si la portée est grande, ce dispositif est irréalisable parce qu'il exigerait l'emploi de pièces de bois d'une très grande longueur, précisément égale au rayon d'intrados. M. Séjourné arrête en ce cas les contrefiches radiales à une traverse horizontale placée à mi-hauteur de la montée, et intercale entre cette traverse et les supports du cintre un étage de contrefiches arc-boutées, venant soutenir les extrémités inférieures des contrefiches radiales : pont de *Lavour*.

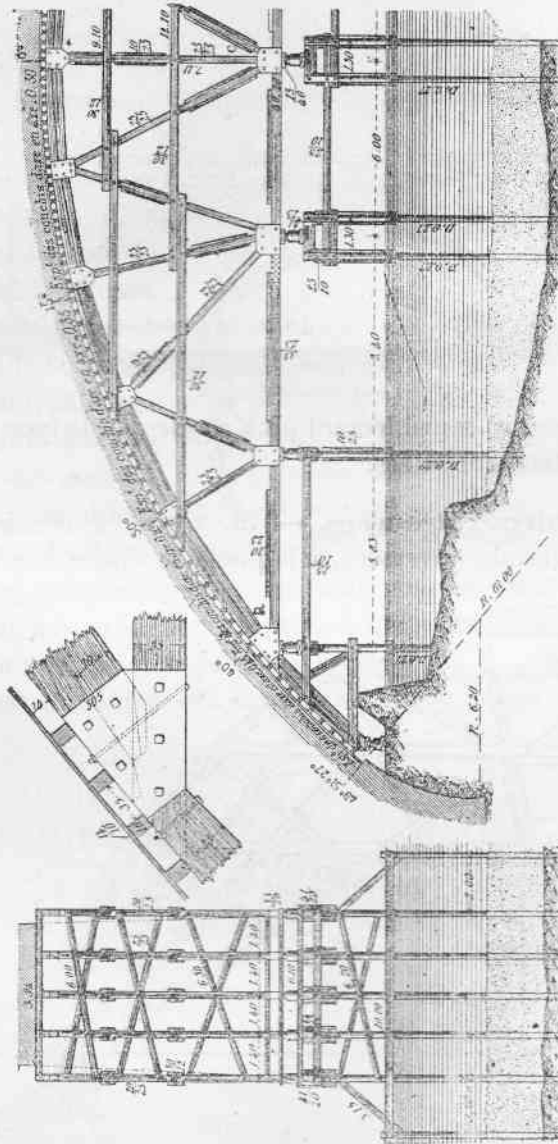
On peut aussi établir sous la traverse inférieure des contrefiches radiales un cintre *retroussé*, ne prenant appui qu'aux naissances de la voûte : pont du *Castelet*, viaduc de *Nice*. Mais avec un dispositif de ce genre, les tassements du cintre sous la charge ne sont guère diminués par l'emploi des contrefiches radiales.

Somme toute, ce système n'est à recommander que pour les très grandes ouvertures, en raison des sujétions qu'il impose, et notamment de l'obligation où l'on se trouve d'intercaler entre les contrefiches radiales et les pièces de support un étage de contrefiches ordinaires, toutes les fois qu'on ne peut se contenter du support central unique admis pour le pont de Saint-Waast.





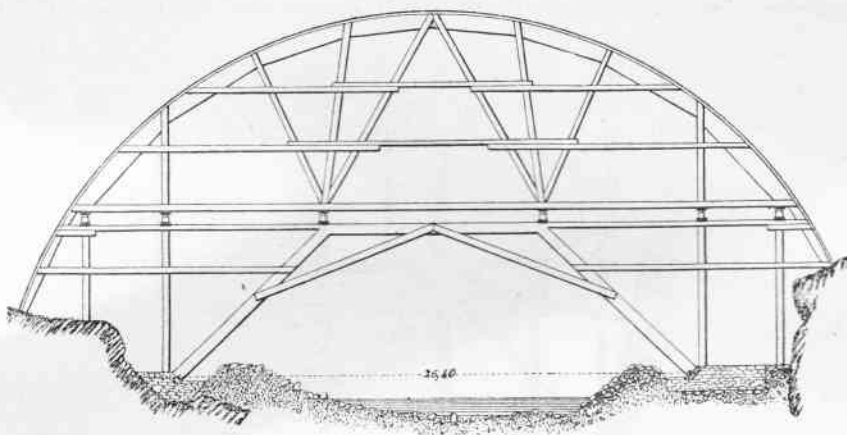
Pour le pont *Antoinette*, où l'ouverture obligeait à prendre des appuis entre les naissances sans que la hauteur fût suffisante pour permettre la division du cintre en deux étages,



Pont Antoinette,

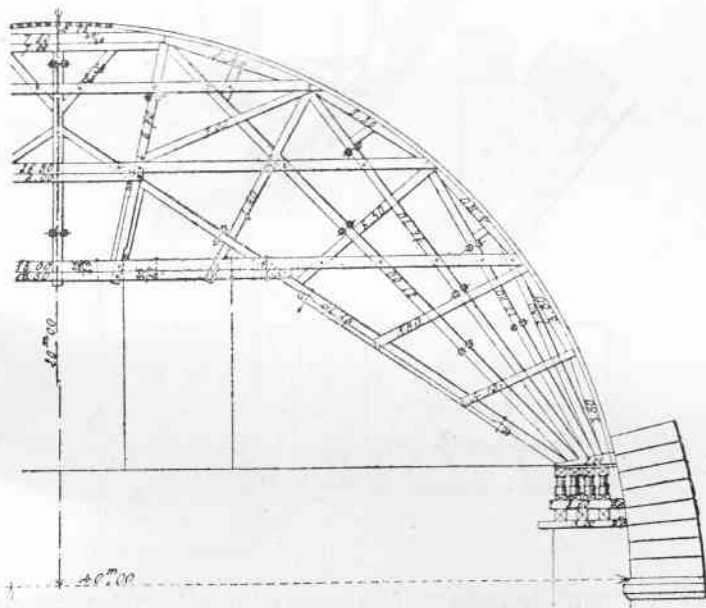
comme au pont de Lavar, M. Séjourné a fait porter par chaque pieu une seule contrefiche radiale encadrée entre deux contrefiches arcboutées. Ce dispositif mixte, qui consiste à rem-

placer uniquement les contrefiches verticales par des contrefiches radiales, ne semble, *a priori*, ni plus simple d'exécution,



ni plus solide, ni sensiblement plus rigide que le type ordinaire à contrefiches arc-boutées.

102. Cintres retroussés. — Si, ayant à construire une voûte de grande ouverture, à laquelle le cintre à arbalétriers



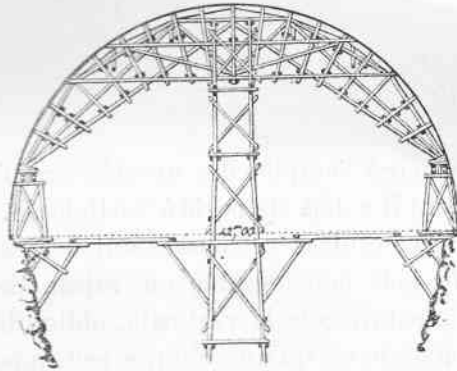
Pont de Collonges.

ne soit pas applicable, il est impossible de se procurer des

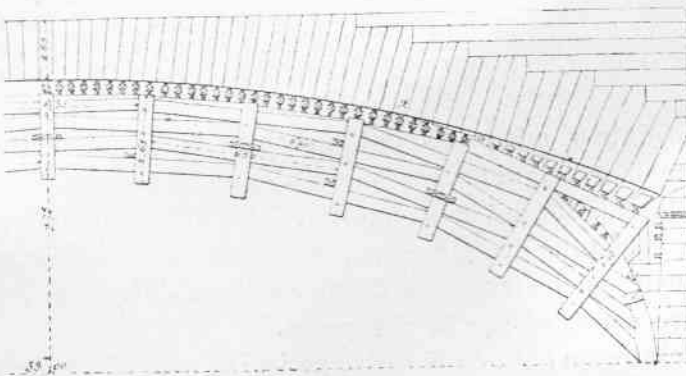
appuis intermédiaires entre les naissances, il faut recourir à l'emploi d'un cintre retroussé.

On a fait usage de divers systèmes.

On peut recourir à des contrefiches isolées de grande longueur formant éventail à partir de chaque naissance : pont de *Waterloo* à Londres, pont de *Collonges*, pont de *Saint-Sauveur*, pont de *Saumur*. Comme ces pièces rencontrent sous des angles très aigus les côtés du polygone des vaux, il est indispensable de relier les extrémités supérieures des contrefiches placées symétriquement par rapport à la verticale de clef, au moyen d'entrails constitués par des traverses ou des moises. D'autre part, on diminue le danger de flambement, pour ces pièces comprimées de grande longueur, en les réunissant ensemble par des moises radiales ou *pendantes* dirigées normalement à la courbe d'intrados.



Pont de Saint-Sauveur.

