

Méthode de requalification des ponts en maçonnerie

Nathalie Domède

Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions – INSA, UPS – 135 avenue de Rangueil 31077 Toulouse CEDEX 4

RESUME. L'objectif de la recherche présentée ici est de développer une méthode de requalification des ponts voûtes en maçonnerie par le re-calcul. La méthode a été développée et mise en œuvre sur une voûte surbaissée construite en 1870 dans le Tarn. Elle est divisée en trois étapes. La première étape est une recherche historique nécessaire pour connaître de façon précise la constitution de l'ouvrage (géométrie, matériaux). La seconde étape est expérimentale. Elle a pour but de déterminer la loi de comportement homogénéisée des maçonneries constitutives de l'ouvrage, et une loi d'interface entre les blocs et les joints de mortier. La troisième étape est le calcul de l'ouvrage, en 3D, à l'aide de la méthode aux éléments finis. L'originalité du modèle est d'intégrer des « éléments joints » et des macro-éléments homogénéisés. Une étude paramétrique a permis de déceler les facteurs influençant la sécurité du pont.

MOTS-CLÉS : requalification, maçonnerie, voûtes.

ABSTRACT. The aim of this research is to built an assessment method for masonry arch bridges by modelling and computing. The method was developed and tried on a vault build in 1870 in south-west of France. It is made of three steps. The first one is an historic research. It is necessary to know the exact bridge constitution (geometry, materials). The second step is an experimental approach whose aim is to establish the mechanic behaviour law of the masonries after homogenisation, and an interface law between blocks and mortar bond. The third step is the 3D computing of the bridge, using a finite element method. The specificity of the model is to include "joint elements" and homogenised macro-elements. A parametric study has established the factors involved in the bridge security.

KEYWORDS : assessment, masonry, arch bridges.

1. INTRODUCTION

Pour les maîtres d'ouvrage gestionnaires d'un parc d'ouvrages d'art ancien, la maintenance des ponts en maçonnerie est une nécessité. Face à des besoins évolutifs, il ne s'agit pas seulement de « conservation » mais aussi de « requalification » du patrimoine, dont le but est de s'assurer de l'aptitude au service d'ouvrages existants et vieillissants compte tenu de l'évolution des sollicitations (augmentation du trafic, véhicules plus rapides et plus lourds). Le « re-calcul » des ponts voûtes s'inscrit dans cette démarche.

Rappelons brièvement les outils de calcul dont les ingénieurs disposent, et qui sont utilisés aujourd'hui. La méthode publiée par Méry en 1830 (décrite notamment par Séjourné en 1913), est une méthode graphique qui consiste à vérifier qu'il existe un équilibre possible des forces dans la voûte. Elle ne donne pas les contraintes réellement atteintes. Le programme VOUTE, développé par J-M Delbecq en 1980 pour le compte du SETRA, effectue un calcul à la rupture, sans connaître la loi de comportement des matériaux. Elle recherche l'équilibre limite des efforts et fournit un coefficient de

sécurité égal au rapport de la charge limite à la charge réelle pondérée. Ces deux outils ont en commun les hypothèses suivantes : la voûte est le seul élément résistant du pont, elle est bi-encastree, les actions sont des charges gravitaires. Il s'agit, dans les deux cas, d'un calcul plan (2D), qui s'affranchit de la connaissance des lois de comportements mécaniques des matériaux de la voûte.

Les ingénieurs peuvent également se lancer dans un calcul par la méthode des éléments finis (MEF) avec des logiciels commercialisés tels que ROBOT. Ces logiciels sont, en général, limités aux matériaux typiques du génie civil : acier, béton, bois. La question qui se pose au calculateur est alors de choisir les paramètres pour adapter l'outil à la maçonnerie (module d'élasticité et la résistance à la compression).

Très peu de recherches universitaires ont été publiées dans le domaine du calcul des ponts voûtés en trois dimensions. Citons les travaux de T. Boothby et P. Fanning (2001) qui ont utilisé la MEF (code ANSYS) pour calculer des ponts en pierre d'Irlande. L'intérêt de cette recherche est d'avoir prouvé la complexité des phénomènes internes transversaux, et la participation de toutes les parties de l'ouvrage à la stabilité globale. Cependant, le choix de la loi de comportement des maçonneries, fait par les auteurs, n'est apprécié que par comparaison avec les résultats d'essais en vraie grandeur réalisés sur le pont, et non sur des échantillons des matériaux.

