



JOURNEES NATIONALES
MAÇONNERIE
5ème édition - Bordeaux
12 et 13 Juin 2025



ÉVOLUTION DU CALCUL À RUPTURE DES PONTS EN MAÇONNERIE



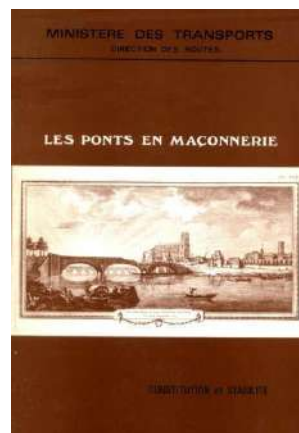
Jean-Louis MICHOTÉY
Ingénieur consultant
Expert près la Cour d'Appel de Paris, agréé par la Cour de Cassation



Objet de la communication



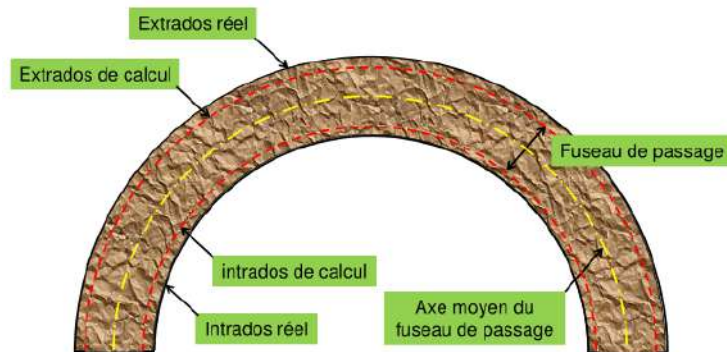
- La théorie du calcul à rupture appliquée aux ponts en maçonnerie a été développée au SETRA par Jean-Michel DELBECQ au début des années 1980.
- Objet de l'exposé :
Faire évoluer l'appréciation de la stabilité d'un pont en maçonnerie par la méthode du calcul à rupture, en proposant des modifications des règles de calcul



1. Modélisation de la géométrie



- Il est proposé de distinguer la géométrie « de calcul » et la géométrie « de chargement ».



2. Utilisation de l'EC1-2



- Il est proposé d'adopter les préconisations du SETRA
Note d'information – Ouvrages d'art 35 – Série (OA) – Mai 2012
« Méthodes courantes d'évaluation structurale des ouvrages existants
Pratiques en vigueur dans le réseau scientifique et technique (RST) »

Quel règlement de charges ?

Le principe retenu consiste à utiliser le règlement actuel, l'Eurocode 1-2 [14], censé être le plus représentatif du trafic actuel.

Il convient cependant de noter que ce règlement a été calibré sur la base de trafics mesurés sur des autoroutes supportant un fort trafic poids lourds. En conséquence :

- pour les ouvrages autoroutiers ou supportant un fort trafic poids lourds ce règlement est le seul à considérer ;
- pour les autres ouvrages lorsque la vérification n'est pas satisfaite avec l'Eurocode 1-2, il est envisageable d'effectuer une vérification selon le règlement de charges français précédent (le titre II fascicule 61 du CPC). La conclusion doit alors être appréciée en fonction du résultat de ces deux approches et du niveau de trafic réellement supporté par l'ouvrage.

Globalement, la classe 2 de l'Eurocode 1-2 et les précédents règlements de charge français, le titre II fascicule 61 [15] de 1960 et celui de 1971 (1^{ère} classe), sont relativement homogènes et conduisent à des niveaux de sécurité voisins. Il convient de mentionner cependant une exception notable à cette règle. En effet, du fait de l'excentrement nettement plus important des charges de l'Eurocode 1-2, celui-ci peut s'avérer sensiblement plus agressif pour certaines familles d'ouvrages et notamment les ponts à poutres.

