

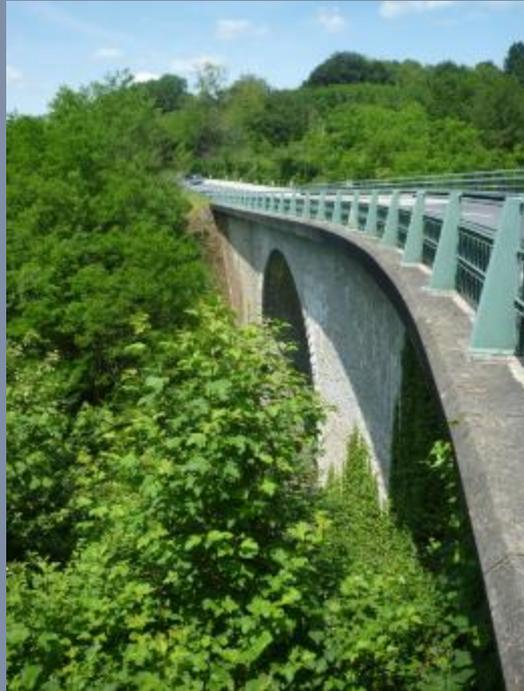
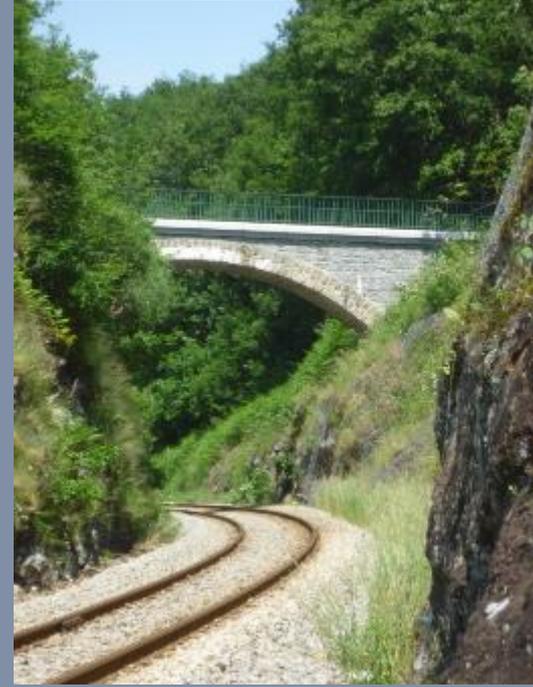
Débat AFGC

Recalcul des voutes en maçonnerie - REX



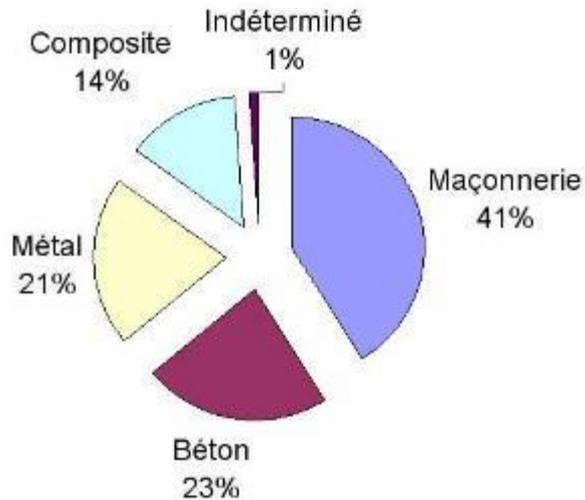
Sommaire

1. Constat et problématique
2. Pathologies courantes
3. Méthodes de calcul existantes
4. Méthodes proposées
 - a) Analyse à la rupture
 - b) Modèle endommagement
5. Conclusion et perspectives

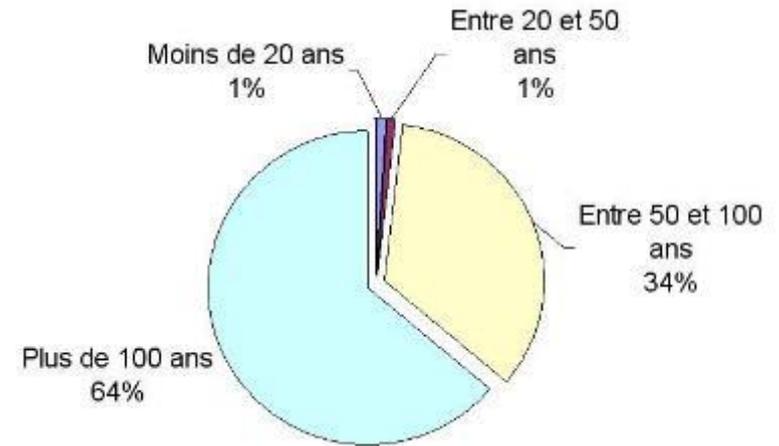


Pourquoi une telle étude ?

Répartition des ouvrages sur le réseau ferré européen



Age des ponts en maçonnerie sur le réseau ferré européen

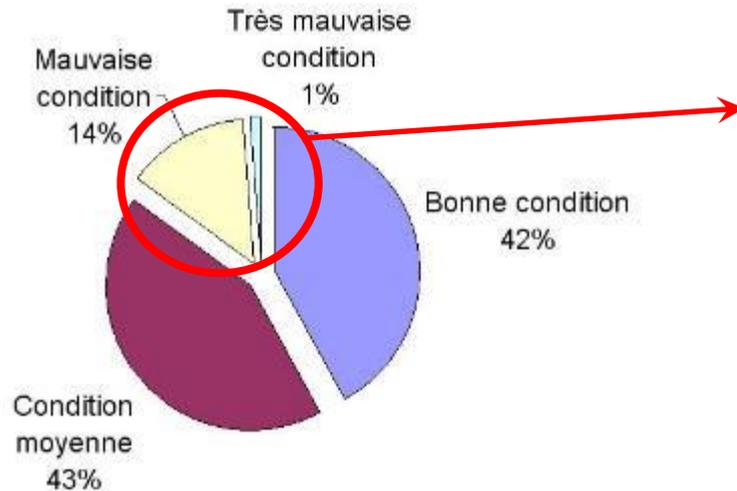


Plus de 90 000 ponts en maçonnerie anciens sur le réseau ferré français



Pourquoi une telle étude ?

Etat des ponts en maçonnerie sur le réseau ferré européen



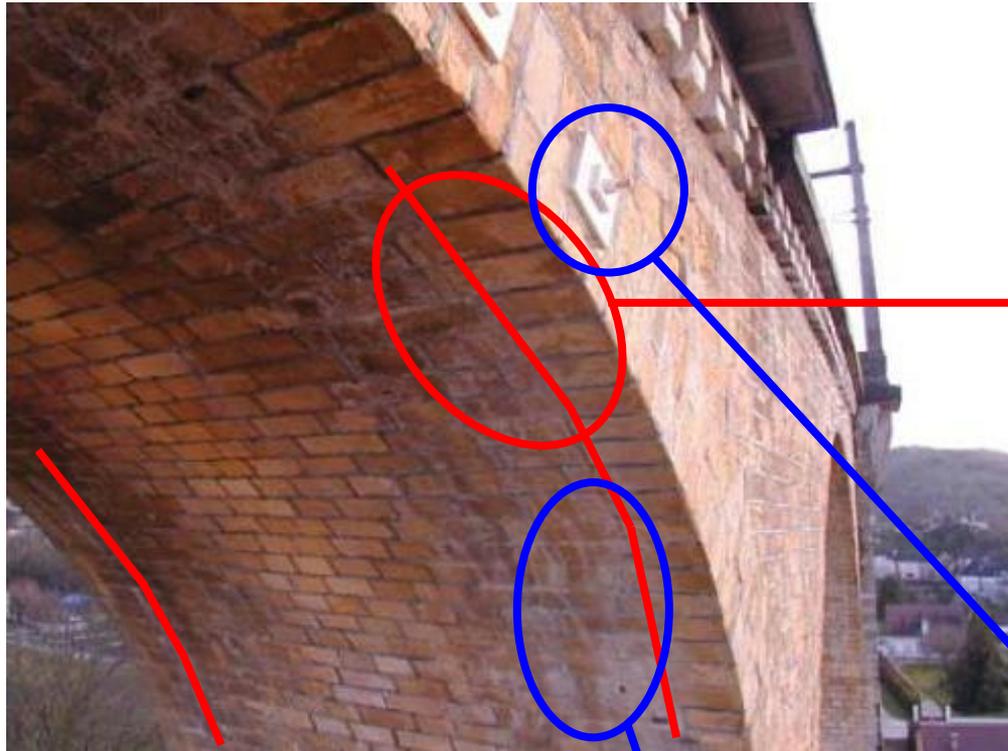
Environ 15 % des ponts en maçonnerie présente un état détérioré et nécessite un suivi particulier et d'éventuelles réparations

Nécessité de comprendre les problèmes et d'agir en conséquence

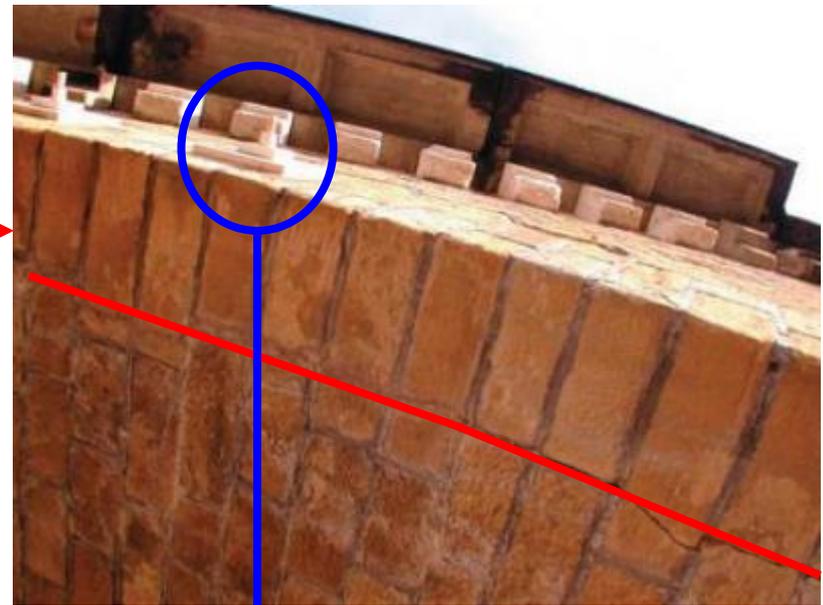


Pathologies courantes

- Fissures longitudinales avec décollement du bandeau :



Traces de calcite
témoin d'infiltration d'eau



Tirants pour le maintien des murs tympans

Pathologies courantes

- Fissure transversale en clé de voûte :

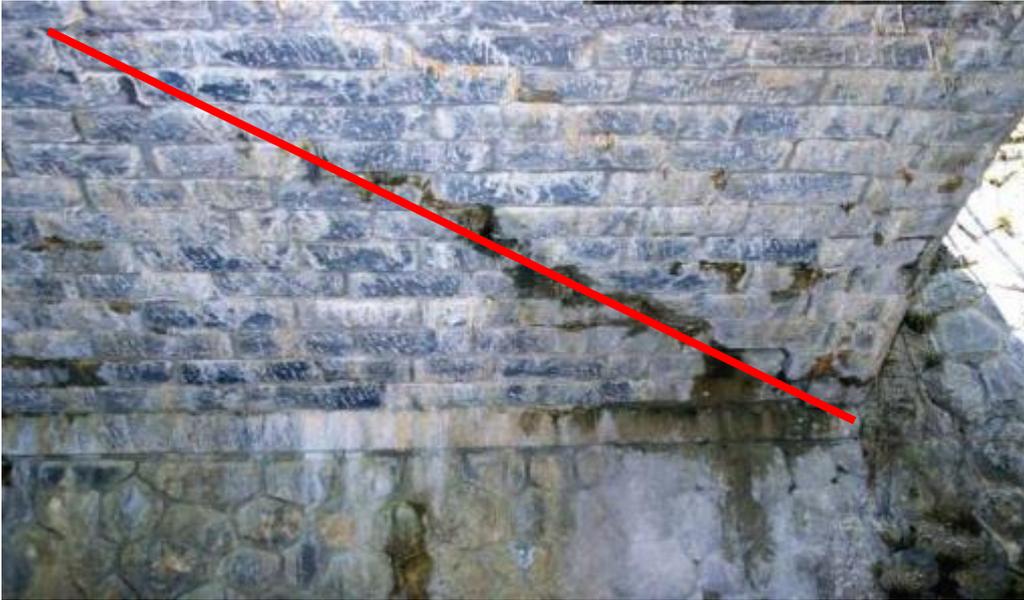


Danger d'effondrement
de la structure



Pathologies courantes

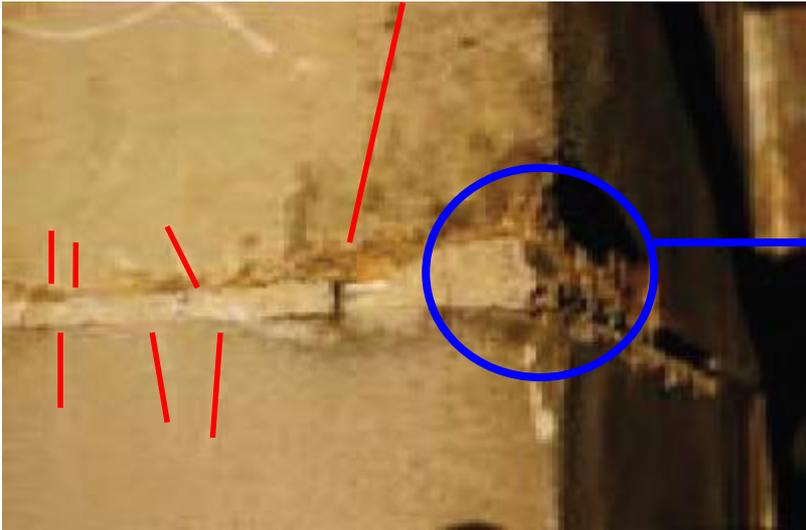
- Fissure biaise en pied de voûte :



Hypothèse : fissure due à un **glissement** de terrain

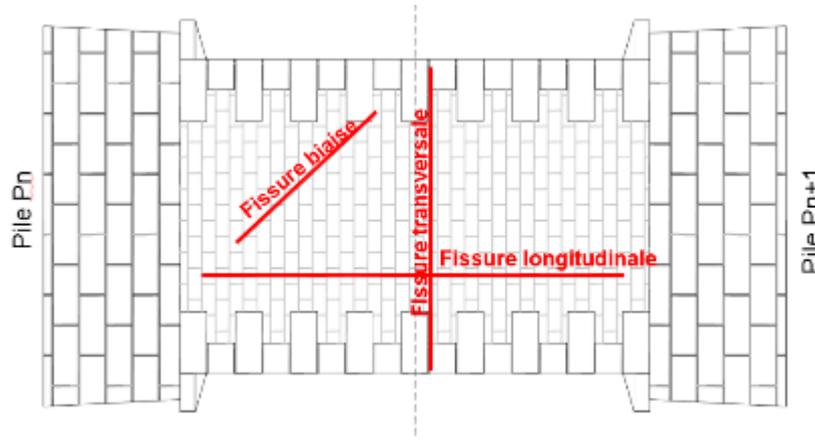
Pathologies courantes

- Excès de compression et fissures :



L'excès de compression écrase le mortier qui fait éclater la pierre

Pathologies courantes



Voûte : vue de dessous

Phénomènes observés :

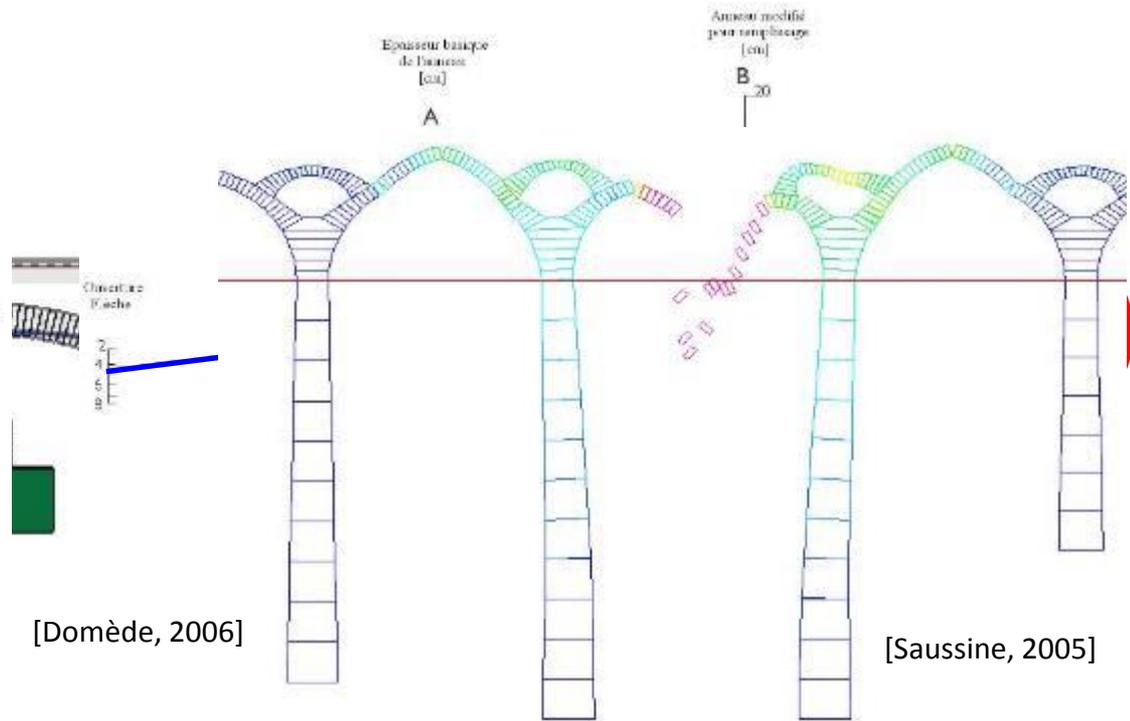
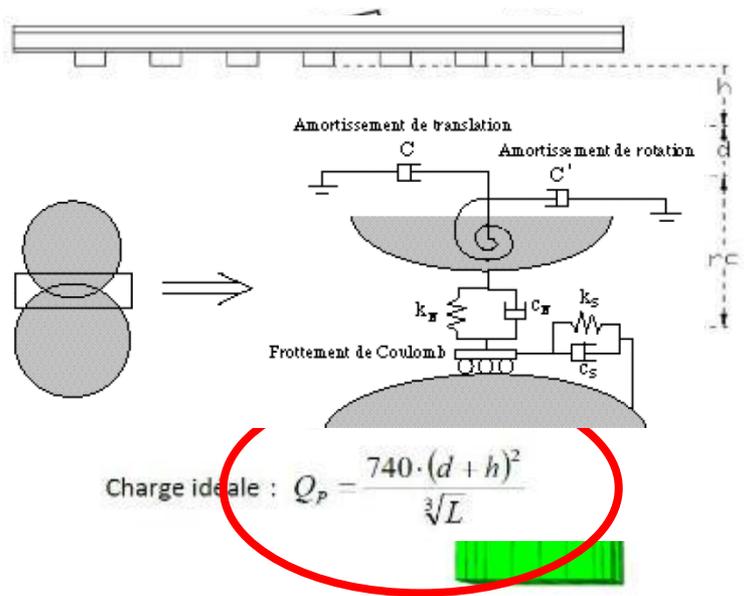
- Pathologies multiples
- Effets longitudinaux et transversaux
- Mouvement du sol