Ainsi, il n'existe pas d'outil simple et performant intégrant le comportement réel de toutes les parties du pont étudié, en service et jusqu'à la ruine, dans les trois dimensions de l'espace. Le but de la recherche qui est présentée ici est de progresser dans ce domaine et de proposer une méthode de calcul réaliste des ponts maçonnés.

La méthode exposée comprend trois phases successives. Il s'agit dans un premier temps de rassembler toutes les informations nécessaires sur l'histoire de l'ouvrage et sa composition par une recherche historique. Dans un deuxième temps, les lois de comportements des matériaux constitutifs de l'ouvrage sont déterminées expérimentalement. Enfin, dans la troisième phase, un modèle de calcul est construit, en trois dimensions, à l'aide de la méthode de calcul aux éléments finis. Ce qui fait la spécificité de notre modèle est la présence d'éléments joints qui restituent la capacité des matériaux à se fissurer en traction, tout en créant des possibilités de glissement entre les blocs.

Nous allons présenter successivement chacune de ces trois phases, dans leurs principes et résultats généraux, sur la base d'une étude de cas : le pont de la Millette (figure 1).



Figure 1 : Le pont de la Millette (Tarn).

2. PHASE 1 : RECHERCHE HISTORIQUE

Dans le cadre de cette recherche, un partenaire a été choisi : Réseau Ferré de France. L'aire d'étude a été restreinte à une ligne de chemin de fer construite en 1870 par la Compagnie des Chemins de fer du Midi, entre Castelnaudary et Albi (Tarn). L'étude des archives disponibles, constituées de plans et de pièces écrites, a abouti à la connaissance précise des ouvrages de la ligne (11 ponts en maçonnerie). Les ponts en maçonnerie constituent un ensemble homogène par la nature et la

disposition de leurs matériaux constitutifs, et très diversifiés par les formes géométriques. Cette similitude donne un caractère régional à ces ouvrages d'art. Listons les matériaux en présence (figure 2) : corps de voûte en maçonnerie de briques pleines d'Albi, bandeaux latéraux et sommiers en pierre de taille (calcaire de Lautrec), murs tympans en maçonnerie de moellons en opus incertum, remplissage en maçonnerie de moellons bruts. Il faut noter que tous les mortiers sont des mortiers de chaux hydraulique à l'exclusion du ciment (chaufourniers du Tarn).

