



S. Morel, T. Parent, J.-C. Mindegia,  
J.-L. Coureau, A. Cointe



P. Morenon, P. Nougayrede



P. Taforel, F. Dubois



P. Nougayrede, T. Ciblac,  
M. Brocato (†2023)



D. Garnier



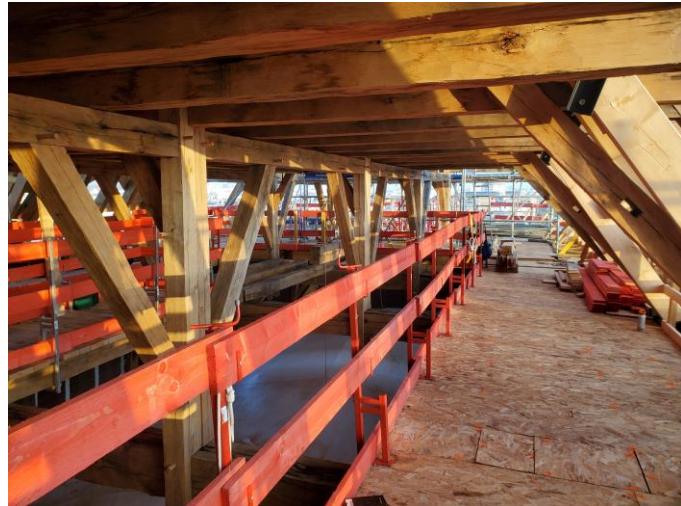
A.-S. Colas



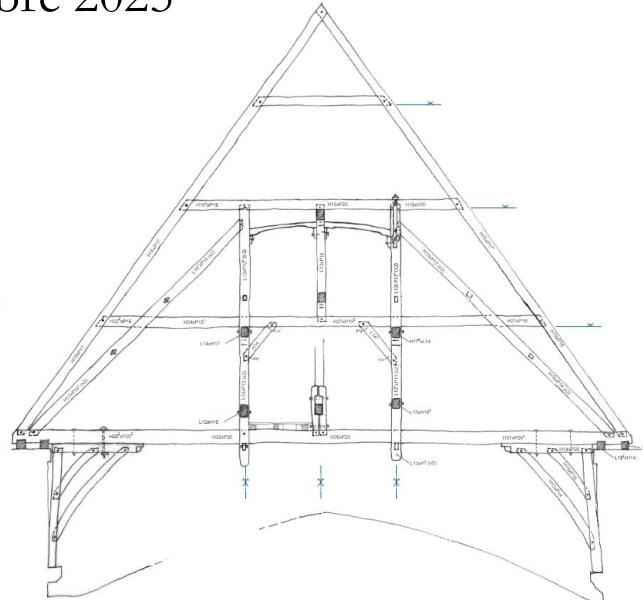
M. Bagneris, F. Cherblanc

# Modélisation de l'interaction charpente-maçonnerie de la cathédrale Notre-Dame de Paris sous charges de vent

Club Cast3m - 28 novembre 2025



P. Nougayrede, 2023



R. Fromont, 2015

# Sommaire

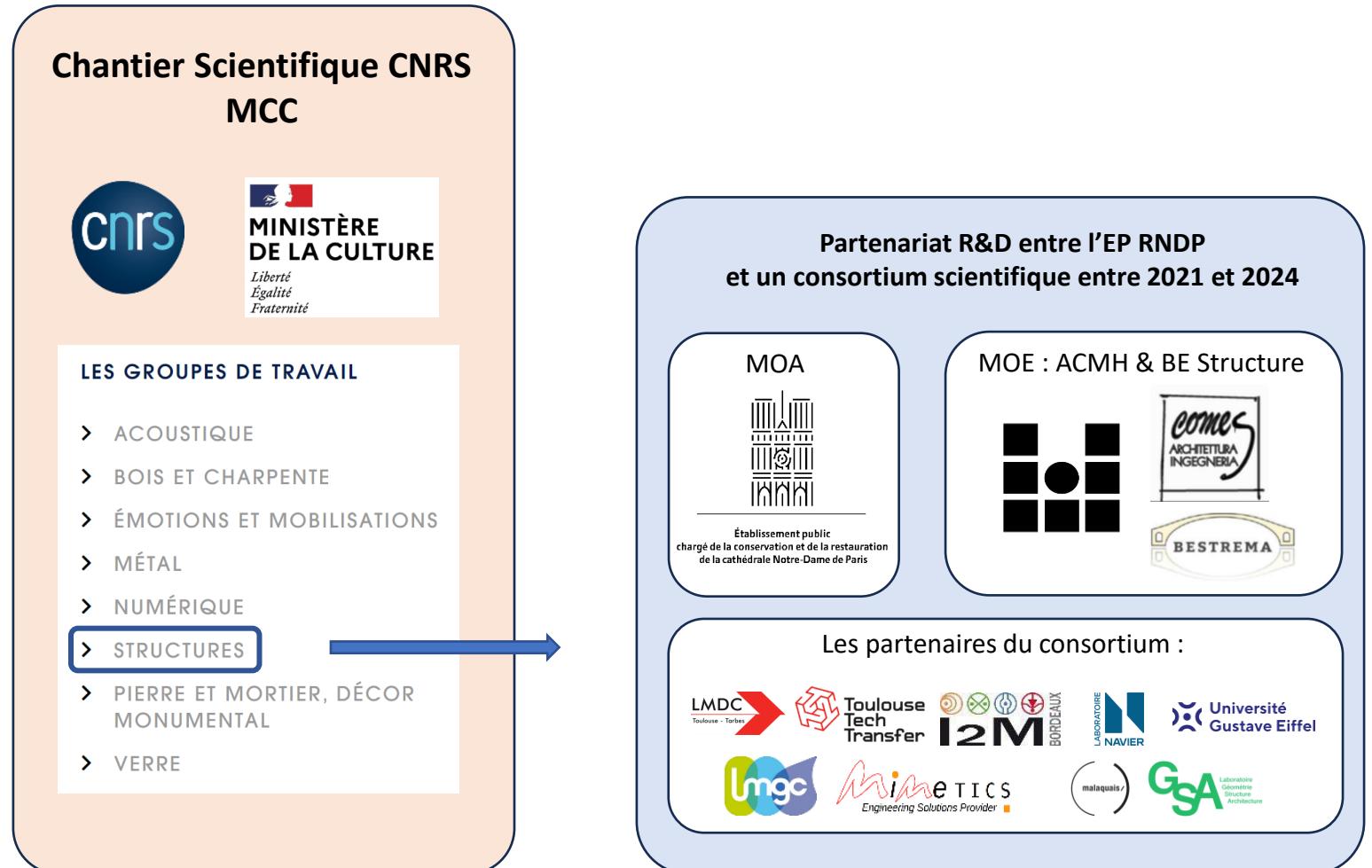
1. Éléments de contexte
2. Modélisation bloc à bloc des maçonneries
3. Modélisation filaire des charpentes et interaction avec la maçonnerie
4. Comportement de la structure sous poids propre et sous charges de vents
5. Conclusions et perspectives

# 1. Éléments de contexte

# Contexte



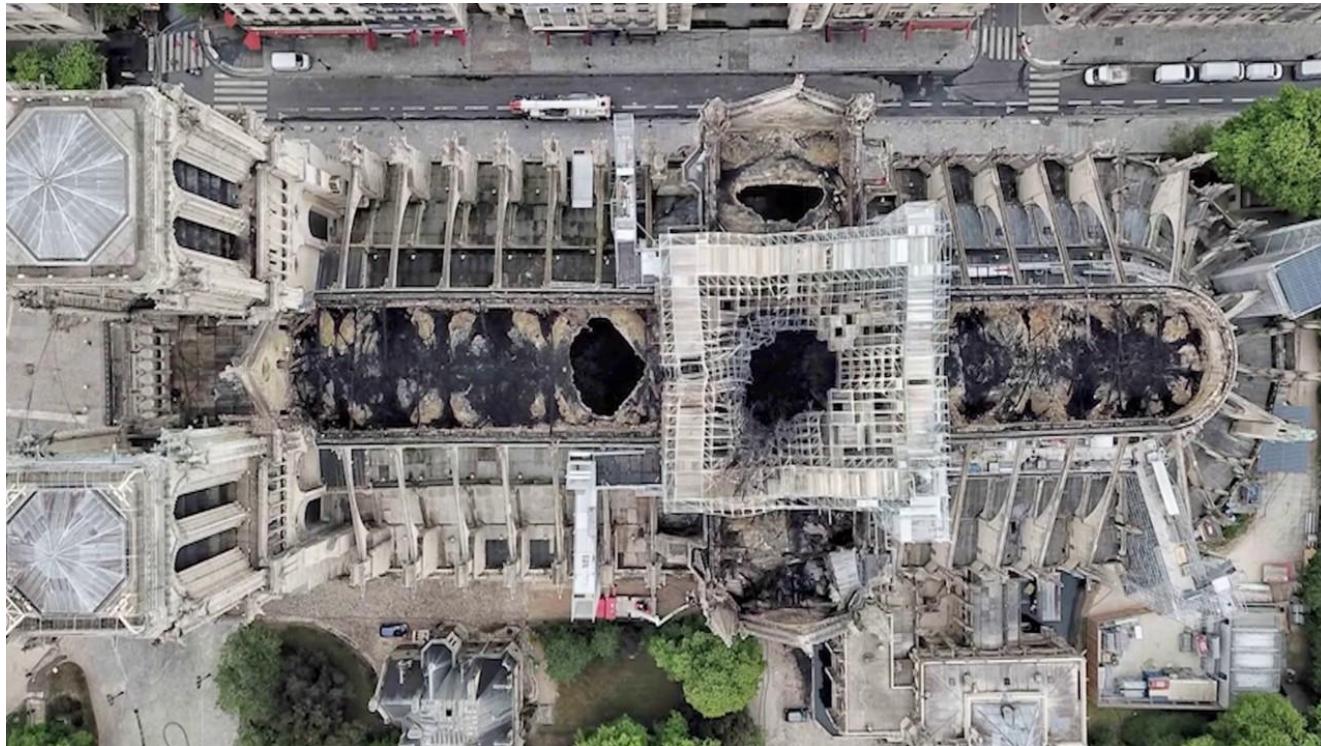
© AFP



# Contexte

Questions posées par les architectes chargés de la reconstruction :

