

LE PONT CANDELIER

PONT-RAIL EN BÉTON ARMÉ SUR LA SAMBRE

Arc de 64 mètres de portée sous la ligne de Paris-Berlin

Par **M. R. GODFERNAUX,**

INGÉNIEUR DES ARTS ET MANUFACTURES.

L'emploi du béton armé pour la construction des ponts-rails n'est pas entièrement nouveau, il a été limité toutefois jusqu'à ces derniers temps soit aux voies ferrées d'intérêt local, soit à des portées relativement restreintes et n'excédant pas en général une vingtaine de mètres.

Au contraire, pour les voies ferrées d'intérêt général à grand trafic, les Compagnies de Chemin de fer montrant une grande prudence, conseillée par la gravité des conséquences d'une mise hors de service imprévue, hésitent encore devant l'emploi du béton armé pour la réalisation des ouvrages de grande portée. Ce matériau pourrait cependant bien souvent leur fournir une solution élégante et plus économique et les débarrasser des lourdes sujétions d'entretien que leur imposent les ponts métalliques.

Aussi y a-t-il lieu d'applaudir l'initiative de M. Candelier, Ingénieur des Ponts et Chaussées, ancien Ingénieur en Chef des études de la Voie de la Compagnie du Nord, qui a abordé résolument ce problème par la construction, sur l'artère principale du Nord-belge, de voûtes de 64 m de portée, surbaissées au $1/10^e$ qui égalent en hardiesse les ponts-routes les plus audacieux.

La conception de l'ouvrage remonte à 1914 ; dès cette époque MM. Limousin et C^{ie} avaient arrêté, d'accord avec la Compagnie du Chemin de fer du Nord, les grandes lignes du projet qui a été exécuté par eux depuis la guerre. — Cet ouvrage est actuellement en service depuis plus de deux ans, et les résultats de ce premier essai étant particulièrement satisfaisants, nous croyons intéressant d'en donner une description sommaire tout en renvoyant pour le détail à la notice de M. Freyssinet, auteur du projet, parue dans les *Annales des Ponts et Chaussées* de 1923, Tome 2.

L'ouvrage franchit la Sambre, sous un biais très prononcé un peu supérieur à 45^o . On a préféré à une voûte biaise, deux voûtes droites de faible largeur portant chacune une voie et décalées de 4 m 50 l'une par rapport à l'autre. La portée réelle des voûtes dépasse dans ces conditions leur portée utile de 3 m 50 environ, mais on a estimé qu'une voûte droite de 64 m de portée était d'une exécution plus simple et plus économique qu'une voûte biaise de 60 m 50.

Les énormes moments de flexion résultant de la portée de 64 m et des fortes surcharges envisagées exigeaient des moments d'inertie très importants et, par suite, de grandes épaisseurs, d'autant qu'en raison du fort biais de la traversée il fallait réduire au minimum la largeur

des arcs. D'autre part, la hauteur disponible entre le gabarit à réserver pour la navigation et le halage et le niveau du rail impérativement déterminé limitait la flèche de l'intrados aux environs de 6 m, et commandait de réduire au minimum les épaisseurs de l'arc.

On a réussi à donner satisfaction à ces exigences contradictoires par l'emploi d'un arc de forme spéciale qui résulte de la liaison par des cloisons longitudinales pleines, convenablement armées, d'un hourdis en béton épousant la forme de l'intrados et du tablier supportant la voie. On obtient ainsi, avec une grande économie de matière, des moments d'inertie considérables aux reins.

Ces dispositions étaient complétées par un blocage en béton massif de tout l'espace compris entre le tablier et l'intrados sur quelques mètres à partir de chaque culée. Le poids de ces massifs provoque une courbure très sensible de la courbe des pressions sans augmenter sensiblement la poussée totale. En rapprochant de la verticale la direction de la réaction finale il permet d'abaisser les points d'appui et de réduire la longueur des culées. L'emploi des poids morts élevés offre également, dans le cas présent, le grand intérêt de réduire l'étendue des changements de direction ou de sens des efforts au passage des surcharges et de diminuer l'importance des vibrations toujours à redouter dans un ouvrage en béton armé. Les essais ont d'ailleurs démontré que ce résultat avait été obtenu dans le cas présent d'une manière tout à fait satisfaisante.

En raison de sa grande raideur qui le rend particulièrement sensible aux effets du retrait, des changements de température, et du moindre déplacement des appuis, un ouvrage de ce type doit être articulé, mais on avait le choix entre l'arc à deux ou à trois articulations. On s'est arrêté à la première solution qui présente une garantie de sécurité plus grande d'autant que par un ingénieux procédé de décintrement M. Freyssinet est arrivé à éliminer le principal inconvénient de ce type d'arc hyperstatique et par suite plus sensible aux variations linéaires dues au retrait, aux changements de température et au raccourcissement élastique.

