

LES PONTS EN MAÇONNERIE DU 19^E SIÈCLE

LE CAS D'OUVRAGES FERROVIAIRES DU MIDI TOULOUSAIN

Nathalie DOMÈDE

Université de Toulouse; UPS, INSA; LMDC (Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions);
135, avenue de Rangueil ; F-31 077 Toulouse Cedex 04, France.

1. INTRODUCTION

En France, les ponts en maçonnerie représentent 20% des ponts du réseau routier (SETRA, 2005), 43% des ponts du réseau ferré (SNCF, 2002). Les ponts en maçonnerie du réseau de chemin de fer français ont été construits sur une période d'une centaine d'année centrée vers 1870. On en compte aujourd'hui 18000 en service. La grande majorité, 82%, est en maçonnerie de pierre, 12% en maçonnerie de briques. Le reste représente quelques arcs en béton non armé, tel que le Pont de Villeneuve sur Lot construit entre 1914 et 1916 par Freyssinet, et annoncent l'âge du béton armé, et la fin de la maçonnerie.

Pendant une cinquantaine d'années, de 1920 à 1970, on s'intéressa peu aux ponts en maçonnerie. Mais, l'effondrement du pont Wilson franchissant la Loire à Tours, en avril 1978, fait prendre conscience, en France, de la nécessité d'apprendre à quantifier le niveau de sécurité de ces ouvrages (Delbecq et Michotey, 1981). Le SETRA entreprend alors la rédaction d'un dossier pilote et d'un programme informatique spécifique, VOUTE, commercialisé en 1982 (Delbecq, 1982). Des programmes similaires sont

développés à la même époque au Royaume Uni (Heymann, 1996 et Hugues, 1997). Par la suite, l'intérêt pour ces ponts-voûtes, faits de pierres et/ou de briques, s'est maintenu en Europe. Aujourd'hui, quelques programmes informatiques spécifiques existent (RING, ARCHIE, par exemple, et toujours VOUTE, bien qu'il ne soit plus commercialisé), mais, malgré les efforts de l'UIC (Orban, 2005), aucune méthode de calcul n'apporte totalement satisfaction. Les recherches sur la modélisation du comportement mécanique des ponts en maçonnerie se poursuivent. Mieux connaître la façon dont ils ont été conçus reste donc une problématique d'actualité.

Autour de Toulouse, la Compagnie des chemins de fer du Midi développa le réseau à partir de 1859, en concurrence avec la Compagnie du Paris-Orléans (Caron, 1999). Aujourd'hui, la direction toulousaine de RFF continue à entretenir 1300 ponts en maçonnerie construits par ces Compagnies. Ils semblent parfois bien différents des standards des autres régions françaises, ne serait-ce que par la prédominance de la brique au lieu de la pierre. Qu'en est-il vraiment ? C'est l'une des questions que nous nous sommes posées au démarrage de l'étude présentée ici.

Dans la mesure où le savoir faire est perdu, la connaissance des ponts voûtes en maçonnerie passe par une démarche historique complétée éventuellement d'une reconnaissance sur site. Cet article présente une recherche de ce type menée sur l'ensemble des ouvrages d'art en maçonnerie d'une ligne de chemin de fer du Tarn. Le but de cette étude, basée non pas sur UN ouvrage mais sur l'ensemble des ouvrages d'une ligne, fut d'établir une typologie des ponts en maçonnerie construits dans une zone géographique donnée (le département du Tarn et sa région), sur une période

ciblée (fin 19^e siècle). Cette étude a été une base de travail pour une autre recherche, expérimentale et mécanique cette fois, visant à construire un outil de calcul des ponts en maçonnerie. Cette recherche là se poursuit au LMDC à Toulouse.

La ligne retenue pour l'étude joignait Castelnau-d'Albret à Rodez via Albi. Entre Castres et Albi-Ranteil (à la sortie Sud d'Albi), la ligne n'est plus en service (Fig. 1).

Une piste cyclable et un chemin de grande randonnée ont remplacé les voies. Parce que la ligne est désaffectée, les

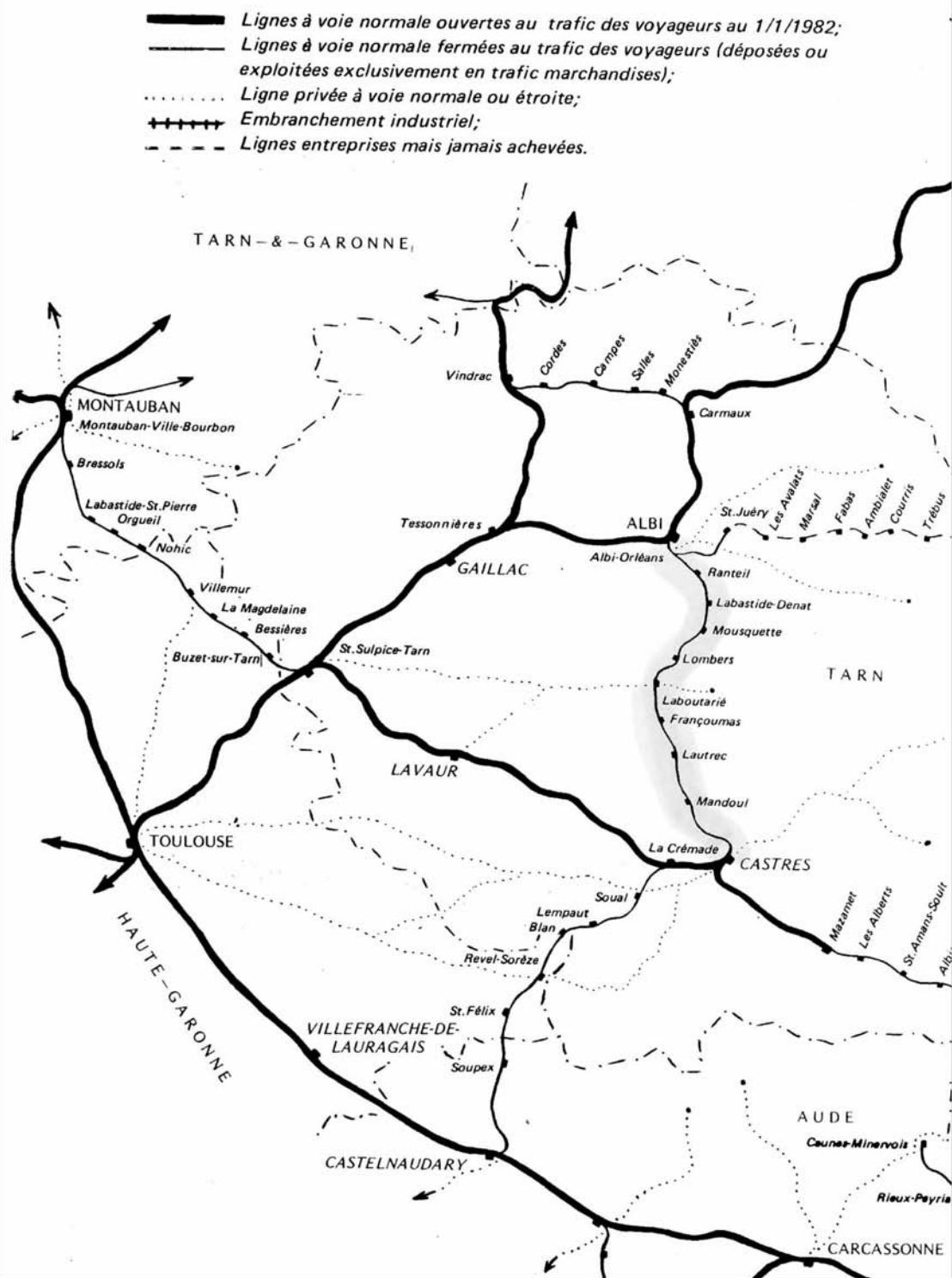


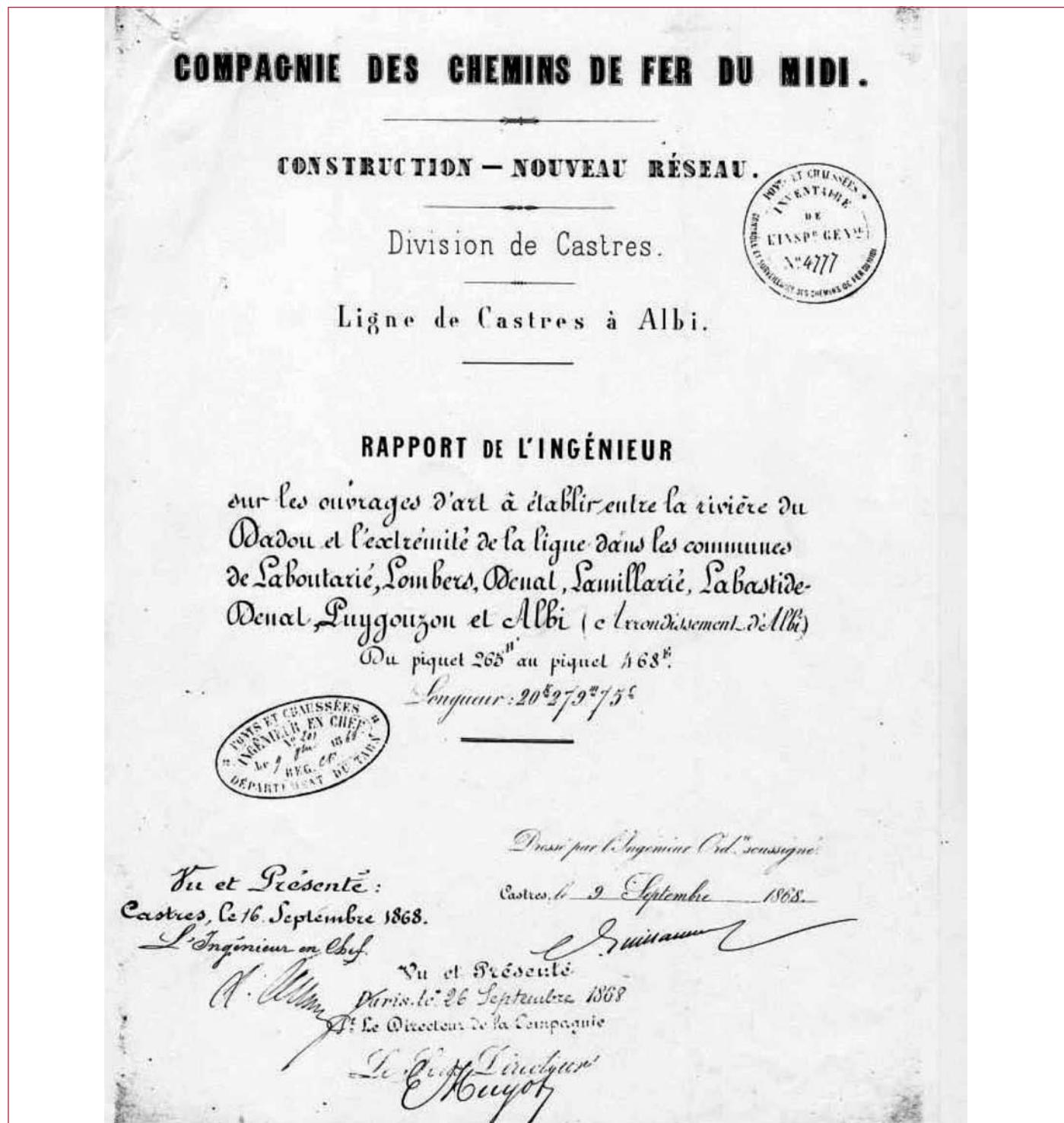
Figure 1. Plan du réseau ferré comprenant les lignes en service et les lignes désaffectées (Banaudo, 1982).

dossiers de construction des ouvrages sont archivés et donc facilement disponibles pour consultation. C'est la raison pour laquelle nous l'avons choisie.

