

## Restitution du chantier démonstrateur du pont d'Osserain : **Résultats du benchmark de méthodes de calcul**



**PN DOLMEN**

**Paul TAFOREL**, MiMeTICS engineering  
[ptaforel@mimetics-engineering.fr](mailto:ptaforel@mimetics-engineering.fr)

**& Pierre MORENON**, LMDC, INSA Toulouse  
[morenon@insa-toulouse.fr](mailto:morenon@insa-toulouse.fr)



# GT Modélisation



Académiques /  
Universitaires

2-10



Spin-off / cellules  
de transfert 7/8-9-3/11



Bureaux  
d'Etudes

1-4-5-6-11



2D

GETEC / Conseil OA / Expert OA 1



SETEC



MiMeTICS engineering 9



Université de Limoges L2GC 2



BOLLINGER + GROHMAN 6



Université de Montpellier LMGC<sup>10</sup>



QUADRIC - Artelia Group 4



INSA Toulouse / LMDC 7-8



STONO 3-11



1		VOUTE	2D	Mono arche	<b>Analyse Limite</b>
2	 		2D	Multi-arches, piles, remblai	
3		THRUST	2D	Multi-arches, piles, tympans	
4			2D	Mono arche, non-linéaire élastique	<b>Méthodes des Eléments Finis</b>
5			2D	Homogénéisation, orthotropic damage	
6	BOLLINGER+GROHMAN		2D	Elasto-plastique	
7			3D	Homogénéisation, endommagement anisotrope & plasticité dans les directions des contraintes principales	
8			3D	Homogénéisation, endommagement anisotrope dans la direction des joints	
9			2D	Corps élastiques avec loi de contact frottante	
10			3D	Corps rigides avec lois cohésives	
11			3D	Corps rigides, frottement tangentiel & contact normal unilatéral élastique	

## 1 - Prédiction

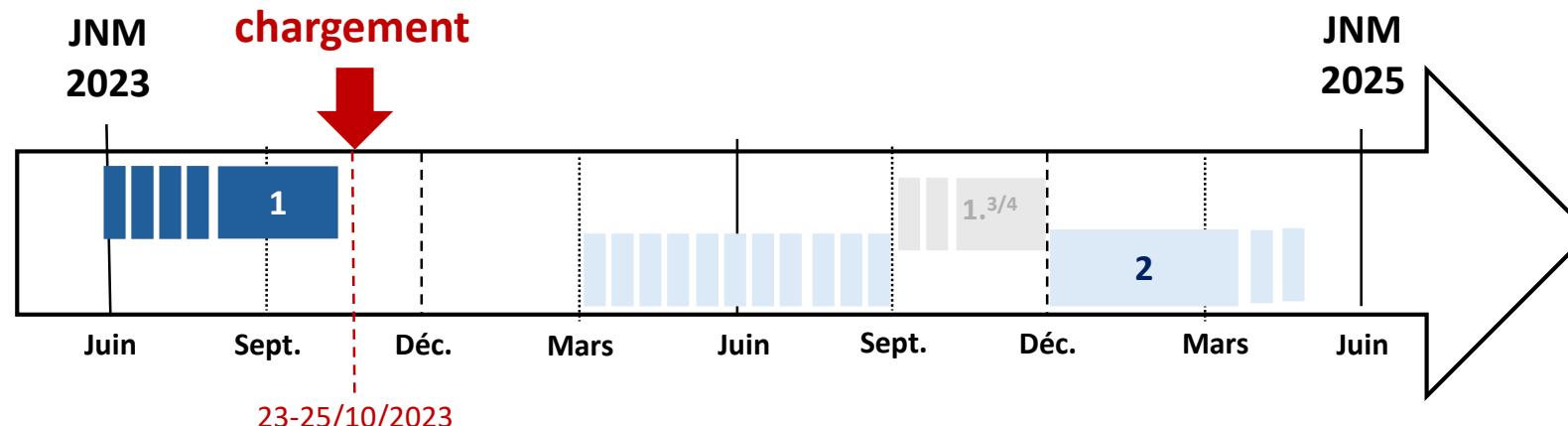
*Juin 2023 → octobre 2024*

- Proposer & valider un **plan de chargement** satisfaisant aux contraintes de l'opération
- **Prédire le comportement** de l'ouvrage pour le chargement considéré
- **Guider l'instrumentation** pour être à même de mesurer les phénomènes prédicts

## 2 – Post-diction

*Mars 2024 → avril 2025*

- **Exploiter les données** et mesures disponibles sur l'ouvrage pour **recaler les modèles**
- **Comparer les réponses des modèles** entre eux et aux données / mesures & mesurer les écarts entre une modélisation en aveugle et une modélisation environnée



## 1 - Prédiction

Juin 2023 → octobre 2024

- Proposer & valider un **plan de chargement** satisfaisant aux contraintes de l'opération
- **Prédire le comportement** de l'ouvrage pour le chargement considéré
- **Guider l'instrumentation** pour être à même de mesurer les phénomènes prédits

## 2 – Post-diction

Mars 2024 → avril 2025

- **Exploiter les données** et mesures disponibles sur l'ouvrage pour **recaler les modèles**
- **Comparer les réponses des modèles** entre eux et aux données / mesures & mesurer les écarts entre une modélisation en aveugle et une modélisation environnée



- *principaux résultats et enseignements*
- *réflexion autour de la modélisation*

# Prédiction

A large, bold white text 'Prédiction' is overlaid on a photograph of a dam and river. The dam is a concrete structure with a metal railing, spanning a river that flows through a lush, green landscape. The background shows a mix of green trees and rocky terrain.

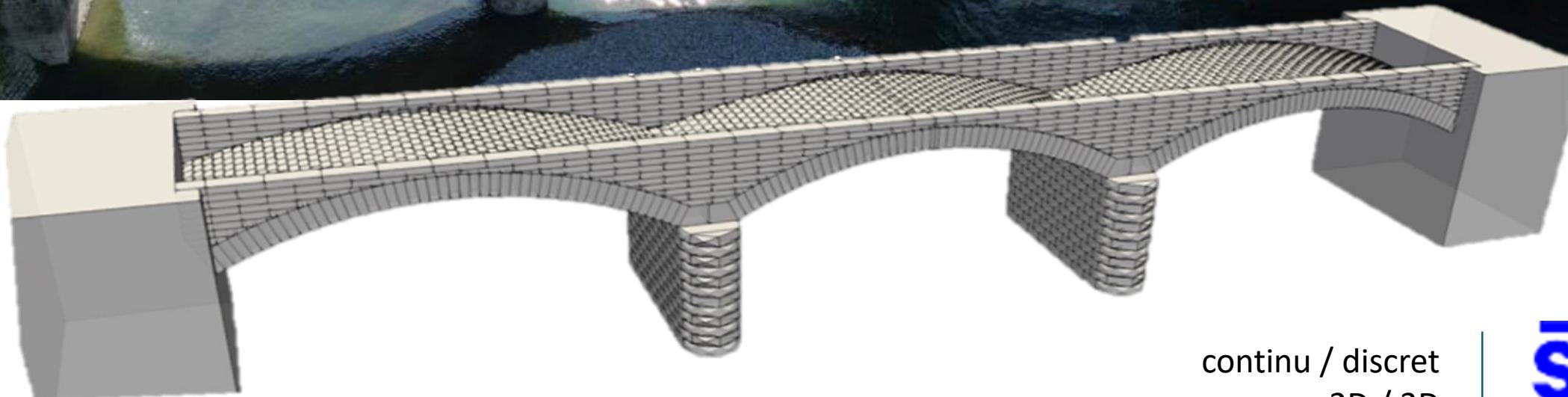


# Géométrie

- Relevés topo
- Sondages à la pelle
- Nuage de points
- ~~Description Culés / piles~~



Modèle géométrique



continu / discret  
2D / 3D



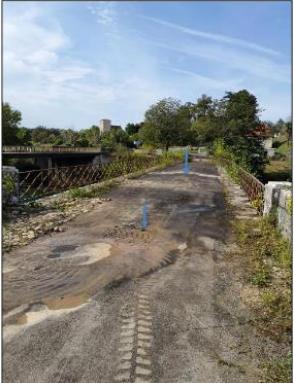
# Géométrie



- Relevés topo
- Sondages à la pelle
- Nuage de points
- ~~Description Cules / piles~~



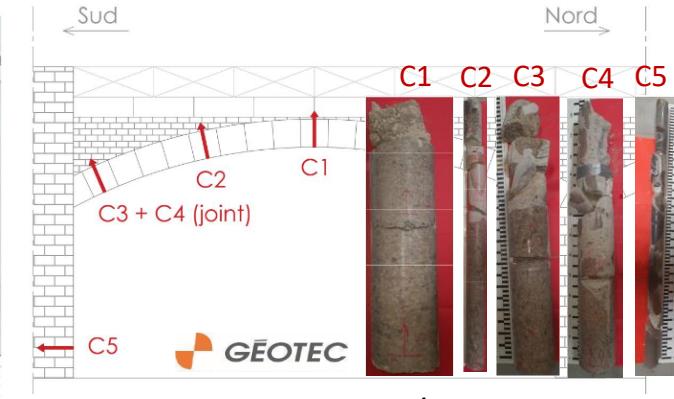
sondages à la pelle



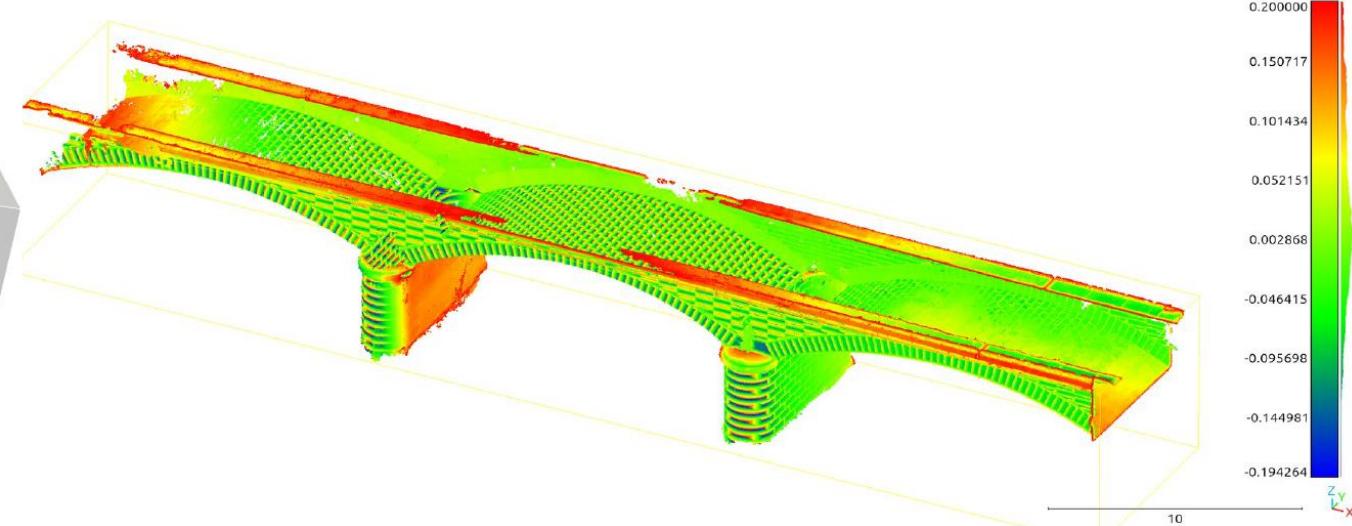
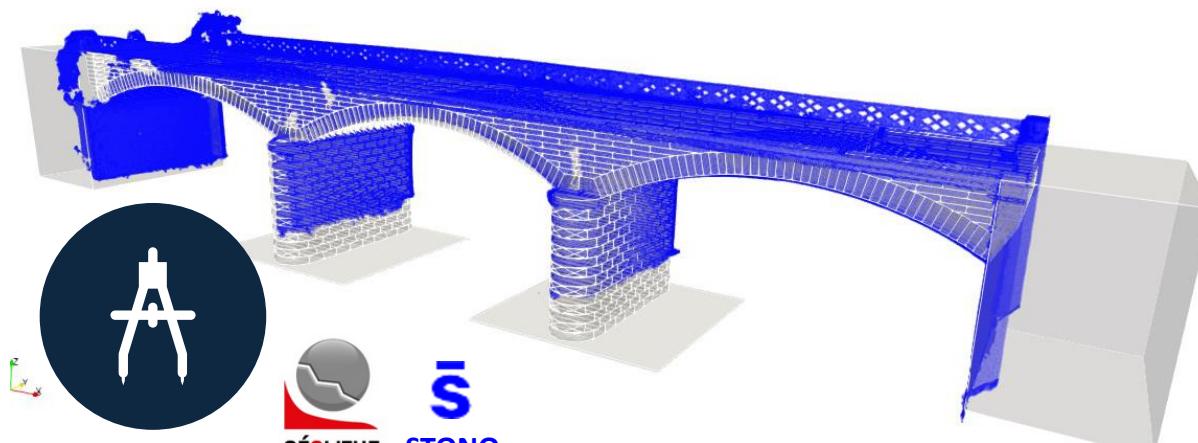
sondages