**Comment évaluer la « réserve » de stabilité des voûtes en maçonnerie de la cathédrale avant et après l'incendie ? Comment la stabilité est-elle impactée par la charpente ?**



© Lana Sator, CNN

Quelques problématiques :

- Répondre à l'**urgence** : temporalité du chantier très resserrée, 5 ans..
- Intervention patrimoniale : absence de cas de charges normalisés ; nécessité de formuler rapidement des propositions pour la modélisation de l'**incendie**, des chargements de **vents**...
- Mission d'Assistance à la maîtrise d'œuvre : préconisations majoritairement **qualitatives** plutôt que strictement quantitatives

# Contexte

Méthodologie adoptée :

**3 modélisations mécaniques indépendantes** réalisées dans 3 laboratoires différents

Pilotage : Laboratoire I2M de Bordeaux (S. Morel, T. Parent)



Modèle continu éléments finis  
Homogénéisation avec ENDO3D  
*Code\_Aster*  
P. Morenon



Modèle blocs à blocs éléments discrets  
Contact dynamique adoucissant aux interfaces  
*LMGC90*  
P. Taforel, F. Dubois



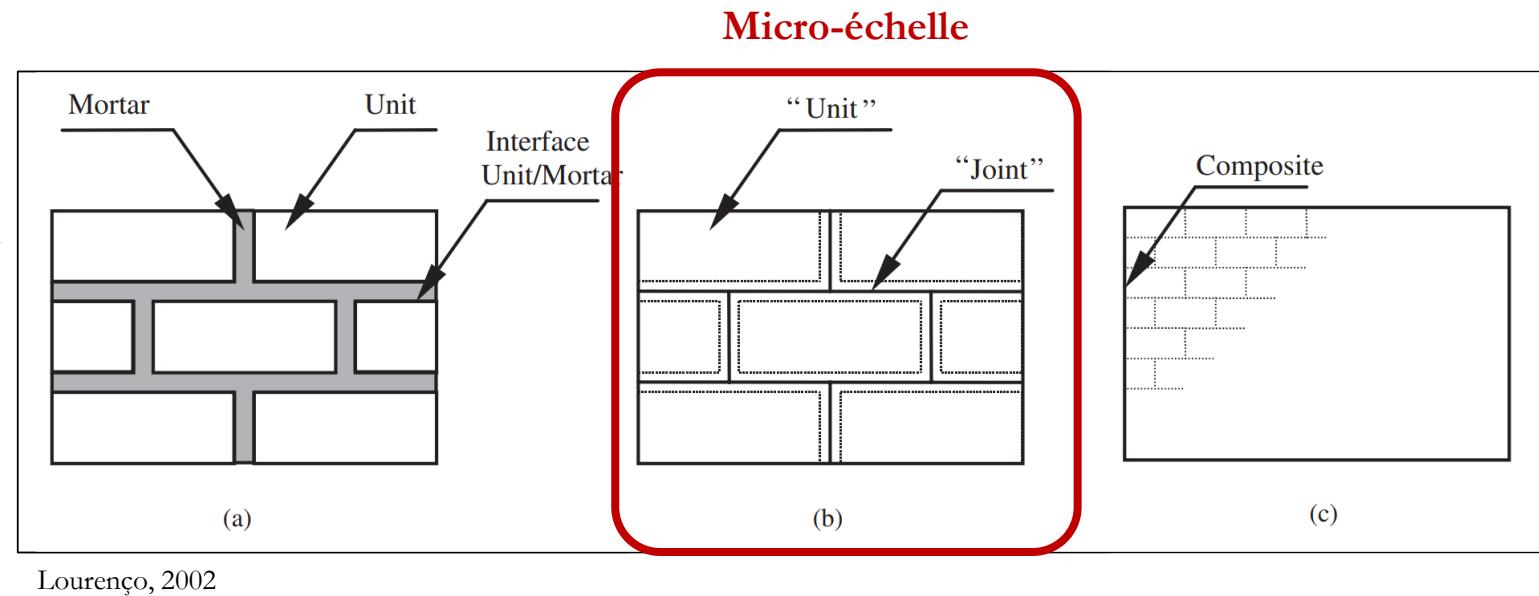
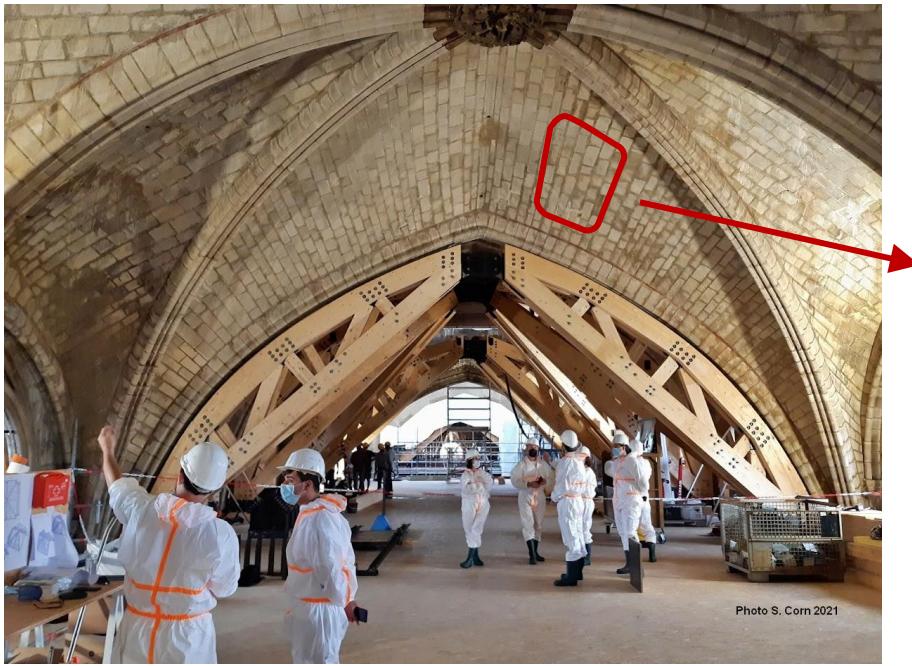
Modèle blocs à blocs éléments finis  
Avec joints non linéaires de Mohr Coulomb  
*Cast3m*  
P. Nougayrede, M. Brocato (†2023)

- Mise en commun des savoir-faire de chaque laboratoire quand à la **modélisation des structures en maçonnerie** : génération des maillages, méthodes de convergence, post-traitement...
- Convergence (ou non) de résultats indépendants : permet de **se rassurer**, d'établir des marges d'erreur
- Profiter des différents **avantages** propres à chaque modélisation : rapidité d'exécution, précision, types de résultats...
- **Prise de recul** sur chacune des modélisations : il n'y en a pas une qui serait « meilleure » que les 2 autres

## 2. Modélisation bloc à bloc des maçonneries

# Modélisation bloc à bloc des maçonneries

Échelles de modélisation pour la maçonnerie de pierre :



S. Corn, 2021

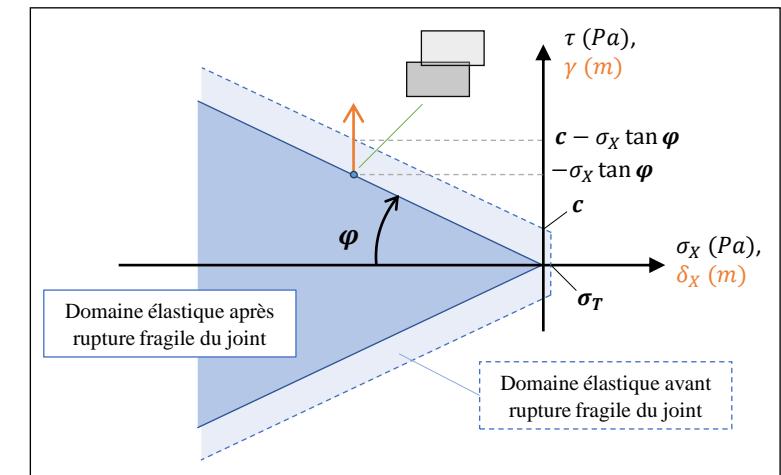
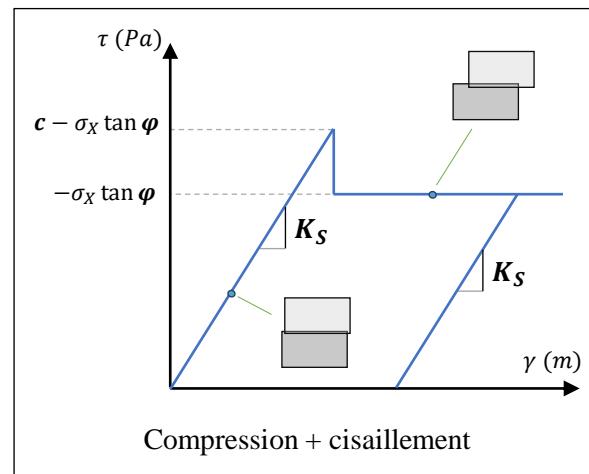
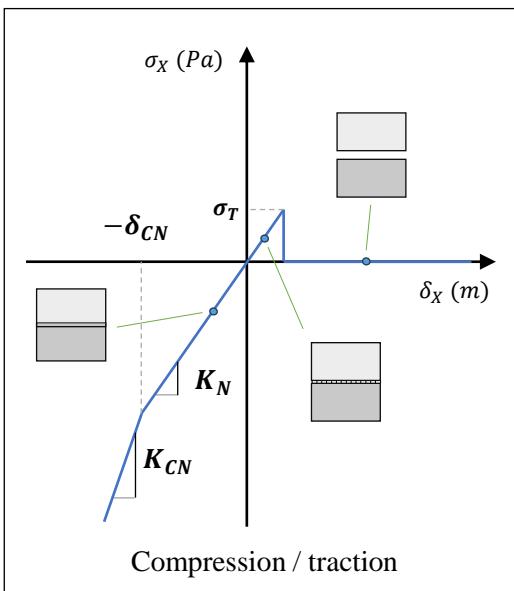
# Modélisation bloc à bloc des maçonneries

