

**ANALYSE DE STABILITE DU
PONT EN MAÇONNERIE
SUR LA RP 13**

Mr. A. ACHARHABI (Directeur au CERS)

Mr. CHOUKIR (LPEE)

H. ELKHAL (Ingénieur au CERS)

A. CHERRABI (Professeur à l'EHTP)

I / INTRODUCTION

Notre patrimoine en ponts en maçonnerie date de plus d'un siècle et témoigne de la valeur historique et architecturale de l'état de l'art de bâtir de nos ancêtres. La plupart de ces ponts sont en service. Malheureusement le vieillissement du matériau maçonnerie et le mauvais étanchement de ces ouvrages affaiblit leur capacité portante par disparition ou dégradation des joints de mortier. En plus, ce phénomène est aggravé par la modification de la nature du trafic, caractérisé par une circulation lourde et intensive sollicitant de façon dynamique la structure porteuse en maçonnerie. Les faibles déformations de la structure d'assise des fondations des piles et des culées peuvent induire éventuellement l'effondrement de l'ouvrage ou une réduction importante de la capacité portante. Dans de telles situations, le gestionnaire doit s'assurer de la marge de sécurité présentée par ces ouvrages pour pouvoir, soit autoriser le passage d'un convoi exceptionnel, soit modifier la nature du trafic empruntant l'ouvrage dans des cas particuliers (exemple: installation de chantier ou ouverture d'une carrière à proximité). Dans le cas où un pont en maçonnerie présente une insuffisance en résistance pour répondre aux exigences du trafic actuel, une étude de réparation et/ou de renforcement est nécessaire pour restituer ou augmenter la capacité portante de l'ouvrage.

Avant de mener l'étude d'évaluation de la capacité portante des ponts en maçonnerie, l'ingénieur responsable de l'étude doit examiner avec prudence les points suivants :

- Définir la géométrie de la structure porteuse: la position de l'extrados est souvent difficile à déterminer avec précision.
- Déterminer les capacités de résistance des matériaux constitutifs: ces paramètres sont difficiles à déterminer avec précision car la maçonnerie ancienne est très hétérogène et son comportement dépend de la qualité du mortier et de la brique (pierre).
- Opter pour le choix de la méthode d'analyse pour évaluer la stabilité de la structure porteuse.

Appréhender la marge de sécurité à adopter sur la méthode de calcul et sur la connaissance que l'on a de l'ouvrage.

II/ METHODES D'ANALYSE DE LA STABILITE DES PONTS EN MACONNERIE

Le calcul des ponts en maçonnerie se fait généralement en utilisant l'une des deux théories:

- La théorie de calcul à la rupture.
- La théorie de l'élasticité.

Le calcul élastique des ponts en maçonnerie nécessite la connaissance du comportement élastique de la maçonnerie dont la détermination avec précision acceptable est presque impossible. Ce calcul ne fournit pas la charge de ruine de la voûte, pile ou culée et ne permet pas les possibilités d'adaptation de la maçonnerie et de la structure. Par contre, le calcul à la rupture permet d'ignorer le comportement du matériau et conduit à considérer l'état limite ultime de la structure porteuse, qui est unique. C'est la méthode qui donne le meilleur résultat possible compte tenu des informations dont on dispose sur le matériau et la structure. Enfin, il reste à l'ingénieur responsable de l'analyse d'apprécier la valeur de ce résultat.

2.1/ Structure porteuse des ponts en maçonnerie.

La structure porteuse des ponts en maçonnerie est généralement constituée de voûtes, de piles et culées et des murs tympans en maçonnerie.