2. Utilisation de l'EC1-2



- Utiliser les charges d'exploitation définies par l'Eurocode 1 Partie 2
En particulier le système LM 1 : UDL + TS + Trottoirs
En considérant les ponts en maçonnerie comme des **ouvrages de 2^{ème} classe de trafic**

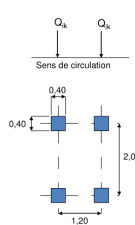
Charges sur la chaussée
Système UDL

UDL

	q_{ik}	α_{qik}		
		1 ^{re} Classe	2 ^e Classe	3 ^e Classe
Voie 1	9,0 kN/m ²	1,0	0,7	0,5
Voie 2	2,5 kN/m ²	1,0	1,0	1,0
Voie 3	2,5 kN/m ²	1,0	1,0	1,0
Autres voies	2,5 kN/m ²	1,0	1,0	1,0
Aire résiduelle	2,5 kN/m ²	1,0	1,0	1,0

Charges sur la chaussée
Tandem TS


TS



	Q_{ik}	α_{Qik}		
		1 ^{re} Classe	2 ^e Classe	3 ^e Classe
Voie 1	300 kN	1,0	0,9	0,8
Voie 2	200 kN	1,0	0,8	0,5
Voie 3	100 kN	1,0	0,8	0,5
Autres voies	0 kN			

Trottoirs

Charges d'exploitation
Charges sur les trottoirs et pistes cyclables

 5,0 kN/m²

Si cumulé avec le système principal de chargement
3,0 kN/m²

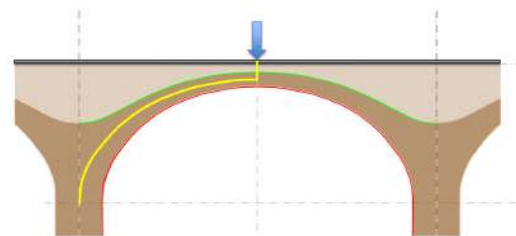
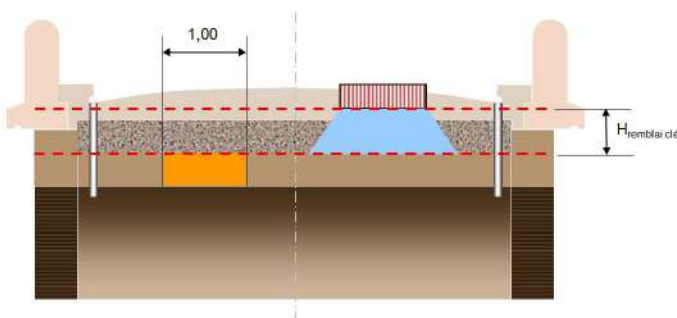
JNM 2025

5

3. Diffusion des charges dans le remblai



- Le document du SETRA (1980) préconise :
 - La répartition des charges concentrées selon un angle de diffusion de 30° à 45° sur une hauteur égale à l'épaisseur du remblai à la clé, puis verticalement.
 - Pas de répartition des charges réparties qui agissent alors verticalement.



Diffusion de la charge à 45° dans le remblai et dans le corps de voûte

$$L_{\text{diffu}} = H_{\text{chaussée}} + H_{\text{remblai clé}} + e_{\text{clé}} / 2 + \text{Longueur du feuillet moyen de la voûte}$$

Dans le cas général, toute la largeur de voûte est intéressée

JNM 2025

6

4. Répartition transversale



- Lors de la déconstruction, nous observons que la ruine d'une voûte ne se produit que lorsqu'elle est entièrement coupée transversalement.
- Nous en déduisons que la maçonnerie permet par l'« engrenement » des pierres une très bonne répartition des charges



Pont d'Osserain – G. VIOSSANGES

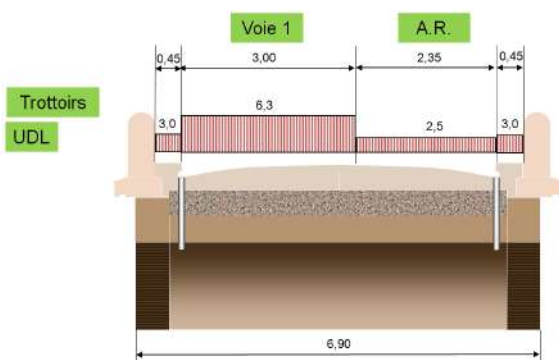
JNM 2025

7

4. Répartition transversale

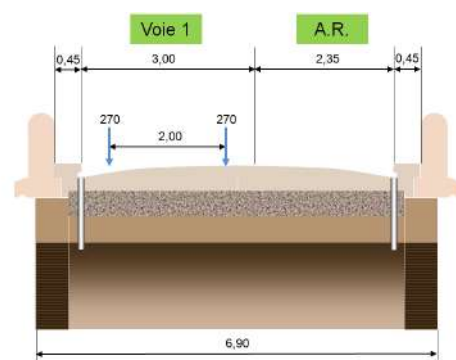


- Plutôt que de considérer la charge maximale sur une largeur unité, il convient de considérer la charge maximale moyenne sur toute la largeur utile du pont



$$p = (2 \times 3,0 \times 0,45 + 6,3 \times 3,00 + 2,5 \times 2,35) / 6,90 = 4,0 \text{ kN/m}^2$$