Cet article fournit tout d'abord les documents sources utilisés, puis, rapidement, les étapes de la construction de la ligne et de son exploitation. Les résultats des recherches historiques concernant les travaux de génie civil des ouvrages en maçonnerie sont ensuite présentés en détail. Une comparaison avec d'autres ouvrages en maçonnerie construits dans la région à la même époque sera engagée. Enfin, on évoquera quelques pistes de réflexion pour la requalification de ces ouvrages.

2. LES SOURCES

Les sources historiques relatives à la construction du génie civil de la ligne de chemin de fer reliant Castres à Albi sont concentrées dans les archives de la direction toulousaine de la SNCF. Les documents, qui datent de 1868, sont classés au numéro actuel de la ligne : 736. Les archives rassemblent des documents généraux (rapport de l'ingénieur de la Compagnie, Fig. 2, profil en long, et des textes administratifs et fonciers) ainsi qu'un dossier de construction pour chaque ouvrage d'art.



Il comporte aussi un dossier de réclamation de l'un des entrepreneurs (lot 3 d'un chantier qui en comportait 4) qui, pour diverses raisons (évoquées par courrier, Fig. 3), a réclamé une augmentation du montant des travaux (et, finalement, ne l'a pas obtenu). Ce dossier de réclamation, très complet, présente l'analyse, faite par l'entrepreneur (M. Dumas), des travaux réellement exécutés, comparés avec le devis des ouvrages et le cahier des charges, ainsi que la réponse de l'in-

génieur de la Compagnie. La requête est étayée par le rapport de l'agent de la Compagnie qui était présent constamment sur le chantier (la lecture de son rapport manuscrit de l'incident survenu au centre du pont la Millette est saisissante de réalisme, Fig. 4). Ce dossier de réclamation est donc d'une importance majeure vis à vis de la connaissance exacte des ouvrages réalisés. En particulier, il apporte des éléments précis sur les matériaux mis en œuvre, dans leur nature, leur lieu

Lautrec, le 15 avril 1871.

A M^e Guillaume, Ingénieur des
Chemins de Fer du Midi, à Toulouse

Monsieur l'Ingénieur,

Les difficultés exceptionnelles qui se sont présentées dans l'exécution des travaux du lot de la ligne de Castres à Albi, dont j'ai été déclaré adjudicataire le dix octobre 1867, ont porté dans mon entreprise une perturbation tellement grande que les conditions de mon marché ont été siées complètement anéanties du moins considérablement altérées principalement dans les terrassements.

L'exécution a révélé des espèces de déblais imperméables, d'une nature exceptionnellement difficile à fouiller ne pouvant s'exploiter qu'à la mine ou à la trave.

Contes ces difficultés se sont traduites par un surcroît de dépenses considérable, en dehors de toutes provisions, d'outillage, de poudre et de main-d'œuvre, dont je ne savais être équitablement rendu responsable.

Confiant en votre justice, malgré le déficit énorme que je constatais chaque jour, je ne me suis point découragé et mon zèle, mon

Figure 3. Réclamation de l'entrepreneur Dumas. 15 avril 1871.

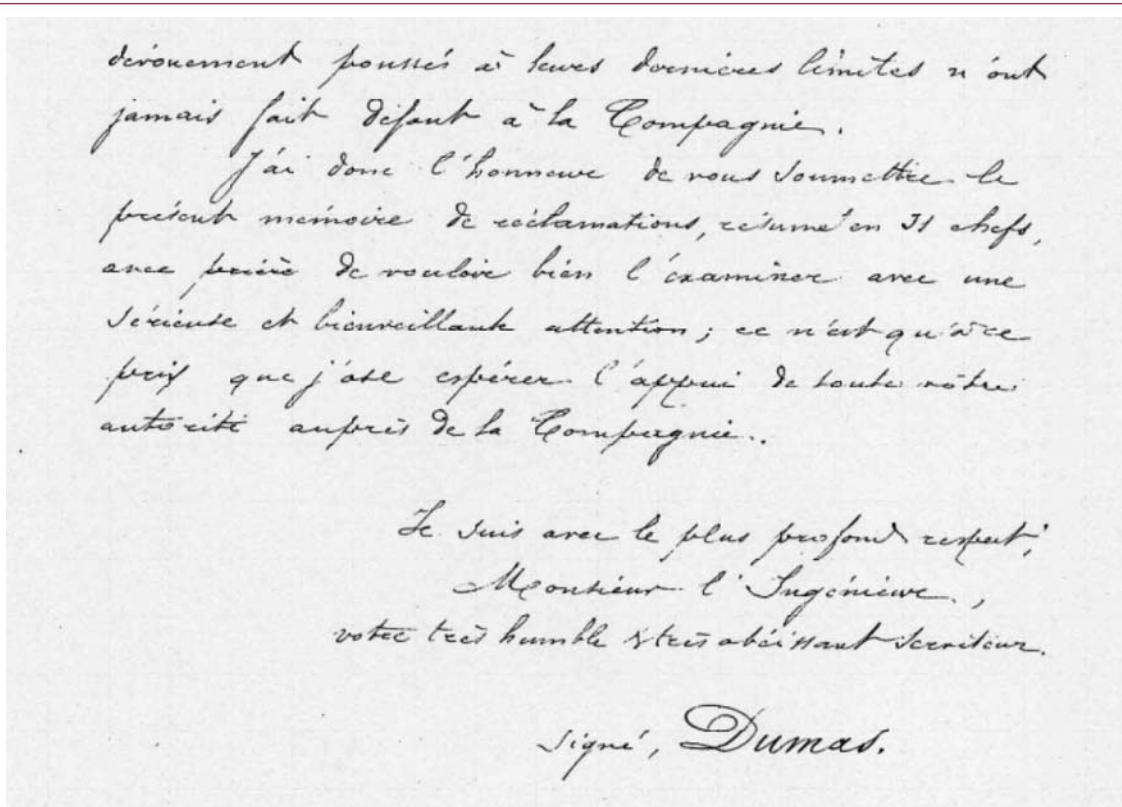


Figure 3 (suite). Réclamation de l'entrepreneur Dumas. 15 avril 1871.

d'extraction ou de fabrication. Il informe des modifications apportées sur la provenance des matériaux, par rapport aux exigences préalables de la Compagnie, et des difficultés réelles d'exécution sur le chantier.

Tous les textes montrent que la Compagnie exerçait un suivi et un contrôle rigoureux des travaux. Un conducteur de travaux de la Compagnie était présent sur le chantier en permanence. Les archives contiennent les lettres et rapports manuscrits de ce contrôleur dont les propos se recoupent avec les informations données par les documents du marché.

3. HISTORIQUE DE LA CONSTRUCTION DE LA LIGNE

La ligne Castres / Albi fut construite en 1870. Elle totalisait un linéaire d'environ 47 km. Cette jonction permettait de relier Castelnau-d'Albret et Rodez, et de mettre en relation les zones industrielles de l'Aveyron, du Tarn, et de l'Ariège. Ce fut un grand succès dès sa mise en service. Suite à la rentabilité de son exploitation (5 voyages dans chaque sens par jour au tout début du 20^e siècle), la ligne fut doublée en 1912 entre Castres et Lautrec ce qui a conduit à un élargissement des ouvrages d'art de cette portion (les voies ont été doublées et un deuxième pont a été construit contre le premier, en parallèle).

La portion nord, entre Lautrec et Albi fut déclassée la première, en 1972 (soit une durée d'exploitation de 100 ans pour ce tronçon). Le trafic entre Castres et Lautrec justifia l'exploitation de la ligne encore 25 ans, jusqu'au 31 mai

1997, avec des opérations d'entretien et de réparation (soit une durée totale d'exploitation de 125 ans). Le tracé de la ligne est aujourd'hui occupé en majeure partie par une piste cyclable, gérée par le Conseil Général du Tarn. Les ouvrages d'art sont plutôt en bon état, sauf certains ouvrages métalliques, dont l'un vient récemment d'être détruit (pont métallique à rails Barlow, Fig. 4). Certains ponts en maçonnerie présentent des désordres qui ne remettent pas en cause leur stabilité globale : altération des matériaux, défaut de jointoiement, fissuration longitudinale en intrados, décollement des bandeaux.

4. CLASSIFICATION DES OUVRAGES D'ART DE LA LIGNE

Dans le cahier des charges, les 237 ouvrages d'art de la ligne sont classés soit en ouvrages «types» (de faible portée), soit en ouvrages «spéciaux», c'est-à-dire faisant l'objet de plans de construction spécifiques.

Parmi les ouvrages types, on trouve des bûches en ciment (66), des aqueducs (122), et des ponceaux de portée inférieure à 2m (21), ainsi que des ponts à tablier métallique de portée inférieure à 4m (14). Leur tablier est constitué de poutres métalliques ou de rails Barlow (Fig. 4), avec remplissage en maçonnerie non armée.

Les ouvrages dits spéciaux furent construits soit en acier soit en maçonnerie. On en dénombre 11, soit en moyenne un ouvrage spécial tout les 3km environ (les principaux sont illustrés Fig. 6). Il n'y a pas d'ouvrages en béton armé.

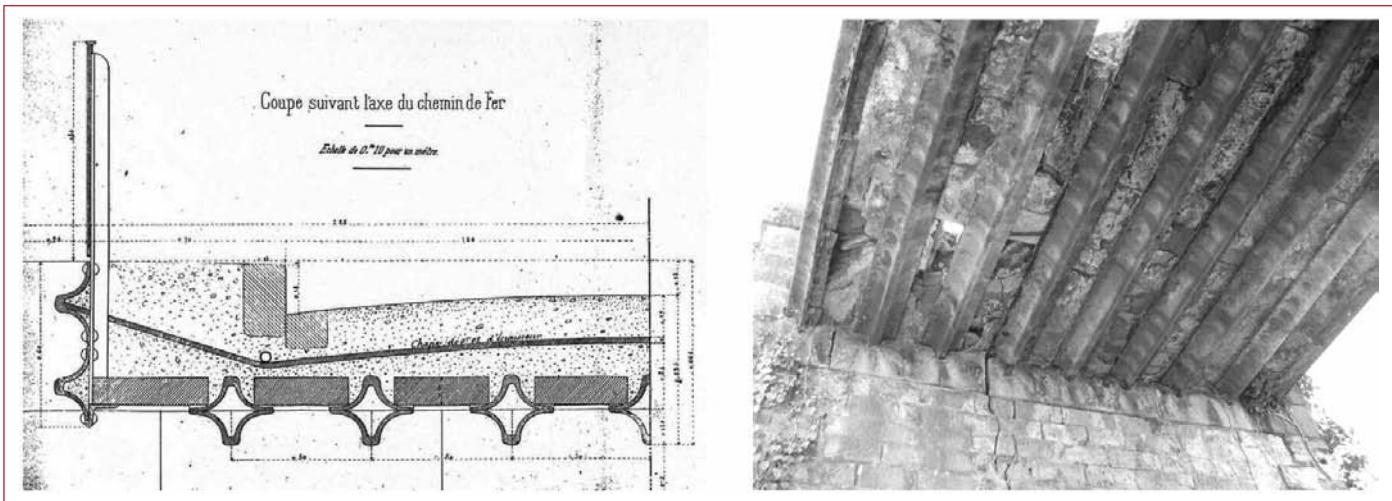


Figure 4. Tablier métallique à rail Barlow. A gauche : coupe suivant l'axe du chemin de fer. A droite : photo prise juste avant démolition du tablier.