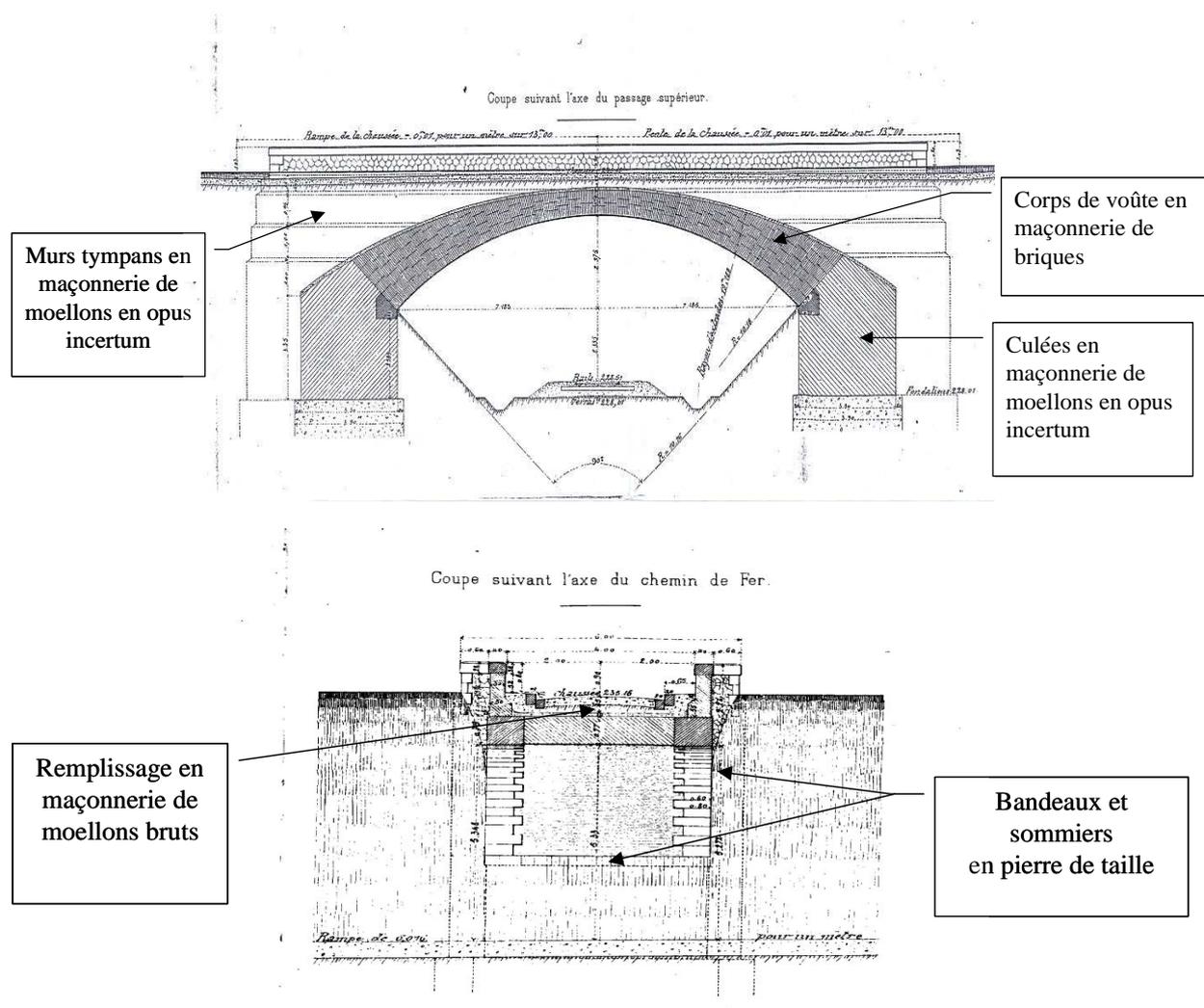


Figure 2 : Plans du pont de la Millette (Archives SNCF, 1870).

3. PHASE 2 : RECHERCHE EXPERIMENTALE

Il s'agit, dans cette seconde phase, de déterminer la loi de comportement mécanique des matériaux identifiés par la phase 1. Une étude bibliographique montre qu'il n'existe pas de données suffisantes sur les matériaux anciens, notamment les matériaux à caractère régional tel que la brique pleine de grand format du sud-ouest, et les pierres extraites de petites carrières qui ne sont plus exploitées. Il faut donc procéder à une identification spécifique.

Nous avons réalisé une étude expérimentale afin de déterminer, dans un premier temps, le comportement des matériaux de base (brique, mortier de chaux et pierre calcaire), puis, dans un

second temps, celui des maçonneries. Concernant le mortier de chaux, précisons qu'une étude de vieillissement a été réalisée, par carbonatation accélérée, de façon à établir le rapport entre le comportement à 1 mois et le comportement à long terme.

A titre d'exemple, la figure 4 présente les résultats expérimentaux et le modèle proposé pour la brique pleine et le mortier de chaux vieilli, la figure 5 pour le composite brique – mortier. Les murets construits pour ces essais sont visibles sur la figure 3.



Figure 3 : Essais sur maçonnerie brique-mortier (Photos après rupture).

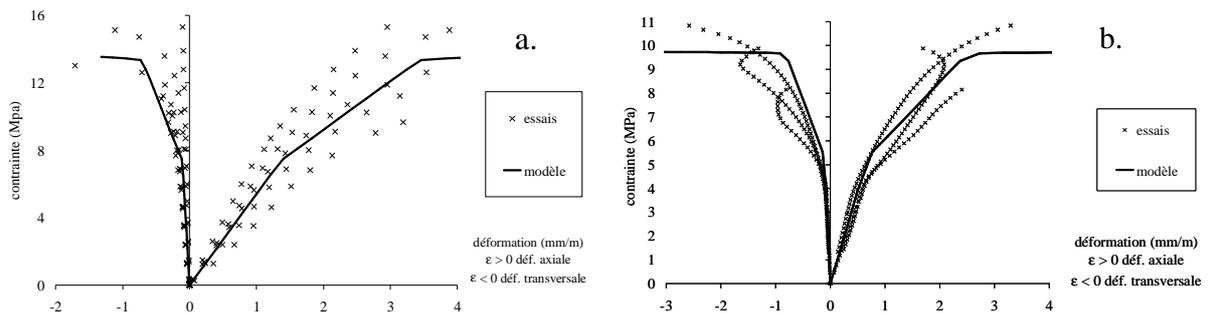


Figure 4 : a) Essais et modélisation des briques ; b) Essais et modélisation sur mortier de chaux.