TS



$$P = 2 \times 270 / 6,90 = 78,3 \text{ kN (par essieu)}$$

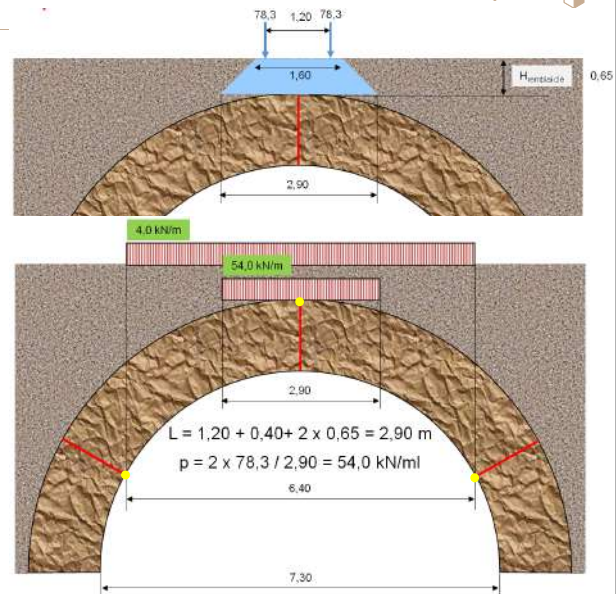
JNM 2025

8

4. Répartition longitudinale

- Il est proposé de conserver les hypothèses du programme VOÛTE :

- La répartition des charges concentrées se fait d'abord selon un angle de diffusion compris entre 30° et 45° sur une hauteur égale à l'épaisseur du remblai à la clé, puis verticalement.
- Il n'y a pas de répartition des charges réparties qui agissent verticalement.



JNM 2025

9

5. Action du matériau de remplissage

- Les remblais exercent des efforts verticaux (pesanteur) et des efforts horizontaux (poussée des terres) sur l'extrados des voûtes.
- La poussée horizontale due au remblai correspond à la poussée des terres au repos.
 - Coefficient $K_0 = 1 - \sin \varphi$
 - φ angle de frottement interne du matériau de remplissage
 - K_0 usuellement compris entre 0,5 et 1
- La cohésion du matériau de remplissage n'est pas prise en compte

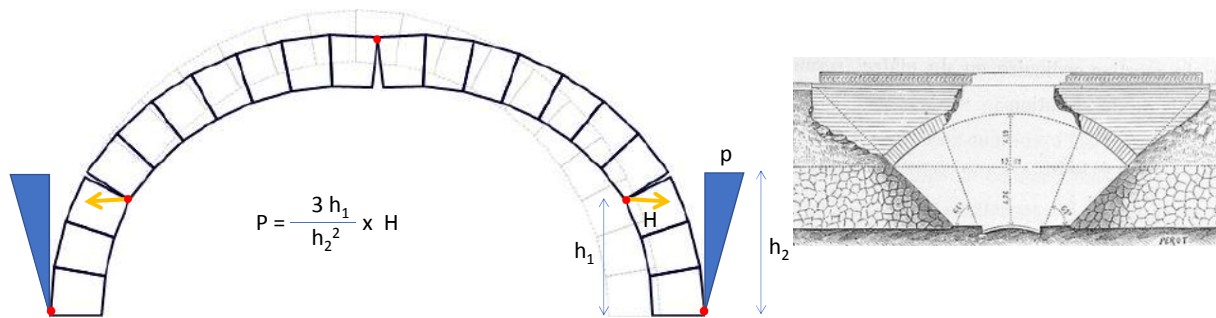
JNM 2025

10

5. Action du matériau de remplissage



- Une action, ignorée dans le programme Voûte, doit être prise en compte :
La réaction horizontale du terrain qui s'oppose à la portion de la voûte qui vient en butée lors du développement du mécanisme de ruine.