Causes :

- Accroissement des vitesses
- Alourdissement des charges à l'essieu (de qlqs tonnes à 22,5 t)
- Hausse des charges permanentes (rechargement)

Méthodes de calcul existantes

| Méthodes | Dates | Résultats | Avantages | Inconvénients |
|---------------------------|-------|-----------------|----------------|--|
| Empirique (MEXE, REAM) | 1936 | Charge de ruine | Simple, rapide | Pas d'analyse en service Pas de matériaux |



[Domède, 2006]

[Saussine, 2005]

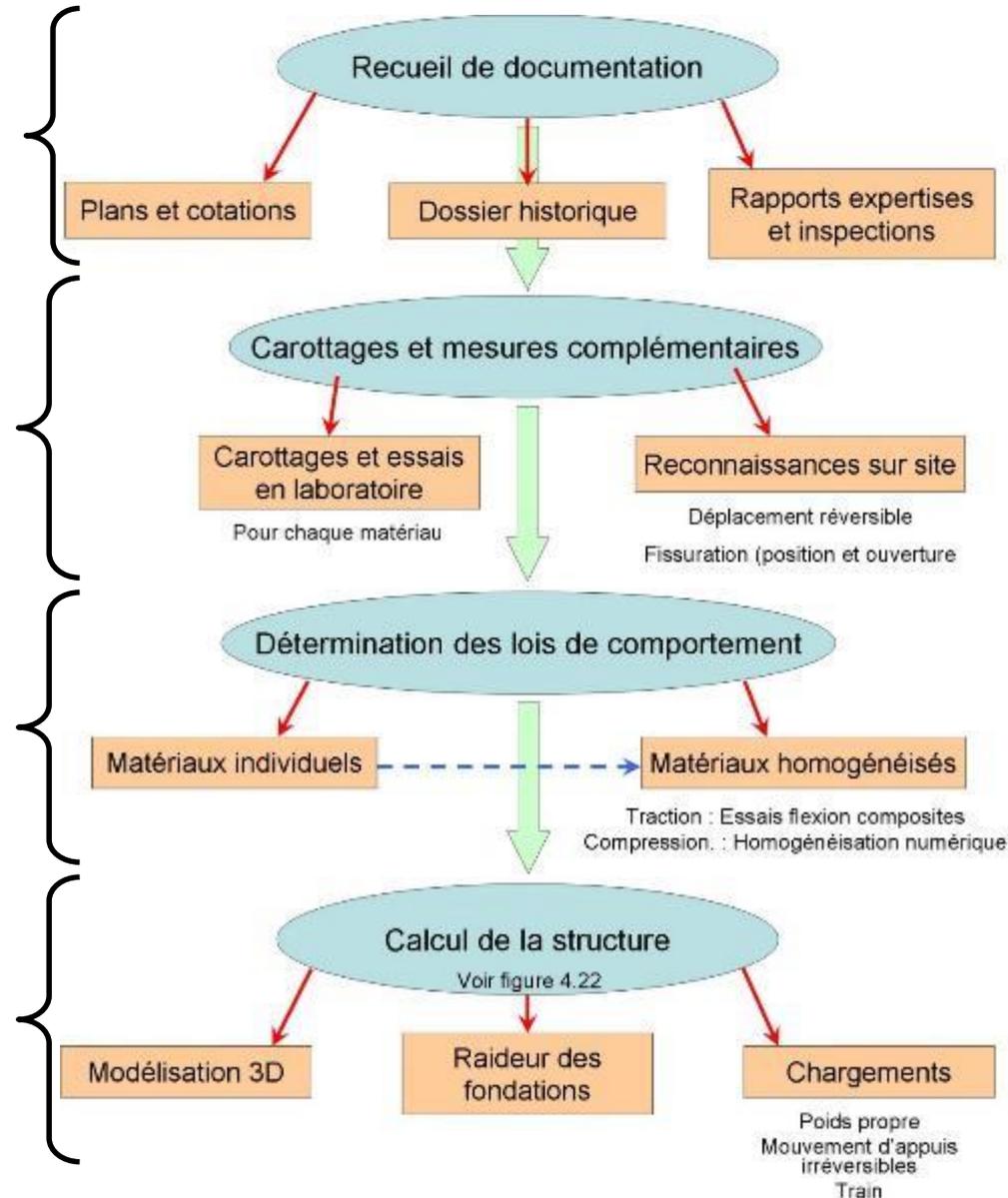
Méthodologie proposée

Données historiques

Prélèvements et mesures sur site

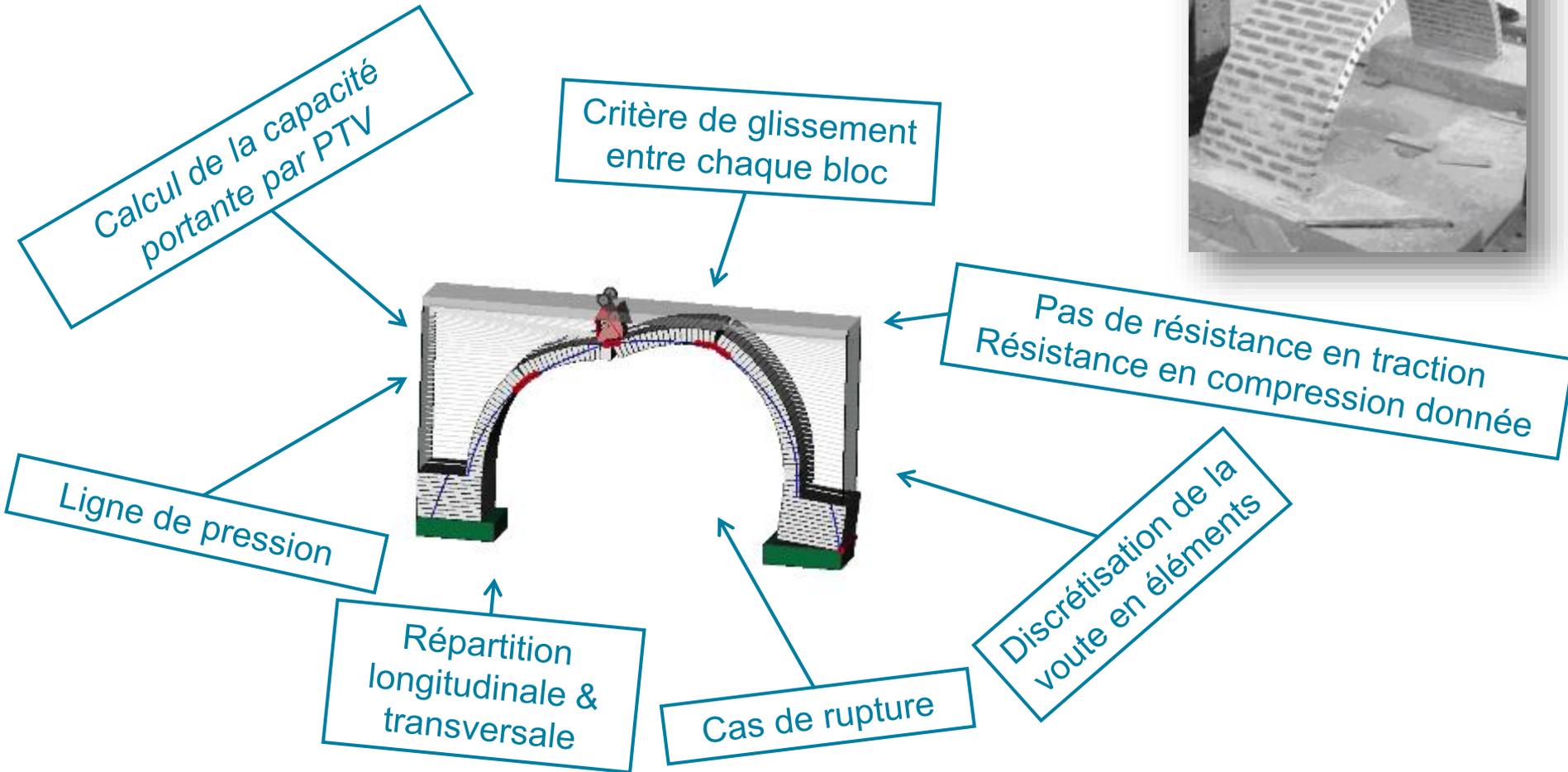
Détermination des lois de comportement

Calcul de la structure



Analyse à la rupture

Analyse à la rupture

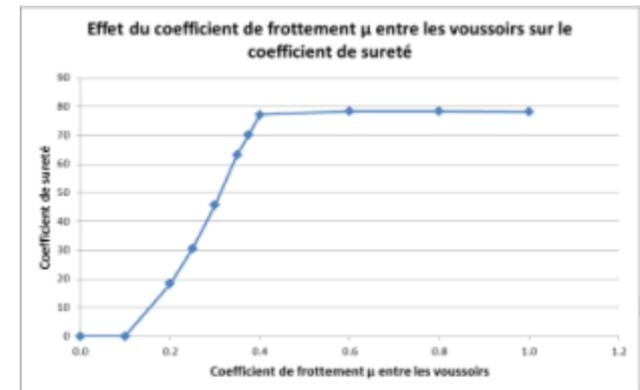
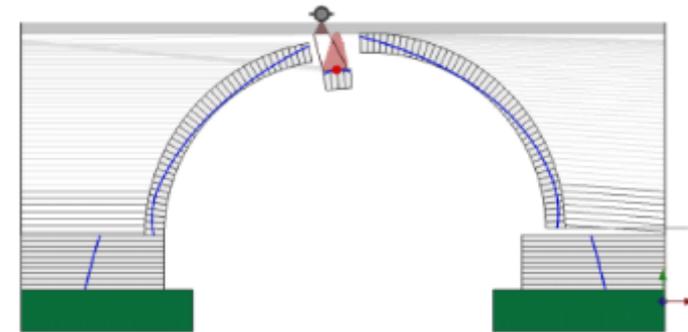
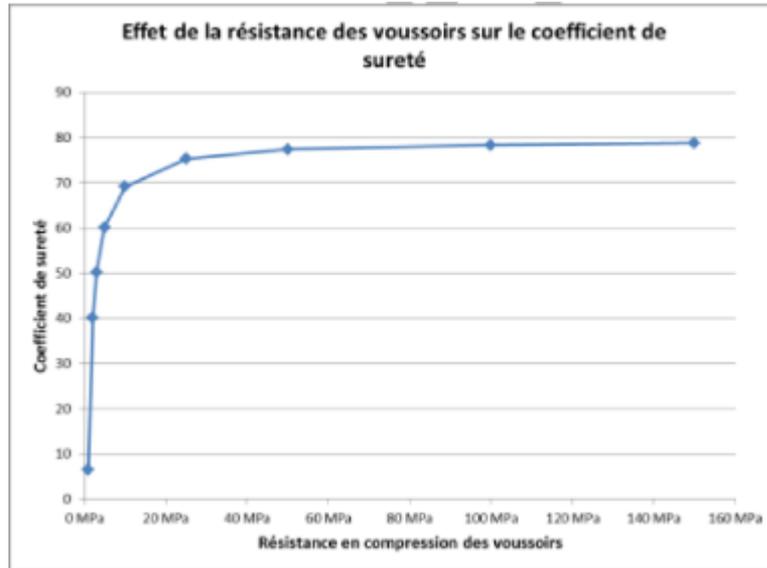


Méthode avec peu d'entrants
Détermination de la capacité portante

Analyse à la rupture

Influence du coef. Frott.

Influence résistance en comp.



Résistance en compression des blocs

Discrétisation de la voute

Densité du remplissage

Coefficient de frottement entre les blocs

Epaisseur des appuis

Densité couche de surface

Poids volumique de la maçonnerie

Discrétisation des appuis

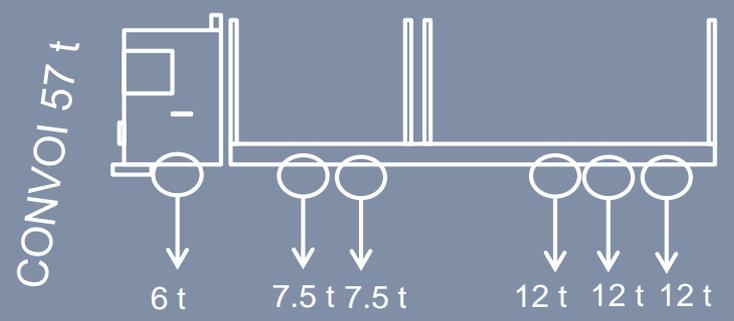
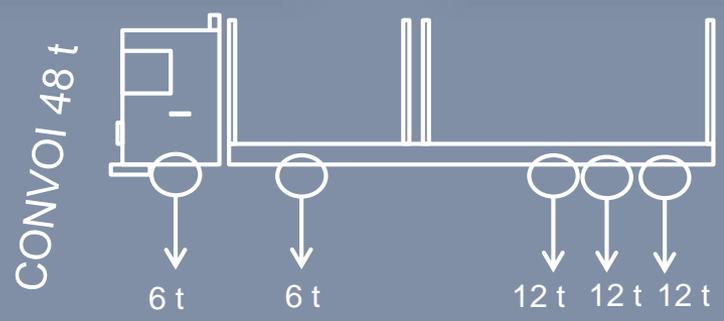
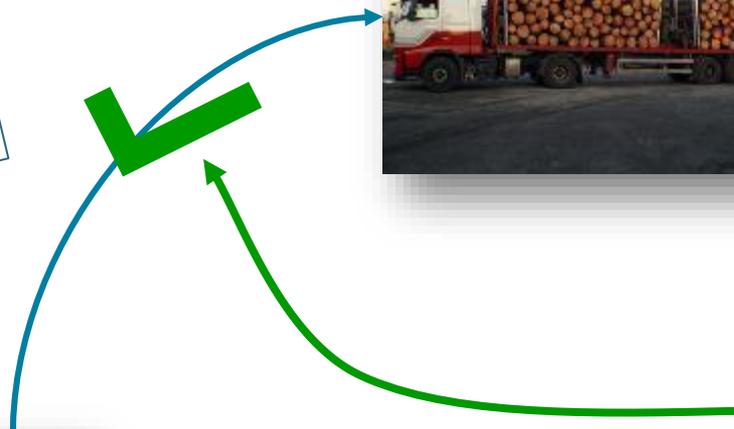
Nombre d'itération

Etude de cas : Pont de Masléon

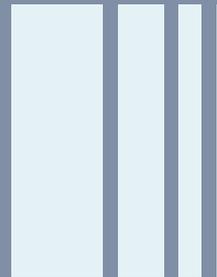
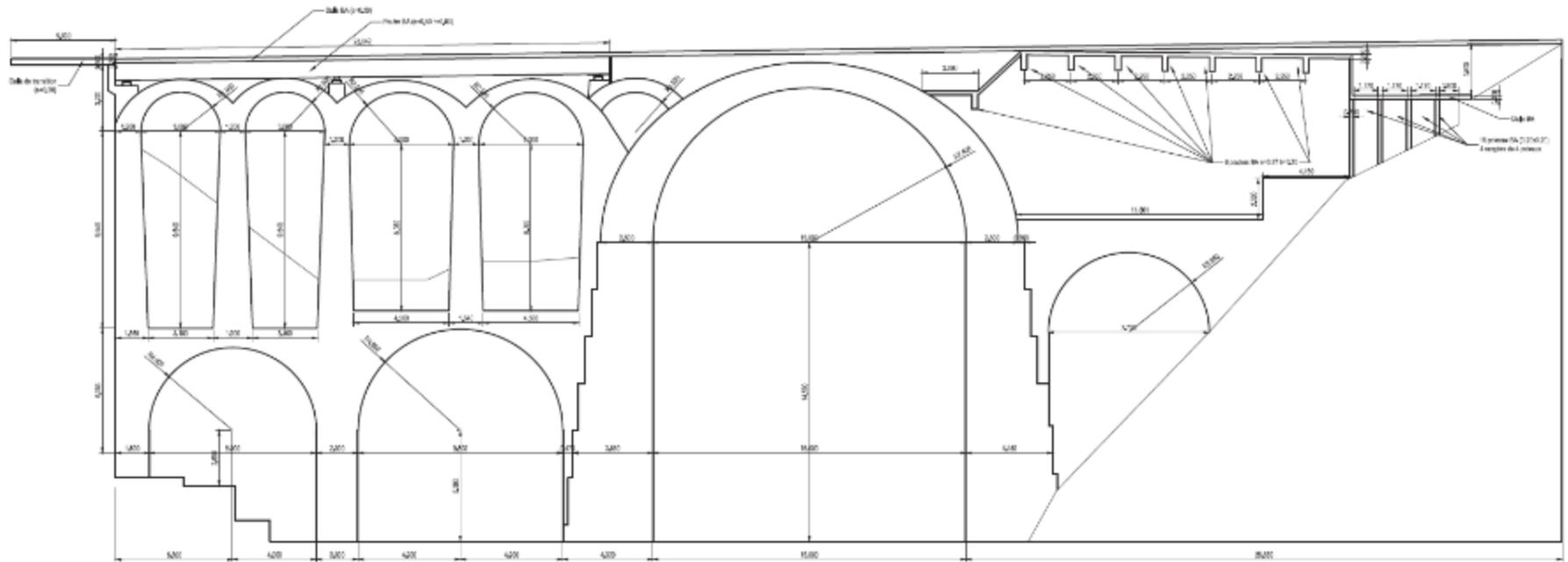


Etude de cas : Pont de Masléon

Décret du 29 juin 2009
Amélioration de l'infrastructure pour le transport du bois

