



# Reconnaissance et recueil des données nécessaires à l'évaluation de la stabilité d'un pont voûte en maçonneries avec le logiciel « Voûte »

Avril 2013



**Centre d'études Techniques de l'équipement de Lyon**

Département Laboratoire de Lyon -Division Ouvrages d'Art  
46, rue Saint Théobald BP 128 – 38081 l'Isle d'Abeau Cédex  
tél : 04 74 27 53 00 / fax : 04 74 27 68 75

Responsable de domaine : Didier GERMAIN

Auteurs de l'étude : Bernard JACQUIER

Vérifié et approuvé par : Didier GERMAIN

# Sommaire

1	Introduction.....	4
2	Données nécessaires.....	4
2.1	Données pour vérification de la stabilité de la voûte.....	4
2.1.1	Géométrie de l'ouvrage.....	4
2.1.2	Caractéristiques des matériaux de la voûte.....	4
2.1.3	Charges sur l'ouvrage.....	4
2.2	Données pour vérification de la stabilité des appuis.....	4
2.2.1	Géométrie des appuis.....	4
2.2.2	Caractéristiques des matériaux des appuis.....	4
2.2.3	Caractéristiques du sol.....	4
2.2.4	Réactions d'appuis.....	4
2.2.5	Autres.....	5
3	Reconnaissances à effectuer.....	5
3.1	Analyse du dossier d'ouvrage.....	5
3.1.1	Plans et documents divers sur construction et travaux.....	5
3.1.2	Inspection détaillée.....	5
3.2	Reconnaissances sur voûte.....	5
3.2.1	Détermination de la géométrie de l'ouvrage.....	6
3.2.2	Détermination des caractéristiques des matériaux de la voûte.....	7
3.3	Reconnaissances sur appuis.....	9
3.3.1	Généralités.....	9
3.3.2	Géométrie des appuis.....	9
3.3.3	Caractéristiques des matériaux des appuis.....	10
3.3.4	Caractéristiques du sol.....	10

# 1 Introduction

La stabilité d'un ouvrage en maçonneries dépend de la stabilité de la voûte et de la stabilité de ces appuis.

Ce document définit les données à obtenir, nécessaires à la vérification de la stabilité de l'ouvrage et les reconnaissances à effectuer pour obtenir ces données.

## 2 Données nécessaires

### 2.1 Données pour vérification de la stabilité de la voûte

#### 2.1.1 Géométrie de l'ouvrage

Coupe longitudinale de l'ouvrage avec géométrie de l'intrados de la voûte et géométrie de l'extrados de la voûte, permettant de déterminer la hauteur de matériaux au-dessus de la voûte.

Coupe transversale de l'ouvrage à la clef de la voûte.

#### 2.1.2 Caractéristiques des matériaux de la voûte

Résistance à la compression des pierres et du mortier pour déterminer la résistance à la compression des maçonneries de la voûte.

Masse volumique des matériaux de la voûte.

Masse volumique des matériaux de remplissage au-dessus de la voûte.

Coefficient de poussée des terres des matériaux de remplissage.

#### 2.1.3 Charges sur l'ouvrage

Intensité, inclinaison et répartition des différentes charges agissant sur la voûte.

### 2.2 Données pour vérification de la stabilité des appuis

#### 2.2.1 Géométrie des appuis

Type d'appuis.

Géométrie des appuis, (longueur, largeur, hauteur, vides éventuels dans appuis, niveau du sol vers appuis)

#### 2.2.2 Caractéristiques des matériaux des appuis

Résistance à la compression des maçonneries des appuis.

Masse volumique des matériaux des appuis.

#### 2.2.3 Caractéristiques du sol

Natures des matériaux du sol.

Caractéristiques géotechniques du sol de fondation.

Si ouvrage sur cours d'eau, hauteur de sol affouillable.

#### 2.2.4 Réactions d'appuis

Intensité, inclinaison et point de passage des réactions d'appuis des voûtes en tête des appuis

### **2.2.5 Autres**

Si ouvrages sur cours d'eau :

- niveau d'eau à l'étiage,
- niveau de crue décennale et centennale.

Intensité des chocs sur appuis, si ouvrage sur route ou voie d'eau navigable.