2.1.1/ Description et fonctionnement des éléments structurels

a) Voûtes:

La voûte est la partie active du pont. C'est le solide en maçonnerie limité par deux courbes: la courbe intérieure est l'intrados, celle extérieure est l'extrados qui est généralement invisible. La qualité de la maçonnerie peut varier le long de son épaisseur. En mobilisant la résistance à la compression de la maçonnerie, la voûte transmet les charges permanentes du pont et les charges routières aux piles et/ou culées au niveau des retombées ou naissances.

b) Les piles culées

Elles constituent les points d'appui des voûtes et permettent la transmission des charges aux fondations.

c) Les tympans:

Ce sont des murs latéraux en maçonnerie, qui reposent directement sur les voûtes et forment la partie inférieure des murs de tête. Ils sont constitués généralement d'une maçonnerie différente de celle des voûtes et jouent le rôle d'un mur de soutènement vis à vis du remblai de remplissage et de poutres latérales longitudinales. Leurs contributions se situent généralement entre 10 et 20 % de la capacité portante de la voûte seule. Bien entendu, leurs contributions dépendent de leurs liaisons avec les voûtes.

d) Le remplissage

Il est généralement constitué d'un matériau très hétérogène de moindre qualité que celui des voûtes et des murs tympans. Son rôle est de répartir les charges sur la voûte dans le sens transversal et longitudinal et peut participer à la capacité portante du pont. En plus, il joue le rôle d'amortisseur des effets dynamiques de la circulation routière.

La participation des tympans et du remplissage à la capacité portante est difficile à appréhender et par conséquent seules les voûtes, les piles et culées sont considérées pour évaluer la capacité portante d'un pont en maçonnerie.

2-1-2/ Méthode de calcul à la rupture

La méthode de calcul à la rupture est utilisée pour étudier la stabilité d'une voûte, pile et culée en maçonnerie.

a) Stabilité d'une voûte en maçonnerie

On considère une voûte en maçonnerie décrite par sa géométrie (courbes d'intrados et d'extrados), et constituée d'une maçonnerie dont le domaine de résistance est défini par le critère de traction, compression et celui de cisaillement de type Coulomb.

Cette voûte repose au niveau des naissances sur les piles et/ou sur les culées. Ces points d'appuis constituent les encastremements de la voûte dans la maçonnerie des piles et/ou des culées. Les charges appliquées à la voûte sont:

- Charges permanentes:

- * poids propre de la voûte.
- * poids du matériau de remplissage, des murs de tête et de la superstructure.

- Charges routières: Fascicule 61 titre II.

Les charges dues aux déplacements d'appuis et à la température ne sont pas considérées. sous l'effet d'une combinaison de charge Q , les efforts développés dans une section quelconque de la voûte sont l'effort normal N , l'effort tranchant et le moment fléchissant M .

La voûte est déclarée potentiellement stable sous l'effet de Q si N , T et M vérifient les conditions d'équilibre et les critères de résistance du matériau définis par:

- Critère de traction - compression

$$|M| \leq N h \left(1 - \frac{N}{\sigma_c S}\right)$$

h : demi hauteur de la section de la voûte.

σ_c : résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie.

S : section transversale de la voûte : $S = 2h$. La voûte de largeur unité est considérée.

- Critère de résistance aux joints ou interfaces.

$$|T| \leq N \tan \varphi$$

φ : angle de frottement interne type Coulomb.

Ces critères définissent les domaines de stabilité du matériau.

Il faut noter que l'effet de l'effort tranchant sur le résultats fourni par le critère de traction - compression et de l'ordre de 2 à 3% et peut être négligé. En plus , l'effet du critère d'interface n'est pas prépondérant car la rupture des voûtes ne se produit pas généralement par glissement d'un bloc par rapport à un autre, donc on peut se limiter au critère de compression - traction et on vérifie que les efforts obtenus vérifient le critère d'interface.

Le critère de traction - compression signifie tout simplement que chaque section de la voûte est entièrement comprimée (on n'admet pas la traction de la maçonnerie) et que le centre de pression définit par le côté $e = \frac{M}{N}$ se trouve assez loin de l'intrados et de l'extrados.