JNM 2025

11

6 – Résistance de la maçonnerie



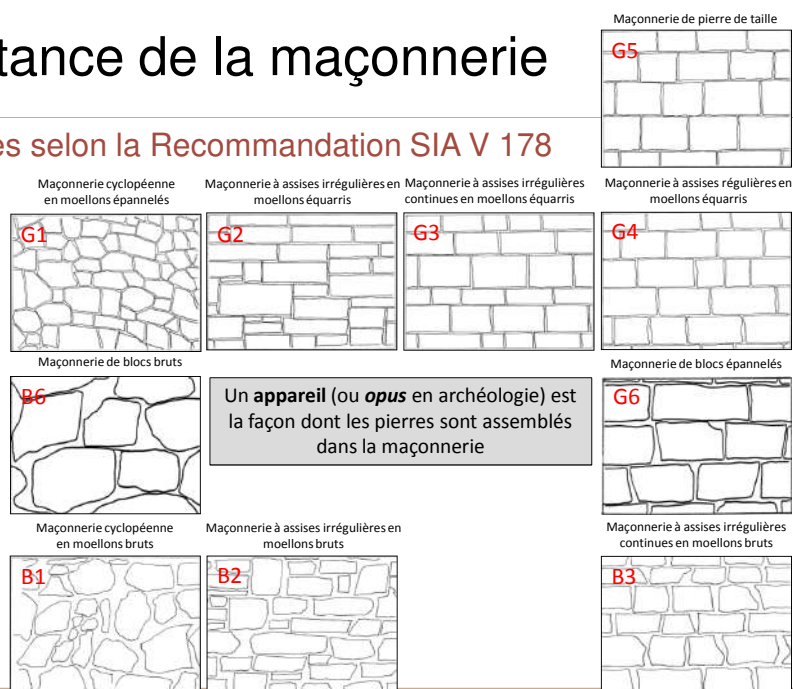
- La détermination de la résistance de la maçonnerie est incertaine.
- La méthode préconisée par VOUTE consiste à déterminer empiriquement la résistance moyenne de la pierre et d'en déduire via une qualité de mortier, la résistance de la maçonnerie.
- Il est proposé, à l'instar des normes suisses, de tenir compte de la **qualité de l'appareillage**, i.e. de la manière dont les blocs sont assemblés, et de l'**épaisseur des joints**.
- En ce qui concerne la résistance de la maçonnerie, il convient de se référer aux études faites dans le cadre du Projet National de recherche DOLMEN

JNM 2025

12

6 – Résistance de la maçonnerie

Les appareillages selon la Recommandation SIA V 178



JNM 2025

13

6 – Résistance de la maçonnerie



% surface mortier		Pas d'assise	Assises discontinues	Assises continues
Pourcentage de la surface de mortier visible relativement à la surface totale	< 8 %			G5
	< 13 %	G1	G2	G3, G4
	< 20 %			G6
	< 25 %	B6		B3
	> 25 %	B1	B2	

Choix pour chaque catégorie d'un **coefficient de rupture admissible** (par exemple)

Catégorie 1	Maçonnerie de pierres de taille et en moellons équarris
Catégorie 2	Maçonnerie à assises régulières ou irrégulières moellons épannelés
Catégorie 3	Maçonnerie cyclopéenne en moellons épannelés
Catégorie 4	Maçonnerie de moellons bruts

2,50
2,75
3,00
3,25

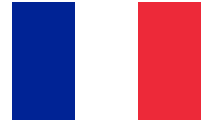
JNM 2025

14

7 – Critères de stabilité



- Le programme VOÛTE analyse uniquement la ligne de pression optimale, i.e. la ligne de pression pour laquelle la contrainte maximale sur la famille de joints considérée est minimale.
- C'est la contrainte σ_{opt} .
- On en déduit un coefficient de rupture $CSR = \sigma_0 / \sigma_{opt}$
- C'est le **critère de résistance** à étudier sous la **combinaison STR** 1,35 ou 1,0 G + 1,35 Q (Nota : Pour les ponts-routes)
- Jean-Michel DELBECQ considère que la voûte est stable si le **coefficient de rupture CSR est supérieur ou égal à 3** (mais pouvant descendre jusqu'à 2,5).
- La Norme Suisse propose un coefficient limite égal à **2,5**.



