

Association JUSTICE CONSTRUCTION



Vendredi 5 juin 2026



La maçonnerie de pierre naturelle face à l'expertise moderne

Jean-Louis MICHOTÉY

Ingénieur Consultant
Expert près la Cour d'Appel de Paris
agréé par la Cour de Cassation

1

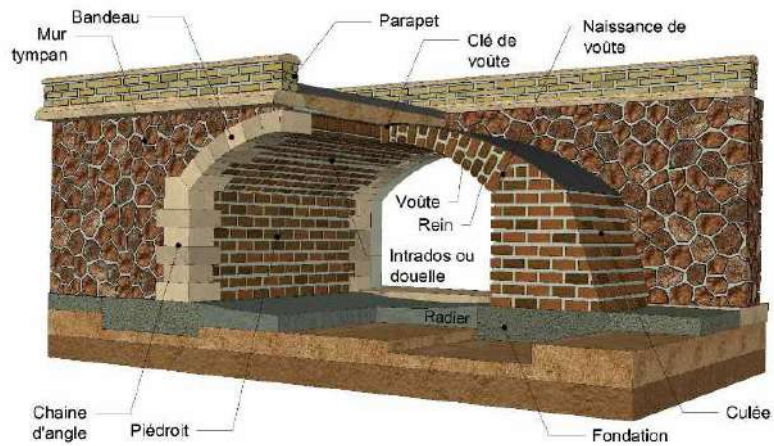
Plan de l'exposé ...

Une réflexion au croisement de l'ingénierie structurelle et de l'expertise

1. Introduction
2. Réflexion sur le Cadre réglementaire
3. Les méthodes de calcul
4. Sécurité des voûtes en maçonnerie
5. Exemples de calcul à rupture
6. Les incertitudes
7. Expertise d'un mur mitoyen

1 – Introduction

Au commencement, une histoire de pont !



Effondrement brutal du Pont Morandi

Gênes, Italie

14 août 2018

Bilan humain

43 morts
16 blessés
650 personnes évacuées

Viaduc multi-haubané

1102 m de longueur
Portée principale : 207,90 m
Autoroute des Fleurs (A10)
Franchissement du val Polcevera.



Mission d'information sénatoriale sur la sécurité des ponts français

N° 609

27 juin 2019

SÉNAT

SESSION ORDINAIRE DE 2018-2019

Révisé par le Président du Sénat le 20 juin 2019

SÉCURITÉ DES PONTS : ÉVITER UN DRAME

RAPPORT D'INFORMATION

FAIT

en nom de la commission de l'aménagement du territoire et du développement
durable (1) par la mission d'information sur la sécurité des ponts (2).

Par M. Hervé MAUREY, président,
Patrick CHAIZE, et Michel DAGBERT, rapporteurs



Michel DAGBERT, Hervé MAUREY et Patrick CHAIZE

Les Sénateurs alertent sur la méconnaissance et la dégradation des ponts !

La plupart des ouvrages sont dans un état préoccupant

L'Etat comme les collectivités doivent investir dès que possible pour éviter de potentiels drames.

« **Pour commencer, on ne connaît pas le nombre exact de ponts routiers en France.**

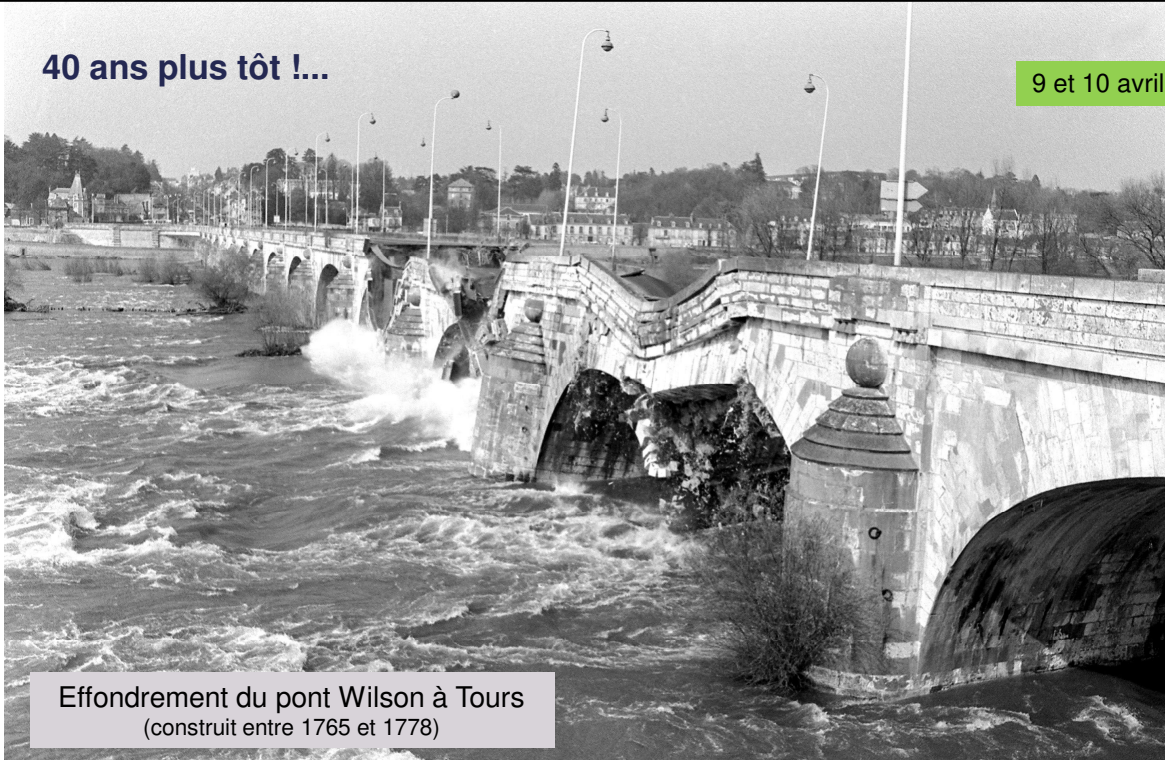
Ce constat est surprenant et en lui-même révélateur des lacunes de la politique de surveillance et d'entretien des ponts.

Ensuite, l'état des ponts s'est dégradé de manière continue ces dernières années.

Enfin, l'état des ponts gérés par les communes et les intercommunalités s'avère encore plus préoccupant. »

40 ans plus tôt !...

9 et 10 avril 1978



Effondrement du pont Wilson à Tours
(construit entre 1765 et 1778)

Un patrimoine important ...

Les ponts en maçonnerie constituent la **majeure partie du patrimoine ouvrage d'art** tant par leur nombre que par leur valeur historique et architecturale

Le patrimoine « Ouvrages en maçonnerie » est important :

- 60 % des murs et 50 % des ponts du réseau routier
- 45 % des ponts et 70 % des tunnels du réseau SNCF
- 85 % des tunnels du réseau RATP

Mais ce sont des **ouvrages anciens**,

aux caractéristiques géométriques limitées et souvent insuffisantes



Nombre de ponts en maçonnerie en France

(Ordre de grandeur)

De plus de 5 m de portée ...

Maître d'ouvrage	Total	Ponts en maçonnerie	
Etat (non concédé)	12 555	10%	1 255
Etat (concédé)	12 184	1%	122
Départements	110 000	48%	52 800
Communes	90 000	50%	45 000
Ouvrages routiers	224 739	44%	99 177
Ouvrages ferroviaires (SNCF)	41 500	44%	18 050

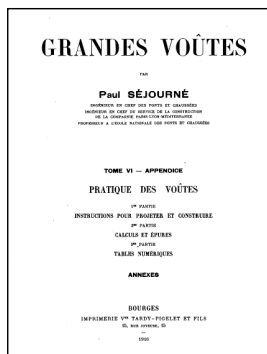


De plus de 2 m de portée : **312 000 ponts dont 50 % en maçonnerie**

Une solidité à toute épreuve ...

« On peut croire impérissable un pont en maçonnerie bien fondé,
en bons matériaux, avec une bonne chape bien protégée »

Paul Séjourné
(1851-1939)
Grandes voûtes



Cette solidité est-elle justifiée ?

- La charge permanente est nettement supérieure aux charges d'exploitation
- Les désordres les plus graves proviennent des fondations
- Mais, **les matériaux vieillissent** sous l'action de l'eau notamment et **les structures sont soumises à des charges plus lourdes**



International Thermonuclear Experimental Reactor

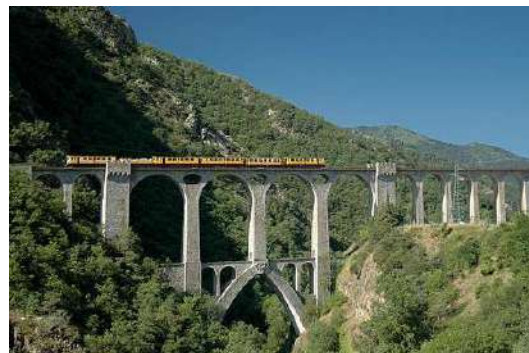
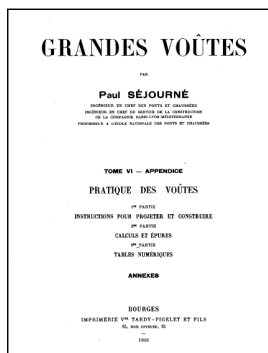


Berre l'Étang - Cadarache : 104 kms
 250 convois exceptionnels entre 2015 et 2024
 Le plus lourd : 450 / 500 tonnes (colis)
 900 tonnes (véhicules compris)
 Le plus haut : 10,5 m
 Le plus long : 33 m à 50 m
 Le plus large : 9 m

Une sécurité qu'il faut maîtriser ...

« Il est quelquefois permis d'être hardi, même très hardi,
 mais il faut savoir qu'on l'est »

Paul Séjourné
 (1851-1939)
 Grandes voûtes



Mission du SETRA

1979

C'est ainsi qu'en 1979, au Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes a été créé une cellule dirigée par **Jean-Michel DELBECQ** et dont la mission était de **concevoir un outil permettant d'évaluer la stabilité des ponts en maçonnerie**.

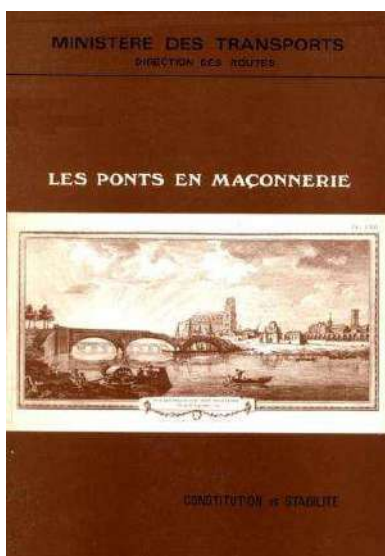


Le problème n'était pas simple :

- On ne construisait plus de pont en maçonnerie depuis longtemps.
- Le savoir-faire était oublié.
- **Il n'existait aucun règlement de calcul pour ce type d'ouvrage.**
- Les théories sur la stabilité des voûtes, développées au XIX^{ème} siècle, étaient nombreuses et conduisaient à des règles empiriques sécuritaires, utiles pour la conception d'un ouvrage mais insuffisantes pour juger de la portance d'un pont existant.

Le Guide du SETRA « Les ponts en maçonnerie »

1982

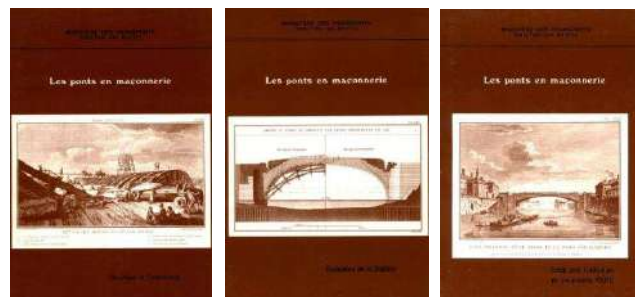


Guide technique paru en Juin 1982

Historique et constitution

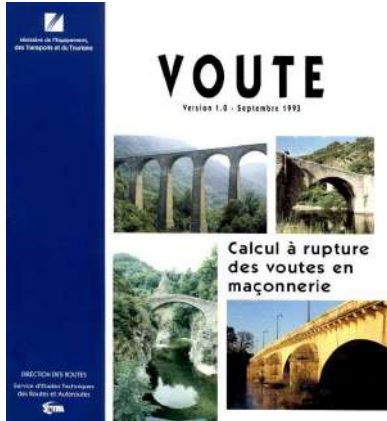
Evaluation de la stabilité

Guide pour l'utilisation du programme VOÛTE



Le logiciel de calcul « VOUTE »

1982
1993



Ecrit entre 1980 et 1982
par **Jean-Michel DELBECQ**
et **Jean-Louis MICHOTÉY**
en fortran sur Ordinateur IBM



Transposé en 1993
sur micro-ordinateur PC AT ou PS2
système d'exploitation DOS version 3.00
par **Patrick LE DELLIU**

Coffret commercialisé par le SETRA comprenant :
- Une disquette au format 3 pouce 1/2 1,44 Mo
- Un manuel de référence
- Un manuel d'exemple d'utilisation



Projet national DOLMEN

5 juillet 2021

Le Projet National DOLMEN porte sur les constructions en maçonnerie :

- de **Pierre** ou de **brique**, avec ou sans liant ;
- du **génie civil** : ponts, soutènements, quais, digues, barrages, tunnels, canaux, conduites, etc.

L'objectif est de **progresser dans la compréhension du comportement**
des ouvrages d'art en maçonnerie et de **transférer les résultats**

de la recherche à la profession pour :

- proposer des outils adaptés et efficaces pour **améliorer l'évaluation et la maintenance du patrimoine existant** en toute sécurité et durabilité ;
- **rétablir la maçonnerie** dans le catalogue des techniques de construction contemporaines.



Le Guide AFGC...

2022



Groupe de travail
Évaluation et renforcement
des ouvrages en maçonnerie

Guide AFGC
paru en mars 2022

Révision actuellement en cours



2 – Cadre réglementaire



Catastrophe du Pont suspendu, actuellement Pont de la Basse chaîne en l'année 1850 (le 11^{ème} Léger)

Chute du Pont de la Basse Chaîne à Angers
16 avril 1850 – 223 victimes

Catastrophe ferroviaire du Pont sur le Tay
survenue le 28 décembre 1879 – 75 victimes

- La réglementation s'est développée au XIX^e siècle par suite des différents accidents
- Les nouveaux matériaux ont fait l'objet d'une réglementation (acier 1870) (béton 1906)
- **Maçonnerie : pas d'accident ... pas de règlement !**



Les textes en vigueur

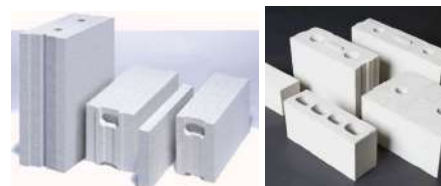
- La maçonnerie de pierre est l'un des plus anciens procédés constructifs, mais **elle dispose aujourd'hui de très peu de textes normatifs de calcul modernes.**
- Le **Fascicule 64 du CCTG**
« **Travaux de maçonnerie d'ouvrages de génie civil** » Circulaire n°82-54 du 17 juin 1982
- **EUROCODE 6 – Norme NF EN 1996 – Mars 2006**
« **Calcul des ouvrages en maçonnerie** » et ses Annexes Nationales
Partie 1.1
Règles générales pour ouvrages en maçonnerie armée et non armée
Partie 1-2
Règles générales — Calcul du comportement au feu
Partie 2
Conception, choix des matériaux et mise en œuvre des maçonneries
Partie 3
Méthodes de calcul simplifiées pour les ouvrages en maçonnerie non armée



Les Eurocodes ne concernent que les structures neuves.

Que penser de l'Eurocode 6 ?