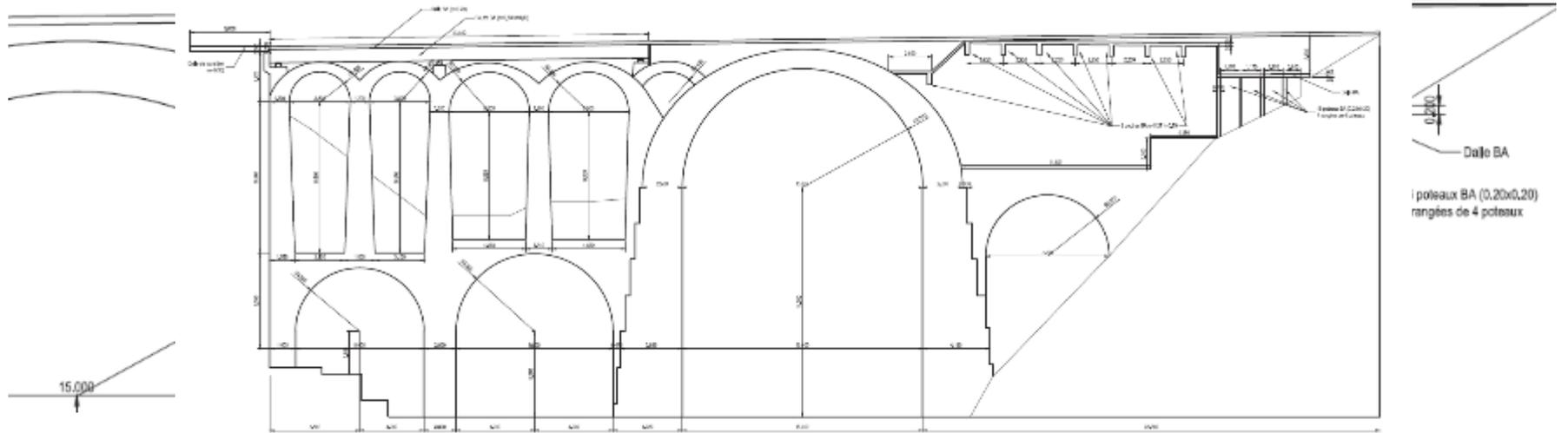
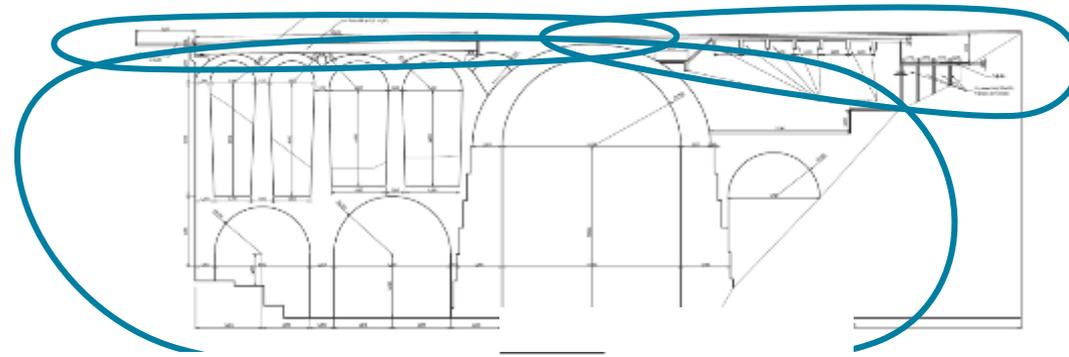


Etude de cas : Pont de Masléon



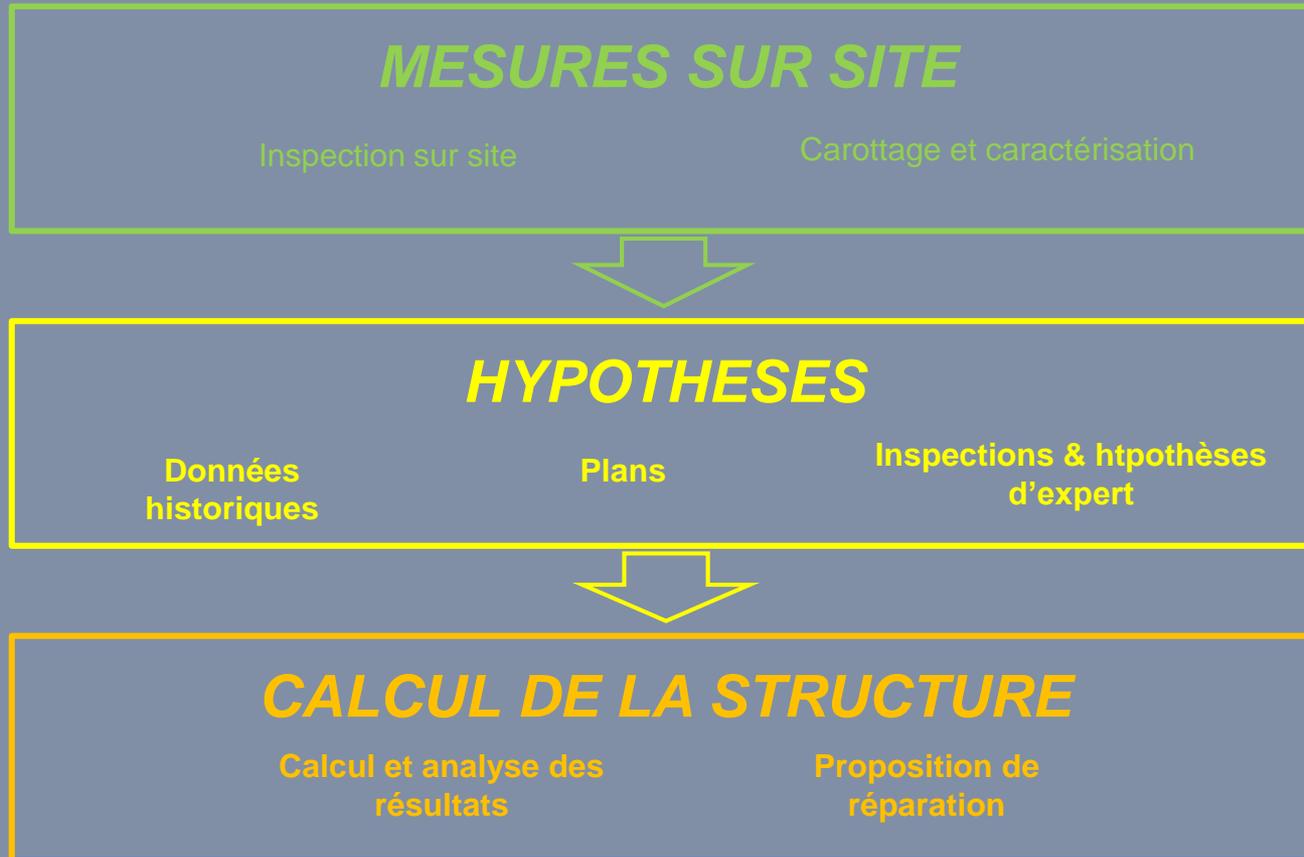
- *Arche principale*
- *7 voutes d'élégissement*
- *Tablier et poutres béton*

Parties en béton armé



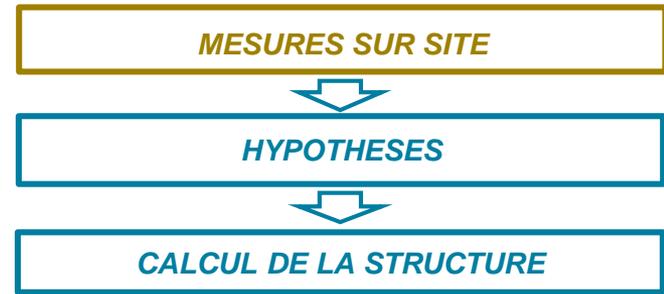
Pont de Masléon

Méthodologie proposée



Pont de Masléon

MESURES SUR SITE



Fissures longitudinales



Gonflement mur & décollement



Infiltration d'eau et végétation

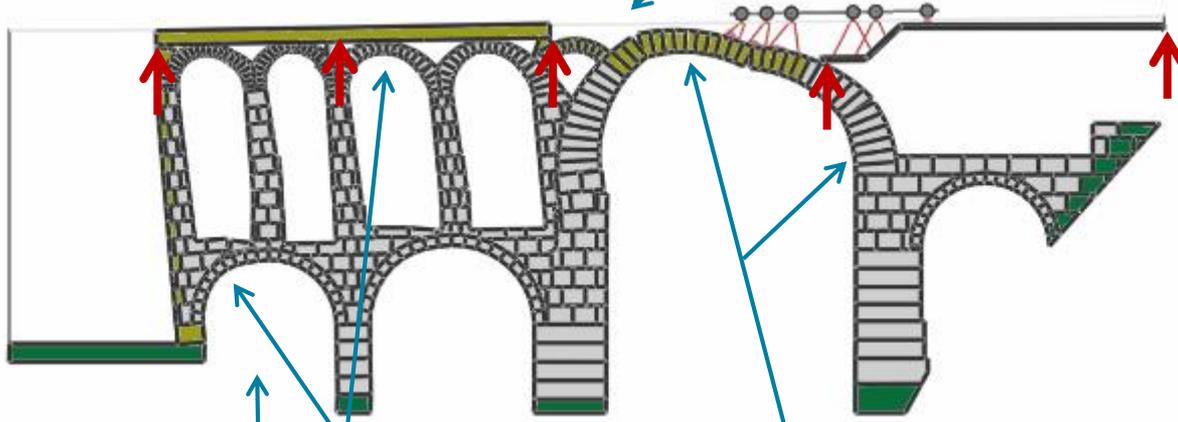


Défaut d'enrobage



Pont de Masléon

HYPOTHESES



Maçonnerie en bon état
 Densité : 20 kN/m³
 REVEL. DE SURFACE
 Bloc de granite
 Diffusion : 26

| Résistance caractéristique à la compression simple des pierres (MPa) |
|--|
| 2,0 |
| 5,0 |
| 7,5 |
| 10,0 |
| 15,0 |
| 20,0 |
| 30,0 |
| 40,0 |
| 60,0 |

| Résistance caractéristique à la compression simple de la maçonnerie suivant les mortiers (MPa) | | | |
|--|------|------|------|
| M4 | M3 | M2 | M1 |
| 1,5 | 1,4 | 1,4 | 1,4 |
| 2,0 | 3,3 | 3,4 | 3,5 |
| 3,5 | 4,1 | 4,5 | 4,9 |
| 4,1 | 4,7 | 5,3 | 6,2 |
| 5,1 | 5,9 | 6,7 | 8,2 |
| 6,1 | 6,9 | 8,0 | 9,7 |
| 7,2 | 8,6 | 10,2 | 12,0 |
| 8,1 | 10,4 | 12,0 | 14,3 |
| | | 16,0 | 18,8 |

Approximativement 20 MPa

| Résistance moyenne à la compression simple des pierres (MPa) |
|--|
| 2,5 |
| 6,5 |
| 10,0 |
| 13,0 |
| 20,0 |
| 25,5 |
| 40,0 |
| 50,0 |
| 80,0 |

130 MPa

MESURES SUR SITE

HYPOTHESES

CALCUL DE LA STRUCTURE

Voute : Epaisseur = 0.63 m
 REMPLISSAGE
 Discretisation : 20 blocs
 Pas de cohésion
 Angle de frott interne : 30°
 Résist. comp. de la maçonnerie : 5 MPa

Voute : Portée = 15 m
 Epaisseur aux reins = 2 x épaisseur en clé = 2.5 m
 SIMPLIFICATION DE LA PARTIE BETON DANS MODELE MACONNERIE
 Discretisation : 40 blocs
 Rigide & stable
 Résist. comp. maçonnerie : 20 MPa

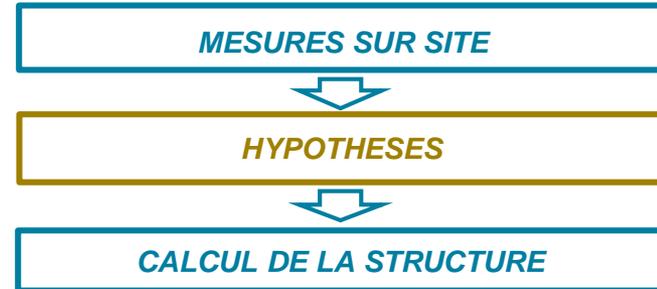
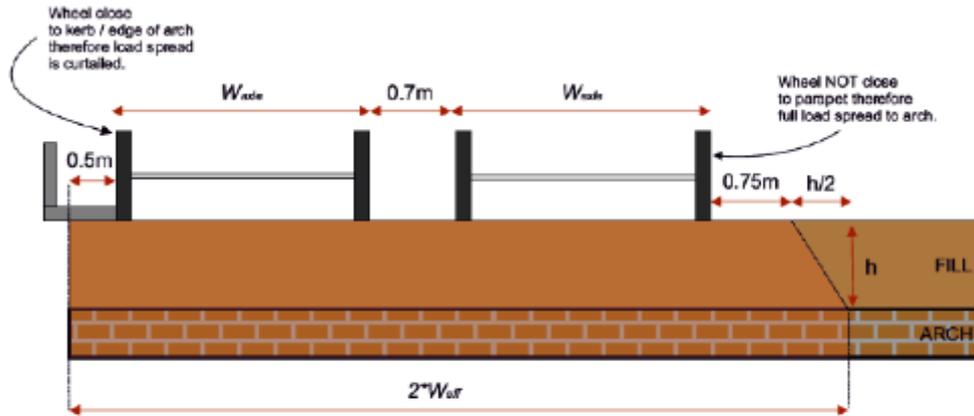
RESULTAT D'INVESTIGATION
 Résistance en compression de la pierre : 130 MPa



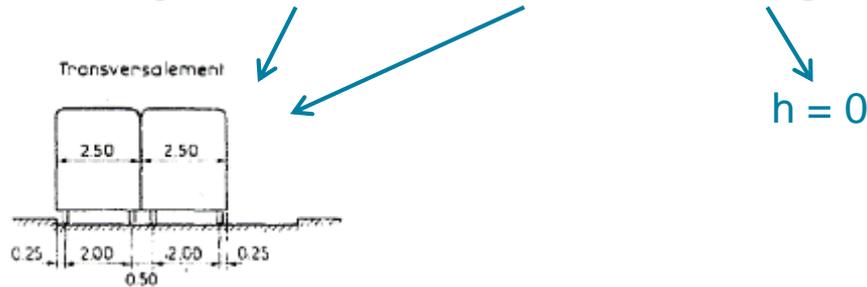
Pont de Masléon

HYPOTHESES

DIFFUSION TRANSVERSALE



$$W_{eff} = [0.5 + W_{axle} + 0.7 + W_{axle} + 0.75 + h/2] / 2$$



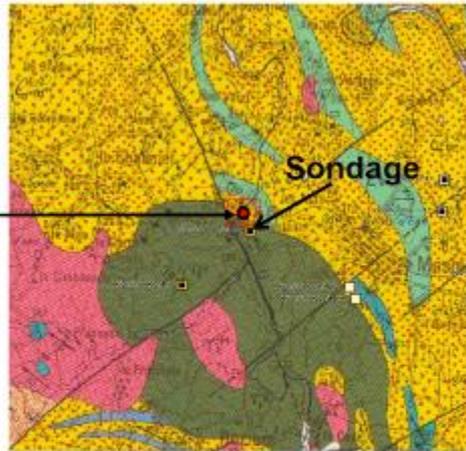
$$W_{eff} = [0.5 + 2.00 + 0.7 + 2.00 + 0.75 + 0] / 2$$

$$W_{eff} = 2.975$$

Pont de Masléon

HYPOTHESES

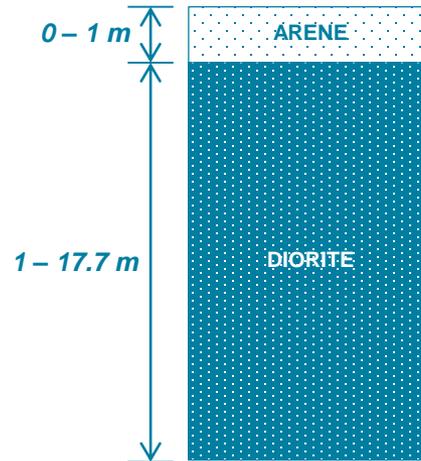
Carte Geologique



GNEISS

- Gneiss orthoclase à brique, sillimanite, orthose + perthite granit. Avec des inclusions. Bases, à brique seule et oronol, perthite à épidote en coques ou à lencence latérale.
- Gneiss massif, de grain fin à moyen, à brique et orthose, perthite granit, souvent à plagioclase en coques.
- Corré quartzite à grain moyen, plus ou moins orientée, à brique et hornblende.

Coupe de sol



MESURES SUR SITE

HYPOTHESES

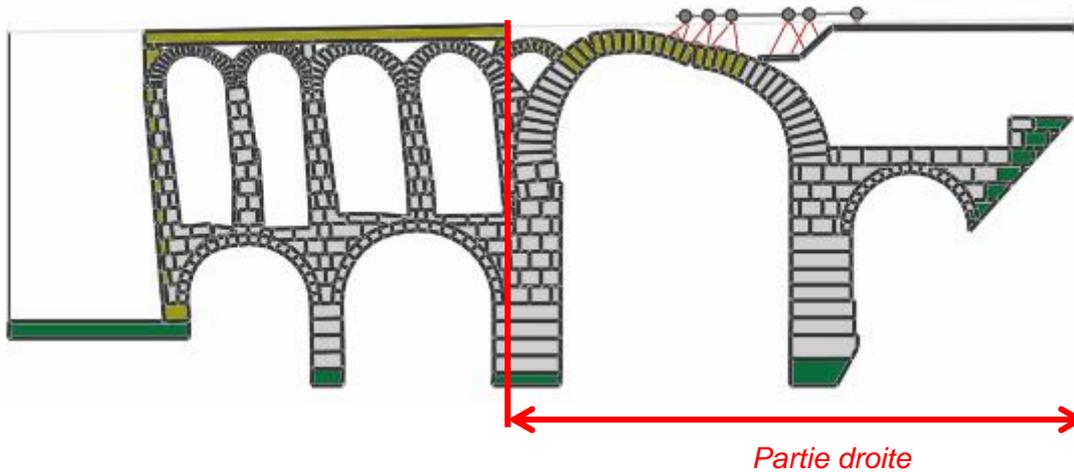
CALCUL DE LA STRUCTURE



Pont de Masléon

CALCUL MACONNERIE

| Convois | Gauche | | Droite | |
|-----------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|
| | Coefficient de sureté | Position du véhicule (m) | Coefficient de sureté | Position du véhicule (m) |
| Bc – Fasc 61 Titre II | 4.99 | -17.24 | 5.59 | 26.31 |
| Bt – Fasc 61 Titre II | 3.89 | -1.86 | 5.25 | 7.97 |
| 48 t – Bois 5 essieux | 4.78 | -32.36 | 5.11 | 17.52 |
| 57 t – Bois 6 essieux | 4.25 | -28.37 | 4.77 | 19.29 |
| Chariots - 1 essieu | 15.27 | -48.26 | 17.26 | 38.08 |
| Chariots - 2 essieux | 9.96 | -32.98 | 12.83 | -1.5 |



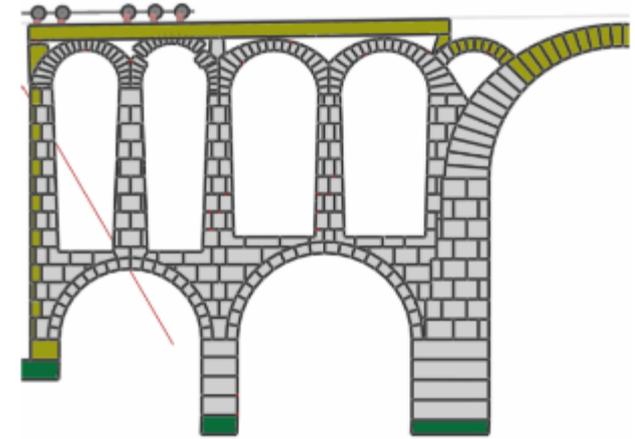
MESURES SUR SITE



HYPOTHESES



CALCUL DE LA STRUCTURE



Partie gauche

Coefficient de sureté : 3.89

STRUCTURE ADAPTEE AU TRANSPORT DE BOIS

Pont de Masléon

CONCLUSION

MACONNERIE

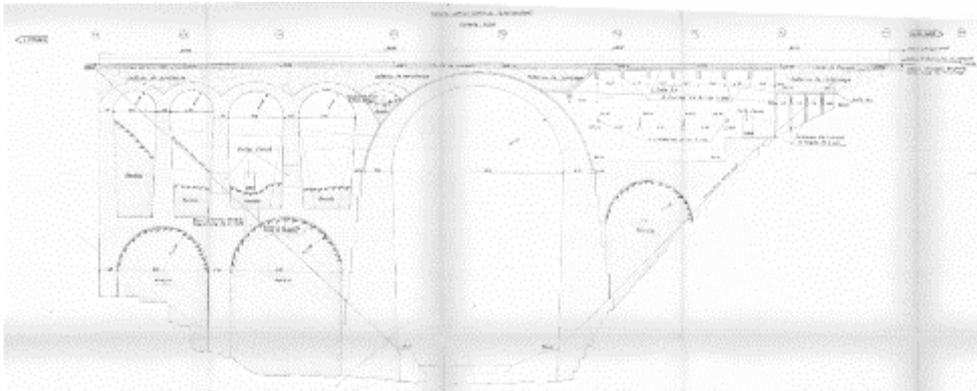
Prise en compte des voutes d'élégissement

Avec des hypothèses conservatrices, le pont est compatible avec cette évolution de charge

Inspection sur site ont montré quelques réparations mineures : maintien des murs, dévégétalisation...