La règle pratique utilisée par les ingénieurs pour dimensionner les voûtes consiste à vérifier que les centres des pressions se trouvent au tiers central de la section, ce qui traduit la compression de la section. Cette règle est pessimiste. Si Les centres de pressions sont en dehors du tiers central , la section est partiellement comprimée. Dans le cas où le centre de pression est en contact avec de l'intrados ou l'extrados , une rotule se produit au niveau de cette section et la voûte ne s'effondra pas nécessairement.

Découpage de la voûte en "voussoirs"

Au lieu de s'intéresser à toutes les sections de la voûte, on procède a un découpage arbitraire de cette voûte en blocs ou "voussoirs". Le joints créés par ce découpage sont fictifs. Fig(1). Les efforts internes appliqués sur chaque joint i sont N_i , T_i et M_i . Ces efforts doivent assurer l'équilibre des "voussoirs" pris séparément et le critère de résistance traction- compression.

$$|M_i| \leq N_i h_i \left(1 - \frac{N_i}{\sigma_0 S_i} \right)$$

La structure est bi-encastée et par conséquent , elle est hyperstatique de degré 3. Les efforts d'hyperstaticité sont pris à la clé.

H : effort normal horizontal ou poussée horizontale.

V : effort vertical ou poussée verticale.

M : moment fléchissant à la clé: ce paramètre est remplacé par la cote du centre de pression à la clé : $Z = \frac{M}{N}$

L'équilibre des voussoirs permet d'exprimer les actions M_i et N_i en fonction des actions sur les voussoirs dues au chargement extérieure appliqué et les inconnues hyperstatiques à la clé Z, H et V. La vérification du critère de résistance traction-compression permet de déterminer le domaine des chargements potentiellement supportables. Ce domaine définit les intervalles de variation de la position du centre de pression et des poussées entrémales à la clé, soient (Z_{min}, Z_{max}) , (H_{min}, H_{max}) et (V_{min}, V_{max}) .

Calcul de coefficient de rupture

Le coefficient de rupture F , permet de situer le chargement appliqué Q par rapport au domaine des chargements potentiellement supportables. La frontière de ce domaine correspond à un chargement extrême Q_{ext} au delà duquel la voûte est déclarée instable sous le chargement appliqué ,

$$\text{soit } F = \frac{Q_{\text{ext}}}{Q}$$

Si $F < 1$ la voûte est instable.

Si $F > 1$ la voûte est potentiellement stable, mais on ne peut pas affirmer qu'elle est stable sous le chargement appliqué Q .

Au lieu d'opérer sur les charges, on procéda au calcul de F de la manière suivante: Le taux de contrainte sur chaque joint est donné par :

$$\frac{\sigma_i}{\sigma_0} = \frac{N_i h_i}{S_i (h_i - |M_i|)} \quad N_i$$

Ce taux est fonction des degrés d'hyperstaticité z , H et V à la clé et atteint au moins un maximum sur un joint, soit:

$$M_{i,\text{ax}} \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_0} \right)$$

Puis on procède à la minimisation de ce maximum dans l'ensemble des lignes internes et compressives soit .

$$S = \min_{z,H,V} \left(M_{i,\text{ax}} \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_0} \right) \right)$$

Le coefficient de rupture n'est rien d'autre que $F = \frac{1}{S}$.

Notons que les lignes des centres de pressions internes et compressives correspondant aux poussées horizontales extrémales sont obtenues par l'équation:

$$\text{Max}_i \frac{(\sigma_i)}{\sigma_o} = 1$$

Il faut noter que l'ensemble des lignes des centres de pressions internes et compressives caractérisé par les intervalles (Zmin, Zmax), (Hmin, Hmax) et (Vmin, Vmax), contient une ligne des centres de pressions optimale. Cette ligne est associée aux contraintes de compression minimales dans la voûte. Les réactions aux naissances associées à cette ligne sont utilisées pour analyser la stabilité des piles et des culées, appuis de cette voûte.

b) Stabilité des piles et des culées

L'étude de stabilité des piles et des culées est faite en utilisant la méthode de calcul à la rupture décrite ci-dessus en découpant ces éléments structuraux en voussoirs délimités par des joints horizontaux. les efforts appliquées sont leurs poids propres et les réactions au niveau des naissances des voûtes qui correspondent à la ligne des centres de pressions optimale .