- L'Eurocode 6 a été développé principalement pour :
 - les maçonneries en briques industrielles
 - les blocs béton
 - les blocs silico-calcaires
 - les éléments de maçonnerie fabriqués selon des caractéristiques normalisées.
- Sa philosophie repose sur :
 - **la connaissance statistique des résistances des matériaux** ;
 - des produits industriels homogènes ;
 - des assemblages par mortiers normalisés ;
 - des calculs aux états limites.
- L'Eurocode 6 a remplacé partiellement
DTU 20.1 - Travaux de bâtiment - Ouvrages en maçonnerie de petits éléments - Parois et murs
DTU 26.1 - Travaux de bâtiment - Travaux d'enduits de mortiers



Que penser de l'Eurocode 6 ?

- La difficulté apparaît lorsque l'on aborde :
 - les ouvrages historiques
 - les ponts anciens
 - les murs de soutènement en pierre
 - les voûtes
 - les édifices patrimoniaux.
- **La pierre naturelle n'est pas un matériau industriel homogène.**
- Deux pierres provenant de la même carrière peuvent présenter :
 - des résistances différentes
 - des fissurations naturelles
 - des anisotropies
 - des comportements variables selon leur orientation.
- **L'Eurocode 6 suppose une caractérisation beaucoup plus homogène des matériaux.**
- L'Eurocode 6 est un excellent règlement pour concevoir une maçonnerie neuve, mais **un outil insuffisant pour comprendre une maçonnerie en pierre naturelle ancienne.**



Le problème fondamental des ouvrages anciens

- **L'Eurocode 6 ne traite pas les sujets suivants :**
 - **les aspects particuliers des natures de construction** (tels que les ponts, barrages, cheminées ou réservoirs en maçonnerie)
 - **les aspects particuliers de types spéciaux de structure** (tels que les voûtes et les coupes)
- Les Eurocodes sont destinés au calcul des structures neuves, Pour les structures existantes il convient de se reporter à la **Norme XP CEN/TS 17440 – Septembre 2020** « Evaluation et rénovation des structures existantes »

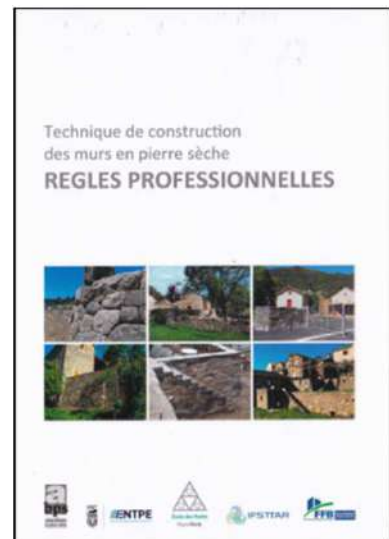
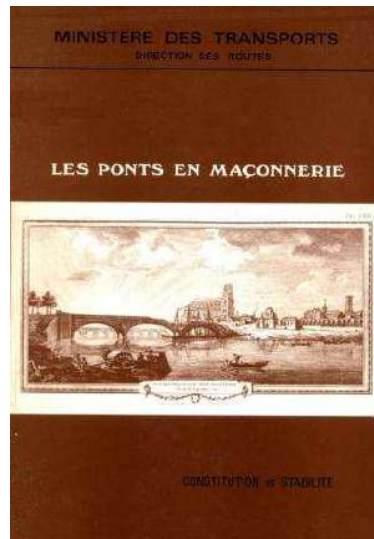


Pour les ouvrages anciens en pierres naturelles, la norme introduit une approche particulièrement intéressante :

- **elle permet de tenir compte de la performance observée de l'ouvrage**
- elle admet que **plusieurs siècles de stabilité constituent une information technique pertinente**
- elle encourage l'utilisation de mesures, d'essais et du suivi de l'ouvrage pour réduire les incertitudes
- elle évite les conclusions excessivement conservatrices qui conduiraient à des renforcements inutiles.



Les règles professionnelles



3 – Les méthodes de calcul

- Méthode graphique Épure de Méry
- Calcul élastique linéaire Programme à barres
 - Loi de comportement du matériau
 - Critère de résistance
 - Connaissance des contraintes initiales
- Calcul élasto-plastique Programme aux éléments finis
 - Loi de comportement « parfaitement plastique standard »
- Calcul à rupture Programme VOÛTE
Programme RING

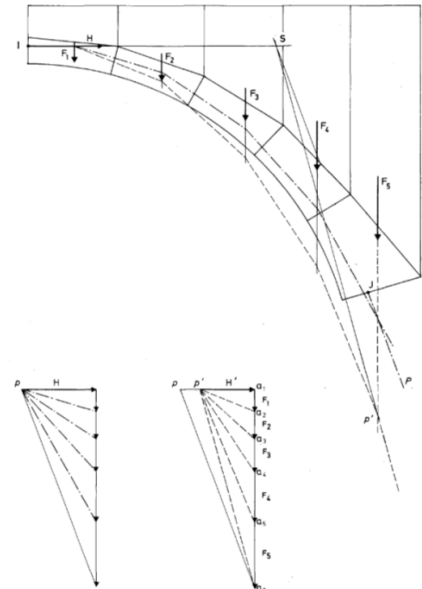
Méthode graphique : Epure de Méry

1839

Méthode proposée par
Edouard MÉRY
 Ingénieur des Ponts et Chaussées
 1805 - 1871

« **Mémoire sur l'équilibre des voûtes en berceau** »
 daté du 27 février 1839
 Publié dans les annales des Ponts et Chaussée en 1840

Méthode basée sur le tracé
 du polygone funiculaire des charges
 et sur la détermination de la **ligne des centres de pression**.



Calcul élastique

1858



Claude Louis Marie Henri NAVIER
 1785 - 1836

En 1821, Claude-Louis-Marie-Henri **NAVIER** établit les bases de la **théorie de l'élasticité** et l'appliqua aux arcs en maçonnerie. Les équations qui en résultèrent n'avaient cependant que rarement de solution et de nouvelles tables de dimensionnement furent établies.

En 1858, William **RANKINE** (1820-1872) coupla la notion de ligne des pressions avec la théorie élastique et parvint à la conclusion que la résultante de l'effort appliqué, et par conséquent la ligne des pressions, devait rester dans la portion centrale de l'arc. Il en résulta un principe, bien connu aujourd'hui sous le nom de **règle du tiers central**.



William RANKINE
 1820 - 1872

Calcul aux éléments finis

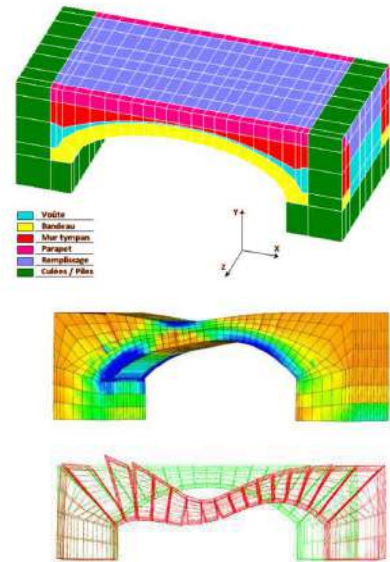
1990

Méthode utilisée dans le Génie Civil depuis les années 1990 grâce aux développements de l'informatique.

Elle est basée sur la **discrétisation de la structure en morceaux élémentaires** (mailles) auxquels on attribue les lois de comportement du matériau considéré.

L'objectif de la méthode est de déterminer une fonction, solution de l'équation aux dérivées partielles dans un domaine donné et pour des conditions limites données.

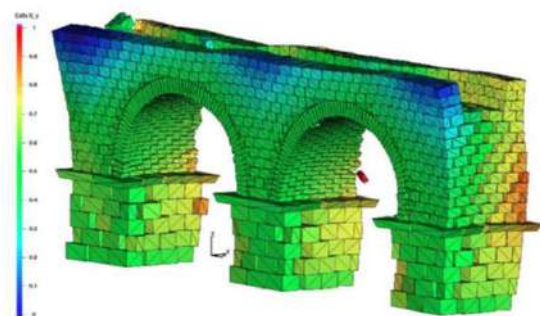
La résolution complète du système sur l'ensemble du domaine d'étude se réalise de manière discrète aux nœuds du maillage de proche en proche en tenant compte des conditions aux limites imposées.



Calcul aux éléments discrets

Initialement, la Méthode aux Eléments Discrets a été proposée par CUNDALL et STRACKS (1979) dans le cadre de la mécanique des roches.

La méthode aux éléments discrets considère un milieu discontinu comme un assemblage de milieux continus (éléments) en interaction.



La résolution est basée sur l'intégration de l'équation de mouvement des éléments (Newton-Euler) qui permet d'admettre de grands déplacements et de grandes rotations comprenant l'actualisation des positions des éléments.

Cette technique est dotée intrinsèquement de la capacité à représenter le comportement statique et dynamique d'une collection d'éléments en mouvement.

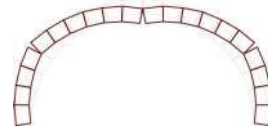
Le calcul à rupture

1964 - 1982

Cette méthode repose sur les travaux de **Jacques HEYMAN** (1964) en application de la théorie de la plasticité sur les arcs en maçonnerie et la formalisation du calcul à la rupture de **Jean SALENÇON** (1979) mise en forme par **Jean-Michel DELBECQ** (1982)



Guide du SETRA « Les ponts en maçonnerie » - 1982



Cette méthode cherche à déterminer le chargement limite ou le chargement extrême supportable par une structure.
Elle repose sur le fait que la stabilité d'une structure impose **la nécessité que tout sous-système de la structure soit en équilibre avec le chargement auquel il est soumis.**
Elle est dans le prolongement de la méthode de MERY.



Méthode mise en application avec les Logiciels **VOÛTE** (1982) et **RING** (1990)

Considérations générales sur le calcul d'une structure

- Tout calcul de structure repose sur trois données fondamentales :
 - Géométrie de la structure
 - Caractéristiques des matériaux constituant la structure
 - Actions agissant sur la structure
- Le nombre de données dépend de la méthode de calcul considérée.
- Le résultat du calcul doit permettre une interprétation afin d'apprécier la sécurité de la structure.
Il convient donc de définir les critères d'appréciation et les limites que l'on se donne.

Principe du calcul à rupture

Approche par l'extérieur

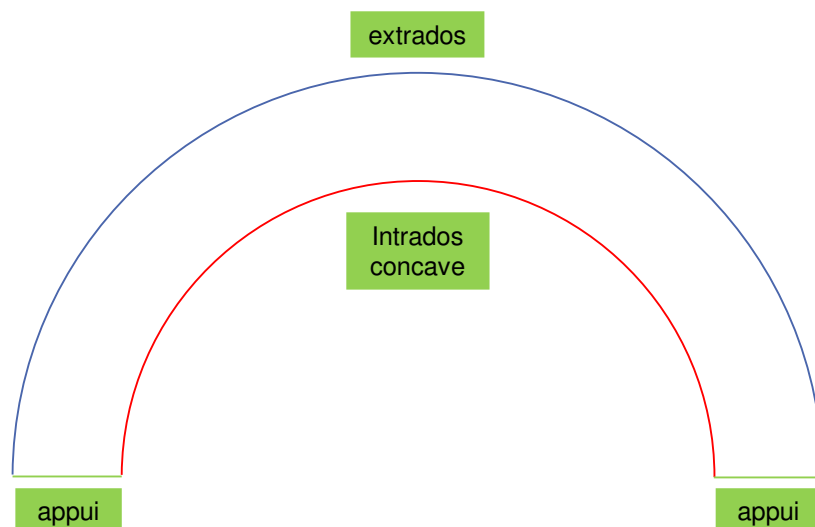
Le problème posé est de déterminer si une voûte,
- de géométrie donnée,
- constituée d'un matériau dont on connaît le critère de résistance,
- et qui est soumise à un chargement extérieur
est stable.

Le calcul à rupture permet en réalité de répondre à la question inverse.

On démontre que si le chargement est à l'**extérieur d'un domaine**
dit « domaine des chargements potentiellement supportables »
la voûte est **certainement instable**.

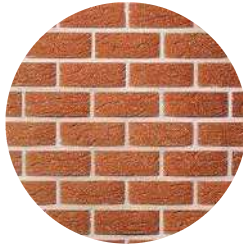
Par contre, si le chargement est à l'**intérieur de ce domaine**,
il est impossible d'en déduire que la voûte est stable.
la voûte est, dans ce cas, **potentiellement stable**.

Géométrie de la structure



Matériau composite Maçonnerie = pierre + mortier

Matériau homogène



1° Absence de résistance à la traction

(pierre, mortier de hourdage et interface pierre-mortier)

Résistance à la compression

σ_0

2° Résistance à la compression simple du matériau composite pierre-mortier finie

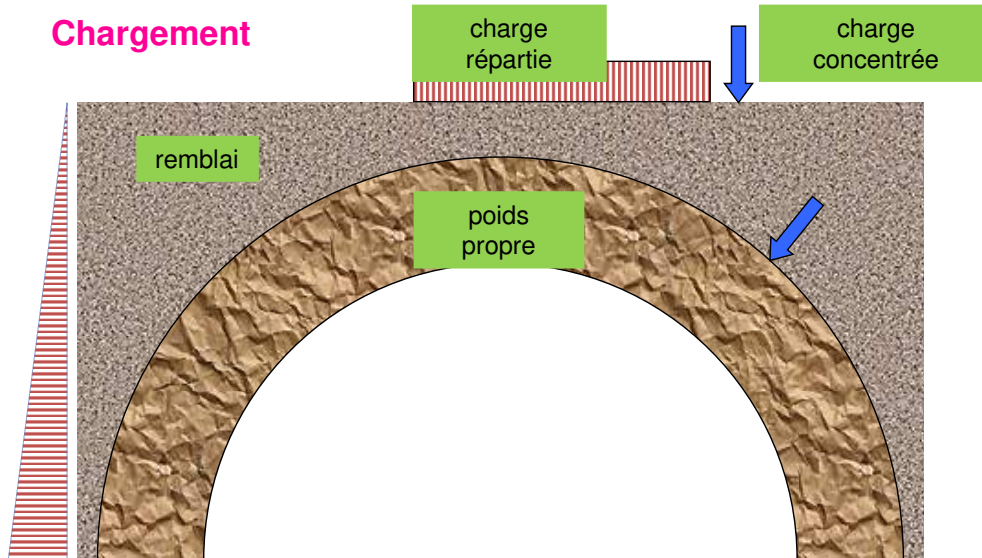
3° Critère d'interface pierre-mortier de type frottement sec de Coulomb

La cohésion est considérée comme nulle ($c = 0$)

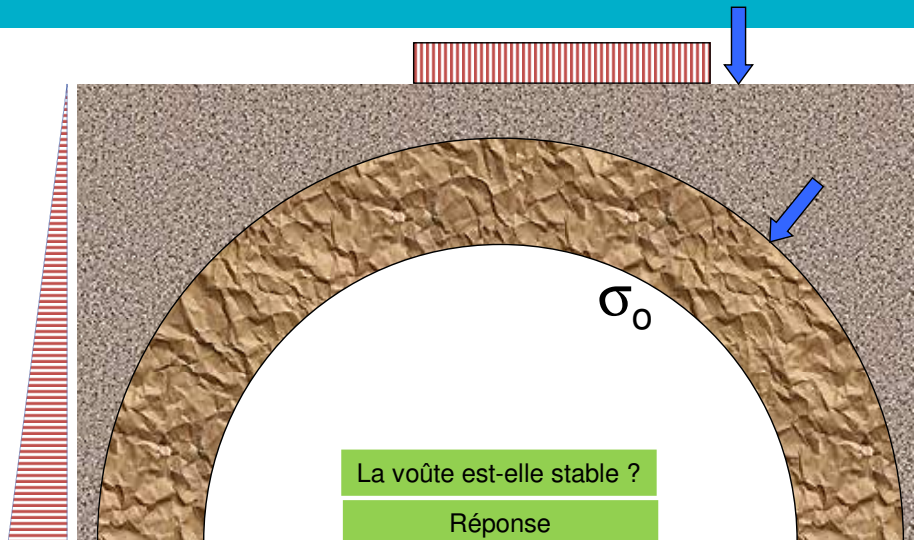
L'angle de frottement interne φ est généralement fixé à 27° (soit $\text{tg } \varphi = 0,5$)