Les articulations sont d'un type spécial qui dérive directement du système classique de deux surfaces cylindriques de rayon de courbure peu différents roulant l'une sur l'autre. L'ouvrage proprement dit est séparé de la culée par un joint de deux centimètres d'épaisseur qui ne laisse subsister au droit de la retombée de la voûte, qu'une surface d'appui en béton de 0 m 40 de hauteur s'étendant sur toute la largeur de l'ouvrage.

Le béton de la voûte et de la culée au voisinage immédiat de l'articulation, est muni d'une forte armature transversale destinée à combattre les efforts d'extension développés dans le béton par le poinçonnage mutuel des deux demi-articulations. On aurait pu croire que de légères fissures se produiraient dans la petite zone sans armature de 2 cm d'épaisseur formant liaison entre la culée et la voûte, et qu'il serait ainsi créé deux surfaces de roulement capables de se développer exactement l'une sur l'autre. La réalité est sensiblement différente, l'articulation joue sans qu'aucune fissure se produise même sous des angles de $\frac{1}{300}$ et des charges dépassant 250 kg par cm^2 de la section rétrécie. De telles articulations imaginées par M. Freyssinet et appliquées par lui depuis 1909 à un certain nombre de grands ouvrages peuvent transmettre des pressions de plusieurs milliers de tonnes par mètre linéaire d'axe d'articulations.

Dans le pont Candelier, la poussée maxima est de 2.300 t et la largeur du tablier est de 3 m 45, la pression transmise est donc de 665 t par mètre courant d'articulation et la charge par centimètre carré de la section rétrécie, de 165 kg environ.

Les culées sont fondées sur une dalle en béton de 4 m de hauteur dont la base est à 6 m au-dessous du niveau des articulations et le dessus vers le niveau normal de la Sambre.

Du côté Erquelines, cette dalle repose sur un fonds de gravier et les fondations ont dû être faites à l'abri d'un rideau de palplanches métalliques. Du côté de Charleroi, la culée prend appui vers l'arrière sur du rocher calcaire compact ; on a simplement décapé le rocher contre lequel on est venu bloquer la dalle en béton.

Entre l'extrémité des tympanes et le parement intérieur des culées, on a maintenu un joint de dilatation de 5 *cm*.

Ainsi que nous l'avons précédemment indiqué, le tablier est formé par la partie supérieure de la voûte. La largeur de chaque voûte est de 3 *m* 50, mais cette largeur est augmentée pour chaque tablier par deux parties en encorbellement l'une de faible largeur du côté commun aux deux tabliers, jusqu'à un joint de 0 *m* 04 séparant ceux-ci, l'autre du côté extérieur, plus large formant trottoir en porte à faux et recevant le parapet.

Le parapet en béton armé a été coulé par éléments séparés qui ont été mis en place après coup. Comme il ne restait entre parapets qu'une largeur de 4 *m* 10 pour chaque voie, un refuge en console a été établi à la clé de chaque côté de l'ouvrage.

L'écoulement des eaux est assuré de la manière suivante : La face supérieure du tablier a reçu une inclinaison de 0 *m* 003 dans le sens longitudinal, elle est revêtue d'un enduit de ciment goudronné à chaud de 0 *m* 02 d'épaisseur auquel on a donné une double pente transversale dont la partie inférieure forme caniveau. Un certain nombre de crépines en fonte traversent le tablier le long de ce caniveau et évacuent les eaux dans une canalisation située à l'intérieur de l'ouvrage. D'autre part, à chaque extrémité, le tablier se prolonge par un élément en ciment armé formant gargouille et allant en porte à faux par dessus le joint de dilatation.

Pour la voie, on a adopté le système de la pose sur ballast qui est de beaucoup le plus commode au point de vue de l'entretien. Mais comme l'emploi d'un profil normal de ballastage aurait imposé d'inutiles sujétions pour l'établissement du tablier, on a accepté une traverse raccourcie de 2 *m* 20 de longueur totale qui se trouve calée entre les trottoirs surélevés de 0 *m* 40. L'épaisseur minimum du ballast sous cette traverse est de 0 *m* 25 dans la région de clé.

Le dosage employé pour l'exécution du béton des arcs est de 350 *kg* de ciment par mètre cube de béton fini, pour les maçonneries des culées qui ne contenaient pas d'armatures ce dosage a été réduit à 200 *kg* avec augmentation progressive au voisinage des articulations. Les masses d'articulation armées transversalement sont au dosage de 800 *kg*.

Pour obtenir le béton, on n'ajoutait au ciment que le résidu, exempt de tout criblage, du concassage du déblai rocheux de l'ouvrage et de ses abords. Le béton obtenu dans ces conditions au dosage de 350 *kg* offrait une résistance d'environ 200 *kg* à 28 jours et 300 *kg* à 90 jours.