carottages horizontaux



carottages verticaux



- Bibliographie
- ~~Caractérisation~~
- Mesures

## Répertoire des Carrières, 1889

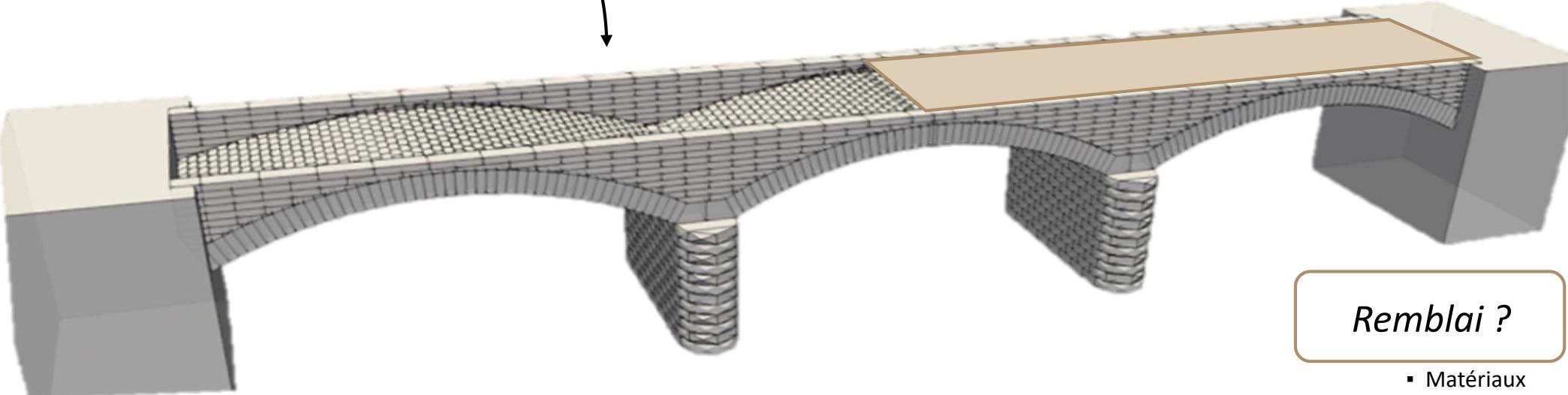
CARRIÈRES DE PIERRE DE TAILLE									
DEPARTEMENT	COMPTES	POUR	GRANIT	OU DE	PIÈCES	PIÈCES	PIÈCES	PIÈCES	PIÈCES
Commune de Nay.	Loppe Béarne.	Gare de Nay.	10	45	A ciel	Découvert : 1500	1500	1500	1500
Commune d'Arros.	Larzac.	Gare de	90	90	à ciel	1500	1500	1500	1500
Commune de Nay.	Pezon.	Gare de	90	70	A ciel	Découvert : 1500	1500	1500	1500
DÉPARTEMENT DES BASSES-PYRÉNÉES									
CARRIÈRES DE PIERRE DE TAILLE									
Commune de Nay.	Loppe Béarne.	Gare de Nay.	50	45	A ciel	Découvert : 1500	1500	1500	1500
Commune d'Arros.	Larzac.	Gare de	90	90	A ciel	Découvert : 1500	1500	1500	1500
Commune de Nay.	Pezon.	Gare de	90	70	A ciel	Découvert : 1500	1500	1500	1500
DÉPARTEMENT DES HAUTES-PYRÉNÉES									
CARRIÈRES DE PIERRE DE TAILLE									
Commune de Nay.	Loppe Béarne.	Gare de Nay.	50	45	A ciel	Découvert : 1500	1500	1500	1500
Commune d'Arros.	Larzac.	Gare de	90	90	A ciel	Découvert : 1500	1500	1500	1500
Commune de Nay.	Pezon.	Gare de	90	70	A ciel	Découvert : 1500	1500	1500	1500

## maçonneries

Pierre

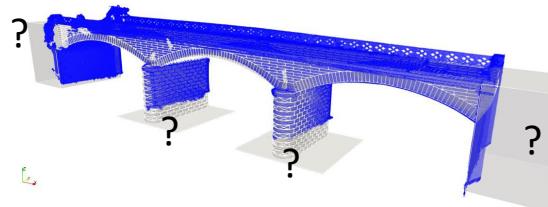
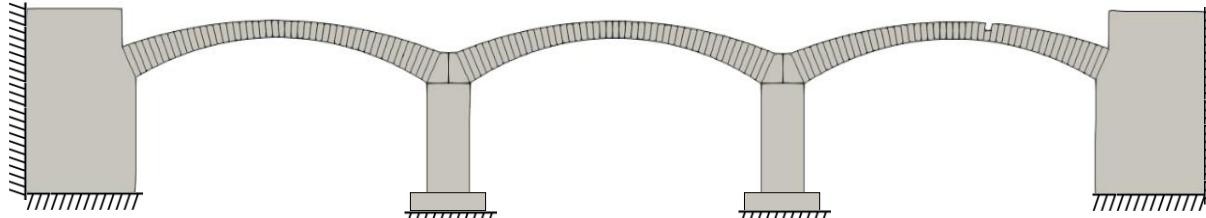
joints

- Corps de Voûte
- Queutage
- Piles
- Tympons
- Culées



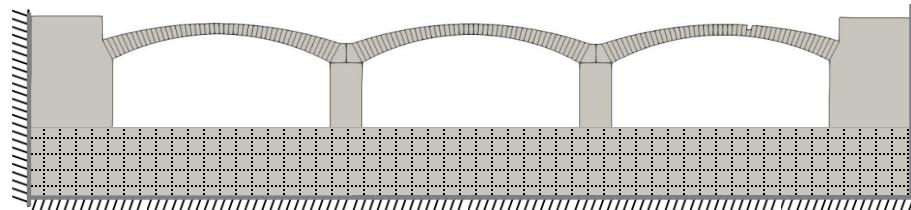
Remblai ?

- Matériaux
- Modélisation  
(masse, poussée, ...)

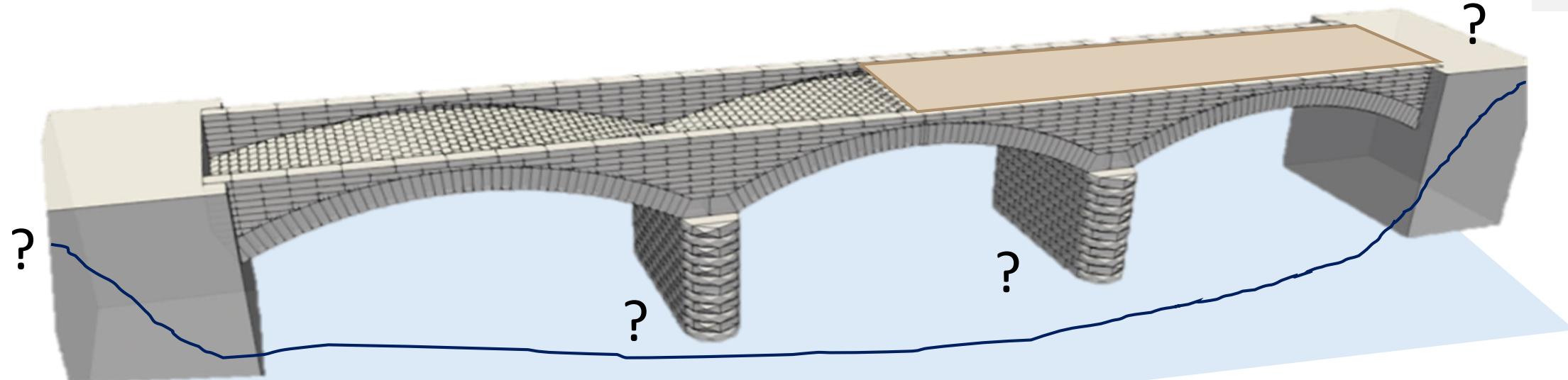


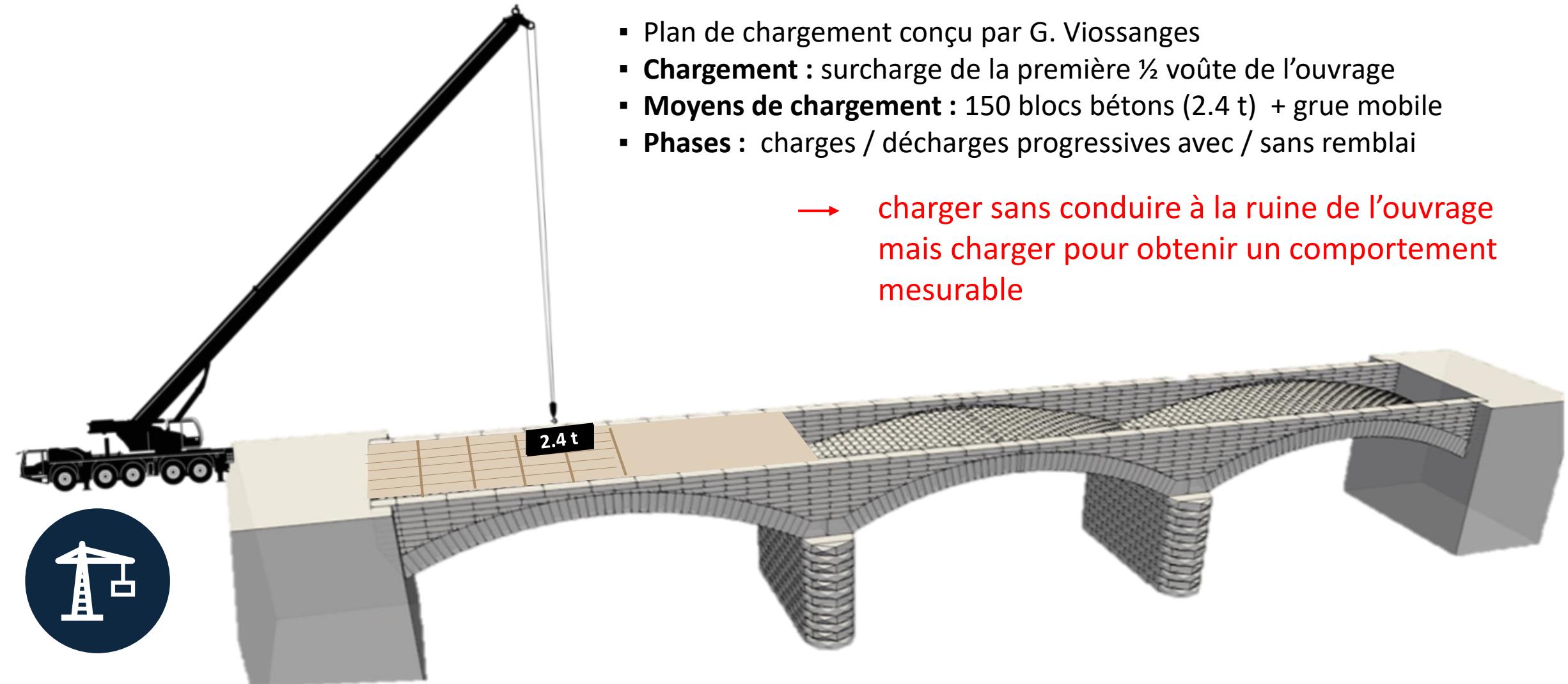
- Sondages
- Mesures

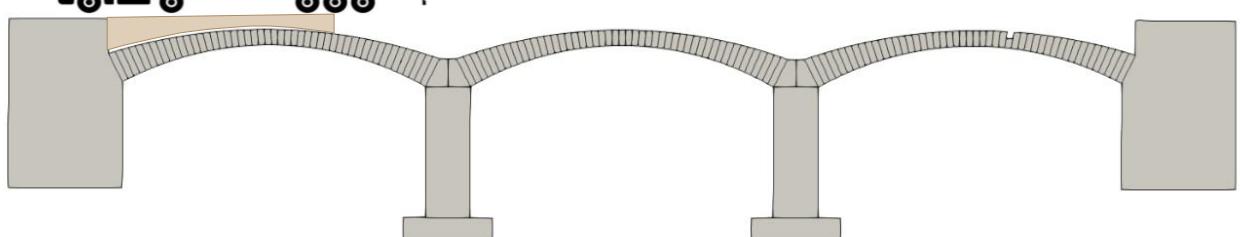
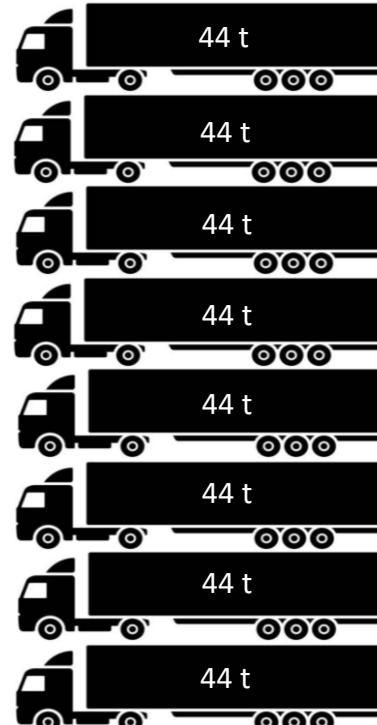
Interaction sol-  
structure ?