(en réalité compris entre 30 et 35°)

Chargement



Question à résoudre



La voûte est stable sous un chargement donné si, **en tout point**, il y a **compatibilité** entre les **équations d'équilibre** et les **critères de résistance**

Équations d'équilibre

- La **statique** est une partie de la mécanique dont la finalité est l'étude de l'équilibre des systèmes matériels (solide ou ensemble de solides) au repos ou en mouvement uniforme par rapport à un repère supposé fixe (un repère Galiléen)
- Si un ensemble matériel {E} est en équilibre par rapport à un repère R, **la somme des actions mécaniques extérieures** à {E} qui agissent sur {E} **est nulle**.
- Théorème de la résultante statique :

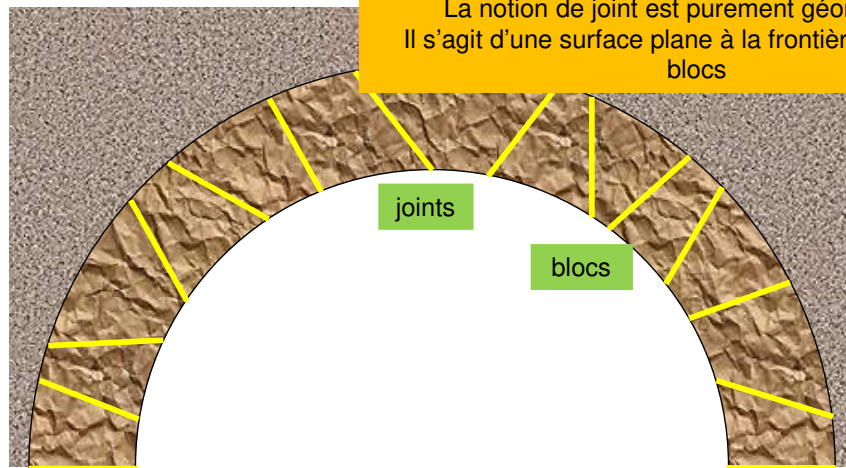
$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = \vec{0}$$

- Théorème du moment statique :

$$\sum_{i=1}^n \vec{M}_A(\vec{F}_i) + \sum_{i=1}^m \vec{C}_i = \vec{0}$$

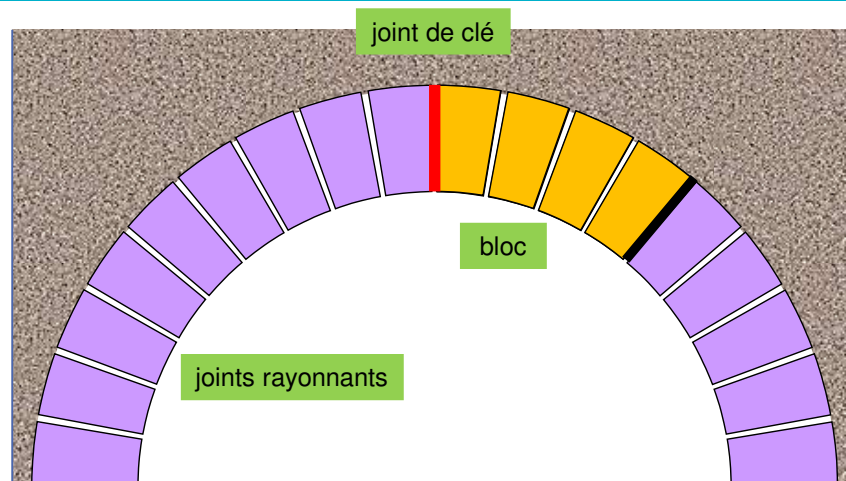


En tout point ! ...



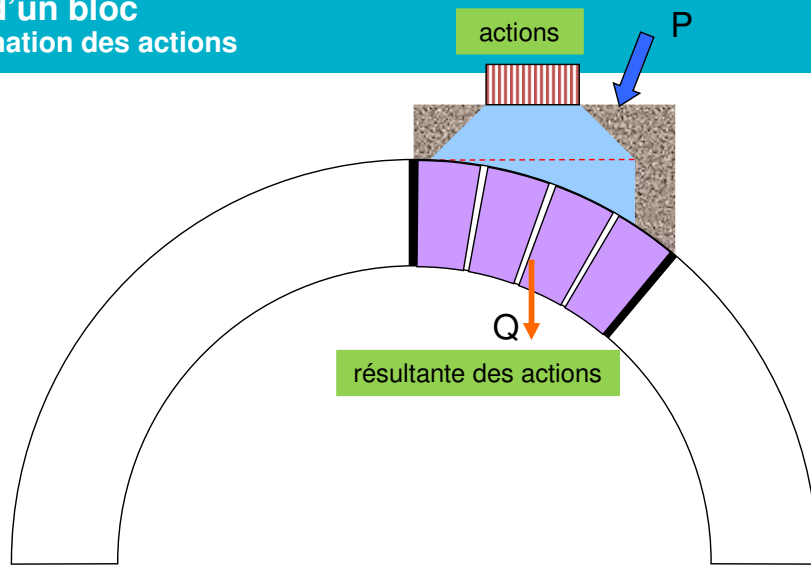
Si on découpe la voûte en blocs par des sections de direction quelconque, **chaque bloc est en équilibre si sur chaque « joint »** il existe une répartition de contrainte respectant les critères de résistance
La « famille » de joints est caractérisée par la forme et le nombre des joints

Découpage de la voûte en voussoirs



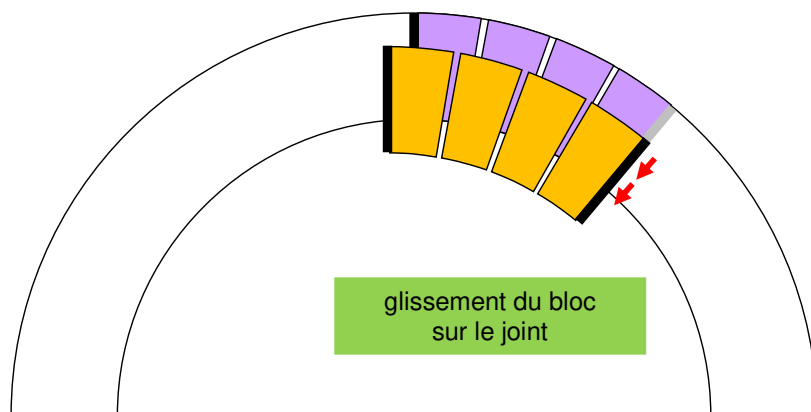
Le choix d'une famille de joints est un **affaiblissement du raisonnement** car la famille de joints retenue n'est pas nécessairement la plus défavorable

Etude d'un bloc Détermination des actions



Pour simplifier la présentation du calcul,
la résultante Q des actions agissant sur le bloc est considérée verticale

Etude d'un bloc Glissement du bloc



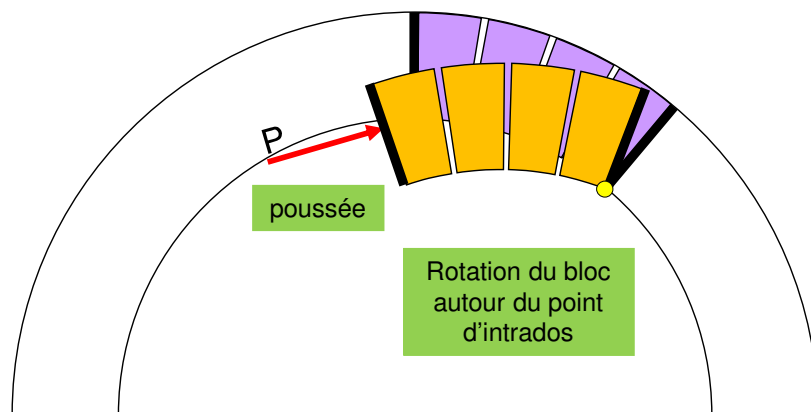
Etude d'un bloc A propos du glissement



- Couplet en 1729 introduit pour la première fois « l'engrènement et la liaison des voussoirs » qui les empêchent de glisser les uns contre les autres.
- Coulomb en 1773, après avoir fait l'étude des voûtes comportant des joints sans frottement, remarque que cette approche conduit à des résultats absurdes.
- Il considère alors des joints satisfaisant au critère de frottement sec et introduit un mécanisme de ruine par glissement le long d'un joint.

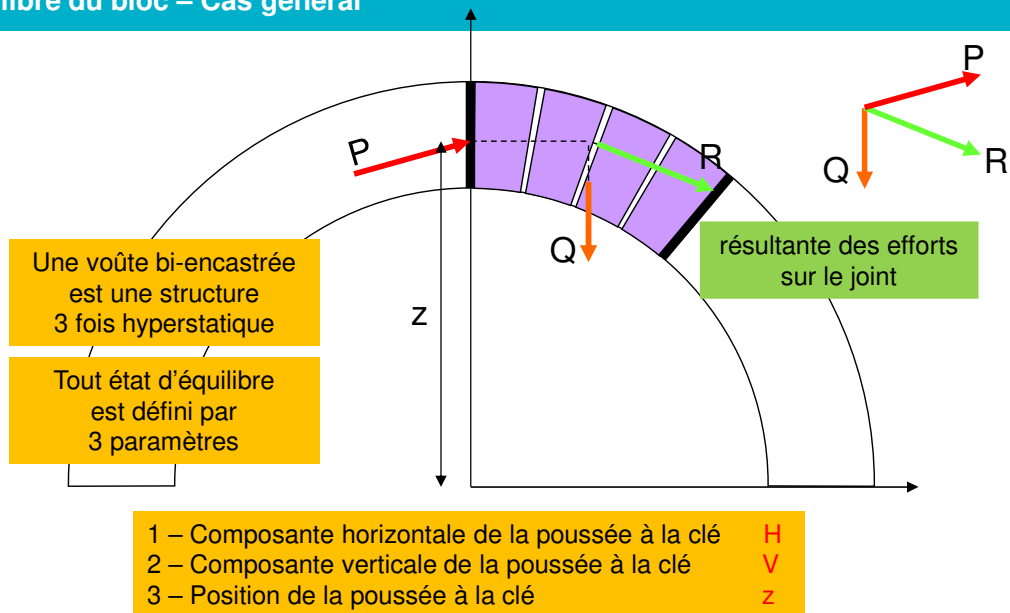
$$\tau \leq c + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi$$
- On adopte généralement $c = 0$ et $\varphi = 27^\circ$ soit $\operatorname{tg} \varphi = 0,5$
- Il élimine ce mode de rupture car il ne se produit jamais dans la réalité.

Etude d'un bloc Rotation du bloc

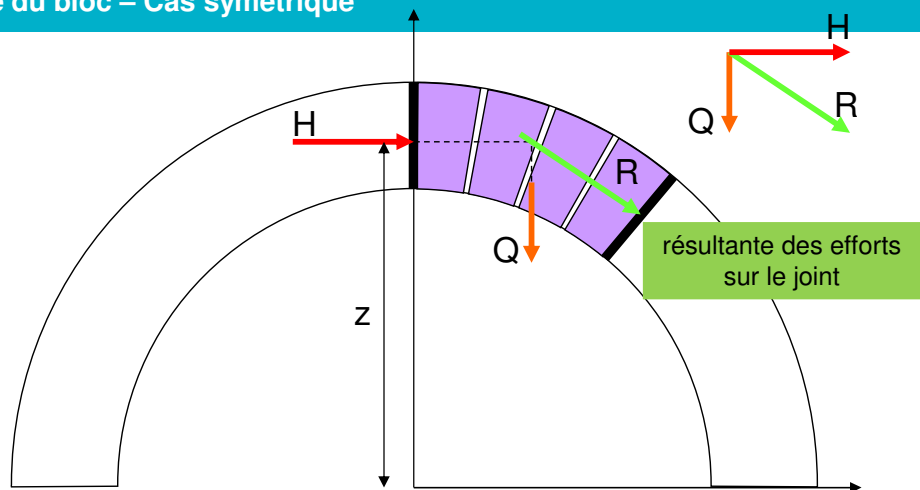


Pour équilibrer le bloc, **il convient d'exercer sur le joint de clé une poussée P**

Etude d'un bloc Equilibre du bloc – Cas général



Etude d'un bloc Equilibre du bloc – Cas symétrique

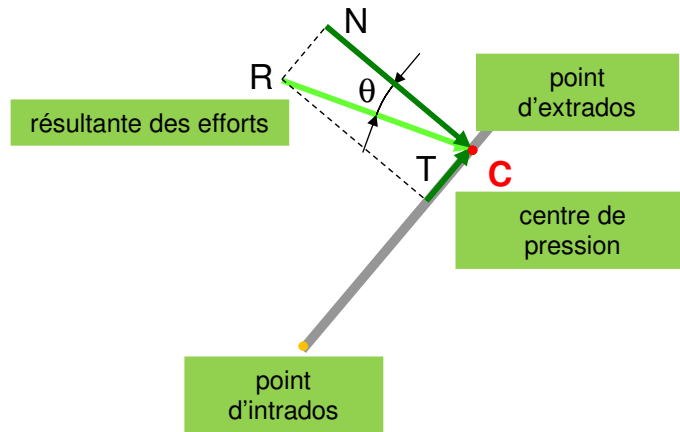


Pour simplifier la présentation,
la poussée P sur le joint de clé est considérée horizontale (cas symétrique)

$$P = H \text{ et } V = 0$$

Equilibre du joint

Stabilité selon le critère de traction



Le **centre de pression C** est le point de passage de la résultante R des efforts sur le joint

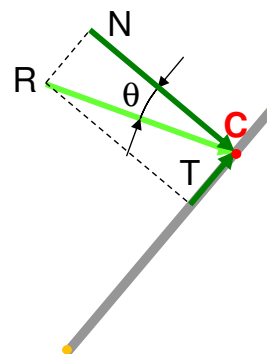
Equilibre du joint

Stabilité selon le critère de traction

Il y a stabilité si :

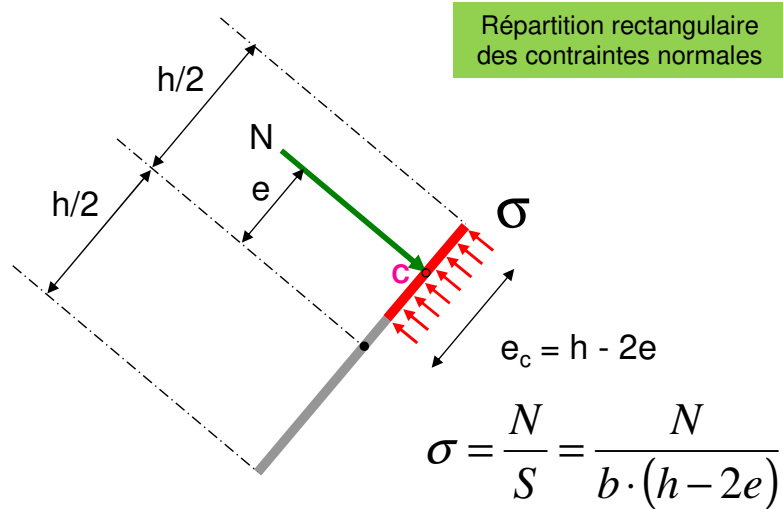
- ☞ Le centre de pression passe à l'intérieur du joint
- ☞ Le joint est comprimé
 $N > 0$
- ☞ Non glissement au droit du joint
 $T < N \cdot \tan \varphi$