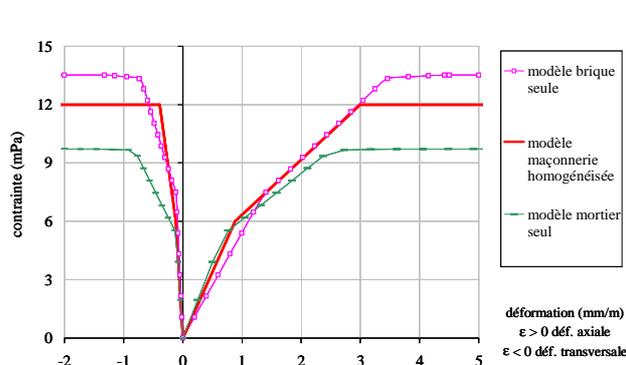


Figure 5 : Comportement de la maçonnerie de briques du sud-ouest.

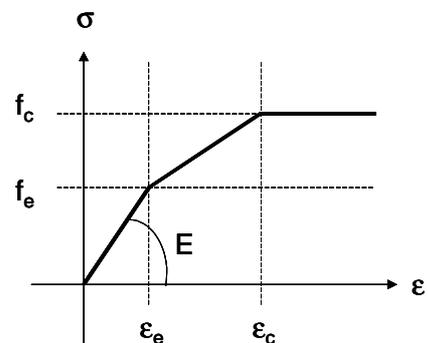


Figure 6 : Allure de la loi de comportement théorique des matériaux

Ainsi, notre étude a permis d'établir une loi de comportement théorique isotrope homogène pour chaque matériau de base, ainsi que pour les composites. La modélisation proposée, pour tous les matériaux en présence (figure 6), comprend une partie élastique linéaire (jusqu'à 40% à 50% de la contrainte de rupture selon les matériaux), suivie d'une phase non linéaire rectiligne jusqu'à un palier d'écoulement horizontal. Le critère de plasticité associé est le critère de Von mises.

Les caractéristiques des matériaux sont regroupées dans le tableau 1.

	Voûte en briques	Bandeau et sommier en pierre	Murs tympans en moellons	Remplissage en moellons bruts
E (MPa)	6800	28100	21700	21700
ν	0.13	0.25	0.22	0.22
f_e / f_c	0.5	0.4	0.4	0.4
f_c (MPa)	12	49	42	42
ϵ_c (mm/m)	3	2.5	3	3

Tableau 1 : Caractéristiques mécaniques des maçonneries des ponts étudiés.

Le comportement théorique est identique en traction et en compression. Ceci ne correspond pas à la réalité, puisque la résistance à la traction observée expérimentalement est très faible. C'est la raison pour laquelle, dans notre modèle théorique, les phénomènes de fissuration sont concentrés dans les éléments joints, prévus à cet effet. Ils représentent le comportement de la surface de contact entre le mortier et la brique. Les éléments fins correspondants sont infiniment minces. Ils ont un comportement différent en traction et en compression (représentation théorique figure 7). Leur critère de plasticité est de type Coulomb.

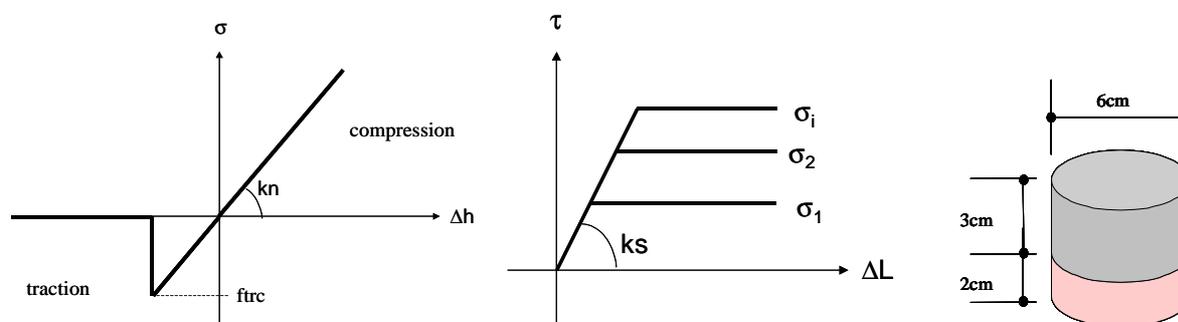


Figure 7 : Comportement des éléments joints et dimensions des éprouvettes utilisées.