En proportion de la longueur de la ligne (47 km environ), les ouvrages en maçonnerie sont relativement nombreux, et offrent une belle diversité par leur géométrie (Tab. 1) : 8 ponts à une seule arche plein cintre, un pont à une seule arche surbaissée, un pont à deux travées en anse de panier, enfin un pont d'envergure à quatre arches plein cintre. Voici toute la diversité offerte par cette ligne qui constitue donc un échantillon particulièrement intéressant du savoir faire des Compagnies de chemin de fer à la fin du 19^e siècle.

5. COMPOSITION DES MAÇONNERIES

Après une description des matériaux utilisés (briques, pierres, mortiers), ce paragraphe décrit successivement chacune des maçonneries présentes dans les ouvrages puis le mode d'exécution des maçonneries, sur la base des documents d'archives.

5.1. Les matériaux utilisés

Voici les différents types de maçonneries présents dans les ponts voûtes et leur utilisation (Fig.7 et 8) :

- les douelles, c'est-à-dire le corps des voûtes, sont en maçonneries de briques,
 - les culées et murs latéraux sont en maçonneries de moellons à assise horizontale ou en opus incertum,
 - les remplissages en maçonneries de moellons ordinaires,
 - les bandeaux sont en maçonneries de pierre de taille.
- Si les géométries des ouvrages sont diverses, les matériaux sont par contre d'une étonnante régularité. Il se dégage donc une typologie des ouvrages en maçonnerie de la ligne Castres – Albi, résumée sur les plans du pont du Bagas (Fig. 7 et 8).

5.2. Les maçonneries de briques

Les briques utilisées sur ces ouvrages d'art sont de grand format ($35*25*4.5$ mm³, à $37*28*5$ mm³ selon les ouvrages), comme il était de coutume dans la région sud ouest à cette époque. Elles viennent d'Albi ou de briqueteries des alentours de Lautrec (Tarn). Le dossier de réclamation de l'entreprise montre la difficulté qu'ont eue les entrepreneurs à se procurer des briques en quantité suffisante du fait de la faible capacité de production des briquetiers de proximité. En effet, ceux-ci n'étaient habitués

Travées	Géométrie	Nom	Portée
1	Arc surbaissé	Passage Supérieur du chemin de la Millette	14,37m
1	Arc plein cintre	Pont du Bagas	13m
4	Arc plein cintre	Pont de Trotoco sur le Dadou	12m
2	Anse de panier	Passage Supérieur sur ruisseau d'Assou	9m
1	Arc plein cintre	Passage Inférieur (P.I.) de la RD 16 d'Alban à Lavaur	7m
		Pont du Poulobre	7m
		P.I. pour le chemin de St Benoit	6,40m
		Ponceau du Lézert	5m
		Passage Inférieur (PI) de Leingary	4m
		P.I. du chemin de Montsalvy à la rte impériale 118	4m
		Ponceau de Pudre	3m

Tableau 1. Récapitulatif des ponts spéciaux en maçonnerie de la ligne Castres-Albi.

29 Chef

Accident arrivé aux Cintres du Viaduc Supérieur de la Millette pour cause de force majeure. -

La première question à poser ici est celle-ci : à qui faut-il attribuer la cause des dégâts occasionnés aux Cintres du Viaduc de la Millette dans la nuit du 1 au 2 Mars 1869 ? Eh ! ce n'est pas à la force majeure d'ordre évidemment imprévue ou à l'Entrepreneur qui n'a pas pris les précautions renforçantes pendant le levage de la Charpente. -

Mais l'événement a eu lieu pendant l'opération, pour ainsi dire. - Toutes les pièces étaient en place sauf la Gravale Croix de St' André, devant relier les poutres entre elles. - Or la nuit arrive, l'obscurité empêche de travailler et on est obligé de laisser pour le lendemain l'achèvement de la pose des poutres renforçantes qui n'étaient pas placées. Tout à coup un vent d'une extrême violence s'élève et met à bas toute la Charpente qui dans sa chute a arraché plusieurs pièces brisées. L'ensemble de ces circonstances me fait penser que l'Entrepreneur n'est pas cause de l'accident et que quelques précautions qu'il aurait prises la violence du vent aurait fait éviter ces pièces toujours plus ou moins isolées, avant que l'ensemble fut complètement assemblé. - Je crois donc que

qu'il est impossible d'attribuer à l'Entrepreneur la faute en évidence cause de son imprévoyance. - Je conclus donc que toutes les dépenses de réparation de ces cintres et fourniture des pièces nouvelles doivent être supportées par la Compagnie, comme effet d'une cause majeure que l'Entrepreneur en personne n'a pas prévue ni empêché de seconde question, à savoir dans ce Chef, est celle du montant de la dépense pour fourniture des pièces nouvelles, et de la main d'œuvre des Charpentiers. -

Le lendemain matin, de l'événement, j'étais sur les lieux de défaillance pour examiner les dégâts. - De prime abord j'ai vu plusieurs pièces brisées, mais à la suite du travail, le nombre de pièces à remplacer a été plus considérable qu'on ne l'a cru à l'issue de l'inspection. - Poteaux, an. bâcheurs, poutres ~~étagées~~ trouvèrent fendus à partir des tenons, ces derniers brisés. - Quelques mois plus tôt, ces poteaux avaient été posés et je pense donc qu'il faut admettre l'évaluation de cette dépense suivant la déclaration de l'Entrepreneur. -

de conducteur du 3^e ouvrage souligné

Toulouse 26 février 1872 ~

Figure 5. Accident arrivé aux cintres du Viaduc Supérieur de la Millette pour cause de force majeure. Rapport du conducteur de travaux, 26 février 1872.

qu'à fournir de faibles quantités de produits et la demande occasionnée par la construction de la ligne était très élevée. Rappelons ici que l'industrialisation de la fabrication des briques n'eut lieu, en Midi Toulousain, qu'au 20^e siècle (Domède, 2004), plus tardivement que dans le Nord de la France. A la fin du 19^e siècle, les briqueteries sont nombreuses en région toulousaine. Elles sont souvent familiales et les méthodes sont artisanales. Les briques sont moulées à la main, parfois mécaniquement, et cuite au

four-séchoir (Nègre, 2001). La qualité des briques est variable.

Les voûtes en briques étaient réalisées sur cintre. Les documents d'origine du Pont de Trotoco sur le Dadou contiennent le plan d'ensemble et des détails du cintre (cintre retroussé, Fig. 10). Les cintres étaient montés en bois de charpente, sur site, et déposés à l'aide de boîtes à sable après achèvement total du corps des voûtes.

P.S du chemin de la Millette



PI de la RD 16 d'Alban à Lavaur



PS sur le ruisseau d'Assou



Pont de Trotoco sur le Dadou



Figure 6. Les principaux ponts en maçonnerie de la ligne : Pont du chemin de la Millette (arc surbaissé), Pont de la RD 16 (plein cintre), Pont sur le ruisseau d'Assou (anse de panier), pont de Trotoco sur le Dadou (plein cintre).

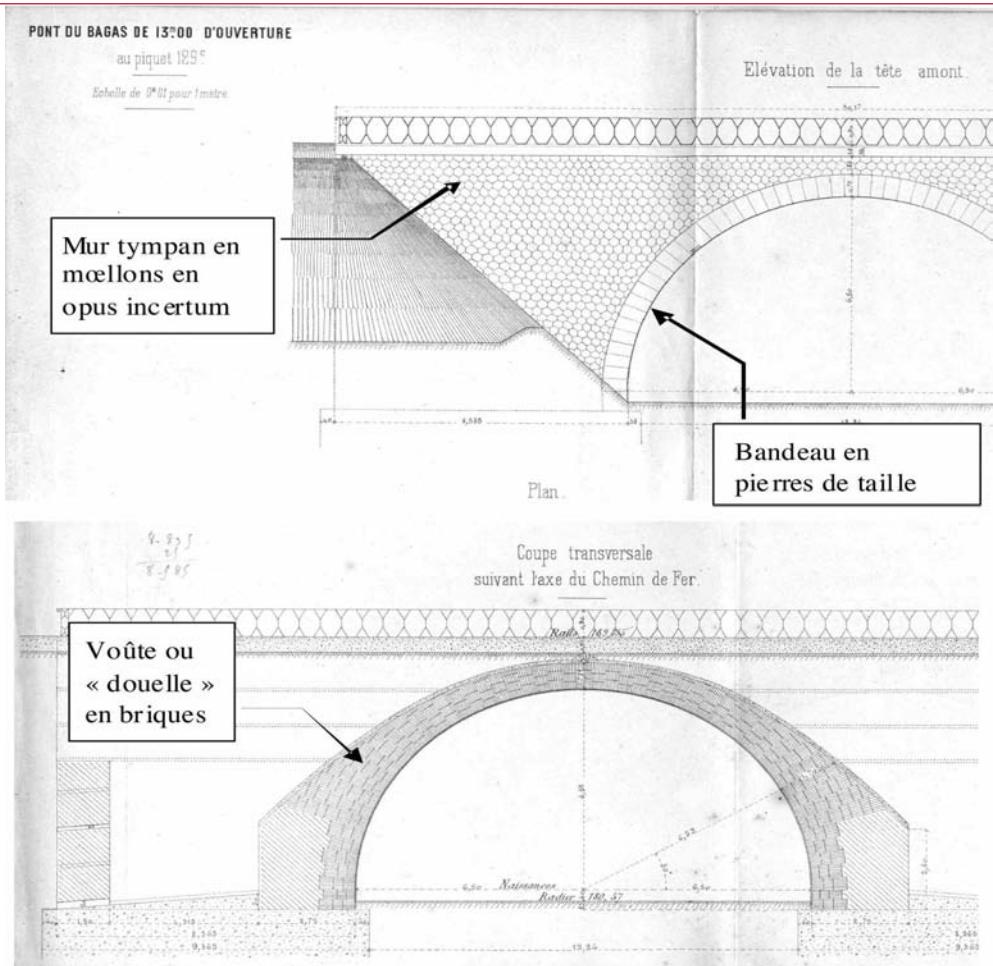


Figure 7. Répartition des matériaux. Exemple du pont du Bagas. Vues en élévation et coupe longitudinale. Le remplissage n'est pas représenté.