III/ COEFFICIENT DE SECURITE

Rappelons que l'étude de stabilité des voûtes, des piles ou des culées par la méthode de calcul à la rupture permet d'affirmer avec certitude l'instabilité de l'élément structurel soumis à un chargement donne si le coefficient de rupture $F < 1$. Cependant, si $F > 1$, on ne peut pas déclarer que la voûte est stable. Le domaine de stabilité admissible est obtenu en réduisant le domaine des charges potentiellement stables en affectant la résistance caractéristique f_k de la maçonnerie par un coefficient de sécurité partiel $\gamma_m = 3$. En plus, pour tenir compte des incertitudes sur les charges, des coefficients de sécurité partiels relatifs sont adoptés, ce qui permet de réduire encore la taille du domaine de stabilité admissible. Les effets d'incertitudes, sur la géométrie de l'extrados sont appréhendés en réduisant d'une manière uniforme l'épaisseur de la voûte. En conclusion, l'élément structurel voûte, pile ou culée est déclarée stable sous un chargement donné si le coefficient de rupture $F > 3$

IV/ DEVELOPPEMENT DU LOGICIEL DE CALCUL A LA RUPTURE

Un programme de calcul à la rupture des voûtes, des piles et des culées a été développé par le LPEE et l'EHTP en vue d'analyser la stabilité des ponts en maçonnerie et d'évaluer leur capacités portantes. Ce logiciel permet:

- Le découpage de la voûte, pile ou culée en voussoirs (représentation graphique).

- Le calcul du poids propre de chaque voussoir en utilisant la géométrie et la densité de la maçonnerie.

- Le calcul des actions du remblai sur chaque voussoir. Cette action a deux composantes:

- + Composante verticale: poids propre de la colonne de remblai surmontant le voussoir.

+ Composante horizontale : poussée du remblai au repos K_0 .

- Le calcul des actions dues aux charges routières définies par le fascicule 6, titre II.

La diffusion des charges est faite transversalement et longitudinalement . La position défavorable est définie par le calcul du coefficient de rupture.

Charges A(I)

Deux configurations sont prises en compte:

a) Voûte totalement chargée.

b) Demi-voûte chargée.

Charges Bc et Bt

La position avant de l'essieu est variée pour déterminer l'emplacement le plus défavorable. Généralement les essieux arrières sont placés au niveau de la clé et des reins.

Charges militaires

Les charges sont diffusées transversalement et longitudinalement. Les éléments de réduction de chaque joint. Le cumul est effectué selon la combinaison de charges considérées.

- La détermination des lignes de poussées extrémales.
- La détermination des lignes des centres de pressions de côte extrêmeale.
- La détermination de la ligne optimale.
- Le calcul du coefficient de rupture.

V/ STABILITE DU PONT EN MACONNERIE SUR LA RP13

5-1/ Description de l'ouvrage

Il s'agit d'un pont voûte en maçonnerie de 105 m de longueur qui est constitué d'une série de 10 voûtes d'ouvertures variables. La chaussée est de 5,20m de largeur. Les fondations sont des semelles isolées rectangulaires constituées de blocs de grés cimentés par la chaux. Ces fondations reposent directement sur les alluvions de l'oued Oum Rabia. La maçonnerie des voûtes, piles et culées est constituée de briques en terre cuite cimentée par un mortier de la chaux. Le profil en long est donné sur la Fig(2).