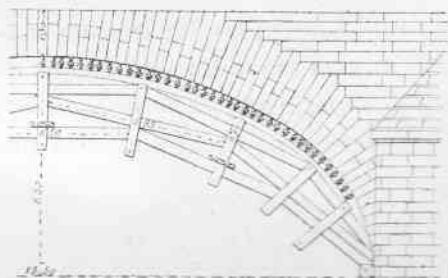


Pont de Neuilly.

l'emploi de pièces de bois longues et massives, qu'il est souvent difficile de se procurer à bon compte.

On peut établir plusieurs séries successives d'arbalétriers de

même longueur formant des polygones semblables inscrits les uns dans les autres, et que l'on relie mutuellement par des



Pont de Cravant.

moises pendantes passant successivement par le sommet d'un polygone et le milieu d'un côté du polygone inscrit suivant : ponts de Neuilly, de Cravant, etc. On obtient de la sorte un arc en bois qui sert de cintre.

On peut également recourir à l'emploi des arbalétriers disposés en chevauchement, dont il a déjà été parlé à l'article 98.

Les cintres retroussés ont le grave défaut d'exiger un cube de bois considérable en raison de l'obliquité des pièces de l'ossature sur la verticale, obliquité dont la conséquence immédiate est qu'une charge peu importante détermine dans ces bois des efforts très considérables.

Soit P la charge appliquée à l'extrémité d'une contrefiche dont l'axe fait avec la verticale l'angle α ; l'effort F subi par cette pièce aura pour expression : $\frac{P}{\cos \alpha}$.

Pour $\alpha = 60^\circ$, on trouve	$F = 2 P$,
75° —	$3,8 P$,
80° —	$5,7 P$,
85° —	$11,4 P$.

Les cintres retroussés ont en outre le défaut d'être très déformables, ce qui peut entraîner des conséquences fâcheuses pour la solidité des maçonneries. Cette déformabilité est due soit à l'obliquité des pièces sur la verticale, soit à leur grande longueur qui les expose à fléchir, soit au défaut de hauteur de l'arc constitué par la charpente.

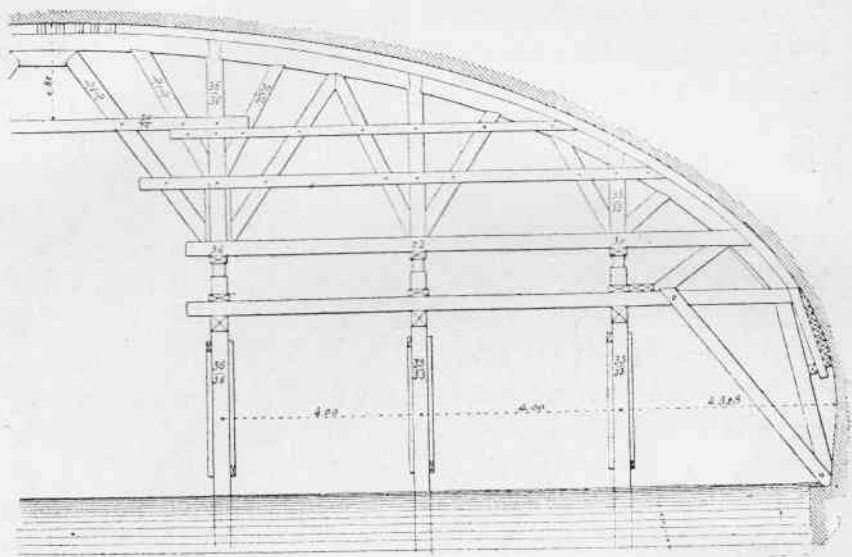
Le cintre du pont de Neuilly, projeté et exécuté par Perronet, qui était un maître constructeur, a tassé de $0^m,51$ pendant l'exécution de chaque voûte, qui n'avait pourtant que 39 mètres d'ouverture avec $9^m,75$ de flèche. Une déformation de ce genre détermine forcément la fissuration des maçonneries et la dé-

sagrégation du mortier qui, ayant fait prise d'une manière incomplète, ne se prête plus aux mouvements sans perdre de sa résistance. Pendant le décintrement, la voûte du pont de Neuilly s'est encore affaissée de 0^m,26, ce qui a porté à 0^m,77 le tassement total à la clef. Avec les mortiers hydrauliques à prise rapide dont on fait usage aujourd'hui, de pareils mouvements ne seraient pas admissibles : la voûte une fois construite aurait des joints rompus et ne présenterait plus qu'une stabilité douteuse.

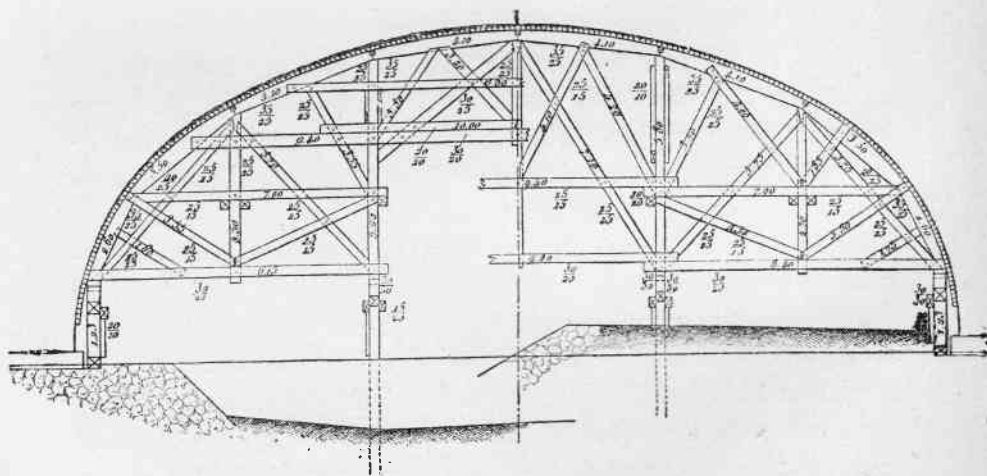
103. Cintres mixtes. — Le vice radical des cintres retroussés tient à l'emploi exclusif du bois auquel on a voulu s'assujettir. Comme les assemblages des charpentes se prêtent mal à la transmission d'efforts de traction, il a fallu combiner des dispositions telles que les pièces maîtresses pussent toutes travailler à la compression, ce qui a conduit à alourdir le cintre, sans lui assurer la rigidité convenable.

Lorsqu'ayant à construire une voûte de grande ouverture, on ne dispose d'aucun point d'appui intermédiaire entre les naissances, nous pensons qu'il convient d'adopter un type de cintre mixte en bois et fer, qui pourrait être soit un arc de hauteur suffisante pour que sa déformation sous la charge fût insignifiante, soit une poutre en *bow-string*, dont la semelle supérieure décrirait la courbe d'intrados. On se servira de fer ou d'acier pour les éléments tendus, en réservant le bois pour les parties comprimées. Nous ne croyons pas devoir entrer dans de plus longs détails à ce sujet, parce que l'étude de ce genre de charpente mixte trouvera naturellement sa place dans le texte consacré aux ponts en bois et fer. Nous remarquerons simplement que les pièces métalliques peuvent être constituées soit par des fers plats ou à section en simple té, soit par des tirants ou tiges rondes en fer dont on règle la longueur et la tension au moyen d'assemblages à vis et écrou, ou à *tendeurs*, de façon à bien serrer tous les assemblages de charpente en les empêchant de prendre aucun jeu, et à rendre l'ouvrage parfaitement rigide en solidarissant tous ses éléments d'une façon complète et sûre.

104. Arches marinières. — Dans les rivières navigables, il faut ménager, au moins sous une arche, un passage libre pour les bateaux. On écarte, à cet effet, l'un de l'autre les



appuis les plus voisins du milieu de l'ouverture, et on dispose les contrefiches du cintre de façon qu'elles laissent l'espace



libre exigé par le gabarit de la navigation, sur lequel on ne laisse pas empiéter les moises, traverses, entretoises et pièces accessoires de contreventement.

Dans le cintre du pont de *Saint-Clair*, à Lyon, on a fait usage, pour couvrir la travée marinière, d'une poutre à treillis en bois, ayant une hauteur suffisante pour posséder la rigidité voulue. Cette disposition était parfaitement rationnelle, et l'emploi du fer pour les pièces tendues, qui est justifié pour les poutres de grande portée, n'était pas ici nécessaire, en raison de la faible longueur et de la multiplicité des barres de treillis, qui ont pu sans inconvénient être des bois de petit échantillon.

105. Ecartement des fermes. — Entretoisement et contreventement des cintres. — On règle l'écartement des fermes du cintre en raison de la hauteur des couchis, dont cet écartement détermine la portée, de façon à limiter convenablement le travail à la flexion et la déformation de ces pièces.

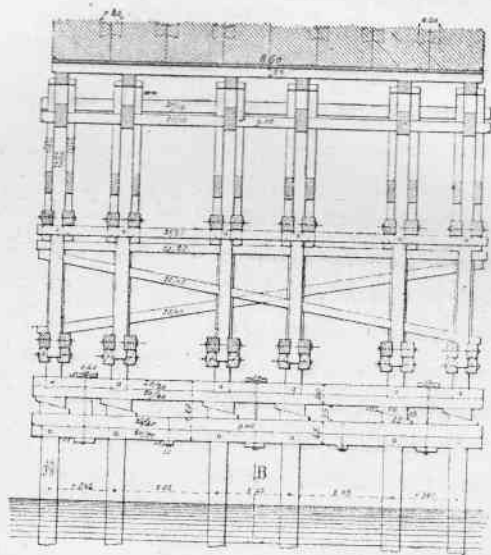
Il convient également de vérifier que la charge de chaque pieu ou poteau de support ne sera pas exagérée. Si le terrain est de mauvaise nature, et la voûte de grande épaisseur, on peut être conduit à rapprocher les fermes en vue d'augmenter suivant les besoins le nombre des appuis.