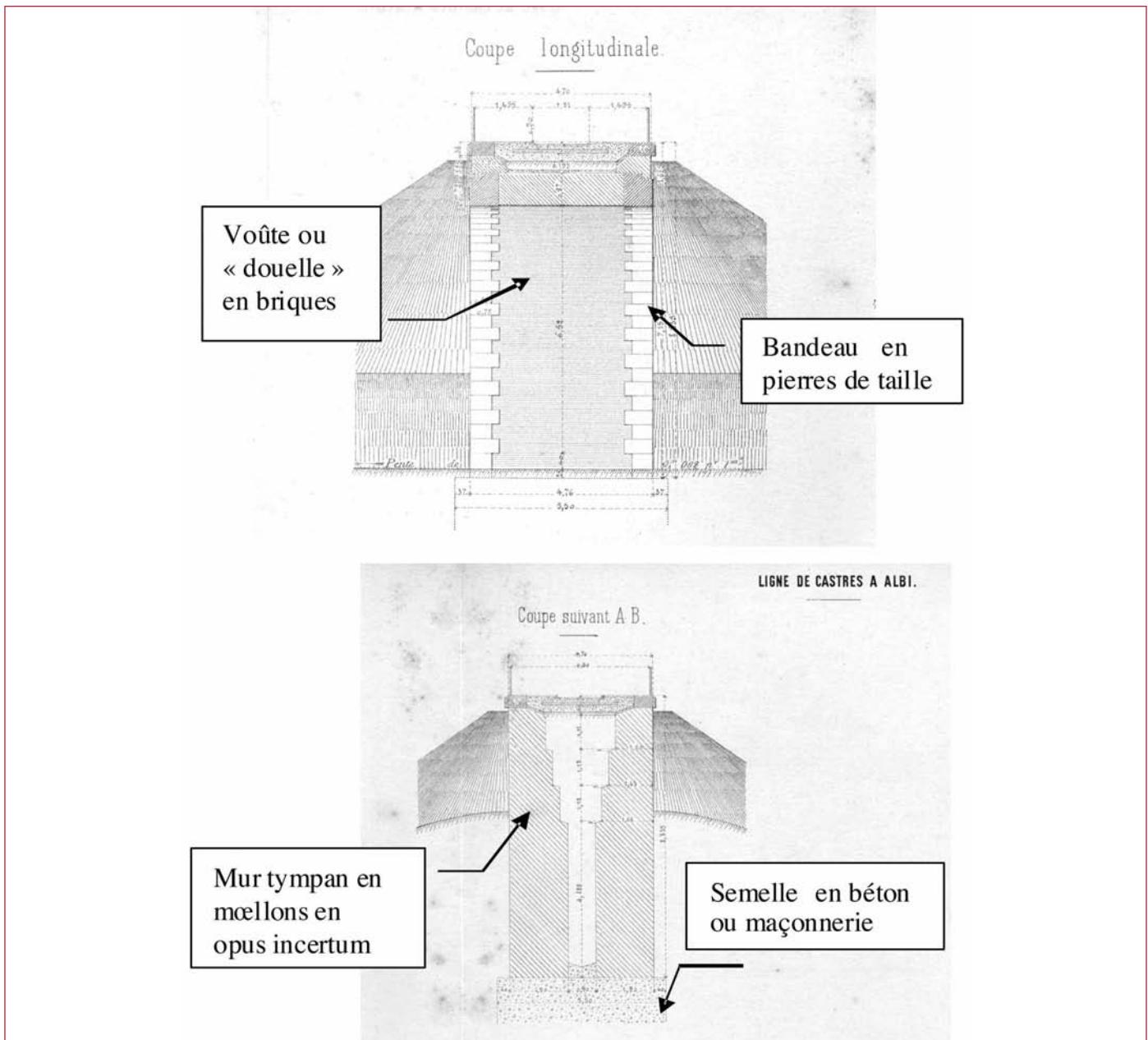


Figure 8. Répartition des matériaux. Exemple du pont du Bagas. Vues en coupes transversales. Noter l'épaisseur impressionnante des murs tympan, à la base.

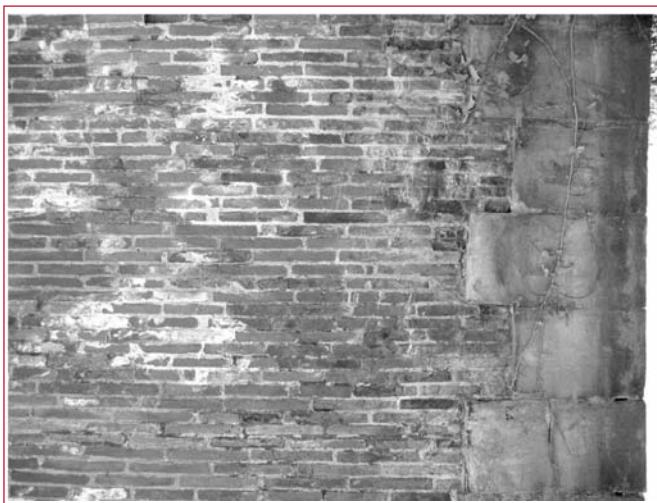


Figure 9. Détail des voûtes en briques avec bandeaux en pierre de taille. Pont de la Millette.

5.3. Les bandeaux en pierre de taille

Bandeaux et sommier, dont la fonction était, pendant la construction, de former un appui au cintre, sont en pierres de taille. Le cahier des charges indiquait que ces pierres devaient être extraites « *des meilleures carrières de la commune de Lautrec* ». Le mémoire de réclamation de l'entrepreneur relate la difficulté rencontrée pour se procurer des pierres de taille de grès et l'augmentation de prix de ce matériau qui en a résulté. Ces faits ont été confirmés par le rapport du conducteur de travaux de la Compagnie, qui a écrit les réelles difficultés liées au transport à effectuer depuis la carrière (Lautrec) jusqu'au chantier (distance de quelques kilomètres), et celles liées à l'extraction des pierres : « *J'accorderais plutôt une augmentation eu égard aux difficultés de transport qui étaient réellement grandes. Les chemins parcourus étaient généralement on ne peut*

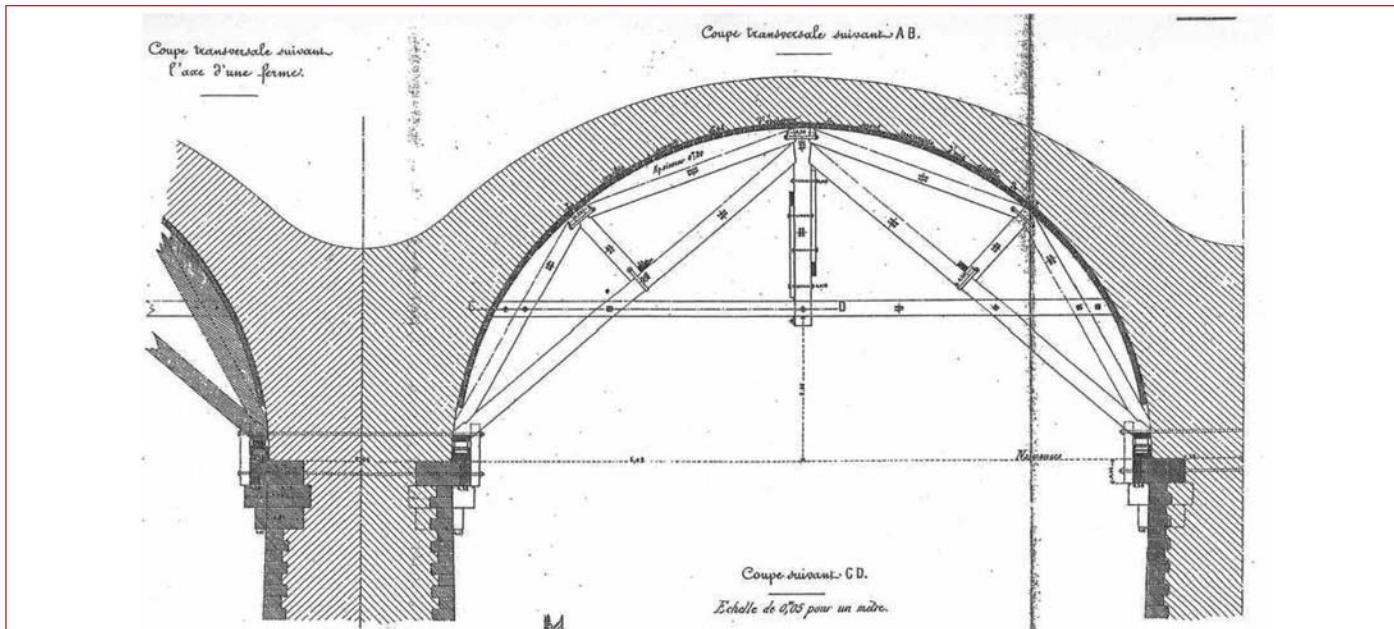


Figure 10 - Cintre du Pont de Trotoco sur le Dadou.

plus très mauvais avec des pentes très rapides. Puis ajoutant à cela que ces approvisionnements se faisaient dans la mauvaise saison, souvent les charrettes ne pouvant sortir du bourbier, on était obligé de déposer le chargement sur les bords des chemins et attendre la saison meilleure. La perte de temps, la main d'œuvre de déchargeement et du chargement étaient des pertes réelles qui méritent d'être prises en considération".

Au sens du cahier des charges, les pierres devaient être sélectionnées de sorte à écarter les pierres qui « sous le choc du marteau, rendraient un son sourd et se casseraient en grains sablonneux au lieu de se briser en éclats à vives arêtes ». Le conducteur de la Compagnie reconnaît que le grès extrait était tendre, « même très tendre », ce qui l'a conduit à refuser des pierres sur le chantier (on constate aujourd'hui l'usure de ces pierres par la corrosion sur quelques ouvrages).

Les pierres sélectionnées étaient taillées puis dressées en parement « avec la fine boucharde » (les outils du tailleur

de pierre de l'époque sont décrits Fig.12). Pour vérifier leurs dimensions, elles étaient présentées à leur place définitive puis ajustées au besoin. La pose se faisait ensuite conformément aux dessins, « à bain de mortier fin et hydraulique ». Les surfaces de pose en contact avec le mortier étaient humectées. Puis on étendait « une couche de mortier de quinze millimètres d'épaisseur. La pierre [était] ensuite amenée et soigneusement placée sans employer de cales, puis [...] bien dressée en tous sens à coups de masse en bois, de manière que le mortier reflue et garnisse exactement le lit, et que l'épaisseur des joints horizontaux soit réduite à dix millimètres, et celle des joints verticaux à la même dimension. On fichera ensuite le joint vertical, en ayant soin de contenir le mortier par devant avec des règles ».