5-2/ Etat de conservation de l'ouvrage

Suite à l'expertise réalisée sur l'ouvrage par le LPEE, les principaux types de dégradations relevées sont:

- Altérations et dégradations des parements, éclatement des mortiers et des briques en terre cuite et érosion de la maçonnerie activée par les eaux de pluie.
- Disjointement et décollement des briques en terre cuite des voûtes.
- Fissuration en sous face des voûtes dans la direction longitudinale de l'ouvrage.
- Affouillement des fondations en amont et en aval et érosion des matériaux.
- Etanchéité défectueuse.

5.3/ Analyse de la stabilité des voûtes

Des investigations réalisées sur l'ouvrage ont permis de relever la géométrie des voûtes, la hauteur du remblai à la clé. En plus, la résistance caractéristique de la maçonnerie est estimée à ≈ 10 bars. Les voûtes rencontrées sont des plein centres et des ogives. Leurs géométrie Fig(3) est donnée dans le tableau suivant :

N° VOÛTE	ÉPAISSEUR (m)	PORTÉE D(m)	RAYONS DES INTRADOS			FLECH (m). f	HAUTEUR DU REMBLAI A LA CLÉE (m)
			R(m)	R1(m)	R2(m)		
V1	0,65	2,90	1,45			1,50	0,42
V2	0,60	3	1,50			1,50	0,62
V3	0,65	2,1	1,05			1,05	0,57
V4	0,65	2,64	1,32			1,30	0,77
V5	0,65	2,64	1,32			1,30	1,47
V6	0,60	2,70	1,35			1,35	1,52
V7	1	5,90		4,60	4,60	2,65	1,27
V8	1	5,80		5	5	3,35	0,52
V9	1	5,70		4,10	4,10	3,90	1,27
V10	0,65	2,60	1,30			1,30	1,62

L'épaisseur du revêtement est 0,27 m.

Caractéristiques des murs de tête: hauteur au dessus de la chaussée:

0,40 m, épaisseur : 0,90 m, Densité de la maçonnerie: $2,2 \text{ t/m}^3$

Résultats:

Les coefficients de rupture des voûtes soumises aux charges permanentes et aux charges routières définies par la fascicule 61 Titre II sont donnés dans le tableau suivant :

N° VOUTE	COEFFICIENTS DE RUPTURES : F
V1	49,1
V2	11,53
V3	10,36
V4	18,71
V5	13,51
V6	11,71
V7	10,60
V8	14,46
V9	15,44
V10	19,83

On constate que le coefficient de rupture est supérieur à 3 ($F > 3$) et par conséquent le calcul à la rupture permet de conclure que les voûtes sont stables vis-à-vis des charges réglementaires. En plus en procédant à une réduction des épaisseurs des voûtes de 10 %, les coefficients de rupture restent toujours supérieurs à 3.

L'analyse de stabilité des piles et des culées a permis de conclure aussi que les coefficients de rupture sont largement supérieurs à 3 et par conséquent elles sont stables.

CONCLUSION

La méthode de calcul à la rupture constitue un outil fiable pour analyser la stabilité des ponts en maçonnerie. On constate que peu d'informations recueillies nous permettent de déclarer la stabilité ou la non stabilité de l'ouvrage en effet, seules la géométrie et la résistance à la compression ont été utilisées.

En plus le logiciel développé peut être utilisé pour décider du passage d'un convoi exceptionnel et analyser la performance d'une solution de renforcement par une voûte en béton armé.

par une voûte en béton armé.

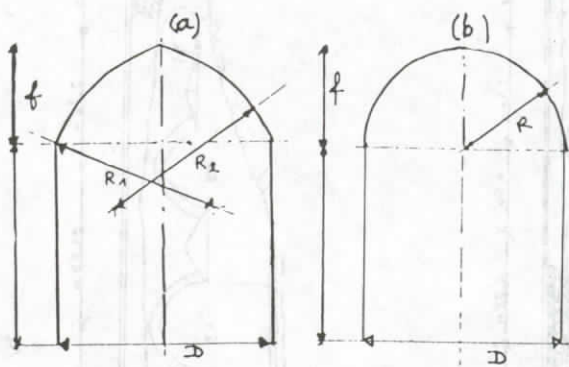


Fig 3 : Géométrie des voûtes

a/ voûte : ogive

b/ voûte plein centre.