En outre des éléments essentiels de la ferme de cintre, contrefiches, arbalétriers, traverses, poingons, potelets, etc., qui subissent des efforts proportionnels au poids de la voûte et déterminés par les calculs de stabilité, on peut être conduit, pour augmenter la rigidité de l'ouvrage, à ajouter des pièces auxiliaires, constituées d'habitude par des moises, qui ont pour objet de soutenir, de distance en distance, les longues pièces comprimées pour les empêcher de flamber, ou les traverses horizontales exposées à fléchir sous leur propre poids. Dans certains cas, il est utile de diviser en triangles des espaces vides polygonaux qui pourraient se déformer par suite du jeu ou de l'insuffisance des assemblages.

On relie entre elles les fermes successives par des moises horizontales et des pièces obliques formant croix de Saint-André, qui les solidarisent et les empêchent de se déverser isolément. Il est indispensable, notamment, que chaque ferme de tête soit rattachée ainsi à la ferme intermédiaire voisine, sans quoi elle risquerait de se pencher en avant, et de déterminer par

suite l'affaissement du bandeau et sa séparation du corps de la voûte.

Le calcul du cintre ne fournit aucun renseignement sur les efforts qu'auront à subir les pièces accessoires. On arrête leurs



Pont de Montlouis.

dimensions par appréciation, en se basant sur les indications fournies par des cintres déjà employés avec succès. Il convient, toutefois, de limiter le plus possible le nombre de ces pièces, et de n'admettre que celles dont l'utilité paraît bien établie *a priori*. On a parfois surchargé les cintres d'éléments auxiliaires dont le rôle n'était pas défini, et c'est là une faute à éviter. Ce n'est pas en multipliant les bois à tort et à travers, sans rime ni raison, que l'on assure la stabilité et la rigidité d'un cintre. Toute pièce inutile est par là même nuisible, parce qu'elle augmente sans nécessité le poids et la dépense de la construction, et affaiblit les autres bois de l'ossature dans les points où elle s'assemble avec eux.

106. Cintres des voûtes biaises. — Les fermes intermédiaires sont généralement parallèles aux fermes de tête, c'est-à-dire aux plans biaises des bandeaux de voûte. Pour un ouvrage de grande longueur entre les têtes, il peut être rationnel et

économique de dévier ces plans de ferme à partir de chaque tête, de façon à les ramener, en fin de compte, à correspondre aux sections droites de la voûte.

Les fermes doivent être reliées les unes aux autres par des entretoises biaises, parallèles aux génératrices de la voûte, et par des entretoises droites, perpendiculaires aux plans des têtes. Ces deux systèmes d'entretoises solidarisent les fermes d'une façon complète, en divisant en triangles le parallélogramme sur lequel le cintre se projette horizontalement.

Comme on doit exiger des cintres de voûtes biaises une rigidité exceptionnelle, il faut, autant que possible : s'abstenir du type retroussé, sauf pour les petites ouvertures ; employer des dispositions réduisant au minimum la déformation de la charpente ; faire usage de pièces massives et robustes ; enfin ne pas reculer devant un grand luxe de bois de contreventement.

Les couchis sont généralement recouverts par un plancher en voliges, sur lequel on trace les joints d'appareil, de façon à permettre la pose rigoureusement exacte de tous les voussoirs.

107. Calcul des cintres. — On doit admettre que le cintre porte la totalité du poids de la voûte depuis la clef jusqu'au joint incliné à 45° sur la verticale. A partir de ce joint, il ne lui est plus transmis qu'une fraction du poids de la maçonnerie, qui va en décroissant et s'annule au joint de naissance, si ce dernier est horizontal.

Soient P le poids d'une portion de voûte comprise entre deux joints voisins, et α la moyenne des angles que font ces joints avec la verticale.

Si $\alpha < 45^\circ$, la charge P sera intégralement transmise à l'ossature du cintre. Si $\alpha > 45^\circ$, on admettra que les couchis ne supportent qu'une charge P' fournie par la relation :

$$P' = P \cotg. \alpha : \text{qui donne } P' = P, \text{ pour } \alpha = 45^\circ ; \\ \text{et } P' = 0, \text{ pour } \alpha = 90^\circ.$$

Connaissant la charge portée par le cintre, on évalue sans difficulté le travail à la flexion des couchis et des vaux.

Le calcul des efforts de compression, ou d'extension simple, supportés par les autres pièces de la charpente est une application élémentaire de la méthode des systèmes articulés, que nous exposerons dans le prochain chapitre. S'il s'agissait d'un cintre retroussé, assimilable à un arc ou à une poutre en bow-string, on n'aurait également qu'à suivre les règles applicables aux arcs ou poutres métalliques, en tenant compte, d'ailleurs, de la différence existant entre le bois et le fer au point de vue des propriétés élastiques. Nous jugeons par ce motif inutile de donner, au sujet du calcul des cintres, des détails qui feraient double emploi avec les développements relatifs aux constructions métalliques.

108. Assemblages des éléments des cintres. — L'étude des assemblages mutuels des pièces de bois est du domaine de la *Stéréotomie*. Nous remarquerons toutefois que dans les cintres, ouvrages de charpente provisoire, on fait grand usage, pour économiser la main d'œuvre et éviter des déchets sur des pièces à réemployer plus tard, d'assemblages mixtes avec éléments en fer : boulons, équerres, étriers, couvre-joints, etc. On lira avec fruit, à ce sujet, l'article publié en 1886 (1^{er} semestre) dans les *Annales des Ponts et Chaussées* par M. Séjourné, qui fournit des indications sur les assemblages étudiés par cet ingénieur pour les cintres de ses ponts : l'emploi de couvre-joints ou de boîtes en tôle lui a permis d'obtenir une rigidité et une solidité que les tenons, mortaises et embrèvements, avec chevilles en chêne, de la charpente classique ne pourraient certainement donner.

Quand une pièce de bois comprimée vient buter sur une face longitudinale d'une autre poutre, on peut craindre que son about ne pénètre dans la seconde pièce, par écrasement des fibres pressées dans le sens de leur épaisseur : il est alors utile d'intercaler entre l'about de la première pièce et la face de la seconde une feuille de tôle, jouant le même rôle que les selles en acier placées assez souvent, dans les chemins de fer, entre les patins des rails Vignole et les traverses qui se trouvent en ce cas soumises à un effort de compression perpendiculaire aux fibres. Cette selle serait inutile entre des bois

superposés à plat, ou butés l'un contre l'autre par leurs extrémités.

Pour le même motif, les cales et coins doivent toujours être en bois dur (chêne, teck, etc.), et jamais en bois tendre (sapin, pin, etc.), afin d'éviter les phénomènes d'écrasement qui se manifestent quand les fibres sont pressées perpendiculairement à leur direction.

109. Exécution des maçonneries. Décintrement des voûtes. — *Arches de faible ouverture.* — On maçonne la voûte en partant des naissances et se dirigeant vers la clef; on pose en dernier lieu le voussoir de clef, que l'on serre fortement sur les deux joints d'assises qui l'encadrent. Ces joints étant presque verticaux, il est difficile et parfois même impossible de les enduire d'une couche de mortier avant la mise en place de la clef; le plus généralement on pose la pierre sur des cales en bois qui ménagent le vide à remplir par le mortier, après quoi on bourre le joint. Il convient d'enlever les cales avant la prise du mortier, pour que celui-ci soit bien serré entre les voussoirs. C'est d'ailleurs une règle générale pour toutes les maçonneries d'appareil, quand on pose les pierres sur cales avant de ficher les joints.

Arches d'ouverture moyenne. — En procédant comme ci-dessus, on risquerait, si le cintre doit tasser de façon appréciable sous la charge, et que le mortier des joints de naissance ait fait prise avant le clavage, de déterminer la fissuration de ces joints, ou plutôt des joints de rupture autour desquels pivotent les deux demi-voûtes par suite de l'affaissement du cintre.

Il est donc prudent de laisser vides les joints de rupture, en maintenant par des cales l'écartement des voussoirs. Une fois la clef en place, on remplit simultanément de mortier les quatre joints vides ménagés à la clef et aux reins, et on enlève les cales immédiatement après.

Il convient de monter symétriquement les deux moitiés de la voûte, de part et d'autre de la clef, pour ne pas s'exposer à une déformation latérale du cintre, qui pourrait s'affaisser du côté le plus chargé, et se soulever du côté le moins chargé, vers

lequel il se trouverait rejeté. Il est également judicieux de maçonner d'un coup chaque assise de voussoirs sur toute sa longueur d'une tête à l'autre, pour éviter toute inégalité de charge entre les diverses fermes du cintre, qui, autrement, éprouveraient à un moment donné des tassements différents, d'où résulteraient d'une part des irrégularités dans la surface de douelle, et, d'autre part, des tendances de la voûte à se rompre suivant les joints discontinus séparant les maçonneries exécutées à des époques différentes.