Encastrement des piles  
et des culées



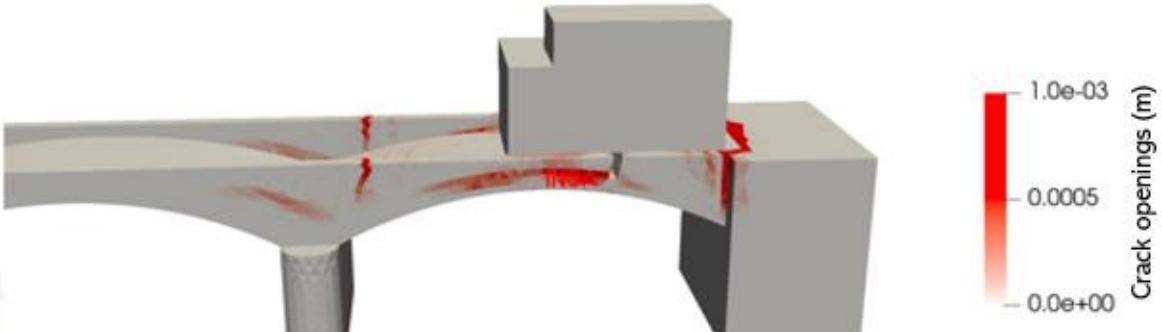
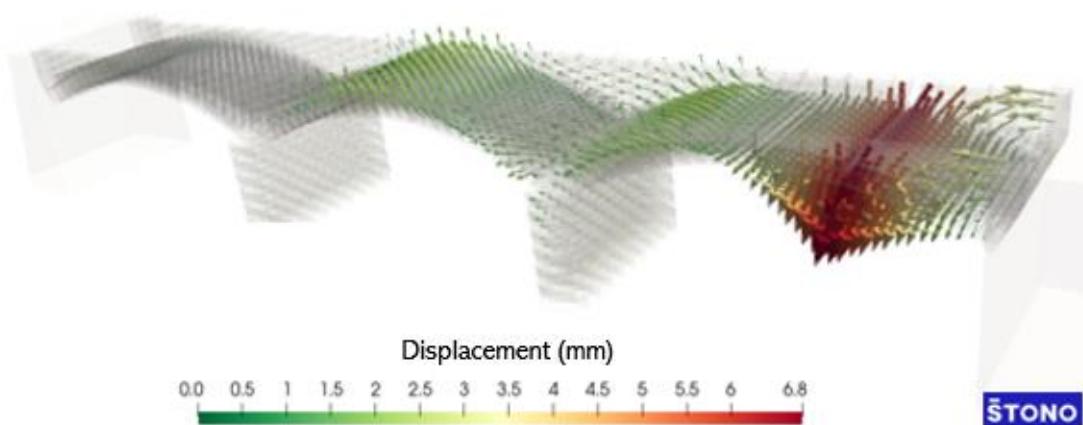




- Plan de chargement conçu par G. Viossanges
  - **Changement** : surcharge de la première  $\frac{1}{2}$  voûte de l'ouvrage
  - **Moyens de chargement** : 150 blocs bétons (2.4 t) + grue mobile
  - **Phases** : charges / décharges progressives avec / sans remblai
- charger sans conduire à la ruine de l'ouvrage  
mais pour obtenir un comportement non linéaire

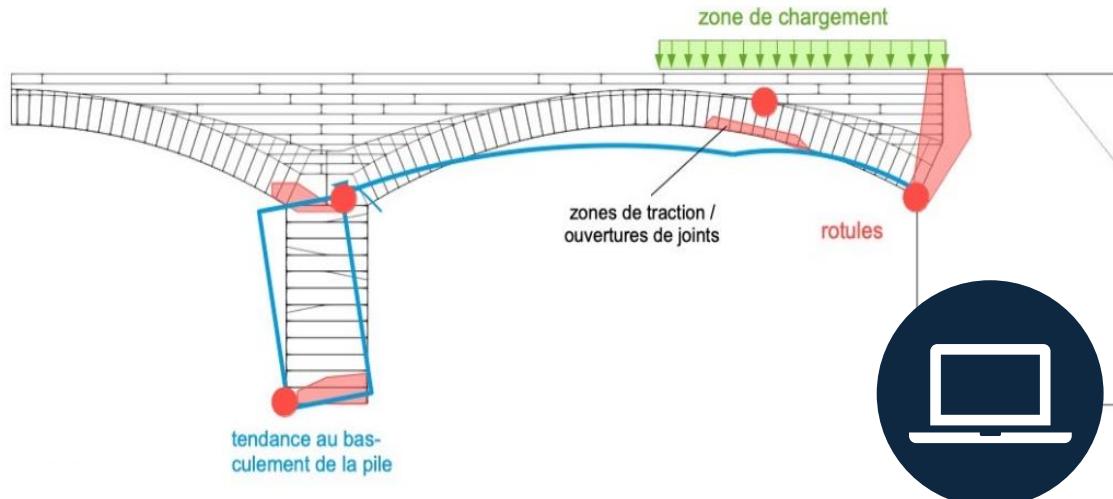


- valider le plan de chargement
- contribuer au plan d'instrumentation



## Résultats

- Ruine par basculement de la pile P1 sous 13-15 niveaux de blocs
- **Affaiblissement** du pont par réalisation d'une **saignée** au droit de la zone de rotule du pont + **décaissement** voûtes → **plan chargement**
- Préconisations → **plan instrumentation**





- Prismes EST topographie (implantation symétrique à l'OUEST) visés par théodolites 

- ◆ Inclinomètres EST (implantation symétrique à l'OUEST)

- ▲ Fissuromètres
- Fibre Optique

- △ Corrélation d'image
- △ Capture motion

-  Vélocimètres



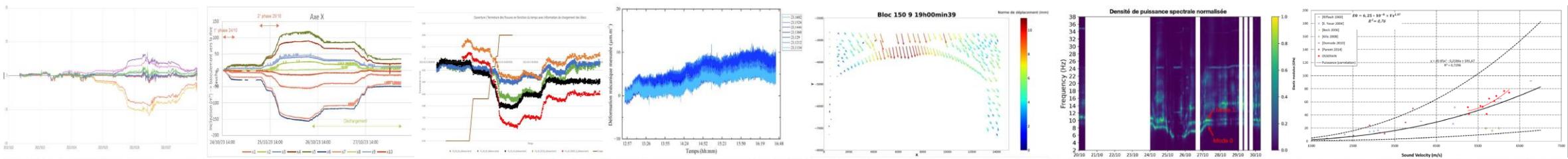
- Décaissement des voûtes
- Réalisation d'une saignée au droit de la zone de rotulage
- Phasage : un cycle de charge / décharge sur 2 jours
- Pose des blocs sur une  $\frac{1}{2}$  travée
- 4 niveaux +  $2 \frac{1}{2}$  niveaux

→ **Surdimensionnement de l'ouvrage / pont très résistant**

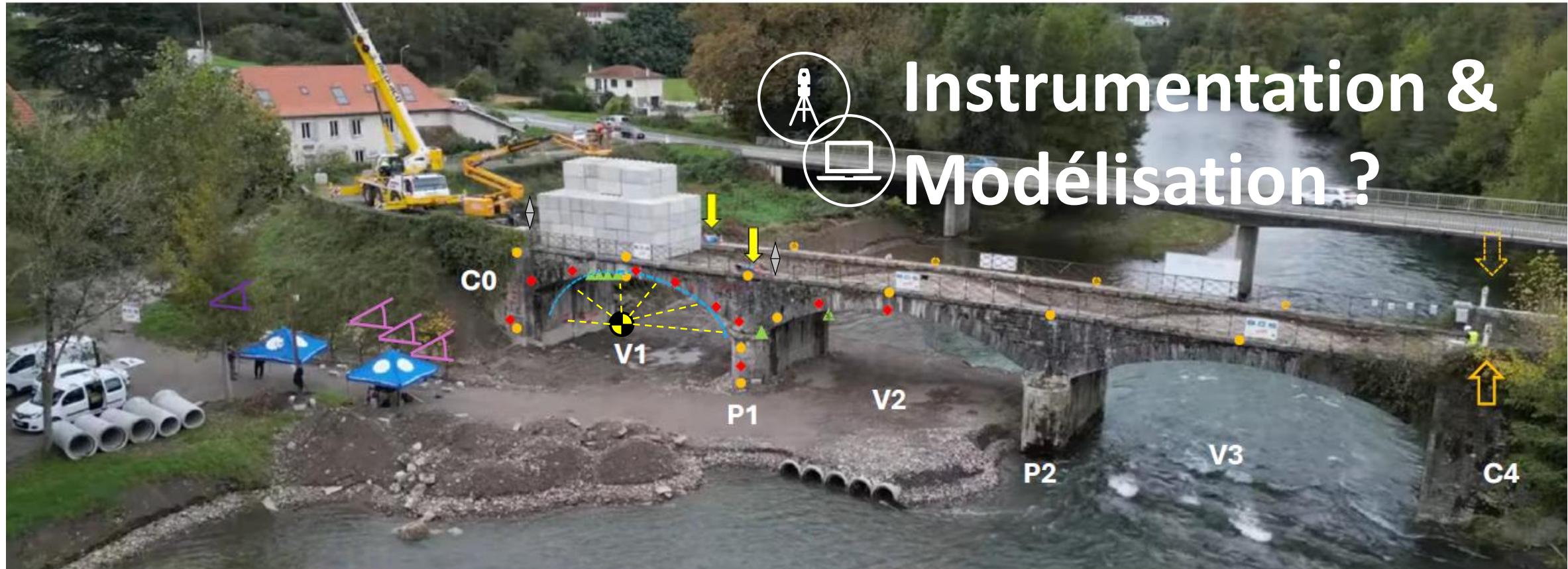




# Post-diction



# Instrumentation & Modélisation ?



- Prismes EST topographie (implantation symétrique à l'OUEST) visés par théodolites

- Inclinomètres EST (implantation symétrique à l'OUEST)
- Essais de sol

- Fissuromètres
- Fibre Optique

- Corrélation d'image
- Capture motion

- Vélocimètres
- Mesures Vitesse Son & caractérisation labo

## PHASE 1: PREDICTION

Géométrie & maillages basés sur mesures sur site & point cloud



Géométrie & maillages basés sur mesures sur site & point cloud

Propriétés des matériaux issues de la littérature



Propriétés des matériaux issues de tests ND & destructifs complétés par la littérature



Conditions aux limites basées sur les observations in situ



Conditions aux limites basées sur l'analyse des réponses

Analyse des différents plans de chargement



Application du chargement réel

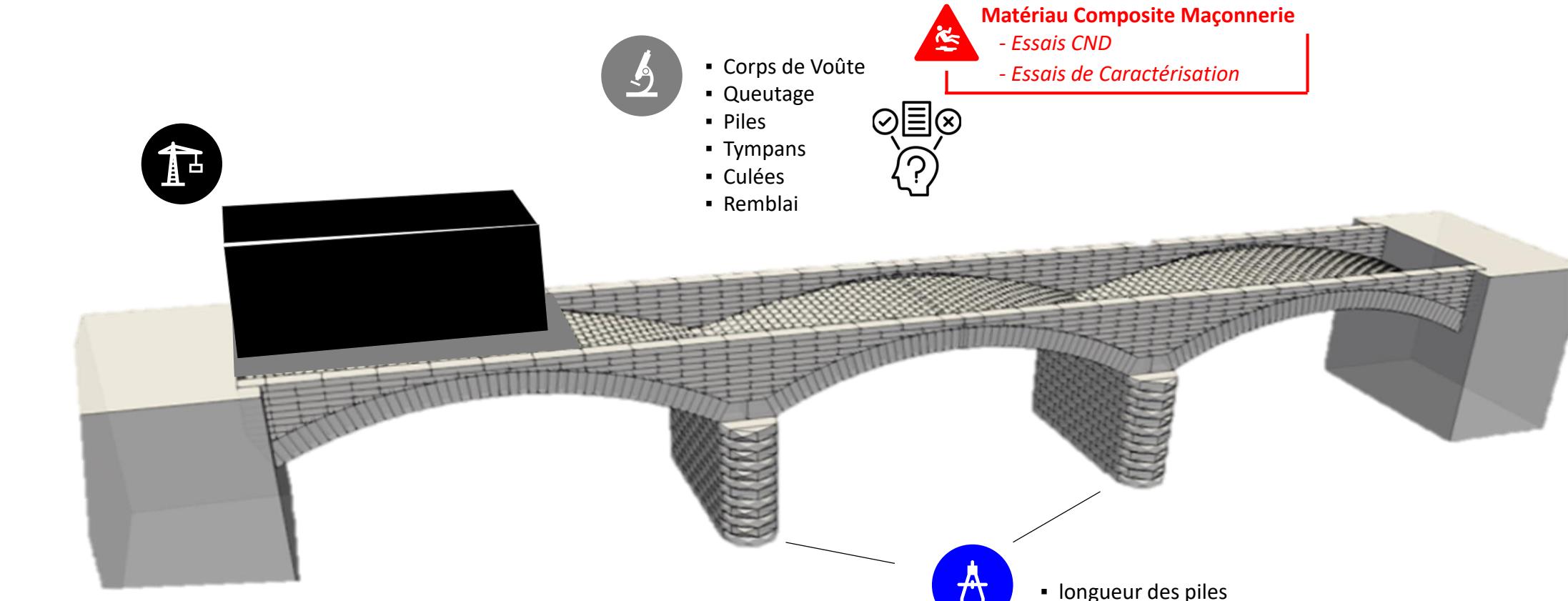
Analyse du fonctionnement de l'ouvrage et de la charge ultime



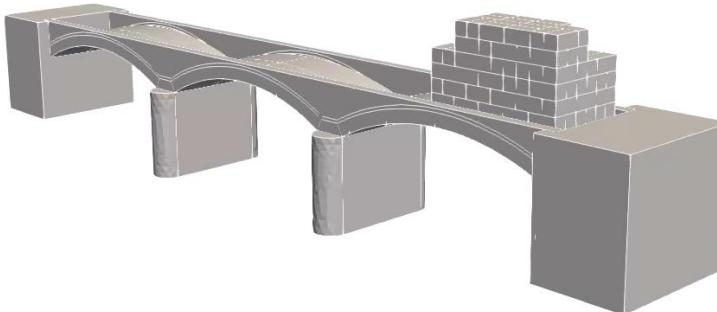
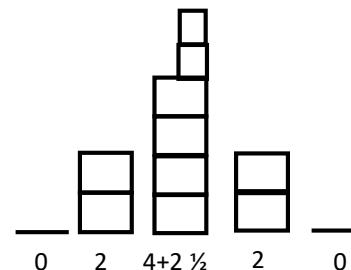
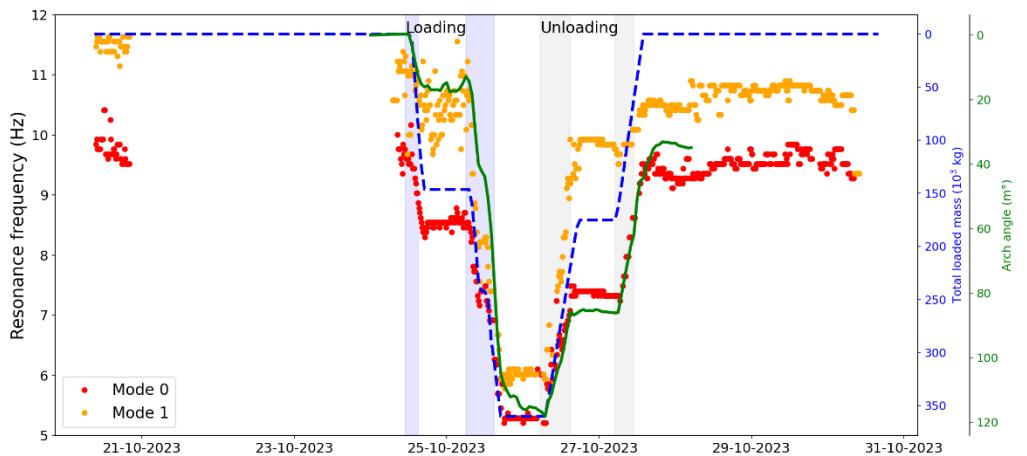
Analyse du comportement et comparaison avec les mesures