## Implémentation du modèle mécanique 3D dans Cast3m :

- Blocs volumiques élastiques linéaires
- Joints surfaciques non linéaires "Coulomb" modifiés :
  - Comportement non linéaire en compression/traction
  - Raideurs normales et tangentielles distinctes ; critère de plasticité de Mohr-Coulomb non associé (dilatance nulle)
  - Comportement transitoire fragile parfait : résistance en traction et cohésion initiales nulles après le premier franchissement du critère



Modèle : 'MECANIQUE' 'ELASTIQUE' 'ISOTROPE' 'PLASTIQUE' 'JOIN_MORCOUL' JOT3			
Description	Symbole	Unité	Nom Cast3m
Raideur normale en compression	$K_N$	$N/m^3$	'KN'
Seconde raideur normale en compression	$K_{CN}$	$N/m^3$	'KN3'
Seuil de fermeture normale en compression	$\delta_{CN}$	$m$	'ECN'
Raideur normale en traction	$K_{NT}$	$N/m^3$	'KN1'
Raideur de cisaillement	$K_S$	$N/m^3$	'KS'
Angle de frottement	$\varphi$	$^\circ$	'FRIC'
Angle de dilatance	$\psi$	$^\circ$	'ZMU'
Résistance en traction initiale	$\sigma_T$	$Pa$	'FTRC'
Cohésion initiale	$c$	$Pa$	'COHE'

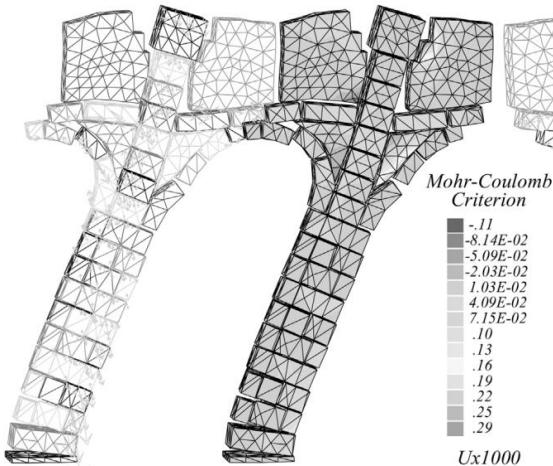


# Modélisation bloc à bloc des maçonneries

PH autobloquant, Troyes

Quelques exemples d'utilisations précédentes :

Structures du patrimoine

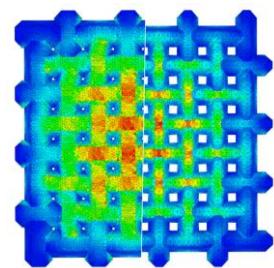


P. Peton, 2001

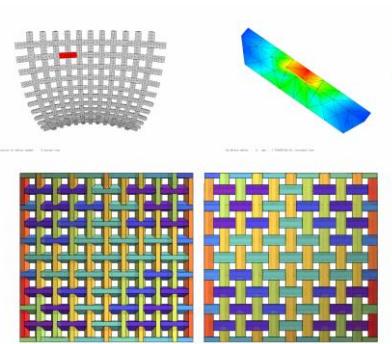
Voûte plate d'Abeille



M. Brocato, L. Mondardini, 2015



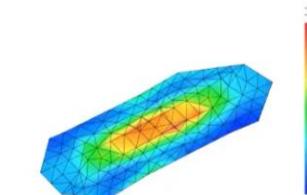
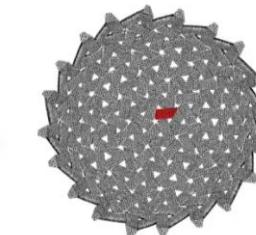
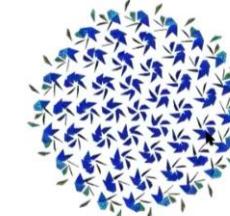
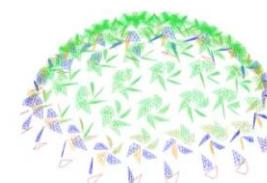
Charpente-maçonnerie de la cathédrale Notre-Dame de Paris



M. Brocato, 2013



Dôme autobloquant

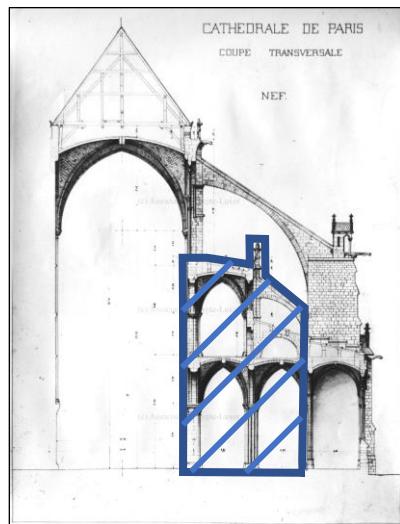
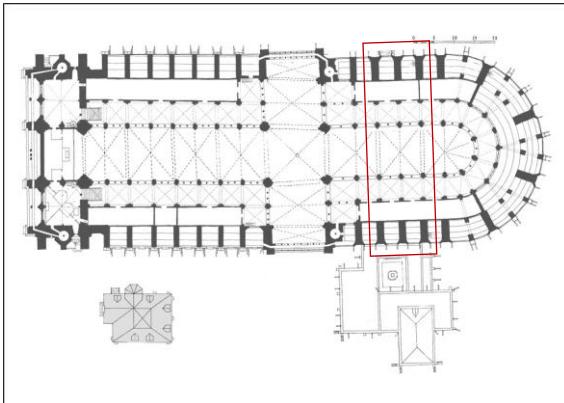


M. Brocato, 2012

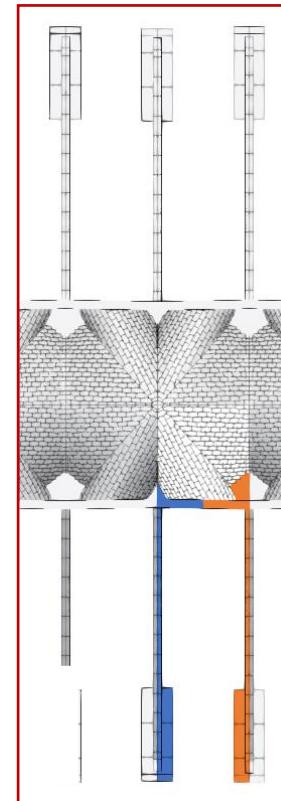
# Modélisation bloc à bloc des maçonneries

## Hypothèses géométriques

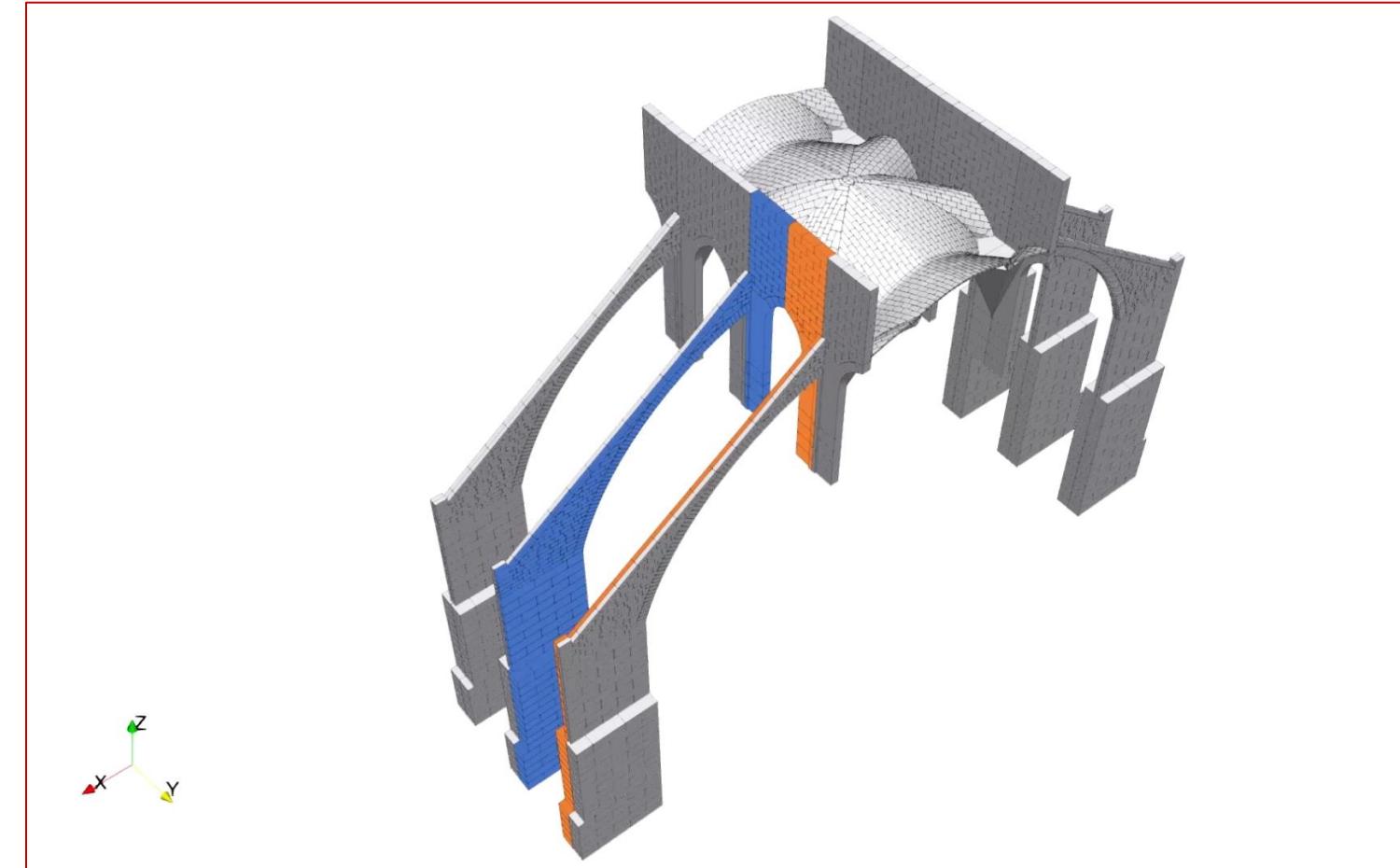
Voûte du chœur



Non prise en compte de la partie inférieure du mur gouttereau



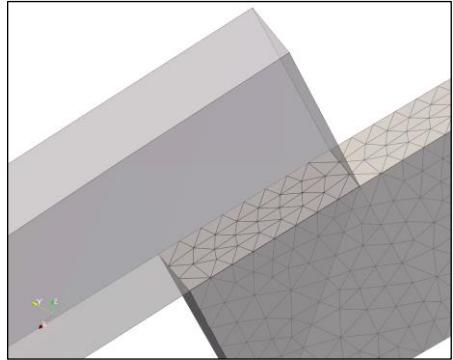
Modélisation charpente-maçonnerie de la cathédrale Notre-Dame de Paris