BETON

Parties béton conformes avec quelques réparations : enrobage, complément d'aciers localisés...



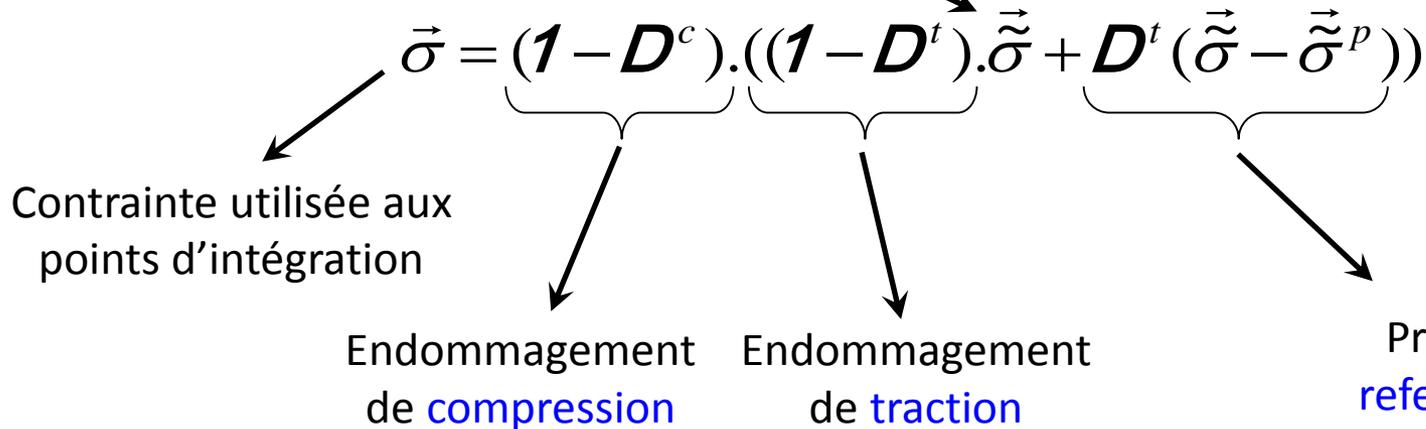
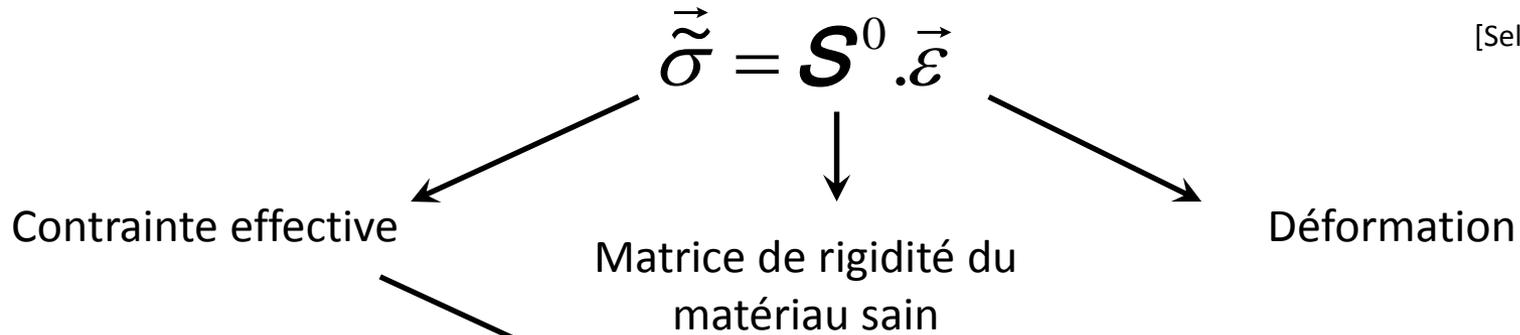
Modèle d'endommagement

Modèle d'endommagement

Calcul des contraintes



[Sellier et al., 2010]



[Jefferson, 2003]

Modèle d'endommagement

Calcul des contraintes

[Sellier *et al.*, 2010]

$$\tilde{\sigma} = \mathbf{S}^0 \cdot \tilde{\epsilon}$$

Partie négative :
Contrainte effective de **compression**

Critère de **Drucker-Prager**
pour évaluer \mathbf{D}^c
(isotrope)

$$f^{DP} = \tilde{\sigma}^{DP} - \left(\sqrt{\frac{J^{2d}}{6}} + \delta \frac{I^1}{3} \right) \leq 0 \quad \delta = \frac{2\sqrt{3} \times \sin \phi}{3 - \sin \phi}$$

Partie positive :
Contrainte effective de **traction**

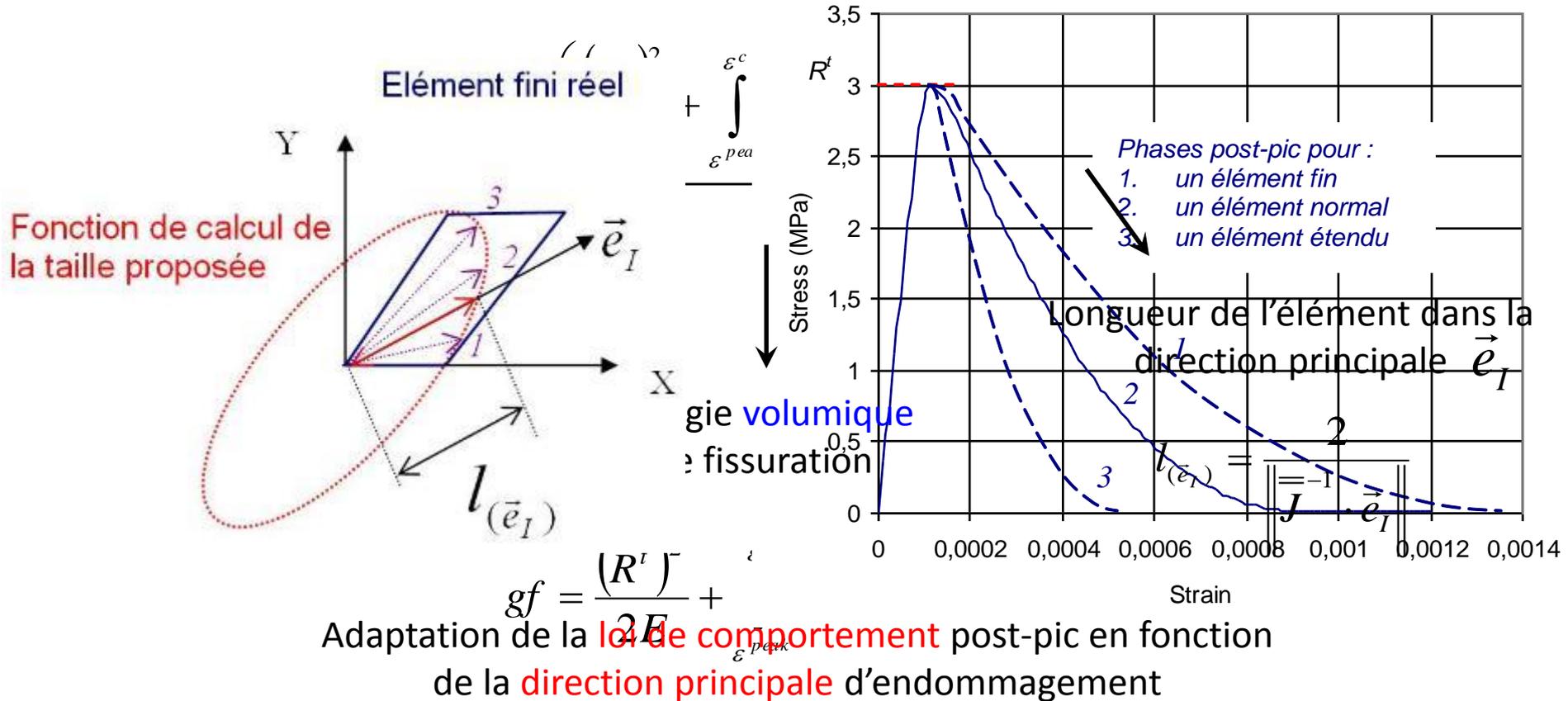
Critère de **Rankine**
pour évaluer \mathbf{D}^t
(orthotrope)

$$f^R = \sup(f_I^R) = \sup(\tilde{\sigma}_{II}^R - \tilde{\sigma}_I^t) \leq 0$$

Modèle d'endommagement

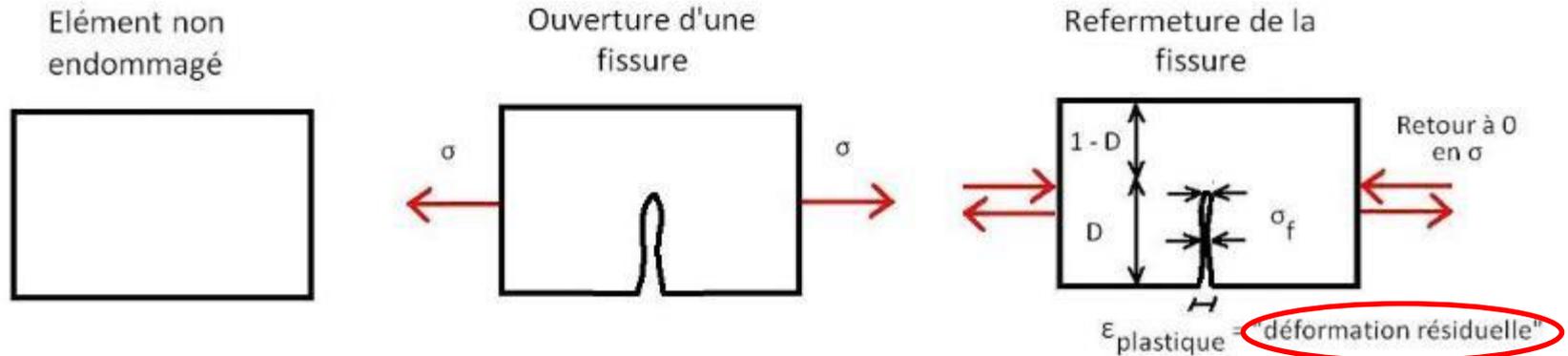
Dissipation d'énergie dans la phase post pic

Objectif : **Indépendance** de la solution vis à vis du maillage



Modèle d'endommagement

Description du processus de refermeture des fissures

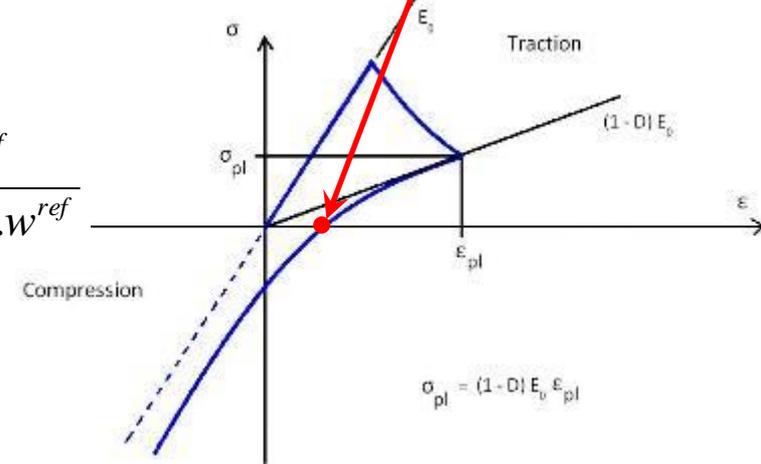


Excès de traction (Rankine) = Ouverture d'une fissure

Refermeture de la fissure = Contacts sur les lèvres de la fissure (échelle micro)

Fonction de refermeture de fissure $\sigma_I^{f(\min)} = -R^t \frac{w^{ref}}{w_I + \alpha \cdot w^{ref}}$

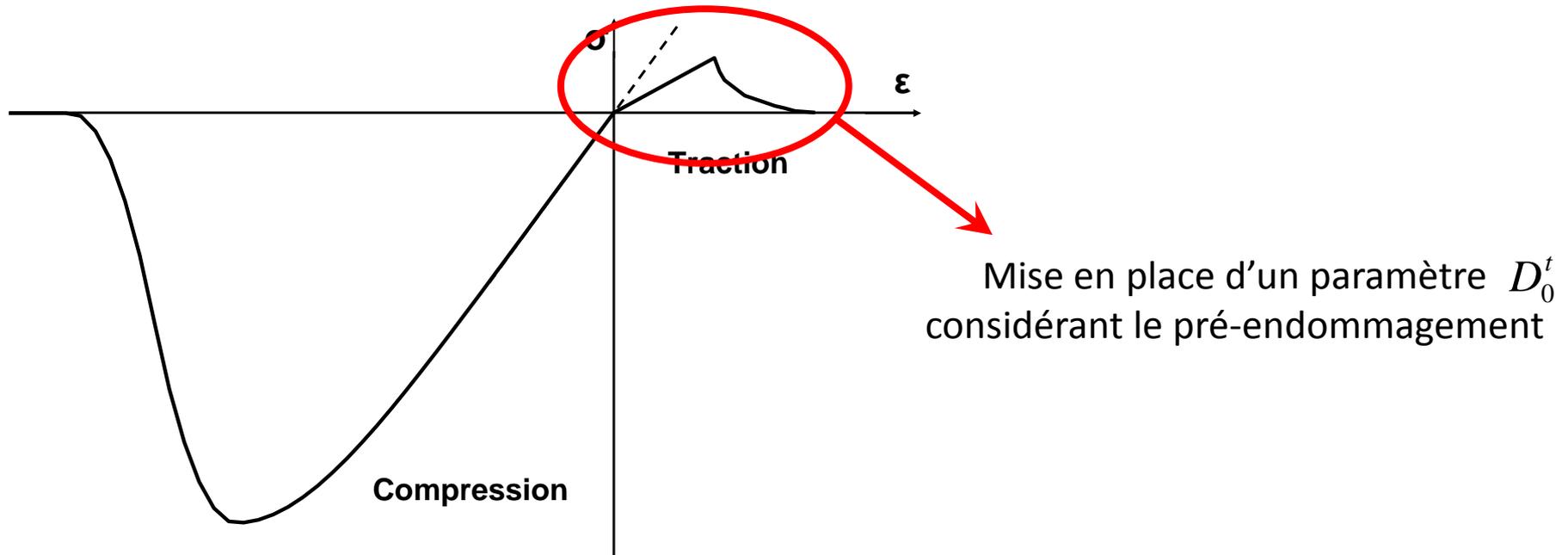
Rugosité de la fissure = Regain progressif de raideur lors de la refermeture de fissure



Modèle d'endommagement

Considération d'un pré-endommagement

Objectif : Prendre en compte un raideur « atténuée » de la structure



Prise en compte d'un pré-endommagement de traction **global** ou **local** de la structure

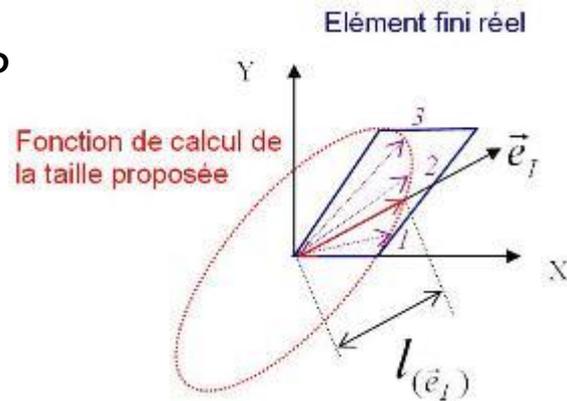
[Stablon *et al.*, 2011]

Modèle d'endommagement

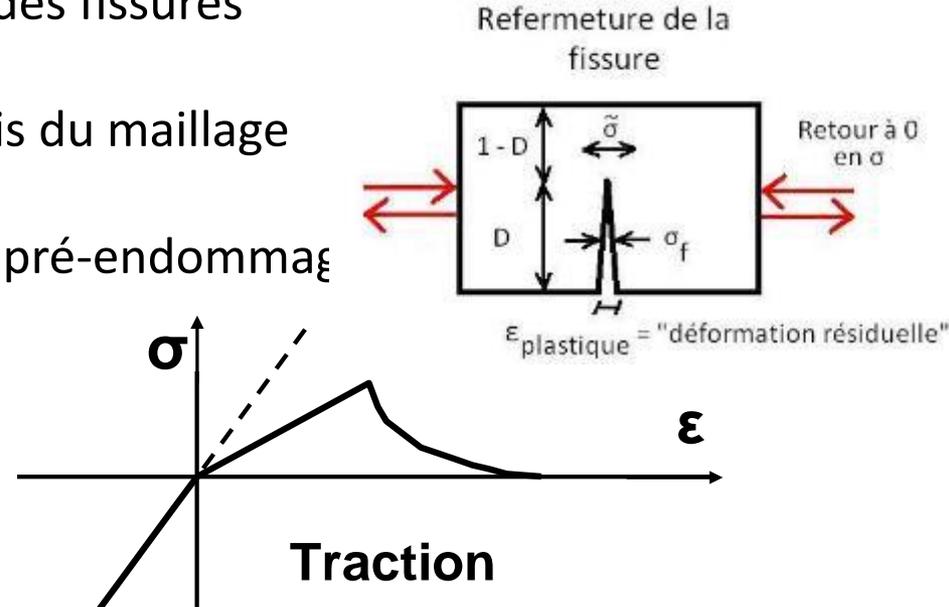
Bilan du modèle

- Modèle d'endommagement éprouvé (utilisé pour la modélisation du béton)
- Aménagement du modèle pour la maçonnerie
- Prise en compte de la refermeture des fissures
- Indépendance de la solution vis à vis du maillage