Toutefois cette règle conduirait, pour les voûtes de très grande longueur, à attribuer au chantier de maçonnerie une étendue excessive : il suffit alors d'entreprendre le travail à partir d'une tête seulement, en réglant de façon régulière son avancement de telle sorte que les charges portées par deux fermes de cintre consécutives ne soient jamais très différentes, et ne correspondent, par exemple, pour chaque demi-voûte qu'à une ou tout au plus deux assises de voussoirs. On construit ainsi l'ouvrage par gradins successifs, dont la hauteur va en diminuant à partir de la tête prise pour origine des opérations. On peut aussi, dans ces conditions, poser successivement les voussoirs de clef, mais il semble préférable, même en ce cas, d'effectuer en une seule fois le clavage sur toute la longueur de la voûte, à moins qu'une même ferme de cintre ne doive être réemployée plusieurs fois sous la même arche : il faut bien alors claver les parties de voûte qu'elle porte, pour pouvoir enlever la charpente afin de la reporter plus loin (voûtes de tunnels ou souterrains).

Voûtes de grande ouverture. — En partant des naissances et se dirigeant vers la clef, on peut déterminer dans le cintre une déformation qui se traduit par un affaissement et un rapprochement des reins, et par un soulèvement de la région de clef.

Il paraît préférable, pour éviter une défiguration de la courbe de douelle, de charger tous les couchis en même temps. On construit simultanément une série de tronçons de voûtes, soutenus chacun à son joint d'assise inférieur par un coffre ou un taquet en bois occupant la place d'un voussoir dont la pose a été ajournée. Quand la maçonnerie est entièrement terminée, sauf à l'emplacement des taquets, on enlève ceux-ci ; on leur

lequel il se trouverait rejeté. Il est également judicieux de maçonner d'un coup chaque assise de voussoirs sur toute sa longueur d'une tête à l'autre, pour éviter toute inégalité de charge entre les diverses fermes du cintre, qui, autrement, éprouveraient à un moment donné des tassements différents, d'où résulteraient d'une part des irrégularités dans la surface de douelle, et, d'autre part, des tendances de la voûte à se rompre suivant les joints discontinus séparant les maçonneries exécutées à des époques différentes.

Toutefois cette règle conduirait, pour les voûtes de très grande longueur, à attribuer au chantier de maçonnerie une étendue excessive : il suffit alors d'entreprendre le travail à partir d'une tête seulement, en réglant de façon régulière son avancement de telle sorte que les charges portées par deux fermes de cintre consécutives ne soient jamais très différentes, et ne correspondent, par exemple, pour chaque demi-voûte qu'à une ou tout au plus deux assises de voussoirs. On construit ainsi l'ouvrage par gradins successifs, dont la hauteur va en diminuant à partir de la tête prise pour origine des opérations. On peut aussi, dans ces conditions, poser successivement les voussoirs de clef, mais il semble préférable, même en ce cas, d'effectuer en une seule fois le clavage sur toute la longueur de la voûte, à moins qu'une même ferme de cintre ne doive être réemployée plusieurs fois sous la même arche : il faut bien alors claver les parties de voûte qu'elle porte, pour pouvoir enlever la charpente afin de la reporter plus loin (voûtes de tunnels ou souterrains).

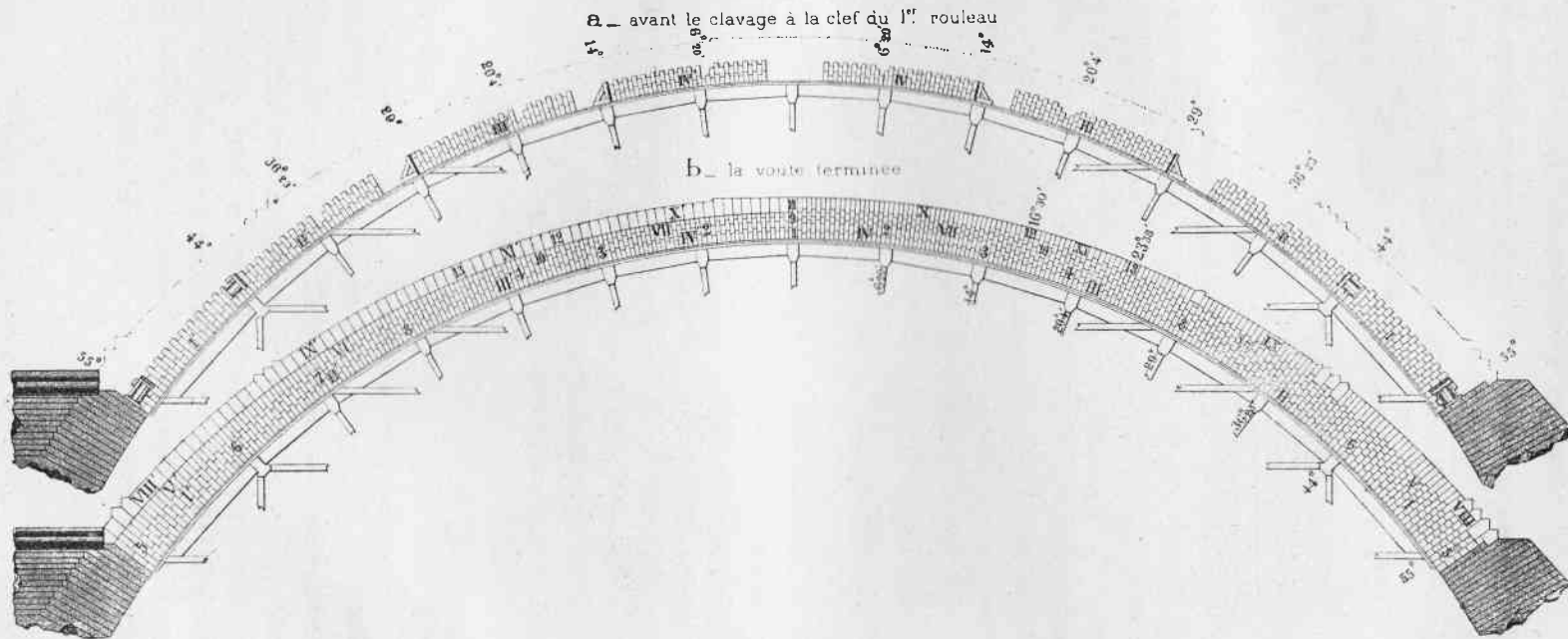
Voûtes de grande ouverture. — En partant des naissances et se dirigeant vers la clef, on peut déterminer dans le cintre une déformation qui se traduit par un affaissement et un rapprochement des reins, et par un soulèvement de la région de clef.

Il paraît préférable, pour éviter une défiguration de la courbe de douelle, de charger tous les couchis en même temps. On construit simultanément une série de tronçons de voûtes, soutenus chacun à son joint d'assise inférieur par un coffre ou un taquet en bois occupant la place d'un voussoir dont la pose a été ajournée. Quand la maçonnerie est entièrement terminée, sauf à l'emplacement des taquets, on enlève ceux-ci ; on leur

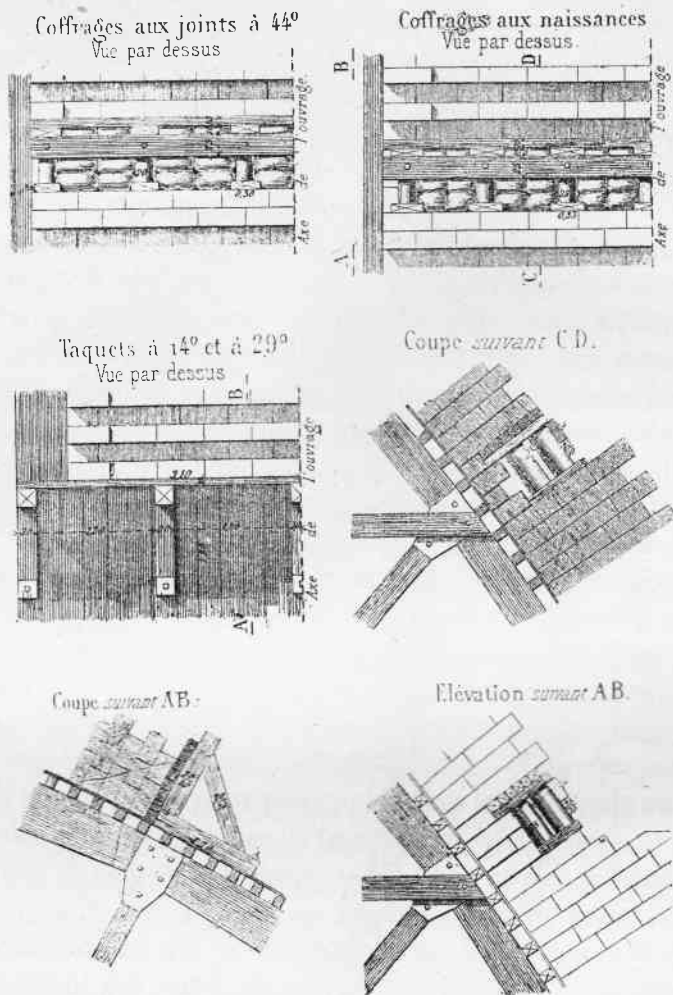
PONT DE LAVAUR

a - avant le clavage à la clef du 1^{er} rouleau

b - la voûte terminée



substitue des voussoirs ; puis on bourre en même temps tous



Pont de Lavaré.

les joints vides correspondant aux pierres posées en dernier lieu.