Critère de traction



Equilibre du joint

Stabilité selon le critère de traction - compression



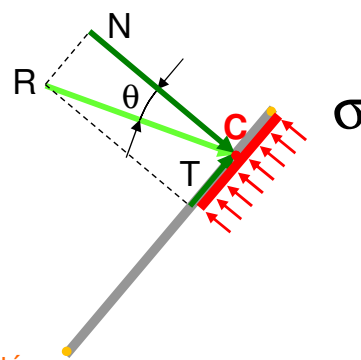
La largeur comprimée e_c pour équilibrer l'effort normal N est égale à $e_c = h - 2e$

Equilibre du joint

Stabilité selon le critère de traction - compression

Il y a stabilité si :

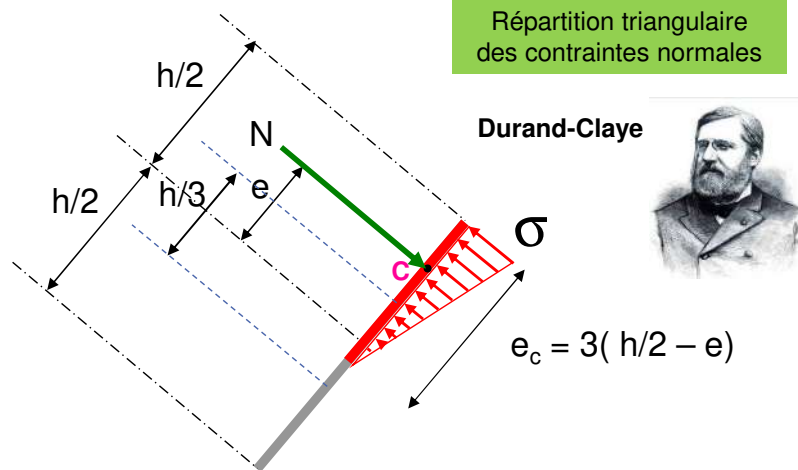
- ☞ Le centre de pression passe à l'intérieur du joint
- ☞ Le joint est comprimé
 $N > 0$
- ☞ Non glissement au droit du joint
 $T < N \cdot \text{tg } \varphi$
- ☞ Résistance de la maçonnerie respectée
 $\sigma < \sigma_0$



Critère de traction - compression

Equilibre du joint

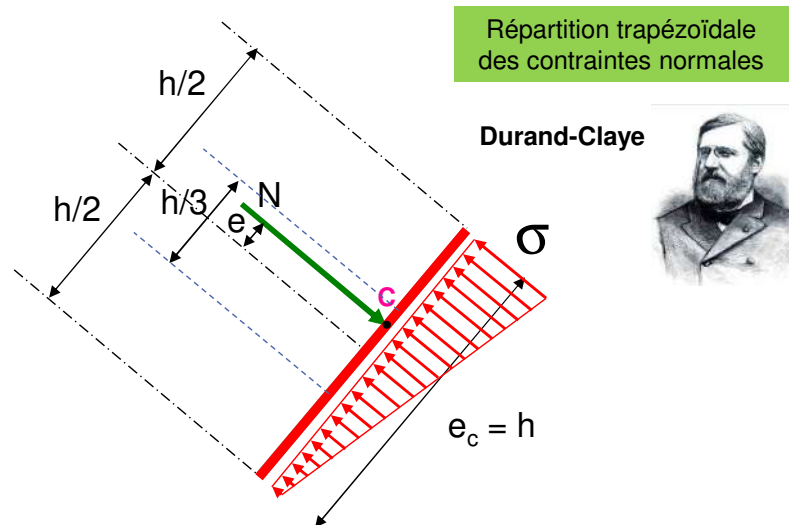
Stabilité selon le critère de traction - compression



La largeur comprimée e_c pour équilibrer l'effort normal N est égale à $e_c = 3(h/2 - e)$ si la résultante des efforts est en dehors du tiers central.

Equilibre du joint

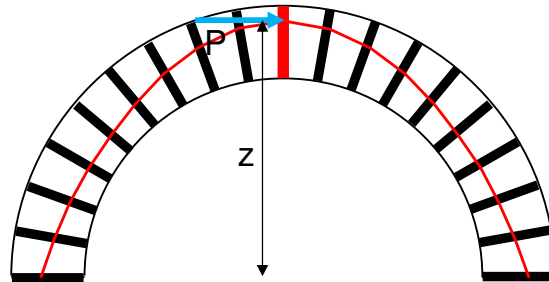
Stabilité selon le critère de traction - compression



La largeur comprimée e_c pour équilibrer l'effort normal N est égale à $e_c = h$ si la résultante des efforts est à l'intérieur du tiers central

Ligne des centres de pression

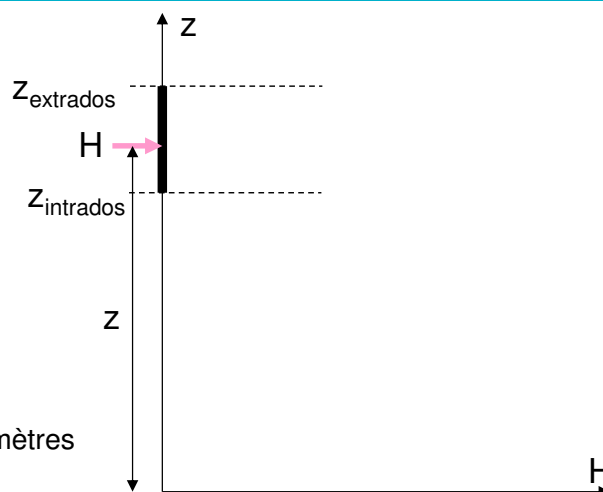
La **ligne des centres de pression** associée à une famille de joints et à la poussée P passant par la cote z est la ligne qui relie l'ensemble de points C des joints.



Pour que la **condition de stabilité en traction** soit respectée sur l'ensemble des joints, il faut que la ligne des centres de pression reste à l'intérieur de la voûte.

Pour que la **condition de stabilité en traction – compression** soit respectée sur l'ensemble des joints, il faut que la ligne des centres de pression reste à l'intérieur de la voûte, **et ne s'approche pas trop près des courbes d'intrados et d'extrados**.

Etude du domaine de stabilité

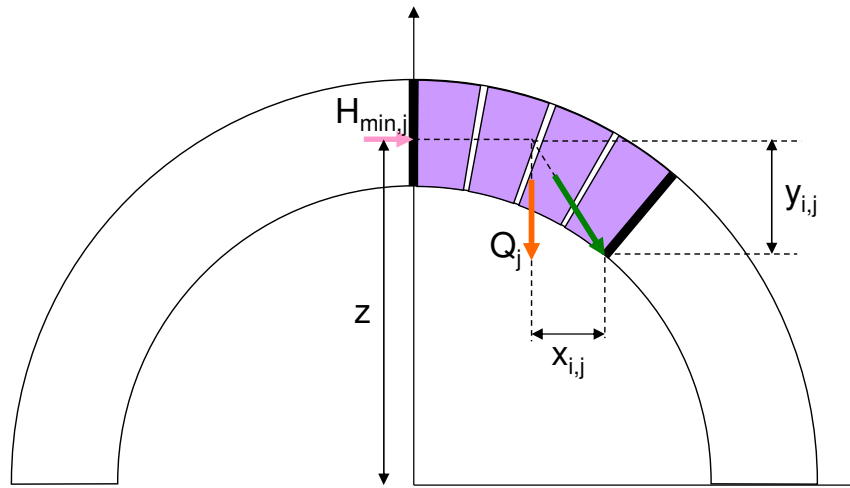


Le domaine de stabilité est défini par deux paramètres (cas symétrique)

En abscisse : par la poussée H

En ordonnée par la cote de passage à la clé z

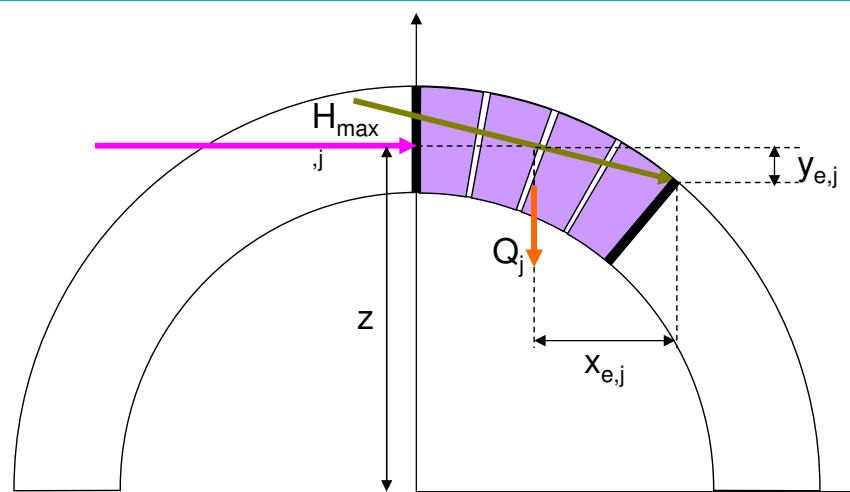
Etude du domaine de stabilité



A une cote z fixée, recherche de la **poussée minimale**

$$H_{\min} = \text{Max} (Q_j \cdot x_{i,j} / y_{i,j}) \text{ pour } j = 1 \text{ à } n$$

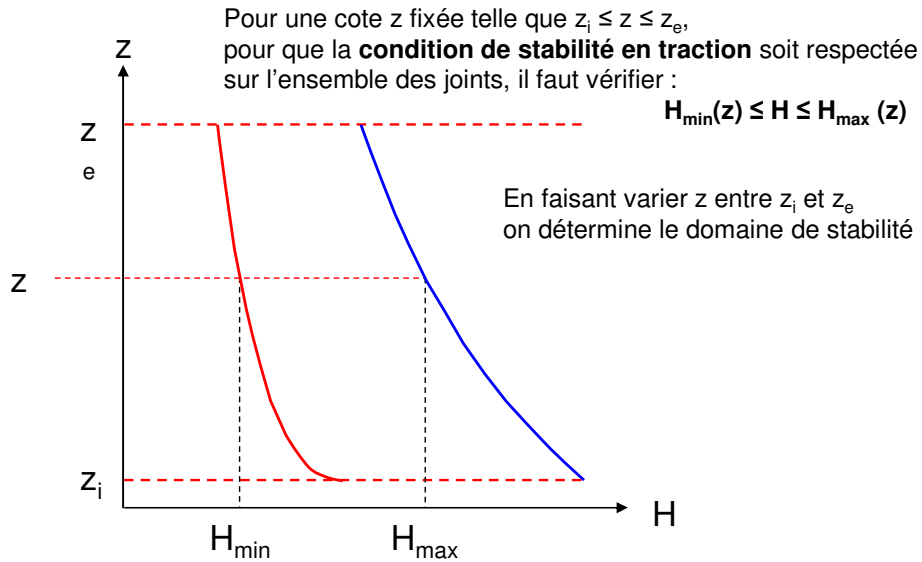
Etude du domaine de stabilité



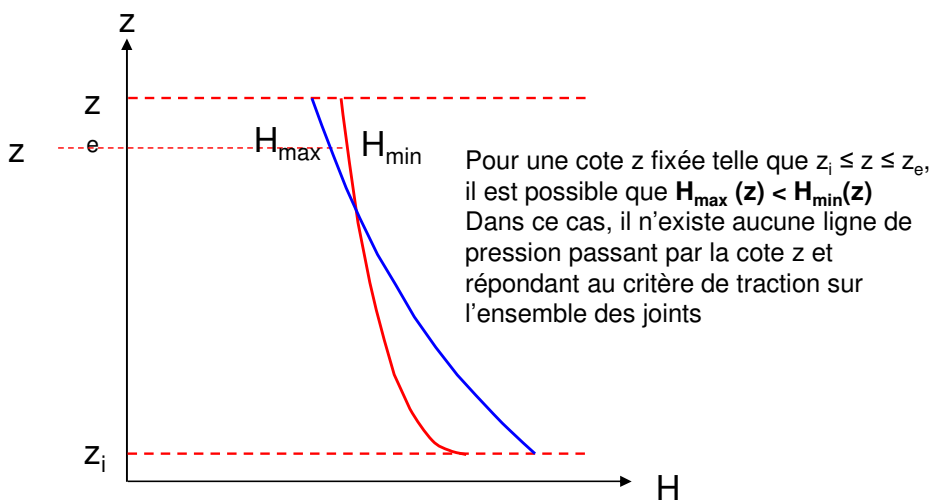
A une cote z fixée, recherche de la **poussée maximale**

$$H_{\max} = \text{Min} (Q_j \cdot x_{e,j} / y_{e,j}) \text{ pour } j = 1 \text{ à } n$$

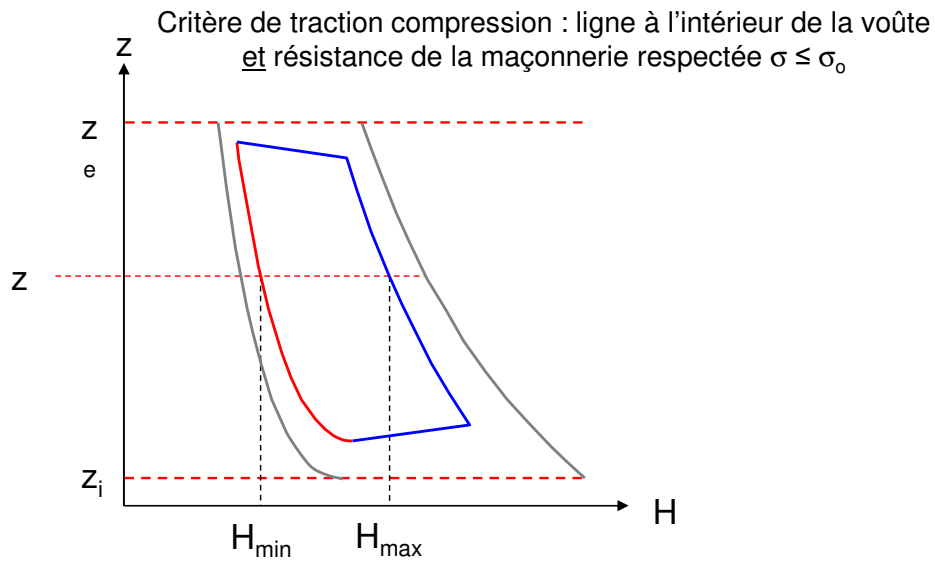
Etude du domaine de stabilité



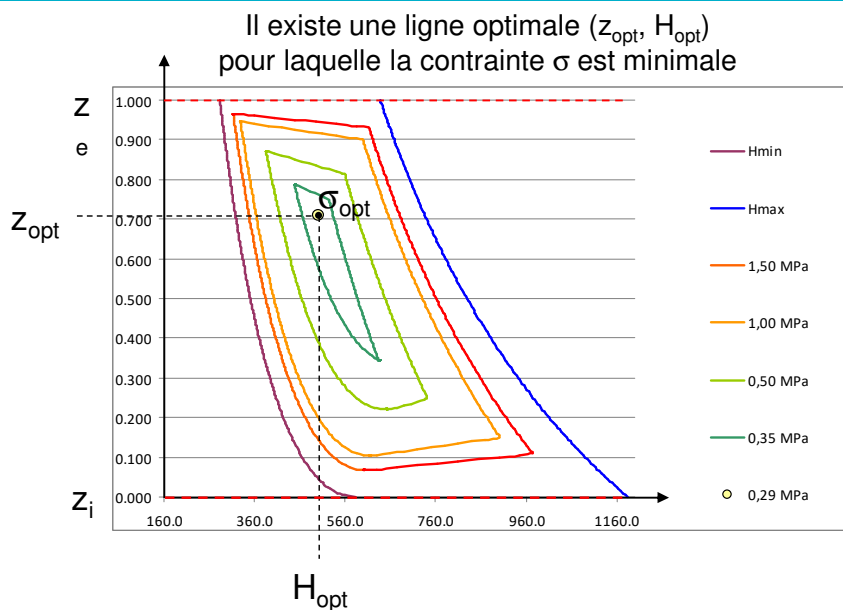
Etude du domaine de stabilité



Etude du domaine de stabilité



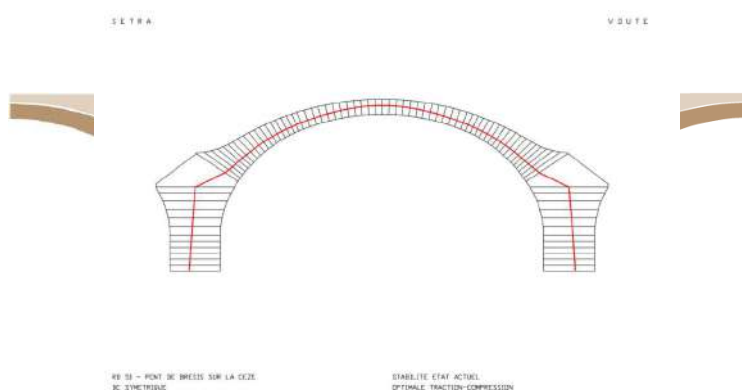
Etude du domaine de stabilité



Etude du domaine de stabilité Interprétation

- **Le critère de traction** permet de définir le domaine des lignes des centres de pression indépendamment de la résistance de la maçonnerie. Seuls comptent la géométrie et le chargement. Si ce domaine est vide, la voûte est certainement instable.
- **Le critère de traction compression** permet de définir le domaine des lignes des centres de pression qui respectent en plus la limite de résistance de la maçonnerie que l'on s'est fixée.
- **La ligne optimale** est la ligne pour laquelle **la contrainte maximale σ_{opt} de compression est minimale**.
- La ligne optimale est associée à la géométrie et au chargement, c'est-à-dire que pour chaque cas de charge on peut associer une ligne optimale.