## **3 Reconnaissances à effectuer**

### **3.1 Analyse du dossier d'ouvrage**

La première opération à effectuer est de rechercher le dossier d'ouvrage qui devrait comprendre à la fois les plans d'origine (que l'on retrouve très rarement) et tout le suivi ultérieur : travaux effectués et inspections faites sur l'ouvrage.

#### **3.1.1 Plans et documents divers sur construction et travaux**

La recherche de ces documents, s'ils ne sont pas détenus par le maître d'ouvrage, pourra se faire aux archives départementales ou chez les anciens maîtres d'ouvrage (ouvrages déclassés ou rétrocedés). Elle pourra être complétée par une recherche documentaire classique et sur internet.

Si on a la totalité du dossier d'ouvrage, on a en général une grande partie des éléments nécessaires à la vérification de la stabilité de l'ouvrage : géométrie, matériaux, mode de construction, étude géologique...

Les données fournies par ces documents doivent être validés par des investigations complémentaires plus sommaires que celles effectuées en l'absence de ces documents :

- vérification des côtes principales,
- vérification des épaisseurs de voûtes à la clef,
- vérification de la nature et des propriétés des matériaux par rapport à ce qui est indiqué dans le dossier,
- confirmation de l'étude géologique...

Il est utile de comparer les valeurs d'épaisseur de la voûte à la clef et aux reins, fournies par ces documents avec les valeurs données par les formules classiques utilisées à l'époque de la construction de l'ouvrage (voir documents du SETRA « Technologies des maçonneries » annexes, « Les ponts en maçonnerie » fascicule 1 « Historique et constitution » paragraphe 3,1,3,1, ou « Cours de ponts en maçonnerie » de l'ENPC par Sénéc de 1951, ou l'on trouve les formules de Perronet, Dupuit, Croisette-Desnoyer et Séjourné.

#### **3.1.2 Inspection détaillée**

Une inspection détaillée récente est nécessaire pour évaluer les évolutions de l'ouvrage par rapport aux documents anciens et modifier « éventuellement les hypothèses de calcul. En particulier, il sera tenu compte des pertes de matière, pierres manquantes dans la voûte, désorganisation de maçonneries ou creusement des joints qui correspondent à une diminution de section résistante. Les fissures entre tympans et voûte, modifient aussi le schéma de calcul, la largeur résistante après diffusion est moins importante. Seule la partie de voûte entre les tympans peut être prise en compte.

### **3.2 Reconnaissances sur voûte**

Les reconnaissances sur voûtes servent à palier aux insuffisances du dossier ou à l'absence de dossier et à la confirmation de données.

### 3.2.1 Détermination de la géométrie de l'ouvrage

#### **Géométrie des parties visibles de l'intrados, profil en travers fonctionnel et profil en long de la chaussée**

Ces caractéristiques sont déterminées sur place par une personne qualifiée avec des outils de mesure courants, mètre, décamètre, perche télescopique, distancemètre laser, niveaux ou il peut être demandé un relevé topographique à un géomètre.

Les techniques à employer dépendent surtout des difficultés d'accès au-dessous de l'ouvrage (différentes pour un petit ouvrage sur une voie routière et un grand arc sur un ravin ou sur un grand cours d'eau dont la base des piédroits est difficilement accessible).

Ces mesures permettent de réaliser le contour des coupes transversales et longitudinales de l'ouvrage.

#### **Géométrie des parties cachées de l'extrados**

##### **Généralités**

Pour vérifier la stabilité de la voûte, il est nécessaire d'avoir son épaisseur sur tout son développé. La forme de l'extrados est, sauf pour les voûtes ogivales et les arcs surbaissés, quasiment toujours composé d'un arc de cercle à sommet à l'axe de la voûte, prolongé, aux reins par un segment de droite tangent.

Pour les arcs surbaissés, c'est en général un seul arc de cercle allant jusqu'aux culées, et pour les voûtes ogivales, deux arcs de cercles symétriques, ayant leur origine commune à la verticale de la clef. La connaissance du niveau de l'extrados, à la clef, à un point situé entre le quart et le sixième de la portée en partant du piédroit et à environ 1 m à l'arrière des piédroits, permet de définir la forme de cet extrados pour les ouvrages classiques.