Le rejointoiement était effectué après achèvement de la pose. Il consistait « dans le raclage au crochet, sur une profondeur d'au moins quinze millimètres, du mortier des joints horizontaux et verticaux, dans le nettoyage et le

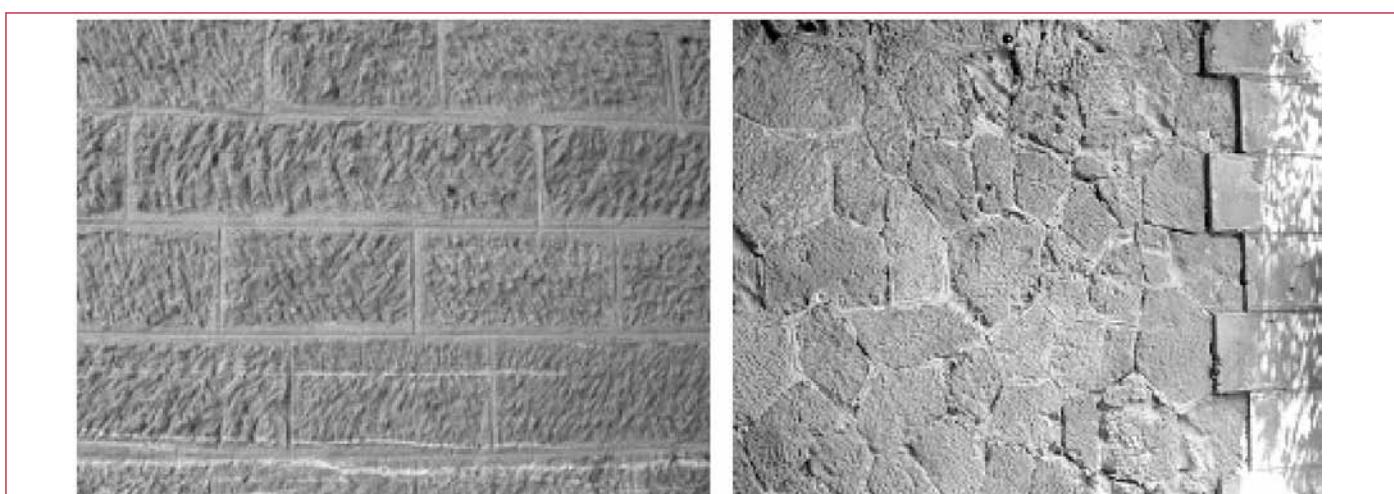


Figure 11. - (a) Pont de Montsalvy, détail de maçonnerie à moellons smallés à assise horizontale. (b) Pont du Leingary, murs en maçonnerie de moellons à joints incertains (opus incertum) et chainage en pierre de taille.

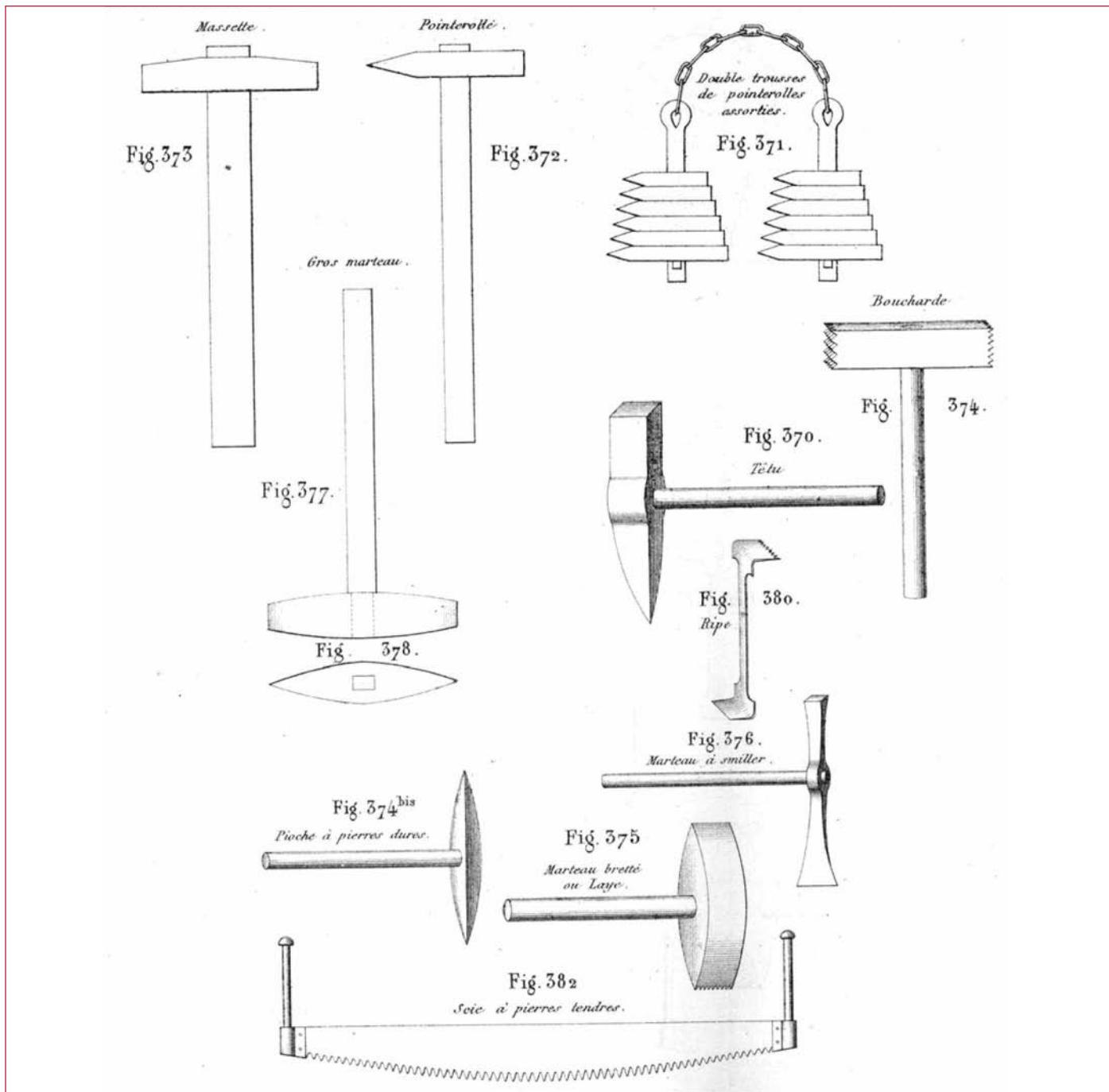


Figure 12. Les outils du tailleur de pierre, d'après Debauve, 1873.

lavage des dits joints, dans leur remplissage soigné avec du nouveau mortier fin, tassé et lissé avec le crochet et la truelle, de manière à bien joindre les arêtes de la pierre en les laissant apparentes ».

5.4. Les maçonneries de moellons

Les murs tympans et le remplissage qu'ils enserrent sont en maçonnerie de moellons. Les murs latéraux ont une épaisseur variable, très imposante à la base, allant en s'aminçissant vers leur sommet, du fait de redans placés sur la face interne, côté remplissage. Ils constituent une pièce importante des ouvrages, tant en volume qu'en rigidité.

On rencontre deux types d'appareillage en parement : les moellons à assise horizontale et les moellons en opus

incertum. Dans tous les cas, les dimensions des pierres étaient imposées par le cahier des charges : au moins 25 cm d'épaisseur pour les moellons à assise horizontale, 25cm de diagonale pour les moellons des parements en opus incertum. Ces moellons devaient avoir une queue (profondeur par rapport au parement vu du mur) comprise entre 20 et 30 cm maxi.

Les moellons étaient posés à la main et « serrés par glissement, les uns contre les autres, de manière que le mortier reflue à la surface par tous les joints ». Ils étaient ensuite « frappés et tassés avec le manche du tête ». Les moellons bruts, à l'arrière du parement (et aussi en remplissage) laissaient parfois des espaces importants à combler de mortier. Ils étaient dans ce cas « garnis d'éclats de pierre dure, enfoncés et serrés de manière que chaque moellon ou éclat

soit toujours enveloppé de mortier ». Les joints de mortier devaient avoir une épaisseur maximale de 16mm en tout point.

Au moment de la pose, les pierres étaient arrosées. La phrase suivante extraite du cahier des charges illustre bien l'état des moellons à poser : « *En un mot, l'état d'humidité du moellon, au moment de l'emploi, sera le même que s'il pleuvait depuis longtemps* ».

5.5. Le mortier

Le ciment n'a été utilisé sur aucun des 4 lots de la ligne Castres-Albi. Rappelons ici qu'il ne le fut que tardivement en région sud-ouest de la France. Même entre les deux guerres mondiales, la chaux cohabite encore largement avec le ciment pour la construction des édifices publics comme des habitations individuelles. Le ciment ne s'impose qu'après la seconde guerre mondiale (Nègre, 1996). Le liant utilisé au 19^e siècle de Toulouse à Albi est la chaux hydraulique. Elle est souvent importée du Teil (usines Pavin de Lafarge en Ardèche), mais elle produite également dans la région, à Carmaux notamment, et à Albi. Pour le chantier qui nous intéresse, la chaux a été cuite dans l'usine de Damiatte (commune du Tarn, à proximité de la ligne), qui possérait plusieurs fours et un appareil broyeur de Davidsen, qui selon Le Commissaire de Vérification de l'Administration, faisait toute la valeur de l'usine (Latgé, 1905).

Beaucoup de soin était apporté à la fabrication des mortiers à base de chaux. La chaux était fournie en pierre (chaux vive) et éteinte sur le chantier au fur et à mesure des besoins, par ajout d'eau « dans des bassins imperméables revêtus en planche, placés sous des hangars couverts, bien abrités et à portée des ateliers de fabrication des mortiers et bétons ». Seule la quantité d'eau nécessaire pour réduire la chaux à l'état de pâte ferme et homogène était utilisée, soit « moyennement huit cent litres pour un mètre cube de chaux de pierre ». La chaux ne pouvait être employée que vingt quatre heures après son extinction. Par conséquent, on n'éteignait « à la fois que la quantité nécessaire pour la consommation de deux ou trois journées au plus ».

Pour juger des qualités hydrauliques de la chaux, des épreuves de convenances étaient réalisées sur chantier. Des échantillons de chaux éteinte étaient placés dans des vases remplis d'eau. Puis, si après six jours d'immersion le mélange ne résistait pas « sans empreinte, à une aiguille d'acier d'un millimètre de diamètre, limée carrément à l'extrémité et chargée du poids de trois cent trente grammes » l'approvisionnement était refusé.

La composition des mortiers de chaux était imposée par la Compagnie : « *Il se composera de deux parties de chaux mesurée en pâte tassée et parfaitement compacte, et de cinq parties de sable. Ces matières seront soigneusement dosées dans des caisses fournies par l'entrepreneur, ayant dix centièmes de mètre cube de capacité* ». Le mortier à base de chaux était fabriqué sur site, au fur et à mesure des besoins au moyen de broyeurs mis parfois par des chevaux, et employé aussitôt après sa confection. La maniabilité du mortier était testée avant emploi : un cylindre de

15mm de diamètre, pesant 250 grammes et tombant d'une hauteur de 10cm ne devait pas s'enfoncer de plus de 2cm.

5.6. Le cas Taillefer

Le viaduc de Taillefer est un pont rail appartenant au tronçon La Crémade – Castres, toujours en exploitation, et qui fait l'objet d'un suivi régulier. C'est un ouvrage à trois arches de 20m de portée. Les matériaux utilisés pour sa construction sont similaires ceux qui viennent d'être décrits.