Les valeurs des paramètres (tableau 2) ont été établies par des essais réalisés à l'aide de l'appareil appelé boîte de Casagrande. Les échantillons utilisés pour ces essais sont formés d'un cylindre de brique (obtenu par carottage) surmonté d'une couche de mortier coulé sur la brique (figure 7).

Cohésion	Angle de frottement interne	Résistance à la traction	Raideur normale à l'interface	Raideur tangentielle à l'interface
0.1 MPa	49°	$f_{trc} = 0.6$ MPa	$k_n = 10^7$ MPa	$k_s = 10^5$ MPa

Tableau 2 : Caractéristiques de l'interface brique – mortier.

4. PHASE 3 : MODELISATION ET CALCUL D'UN PONT

Tous les éléments sont maintenant réunis pour calculer l'ouvrage : les plans du pont, les lois de comportement des matériaux et l'outil de calcul, le code CASTEM. Nous montrons ici le principe de la modélisation du pont et les résultats essentiels du calcul.

4.1. PRINCIPE DE LA MODELISATION

Listons les principes fondamentaux du modèle :

1. Le maillage du pont est automatisé (pour une application ultérieure) et ne nécessite qu'un minimum de paramètres donnés par l'utilisateur (12), dans les trois dimensions de l'espace.
2. Le modèle du pont est constitué de 4 types de maçonneries différentes (celles de la voûte, des bandeaux et des sommiers, des murs et des culées, du remplissage) coupées par des joints rayonnants qui découpent le pont en voussoirs pouvant se séparer les uns des autres par glissement et/ou décollement. Les joints traversent la voûte et le remplissage (figure 8).
3. Le pont peut glisser et se décoller par rapport au sol de fondation. La butée sur les remblais est négligée, par sécurité.

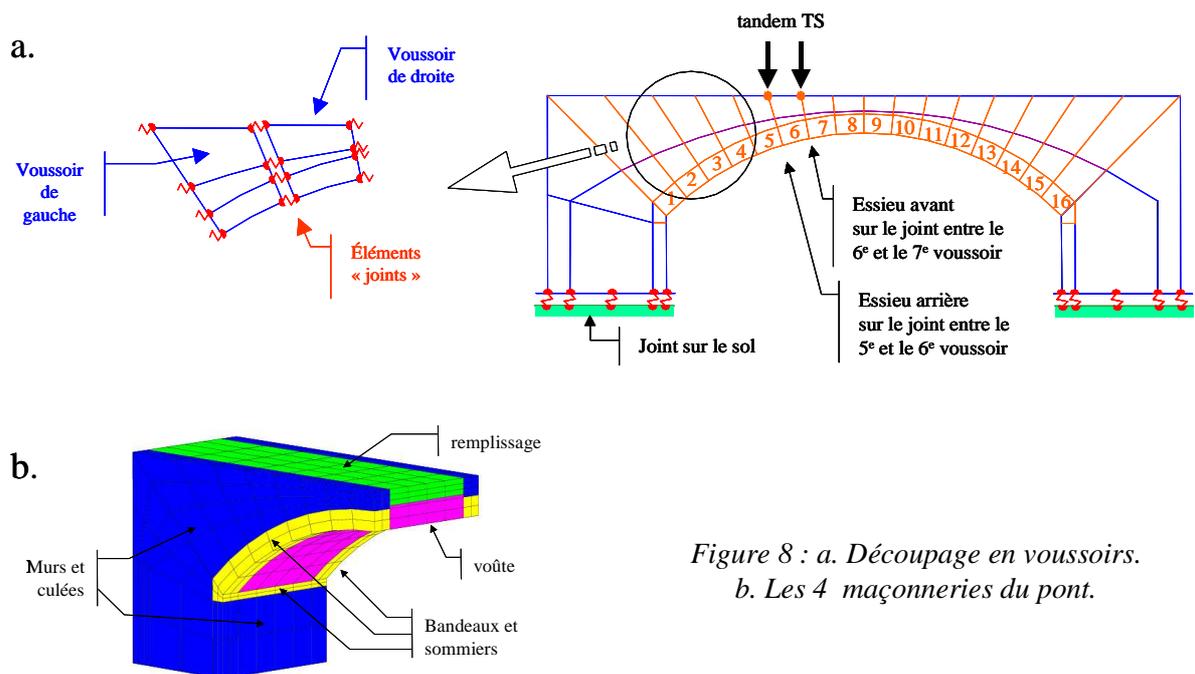


Figure 8 : a. Découpage en voussoirs.
b. Les 4 maçonneries du pont.