## PHASE 2: POSTDICTION





→ Nature des investigations menées au cas par cas sur la base des possibilités des approches de modélisation mises en œuvre



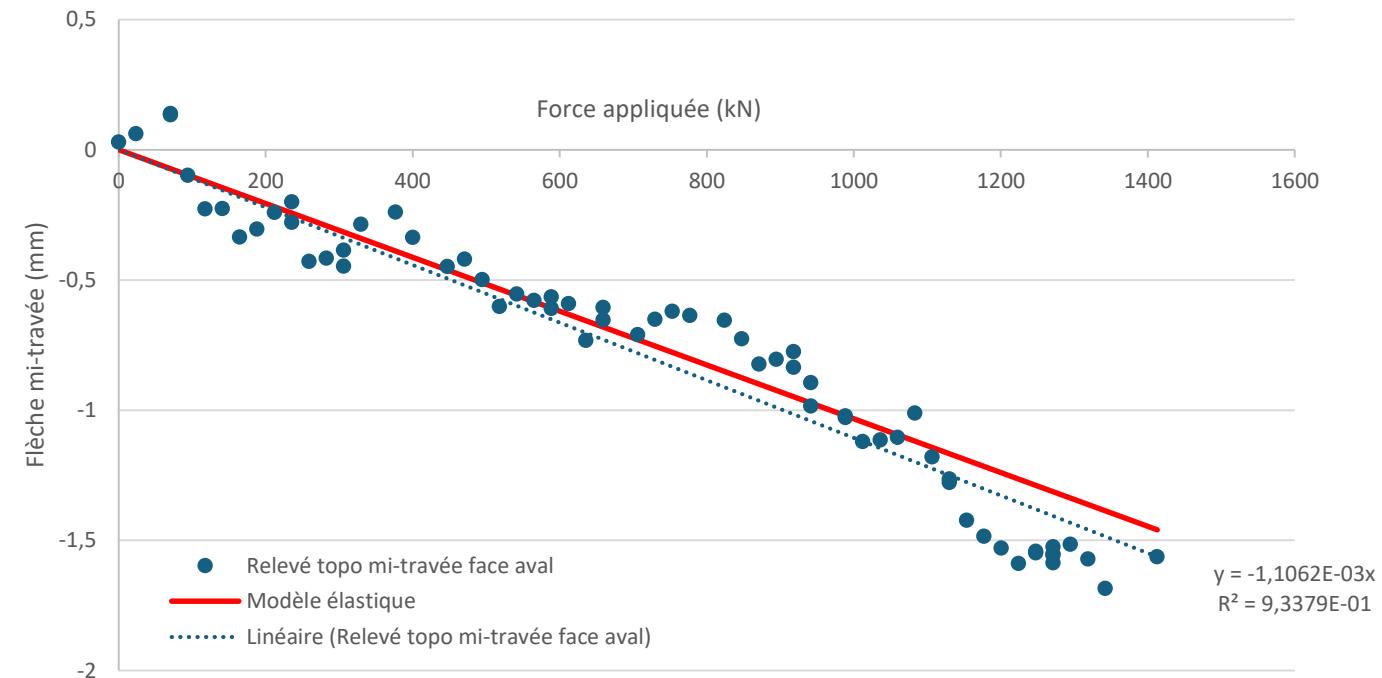
## → Calibration du module d'élasticité à 4.8 Gpa (modèle élastique)



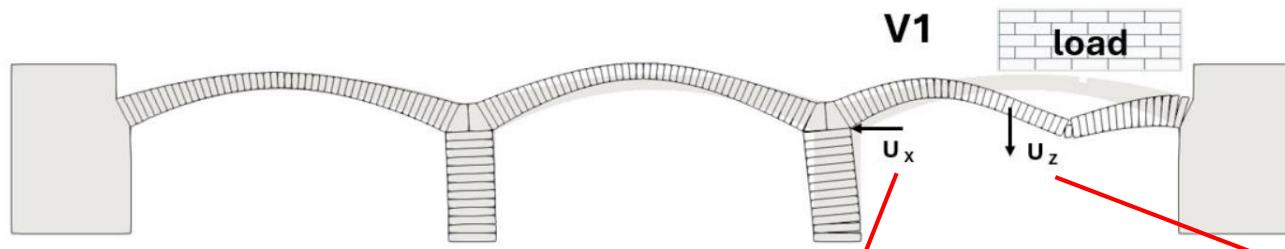
## *6 premiers modes propres*

**Validation** par comparaison de la flèche à mi-travée  
lors du chargement des premiers blocs de béton

- Erreur de seulement 7% sur la **raideur apparente**
- La méthode donne des résultats très satisfaisants

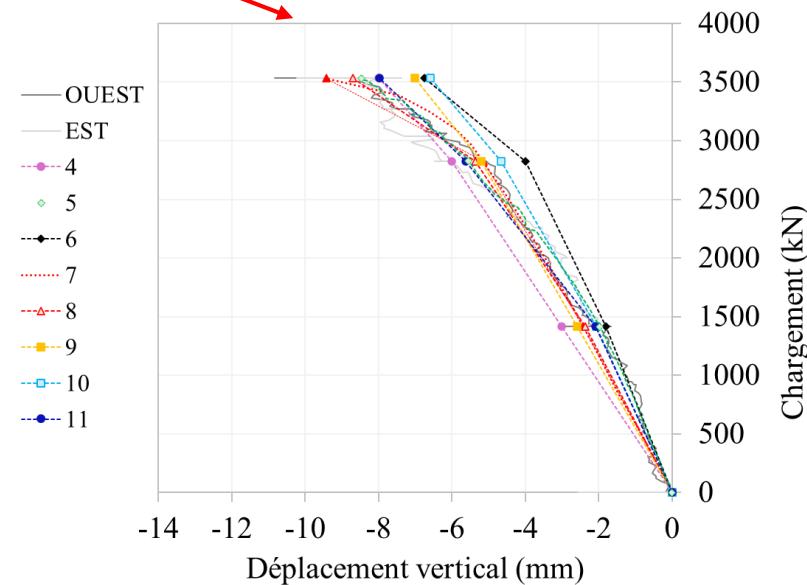
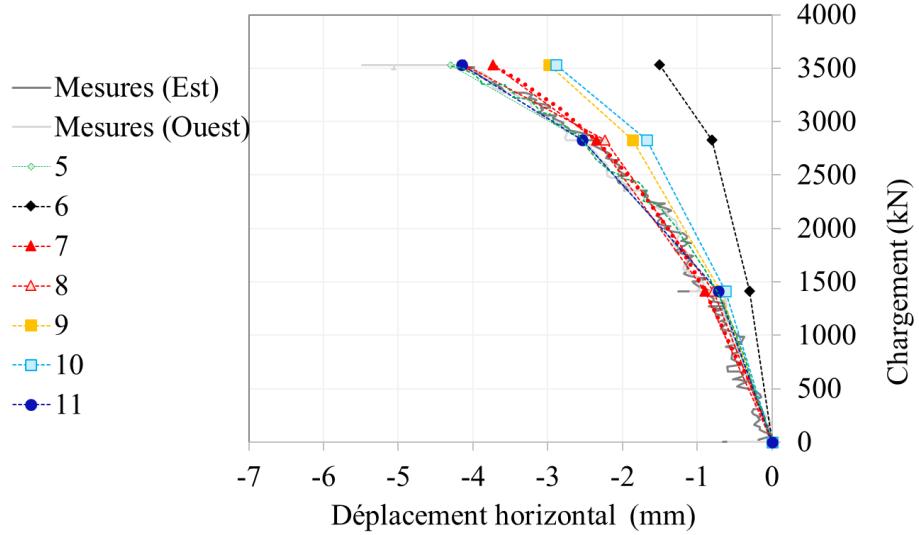


# Comparaison avec les mesures



## Ajustements :

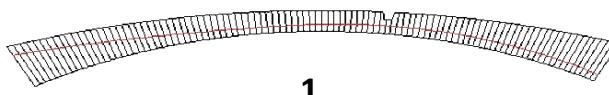
- Propriétés Maçonneries
- Conditions aux Limites



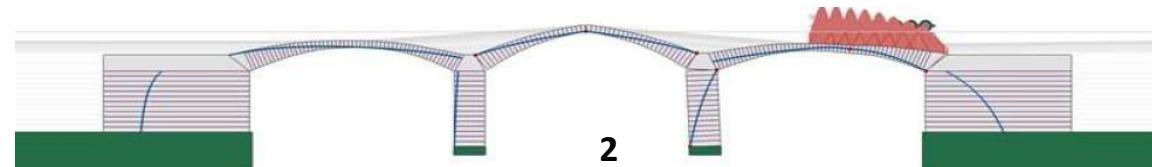
# Résultats des différents modèles

SETRA  
ROUTE 1.0  
CHARGEMENT 6 NIVEAUX INCOMPLETS

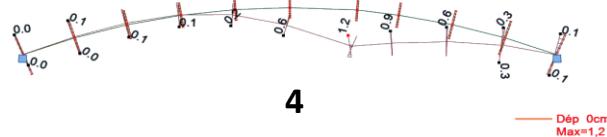
OSSERAIN ENGRAUURE CHARG 2 4 6 NIVEAUX  
DOUILLE 45CM 12MPA QUETTAGE 12MPA  
LIGNE OPTIMALE TRACTION-COMPRESSION