Géométrie bloc à bloc réalisée principalement par Antoine Gros, MAP Marseille

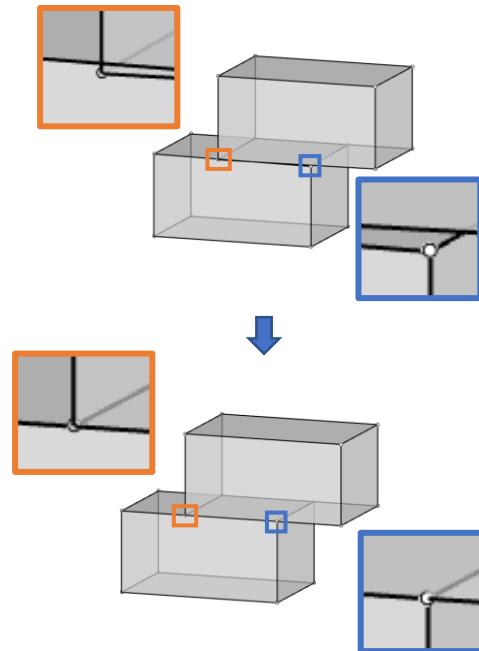
# Modélisation bloc à bloc des maçonneries

Parenthèse : retour d'expérience sur GENJ



Deux blocs avec maillages compatibles

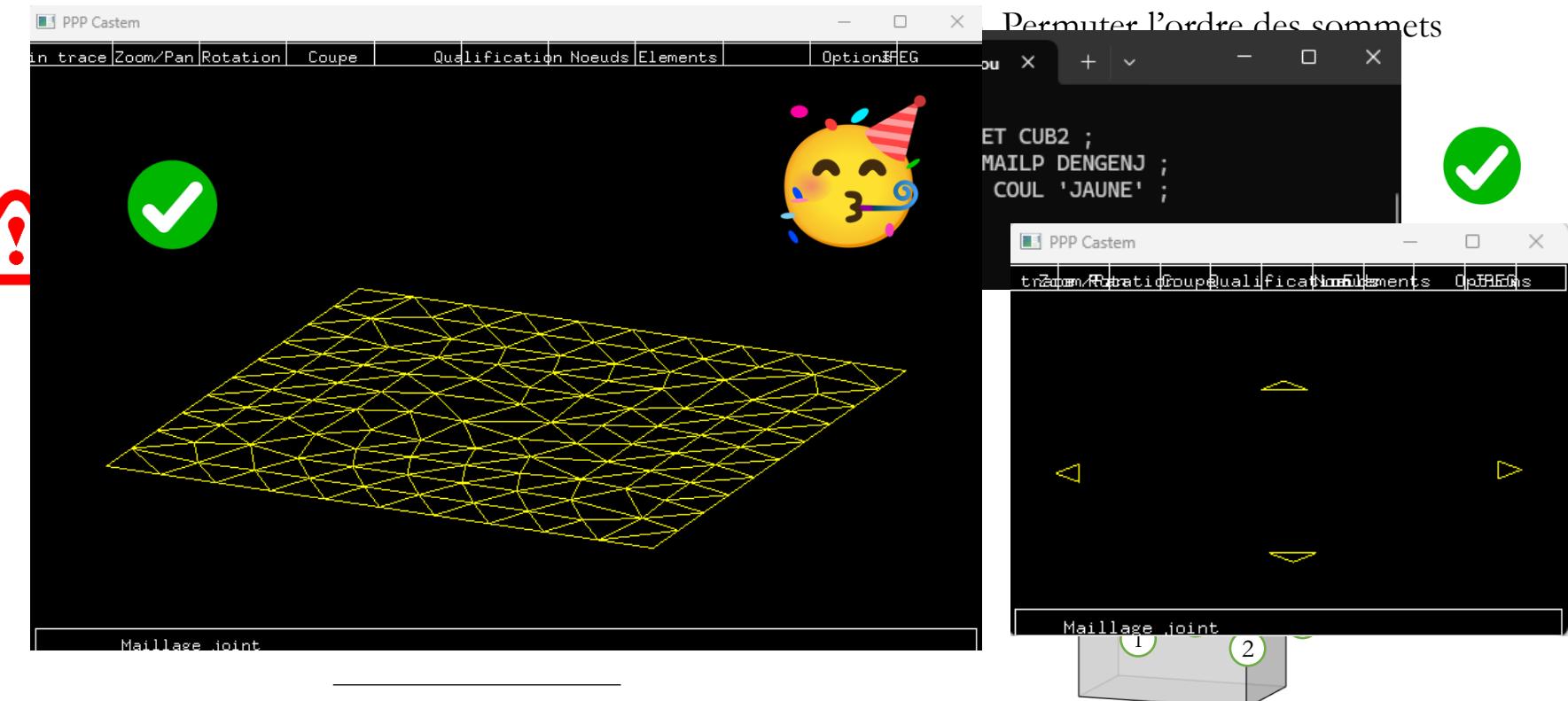
1. Corriger les imprécisions



Génération du maillage des éléments joints avec la procédure Cast3m **GENJ**

Les maillages en entrée de GENJ doivent être bien compatibles ; sinon ça bug...

Précautions sur les maillages en entrée de GENJ :



Modélisation charpente-maçonnerie de la cathédrale Notre-Dame de Paris

# Modélisation bloc à bloc des maçonneries

## Hypothèses mécaniques

### Calage des modèles des blocs de pierre :

Projet DEMMEFI (N. Domede, C. Guenser, T. Parent, P. Morenon 2024)

Calage commun pour les 3 modèles



### Campagne de mesure de vitesse du son

- Mesures réalisées sur la travée du **chœur**
- Distinction de la qualité des pierres en fonction de leur emplacement dans l'ouvrage
- Obtention du **module d'élasticité  $E$**  et de la **résistance en compressions  $R_C$**  des pierres calcaires (corrélations empiriques)

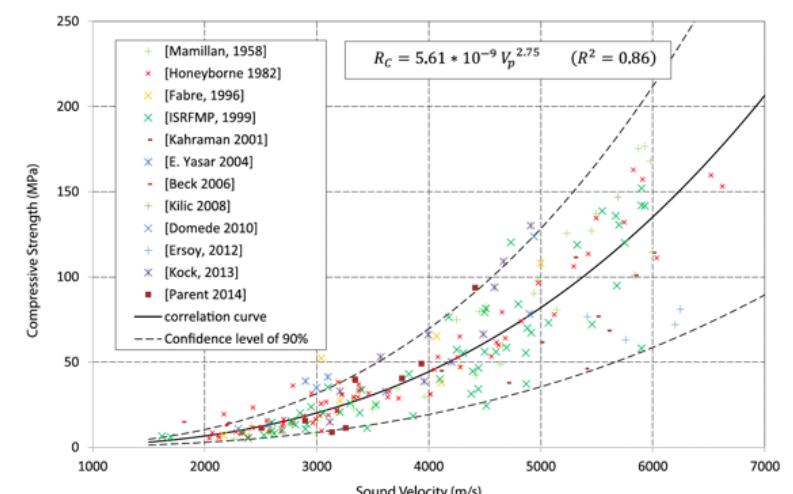
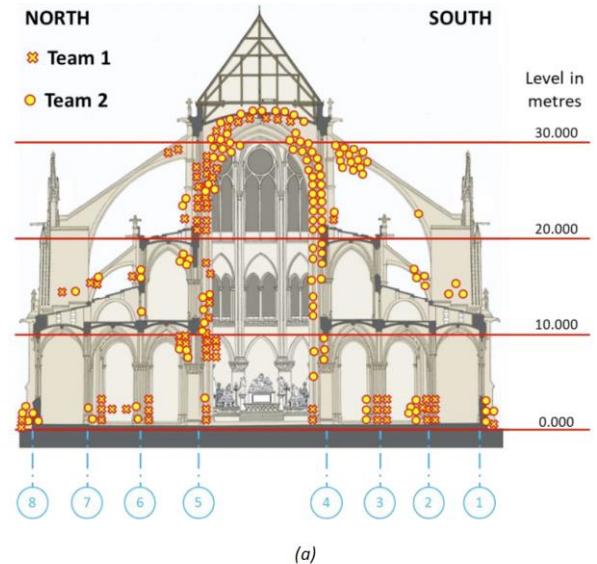


Fig. 4. Correlation between compressive strength and sound velocity.