Décintrement. — Pour une voûte de petite ouverture, ou exécutée avec un mortier à prise très lente (chaux grasse ou moyennement hydraulique), il n'y a nul inconvénient à décintre immédiatement après la pose de la clef. Le mortier est encore plastique dans tous les joints ; il subit par le décintrement une compression qui ne peut qu'améliorer sa résistance

finale. Les joints mal bourrés se resserrent et se remplissent, ce qui ne saurait être qu'avantageux.

Mais si, par suite de la rapidité de prise du mortier, ou en raison de l'importance de l'ouvrage, un certain nombre de joints ont perdu leur plasticité avant le clavage, sans avoir toutefois encore atteint une résistance notable, on peut craindre que le tassement de la voûte ne détermine dans ces joints des fissures qui ne pourraient plus se refermer. Il vaut mieux alors attendre que le mortier ait fait complètement prise et ait acquis une grande cohésion.

En résumé, si l'on ne peut effectuer le décintrement quand le mortier est encore mou et plastique, il faut ajourner l'opération jusqu'à l'époque où il aura complètement durci, en s'abstenant de modifier les conditions d'équilibre de la maçonnerie pendant la période où la prise est incomplète.

Le décintrement des ponts biais ne doit en aucun cas être entrepris avant que le mortier ait acquis une grande dureté dans tous les joints, parce qu'ici un tassement notable a toujours des conséquences fâcheuses, et parfois désastreuses, même si le mortier est encore mou : nous ne reviendrons pas sur les explications déjà fournies à ce sujet.

110. Construction par rouleaux. — Le décintrement des voûtes construites par rouleaux peut indifféremment s'effectuer après le clavage du rouleau inférieur, ou après l'achèvement complet de la maçonnerie : c'est généralement à ce dernier parti qu'on s'arrête, comme le plus prudent.

Il est d'ailleurs bien entendu que, dans le calcul du cintre, on limite la charge qu'il devra supporter au poids du premier rouleau. Comme nous l'avons vu à propos de la stabilité des voûtes, ce rouleau doit être relativement mince à la clef et épais aux naissances. Il est donc peu lourd dans la région de clef située au-dessus du joint incliné à 45° , où le cintre porte la totalité du poids, et très lourd dans la région de naissance située plus bas, où la fraction portée par le cintre va en décroissant rapidement, et où la distance de l'intrados aux supports fixes de la charpente va aussi en diminuant. On conçoit donc que la construction par rouleaux permette de réaliser une

économie considérable sur l'exécution du cintre, dont elle réduit la charge surtout dans la région de clef, où les pièces maîtresses sont les plus longues et les plus fatiguées.

Un certain nombre de ponts existant en Perse (Pont de la *Jeune fille*, *Pont-Rouge*, etc.) portent la marque évidente de la préoccupation qu'avaient les constructeurs de réduire au minimum la charge à imposer au cintre, sans doute en raison de la rareté des bois et de l'insuffisance des communications. Subordonnant tout à cette condition essentielle, ils ont adopté des profils en ogive, de façon à diminuer le plus possible l'étendue de la région comprise entre les joints inclinés à 45°. D'autre part, ils ont employé le système de construction par rouleaux en réduisant à une hauteur de brique, et parfois à une épaisseur seulement, le premier ou les premiers anneaux, dont le poids doit être intégralement supporté par le cintre. Dès que le mortier de ces anneaux avait fait prise, il leur était possible d'exécuter le surplus de la voûte avec des briques posées en long sans craindre de dépasser la limite de résistance du cintre mixte constitué par la charpente et par les premiers anneaux de briques.

C'est ainsi que le Pont-Rouge (Voir la figure de la page 244), à intrados ogival, comporte d'abord quatre rouleaux formés de briques posées à plat, sans liaison mutuelle d'un anneau à l'autre, puis deux anneaux formés de briques posées en long. Comme cet appareil s'arrête aux joints inclinés à 45°, il est visible que son adoption a été motivée par la très faible résistance du cintre en charpente dont on disposait.

L'article, cité déjà précédemment, qu'a publié en 1886 M. *Séjourné* dans les *Annales des Ponts-et-Chaussées*, contient des renseignements très intéressants et très complets sur la construction des cintres, l'exécution des voûtes, l'emploi des rouleaux et le décintrement pour les arches d'ouvertures moyennes, grandes ou exceptionnelles (Ponts de *Saint-Waast*, du *Castelet*, *Antoinette* et de *Lavaur*).

III. Ponts à plusieurs arches. — Le parti le plus sûr consisterait à édifier toutes les voûtes en même temps, et à ne les décintrer simultanément qu'après que, toutes les arches

ayant été clavées, les joints de mortier auraient partout fait une prise complète.

Si le nombre des arches est considérable, cette méthode serait onéreuse et peut-être même impraticable. Il n'est pas toujours possible de réunir sur un même chantier et d'approvisionner de matériaux un nombre suffisant de maçons pour que le travail soit entrepris simultanément et conduit de front dans toutes les arches.

D'autre part, on diminue considérablement la dépense en utilisant plusieurs fois le même cintre.

A cet égard, le mieux est de commencer le travail par une arche de rive (adossée à une culée), et de le conduire de telle façon que la pose d'une clef de voûte ne soit effectuée qu'au moment où la voûte suivante est presque terminée, et sur le point elle-même d'être clavée. On n'entreprendra le décintrement d'une arche que si la suivante est clavée, et si tous ses joints sont remplis de mortier.

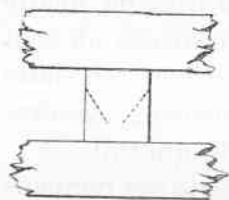
Il est possible, dans ces conditions, avec trois ou quatre cintres qu'on réemploie successivement, de construire un pont comportant un nombre illimité d'arches. Si l'on rencontre chemin faisant une pile-culée, on peut généralement décintre la voûte qui la précède avant d'avoir clavé celle qui suit.

On ne doit en aucun cas attaquer la maçonnerie des tympans d'une arche tant que la suivante n'est pas décintrée. Il est prudent de ne pas faire supporter à deux voûtes consécutives des charges trop inégales. Au surplus, les mesures à prendre en pareil cas dépendent de la stabilité des piles, et l'on devra toujours s'assurer que la marche adoptée ne peut compromettre l'équilibre du support, ni celui de la voûte.

Pour un viaduc dont les piles très hautes peuvent, sous l'influence des poussées horizontales, subir à leurs sommets des déplacements élastiques horizontaux d'une certaine importance, il faudra être beaucoup plus prudent que s'il s'agissait d'un pont peu élevé au-dessus de ses fondations, parce que l'on n'est pas sûr qu'une pile puisse faire office de culée alors même que le poids de l'arche adjacente se trouve réduit à celui de la voûte proprement dite, sans tympans.

112. Appareils de décintrement. — Pour décintrer la voûte, il faut abaisser le cintre. Autrefois on se contentait de ruiner à la hache les poteaux de support au niveau des naissances. Mais le cintre, privé successivement de ses appuis, s'affaissait irrégulièrement et par à-coups. Certaines portions de la voûte reposaient encore sur lui, alors que d'autres avaient déjà été brusquement séparées des couchis. Cette opération brutale et barbare a donné des mécomptes sérieux : ouvertures de joints, fissures parallèles aux têtes, épauffrements des pierres, déformation de l'intrados, et même chute des arches. On a recours aujourd'hui à des méthodes moins scabreuses.

On a réalisé une première amélioration en séparant de ses appuis la charpente du cintre, et intercalant entre les supports fixes et les pièces maîtresses du cintre qui viennent prendre appui sur eux, des potelets de faible longueur, placés d'habitude entre deux étages de moises horizontales, dont l'un, inférieur,



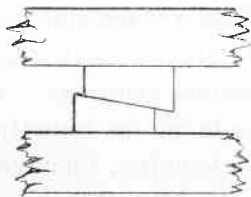
relie les sommets des pieux, et l'autre, supérieur, forme la base du cintre proprement dit. Après l'achèvement de la voûte, on ruine les potelets à la coignée ou à la scie, en les coupant en sifflet. Pour que l'opération s'effectue avec régularité et sans secousse,

on pratique une première entaille sur tous les potelets sans exception, puis on passe à la seconde entaille, etc., de façon à les affaiblir tous en même temps dans la même mesure. La rupture du premier d'entre eux, dont la pointe s'écrase, entraîne presque infailliblement la rupture simultanée de tous les autres, sous le surcroît de charge que chacun d'eux reçoit brusquement par suite de l'affaissement de son voisin. Toutefois un défaut d'attention ou d'habileté des ouvriers peut encore entraîner un échec, si au dernier moment certains potelets ont encore conservé une résistance très supérieure à la charge portée par eux, et l'on retombe sur l'inconvénient signalé plus haut. D'autre part, même si l'opération est bien conduite, l'abaissement du cintre s'opère au dernier moment d'une façon brusque et soudaine ; les couchis se séparent instantanément de la voûte, qui, abandonnée à elle-même, tasse avec une

vitesse appréciable, donnant lieu à une augmentation sensible dans le travail de la maçonnerie.