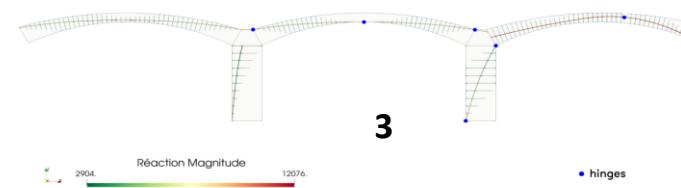
1



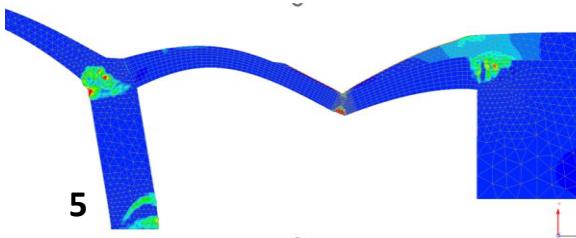
2



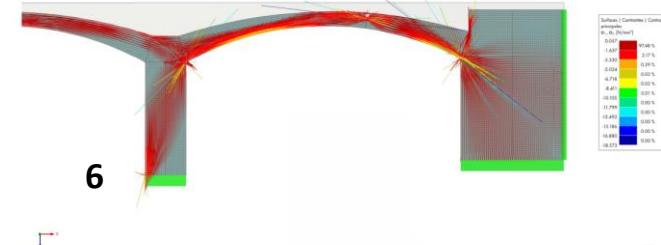
4



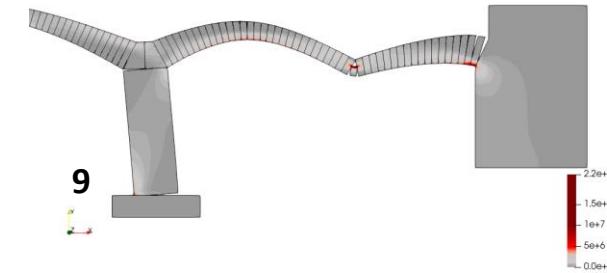
3



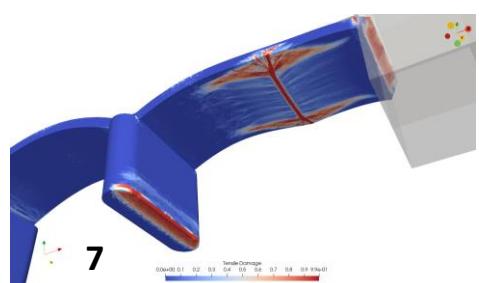
5



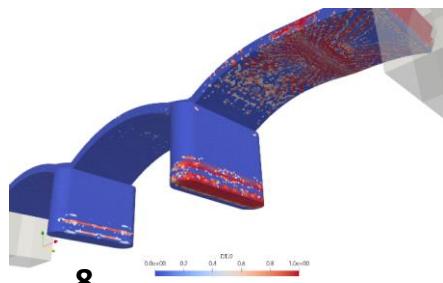
6



9



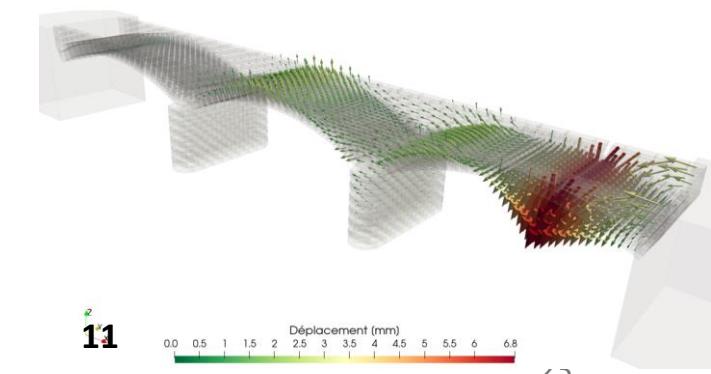
7



8

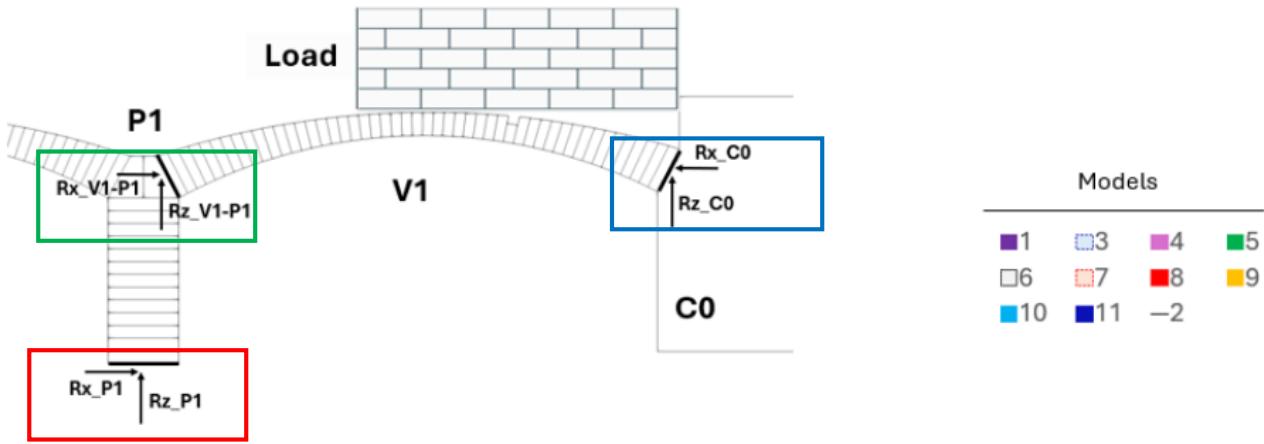


10



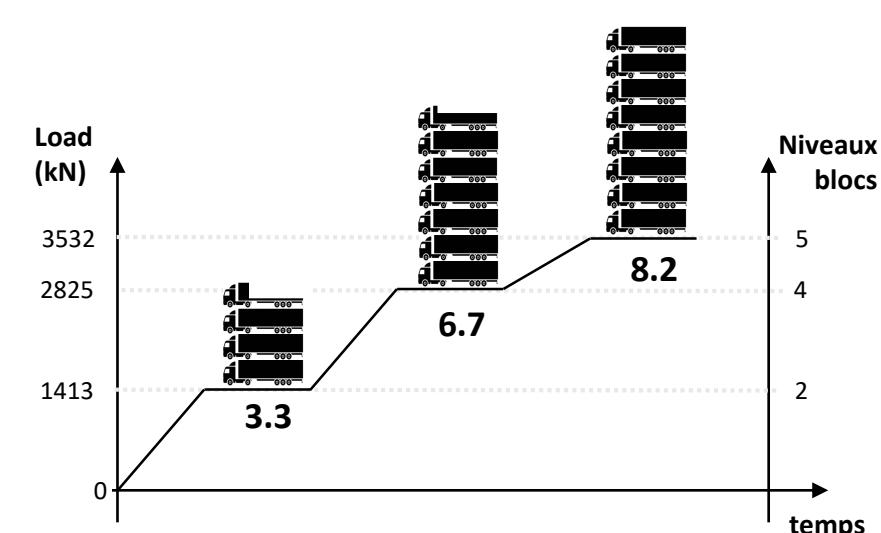
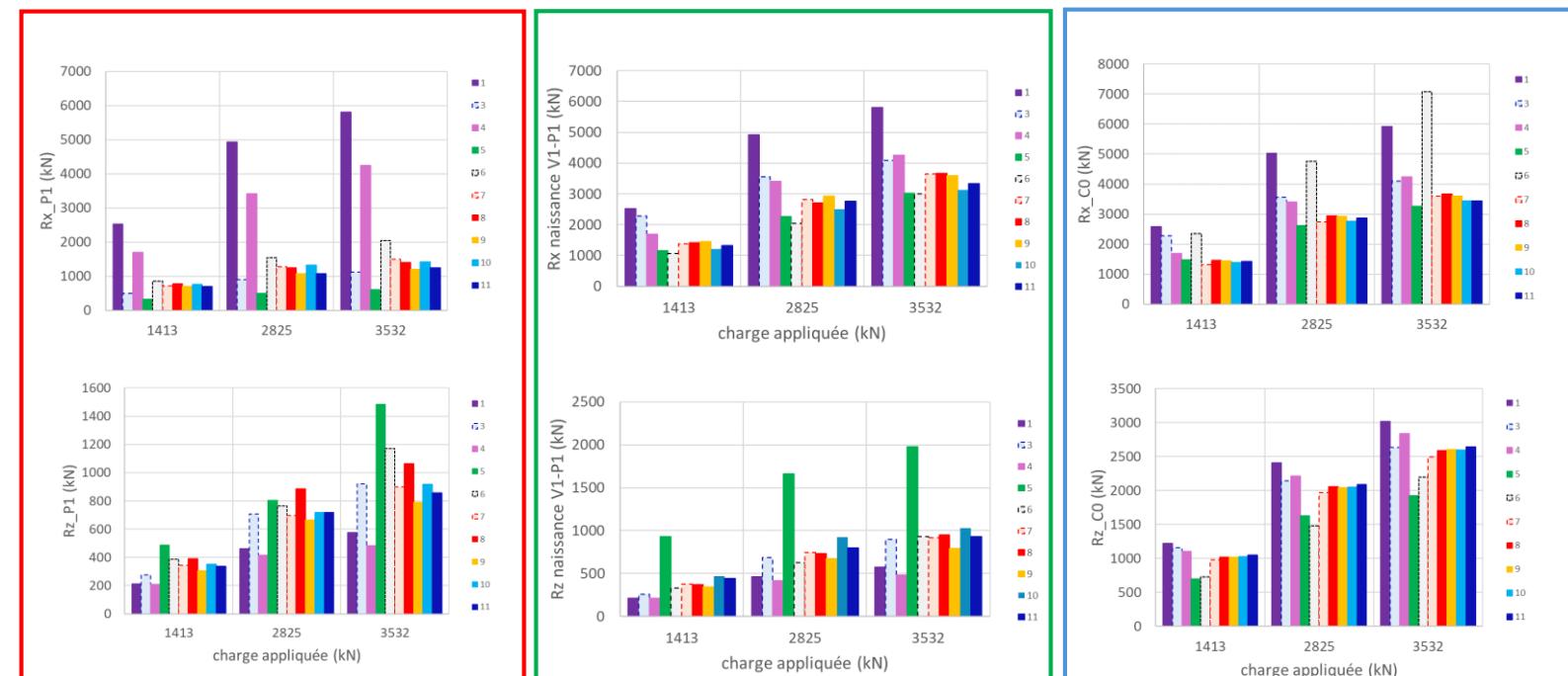
11

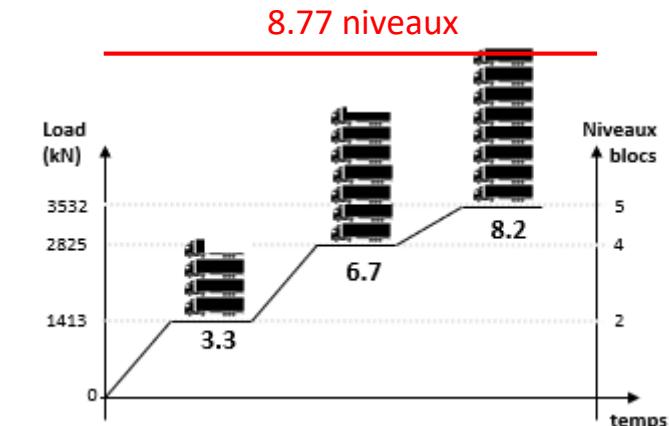
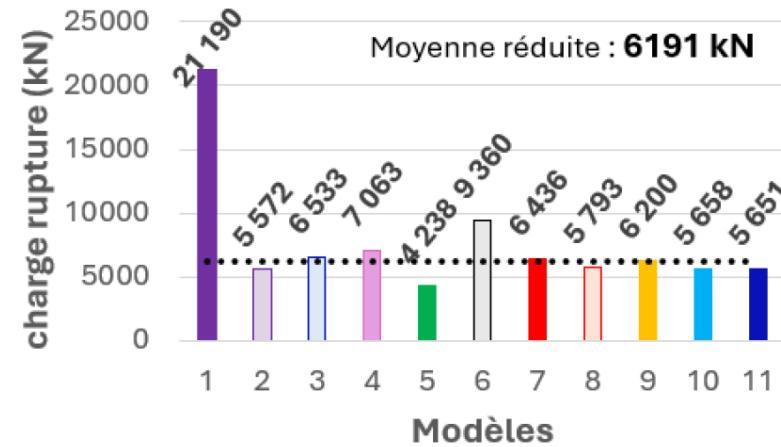
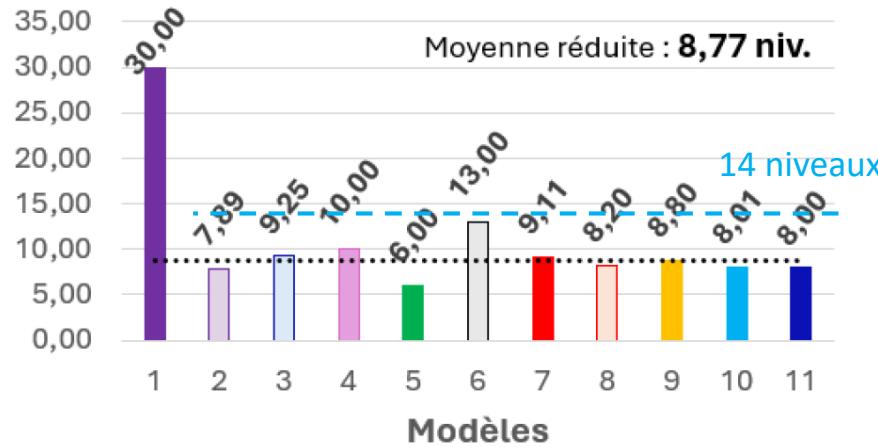
# Comparaison entre modélisations



## Ajustements :

- Propriétés Maçonneries
- Conditions aux Limites

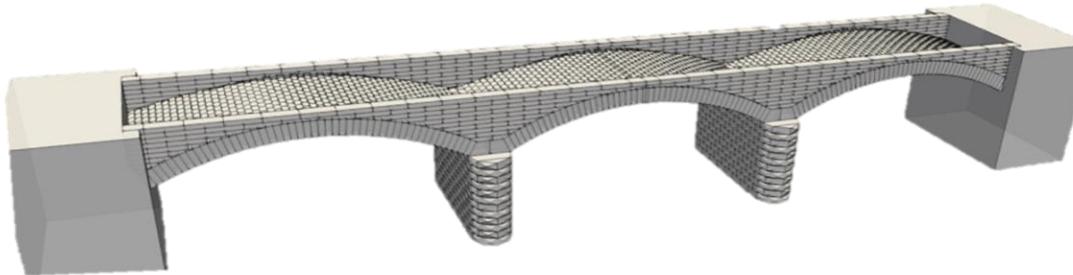




- **Niveaux de blocs à la rupture :**  
13-15 niveaux (phase de prédition) contre près de 9 en phase de post-diction
- **Rupture ?**  
critère cinématique ? niveau de décompression des joints ? critère de contrainte ? etc

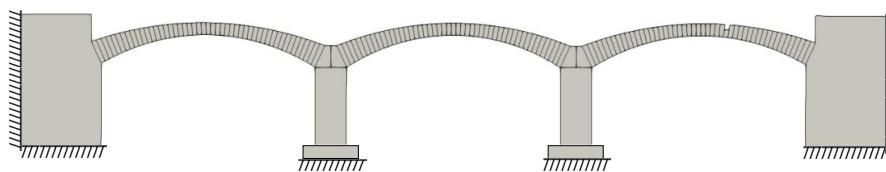
**Modèle 3D** : Prise en compte du bandeau (non scié)

*Module d'élasticité maçonnerie homogénéisée entre 8 et 10 GPa*



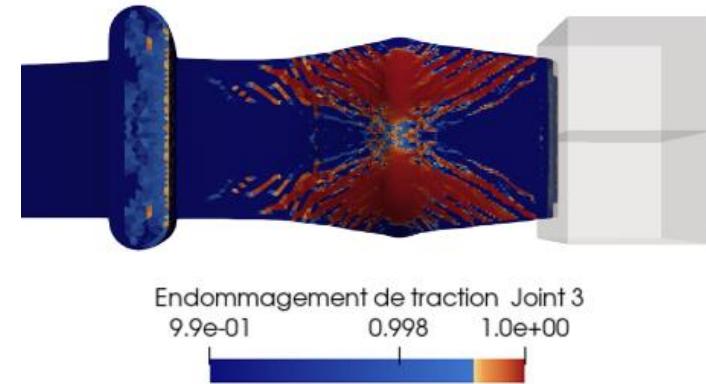
**Modèle 2D** : section médiane (équivalent bandeau scié)