➤ P



ste d'un pré-endommag



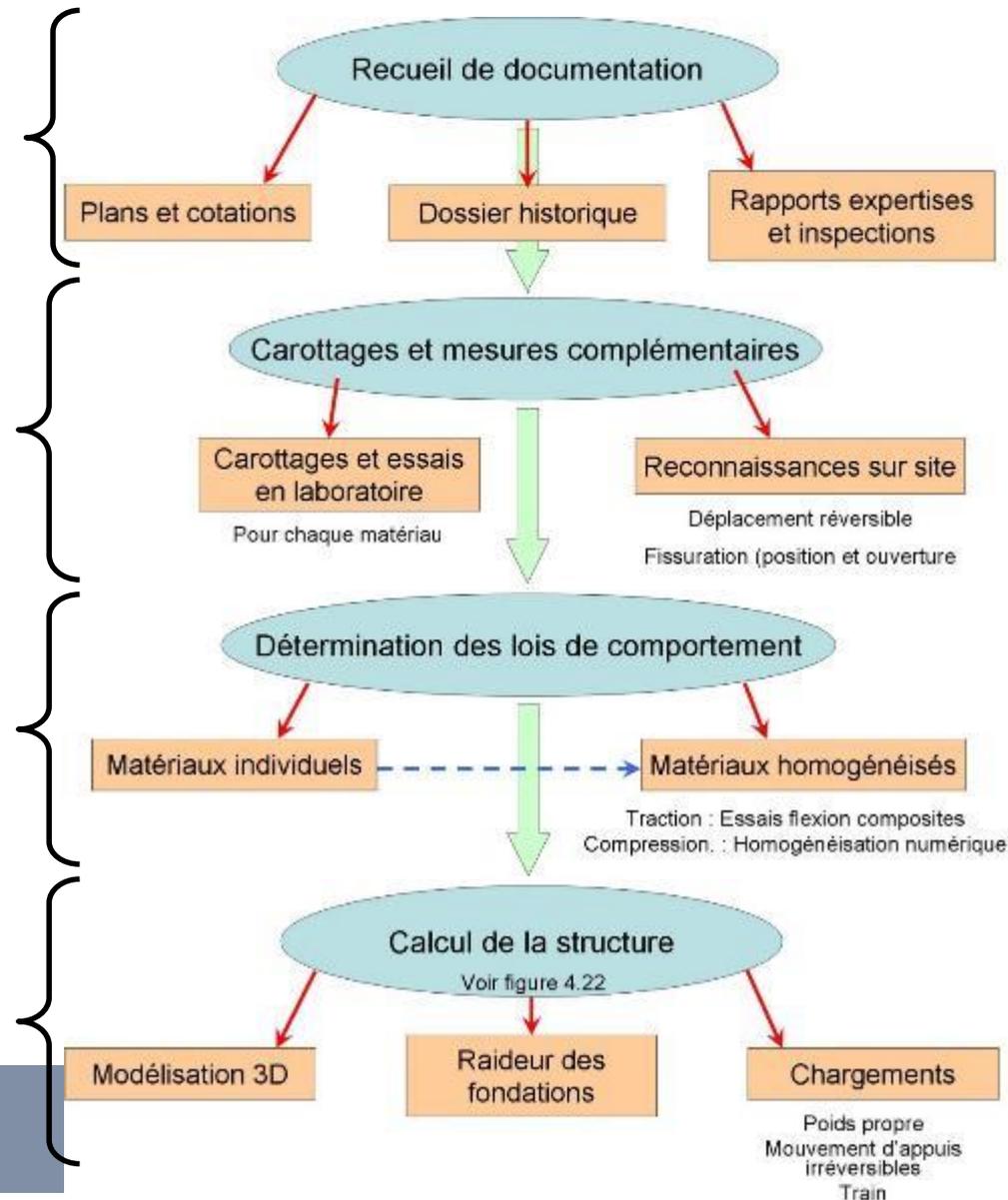
Méthodologie proposée

Données historiques

Prélèvements et mesures sur site

Détermination des lois de comportement

Calcul de la structure



Application au viaduc de St Ouen



La validation du modèle développé est menée sur un cas concret : le viaduc de St Ouen

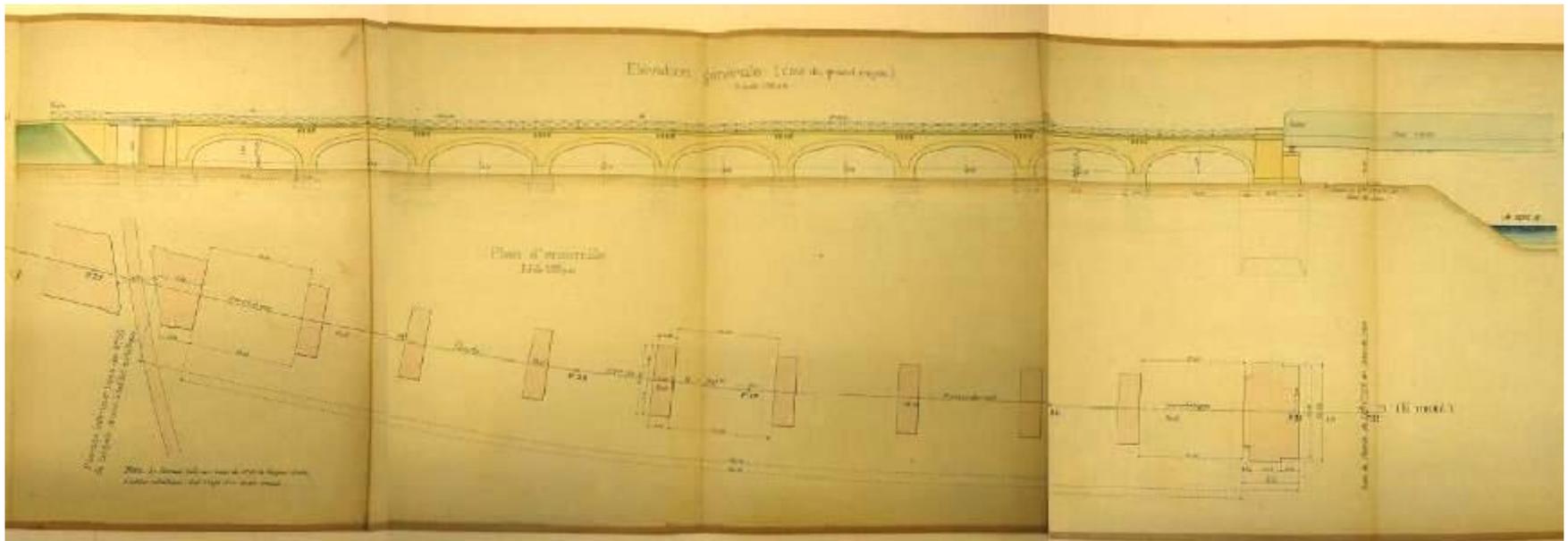


Viaduc d'approche en pierre construit en 1904

Trafic intense : RER C et Fret 80 à 150 passages quotidien

Application au viaduc de St Ouen

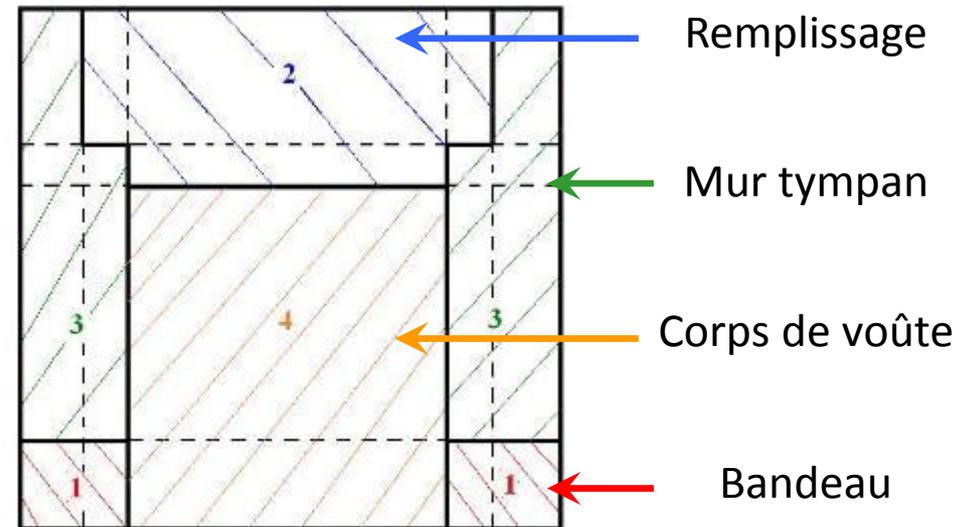
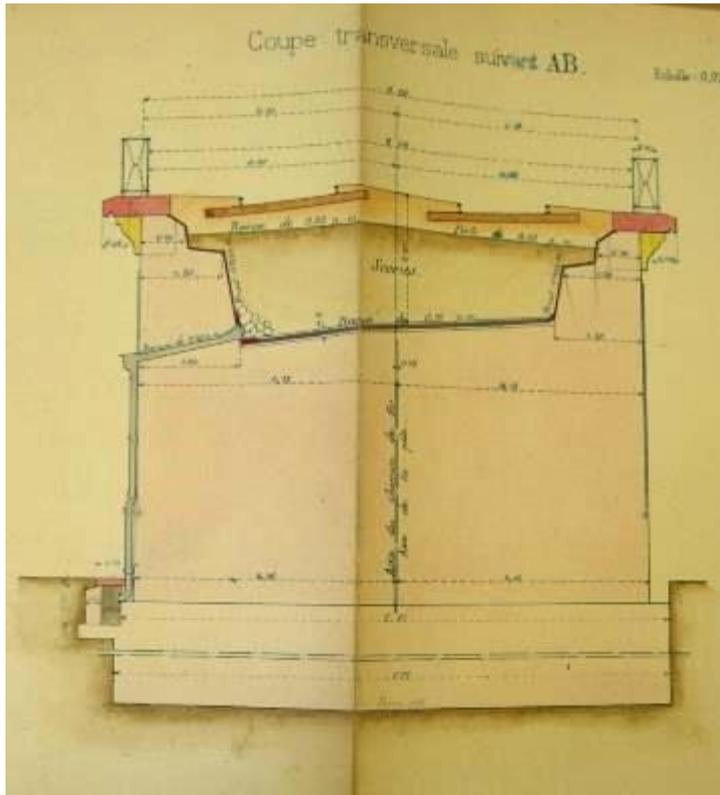
Coupe longitudinale



9 travées de 12 m / 2 culées de 17 m / 150 m de long

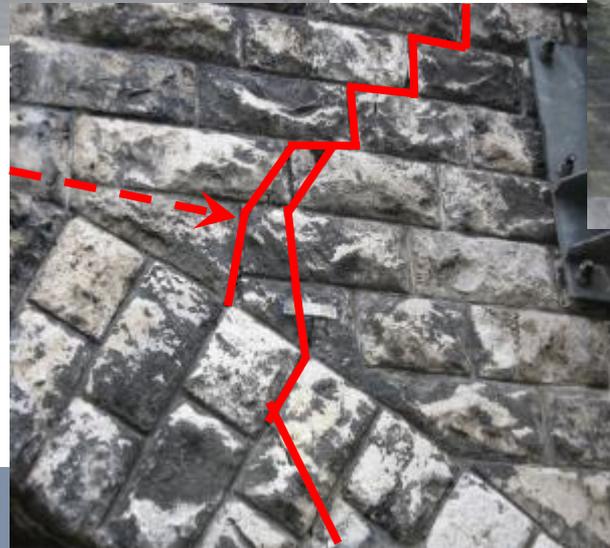
Application au viaduc de St Ouen

Coupe transversale



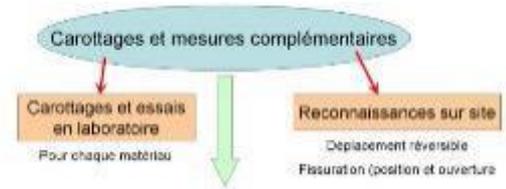
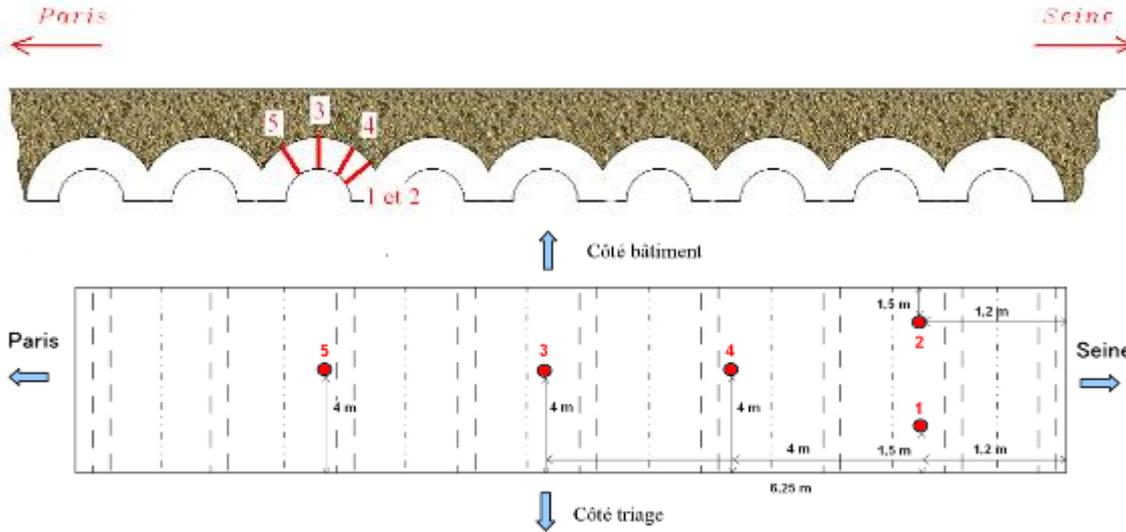
Application au viaduc de St Ouen

Inspections

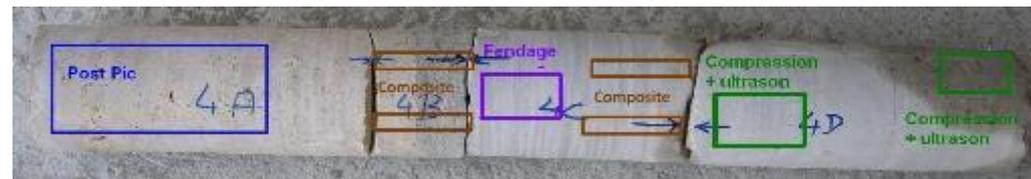
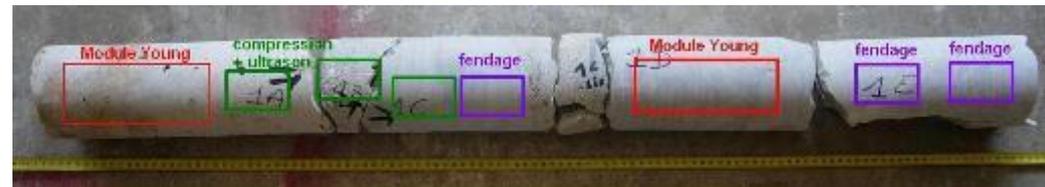


Application au viaduc de St Ouen

Carottages

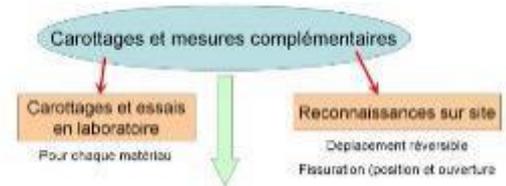


Extraction de 5 carottes d'env. 1,20 m de long



Application au viaduc de St Ouen

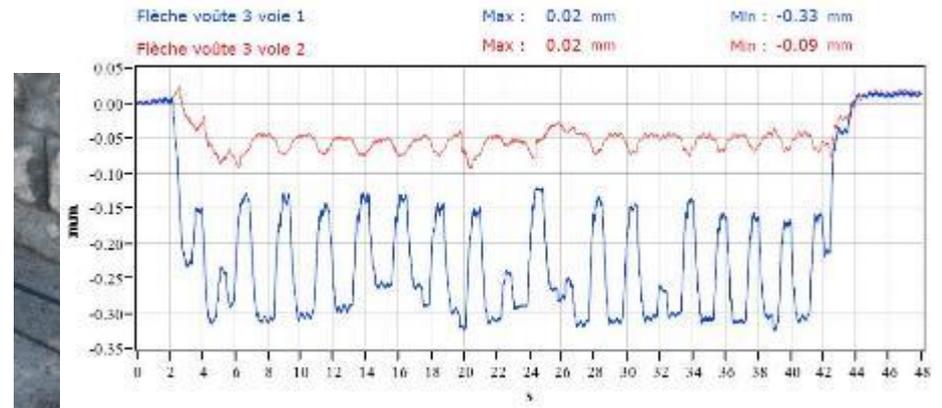
Reconnaitances sur site



Mesures relatives et absolues



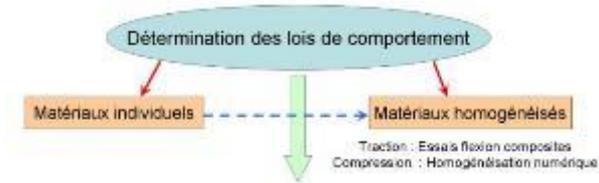
Déplacements vertical et horizontal



Application au viaduc de St Ouen

Loi de comportement - Matériaux individuels

3 matériaux différents : Pierre intérieure (47 %),
pierre de parement (33 %) et mortier (20 %)

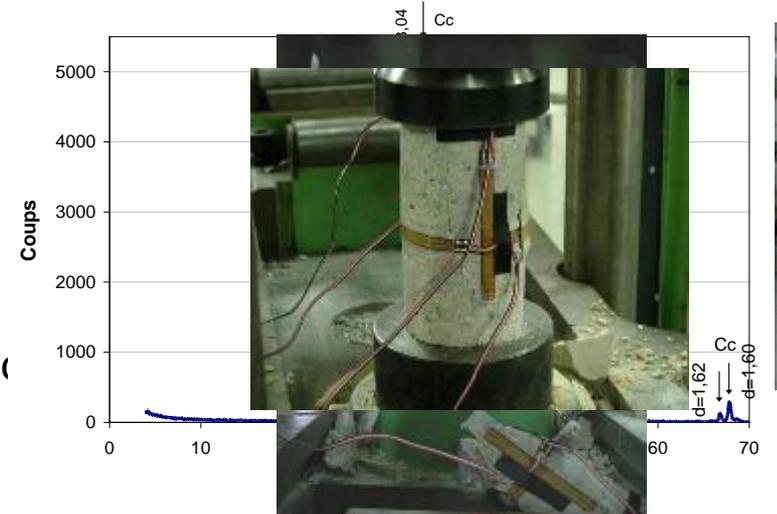


Essais physico-chimiques

- Porosité et masse volumique (dessiccation)
- Phases minérales (diffraction de rayons X)