On veut, aujourd'hui, non seulement que le décintrement s'effectue avec lenteur, et que la pression de la voûte sur les couchis aille en diminuant régulièrement et graduellement jusqu'à zéro, mais encore qu'on puisse, à un moment quelconque de la manœuvre, arrêter le mouvement de descente du cintre, si l'on constate l'apparition de fissures dans le corps de la voûte et que l'on juge prudent de renforcer ou de consolider la maçonnerie. On a donc recours à des appareils de décintrement permettant de faire subir au cintre, à des intervalles de temps que l'on puisse fixer à volonté, une série de descentes partielles successives, correspondant chacune à un déplacement égal et simultané de tous les appuis, déplacement dont on peut arbitrairement régler l'amplitude, toujours très faible : quelques millimètres tout au plus au début de l'opération.

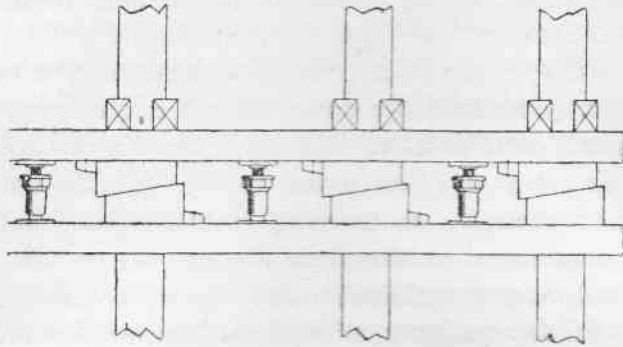
Coins. — On a fait tout d'abord usage de doubles coins que l'on plaçait auprès de chaque potelet de support du cintre et que l'on serrait tout d'abord pour dégager ce potelet. Après que tous les potelets avaient été enlevés à la main, ou brisés à la hache, s'il était impossible de les dégager complètement, la charpente reposait sur les coins. On chassait alors ceux-ci à coup de masse pour réduire leur hauteur et faire descendre le cintre.



Ce procédé n'est ni précis ni sûr : un trop faible coup de masse ne produit aucun effet, le frottement mutuel des deux coins superposés les empêchant de glisser l'un sur l'autre ; par contre, un coup trop fort peut faire sauter le coin et supprimer immédiatement l'appui. Il arrive, d'autre part, que les fibres des coins, coupées obliquement, se pénètrent par l'effet de la pression, et qu'il devient impossible de les faire glisser l'un sur l'autre ; ils n'offrent plus alors aucune supériorité sur les potelets, puisqu'on est obligé de les ruiner à la hache ou à la scie.

Vérins. — M. Dupuit a imaginé de placer, après l'achèvement de la voûte, un vérin à vis auprès de chaque potelet ou coin de

support. On relève d'abord simultanément tous ces vérins, de façon à leur faire porter le cintre et à dégager les potelets, qu'on enlève ou qu'on détruit. Puis on fait descendre graduellement toutes les vis en faisant tourner à la fois toutes les barres de manœuvre d'une fraction déterminée de circonférence. On obtient de la sorte pour tous les appuis



le même déplacement vertical à chaque phase de l'opération. On sépare deux manœuvres successives par l'intervalle de temps nécessaire pour vérifier que la voûte se comporte bien.

Les vérins, qui permettent de faire descendre le cintre avec la lenteur et la régularité désirables, présentent de plus un second avantage : ils donnent la faculté de relever la charpente et de remettre la voûte sur cintre, si, pour un motif quelconque, on juge convenable d'ajourner l'opération.

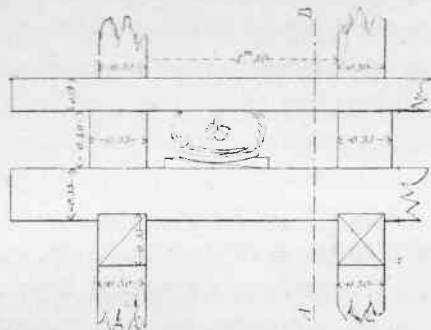
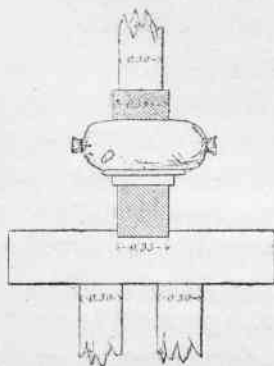
M. *Picard* s'est servi de vérins pour exhausser l'arche du pont de la station de *Frouard* qui, à la suite d'un relèvement du plan d'eau du canal qu'elle franchit, n'avait plus la hauteur libre sous clef exigée par le gabarit de la navigation. La voûte, en arc de cercle de 10 mètres de portée et 1^m,30 de flèche, a été mise sur cintre. On a coupé la maçonnerie aux naissances et on a monté le cintre avec des vérins à la hauteur voulue, en le calant au fur et à mesure du déplacement à l'aide de coins superposés. L'opération a fort bien réussi, et la maçonnerie n'a éprouvé que de légères avaries, consistant en des fissures qu'on a remplies après coup avec un coulis de ciment. La dépense a été bien inférieure à celle qu'eût exigée la reconstruction de la voûte.

Sacs de sable. — A l'époque où M. *Dupuit* faisait pour la pre-

mière fois emploi de vérins au décintrement des *Ponts-de-Cé* sur la Loire, près d'Angers, M. *Beaudemoulin* imaginait de son côté, pour le pont de *Port-de-Piles*, également sur la Loire, le procédé des sacs de sable. On place un sac de sable à côté de chaque potelet de support; on le serre contre les traverses inférieure et supérieure à l'aide de coins en chêne chassés à la masse, de façon à lui faire porter toute la charge, puis on dégage le potelet en le coupant à la hache. Pour décintrer, on fait sortir le sable par un ajutage en toile servant d'exutoire au sac, en ayant soin de retirer simultanément à chaque manœuvre la même quantité de sable de tous les sacs, de façon que la descente du cintre s'opère régulièrement.

Boîtes à sable. — Le procédé de M. *Beaudemoulin* a été perfectionné par M. *de Sazilly*, qui a logé le sable dans un cylindre creux en tôle, où pénètre à frottement doux un piston en chêne. Quatre petits orifices, ménagés à la base du cylindre, servent à faire écouler le sable, qui forme à la sortie de chacun un cône de déjection. Dès que ce cône masque l'orifice, l'écoulement du sable s'arrête. Il n'y a pas besoin ici de vérifier que les quantités de sable extraites des cylindres sont les mêmes pour tous les appuis : le phénomène d'arrêt produit par le cône suffit pour assurer au-

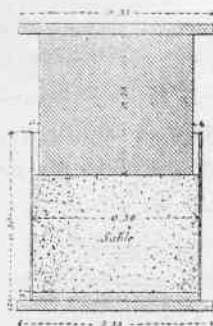
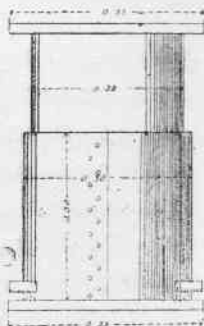
Coupe suivant AB



Détail des boîtes en tôle servant au décintrement

Elevation

Coupe sur l'axe



lomaliquement la régularité de l'opération. Quand on veut reprendre le mouvement de descente, il suffit d'enlever à la main le sable déjà extrait : la sortie du sable recommence spontanément jusqu'à formation d'un nouveau cône, etc.

Il faut que le sable soit parfaitement sec. S'il était humide, sa cohésion ne lui permettrait pas de couler : il faudrait le retirer avec une tringle, et il deviendrait difficile de réaliser pour tous les appuis l'uniformité d'abaissement. Aussi a-t-on la précaution de torréfier ce sable avant d'en remplir le cylindre.

Au lieu de faire supporter le cintre par des potelets ou des coins pendant la construction de la voûte, comme nous l'avons vu faire avec les sacs de sable et les vérins, il paraît souvent préférable d'employer les boîtes à sable comme supports dès le début du montage de la charpente. De cette façon on évite l'opération, toujours difficile et dangereuse, du remplacement des potelets par les appareils de décintrement : manœuvre qui peut donner lieu à des mouvements irréguliers du cintre. Mais il faut alors prendre des précautions particulières pour protéger le sable contre l'humidité, pendant que l'on maçonne la voûte (eau de pluie, eau de lavage des pierres, crues de la rivière, etc.). Dans ce but, on ferme hermétiquement l'intervalle compris entre le piston et le cylindre au moyen de plâtre et d'étoupes graisseuses. M. *Séjourné* a fait emploi d'un second cylindre enveloppant le premier et séparé de lui par un vide annulaire de 7 centimètres rempli de plâtre. Dans ces conditions, l'appareil peut être plongé dans l'eau sans que l'humidité pénètre jusqu'au sable, et il n'y a à craindre aucun trouble dans son fonctionnement au moment où l'on procède à la descente du cintre.