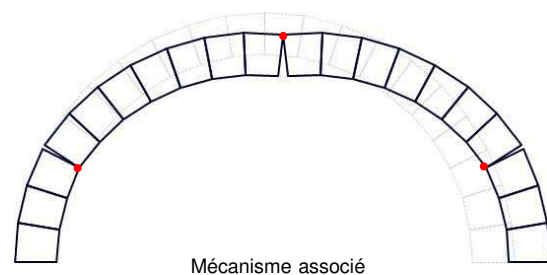
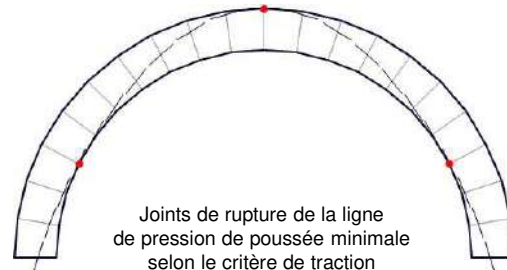
Ligne optimale



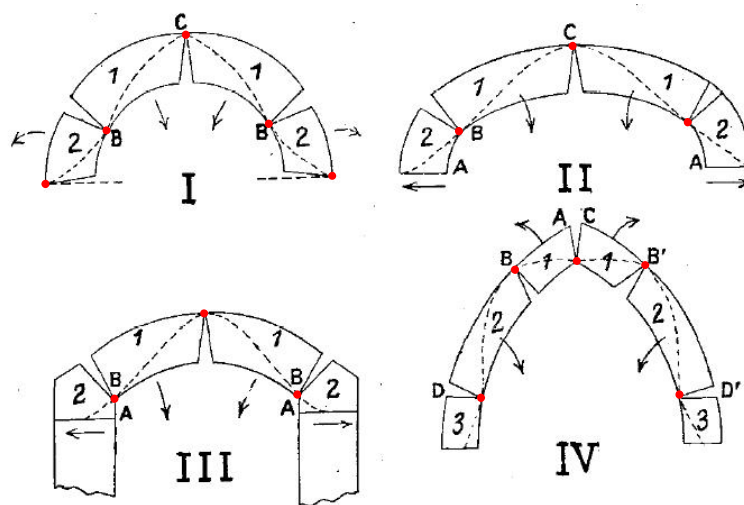
Joint de rupture (ou points-chaînières)

Ce sont les joints pour lesquels le(s) critère(s) sont déterminants

- Si apparition de **3 rotules**, la structure devient isostatique.
- Si apparition de **4 rotules**, la structure devient hypostatique. Il y a ruine
- La position des joints de rupture est utile à connaître pour comprendre le mécanisme de ruine de la voûte

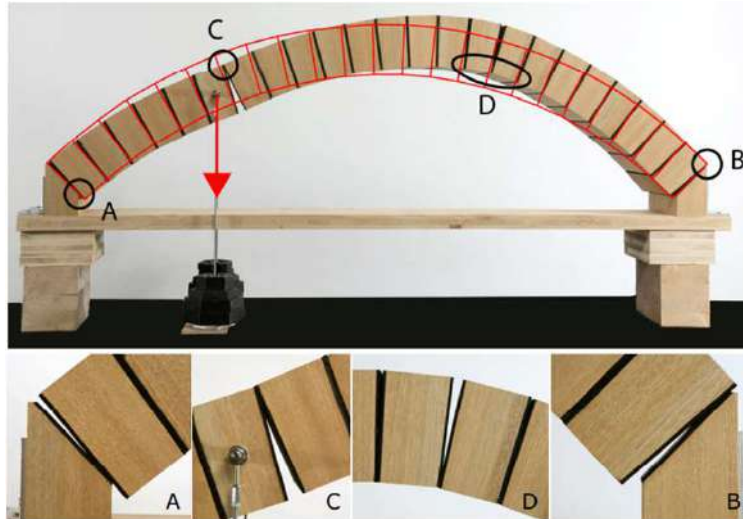


Mécanisme de ruine



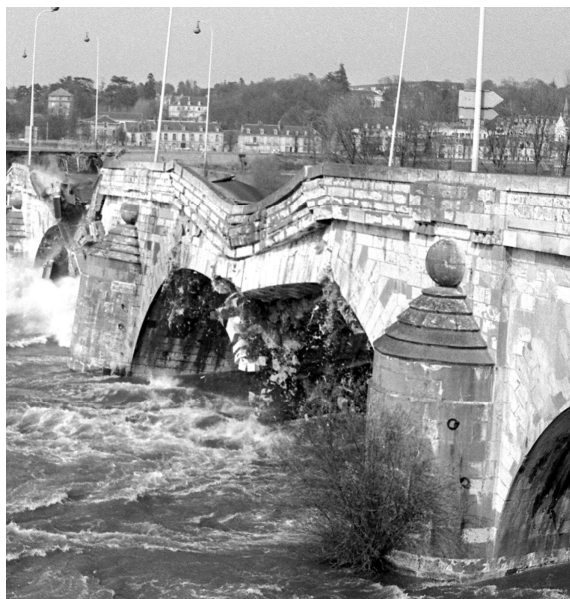
La voûte se rompt par rotation des blocs les uns par rapport aux autres

Mécanisme de ruine



Déformation d'un arc juste avant la ruine
Thèse Alix GRANDJEAN – EPFL 2010

Mécanisme de ruine

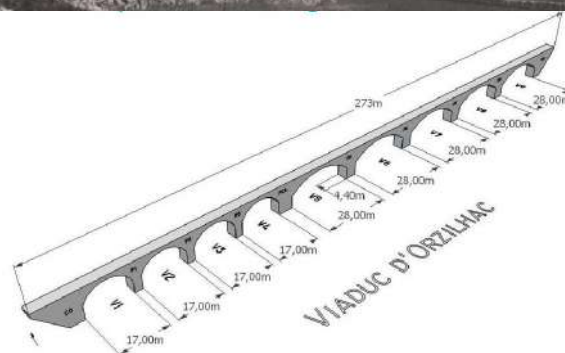


Démolition du Viaduc d'Orzilhac

Viaduc ferroviaire franchissant la Loire
 Construit vers 1930
 Ligne : Brive Charensac (Haute-Loire)
 à Lalevade (Ardèche) – 89 kms
 Ligne inachevée - Abandon en 1937
 Le pont n'a jamais été mise en service



Longueur 273 m
 9 arches : 4 de 17 m d'ouverture
 et 5 de 28 m d'ouverture



Démolition du Viaduc d'Orzilhac

Le pont a été victime des violentes crues de la Loire.
 On a observé un affouillement des assises de la pile P7 qui a provoqué un tassement et un basculement.



Démolition du Viaduc d'Orzilhac



Démolition du Viaduc d'Orzilhac

Le pont est resté en l'état fort longtemps, mais le phénomène évoluant inexorablement et devant sa dangerosité, la démolition partielle a été envisagée. L'opération s'est déroulée le 12 décembre 2011.



Démolition du Viaduc d'Orzilhac



Vidéo

4 – Sécurité des voûtes en maçonnerie



Réglementation

- **Il n'existe pas de texte réglementaire** pour évaluer la performance structurale d'un ouvrage existant.
- Un nouvel Eurocode
« Evaluation et rénovation des structures existantes »
est en cours d'élaboration.
- En attendant ...

NI-OA n° 35 – Mai 2012

Méthodes courantes d'évaluation structurale des ouvrages existants
Pratiques en vigueur dans le réseau scientifique et technique (RST)



- **La stricte application des règlements** destinés aux ouvrages à construire pour évaluer un ouvrage existant **n'est pas toujours pertinente**.
- Les projeteurs sont amenés lors des recalculs d'ouvrages à **prendre des initiatives, à faire des adaptations et dérogations par rapport aux règlements** utilisés pour la conception des ouvrages neufs, en se basant sur des textes ou articles n'ayant pas de caractère officiel ou sur leur expérience.

Évaluation de la performance

NI-OA n° 35 – Mai 2012

- Elle se fait vis-à-vis de trois aspects :
 - La **sécurité structurale** (ou capacité portante) y compris la fatigue (ELU)
 - L'**aptitude au service** (ELS)
 - La **durabilité** (Matériau)
- Les Etats Limites sont définis par l'Eurocode 0
 - **ELS** : Etats correspondant à des conditions au-delà desquelles les exigences d'aptitude au service spécifiées ne sont plus satisfaites (fonctionnement, confort, aspect)
 - **ELU** : Etats associés à un effondrement ou à d'autres formes similaires de défaillance structurale (sécurité des personnes et de la structure)
- Quels règlements utiliser ? Les plus actuels (**Eurocodes**)
avec éventuellement des aménagements pertinents
- Quel règlement de charges ? **Eurocode 1 Partie 2**.

États limites

Trois modes de défaillances sont à envisager

- Cas A : Perte d'équilibre statique
- Cas B : Défaillance de la structure due à un manque de résistance du matériau
- Cas C : Défaillance du sol

EQU

STR

Non objet de cet exposé

GEO

EQU $1,05 G_{\text{sup}} + 0,95 G_{\text{inf}} + 1,35 Q_{\text{route,défavorable}}$

$$1,05 G + 1,35 Q_{\text{route,défavorable}}$$

$$0,95 G + 1,35 Q_{\text{route,défavorable}}$$

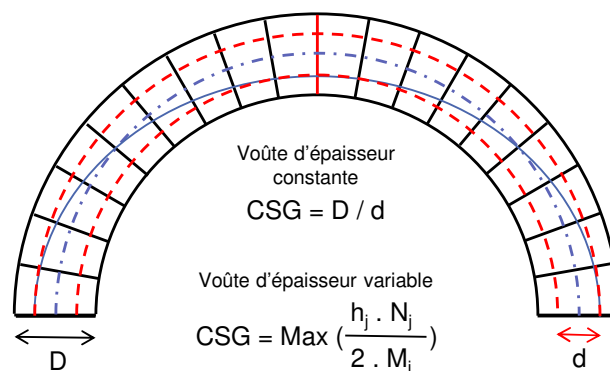
STR $1,35 G_{\text{sup}} + 1,00 G_{\text{inf}} + 1,35 Q_{\text{route,défavorable}}$

$$1,35 G + 1,35 Q_{\text{route,défavorable}}$$

$$1,00 G + 1,35 Q_{\text{route,défavorable}}$$

Etude de l'équilibre statique Coefficient de Sécurité Géométrique

EQU



Le CSG correspond au rapport entre l'épaisseur de la voûte étudiée « D » et l'épaisseur minimale « d » de voûte homothétique (par rapport à la courbe des centres de joints) contenant au moins une ligne de pression.

Cette ligne est celle qui minimise l'excentricité $e = M / N$ de la résultante R pour la famille de joints considérée. Il peut être assimilé à un **coefficient réducteur de l'épaisseur de la voûte**.

Etude de l'équilibre statique

Coefficient de Sécurité Géométrique

EQU

Si le **coefficient de sécurité géométrique** d'une ligne de pression vaut :

- **1**, cela signifie que cette ligne de pression est exactement contenue dans l'arc, et qu'elle touche l'intrados ou l'extrados en au moins un point.
- **2**, cela signifie que cette ligne de pression est contenue dans une voûte 2 fois plus fine que la voûte réelle.
- **3**, cela signifie que cette ligne de pression est contenue dans le tiers central de la voûte.



Jacques HEYMAN considère que la voûte est stable si le coefficient de sécurité géométrique est supérieur ou égal à **2**.



Cette valeur corrobore la **limite d'excentrement** fixée par la Norme NF P 94-281
Norme d'application nationale de l'Eurocode 7 : Ouvrages de soutènement : Murs - Avril 2014

Article 12.3 : $1 - \frac{2e}{B} \geq \frac{1}{2}$ soit $e \leq B / 4$ sauf qu'il s'agit d'ELS !

Etude de l'équilibre statique

Coefficient de Sécurité de Résistance

STR

appelé aussi **coefficient de rupture**

- Le coefficient de rupture est le rapport entre :
 - La résistance à la compression simple σ_0 de la maçonnerie
 - La contrainte optimale σ_{opt} calculée

$$CSR = \frac{\sigma_0}{\sigma_{opt}}$$

- C'est le coefficient par lequel il faut multiplier toutes les charges (y compris les charges permanentes) pour obtenir la ruine de la voûte.

$$CSR = \frac{Q_{extrême}}{Q_{réel}}$$

Etude de l'équilibre statique

Coefficient de Sécurité de Résistance

STR

- Si $CSR < 1$ La voûte est certainement instable
- Si $CSR \geq 1$ La voûte est potentiellement stable

$$CSR = \frac{\sigma_o}{\sigma_{opt}}$$



Jean-Michel DELBECQ considère que la voûte est stable si le coefficient de rupture est supérieur ou égal à **3**.