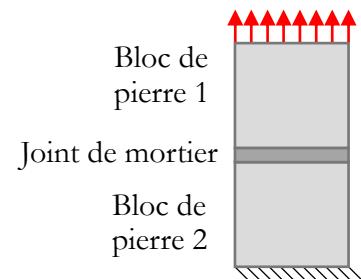
# Modélisation bloc à bloc des maçonneries

## Hypothèses mécaniques

### Calage des modèles de joint de mortier :

Thèses I2M Bordeaux (M. Bisoffi-Sauve 2016, V. Venzal 2020)  
Projet DEMMEFI (A. Boukham 2023)

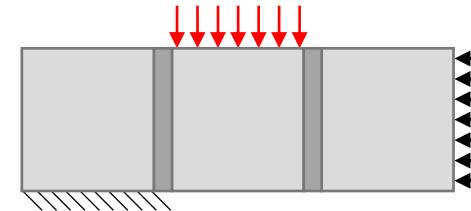
Calage commun pour les 3 modèles



Essai de caractérisation en traction pure d'un assemblage pierre-mortier, I2M-Bordeaux / AIA Ingénierie



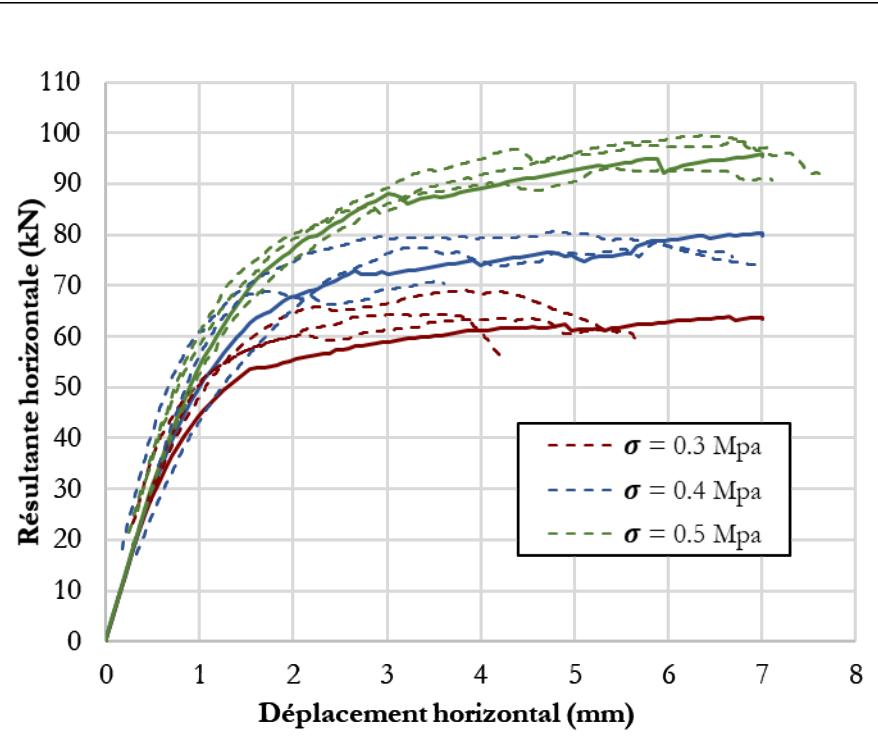
Essai de caractérisation en cisaillement d'un assemblage en triplet pierre-mortier-pierre, I2M-Bordeaux / AIA Ingénierie



# Modélisation bloc à bloc des maçonneries

## Hypothèses mécaniques

Vérification du calage de la maçonnerie globale :

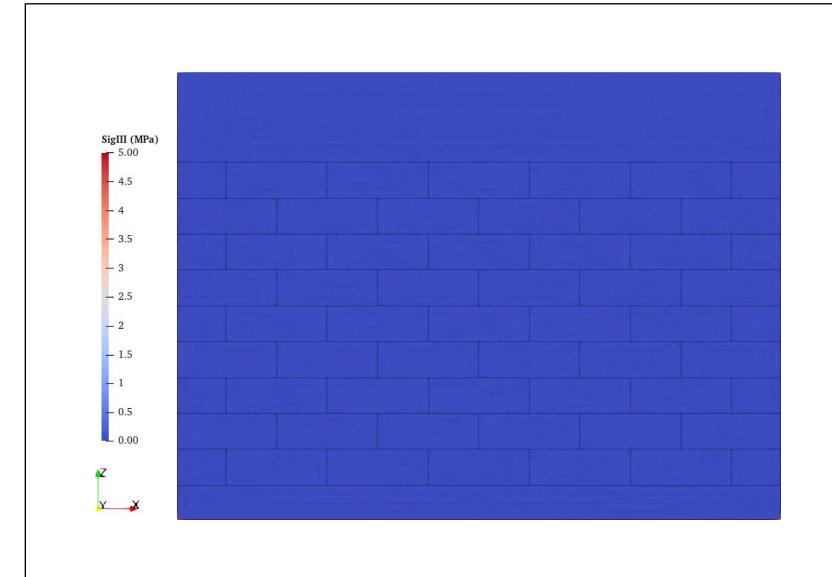


Réponses force-déplacement horizontal

Traits pointillés : expérimentations I2M Bordeaux  
Traits pleins : modèle bloc à bloc Cast3m



Mur en pierre et mortier de chaux  
dans un banc de cisaillement,  
I2M-Bordeaux / AIA Ingénierie



Modèle bloc à bloc Cast3m :  
3<sup>ème</sup> contrainte principale, définie positive en compression,  
sur la déformée x10

### 3. Modélisation filaire des charpentes et interaction avec la maçonnerie

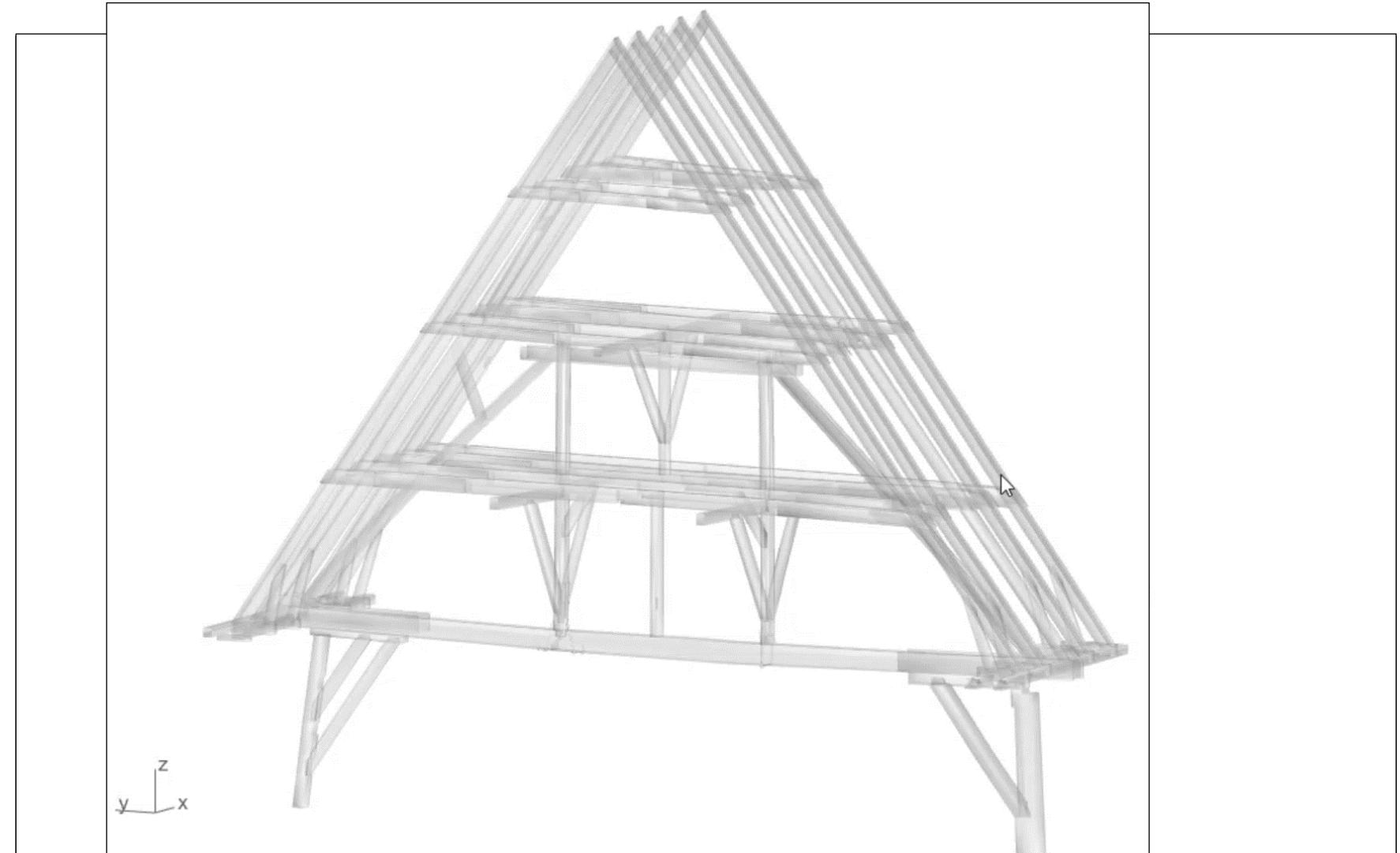
# Modélisation des interactions charpentes-maçonneries