Des tirants transversaux, ont été posés en 1924, au droit des piles, pour renforcer transversalement l'ouvrage. Mais cette réparation n'a pas stoppé l'évolution des désordres de nature mécanique. En 1973, des désordres importants ont été constatés justifiant l'ouverture de fenêtres permettant l'observation interne des remplissages, et finalement une intervention d'urgence. Les parements des tympans, en briques, étaient très fissurés. Le contrôleur principal des ouvrages d'art observe que le parement de brique se décolle vers l'extérieur. Suite à son inspection visuelle sur site, il précise, en son rapport du 23 novembre, que la maçonnerie de remplissage est parfaitement liée. « *Le liant composé d'un mortier de chaux est sain et sec [...]. Mais on peut observer par endroits un décollement variable de 2 à 3 cm avec la maçonnerie de blocage* ». Cette maçonnerie de blocage composée de différents éléments (calcaire, grès, ...) est « *compacte, saine, sans traces d'humidités, et avec un liant de mortier de chaux englobant parfaitement ces gros cailloux* ».

Un nouveau rapport du 27 juin 1974 fait état d'une aggravation des fissures à l'arrière des bandeaux. La résistance de l'ouvrage est mise en cause. En 1974, il est décidé de procéder à des réparations.

Ces observations confirment le bon état des remplissages internes. C'est un fait important parce qu'il est souvent dit que, sur les ponts en maçonnerie, les remplissages sont de mauvaise qualité, et réalisés sans soin, à partir de matériaux divers de récupération. Sur les ponts de cette ligne, les documents écrits et les observations sur sites confirment qu'il n'en est rien.

6. APPAREILLAGE DES DOUFLIES ET MODE D'EXÉCUTION

Le comportement mécanique des maçonneries dépend de leur appareillage, c'est-à-dire de la façon dont les blocs (pierres ou briques) sont assemblés. Pour être plus précis, il dépend de la disposition relative des blocs et des joints et de l'état de l'interface blocs/joints. Parce que la douelle représente la partie résistante d'un pont voûte, il est donc essentiel de connaître son appareillage en vue d'une analyse de la stabilité et de la résistance du pont dans son ensemble, pour sa requalification.

Après une description des techniques générales utilisées à la fin du 19^e siècle pour construire les voûtes, nous décrirons celle utilisée pour les ouvrages de la ligne de chemin de fer Castres-Albi.

Au 19^e siècle, essentiellement deux techniques sont utilisées pour construire les voûtes : l'une consiste à réaliser la voûte en un rouleau unique, l'autre à réaliser plusieurs rouleaux successifs. Ces techniques sont décrites dans les livres et les cours contemporains de cette époque (Degrand 1888, Chaix, 1890, Séjourné 1913, Gay 1924) pour les ouvrages en pierres. En effet, tous ces auteurs préconisent d'utiliser de préférence ce matériaux, et de limiter l'usage des briques aux seules régions où l'on ne dispose pas de pierre. Lorsque les briques sont évoquées, il s'agit des briques au format 22cm*11cm*5cm, dites de Bourgogne, qui n'ont pas été utilisées dans le sud ouest de la France. Notre étude nous éclaire donc sur les dispositions propres aux briques de grand format (dites les foraines) utilisées en région toulousaine.

Pour les ponts de dimensions courantes (ouverture inférieure à 40m environ), la douelle est réalisée en une seule fois, sur cintre. Des moellons, équarris uniquement sur leur face vue (intrados), sont posés sur la charpente provisoire. La voûte, en son épaisseur, est complétée par des moellons pour constituer le queutage de sorte que les plans des joints, perpendiculaires à l'intrados (et rayonnants si l'arc est plein cintre) soient continus sur toute l'épaisseur de la voûte (Fig. 13).

L'usage de la technique par rouleaux successifs (Fig.14) est déjà répandu en 1880. Décrit par Chaix, le procédé consiste à former plusieurs rouleaux concentriques indépendants. Il permet d'éviter d'avoir des joints en mortier dont l'épaisseur varie notablement de l'intrados à l'extrados, ce qui se produit avec l'appareil ordinaire dès que les voûtes ont une grande épaisseur et présente l'avantage de pouvoir employer des cintres plus légers, puisque le premier rouleau sert d'appui pendant la construction des rouleaux supérieurs. Les joints perpendiculaires à l'intrados ne sont donc pas continus. Par contre, les joints circulaires (parallèles à l'intrados dans le cas d'une voûte plein cintre d'épaisseur constante) le sont.

Ce défaut n'existe pas dans la technique décrite par Séjourné (1913) dans laquelle les rouleaux successifs ne sont pas indépendants. Cet ingénieur a utilisé la méthode pour construire les ponts de Lavaur, Antoinette et du Castelet, dans la région qui nous intéresse en 1883-1884, et au Luxembourg un peu plus tard (1901). Le pont de Lavaur (Fig. 15) est une très belle arche de 61.50m d'ouverture qui enjambe l'Agout, à Lavaur, ville située à 40km de Castres et du lieu de construction des ouvrages que nous étudions. Les proximités géographique (40km) et temporelle (une douzaine d'années d'écart) entre cet ouvrage et ceux que nous étudions justifient l'intérêt de la comparaison des techniques de construction employées.

Le pont de Lavaur est cité par Degrand et Résal (1888) comme la deuxième plus grande voûte existante. Ici, comme sur le pont du Luxembourg (Fig.16), les anneaux sont imbriqués les uns dans les autres. Les joints circulaires ne sont donc pas continus. L'épaisseur des blocs de chacun des rouleaux est variable de sorte que la voûte parvienne à être plus épaisse aux naissances qu'en clé. Pour Résal, le procédé par rouleaux successifs « *qui n'était employé que dans le but de réaliser une économie sur le cintre, a une influence considérable sur les conditions de stabilité des voûtes [...]. Nous croyons qu'il convient de tenir compte, dans la préparation du projet d'un ouvrage, de la manière dont il doit être construit et, lorsque l'on compte le diviser en rouleaux, de dresser dans cette prévision les épures de stabilité, de façon à corriger les inconvénients qu'entraîne ce mode de construction, sans quoi l'on s'exposerait à amener l'écrasement des arêtes d'intrados des voussoirs dans le voisinage des reins ; La division en rouleaux est donc une question qui intéresse le projet lui-même et influe notablement sur les calculs de résistance* ».

La figure 17 permet une comparaison aisée des douelles selon les différentes techniques. Dans le cas des rouleaux successifs (tel que sur le pont du Luxembourg ou le pont de

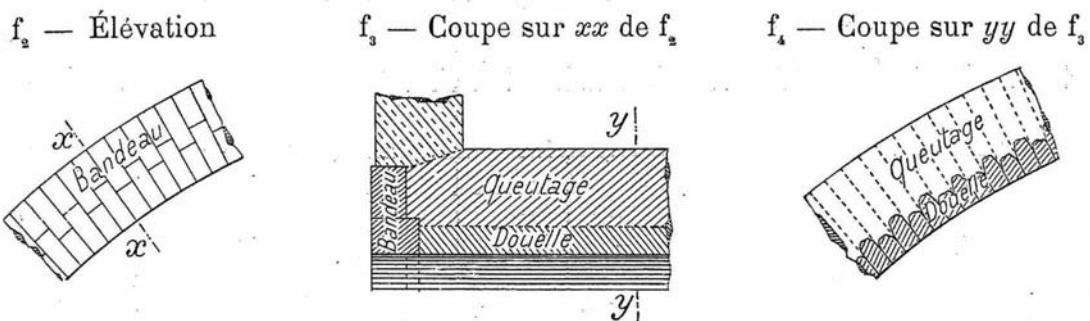


Figure 13. « Comment sont faites les voûtes appareillées », Séjourné (1913).

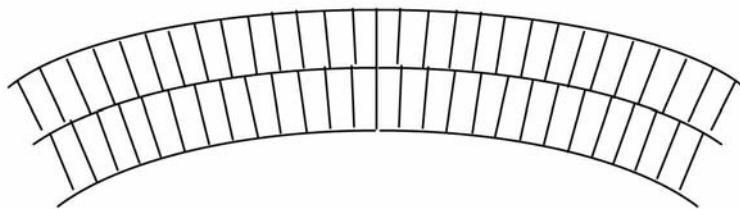


Figure 14. Principe de construction par rouleaux successifs.

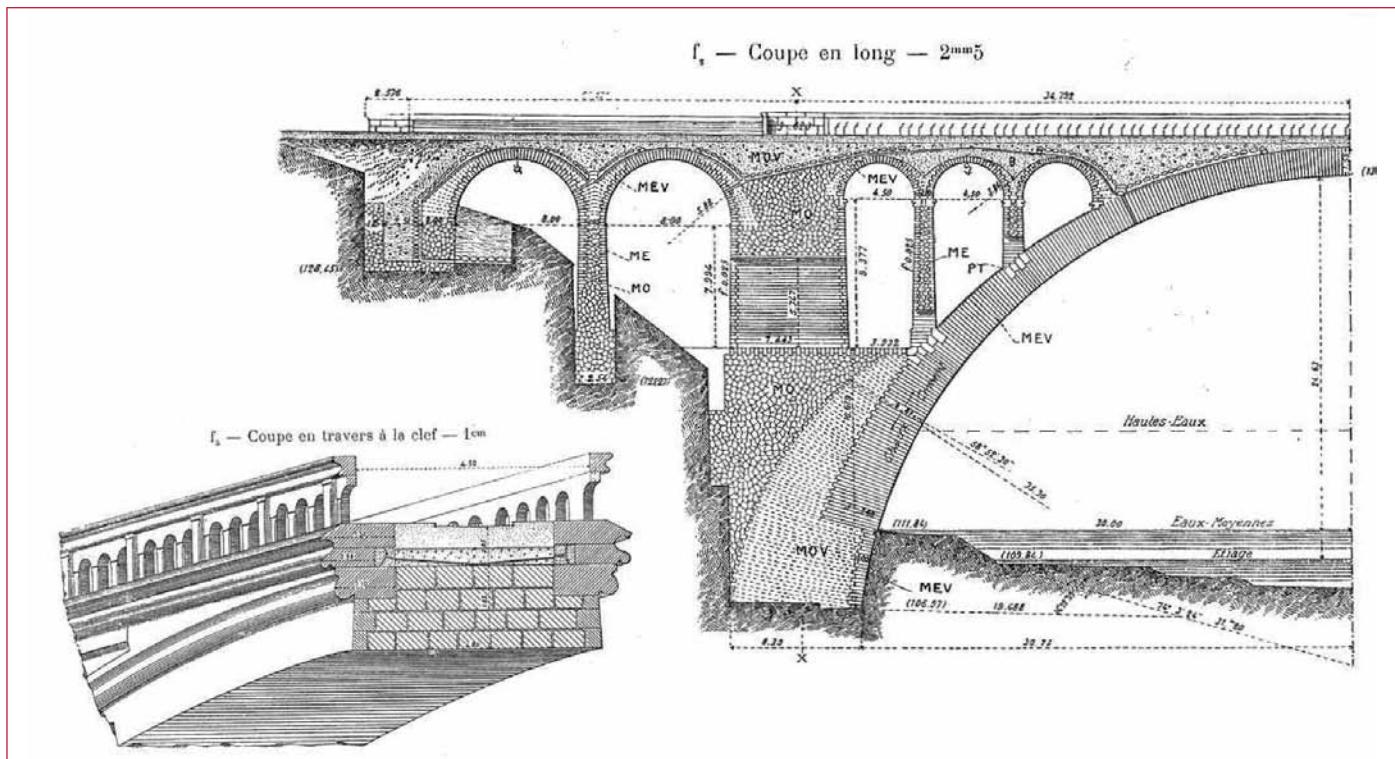


Figure 15. Pont de Lavaur, sur l'Agout, grande arche en pierres (Séjourné).