Ce coefficient est à relativiser. Il a été fixé de façon à :

- Retomber à peu près sur la règle des anciens
- Conclure rapidement pour un « non expert »

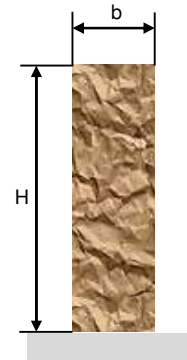
Dans la pratique, le SETRA admet de descendre à **2,5** moyennant une attention particulière sur les calculs (hypothèses et résultats)

Nota : Pour le béton, la limite ELU = $0,85 f_{ck} / 1,5 = f_{ck} / 1,77$

5 – Exemples de calcul à rupture



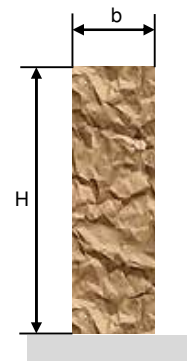
Calcul à rupture – Cas du mur de soutènement



Calcul à rupture – Cas du mur de soutènement

Caractéristique des matériaux

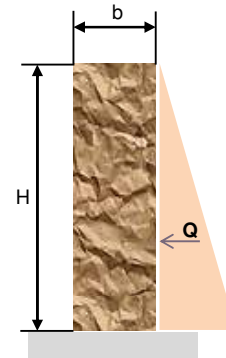
- Maçonnerie
 - Poids volumique : $\gamma_m = 24 \text{ kN/m}^3$
 - Résistance à la compression : $\sigma_0 = 3 \text{ MPa}$
 - Résistance à la traction : nulle
- Remblai
 - Poids volumique : $\gamma_r = 22 \text{ kN/m}^3$
 - Angle de frottement interne : $\alpha = 30^\circ$
 - Coefficient de poussée : $K_a = 0,33$



Calcul à rupture – Cas du mur de soutènement

Chargement

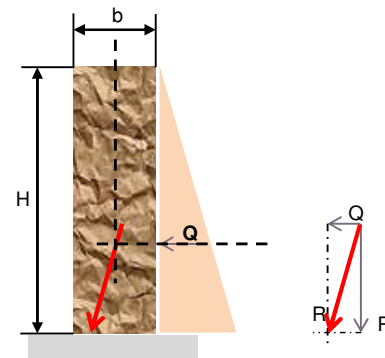
- On considère une largeur de 1 ml de mur
- Poids propre
 - Poids volumique maçonnerie : $\gamma_m = 24 \text{ kN/m}^3$
 - $P = b \cdot H \cdot \gamma_m$
- Remblai
 - On suppose qu'il n'y a pas de frottement sol/mur
 - Poids volumique du remblai : $\gamma_r = 22 \text{ kN/m}^3$
 - Coefficient de poussée : $K_a = 0,33$
 - Poussée : $Q = K_a \cdot \gamma_r \cdot H^2 / 2$



Calcul à rupture – Cas du mur de soutènement

Actions sur le joint

- Force verticale : P
- Force horizontale : Q
- Résultante : $R = (P^2 + Q^2)^{1/2}$
- Inclinaison de la résultante sur le joint : $\varphi = \text{Arctg}(Q/P)$
- Critère d'interface global de Coulomb
Si φ supérieur à 27° alors **glissement potentiel**
 $\varphi \leq 27^\circ$ équivaut à $Q \leq P \cdot \text{tg } \varphi$

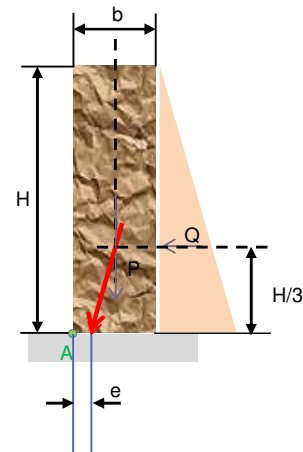


$$Q \leq 0,5 P$$

Calcul à rupture – Cas du mur de soutènement

Etude de la stabilité du bloc

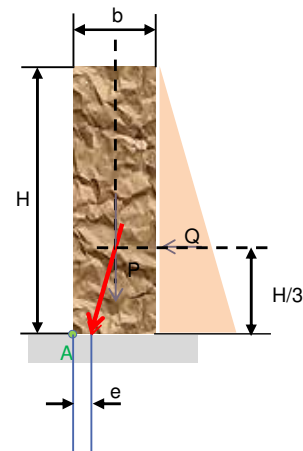
- Etude par rapport au point A
- Moment stabilisant : $M_s = P \cdot b / 2$
- Moment renversant : $M_r = Q \cdot H / 3$
- Moment : $M_A = P \cdot b / 2 - Q \cdot H / 3$
 - Si M_A positif : Stabilité potentielle
 - Si M_A négatif : Renversement
- Excentricité : $e = M_A / P$
 $e = b / 2 - Q \cdot H / 3 \cdot P$
- **Critère de traction** : $e \geq 0$
Le joint doit rester comprimé



Calcul à rupture – Cas du mur de soutènement

Etude de la stabilité du joint

- Excentricité / pt A : $e = b / 2 - Q \cdot H / 3 \cdot P$
- En supposant une répartition rectangulaire des contraintes sur le joint :
Si $e > 0$: $\sigma = P / 2 \cdot e$
- Il convient de comparer σ à σ_0
Critère de traction – compression : $\sigma \leq \sigma_0$
- **Coefficient de rupture** : $k = \sigma_0 / \sigma$
Si $k < 1$: instabilité
Si $k \geq 1$: stabilité potentielle



Calcul à rupture – Cas du mur de soutènement

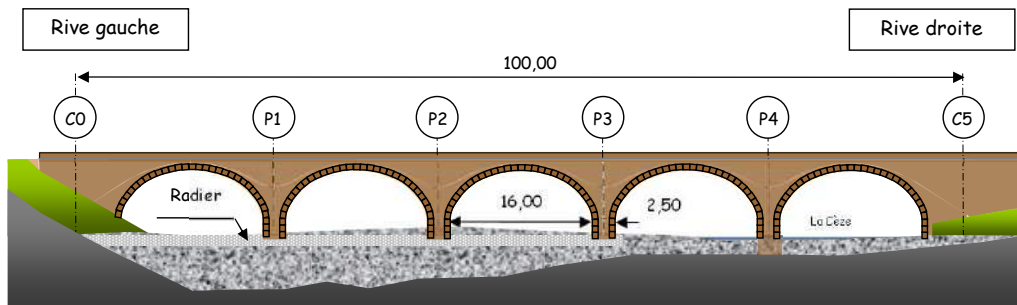
				H	e	CSG	σ	CSR	tg ϕ	
Géométrie	Hauteur	H	3.700 m	0,500 m	0,589 m	56,6	0,0 MPa	245,6		
	Épaisseur	b	1.200 m	1,000 m	0,558 m	14,1	0,0 MPa	116,2		
Matériaux	Maçonnerie	Poids volumique	γ_m	24.00 kN/m ³	1,500 m	0,505 m	6,3	0,0 MPa	70,1	
		Résistance à rupture	σ_o	3.00 MPa	2,000 m	0,430 m	3,5	0,1 MPa	44,8	
Remblai	Poids volumique	γ_r	22.00 kN/m ³	2,170 m	0,400 m	3,0	0,1 MPa	38,4	0,28	
	Angle de frottement interne	α	30 °	2,500 m	0,335 m	2,3	0,1 MPa	27,9		
	Coefficient de poussée du remblai	Ka	0.33	2,660 m	0,300 m	2,0	0,1 MPa	23,5	0,34	
				3,000 m	0,218 m	1,6	0,2 MPa	15,1		
Poids du mur	P	106.56 kN/ml	3,500 m	0,080 m	1,2	0,6 MPa	4,8			
Poussée des terres	Q	50.20 kN/ml	3,594 m	0,052 m	1,1	1,0 MPa	3,0	0,46		
Résultante	Inclinaison	R	Q/P	3,600 m	0,050 m	1,1	1,0 MPa	2,9		
				3,700 m	0,019 m	1,0	2,8 MPa	1,1		
Moment stabilisateur	Moment renversant	M_S	M_R	3,704 m	0,018 m	1,0	3,0 MPa	1,0	0,47	
				3,710 m	0,016 m	1,0	3,4 MPa	0,9		
Excentricité	Contrainte	e	σ	3,720 m	0,013 m	1,0	4,2 MPa	0,7		
				3,730 m	0,010 m	1,0	5,6 MPa	0,5		
Coefficient de rupture	k	1.07	3,740 m	0,006 m	1,0	8,4 MPa	0,4			
			3,750 m	0,003 m	1,0	16,8 MPa	0,2			
				3,760 m	0,000 m	1,0	2192,8 MPa	0,0	0,48	
				3,928 m					0,50	

Cas d'un ouvrage d'art Exemple du pont sur la Cèze à Brésis



Cas d'un ouvrage d'art

Exemple du pont sur la Cèze à Brésis



- Matériau : Schiste : résistance entre 15 et 70 MPa

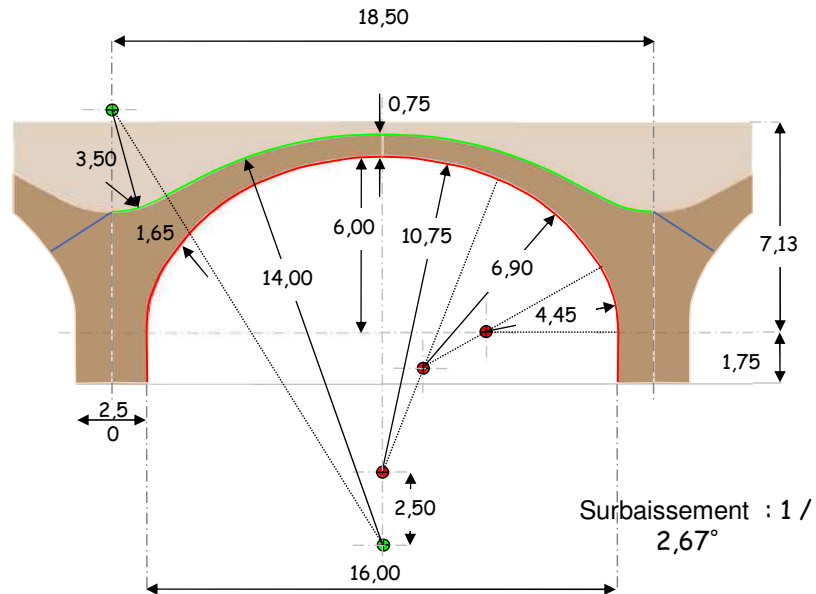
Cas d'un ouvrage d'art

Exemple du pont sur la Cèze à Brésis



Cas d'un ouvrage d'art

Exemple du pont sur la Cèze à Brésis



Cas d'un ouvrage d'art

Exemple du pont sur la Cèze à Brésis

Résistance des pierres caract. moyenne		Résistance caractéristique de la maçonnerie suivant les mortiers			
---	--	---	--	--	--

f_{pk}	f_{pm}	M4	M3	M2	M1
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

Cas d'un ouvrage d'art

Exemple du pont sur la Cèze à Brésis

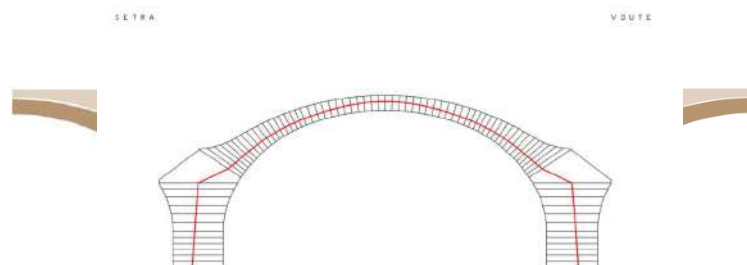
- Schiste : résistance entre 15 et 70 MPa
- Résistance à la compression de la maçonnerie : **5 MPa**

Chargement	Coefficient de rupture	Contrainte de compression maxi
Charges permanentes	5.894	0.85 MPa
A(l) symétrique	4.584	1.09 MPa
A(l) dissymétrique	4.566	1.10 MPa
Bc symétrique	4.274	1.17 MPa
Bc dissymétrique	4.296	1.16 MPa
	CSR	

Cas d'un ouvrage d'art

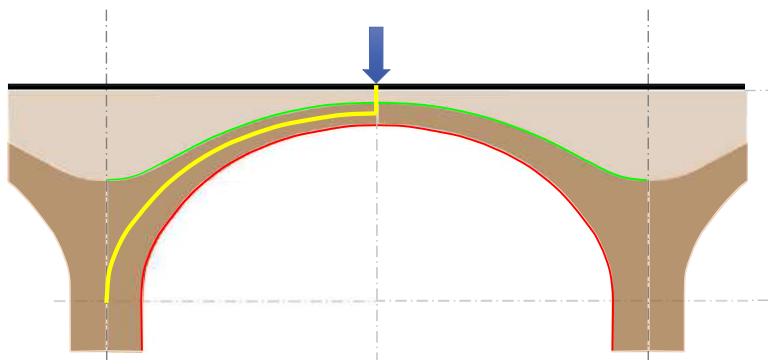
Exemple du pont sur la Cèze à Brésis

Ligne optimale sous Bc symétrique



6 – Les incertitudes

Répartition des charges Observations !



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

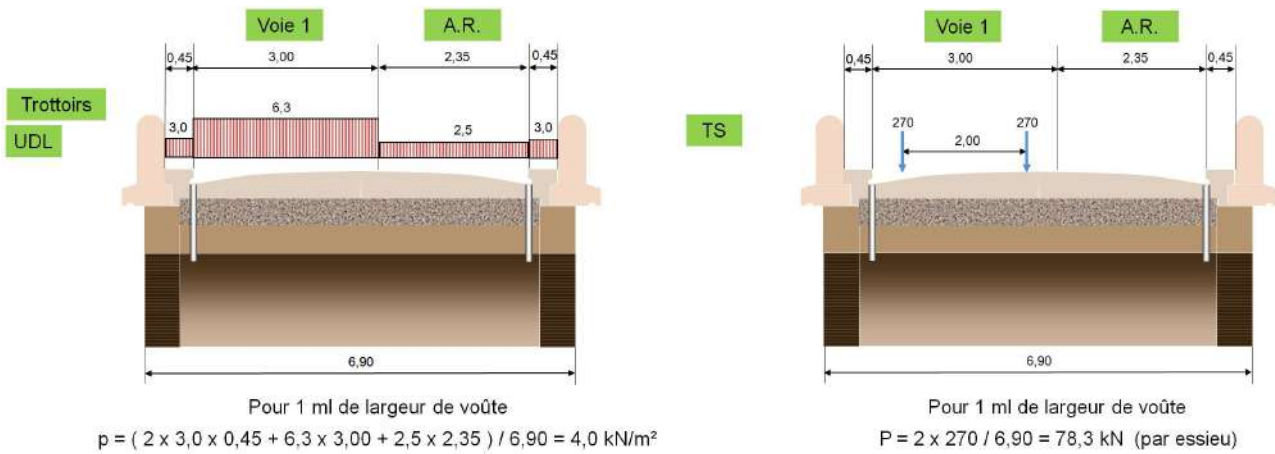
$$L_{\text{diffu}} = H_{\text{chaussée}} + H_{\text{remblai clé}} + e_{\text{clé}} / 2 + \text{Longueur du feuillet moyen de la voûte}$$