## Hypothèses géométriques

Charpente du chœur

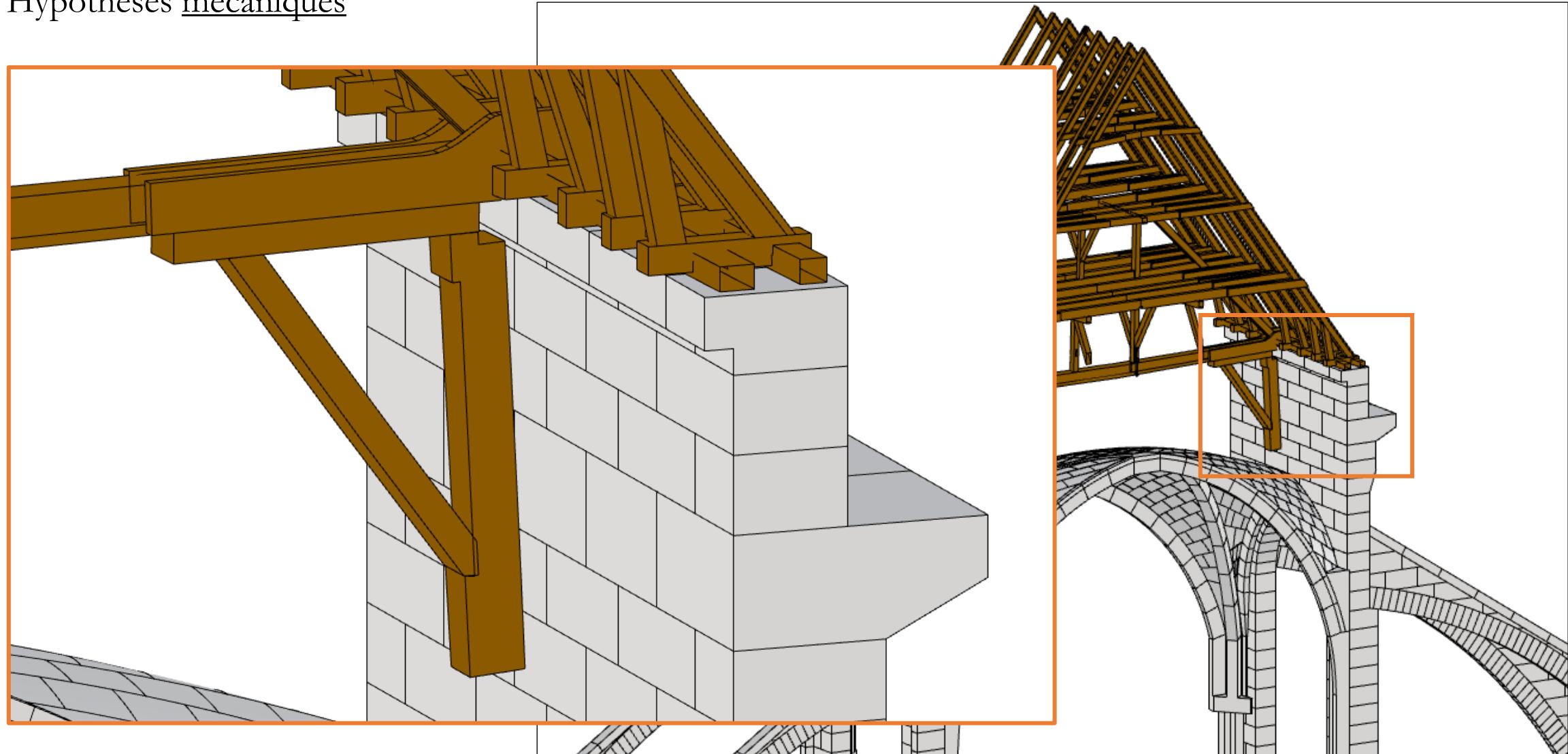
Modèle géométrique  
réalisé par Kevin Jacquot

**Modèle filaire** adaptable  
de la charpente du chœur



# Modélisation des interactions charpentes-maçonneries

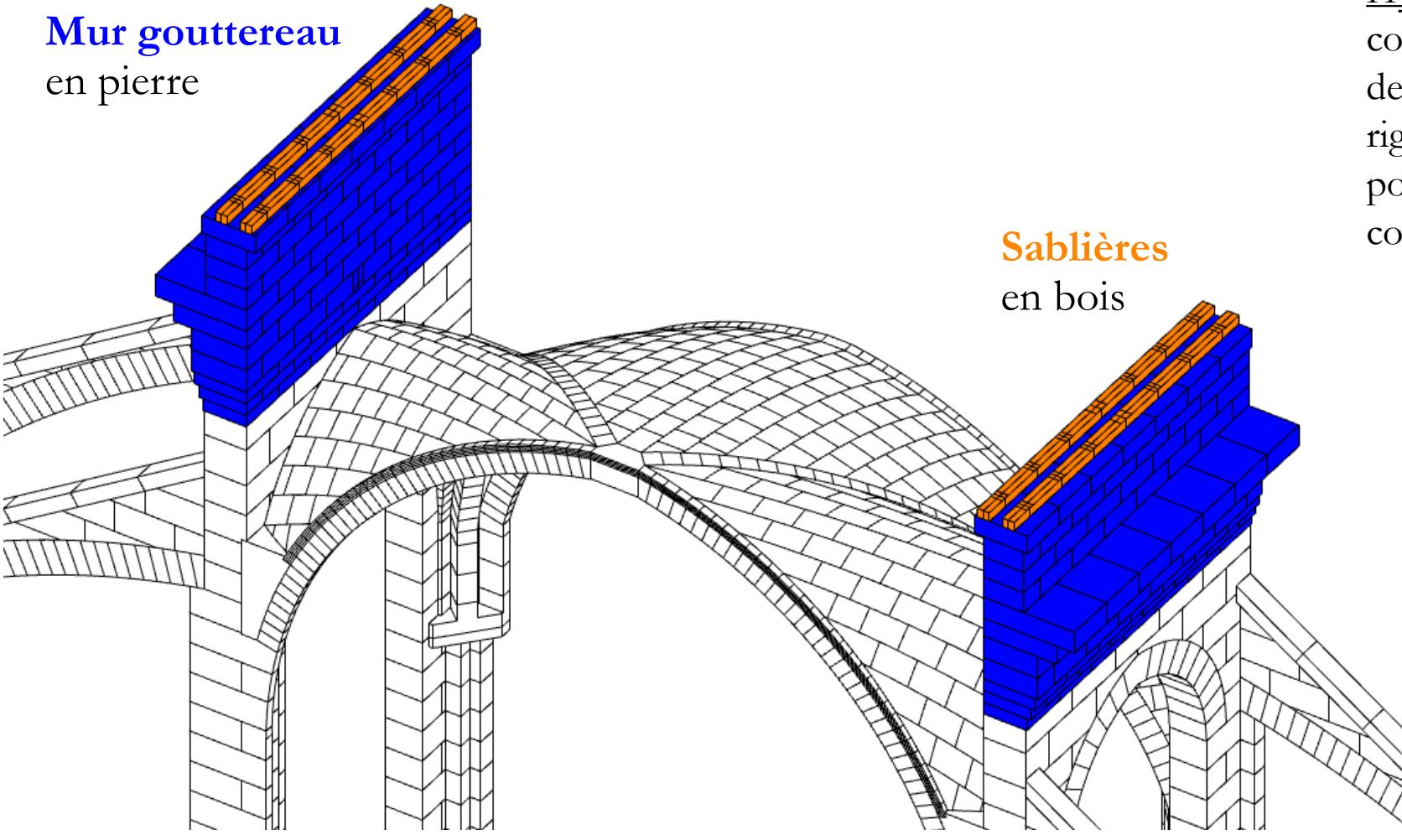
## Hypothèses mécaniques



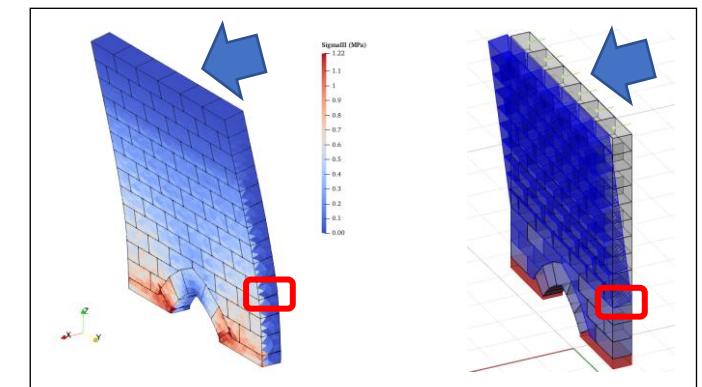
Modélisation charpente-maçonnerie de la cathédrale Notre-Dame de Paris

# Modélisation des interactions charpentes-maçonneries

## Hypothèses mécaniques

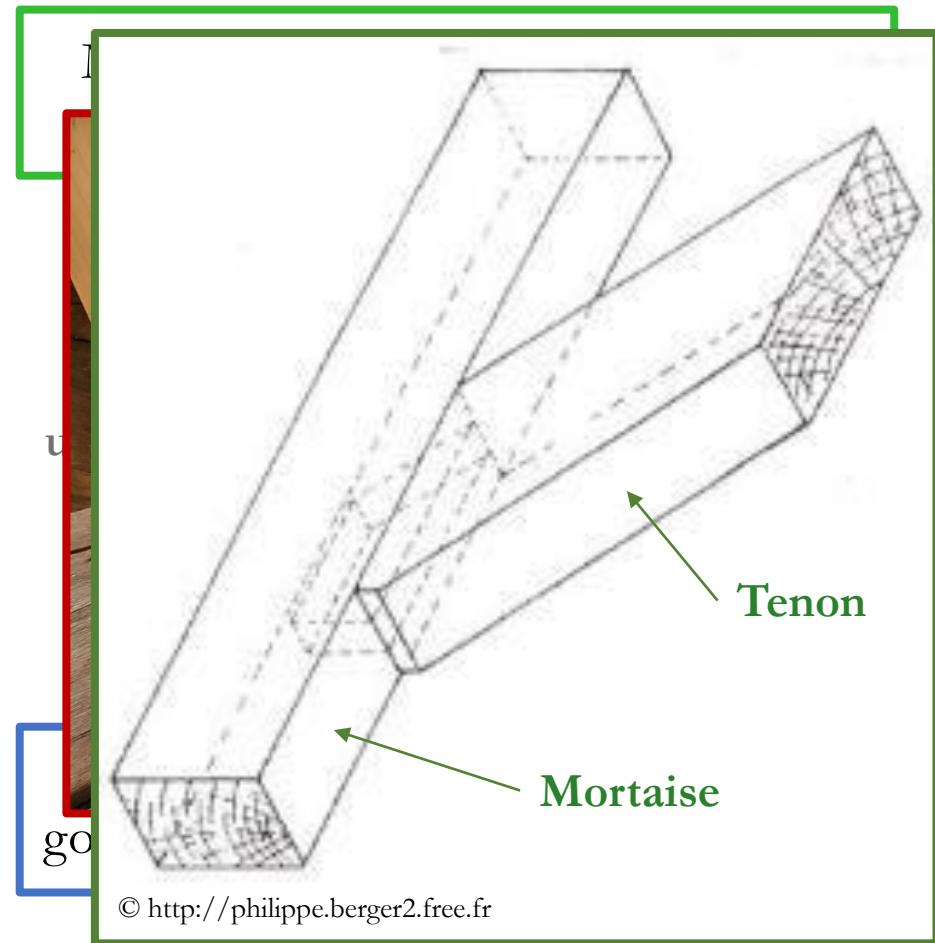


Hypothèse : rigidité horizontale du complexe AB+voûte+AB est d'un ordre de grandeur plus important que la rigidité flexionnelle du mur gouttereau, pour les cas de charge de vents considérés (à vérifier par la suite...)