Les deux arcs ont été exécutés successivement avec le même cintre qui avait été installé de manière à être transporté facilement sans être démonté

En réalité, cette manière de procéder n'a pas retardé notablement la mise en service de l'ouvrage, puisque le premier arc ayant été décentré le 15 Août, il a suffi de deux mois pour déplacer le cintre et couler le deuxième arc qui a été décentré le 15 Novembre.

Ces décentrement ont été opérés par un procédé spécial particulièrement intéressant. Aucun organe n'avait été disposé dans le cintre pour permettre son abaissement, mais on avait réservé, dans la section de clé, au droit d'un joint sans épaisseur qui est plein dans cette région sur une longueur de 1 *m* 20, un logement pour une batterie de 8 vérins hydrauliques agissant horizontalement et tendant à écarter l'une de l'autre les deux demi-voûtes et à les soulever au-dessus du cintre. On provoque ainsi tout d'abord une ouverture progressive du joint sans soulèvement au-dessus du cintre ; cette ouverture atteint 12 *mm* environ lorsque la pression des vérins devient

égale à la poussée de la voûte qui résulterait d'un décintrement ordinaire et correspond au raccourcissement de la fibre moyenne de l'arc sous l'influence du retrait et de son poids propre. A partir de ce moment les deux demi-voûtes se soulèvent au-dessus du cintre et le soulèvement est à peu près proportionnel à la course des vérins, on a obtenu finalement une ouverture de 6 *cm* environ correspondant à un soulèvement de 12 *cm* environ à la clé.

Dans le joint ainsi ouvert à la clé au-dessus et au-dessous du logement des vérins, on a introduit une plaque de 4 *cm* d'épaisseur en mortier riche armé d'un double quadrillage d'armatures à mailles serrées et recouvert au dernier moment sur chaque face d'un enduit frais de pâte de ciment pur. On a ensuite vidé lentement les vérins ; le joint s'est refermé sur les plaques, l'écartement des faces se réduisant à 4 *cm* 5 environ, et le soulèvement au-dessus du cintre à 7 *cm* ce qui permettait un déplacement facile de celui-ci.

Par ce procédé on a réalisé, sans aucune déformation angulaire, un allongement artificiel de la fibre moyenne de l'arc de 45 *mm* environ égal à la somme calculée à l'avance :

1° du raccourcissement de l'arc par compression sous son propre poids augmenté de celui des charges permanentes soit 15 *mm* environ ;

2° du retrait du béton évalué à 3 *mm*.

Ce procédé de décintrement qui supprime les fatigues parasites dues au retrait et au raccourcissement élastique, offre de plus l'avantage que le dispositif de vérins employé peut à tout moment être remplacé pour recalibrer l'ouvrage dans le cas où un mouvement de culée ou un retrait supérieur aux prévisions rendraient ultérieurement nécessaire un nouveau réglage de la hauteur de la clé.

Les essais du pont ont été faits le 18 Décembre 1921 pour le premier arc et le 22 Janvier 1922 pour le deuxième, par les soins de la Compagnie du Chemin de fer du Nord. Les surcharges imposées étaient celles du règlement ministériel majorées de 40 %. Les essais ont été faits d'abord au poids mort, puis à des vitesses de 20 et de 40 *km* à l'heure.

Toutes les déformations observées ont été des déformations élastiques, l'ouvrage revenant à la position normale après le départ de la surcharge. Les maxima de ces déformations sont les suivantes :

$$\begin{aligned} \text{Flèche à la clé : } & \left\{ \begin{array}{l} 1^{\circ} \text{ Arc : } 4,2 \text{ mm;} \\ 2^{\circ} \text{ Arc : } 4,6 \text{ mm.} \end{array} \right. \\ \text{Déplacement latéral à la clé : } & \left\{ \begin{array}{l} 1,2 \text{ mm vers l'extérieur} \\ 0,3 \text{ mm vers l'intérieur} \end{array} \right. \\ \text{Déplacement longitudinal à la clé : } & 0,3 \text{ mm.} \end{aligned}$$

On voit que le pont Candelier est infiniment plus rigide qu'un ouvrage métallique de dimensions analogues.

La mise en service a eu lieu en Décembre 1921 pour le premier arc voie montante et en Janvier 1922 pour le deuxième arc voie descendante.

Ainsi que l'a fait remarquer M. Freyssinet, l'intérêt considérable du pont Candelier est que, pour la première fois, un problème, dont jusqu'alors la solution avait été invariablement demandée au métal, a été résolu par l'emploi de voûtes tendues en béton légèrement armé et comportant obligatoirement l'emploi de taux de compressions élevées.

On peut espérer que, mieux que tout ce qui pourra être dit et écrit, cet ouvrage constituera par sa durée une preuve permanente que le béton armé est apte à rendre les plus grands services pour les ouvrages sous rails et peut entrer victorieusement en concurrence avec les charpentes métalliques dans la plupart des cas considérés jusqu'à ce jour comme du domaine exclusif de cette dernière.