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

Répartition transversale des charges

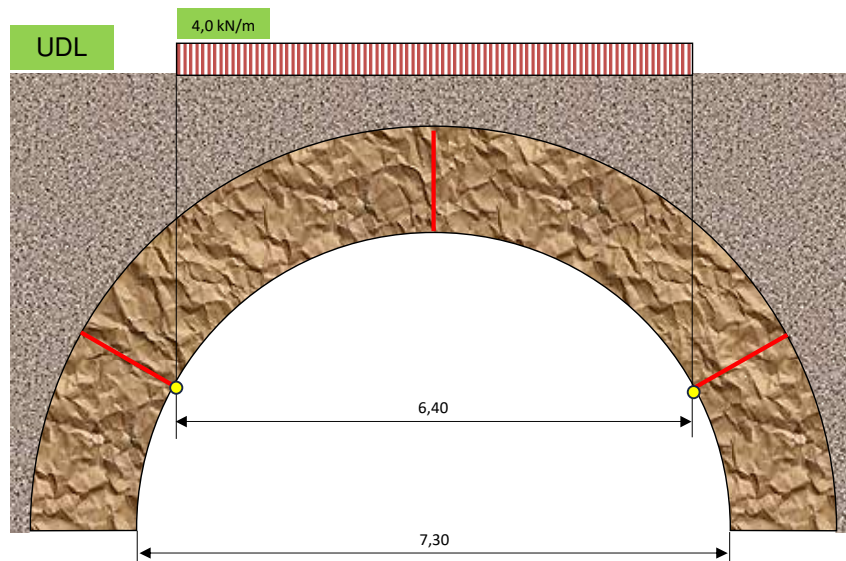
Proposition J-L MICHOTÉY

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



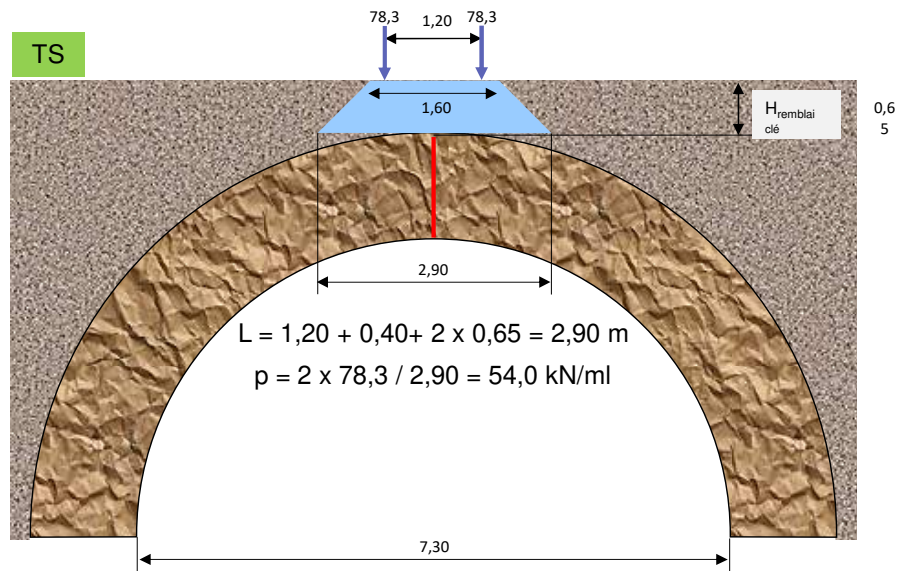
Répartition longitudinale des charges

Proposition J-L MICHOTÉY - Exemple



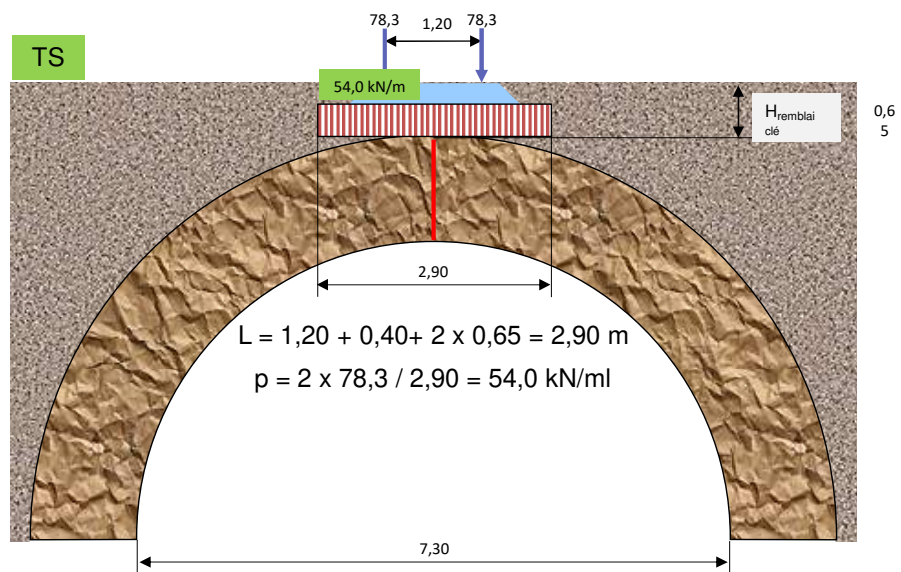
Répartition longitudinale des charges

Proposition J-L MICHOTÉY - Exemple



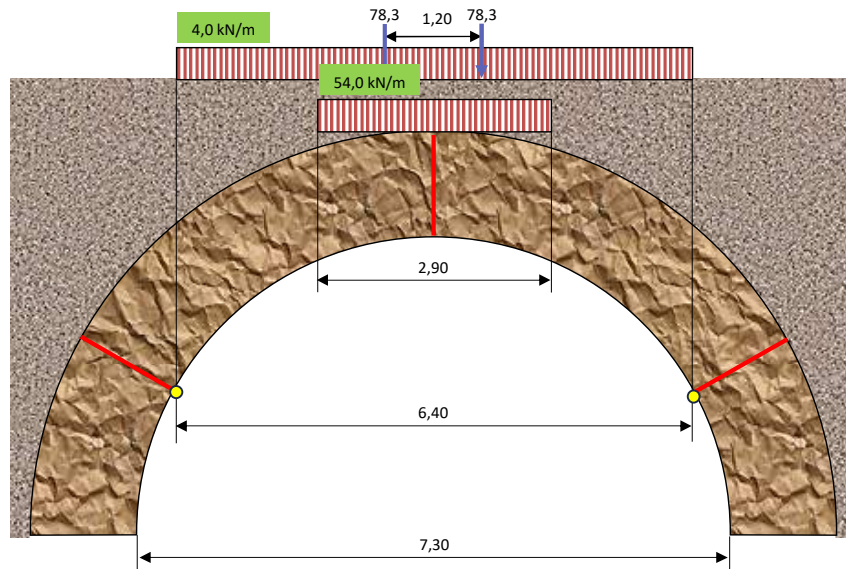
Répartition longitudinale des charges

Proposition J-L MICHOTÉY - Exemple



Répartition longitudinale des charges

Proposition J-L MICHOTÉY - Exemple

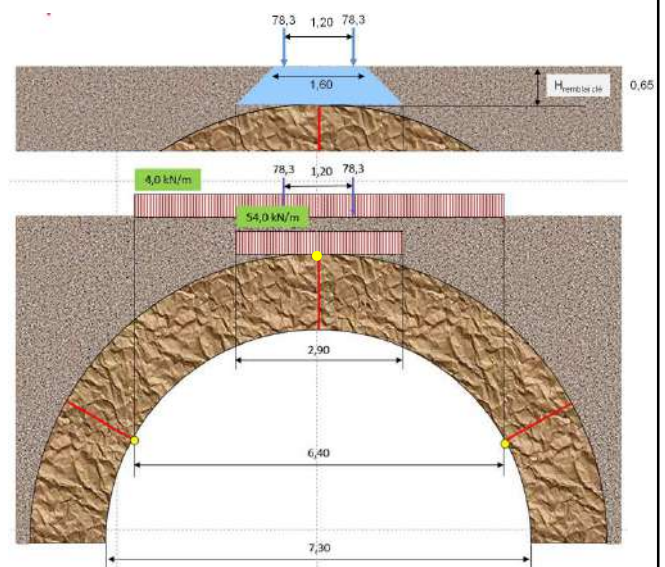


Répartition longitudinale des charges

Proposition J-L MICHOTÉY

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.



Les questions à résoudre !

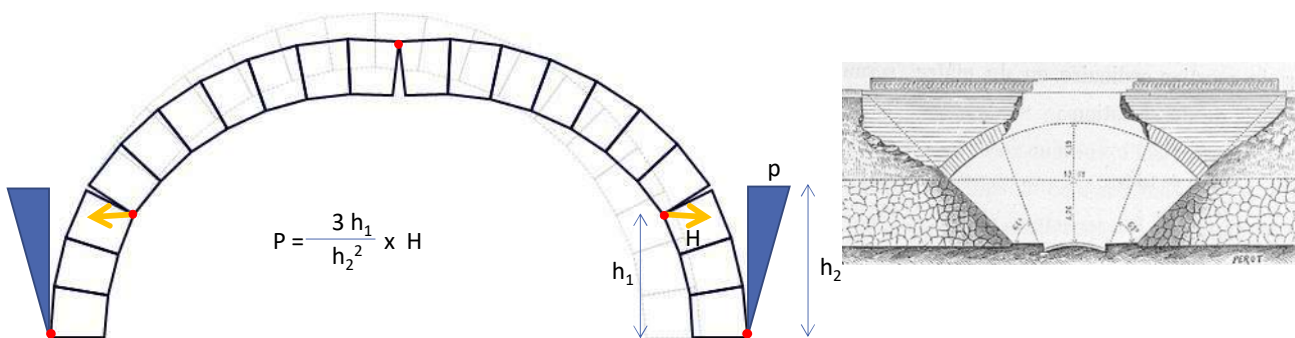
Action du matériau de remplissage

- Les remblais exercent sur l'extrados des voûtes des efforts verticaux (pesanteur) et des efforts horizontaux (poussée des terres).
- 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

Les questions à résoudre !

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.



Les questions à résoudre !

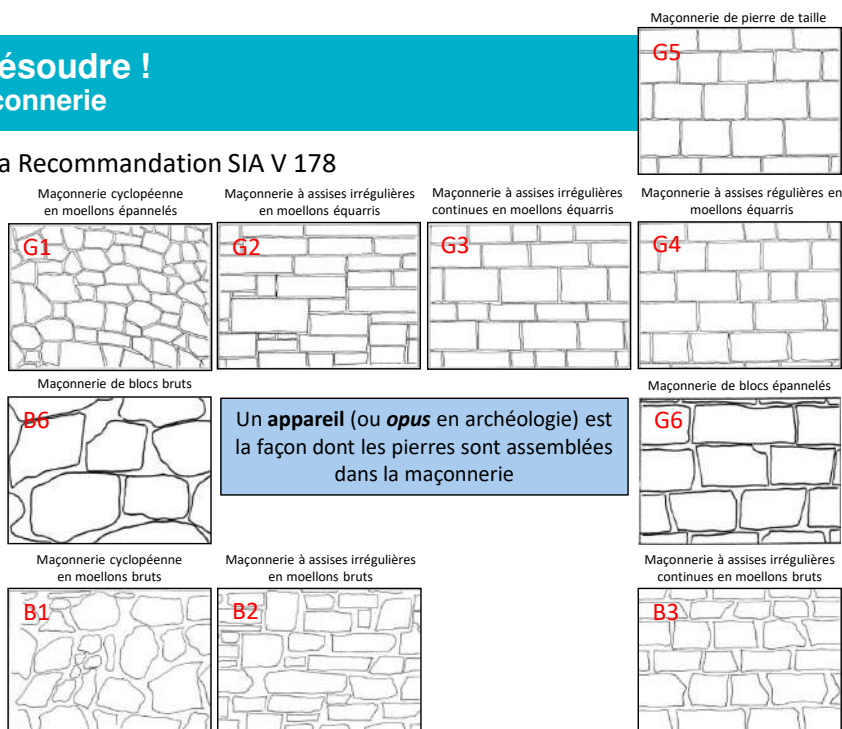
Résistance de la maçonnerie

- 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

Les questions à résoudre !

Résistance de la maçonnerie

Les appareillages selon la Recommandation SIA V 178



Les questions à résoudre !

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
	< 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	2,50
Catégorie 2	Maçonnerie à assises régulières ou irrégulières moellons épannelés	2,75
Catégorie 3	Maçonnerie cyclopéenne en moellons épannelés	3,00
Catégorie 4	Maçonnerie de moellons bruts	3,25

Les questions à résoudre !

Les 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**.



Les questions à résoudre !

Les critères de stabilité

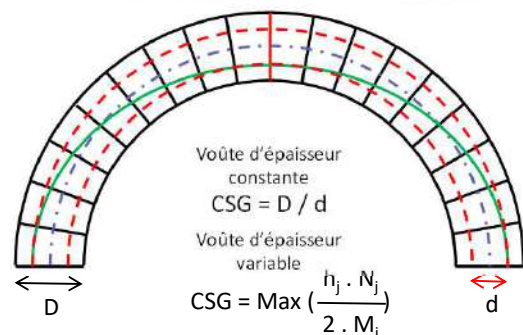
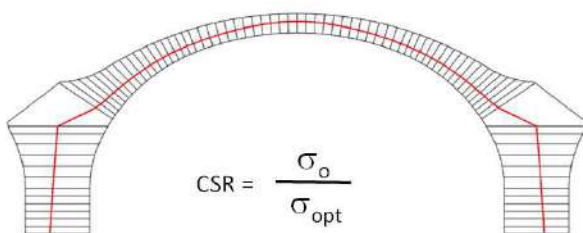
- Jacques HEYMAN propose de rechercher le fuseau de passage minimum dans lequel s'inscrit une ligne de pression.
- Ce fuseau est caractérisé par le **coefficient de sécurité géométrique**, plus grand rapport entre la demi-épaisseur résistante du joint et la distance entre la ligne de pression et la ligne 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**



Les questions à résoudre !

Les critères de stabilité

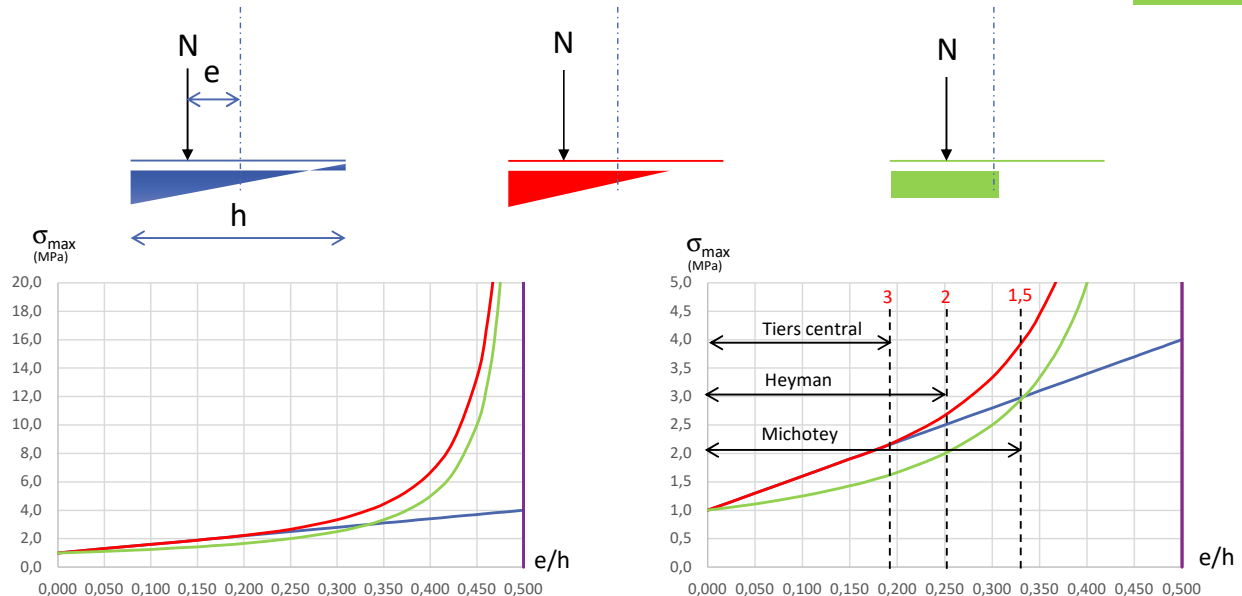
- Il est proposé de calculer systématiquement :
 - Le coefficient de rupture CSR $> 2,5$ ou 3
 - Le coefficient de sécurité géométrique CSG > 2
 - Puis de conclure



Evolution de la contrainte maximale sur le joint en fonction de l'excentrement de la charge