# Modélisation des interactions charpentes-maçonneries

## Hypothèses mécaniques



Assemblages :  
Tenon articulé en rotation  
par rapport à la mortaise  
(équivalent : poutre continue)

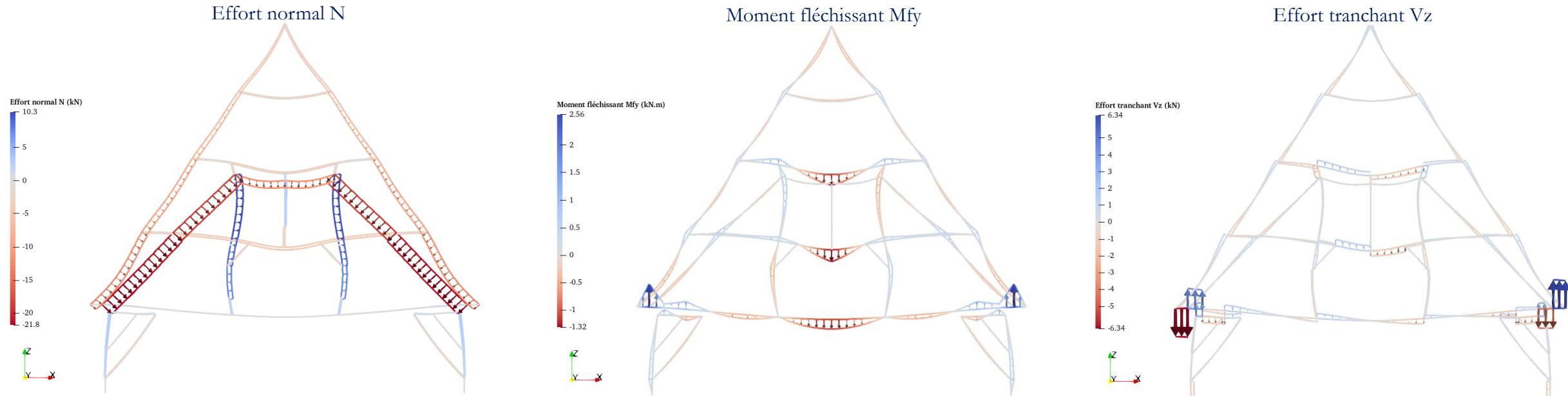


## 4. Comportement de la structure sous poids propre et sous charges de vents

# Modélisation des interactions charpentes-maçonneries

## Comportement sous poids propre

Diagrammes d'efforts intérieurs tracés sur la déformée x500



Simulation de la charpente filaire sans la maçonnerie, blocages latéraux des appuis

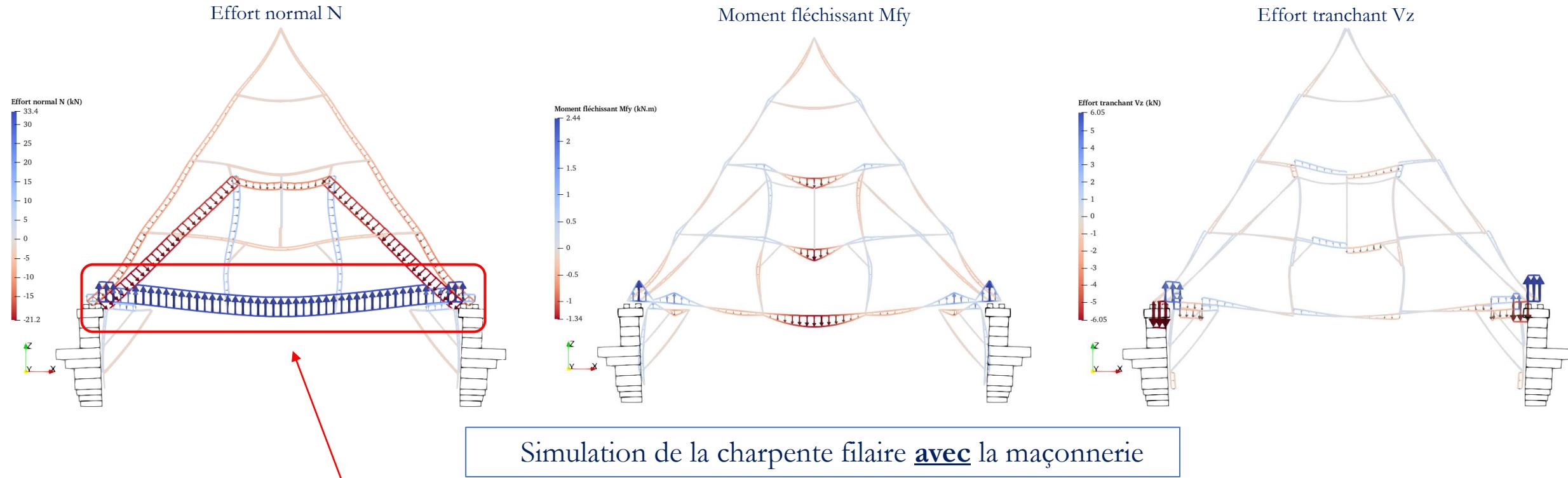
### Charges permanentes (poids propre) :

- 1 - Poids propre des poutres constituant la charpente (ferme principale et chevrons formant fermes) = **78 kN**
- 2 - Poids propre de la couverture (voliges + tables en plomb) :  $78 \text{ kg/m}^2 = 73 \text{ kN}$
- 3 - Crête de faitage (plomb + structure interne) :  $400 \text{ kg/ml} = 16 \text{ kN}$