Essais mécaniques

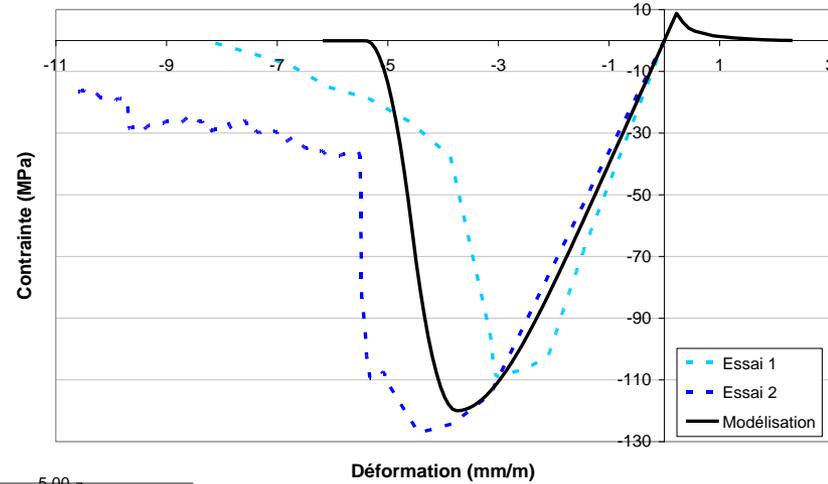
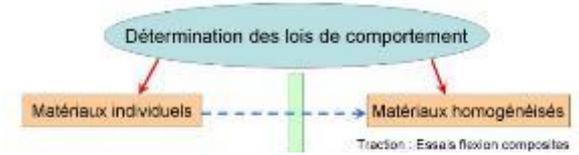
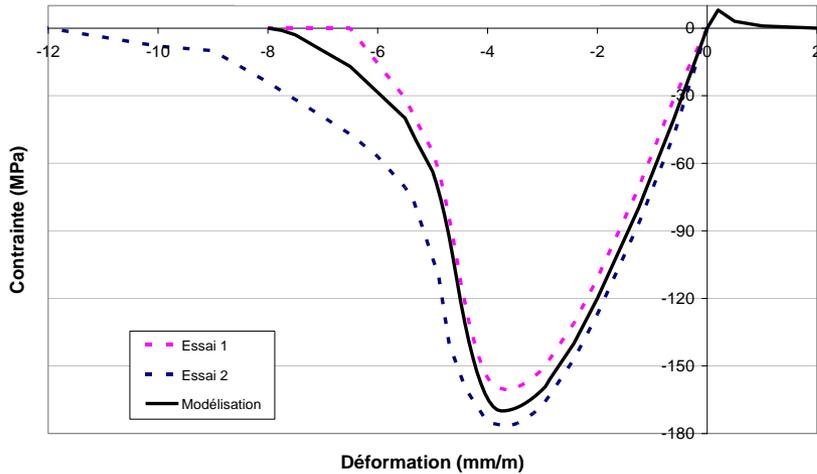
- Propagation d'une onde ultrasonore
- Essais de compression
- Essais de fendage
- Essais de module d'élasticité et coefficient de Po
- Essais du comportement post pic



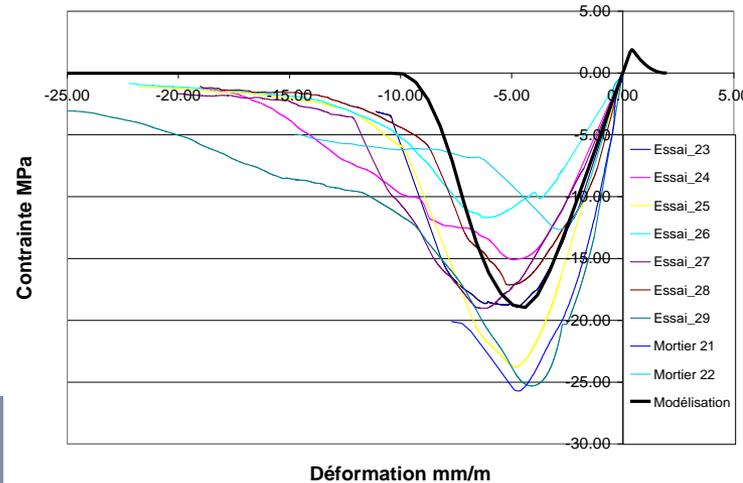
Application au viaduc de St Ouen

Loi de comportement - Matériaux individuels

Pierre intérieure



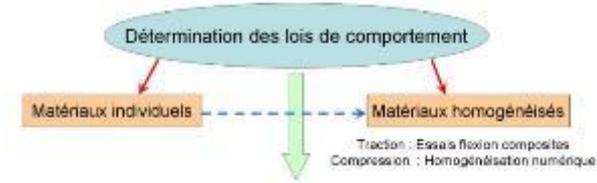
Mortier



Pierre de parement

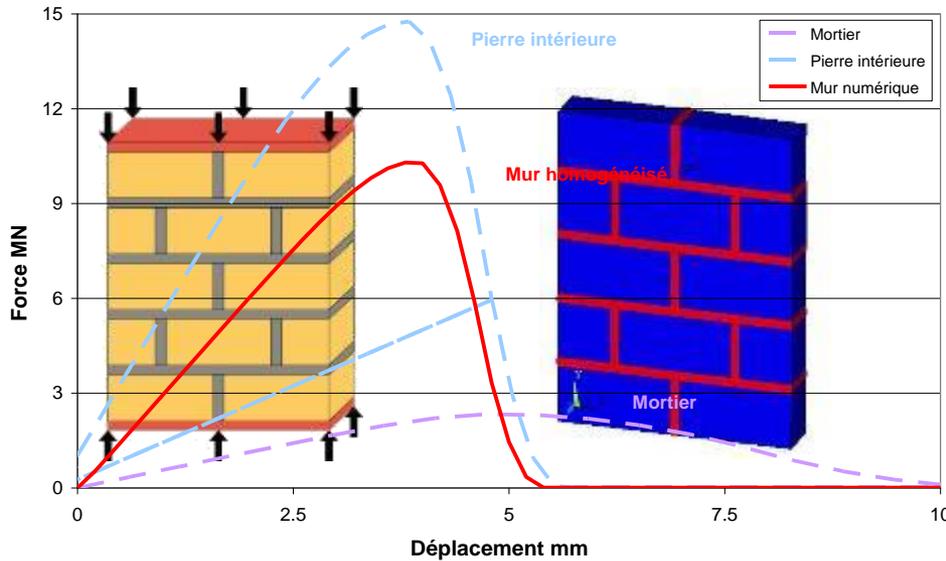
Application au viaduc de St Ouen

Loi de comportement - Matériaux homogénéisés



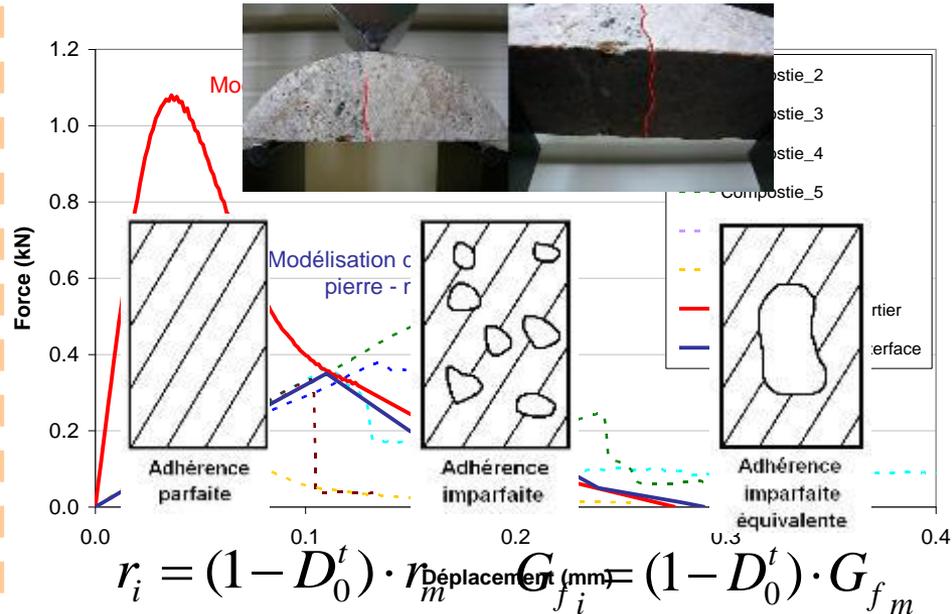
Compression

Simulation numérique d'un essai de compression sur un mur normalisé



Traction

Comportement de l'interface pierre-mortier

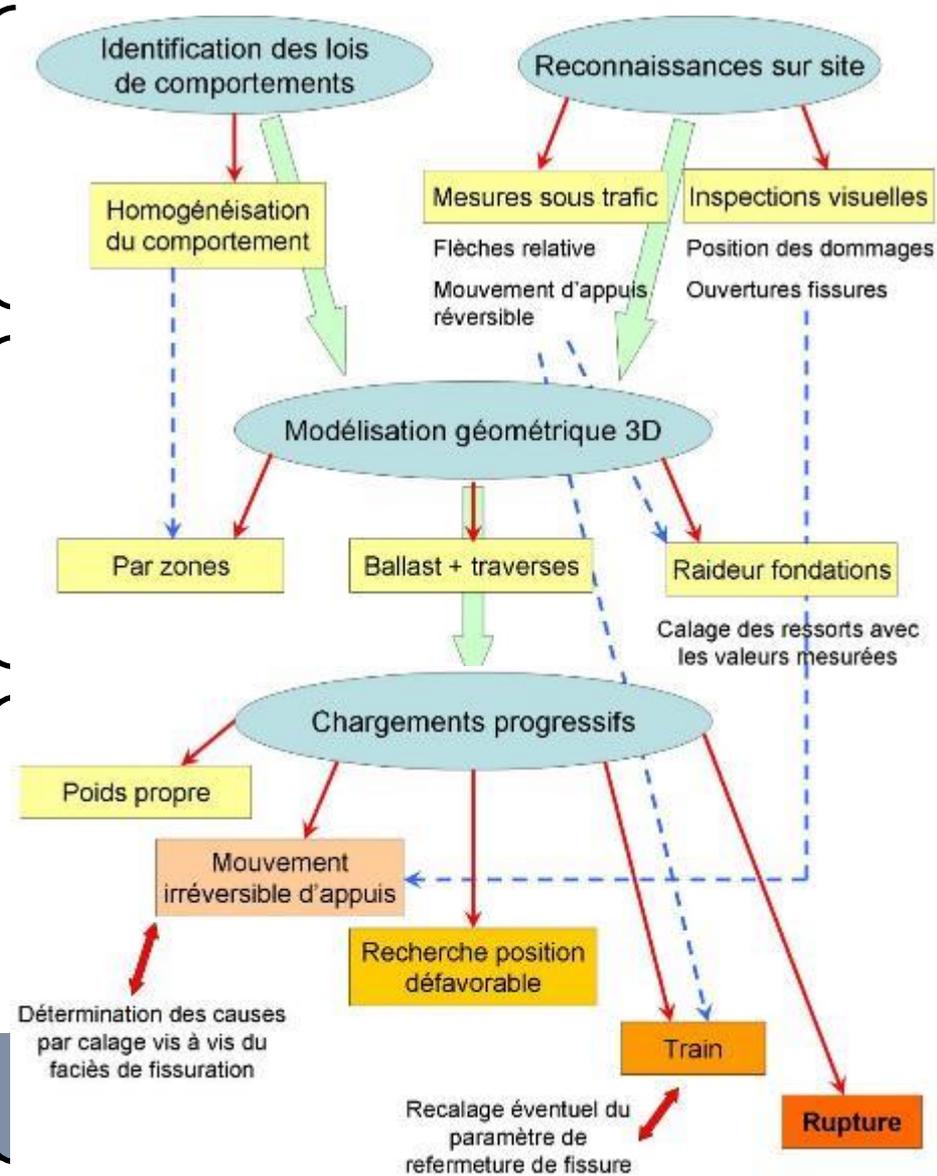


Méthodologie de calcul proposée

Lois de comportement et
reconnaisances sur site

Modélisation géométrique

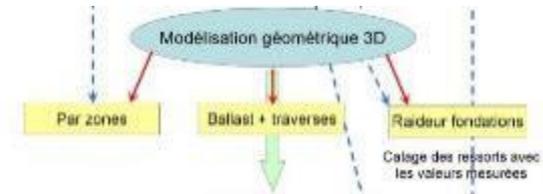
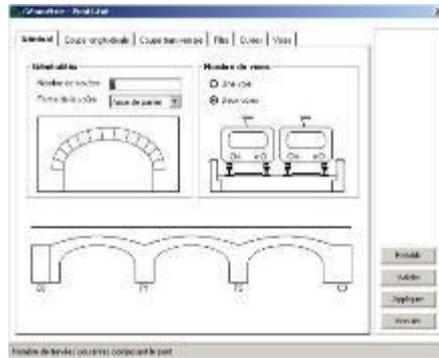
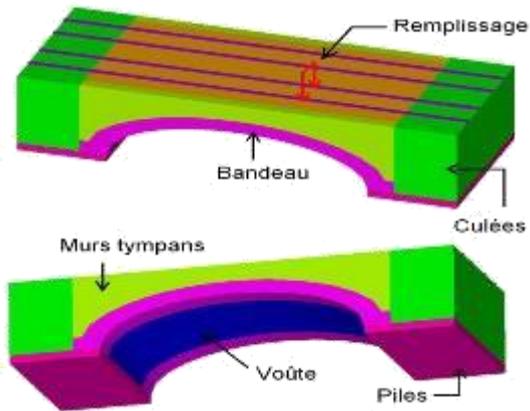
Chargement par étapes de la structure



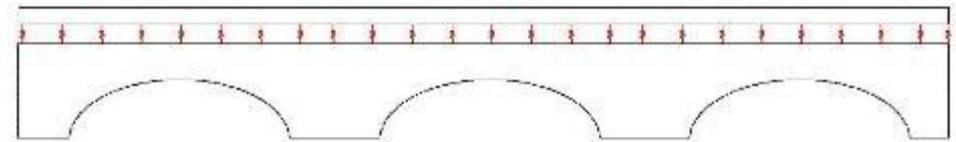
Application au viaduc de St Ouen

Modélisation géométrique 3D

Modélisation par zones



Mise en place d'un **ballast** élastique linéaire pour la **distribution des charges**



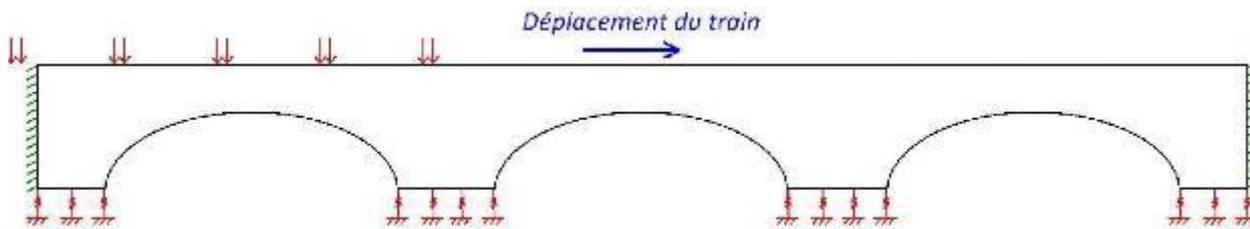
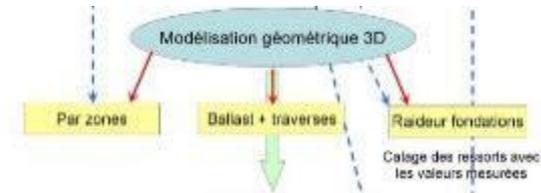
| Paramètres | Ensemble « ballast - traverses » |
|------------------------|----------------------------------|
| Module élastique | 30 000 MPa |
| Coefficient de Poisson | 0.2 |
| Densité | 1700 kg/m ³ |
| Raideur verticale | 100 MPa/m |
| Raideur horizontale | 1000 MPa/m |

Application au viaduc de St Ouen

Conditions aux limites

Blocage plans verticaux pour simulation des 9 travées (symétrie)