Il est à noter que l'épaisseur du corps de voûte, n'a en général rien à voir avec l'épaisseur du bandeau.

Le moyen de détermination usuel de l'épaisseur de la voûte est la réalisation de sondages.

La nature et la position des sondages dépend surtout des possibilités d'accès, des épaisseurs de matériaux au-dessus du corps de voûte et du matériel présent sur l'ouvrage. Par exemple la présence de carottier nécessaire à la réalisation de sondages géotechnique peut conduire à réaliser toutes les opérations avec ce matériel.

Avant sondages, à partir des relevés de l'intrados et de la chaussée et des valeurs données par les formules de calcul des épaisseurs de voûte citées en 2,1,1, il sera fait une coupe longitudinale approximative de l'ouvrage et suivant les positions et inclinaison des sondages prévus, il sera déterminé approximativement les résultats qu'ils devraient donner. Si les résultats sur le terrain sont sensiblement différents, il faut consulter un spécialiste, pour orienter vers de nouvelles investigations, si possible avant départ des engins de sondage.

Les murs tympan ayant un fruit ou des redans, il est conseillé d'effectuer les sondages à proximité de l'axe de l'ouvrage pour éviter aux sondages de traverser la face arrière de ces murs plutôt que l'extrados de la voûte lorsqu'on a de fortes épaisseur de remplissage sur voûte.

L'interprétation des sondages sera faite par un spécialiste, car il est souvent difficile d'apprécier le niveau où commence réellement les maçonneries de voûte, notamment quand le remplissage dans ces couches inférieures contient beaucoup de résidus de taille des pierres ou des pierres de mauvaise qualité non employées.

##### **Sondages par-dessus**

Pour un petit ouvrage classique sur une voie peu circulée, sur une voie pouvant être coupée, ou sur un voie où l'on peut installer un alternat, les sondages seront exécutés depuis la chaussée. On réalise, en général, un sondage à la pelle en clef de voûte et deux sondages à la pelle ou au carottier aux emplacements définis précédemment sur une demie voûte, plus un sondage complémentaire de contrôle sur l'autre demie voûte, symétriquement au sondage entre clef et piédroit déjà réalisé. L'implantation en plan, les niveaux sur chaussée et l'inclinaison éventuelle des sondages doivent être relevés précisément.

Pour les très petits ouvrages, l'extrados peut être déterminé par une tranchée parallèle à l'axe longitudinal de l'ouvrage descendant jusqu'à l'extrados, suivi d'un relevé de cet extrados. Lors de sondages manuels, il faudra éviter de détériorer l'étanchéité sur voûte de l'ouvrage, et l'on profitera de ces fouilles pour évaluer l'état de cette étanchéité.

Après réalisation de sondages carottés, le trou sera rebouché avec un micro béton sans retrait jusqu'à une dizaine de centimètres au-dessus de l'extrados. Le reste du forage, dans l'épaisseur du remplissage sur voûte sera rempli de sable ou grave fine, puis dans l'épaisseur des couches de chaussée par des produits bitumineux.

#### **Sondages par-dessous**

S'il est difficile de travailler sur la chaussée et que l'intrados de l'ouvrage est accessible, les sondages seront exécutés en sous-face de la voûte. Le premier sondage sera effectué verticalement à la clef, le deuxième sera effectué perpendiculairement à l'intrados à mi-hauteur de la voûte (aux reins de la voûte) et le troisième à proximité de la liaison voûte piédroits (naissance de la voûte), avec une inclinaison à environ 45° par rapport à la verticale pour les voûtes en plein cintre, en ellipse ou anses de panier et perpendiculairement à l'intrados pour une voûte en arc de cercle. Les sondages seront arrêtés dans le remplissage sur voûte, une trentaine de centimètres après traversée des maçonneries. De même que pour les sondages sur chaussée, il sera exécuté un relevé précis des implantations et inclinaisons des sondages.

Les trous seront rebouchés par injection d'un mortier sans retrait.