*Module d'élasticité maçonnerie homogénéisée entre 15 et 20 GPa*

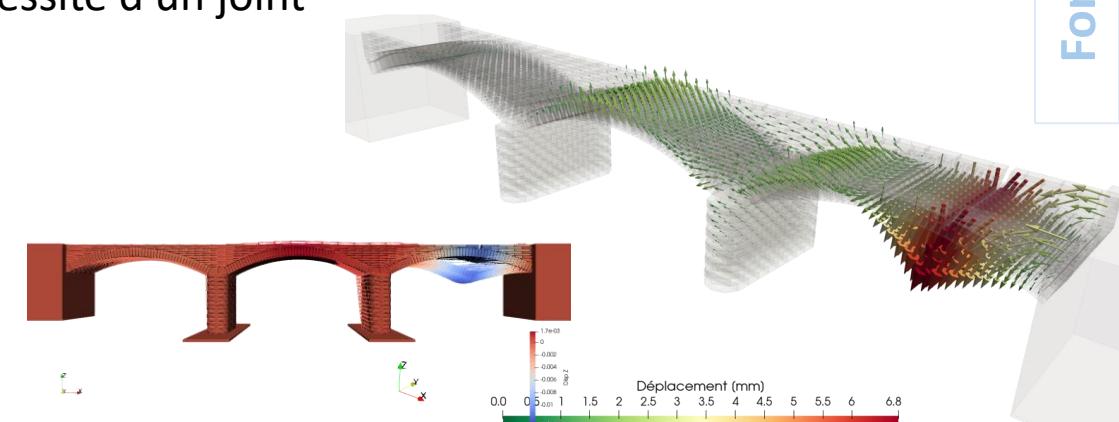


**Module d'élasticité**

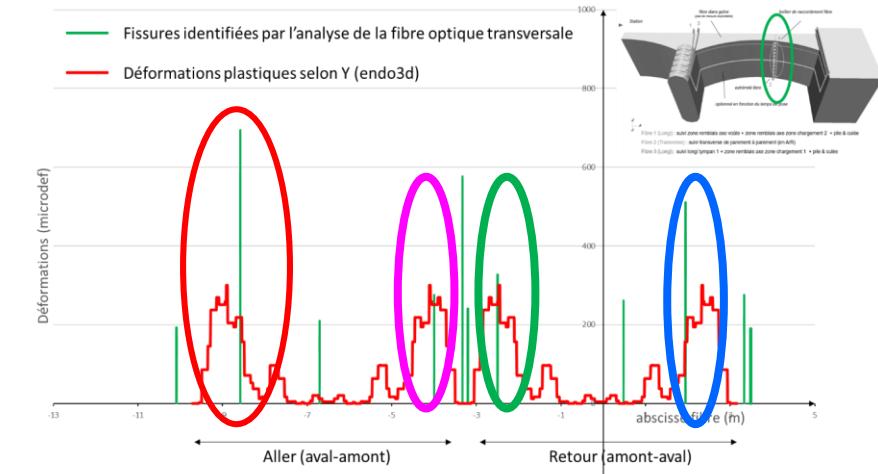
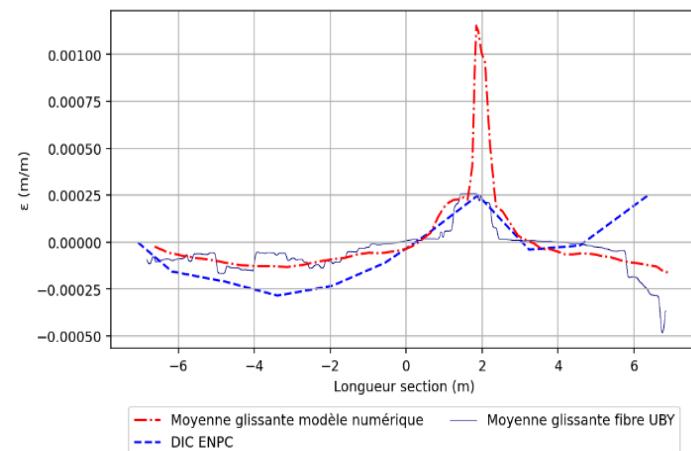
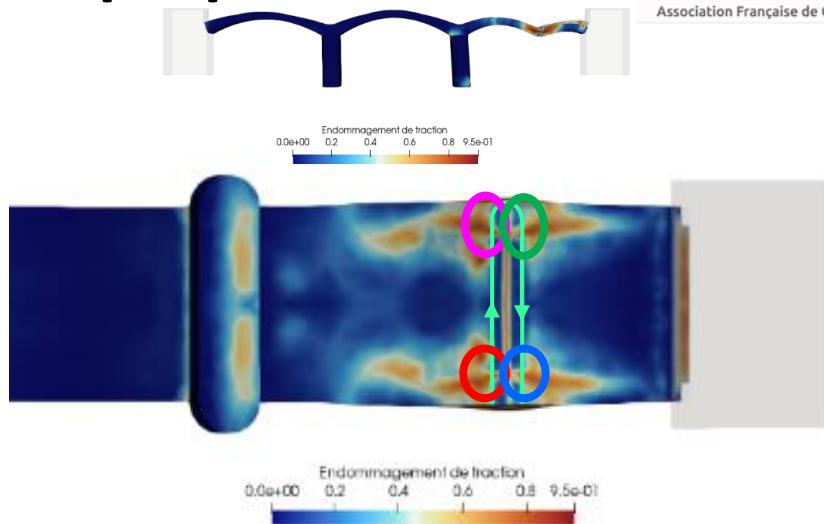
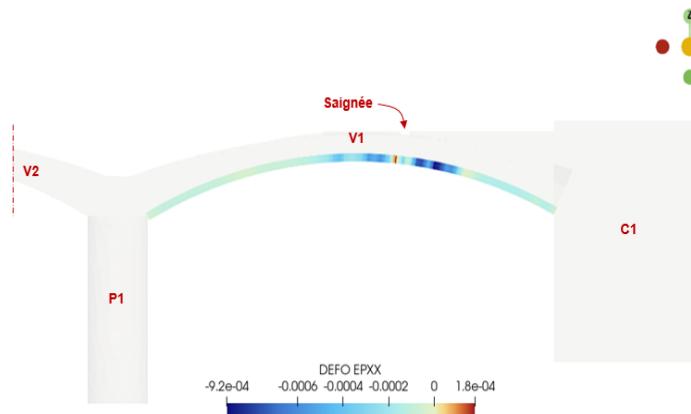
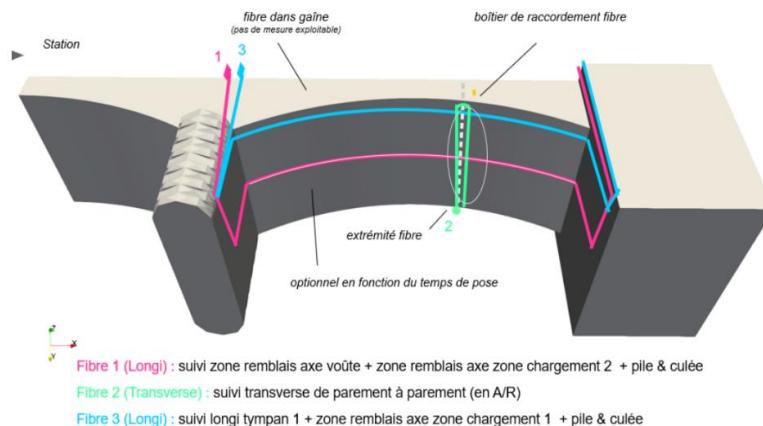
**Fissuration biaise non évaluée par les modèles 2D**



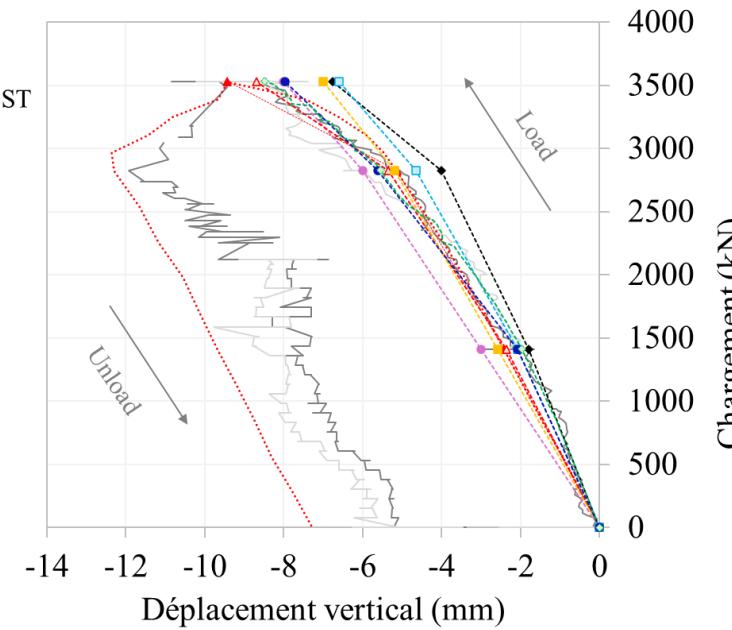
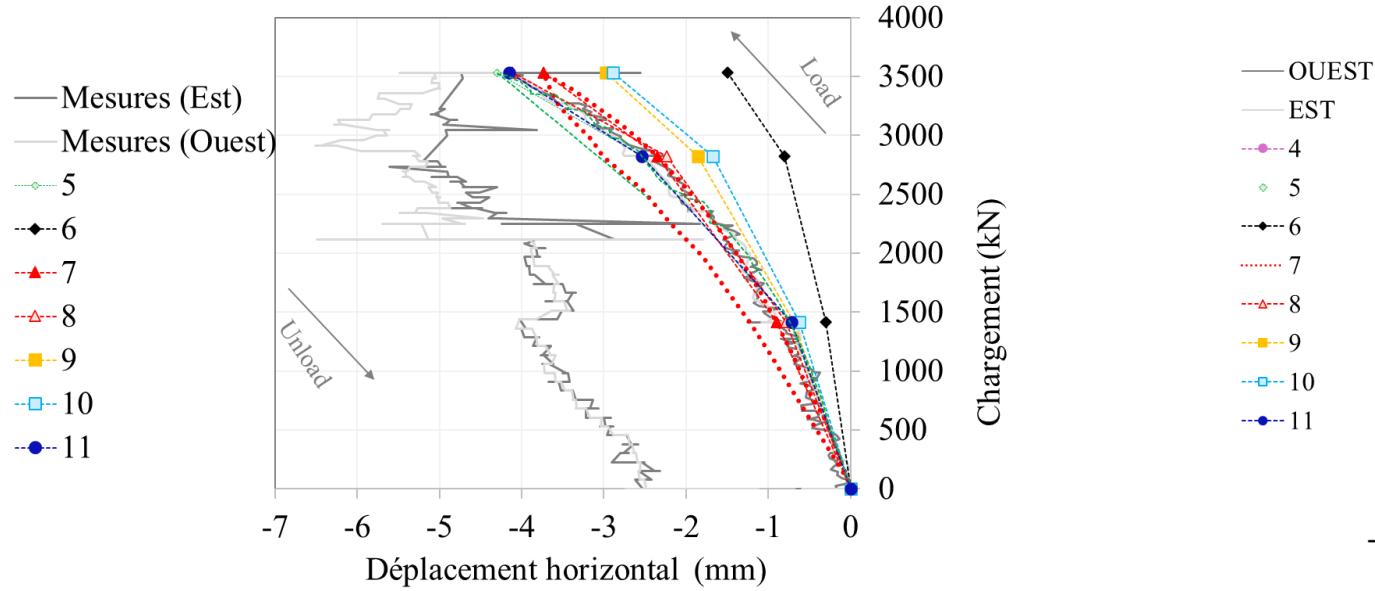
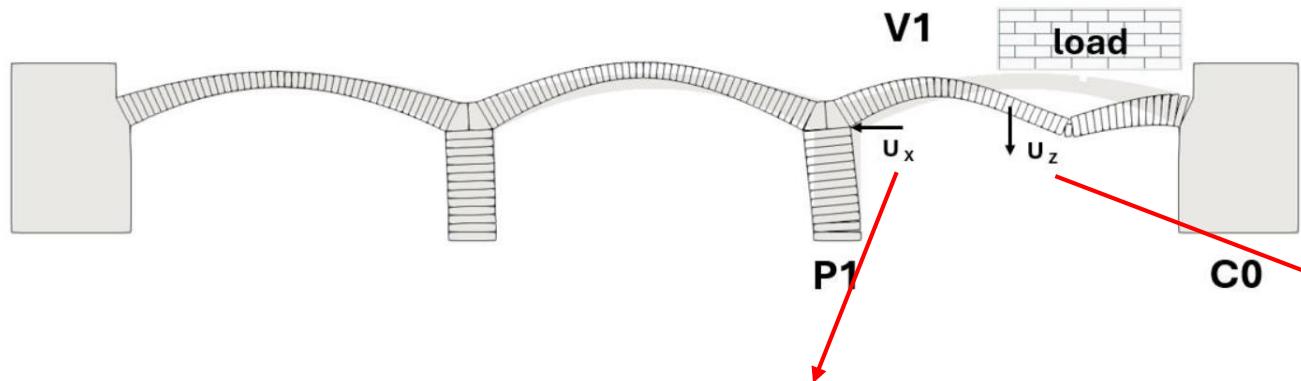
Effet du **mur tympan** sur la raideur : nécessité d'un joint