Evaluation du **sol environnant** → Calibration de **ressorts** de fondation



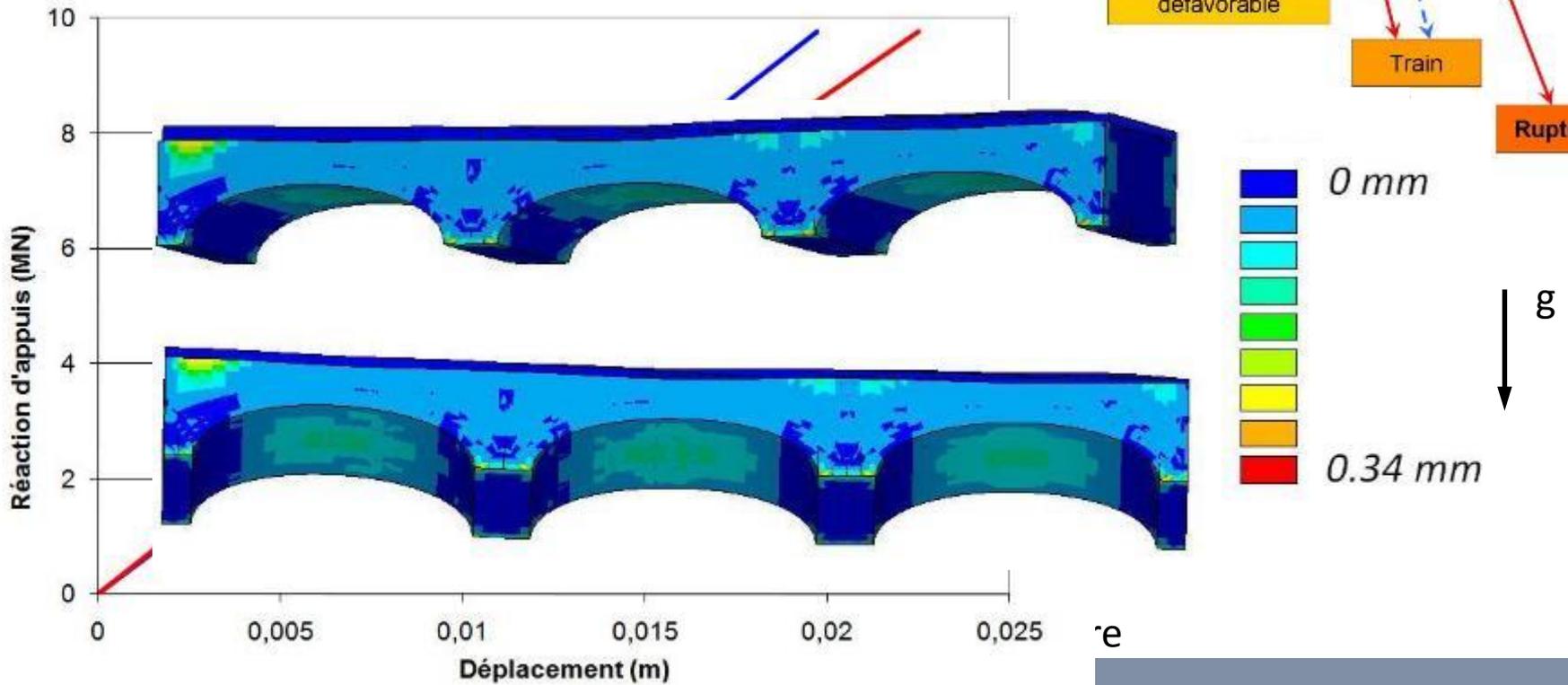
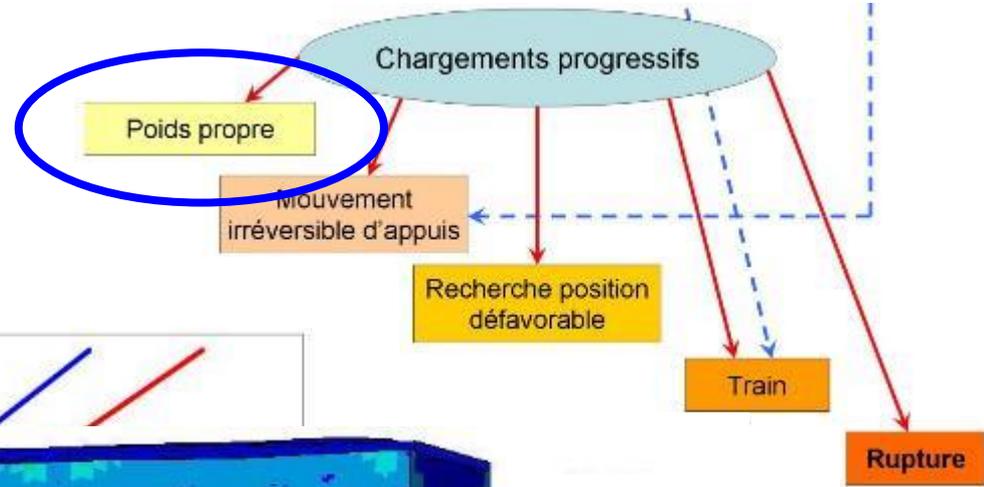
Comparaison des déplacements calculés avec les mesures sur site sous trafic

$$Kn = 75 \text{ MPa} / \text{m}$$

Application au viaduc de St Ouen

Application des charges

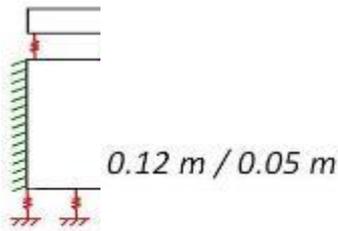
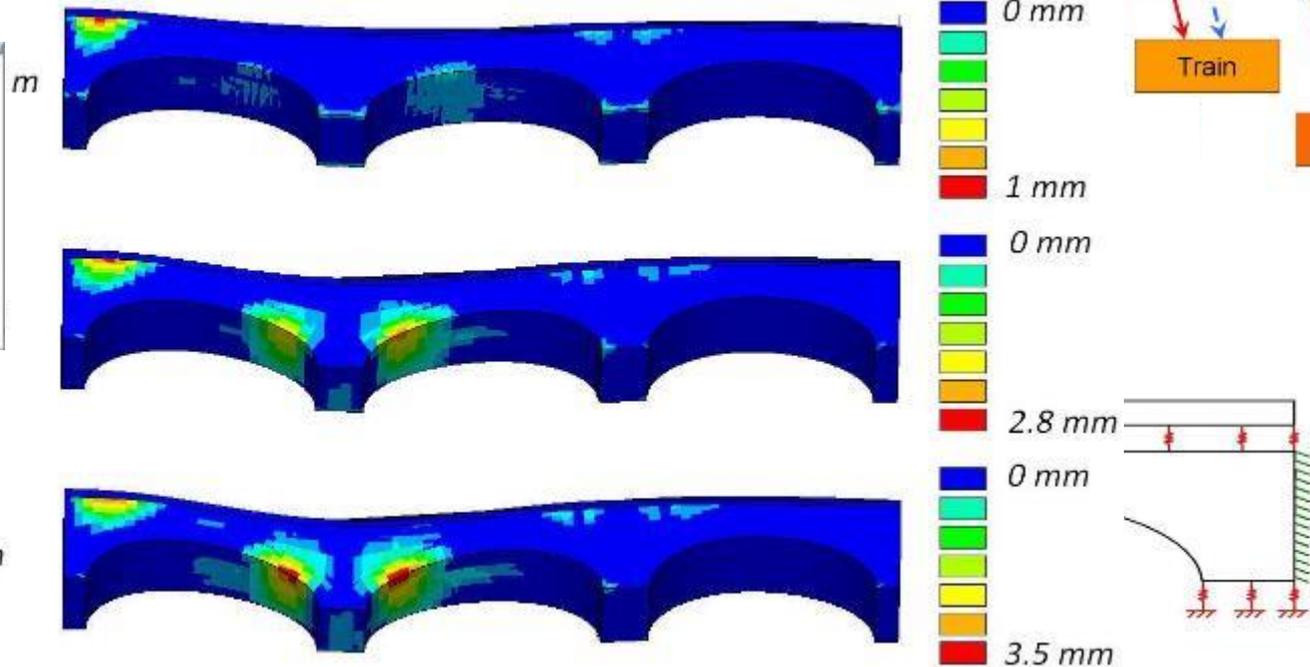
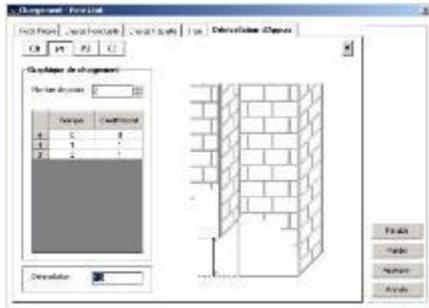
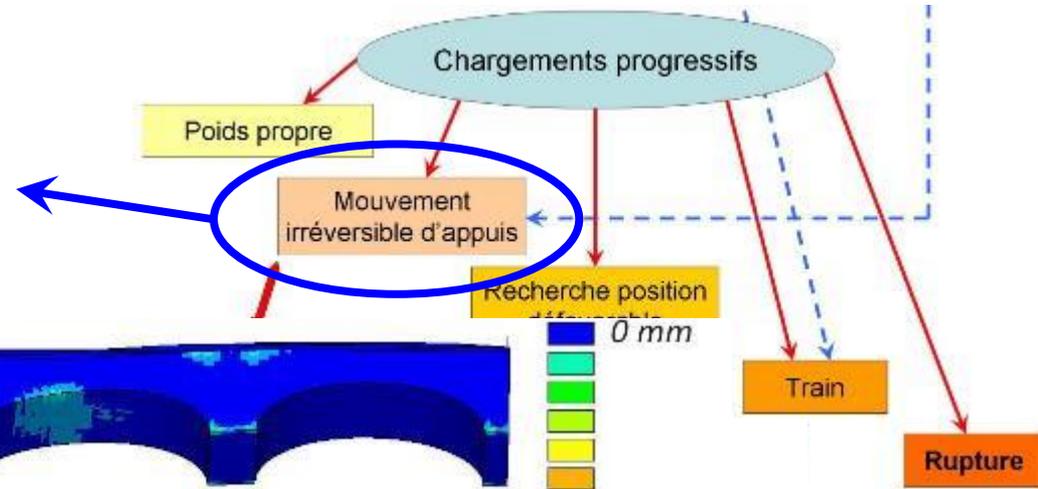
Application progressive du poids propre



Application au viaduc de St Ouen

Application des charges

Application progressive de tassements d'appui pour retrouver le faciès de fissuration observé sur l'ouvrage

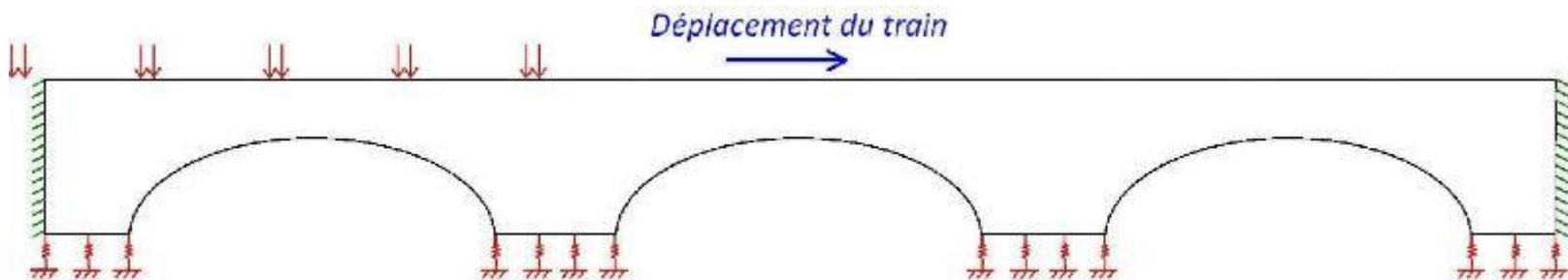
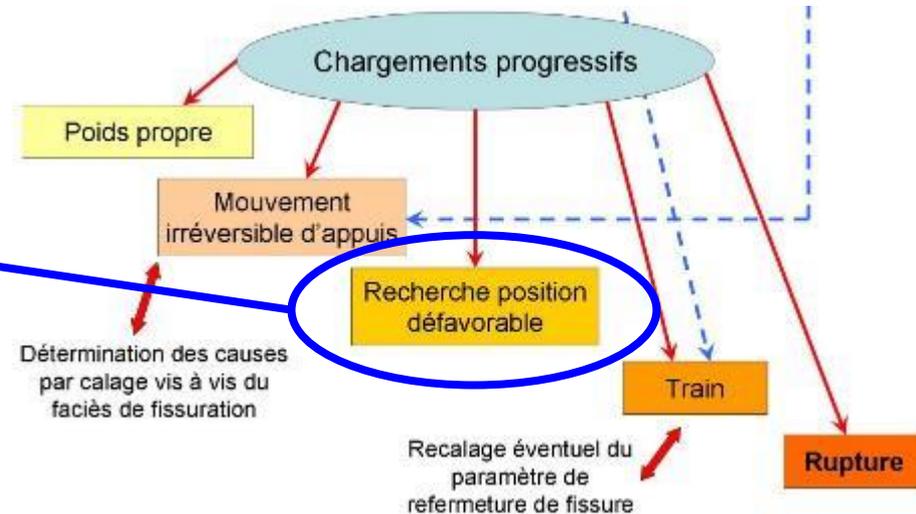


Ouverture de fissure sous tassement d'appui

Application au viaduc de St Ouen

Application des charges

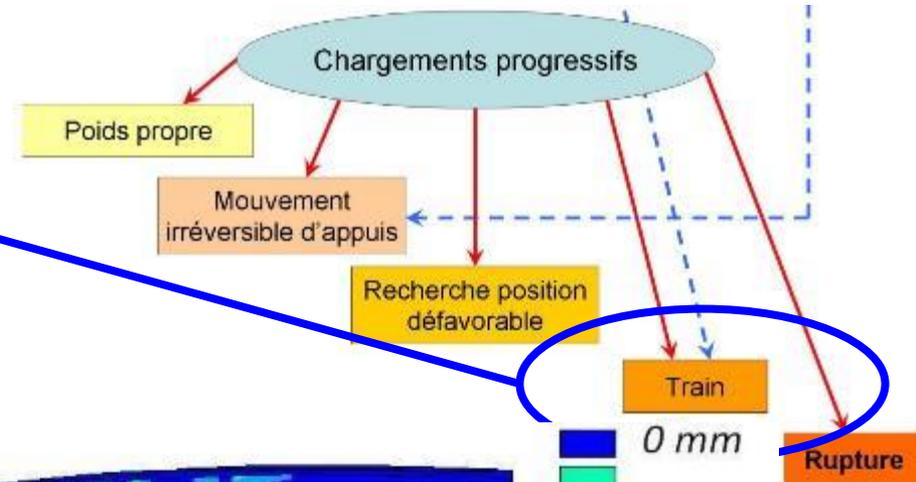
Recherche de la **position la plus défavorable** d'un train sur l'ouvrage en fonction d'un critère choisi



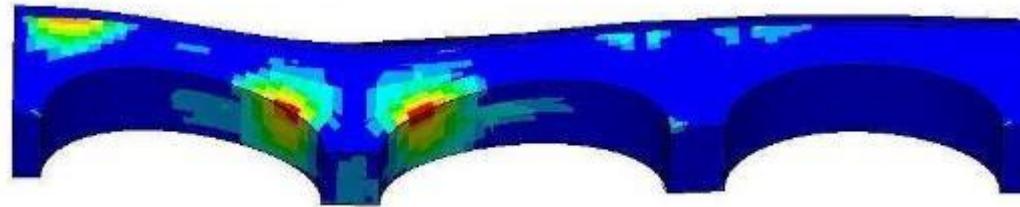
Application au viaduc de St Ouen

Application des charges

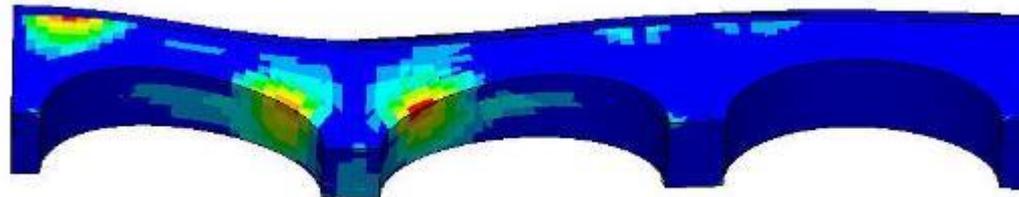
Application progressive du **train** sur l'ouvrage
(convoi automatisé)



0.12 m / 0.05 m



Train réel

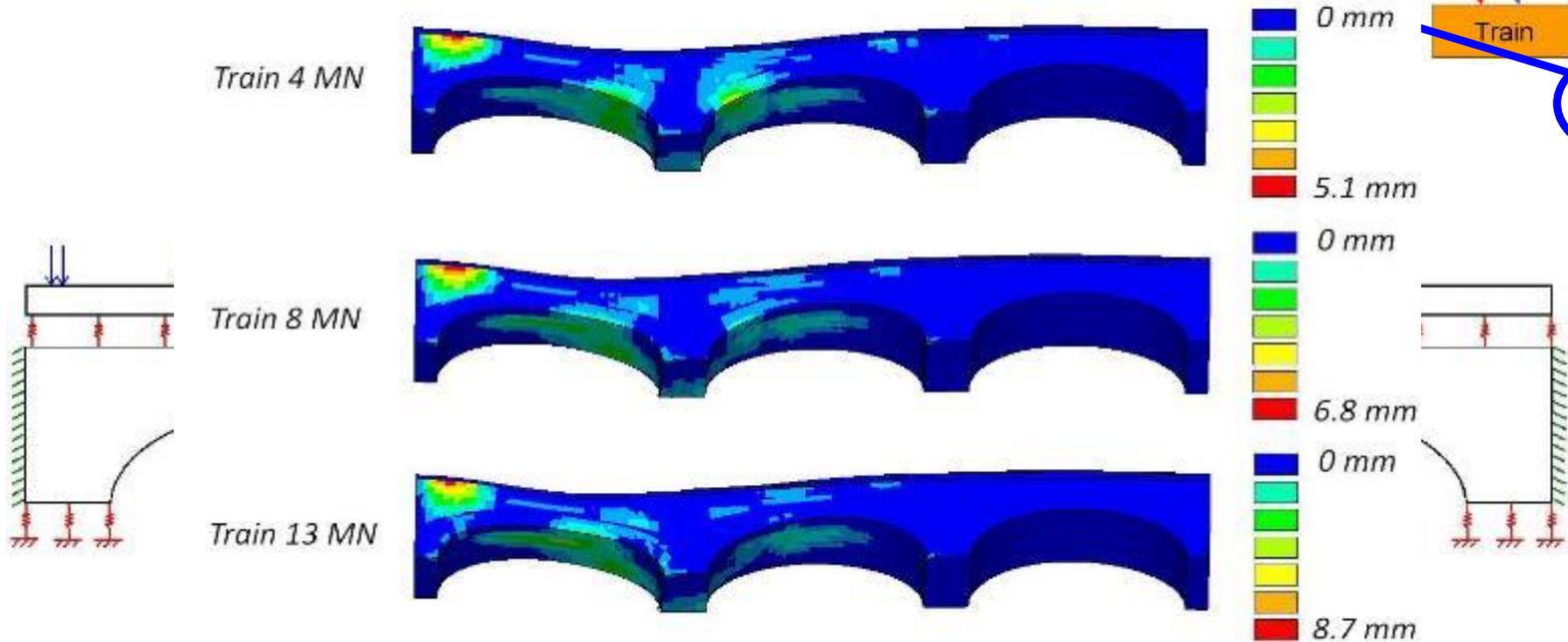
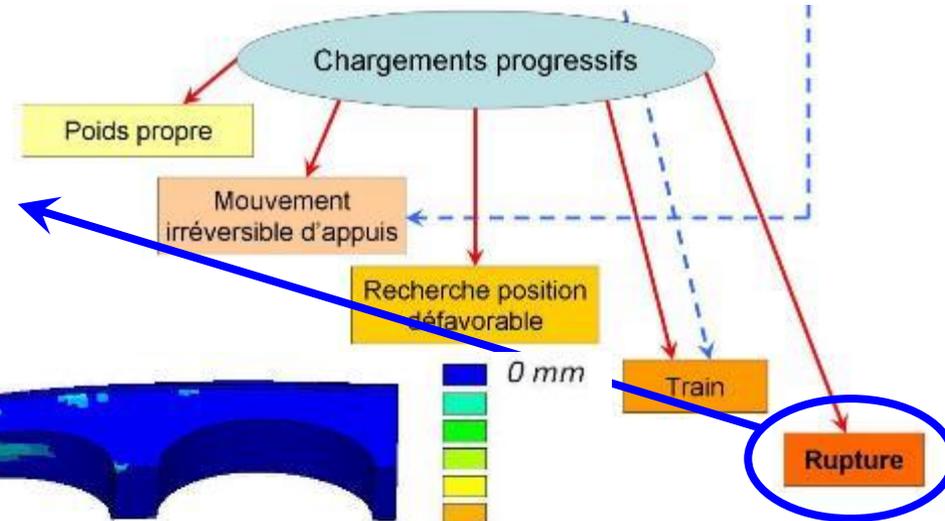