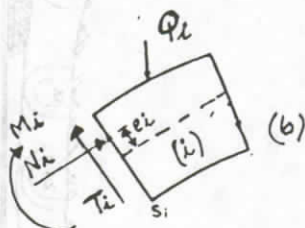
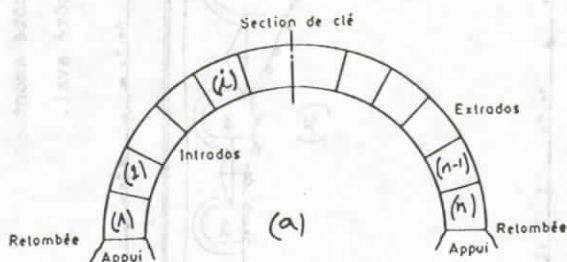


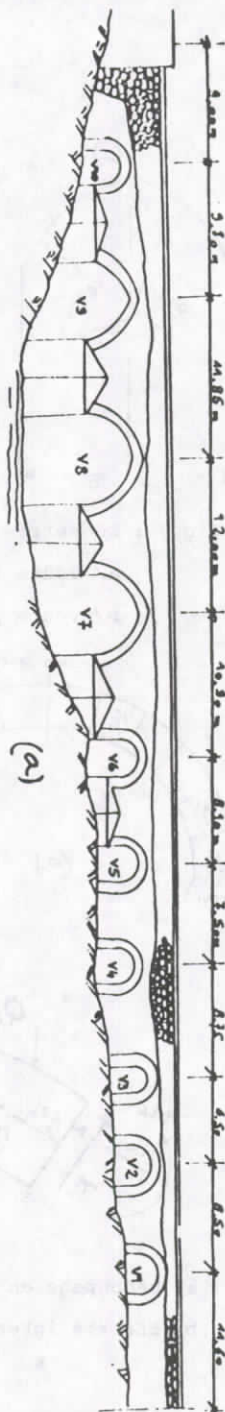
Fig 1 : a/ Découpage en "voussoirs".

b/ Efforts internes appliqués sur un joint.

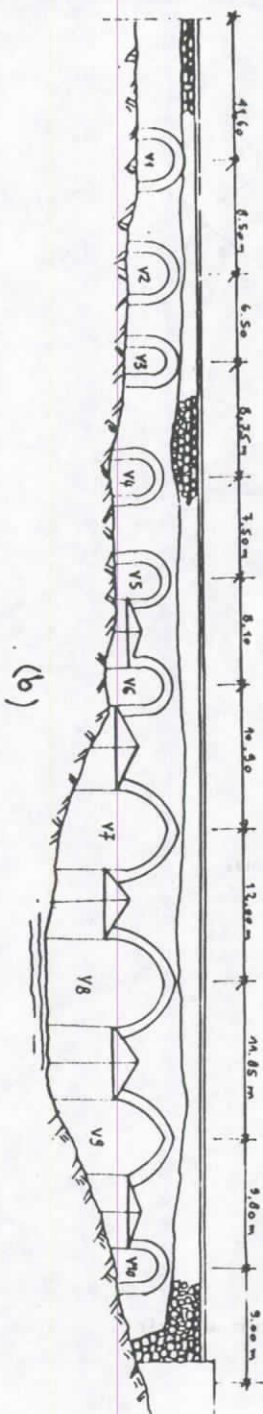
Fig 2 : Profil en long du pont portugais

a / élévation côté amont.

b / élévation côté aval.



(a)



(b)