Les cylindres à sable sont, aujourd'hui, universellement employés, préférablement aux vérins, d'un emploi moins commode et moins pratique, et qui exigent le montage du cintre sur potelets ou coins. Le seul avantage des vérins consiste dans la possibilité qu'ils donnent de relever le cintre : mais, en fait, une opération de ce genre ne s'effectue jamais. D'ailleurs, si l'on jugeait à propos d'envisager telle éventualité où cette mesure serait justifiée, il n'en serait pas moins préférable de conserver les boîtes à sable pour le décintrement ;

mais, par mesure de prudence, on approvisionnerait sur le chantier les vérins nécessaires pour opérer le relèvement du cintre, s'il en était besoin.

113. Tassements du cintre et de la voûte. — Pour les grands ouvrages, on limite à quelques millimètres l'amplitude de chaque descente partielle, au début du décintrement. Puis, on active la manœuvre dès que les couchis tendent visiblement à se séparer de la douelle, et que la voûte, ne reposant presque plus sur le cintre, a pris à peu de chose près sa position définitive d'équilibre. Il convient de remarquer que le déplacement vertical nécessaire pour séparer les couchis de la voûte est la somme du tassement de celle-ci et du relèvement vertical du cintre, charpente élastique qui, après s'être affaissée sous la charge pendant qu'on exécutait la maçonnerie, se redresse dès qu'elle cesse d'être pressée. Le tassement proprement dit de la voûte n'est donc qu'une fraction, parfois insignifiante, du déplacement vertical des appuis du cintre. On ne peut mesurer ce tassement de la voûte qu'à l'aide de repères établis avant l'opération sur les culées et sur différents voussoirs du bandeau, et notamment celui de clef.

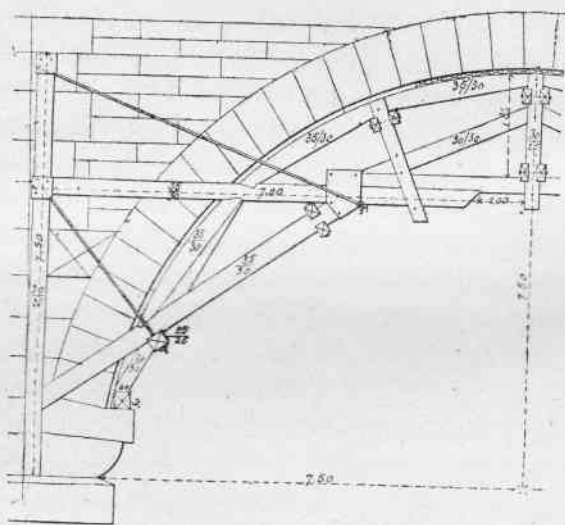
L'importance du tassement dépend, à la fois, de la nature des matériaux employés, du soin avec lequel ils ont été mis en œuvre, des profils d'intrados et d'extrados, de la charge portée par la voûte, de la rigidité des culées ; puis de la dureté du mortier au moment où l'on décintre, et aussi de la raideur du cintre : si celui-ci a subi une déformation considérable pendant l'exécution de la voûte, on doit prévoir que la maçonnerie aura éprouvé, de ce chef, des détériorations dont la conséquence sera une augmentation du tassement (pont de *Neuilly* déjà cité).

Il paraît donc difficile de calculer à l'avance par une formule le résultat à attendre de ces diverses causes agissant simultanément ⁽¹⁾. En pareille matière, il faut baser ses prévisions

(1) Nous pourrions bien ici énoncer la formule donnant pour un arc l'abaissement à la clef, en fonction du coefficient d'élasticité de la matière, des dimensions de l'arc et de la charge qu'il porte. Mais nous nous en abstenons parce que, en vertu des raisons données plus haut, les prévisions basées sur un pareil calcul n'auraient, suivant toute probabilité, aucun rapport avec le résultat final du décintrement.

sur les renseignements fournis par des ouvrages de forme semblable et de dimensions analogues. Les traités de construction de ponts et les monographies publiées dans les journaux techniques donnent sur cette question des indications utiles à recueillir. Nous en dirons autant de la déformation élastique du cintre, qui peut difficilement être calculée avec exactitude, et dont il faut pourtant tenir compte, puisqu'elle se répercute sur la surface de douelle.

114. Systèmes divers de montage des voûtes. — On a parfois employé des cintres suspendus, qui prenaient leurs appuis sur des câbles, des chaînes ou des tirants métalliques ancrés dans les maçonneries des piles ou culées (pont en arcs de fonte d'*El Kantara*, à Constantine). On trouve, dans le cintre



Aqueduc de Roquetavouir.

retroussé de l'aqueduc de *Roquetavouir*, un exemple de tirants en fer renforçant la charpente et augmentant sa rigidité. De pareilles dispositions peuvent être justifiées pour de petites voûtes placées à une grande hauteur (viaducs), parce qu'elles fournissent au besoin un cintre léger, n'exigeant pas d'appuis intermédiaires entre ceux des naissances, facile à monter et néanmoins solide et peu déformable.

On a quelquefois occasion d'employer des cintres en terre,

et de monter les voûtes sur *pâtés*. Les terrains de remblai ne sont guère propres à cet usage : le cintre ne peut se maintenir et garder sa forme que s'il est en terre un peu argileuse, et, par suite, de nature compressible ; or, on aura beau pilonner un remblai de ce genre, on n'arrivera pas à lui donner la consistance voulue pour qu'il ne s'affaisse pas sous le poids de la maçonnerie. Quand, au contraire, on peut tailler le cintre dans le sol naturel, le résultat est très satisfaisant : voûtes de fondation, voûtes de tunnel exécutées à ciel ouvert, etc. Nous citerons, à ce propos, l'exemple des tunnels du chemin de fer de la place Médicis à la gare de Sceaux, à Paris, où l'on a exécuté avec succès sur pâtés des voûtes ayant jusqu'à 20 mètres d'ouverture. Pour assurer plus de régularité et plus de résistance superficielle à la surface cylindrique de déblai, et éviter que la terre ne se délayât et ne se mélangeât au mortier de la maçonnerie, on avait pris le parti de masquer cette surface par un enduit en plâtre qui a donné de bons résultats.

Les anciens constructeurs, peu experts en fait de charpente, ont employé pour leurs voûtes de ponts des cintres en pierres sèches, ou des cintres reposant sur des supports en maçonnerie, qu'on élevait dans le lit de la rivière à franchir. Il fallait, bien entendu, que le fond de ce lit fût en terrain incompressible, rocher, sable ou gravier, ce qui était presque toujours le cas, car on ne se risquait guère autrefois à bâtir en terrain compressible, ou, du moins, les tentatives de ce genre n'ont pas réussi souvent, car les anciens ne nous ont laissé que bien peu de ponts établis dans ces conditions. Les cintres portés par des piles en maçonnerie étaient généralement économiques, très solides et très rigides : mais ils avaient le défaut grave d'être affouillés et détruits par les moindres crues, et on a renoncé à une pratique qui n'assurait pas suffisamment la sécurité, puisque la voûte sur cintre était toujours en danger d'être emportée, pour peu que le niveau des eaux vînt à s'élever.

115. Voûtes exécutées sans cintres. — On peut construire sans cintre une voûte, en la formant d'une série d'anneaux successifs accolés les uns aux autres, ce qui revient à adopter des plans d'assises parallèles aux têtes, la division en voussoirs

s'effectuant suivant les joints discontinus, dans la direction des génératrices d'intrados.

On exécute séparément et successivement tous les anneaux : les voussoirs de chacun d'eux sont appliqués, avec interposition d'une couche de mortier, contre l'anneau précédent déjà clavé, et on le maintient en place jusqu'à ce que le mortier ait suffisamment durci pour que sa cohésion puisse faire équilibre au poids de la pierre. L'opération réussit mieux si les joints d'assises, au lieu d'être verticaux, sont des plans obliques présentant un fruit notable, ou des surfaces coniques, auquel cas le frottement du voussoir, que l'on vient de mettre en place, sur la surface qui le porte suffit pour empêcher son glissement avant même que le mortier ait fait prise (Voir sur cette question l'article publié par M. Choisy dans les *Annales des Ponts et Chaussées*, 1876, 2^e semestre).

Un pareil procédé d'exécution est évidemment inadmissible pour une arche de pont, en raison de l'orientation irrationnelle attribuée aux joints d'assises : l'appareil est défectueux, ce qui nuit considérablement à la stabilité.

Peut-être, toutefois, ce procédé permettrait-il, le cas échéant, d'établir un cintre en briques destiné à porter la voûte pendant sa construction, si l'on suppose que l'on n'a pu trouver dans la contrée les bois nécessaires à la confection d'un cintre en charpente.

116. Entretien des ponts en maçonnerie. — Nous avons déjà parlé de la surveillance à exercer sur les fondations des ponts, et des travaux à effectuer éventuellement pour les entretenir, réparer leurs avaries, remédier aux affaissements, aux dislocations, etc. Nous ne reviendrons pas sur ce sujet.