Nous avons choisi de soumettre l'ouvrage à son poids propre (10MN) ainsi qu'au poids d'un véhicule non centré longitudinalement (figure 8). Il est constitué d'un tandem d'essieux, dont la géométrie est conforme au type TS de l'EUROCODE 1 (2*300kN en service). Le positionnement transversal de ce tandem est étudié. Les charges concentrées sont appliquées sous la forme d'un déplacement imposé des points d'impact des roues, déplacement augmenté jusqu'à rupture du pont.

4.2. RESULTATS ET ANALYSE

L'analyse des résultats du calcul a dégagé des informations essentielles sur la circulation des efforts internes et sur le mécanisme de ruine de l'ouvrage. Il semble que celui-ci soit associé au glissement des fondations mis en évidence par le tracé de la déformée du pont (figure 9). Lorsque ce glissement se déclenche, la résistance à la compression des maçonneries n'est toujours pas atteinte, alors que le poids du véhicule atteint 5700kN (charge totale, poids propre inclus = 15.7MN). Ce glissement autorise l'ouverture des fissures entre les voussoirs, notamment en intrados sous le tandem, et en extrados près des appuis. L'ouverture est très faible en service normal, de l'ordre du centième de millimètre, et atteint 1mm au moment du glissement de la fondation.

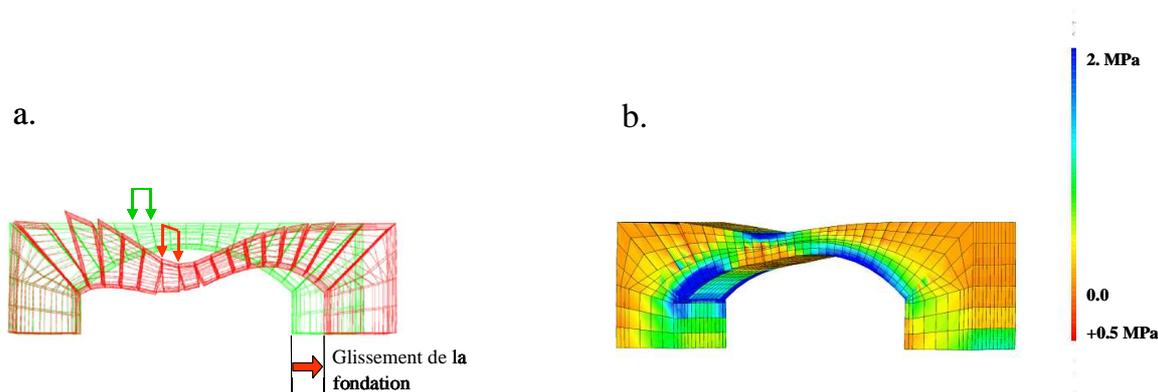


Figure 9 : a) Déformée du pont ; b) Compressions principales dans le pont.

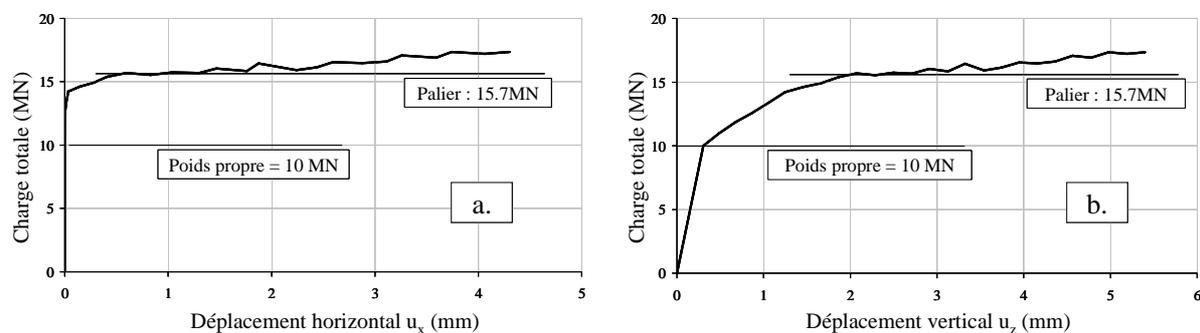


Figure 10 : a) Glissement de la culée ; b) Déplacement vertical des points chargés.