#### **Auscultation radar**

Cette technique est actuellement plutôt au stade exploratoire et n'est pas applicable sur les ouvrages avec :

- remplissage en matériaux argileux,
- chape d'étanchéité en extrados en argile qui empêchent la propagation des ondes,
- avec une humidité importante et hétérogène du remplissage,
- chape d'étanchéité comportant une feuille métallique.

(Voir avec Laboratoire des Ponts et Chaussée d'Autun).

Cette technique, quand elle est applicable, permet de déterminer les épaisseurs des couches de chaussée, du matériau de remplissage et du corps de la voûte sur un profil longitudinal de l'ouvrage. Elle demande cependant des investigations complémentaires, car il est nécessaire de calibrer les résultats à partir d'observations et de mesures sur des prélèvements carottés ou issus de fouilles. Elle demande d'autre part un personnel particulièrement compétant pour la mise en œuvre et l'exploitation des résultats.

## **3.2.2 Détermination des caractéristiques des matériaux de la voûte**

### **Généralités**

Les données nécessaires, concernant les matériaux, pour vérifier la portance d'un pont en maçonneries avec le programme Voûte sont la résistance à la compression et la masse volumique des maçonneries de la voûte, la masse volumique et le coefficient de poussée des terres du matériau de remplissage. La résistance à la compression des maçonneries est déduite de celle des pierres ou briques et de celle du mortier de hourdage.

### **Pierres**

La résistance à la compression des pierres et leur masse volumique peuvent être obtenues par essais d'écrasement et mesure de masse volumique conformes aux normes les régissant (NF EN 1926, NF EN 772-1 et NF EN 1936), effectués sur des prélèvements faits sur l'ouvrage.

Pour les pierres anisotropes (calcaire en particulier), il est nécessaire de réaliser l'essai de compression perpendiculairement aux lits de la pierre, sans des efforts appliqués sur les

pierres en place dans la voûte.

Sur les ouvrages dont la totalité des maçonneries sont constituées du même matériaux, ce qui est le plus souvent le cas, les prélèvements peuvent être faits sur des éléments annexes de l'ouvrage, facilement accessible comme les plinthes ou parapets.

Des données sur les pierres peuvent aussi être obtenues, si leur nature et provenance peuvent être déterminées par un géologue, en utilisant le tableau, en annexe du document précité « Technologies des maçonneries », qui donne pour certaines pierres, la masse volumique et la résistance à la compression, ou si la provenance des pierres est connue, à partir du site Monumat (<http://monumat.brgm.fr>) du BRGM (Bureau de Recherche Géologique et Minière), qui recense la plupart des carrières en France et indique la densité et résistance à la compression minimum et maximum des pierres extraites.

Pour l'évaluation de la résistance à la compression des calcaires, on peut aussi utiliser la figure 2 du paragraphe 2,1,1,2,1 de l'ouvrage « Les ponts en maçonnerie » fascicule 1 « Historique et constitution », donnant la résistance à la compression en fonction de la densité apparente.

### **Briques**

La résistance à la compression peut être obtenue par essais d'écrasement sur briques provenant de l'ouvrage ou après mesure de la densité sur échantillons en utilisant un tableau de corrélation entre densité et résistance à la compression (voir « Les ponts en maçonnerie » fascicule 1 « Historique et constitution » page 24 tableau 2)

### **Mortier**

Il faut faire la différence entre mortier de surface de remplissage des joints et mortier de hourdage des pierres. L'ouvrage a pu être rejointoyé avec un mortier différent de celui employé pour la structure. Il est préférable de raisonner sur un échantillon prélevé sur des carottes faites dans la voûte

Il faut déterminer la classe du mortier suivant la classification du tableau 5 page 31 du fascicule précité.

Type de mortier	Résistance moyenne à la compression à 28 jours MPa
M1	20
M2	10
M3	5
M4	2,5

Il est difficile d'avoir des échantillons de la taille nécessaire pour faire des essais de compression. La détermination du type de mortier est donc souvent soumise à appréciation du projeteur (Mortier M1 difficile à rayer avec un tournevis, mortier M4 se désagrège facilement au grattage).