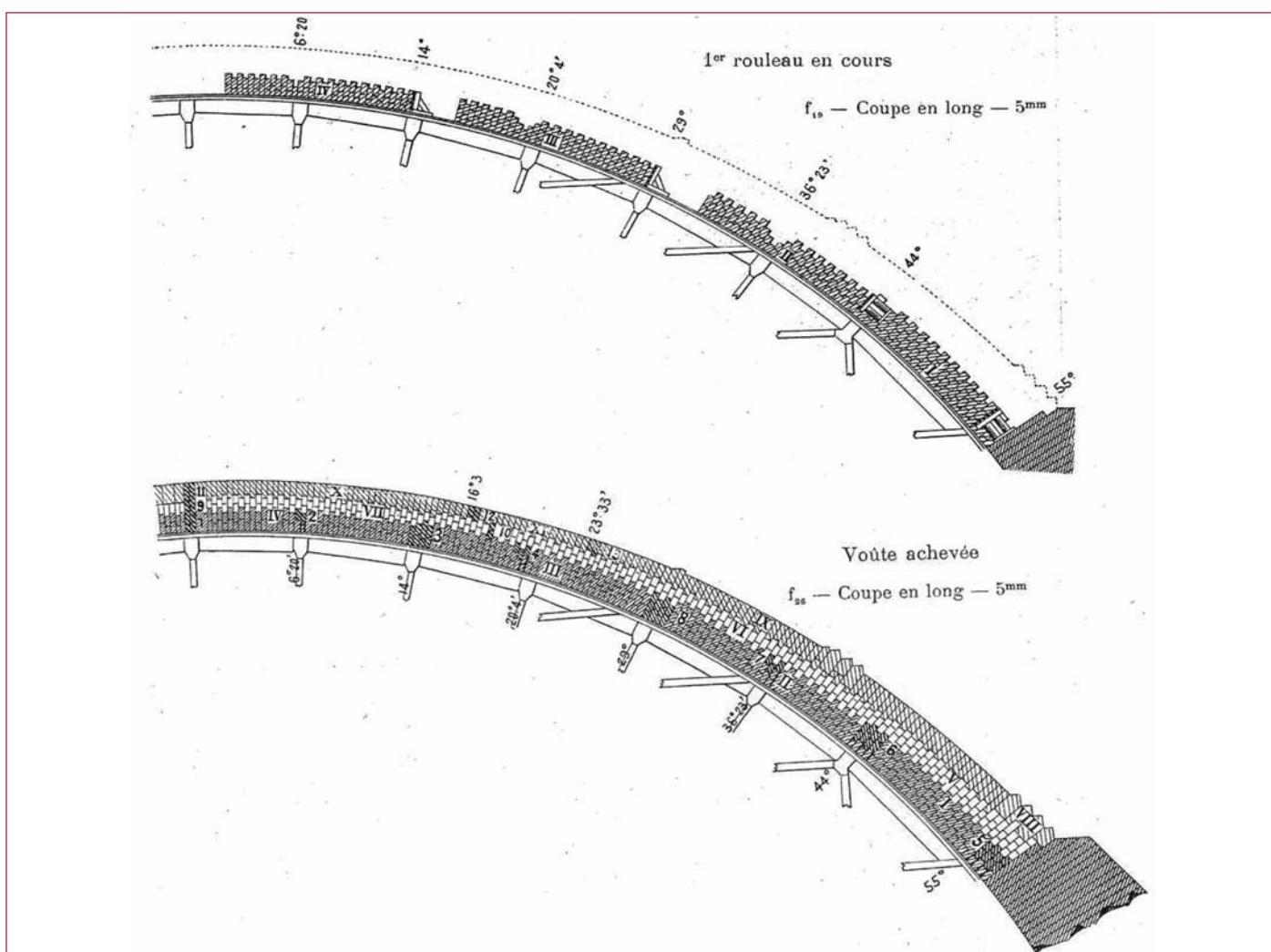


Figure 16. Pont de Lavaur, construction par rouleaux successifs, 1883 (Séjourné).

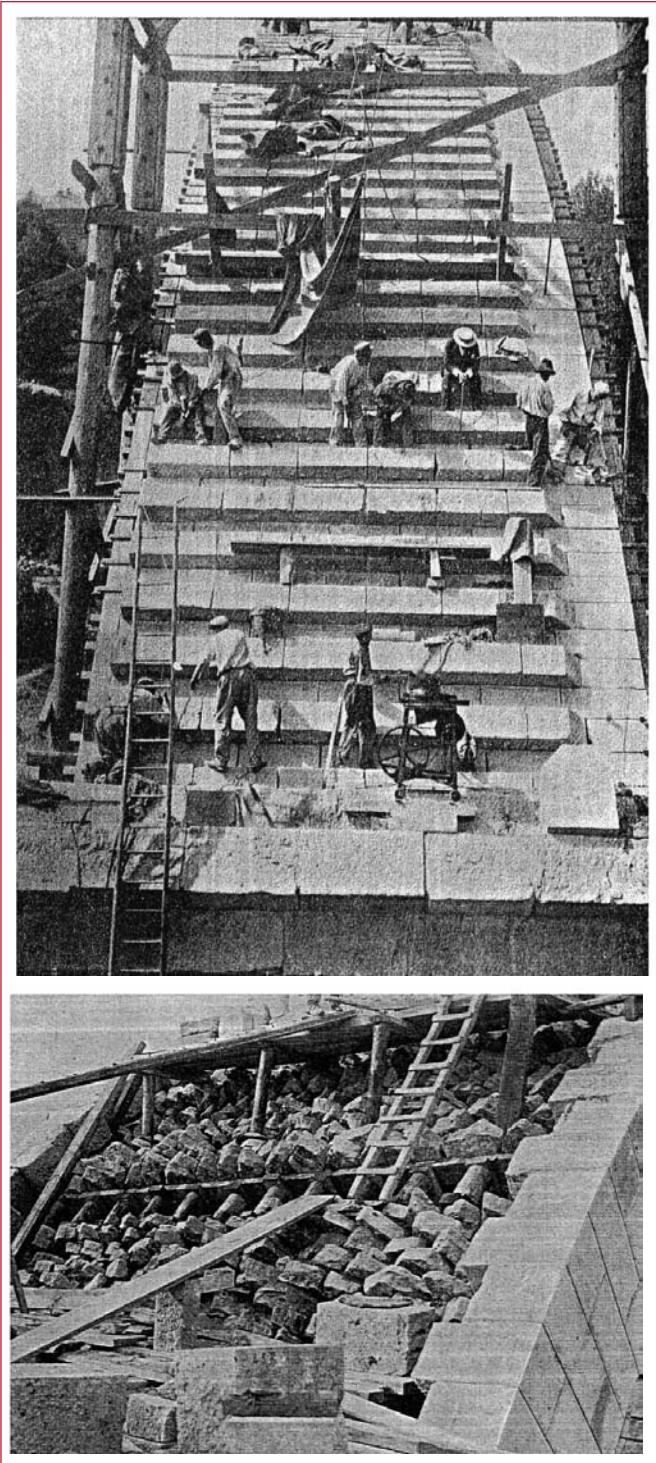


Figure 17. Illustration de deux techniques de constructions différentes : en haut : réalisation de la voûte en pierres de taille du pont du Luxembourg, 1901, construite par rouleaux successifs ; en bas : vue du queutage de la voûte du pont d'Epinay sur la Seine, 1906 (Séjourné, 1913).

Lavaur), les joints rayonnants sont continus. La taille des pierres permet de leur donner une épaisseur constante. En section transversales, les joints horizontaux sont continus. En fait, on peut décrire la douelle comme une succession radiaire de murs en moellons à assises horizontales, accolés les uns aux autres. Dans le cas du queutage en moellons équarris, la lecture du réseau de joints est plus difficile car la géométrie des blocs n'est pas régulière et l'épaisseur

des joints n'est pas constante. Cependant, les joints rayonnants sont continus. On peut remarquer la distinction d'appareillage entre le bandeau et le queutage.

Voyons maintenant la technique utilisée en 1870 pour les onze ouvrages en maçonnerie de la ligne Castres-Albi. La douelle est en brique, les bandeaux en pierre de taille. Une observation détaillée des plans d'exécution des ouvrages permet de comprendre la complexité de l'appareillage des briques. La position des briques est liée à la position des pierres du bandeau. A chaque bloc de pierre de taille correspond 7 lits de briques. Les briques sont en boutisse ou en panneresse comme les pierres du bandeau (Fig. 18). Seuls les joints rayonnants sont continus. Le nombre de couche est ajusté de façon à constituer une voûte d'épaisseur variable. La dernière couche est taillée pour former l'arc de cercle de l'extrados. La technique se différencie donc à la fois du rouleau simple avec queutage formés de blocs non équarris, et des deux techniques par rouleaux successifs décrites par Chaix et Séjourné.

L'épaisseur des briques étant constante, l'épaisseur des joints perpendiculaires à l'intrados est variable, et atteint en moyenne 1.5cm. Globalement, le rapport volume de mortier / volume de maçonnerie de briques est estimé à environ 25%, contre 10% pour les murs et le remplissage, et 2% pour le bandeau. On peut donc s'attendre à une plus grande souplesse de la douelle par rapport aux autres parties du pont, en particulier les bandeaux latéraux (ceci fut confirmé par les essais mécaniques réalisés au laboratoire, à Toulouse).

Selon Séjourné, la technique employée ici n'est pas bonne. En effet, dans le tome V des Grandes Voûtes, il note « *qu'il peut être dangereux de changer les matériaux parallèlement à la résultante R* », c'est-à-dire à l'axe des pressions, par exemple « *d'avoir des bandeaux en pierre de taille, c'est-à-dire avec peu de joints et des joints minces, et un corps en briques qui en a beaucoup ; ou bien de queuter une douelle en pierre de taille ou en moellons d'appareil par des moellons bruts, qui ont plus de joints et des joints plus épais. Il y aura tendance à séparation derrière les parties qui tassent moins, c'est-à-dire entre le bandeau et le queutage, entre la douelle et le queutage, entre le bandeau et la douelle* ». L'observation actuelle de l'état des ouvrages lui donne raison : des fissures longitudinales se sont ouvertes entre les bandeaux et la douelle sur plusieurs ouvrages.

9. CONCLUSION

La reconnaissance du génie civil des ouvrages d'art de la ligne de chemin de fer Castelnau-d'Albi, faite par recherche sur archives et par inspection sur site, a abouti à la collecte d'informations sur la conception des ponts en maçonnerie à la fin du 19^e siècle dans le sud de la France. Ces informations renseignent sur leur géométrie externe et interne, les matériaux de construction utilisés, et les techniques de mise en œuvre.

A la lecture des documents conservés par la SNCF, regroupant des pièces écrites et manuscrites ainsi que des plans, nous observons que la Compagnie des Chemins de fer du Midi effectuait un contrôle rigoureux du chantier et des matériaux mis en œuvre.