Ouverture de fissure sous un train

Application au viaduc de St Ouen

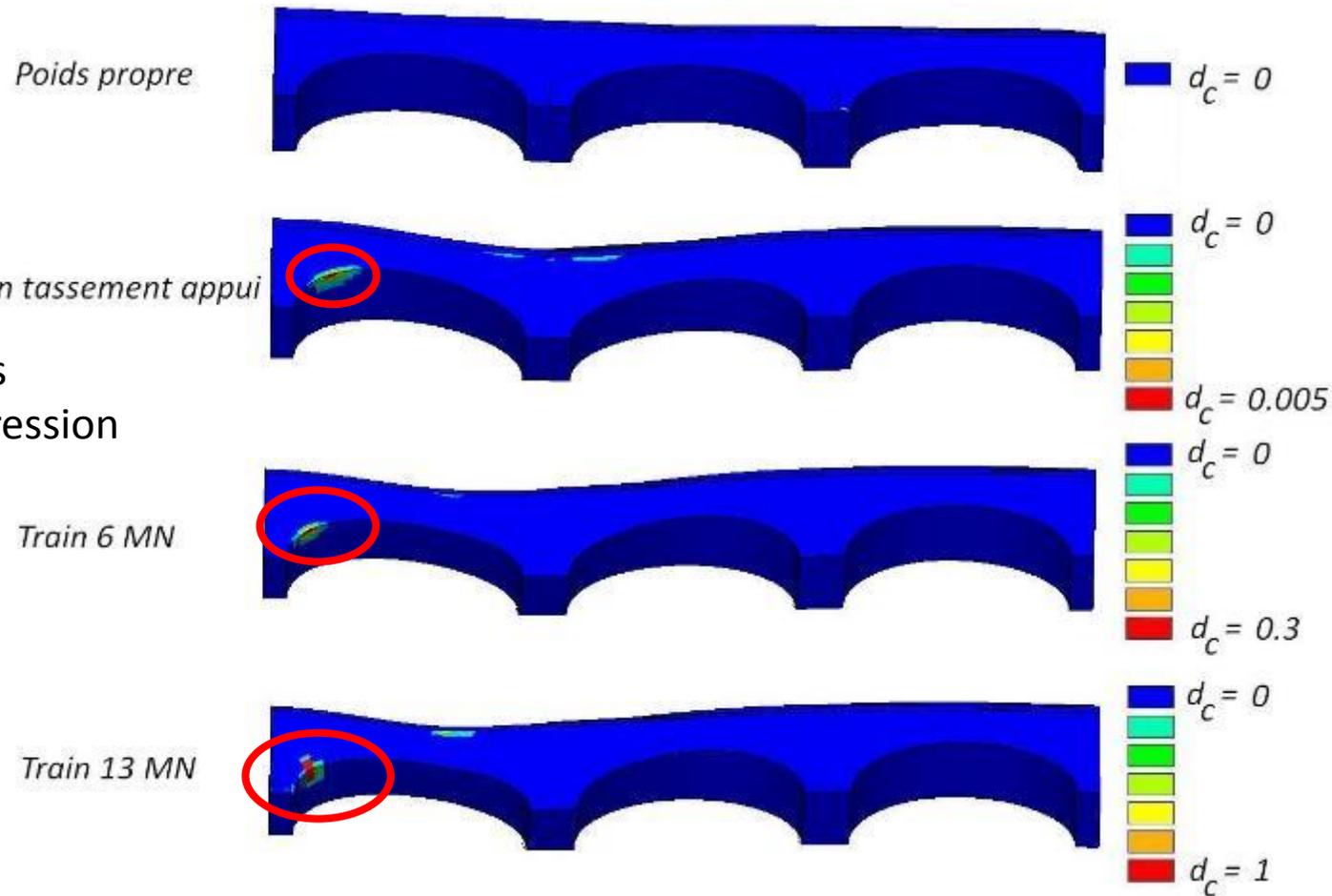
Application des charges

Application progressive du **train** jusqu'à **rupture**
(convoi automatisé)



Ouverture de fissure sous un train fictif jusqu'à rupture

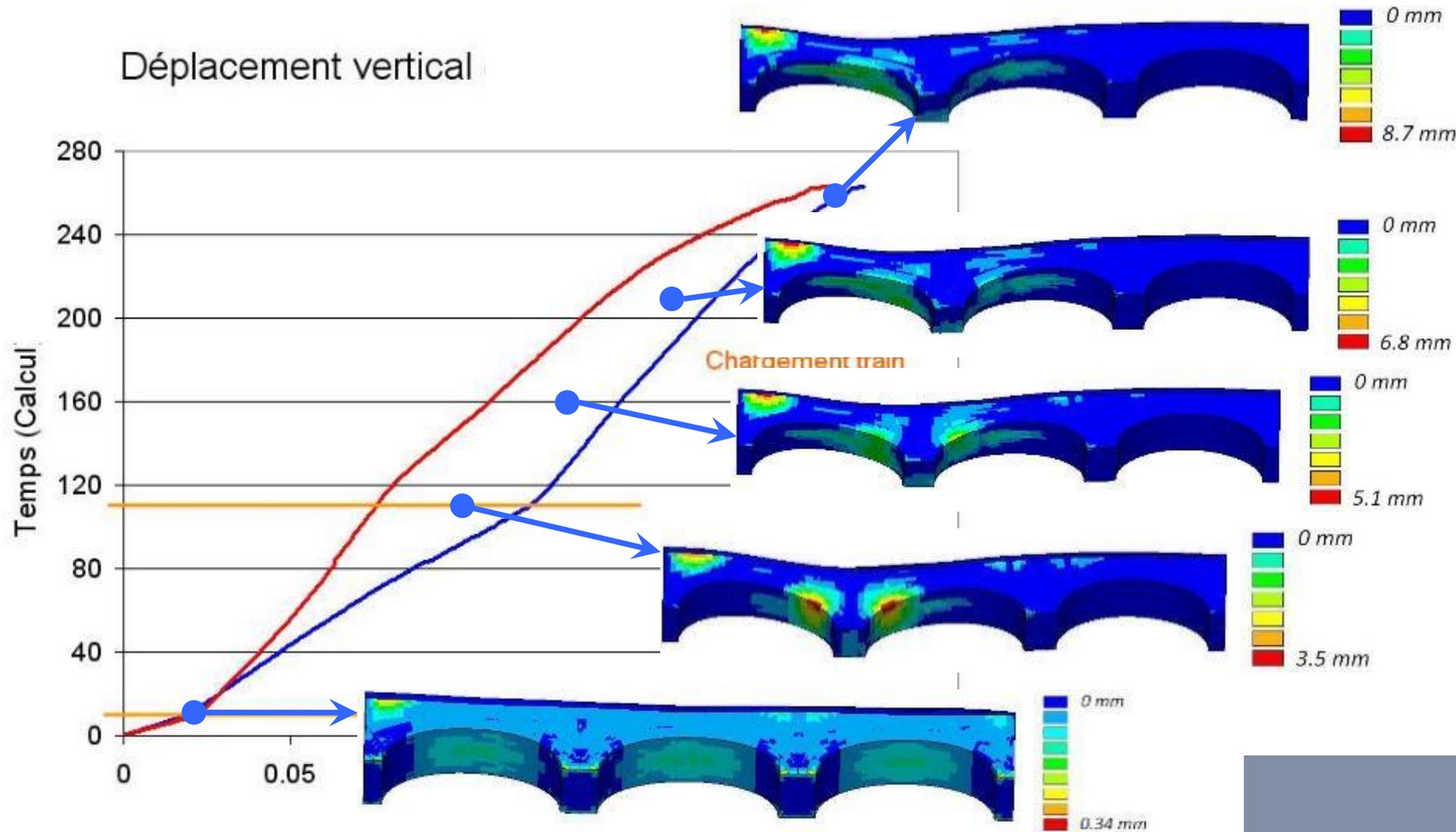
Application au viaduc de St Ouen



Détection de zones endommagées en compression

Endommagement de compression sous un train fictif jusqu'à rupture

Application au viaduc de St Ouen



Débat AFGC

Recalcul des voutes en maçonnerie - REX

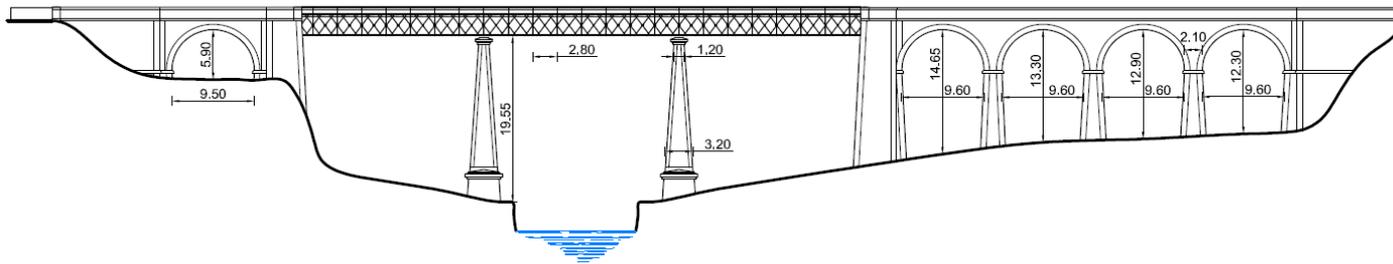


Expertise 5 ponts ferroviaires en Corse

Enjeu : Sécurité et pérennité OA

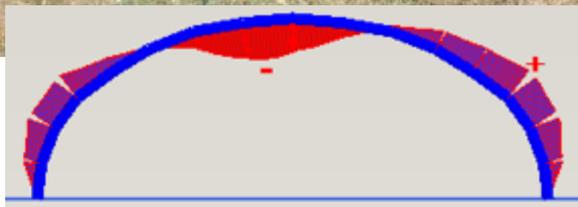
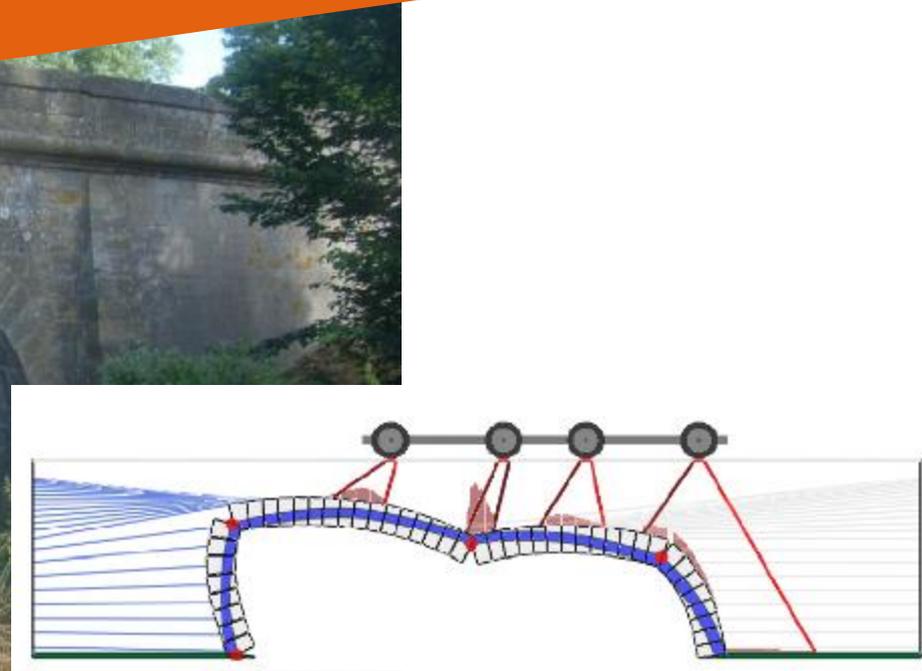
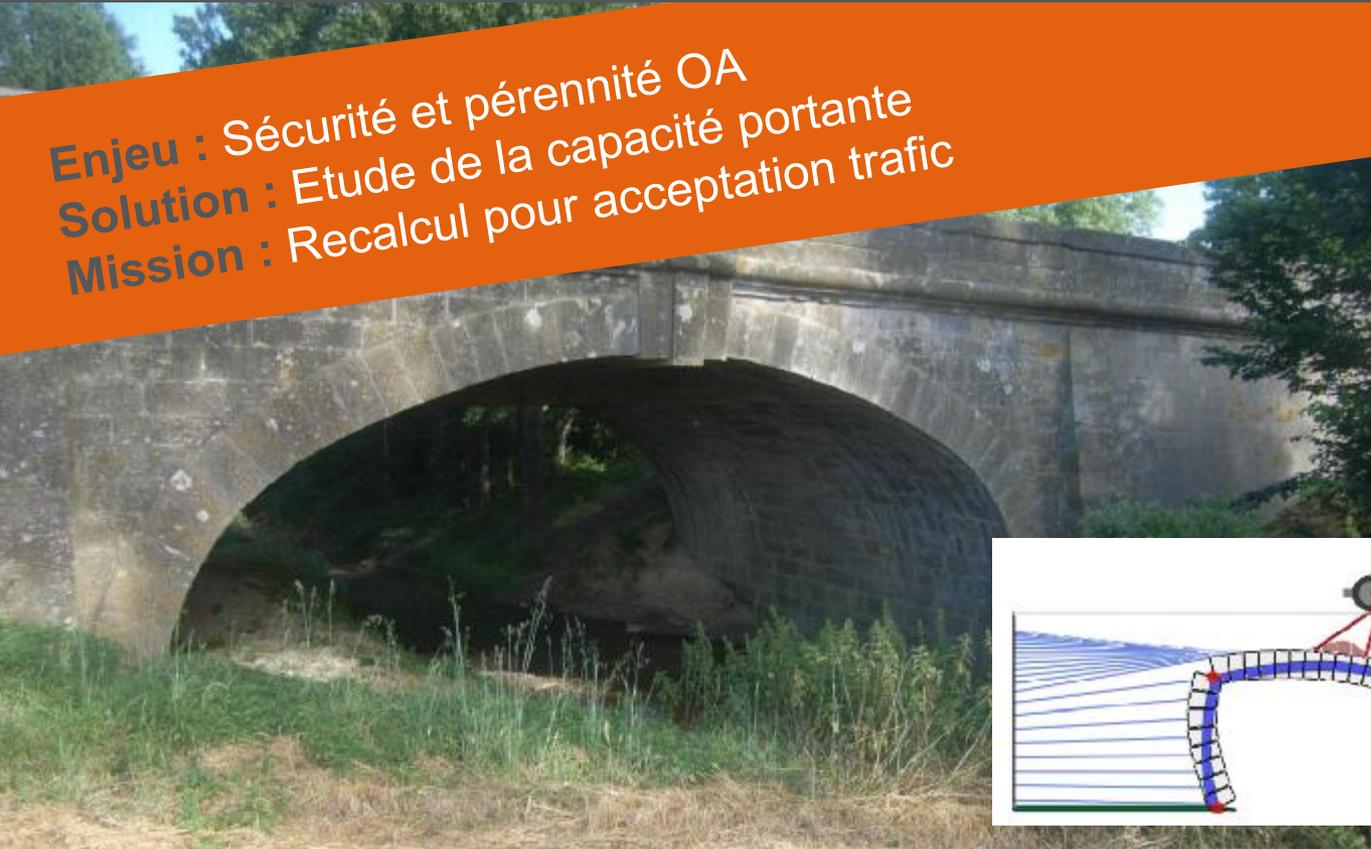
Solution : Inspection et capacité portante

Mission : Diagnostic & Recalcul pour prioriser actions de maintenance



CD Aude - Pont sur RD

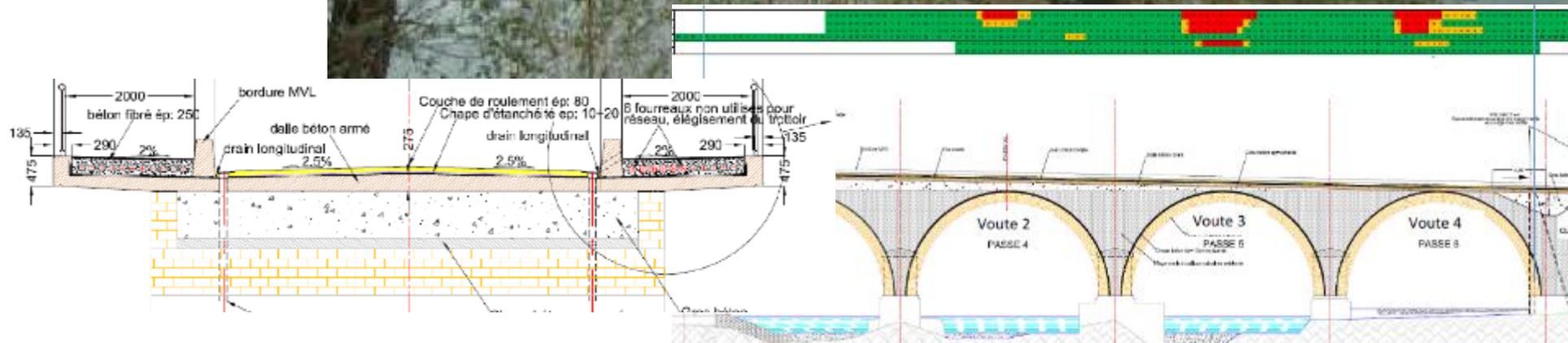
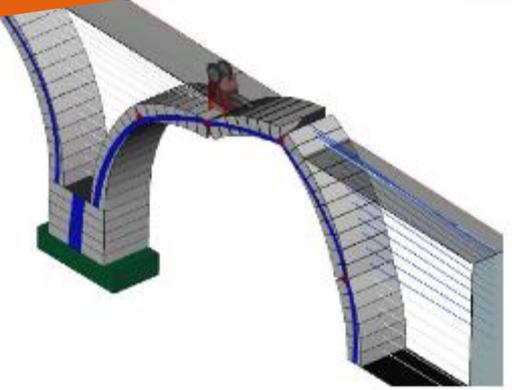
Enjeu : Sécurité et pérennité OA
Solution : Etude de la capacité portante
Mission : Recalcul pour acceptation trafic



| Convois | Cas de charge rupture | Position de l'essieu arrière | Position de l'essieu avant | Coefficient de sureté |
|--------------|-----------------------|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| Bc | 15 | 5.40 m | -11.10 m | 1.24 |
| Bt | 16 | 6.00 m | 4.65 m | 1.10 |
| 3.5 tonnes | 24 | 10.80 m | 3.30 m | 9.01 |
| 1- 12 tonnes | 13 | 4.20 m | -0.80 m | 3.85 |
| 12 tonnes | 13 | 4.20 m | -9.80 m | 3.47 |
| 1-19 tonnes | 14 | 4.80 m | 0.30 m | 2.82 |
| 19 tonnes | | -3.60 m | -17.10 m | 2.14 |
| 1-30 tonnes | | -11.10 m | -17.10 m | 1.52 |
| C2 | | 4.20 m | -9.60 m | |

Pont Pinsaguel

Enjeu : Réhabiliter l'ouvrage
Solution : Capacité portante à toutes les phases du chantier
Mission : Etude et adaptation du phasage travaux



Renforcement du viaduc de Casamozza

Enjeu : Sécurité et pérennité OA
Solution : Inspection, capacité portante, renforcement
Mission : Recalcul et projet de renforcement