On constate que les zones les plus comprimées du pont (figure 9) sont, d'une part, les bandeaux, et d'autre part, les angles extérieurs des sommiers.

Par ailleurs, des contraintes de traction transversales ont été mises en évidence, dans la voûte en brique essentiellement. Ces tractions proviennent de la circulation des forces internes qui, depuis la zone d'impact du véhicule, se dirigent vers le bandeau et le sommier. Des « bielles » internes de compression se développent, inclinées vers le bas et l'extérieur, qui s'accompagnent inévitablement de forces de traction d'équilibrage. Ces tractions peuvent atteindre 0.1MPa dans la voûte en brique, en service normal, et donc provoquer des dommages, comme la formation de fissures longitudinales en intrados. Elles correspondent à une pathologie souvent observée par les maîtres d'ouvrages. Dans le

plan de contact entre l'ensemble voûte / remplissage d'une part, et l'ensemble bandeau / murs d'autre part, des cisaillements s'ajoutent à ces tractions qui augmentent encore le risque de rupture localisée.

Selon nos calculs, ce phénomène transversal s'amplifie lorsque le coefficient de Poisson du remplissage s'élève (plus le remplissage est dilatant et plus le frottement transversal exercé par la voûte est sollicité), et lorsque la position du véhicule est désaxée transversalement vers l'extérieur de la voie.

Enfin, quel coefficient de sécurité peut-on déduire de l'ouvrage calculé ? Dans cet exemple, on observe que le rapport de la charge de glissement à la charge de service est de l'ordre de 1.5. Par ailleurs, le rapport du poids du véhicule qui a provoqué le glissement au poids du véhicule de service est égal à 10.5. Cependant, lors de l'exécution du calcul mené avec des fondations complètement bloquées, l'instabilité du pont n'a pas été atteinte. En effet, les calculs ont été stoppés alors que la masse du véhicule atteignait 1700 tonnes, soit 28 fois plus que la charge roulante nominale. Ainsi, la question des conditions aux limites à imposer à l'ouvrage apparaît comme une question fondamentale et devrait être approfondie.

5. BILAN ET PERSPECTIVES

La méthode de requalification par le calcul que nous venons de décrire pourrait s'appliquer pour tous les ouvrages en maçonnerie. Cette méthode, en trois phases, permet de décrire les phénomènes internes des différentes parties de l'ouvrage, en service et jusqu'à la rupture, dans les trois dimensions du pont. Elle prend en compte la phase non linéaire des matériaux constitutifs et la fissuration transversale.

Il apparaît que les conditions aux limites imposées au pont doivent être considérées avec soin. Dans l'hypothèse où un glissement des culées sur le sol est permis, le mécanisme de rupture se produit, comme l'avait annoncé Coulomb en 1773, par rotation des blocs les uns par rapport aux autres. Ce glissement, de faible amplitude, pourrait-il être empêché par effet de butée à l'arrière des culées ?

Par ailleurs, les simulations ont mis en évidence des tractions internes transversales qui sont à l'origine des fissures longitudinales observées sur les ouvrages. Ces tractions augmentent lorsque la charge est excentrée vers l'extérieur de la voie de circulation. Par conséquent, l'élargissement des ponts apparaît comme un facteur aggravant de cette pathologie.

Ainsi, la méthode présentée ici permet de décrire le comportement d'un pont en maçonnerie, de prévoir la marge de sécurité disponible et d'apprécier l'impact des modifications qui pourraient être apportées à l'ouvrage.

6. BIBLIOGRAPHIE

Fanning P.J., Boothby T.E. (2001) « Three-dimensional modelling and full-scale testing of stone arch bridges », *Computers & Structures*, vol. 79, Issues 29-30, p. 2645-2662.

Séjourné P. (1913) *Grandes voûtes*, Bourges : imprimerie Veuve Tardy, 6 tomes.

SETRA / LCPC (1982) *Les ponts en maçonnerie, historique, stabilité, utilisation du programme VOUTE*.

SNCF, Direction de l'ingénierie (2002) *Référentiel infrastructure, document d'application, chapitre maçonnerie*, IN 2086.