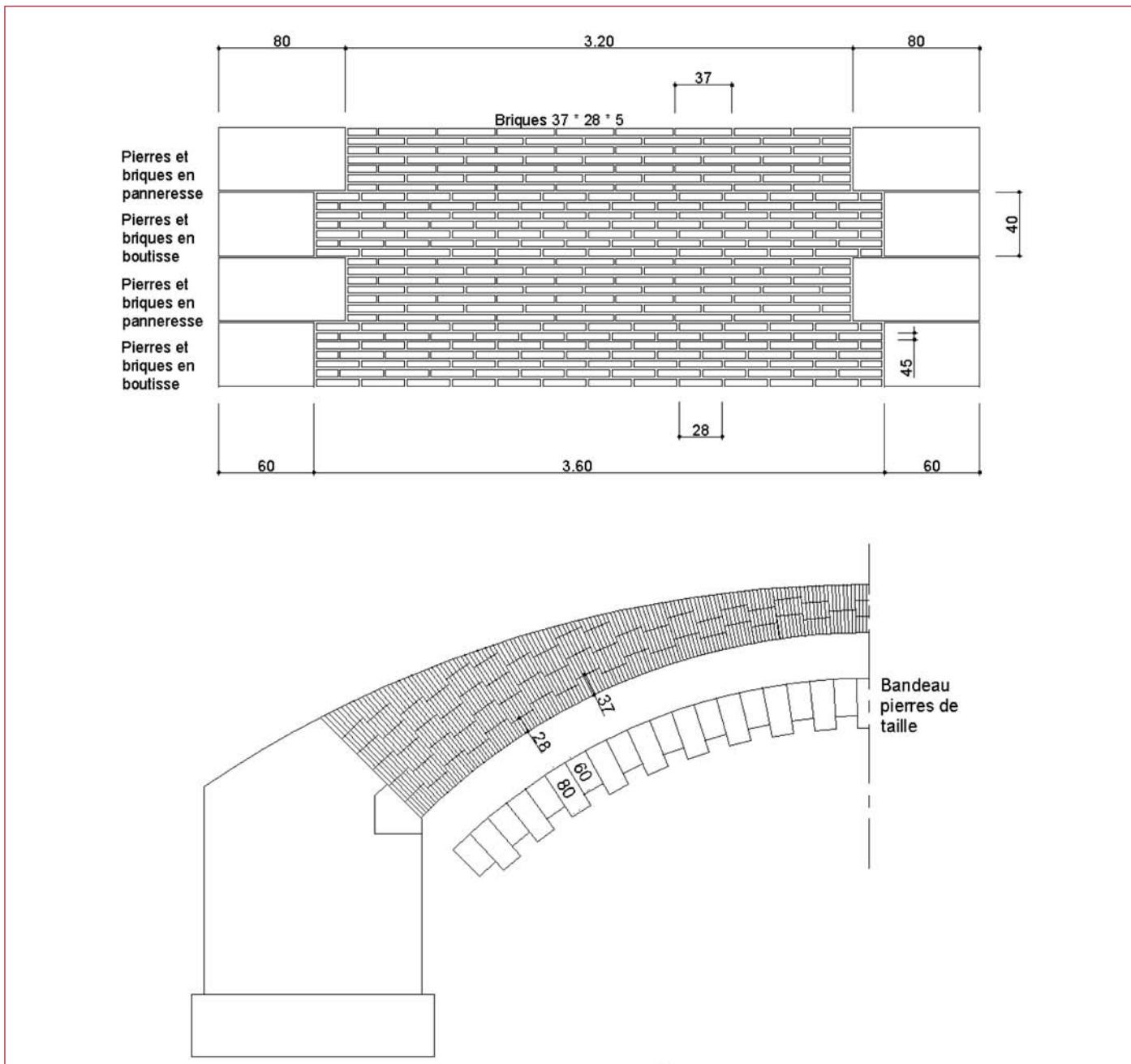


Figure 18. Appareillage des maçonneries de briques avec les bandeaux dans le cas des ponts de la ligne Castres-Albi, 1870. Exemple du pont la Millette.

La présentation du dossier de réclamation de l'entrepreneur Dumas et la réaction de la Compagnie qui a suivi, offrent une illustration concrète du métier de maçon dans la seconde moitié du 19^e siècle. Les propos du conducteur de travaux traduisent la difficulté d'extraire les matériaux de construction et de les transporter, et laissent supposer une forte contribution de la force humaine à défaut de machines. L'impossibilité d'éclairer le chantier la nuit obligea d'interrompre la pose d'un cintre et de laisser une charpente de plusieurs mètres de hauteur dans l'attente du lendemain, sans contreventement, et provoqua un désastre. Le rapport de force entre l'entrepreneur qui réclama des frais supplémentaires de dédommagement et l'ingénieur de la Compagnie des chemins de fer du Midi, qui réagit en stricte conformité des clauses du marché, est étonnamment moderne. Ce dossier de réclamation, par l'ensemble des

témoignages manuscrits qu'il contient, permet de recouper les informations données, par ailleurs, dans le dossier contractuel de construction. Il est donc l'un des éléments essentiels de notre enquête.

Les ponts en maçonnerie spéciaux, au nombre de onze entre Castres et Albi, constituent un ensemble homogène par la nature et la disposition de leur matériaux constitutifs, et diversifié par les formes géométriques. Les informations recueillies ont permis d'établir le profil type d'un pont en maçonnerie de cette ligne de chemin de fer.

Chacun de ces ouvrages se divise en 4 parties maitresses, chacune constituées de maçonneries différentes. Ils ont un corps de voûte en briques produites localement (notamment aux environs d'Albi), de deux bandeaux latéraux en pierre taillée avec précision et posées avec très peu de mortier, de deux murs tympans en maçonnerie de moellons

taillés (à assise horizontale ou à joints incertains), et d'un remplissage en maçonnerie de moellons bruts. Les pierres étaient extraites au fur et à mesure de l'avancement du chantier, dans un périmètre limité à quelques kilomètres, notamment dans les carrières de calcaire de Lautrec. Les mortiers utilisés pour les joints étaient formés d'un mélange de sable et de chaux hydraulique, provenant des fours du département (Tarn), et jamais de ciment. Ainsi, le lieu de provenance de tous ces matériaux se situe à moins de 40km du lieu de construction. Cette similitude donne un caractère régional à ces ouvrages d'art.

La pose des briques et des blocs de pierre était exécutée avec des techniques strictes, de sorte que les joints aient une épaisseur en tout point inférieure à une valeur seuil imposée, et qu'il n'y ait pas de vides. Toutes les maçonneries étaient rejoointoyées. On note en particulier, que les remplissages étaient formés d'une maçonnerie de qualité, globalement homogène et cohérente, et non de sable ou d'un mélange de matériaux divers comme on pourrait le croire.

L'appareillage des douelles est complexe et se distingue des techniques couramment employées à cette époque : le rouleau unique constitué d'un queutage en moellons ordinaires, et les rouleaux successifs. Il s'agit d'un appareillage spécifique, adapté à l'utilisation des briques à la place des pierres. Il serait intéressant d'étendre l'aire géographique d'étude pour engager une comparaison avec d'autres voûtes faites avec des briques de formats différents.

Le mode constructif choisi il y a 130 ans a une influence directe sur le comportement mécanique des voûtes depuis la mise en service des ouvrages. Les désordres observés, prévisibles dès 1880, le prouvent. Ils sont liés à des mécanismes internes longitudinaux et transversaux, induits par le choix de maçonneries aux rigidités différentes.

Cette recherche historique et technique confirme que, dans le cadre d'une requalification d'un pont en maçonnerie, une analyse détaillée préalable de la technologie de l'ouvrage est indispensable. Elle doit mettre en évidence, autant que possible, la nature des différentes maçonneries en présence et leur nombre, la qualité des blocs (pierres ou briques) et des joints de mortier, l'appareillage et le phasage de mise en œuvre adopté par les concepteurs de ces ouvrages d'art. Leur comportement mécanique actuel en dépend.

10. BIBLIOGRAPHIE

- Archives de la SNCF. Gare Matabiau. Dossier de la ligne 736 (sans classement).
- Archives SNCF, Toulouse. Rapport du contrôleur SNCF, région de Toulouse, 26 novembre 1973.
- Banaudo J., *Trains oubliés, le P-O, le Midi*, volume 3. Editions du Cabri, 1982.
- Caron F. et al. *Le patrimoine de la SNCF et des chemins de fer français*, Paris : Flohic Editions, 1999.
- Chaix J., *Traité des ponts*, tome 2, Ponts en maçonnerie, Paris : Ed. Chairgrasse fils, 1890.

- Debauve, *Manuel de l'ingénieur des Ponts et Chaussée*, 20 fasc. Paris: Dunod, 1873.
- Degrard E., Résal J., *Ponts en maçonnerie*, Paris : Baudry & Cie, Encyclopédie des travaux publics, 1888.
- Delbecq J.M., Michotey J.L., Simonet P.T., « Calcul, désordres, réparation et modernisation des ponts en maçonnerie », revue Travaux, déc. 1981.
- Delbecq J.M., SETRA. *Les ponts en maçonnerie, historique, stabilité, utilisation du programme VOUTE*, 1982.
- Domède N., *Méthode de requalification des ponts en maçonnerie*, thèse de doctorat, INSA de Toulouse, LMDC : 2006.
- Domède N., « La mécanisation de la briqueterie Gélis (1924 – 1990) d'après la description et les dessins de ses machines », dans *Documents d'histoire des techniques n°13 « Terre crue, terre cuite, recueil d'écrits sur la construction »*, Paris : Ibis Presse, CDHT, EHESS, 2004.
- Domède N., Pons G., Sellier A., Fritih Y., « Mechanical behaviour of ancient masonry », *Materials & Structures*, DOI 10.1617/s11527-008-9372-z, 2008.
- Gay C., *Ponts en maçonnerie*, Paris : librairie Baillière et fils, 1924.
- Heymann J., *Arches, vaults and buttresses: masonry structures and their engineering*, collected studies series, Norfolk, GB, 1996.
- Hugues T.G., Blackler M.J., « A review of the UK masonry arch assessment methods », *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures & Buildings*, n°122, Aug. 1997, pp. 305-315.
- Latgé A., Rapport du Commissaire de Vérification sur les apports de la Société Anonyme des Chaux et Ciments de Saint-Martin-Damiatte (Tarn), Albi : imprimerie coopérative du Sud-Ouest, 1905.
- Nègre V., *Matériaux et construction dans l'architecture civile du Midi Toulousain, 1770-1914*, Direction technique de l'ANAH, 1996. 120p.
- Nègre V., « Les Briqueteries de la région toulousaine au XIX^e siècle », *L'Archéologie industrielle en France*, n°39, décembre 2001, pp. 20-28.
- Orban Z., UIC (Union Internationale des Chemin de fer), Improving assessment optimisation of maintenance and development of database for masonry arch bridges, progress report, 9 june 2005.
- Séjourné P., *Grandes voûtes*, Bourges : imprimerie Vve Tardy, 1913, 6 tomes.
- SETRA, IQOA – PONTS, Campagne d'évaluation 2004, dossier national, septembre 2005.
- SNCF, direction de l'ingénierie, *Prescriptions techniques pour la surveillance et la maintenance des ouvrages d'art*, chapitre Ouvrages en maçonnerie, Référentiel infrastructure, document d'application, octobre 2002.
- Vieu B., « La ligne de Castelnau-d'À Rodez », dans *Connaissance du rail*, n°70 et 71, septembre/octobre 1986. pp 4-10, 12-14, 31-34.