7 – Critères de stabilité



- Jacques HEYMAN propose de rechercher le fuseau de passage minimum dans lequel s'inscrit une ligne de pression.
- Ce fuseau est caractérisé par le **coefficient de sécurité géométrique**, plus grand rapport entre la demi-épaisseur résistante du joint et la distance entre la ligne de pression et la ligne médiane des épaisseurs résistantes.
- Le fuseau d'épaisseur minimale est atteint lorsque le coefficient de réduction géométrique est maximal.
- C'est le **critère géométrique** à étudier sous la **combinaison EQU** 1,05 ou 0,95 G + 1,35 Q (Nota : Pour les ponts-routes)
- Jacques HEYMAN considère que la voûte est stable si le **coefficient de sécurité géométrique CSG est supérieur ou égal à 2**

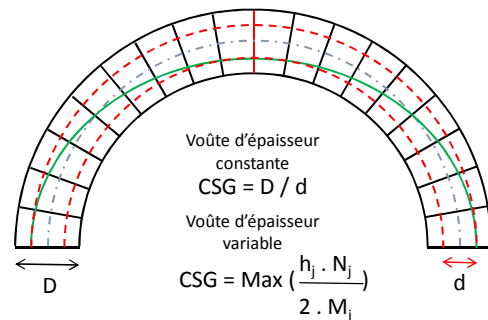
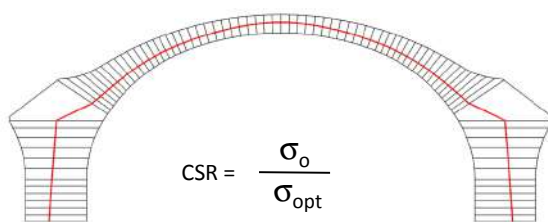


7 – Critères de stabilité



- Il est proposé de calculer systématiquement :

- Le coefficient de rupture CSR $> 2,5$ ou 3
- Le coefficient de sécurité géométrique CSG > 2
- Puis de conclure



JNM 2025

17

8 – Prise en compte des altérations



- Thèse d'Alix GRANDJEAN – EPFL - 2010

- Trois endommagements sont fréquemment rencontrés :

- Fissures longitudinales à l'intrados en particulier à l'interface bandeau-douelle
- Détérioration locale de la maçonnerie et plus particulièrement des joints de mortier
- Mouvement des appuis

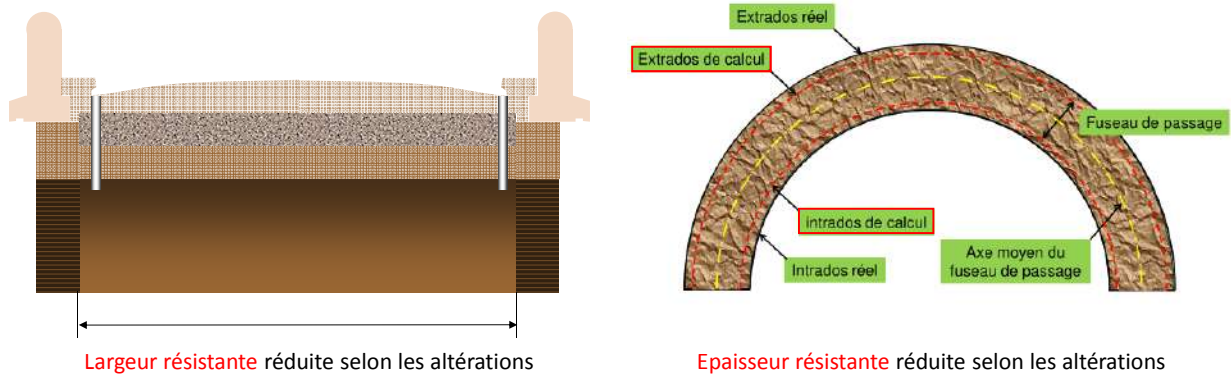
- Les réponses proposées sont respectivement :