# Pour aller plus loin : comparaison avec la fibre optique



# Pour aller plus loin : la décharge

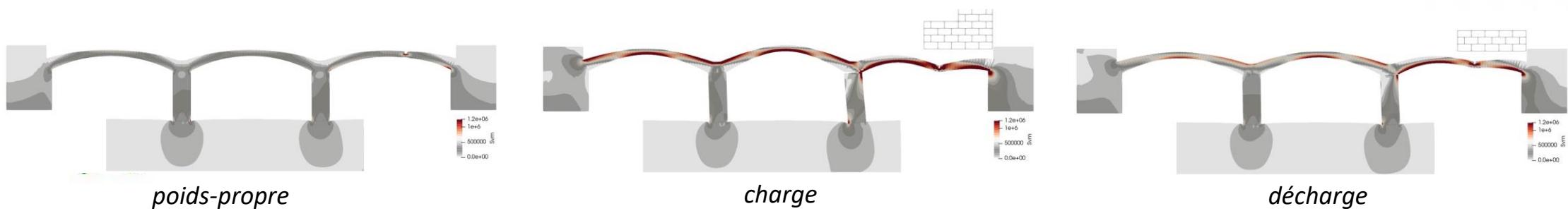
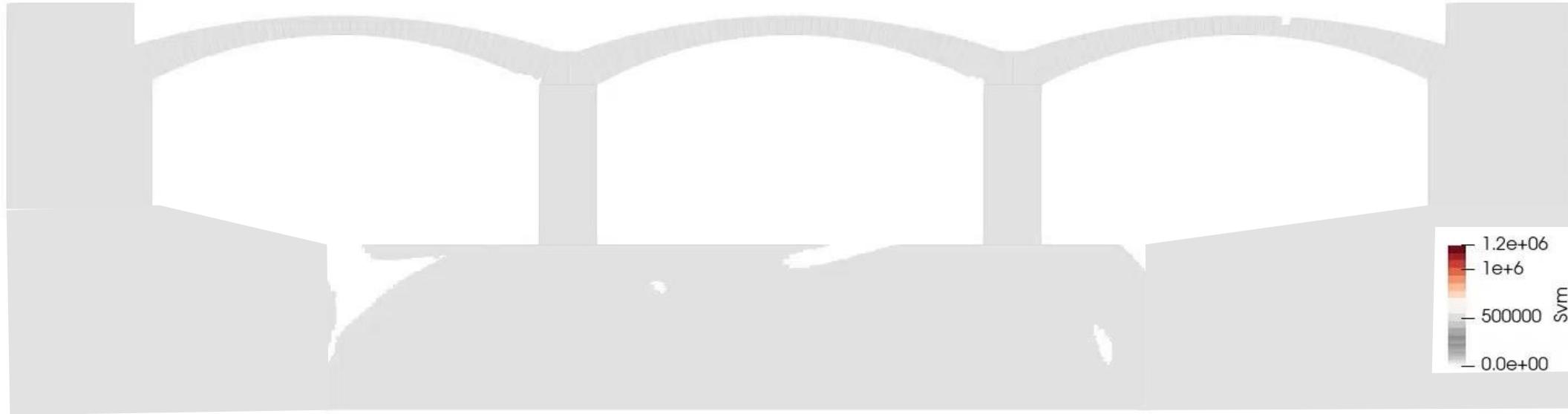


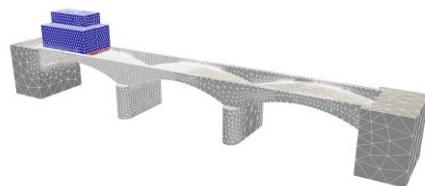
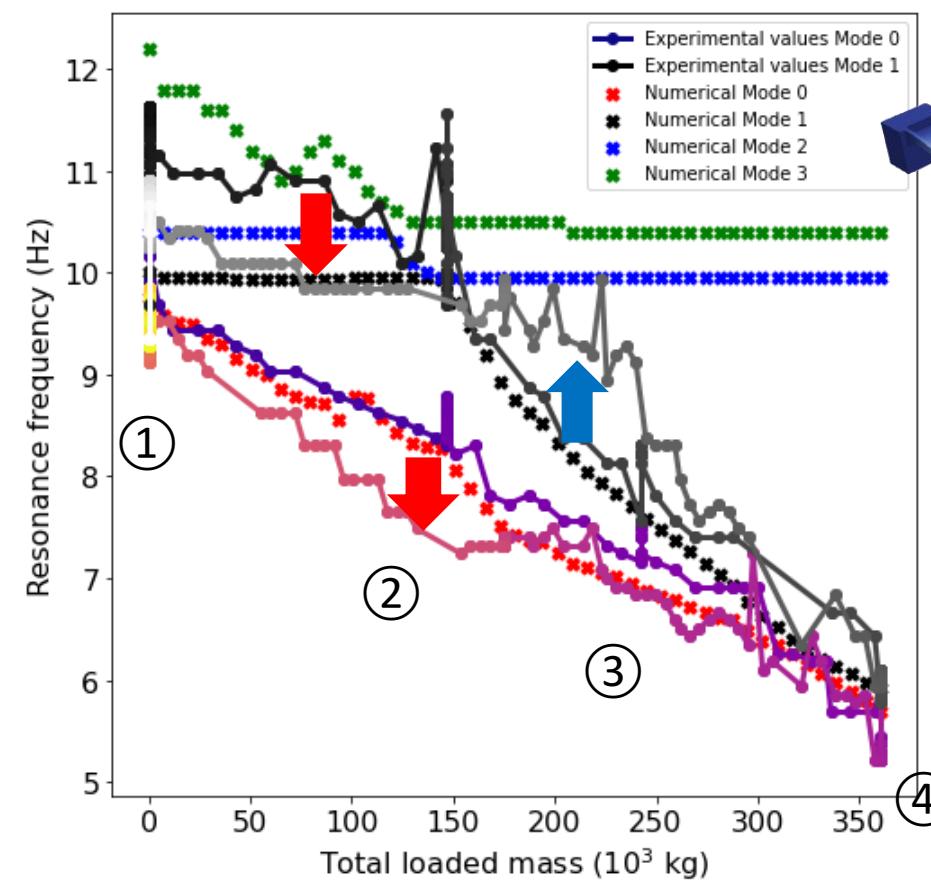
## Ajustements :

- Propriétés Maçonneries
- Conditions aux Limites

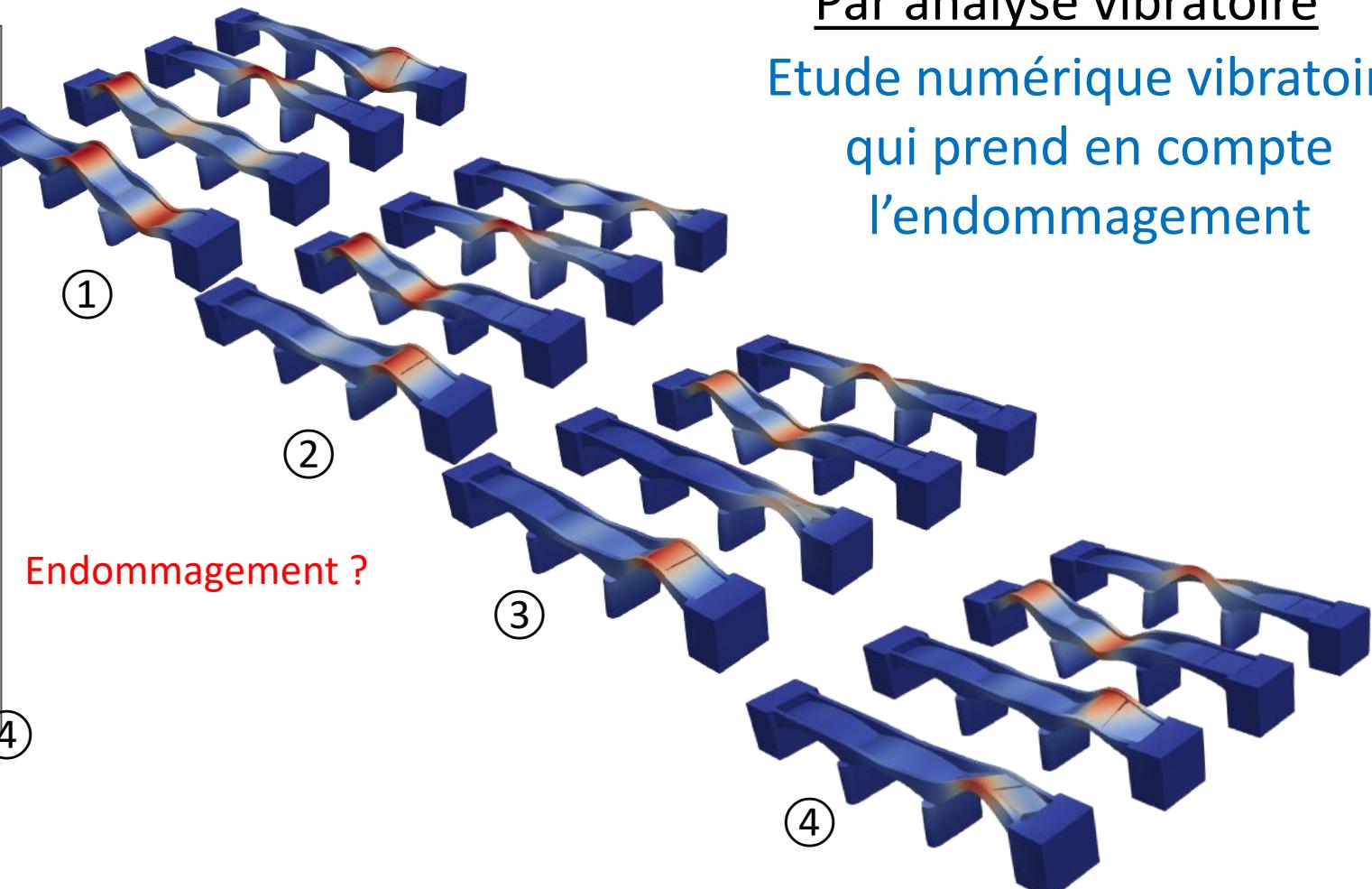


## Prise en compte du sol dans le modèle





INSA de Toulouse – Restitution du chantier démonstrateur  
d'Osserain – 22 Janvier 2026



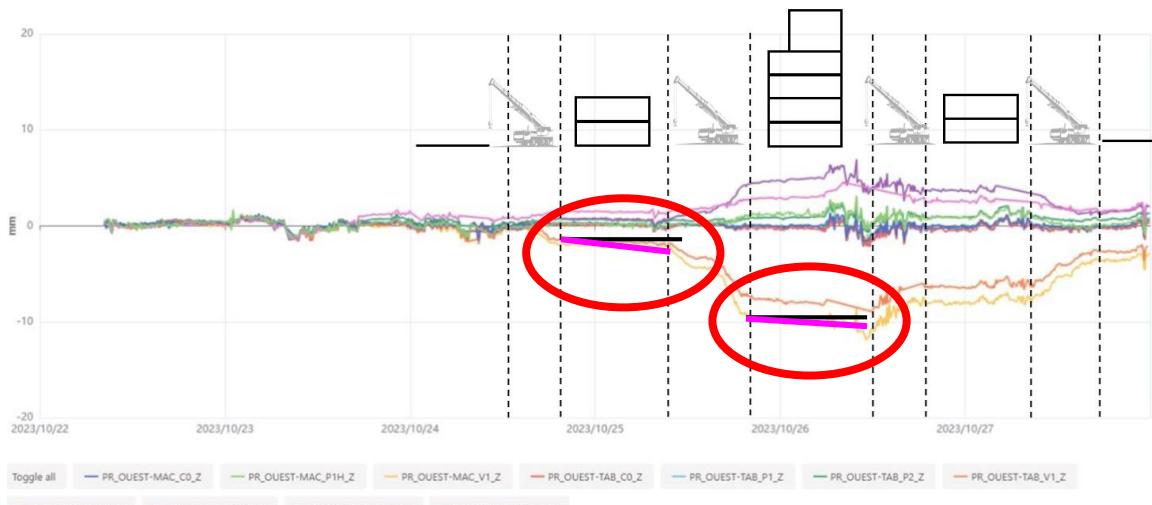
Par analyse vibratoire

Etude numérique vibratoire  
qui prend en compte  
l'endommagement

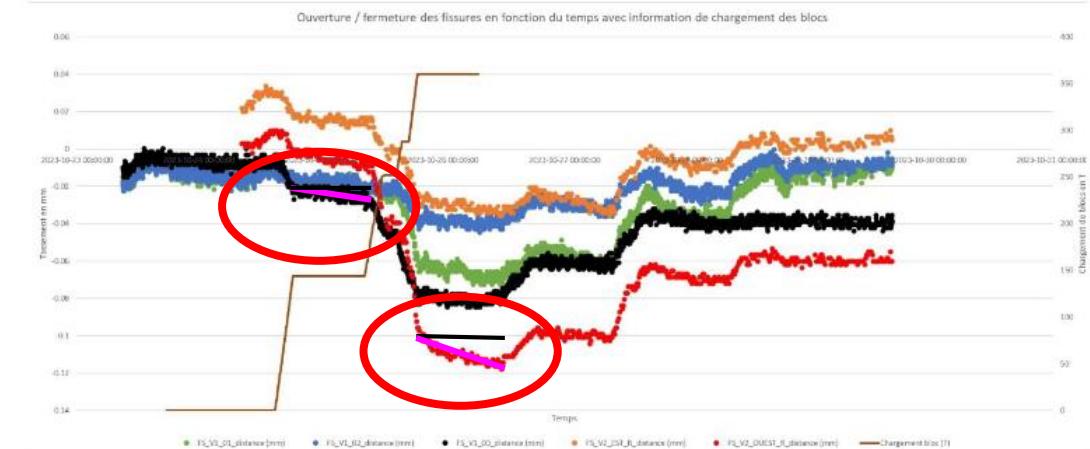
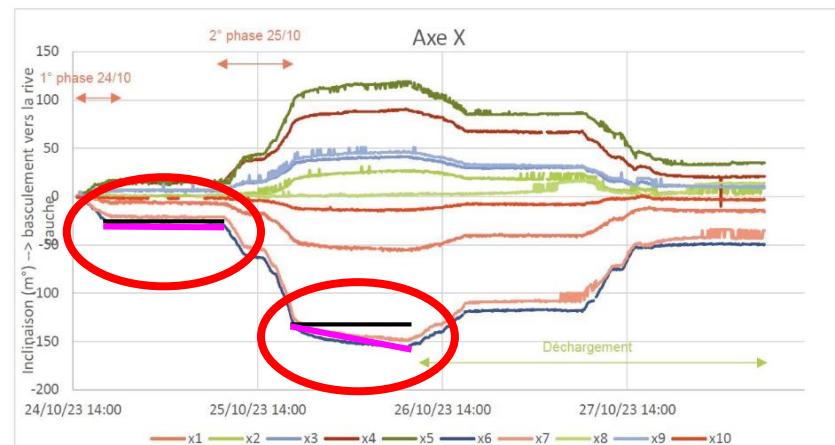
# Pour aller plus loin : déplacements vs endommagement