EQU

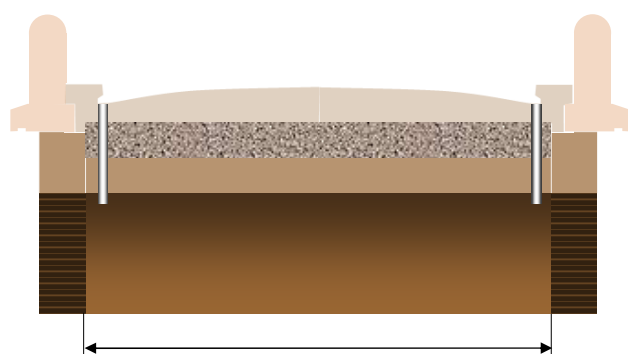
STR



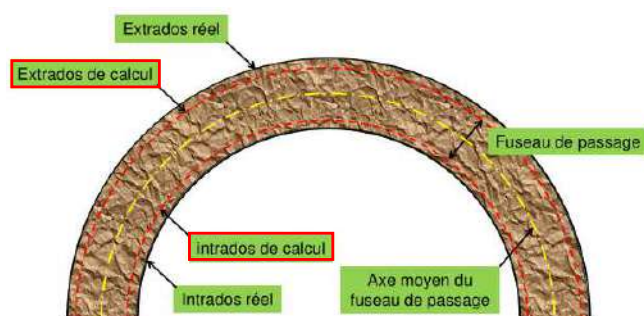
Les questions à résoudre ! La prise en compte des altérations

- 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

Les questions à résoudre ! La prise en compte des altérations



Largeur résistante réduite selon les altérations

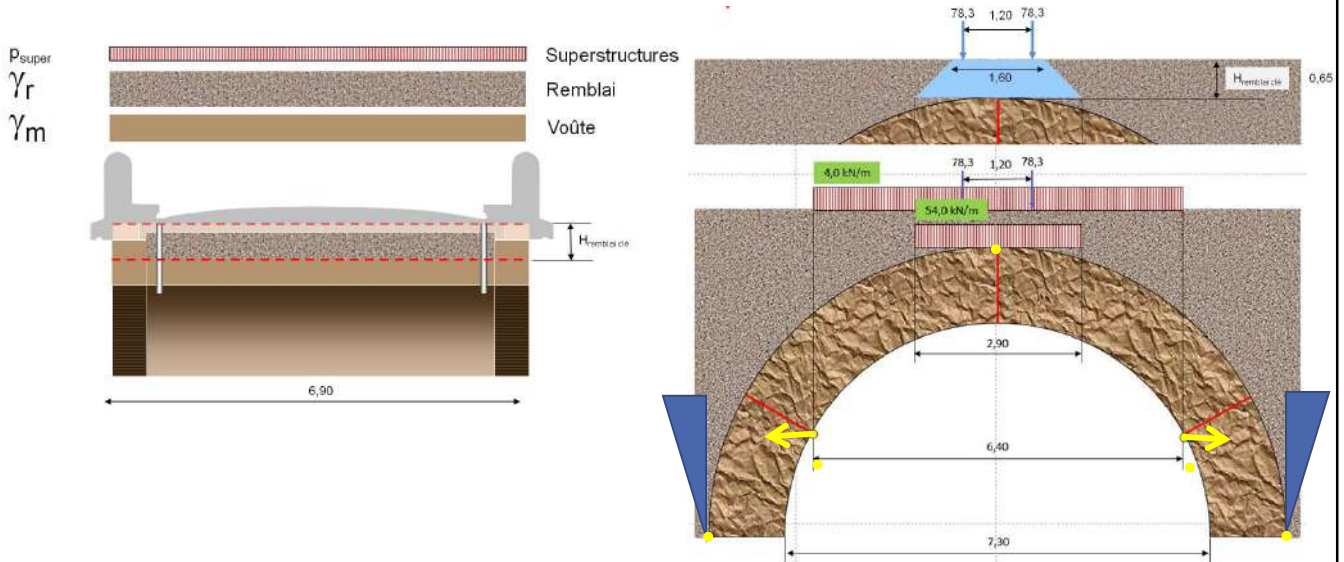


Épaisseur résistante réduite selon les altérations

Méthode de justification d'une voûte La prise en compte des altérations

- 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

Méthode de justification d'une voûte La prise en compte des altérations



Le talon d'Achille des ponts en maçonnerie ...

« Sauf de très rares exceptions qu'expliquent les fautes d'exécution, les ponts ne périssent que par les fondations »

Paul SÉJOURNÉ (Annales des P&Ch 1886)

- Insuffisance du débouché hydraulique lors des crues
- Action de l'eau sur l'ouvrage et les berges
- Affouillement du sol des fondations
- Etat précaire des fondations



Mais attention à nos aménagements ...

- Les inondations sont le premier risque naturel en France en termes de dommages occasionnés.
- Ces inondations sont aggravées depuis des décennies par l'aménagement du territoire.
- **On entrave le bon fonctionnement des cours d'eau**

- L'urbanisation : les constructions s'approchent toujours plus des zones à risque
- L'artificialisation des sols
- Certains aménagements des cours d'eau : modification du tracé, construction de digues, creusement des rivières ... qui accélèrent l'écoulement de l'eau
- Le manque d'entretien du lit des cours d'eau : apparition de bouchon de débris qui bloque la circulation de l'eau.



et au changement climatique !

- **Le changement climatique accentue les extrêmes météorologiques,** avec des pluies plus importantes sur un plus faible nombre de jours.
- Cette augmentation de l'intensité des précipitations amplifie les phénomènes d'inondation et risque d'accroître les dégâts observés en zones vulnérables.

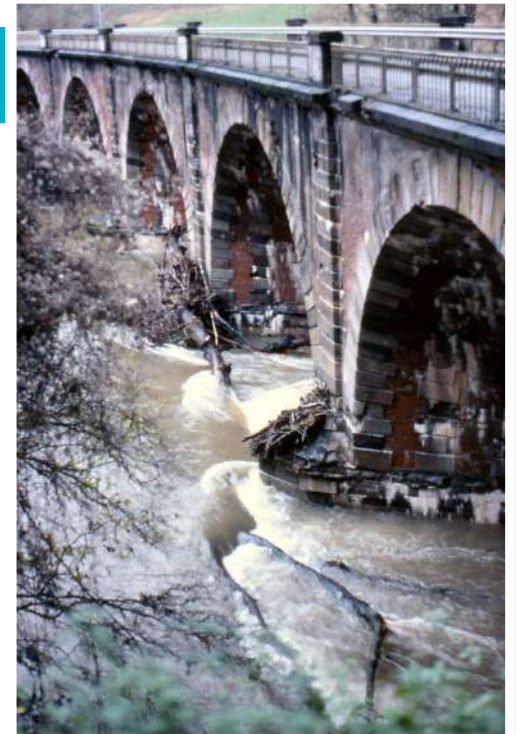


Conséquences des crues Submersion partielle ou totale des ponts

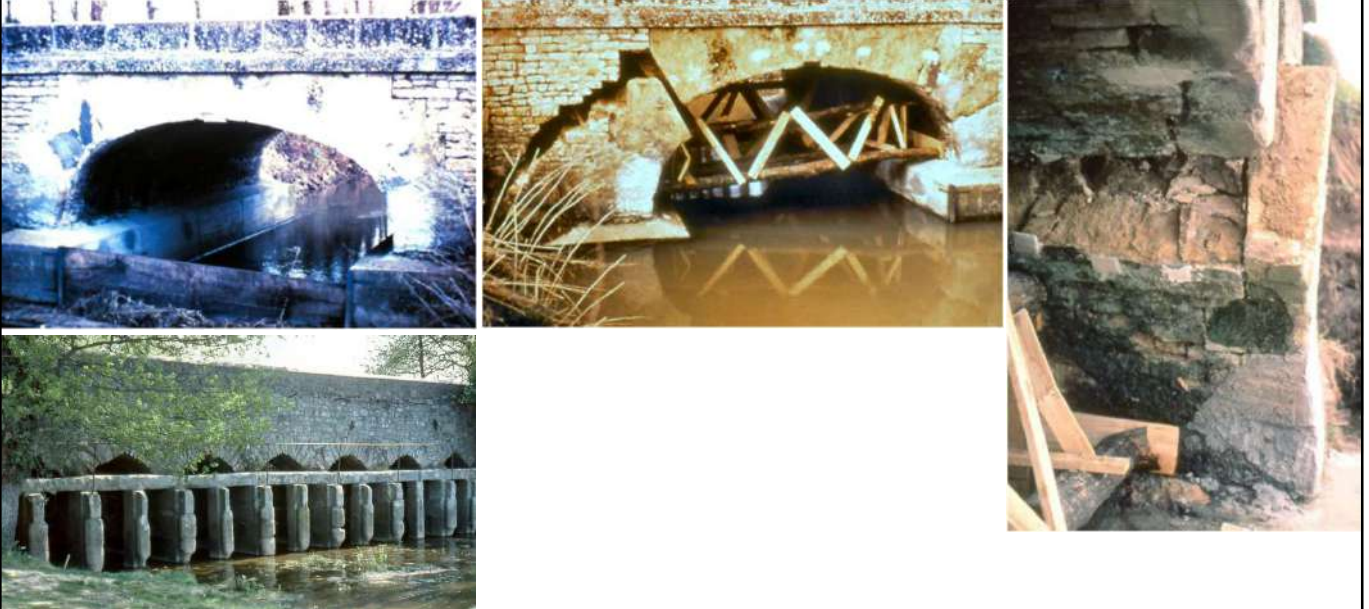
Pont de Saint-Nicolas de Campagnac (Gard)
(1245 – 1260)
Crues du Gardon des 8 et 9 septembre 2002



Conséquences des crues Les embâcles



Interventions humaines inadaptées Barrage improvisé



Envasement des cours d'eau Défaut d'entretien



D402 - Pont de Guignes sur le rû d'Avon – Seine et Marne



8 – Expertise d'un mur mitoyen



Expertise d'un mur mitoyen



les désordres allégués affectant le mur mitoyen sont :

1. Un bombement du mur (tronçon AB) ;
2. Une dégradation des joints en de nombreux emplacements ;
3. Une dégradation de surface des moellons sur un linéaire d'environ 30 m ;
4. Une fissuration avec écartement du couronnement



Expertise d'un mur mitoyen

Lors de la réunion sur site, nous avons relevé :

1. Une atmosphère ambiante humide révélée par la présence de mousse sur la couverture. Orientation du mur sensiblement Nord-Sud, les parements du mur ne sont jamais ensoleillés.
2. Un état général des murs correct : peu de déformation
3. Une maçonnerie « fatiguée » : arêtes effritées joint
4. Les dégradations principales concernent les pierres calcaires du mur : effritement, perte de matière en surface, humidité, chute locale de pierres par suite de l'érosion des angles d'assise et de la dégradation des joints par l'humidité
5. Les joints en mortier de ciment sont principalement dégradés en partie basse des murs dans les zones affectées par des infiltrations et/ou remontées capillaires
6. Etat général satisfaisant de la couverture en ciment malgré le développement des mousses. Il est observé deux fissures transversales à 7,00 m du point B puis à 6,80 m

Expertise d'un mur mitoyen



Cadastre Neuilly 1870 (repérage du mur en rouge)

Expertise d'un mur mitoyen

1°) **Le milieu ambiant humide** par le cloisonnement de l'espace par les immeubles périphériques qui entourent les jardins privatifs et par les murs séparatifs des parcelles ainsi que par le couvert végétal



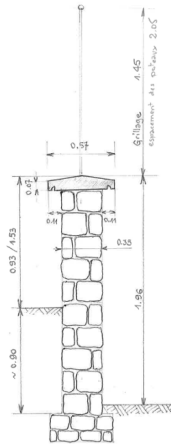
Expertise d'un mur mitoyen

1°) **Le milieu ambiant humide** par le cloisonnement de l'espace par les immeubles périphériques qui entourent les jardins privatifs et par les murs séparatifs des parcelles ainsi que par le couvert végétal



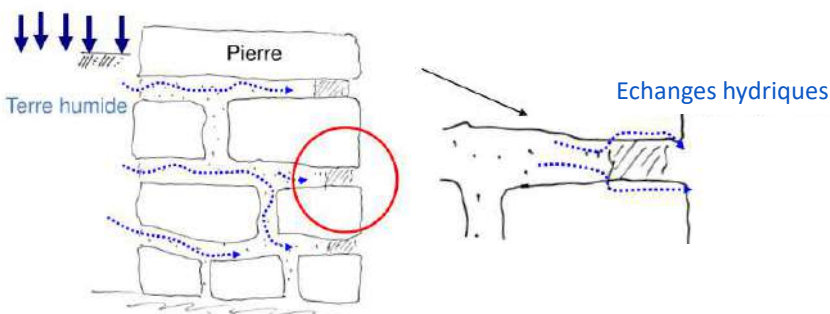
Expertise d'un mur mitoyen

2°) **La sensibilité des pierres calcaires tendres**, en raison de leur composition chimique et physique : Porosité et absorption de l'eau, altération chimique, moisissures et algues, effet des cycles d'humidité, sensibilité à l'humidité de surface et aux infiltrations.



Expertise d'un mur mitoyen

3°) **Les pierres calcaires tendres sont sensibles aux mortiers à base de ciment** en raison des réactions chimiques entre le ciment et le carbonate de calcium, de l'effet du pH élevé, des tensions mécaniques dues aux différences de dilatation thermique et des risques d'humidité emprisonnée.



Expertise d'un mur mitoyen

Pour minimiser ces effets, il est recommandé d'utiliser des **mortiers à base de chaux** (moins alcalins et plus compatibles avec la pierre) pour les travaux de restauration ou de conservation des pierres calcaires



Restes d'une portion de mur effondrée
Matériau de qualité identique à l'existant
utile pour remplacer les pierres dégradées
et non réemployables

Expertise d'un mur mitoyen

Il a été proposé aux Parties :

1. de procéder à des **analyses de laboratoire pour caractériser la pierre et le mortier** (celui d'origine et le nouveau à base de ciment) afin de définir les conditions de réparation des désordres :

- Réemploi des pierres
- Nature et qualité du mortier à mettre en œuvre
- Traitement des parements pour stopper les remontées d'humidité

2. **De choisir un Laboratoire – Maître d'œuvre**

pour réaliser les missions **DIA, PRO-DCE, ACT, DET, AOR**

L'expert a rédigé un cahier des charges pour cette consultation :

LERM, GINGER CEBTP, Centre Technique des Matériaux Naturels de Construction (CTMNC), Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH), Aslé Conseil Méditerranée

Expertise d'un mur mitoyen

Phase DIA

- Reconnaître la géométrie du mur (avec reconnaissance locale des fondations) et établir un plan coté ;
- Repérer les désordres et établir une cartographie des zones dégradées ;
- Réaliser des prélèvements (pierres et mortier) pour analyse ;
- Réaliser des mesures en laboratoire dans le but de caractériser la pierre, caractériser le mortier de ciment, caractériser le mortier d'origine et étudier la compatibilité chimique des matériaux ;
- Evaluer de l'état de dégradation des pierres : Laisser en l'état, conforter par un ragréage de surface, ou remplacement des pierres ;
- Proposer une méthode de traitement des désordres ;
- Etablir une cartographie du mur en fonction du traitement préconisé : laissé en l'état, ragréage, remplacement de pierres, etc.... ;
- Etablir une estimation de la réparation sur la base d'un avant-métré et de prix unitaires.

Le développement durable et éco-responsable La renaissance des ponts en maçonnerie de pierre naturelle

- **La pierre naturelle ...**
 - C'est un **matériau d'exception** (résistant, durable)
 - **disponible** un peu partout
 - **recyclable**
 - faisant travailler une **main d'œuvre de proximité**
- **La voûte ...**
 - une **architecture raisonnée**
 - qui **s'intègre aux paysages**

2011

Pont de Chaldecoste
Saint-Andéol-de-Clerguemort - Lozère
Ouverture : 6 m – Longueur : 14,25 m
Largeur : 4 m



MERCI DE VOTRE ATTENTION



m
consultant

Jean-Louis MICHOTÉY
Ingénieur Consultant
Expert près la Cour d'Appel de Paris
agréé par la Cour de Cassation
06.30.70.34.54
michotey@wanadoo.fr