- L'ajustement de la largeur résistante, influant sur la charge moyenne agissante
- L'ajustement de la géométrie « résistante » en prenant en compte les détériorations observées
- L'analyse des mouvements d'appui en relation avec l'état des fondations

JNM 2025

18

8 – Prise en compte des altérations



JNM 2025

19

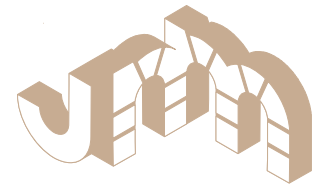
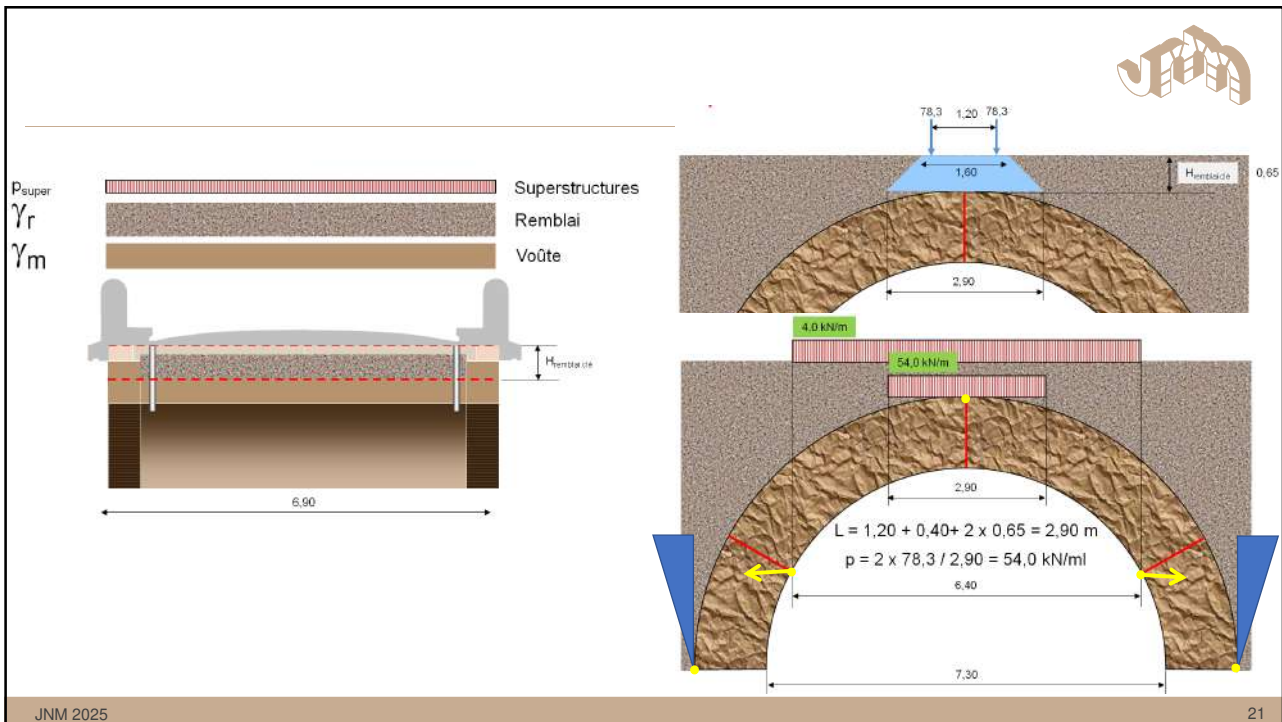
9 – Méthode de justification d'une voûte



- Définir soigneusement des données du calcul :
 - Géométries
 - Résistance de la maçonnerie
 - Chargements (permanent et d'exploitation)
- Calculer les états limites EQU et STR
 - Sous charges permanentes seules sans les poussées additionnelles du remblai : cas de référence servant à définir la position des joints de rupture et le mécanisme de ruine.
 - Sous charges permanentes avec les poussées additionnelles du remblai.
 - Sous charge d'exploitation en les positionnant de façon à déséquilibrer la structure.
- Interpréter les résultats

JNM 2025

20



Merci de votre attention



Contact :
Jean-Louis MICHOTÉY
 06.30.70.34.54
michotey@wanadoo.fr

Journées Nationales de la Maçonnerie
 5ème édition I Bordeaux
 12 et 13 juin 2025