## Prise en compte du fluage et de la température

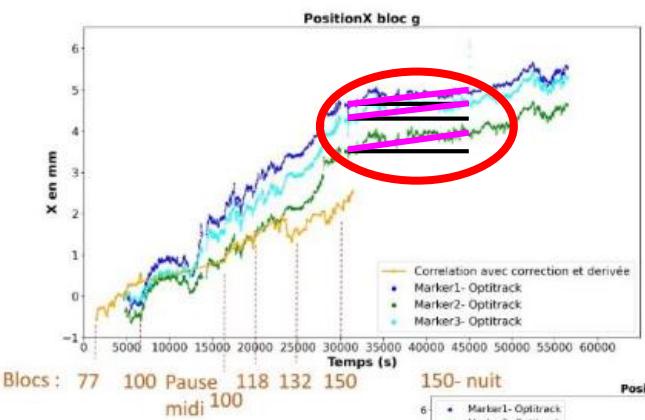
### Fissuromètres



### Mesures topo



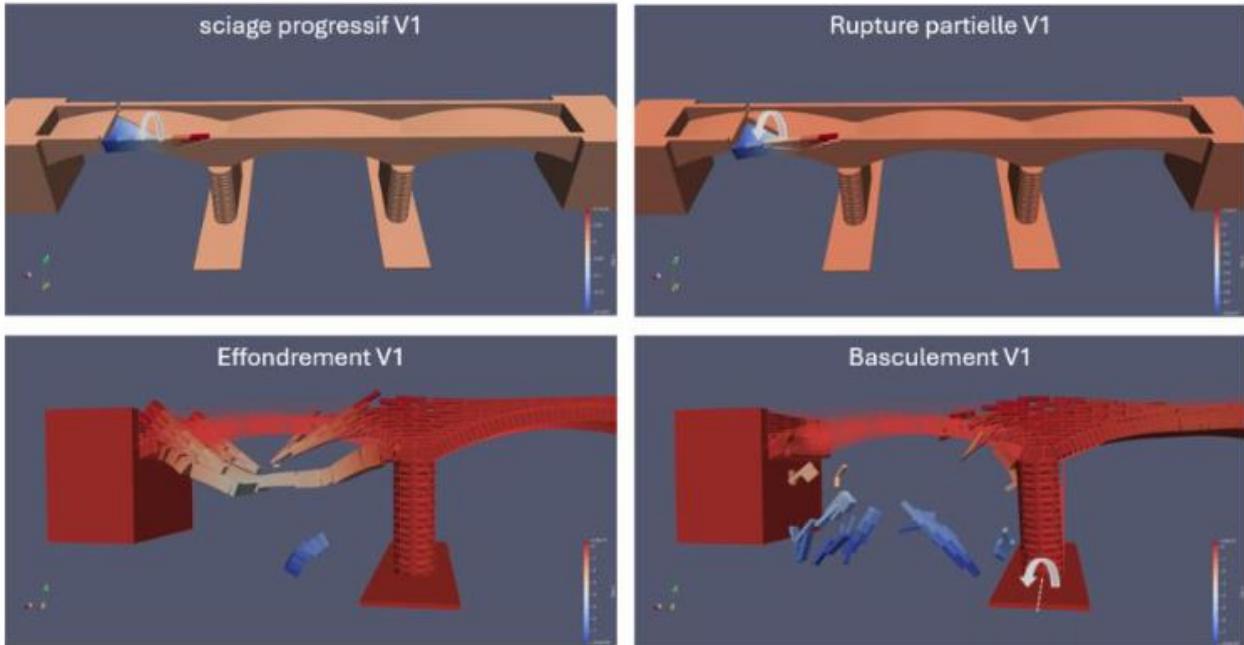
### Optitrack



Fluage du mortier comprimé ?

# Pour aller plus loin : phase de démolition

## Modélisation de la ruine de l'ouvrage



Des faciès de ruptures **comparables**

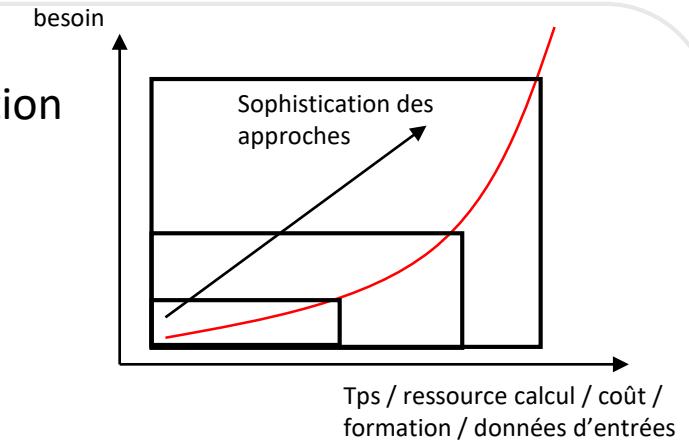
Type d'approche permettant de modéliser les structures jusqu'à leur **ruine**

## *Quid de l'approche de modélisation miracle ?*

**Elle n'existe pas.** Il faut accepter le fait qu'il y ait différentes approches de modélisation avec leurs forces, leurs faiblesses et surtout leurs limites, d'une part et qu'il y ait des experts sur ces approches susceptibles de les exploiter au mieux

→ **Choix de la méthode : équilibre besoin / finalité de l'étude vs moyens à disposition (données, temps, €, etc)**

→ **Approches les + avancées : possibilité d'investiguer un espace paramétrique complexe susceptible d'évoluer** en fonction des **besoins de représentativité**



## *Quelle stratégie adoptée ? solutions tout en un ? multi-approches ?*

→ **on ne remplacera pas l'expertise sur les outils**

→ **Plateforme tout en 1 : OUI** pour faire découvrir d'autres approches [PN Dolmen / Axe 2 – F. Dubois] **mais NON** pour une utilisation avancée de ces approches

→ **Bonne connaissance des limites des outils utilisés & curiosité pour les autres approches**

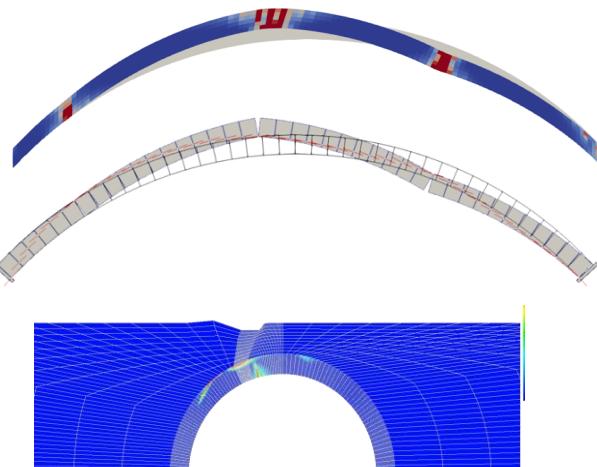
**Peut-on être conclusif sur ce seul benchmark pour évaluer les approches entre elles ?**

**NON :** Osserain reste une structure spécifique (pont massif très surbaissé) avec peu de remblais

*Attendons les conclusions des autres benchmarks du PN pour tâcher de l'être !*

## Prestwood Bridge I & II [P. Morenon]

Analyse de sensibilité des paramètres  
pour la capacité portante d'un pont à 1 arche



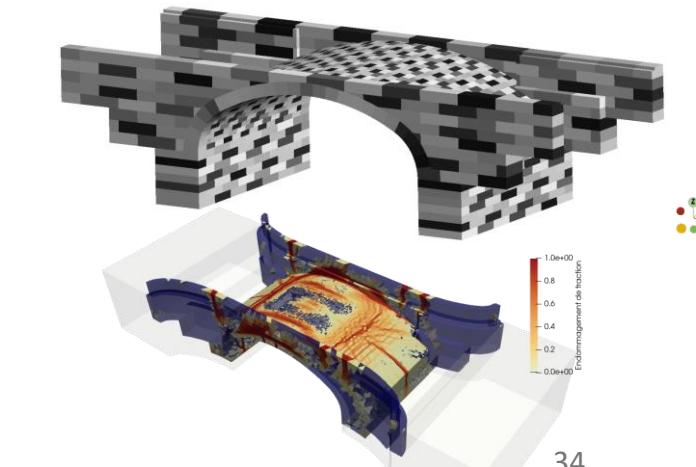
## Pont d'Osserain [P. Taforel]

Prédiction / Finalisation plan de charge  
et d'instrumentation / post-diction & recalibration



## Ponts SNCF-RATP [F. Dubois]

Etude de la réponse des ouvrages  
sous chargements normatifs





# Merci de votre attention

Contacts :

**Paul TAFOREL, MiMeTICS**  
[ptafrel@mimetics-engineering.fr](mailto:ptafrel@mimetics-engineering.fr)

**& Pierre MORENON, LMDC, INSA Toulouse**  
[morenon@insa-toulouse.fr](mailto:morenon@insa-toulouse.fr)



Développement d'Outils et de Logiciels  
pour la Maçonnerie Existante et Neuve



# Merci de votre attention

## Contacts :

**GETEC**, Benoît Malenfant, [benoit.malenfant@getec-so.com](mailto:benoit.malenfant@getec-so.com)

**Expert OA**, Bernard Jacquier, [bernard.jacquier51@orange.fr](mailto:bernard.jacquier51@orange.fr)

**Conseils OA**, Gérard Viossanges, [g.viossanges@gmail.com](mailto:g.viossanges@gmail.com)

**Université de Limoges**, Sylvie Yotte, [sylvie.yotte@unilim.fr](mailto:sylvie.yotte@unilim.fr)

**Quadric**, Judith Christophe, [Judith.CHRISTOPHE@arteliagroup.com](mailto:Judith.CHRISTOPHE@arteliagroup.com)

**SETEC**, Omar Moreno-Regan, [omar.moreno-regan@setec.com](mailto:omar.moreno-regan@setec.com)

**Bollinger & Grohmann**, Félix Cassiani-Ingogni, [fcassiani-ingogni@bollinger-grohmann.fr](mailto:fcassiani-ingogni@bollinger-grohmann.fr)

**Bollinger & Grohmann**, Pierre Marquis-Lhuillier, [pmarquislhuillier@bollinger-grohmann.fr](mailto:pmarquislhuillier@bollinger-grohmann.fr)

**INSA Toulouse / Toulouse Tech Transfer**, Pierre Morenon et Jules Cinier, [morenon@insa-toulouse.fr](mailto:morenon@insa-toulouse.fr)

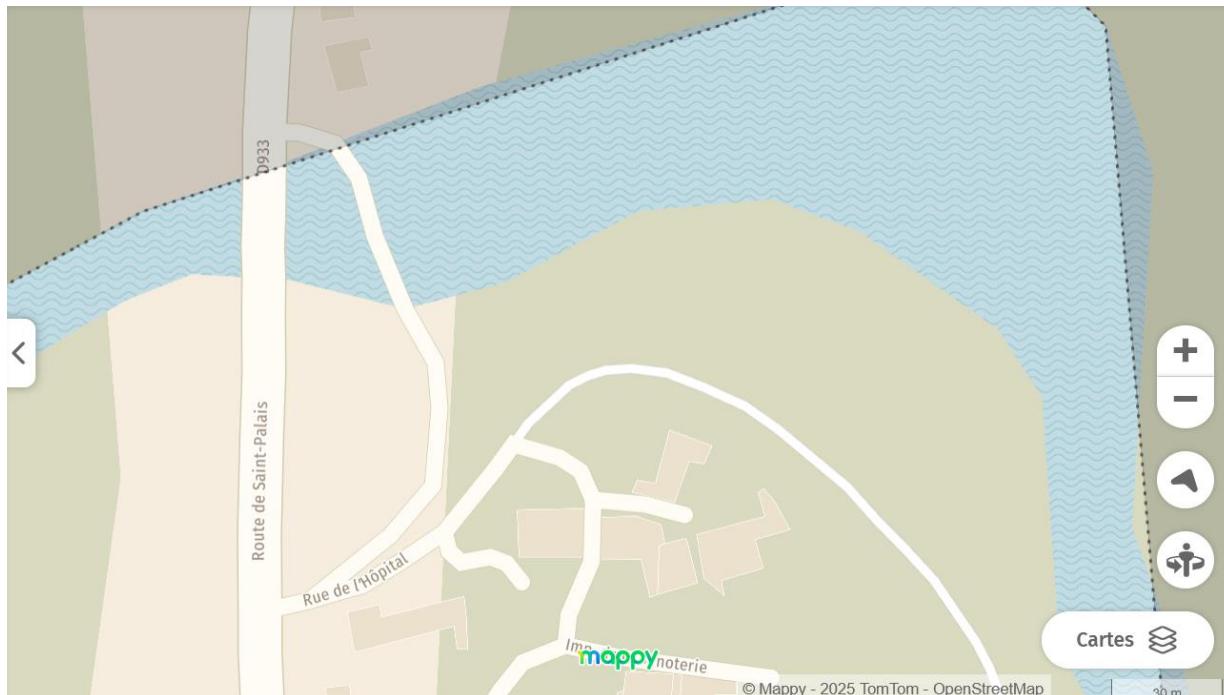
**MiMeTICS engineering**, Paul Taforel, [ptaforel@mimetics-engineering.fr](mailto:ptaforel@mimetics-engineering.fr)

**Université de Montpellier / LMGC**, Frédéric Dubois, [frederic.dubois@umontpellier.fr](mailto:frederic.dubois@umontpellier.fr)

**STONO**, Marine Bagnéris, [bagnéris@stono.fr](mailto:bagnéris@stono.fr)

**STONO**, Fabien Cherblanc, [cherblanc@stono.fr](mailto:cherblanc@stono.fr)





**mappy**





Institut pour la recherche appliquée  
et l'expérimentation en génie civil