Pour les ouvrages ayant une déficience d'étanchéité (présence de nombreuses stalactites de calcite réparties sur l'intrados), il faut en général considérer que l'on a un mortier de type M1, car la chaux du mortier a été dissoute par les eaux d'infiltration chargées de gaz carbonique et les joints ne sont plus remplis que d'un sable légèrement rigidifié par des restes de liant quand ils ne sont pas entièrement vides et que l'on a un appui pierre sur pierre

Recherche : Il serait intéressant de faire des mortiers des 4 types pour trouver une méthode de caractérisation.

## Maçonneries

La résistance des maçonneries (ensemble des pierres ou briques avec mortier de hourdage) se déduit de celle de ces constituants en utilisant le tableau 4, page 31 du fascicule précité.

Résistance à la compression des pierres		Type de mortier			
		M4~2,5MPa	M3~5MPa	M2~10MPa	M1~20MPa
Fpk	Fpm	Résistance à la compression des maçonneries			
2,0	2,5	1,3	1,4	1,4	1,4
5,0	6,5	2,9	3,3	3,4	3,5
7,5	10,0	3,5	4,1	4,5	4,9
10,0	13,0	4,1	4,7	5,3	6,2
15,0	20,0	5,1	5,9	6,7	8,2
20,0	26,5	6,1	6,9	8,0	9,7
30,0	40,0	7,2	8,6	10,2	12,0
40,0	53,0	8,1	10,4	12,0	14,3
60,0	80,0			16,0	18,8

## Matériaux de remplissage

Les données requises concernant les matériaux de remplissage pour vérifier une voûte sont la masse volumique et le coefficient de poussée des terres.

Ces valeurs peuvent être obtenues à partir de mesures faites sur échantillons prélevés, mais il est usuel de prendre une masse volumique de 2T/m<sup>3</sup> pour les remblais et un coefficient de poussée des terres entre 0,5 et 1. Cette valeur influe peu pour le coefficient de sécurité à la rupture de la voûte mais peut faire varier sensiblement les réactions d'appuis et l'inclinaison de la résultante sur les joints. Il est donc conseillé de faire un calcul en fourchette.

## 3.3 Reconnaissances sur appuis

### 3.3.1 Généralités

Les reconnaissances sur appuis comprend les reconnaissances sur l'appui lui-même (géométrie et matériaux), ainsi que celles sur le sol de fondation.

### 3.3.2 Géométrie des appuis

Elle est déterminée par des relevés topographiques des parties visibles, complétées par des sondages pour les parties enterrées.

Il faut au minimum par appui un sondage vertical qui permet de déterminer le niveau de la base de la fondation. Ce sondage est à prolonger en dessous (au minimum 3 fois la largeur présumée de la base de la fondation) pour avoir les caractéristiques géotechniques du sol de fondation.

Pour les piles des sondages carottés transversaux horizontaux sont souvent nécessaires pour déterminer les caractéristiques des matériaux de constitution, car on a souvent une enceinte périphérique en bonnes maçonneries avec un remplissage en partie centrale avec des matériaux de nettement moins bonne qualité.

Pour déterminer la longueur d'une culée, on peut, suivant les conditions d'accès, réaliser un sondage horizontal dans le mur de front ou des sondages verticaux successif depuis la

chaussée (méthode moins précise). La réalisation de sondages horizontaux à 2 niveaux dans le mur de fronts permet de déterminer assez précisément la pente de l'arrière de la culée.

Pour les ouvrages sur pieux bois, si l'on ne dispose pas d'archives sur l'ouvrage, il est quasiment impossible de déterminer le maillage et la longueur de ces pieux et il n'est pas possible de faire une vérification précise de la portance des appuis.

### **3.3.3 Caractéristiques des matériaux des appuis**

Il sera appliqué les mêmes principes que pour les matériaux de la voûte.

### **3.3.4 Caractéristiques du sol**

Les données recherchées sont celles d'une étude géotechnique courante pour un appui :

- Natures des matériaux du sol.
- Caractéristiques géotechniques de ces matériaux (module pressiométrique, pression limite, angle de frottement interne)

Si l'ouvrage est sur cours d'eau, il faut aussi déterminer la hauteur de sol affouillable ainsi que les niveaux des eaux nécessaires aux diverses situations de calcul.