Chapes. — Toutes les fois que des suintements à travers la voûte signalent une détériorisation de la chape, il convient de découvrir les parties avariées et de procéder à un travail de réparation ou de réfection partielle, au sujet duquel nous n'avons aucune remarque spéciale à faire, qu'il s'agisse d'un enduit d'asphalte, de ciment, ou de mortier de chaux.

Joints dégradés ou rompus. Fissures dans les maçonneries. — On rejointoie les joints dégradés. Mais cette réparation su-

perficielle ne donne aucun résultat durable s'il s'agit d'une fracture profonde pénétrant dans la maçonnerie. Le placage en mortier qui ferme l'entrée de la fissure se brise toujours peu après sa confection, par l'effet des changements de température, des vibrations sous le passage des charges roulantes, etc., etc. On se retrouve bientôt dans la même situation qu'avant. Si la maçonnerie est brisée sur une portion notable de son épaisseur, il faut recourir à un coulis de ciment, qui pénètre jusqu'au fond de la lézarde, et, la remplissant toute entière, rétablit la continuité du massif.

Nous citerons l'exemple d'un pont, établi à *Nantes* sur la rivière d'Erdre, dont presque tous les joints de voûte s'étaient ouverts sur toute leur profondeur à la suite d'un recul notable des culées, constituées par des murs de quai dont les fondations étaient insuffisantes. Ce recul était signalé de façon irrécusable par un affaissement très sensible de la clef, qui représentait environ $\frac{1}{10}$ de la montée. Le mortier des joints brisés s'était désagrégé et avait en partie disparu, si bien que les joints étaient à demi vides et à demi pleins de débris sans consistance. On se trouvait, en définitive, avoir affaire à une voûte quasi en pierres sèches, qui menaçait ruine. Avant de se résoudre à la reconstruction complète de l'arche, qui, *a priori*, paraissait être une mesure inévitable, on a tenté de boucher toutes les fissures avec un coulis de ciment. Après avoir fermé les joints des parements avec du plâtre, on a pratiqué, à partir de l'extrados, des trous de sonde par lesquels on a injecté d'abord de l'eau pour chasser les débris de mortier et nettoyer les faces des pierres, puis un coulis de ciment très liquide. Le succès a été complet : les joints ont été complètement remplis et la continuité de la maçonnerie rétablie dans toutes les parties. Cinq ans après, on n'avait constaté la réapparition d'aucune fissure, et la voûte offrait l'aspect d'un monolithe.

Dans les ponts de grande ouverture, on observe très fréquemment aux joints de rupture et dans les tympans, parfois à la clef mais plus rarement, des fissures de dilatation qui, résultant des changements de température, se ferment en été et s'ouvrent en hiver. Il est inutile de les masquer par un rejoint-

toiemment superficiel qui n'aurait pas de durée. On aurait également tort de vouloir les remplir d'un coulis de ciment, parce que ces fractures, dues à une cause physique qu'on ne peut empêcher d'agir, réapparaîtraient nécessairement dans l'année, soit à leur emplacement primitif, soit plus probablement à côté, l'adhérence sur la pierre et la cohésion propre du coulis de ciment étant, d'habitude, plus grande que celles des joints de mortier voisins.

En pareil cas, il n'y a rien à faire, à condition, bien entendu, que les fissures soient étroites et ne paraissent pas s'élargir avec les années, et que le mortier des joints brisés ne présente pas de traces de désagrégation ; dans ce dernier cas, il conviendrait de le remplacer ou de le raffermir par un coulis, sans espérer toutefois que la fracture ne dût pas réapparaître plus tard.

Entretien des parements. — Le nettoyage des parements vus, lorsqu'ils sont souillés par la poussière et les dépôts de chaux dus aux infiltrations qui appauvrissent le mortier, est affaire de propreté. Toutefois ce peut être une mesure utile au point de vue de la conservation de l'ouvrage, lorsque celui-ci est bâti en pierres calcaires à texture lâche, exposées à des exhalaisons acides ou à la fumée de houille (ponts sur rails, ponts sur rivières navigables fréquentées par les bateaux à vapeur). La fumée dépose sur la pierre de l'acide sulfureux qui, se transformant à l'air en acide sulfurique, attaque et ronge le carbonate de chaux. La couche de poussière et de détritits qui recouvre le parement constitue une sorte d'éponge retenant la solution acide, et facilitant, par l'humidité qu'elle absorbe pendant les temps pluvieux, l'oxydation de l'acide sulfureux. En faisant disparaître ce dépôt, on entrave ou tout au moins on retarde la corrosion de la pierre.

Quand les parements sont épaufrés, dégradés ou rongés par les intempéries (pierres gélives) ou par l'action de la fumée, on rétablit leur intégrité par des placages en ciment à prise rapide ou de préférence à prise lente, après avoir gratté, nettoyé et lavé la pierre pour obtenir une adhérence convenable. Avec un parement en béton, il n'y a pas de précautions spéciales à prendre. Mais sur un parement en moellons, et surtout sur un parement en pierres de taille, on doit se garder de faire des

placages de trop grande étendue : exposés directement à l'influence des changements de température, ces placages subiraient des phénomènes de dilatation et de contraction en discordance avec ceux du noyau intérieur. On en a vu se briser et être divisés par des fissures, qui s'élargissaient avec le temps par désagrégation de leurs bords. Le plus souvent ils se séparent de la maçonnerie : on s'en aperçoit aisément soit par la déformation subie par les parements, qui se voilent et font ventre, soit par la sonorité du bruit produit par le choc d'un marteau. La plaquette de ciment, n'étant plus adhérente à la maçonnerie, s'effondre un beau jour, et le travail est à refaire.

On aura donc, en pareil cas, la précaution de faire un placage isolé sur chaque pierre, en interrompant la couche de ciment au droit des joints. Pratiquement, l'opération est des plus simples. Il suffit de masquer les joints par des lattes en bois qu'on enlève après que le ciment a fait prise. Après quoi, on remplit les joints ainsi ménagés dans l'enduit avec un mortier pauvre en ciment, ou mieux en chaux hydraulique et par suite moins cohérent : les ruptures, s'il s'en produit sous l'influence des changements de température ou des vibrations, se localisent dans les joints, et, vu leur multiplicité, ne donnent lieu qu'à des fissures imperceptibles. Le parement artificiel se conserve indéfiniment sans avarie apparente.

Pour la réparation des parements en pierre de taille, on a à Paris substitué avec succès au ciment à prise rapide ou à prise lente, dont l'adhérence sur la maçonnerie laisse parfois à désirer, un ciment spécial, obtenu par un mélange d'acide chlorhydrique, de rognures de zinc et de calamine grillée. On colore ce ciment métallique avec du noir de fumée, de la pierre pulvérisée ou de l'ocre rouge, si on juge à propos de lui donner un ton se rapprochant de celui de la maçonnerie à réparer. On ajoute à la dissolution d'acide chlorhydrique du sel ammoniac pour rendre la pâte alcaline, le chlorhydrate d'ammoniaque étant décomposé par l'oxyde de zinc, avec dégagement d'ammoniaque.

L'oxychlorure de zinc ainsi préparé présente une grande plasticité, qui le rend d'un emploi facile. Il adhère parfaite-

ment à la pierre, et acquiert avec le temps beaucoup de cohésion et de dureté. Il résiste beaucoup mieux que les mortiers ordinaires à l'action des intempéries, et les fumées acides ne l'attaquent pas.

Ce ciment a été utilisé pour la réparation de la *Colonnade du Louvre*, dont les colonnes étaient profondément rongées par la pluie et la gelée. Les têtes des mascarons du *Pont-Neuf*, en pierre semi-dure dont les surfaces avaient été corrodées, ont été ramenées par le même procédé à leur forme primitive; certains de ces mascarons, rompus par la gelée en fragments qui tombaient dans la Seine, ont pu être reconstitués et rétablis dans leur intégrité. On a même jugé à propos de badigeonner d'un coulis d'oxychlorure de zinc les portions de ces têtes qui n'avaient pas besoin d'être rechargées et ne réclamaient qu'un simple nettoyage. Le résultat paraît avoir été satisfaisant, au double point de vue de la conservation des surfaces et de l'aspect de l'ouvrage. La teinte du ciment métallique, préparé *ad hoc* avec des éléments convenables, se confond pour le spectateur avec la couleur de la pierre sur laquelle on a travaillé. La même précaution n'a pas été prise pour les parapets du Pont-Neuf, où l'on distingue aisément les reprises en ciment métallique (1).

(1) M. Grimaud, Conducteur des Ponts et Chaussées, a publié dans la *Revue Pratique des Travaux Publics* (décembre 1894) une notice dont nous extrayons les renseignements suivants, relatifs à la composition de divers ciments employés pour les ponts de Paris.

Mélange en poudre

Oxyde de zinc	20kg	10kg	10kg	5kg	10kg
Pierre calcaire écrasée	20	20	30	10	»
Grès pulvérisé	10	5	10	»	»
Plâtre	»	»	»	10	»
Silex pulvérisé	»	»	»	»	15
Ocre jaune ou rouge	1	0,4	0,3	0,5	»
Noir de fumée	»	»	»	»	»

Liquide de gachage

Acide chlorhydrique (22° Baumé) : 10 litres; zinc : 2 kilogs.
 Sel ammoniac : 0kg,5; eau : 5 à 10 litres.