# Modélisation des interactions charpentes-maçonneries

## Comportement sous poids propre

Diagrammes d'efforts intérieurs tracés sur la déformée x500

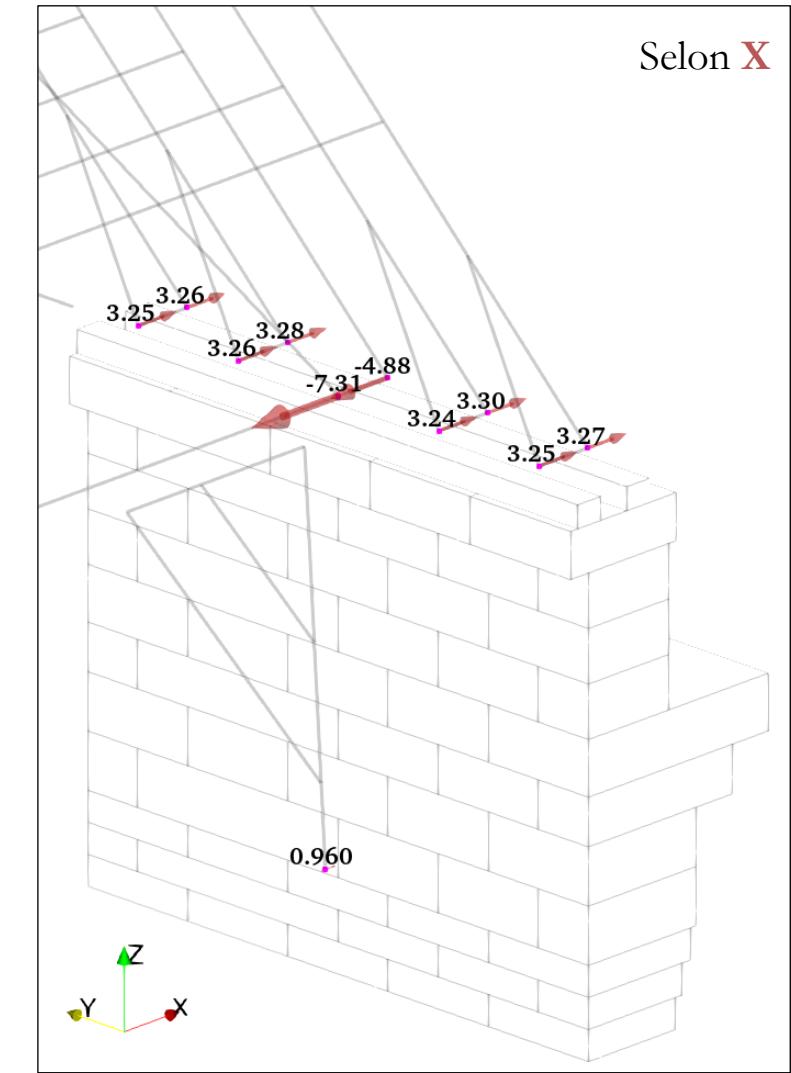
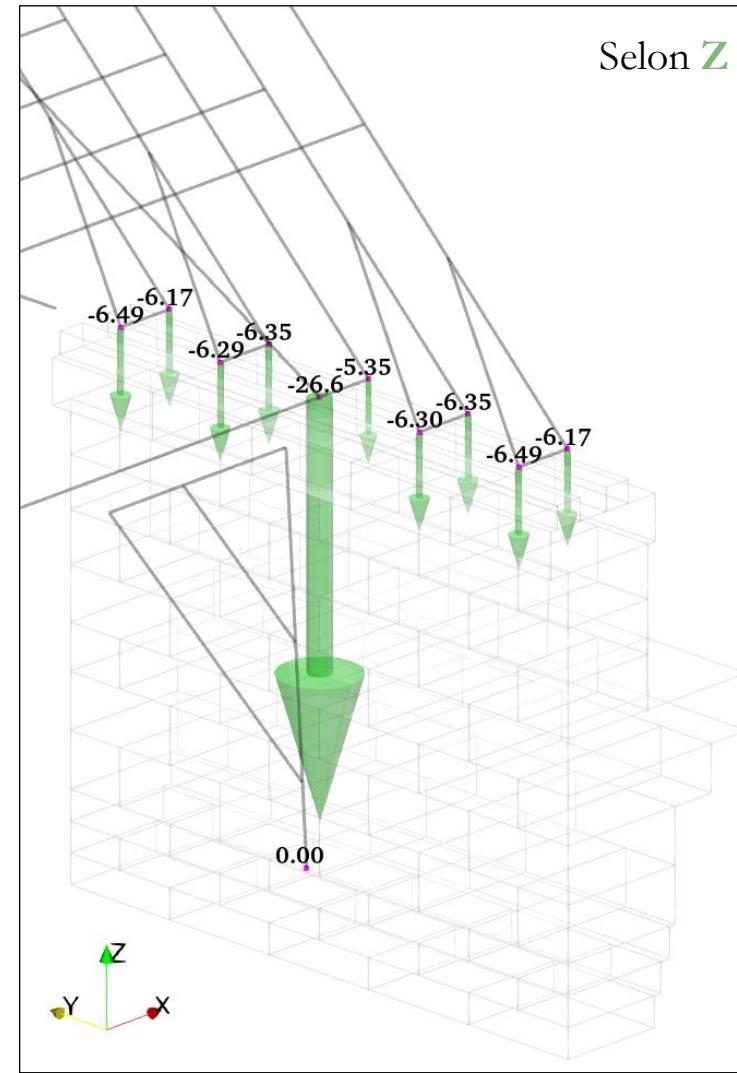
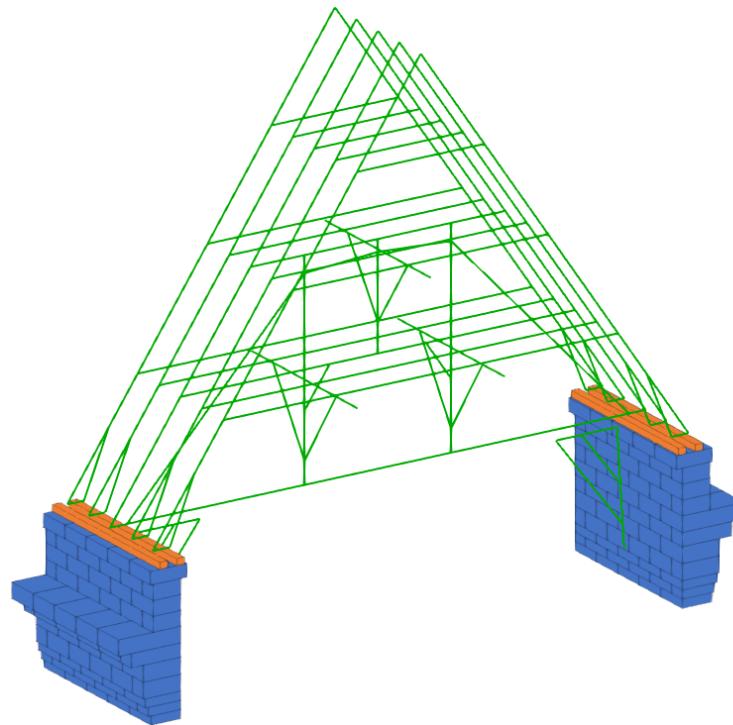


Principale conséquence de la prise en compte de l'interaction charpente-maçonnerie sous poids propre :  
**l'entrait se retrouve en traction**

# Modélisation des interactions charpentes-maçonneries

## Comportement sous poids propre

Réactions (kN) de la **charpente filaire**  
sur les **sablières** et  
sur le **mur gouttereau**



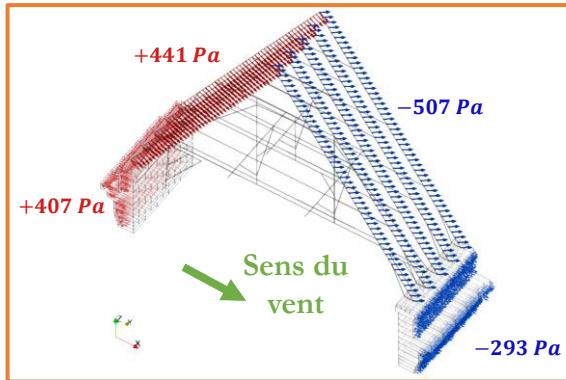
# Modélisation des interactions charpentes-maçonneries

## Comportement sous charges de vent

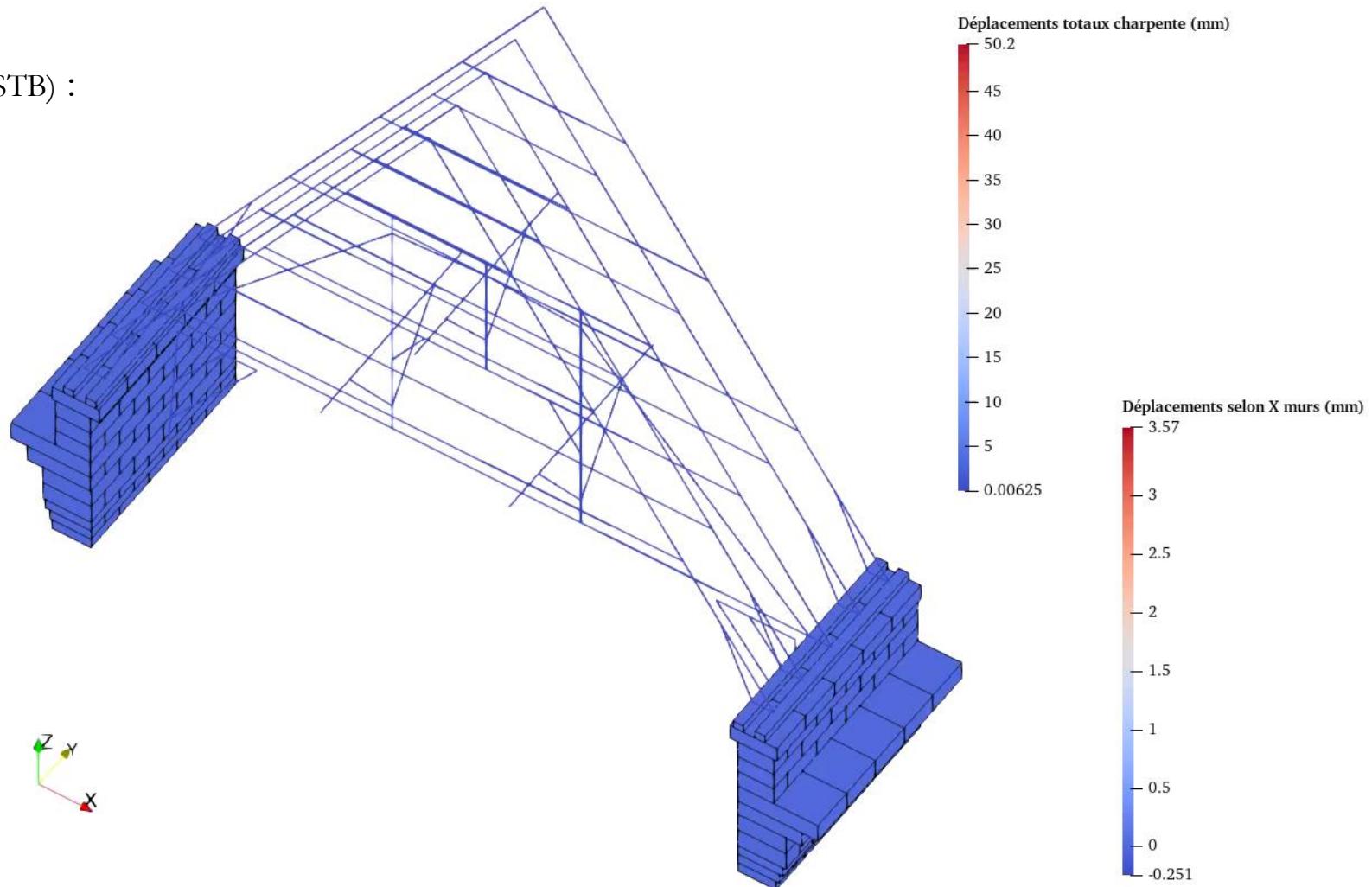
Déformée x50

Au faîte (Eurocodes + essais en soufflerie CSTB) :

- Vitesse moyenne : 80 km/h
- Vitesse de pointe : 130 km/h



Selon  $\vec{X}$  : + 37 kN  
Selon  $\vec{Z}$  : + 2 kN



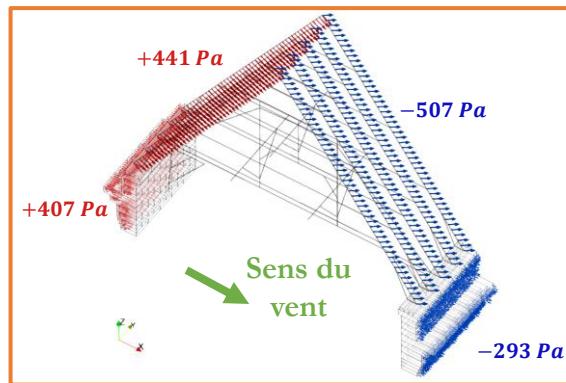
# Modélisation des interactions charpentes-maçonneries

## Comportement sous charges de vent

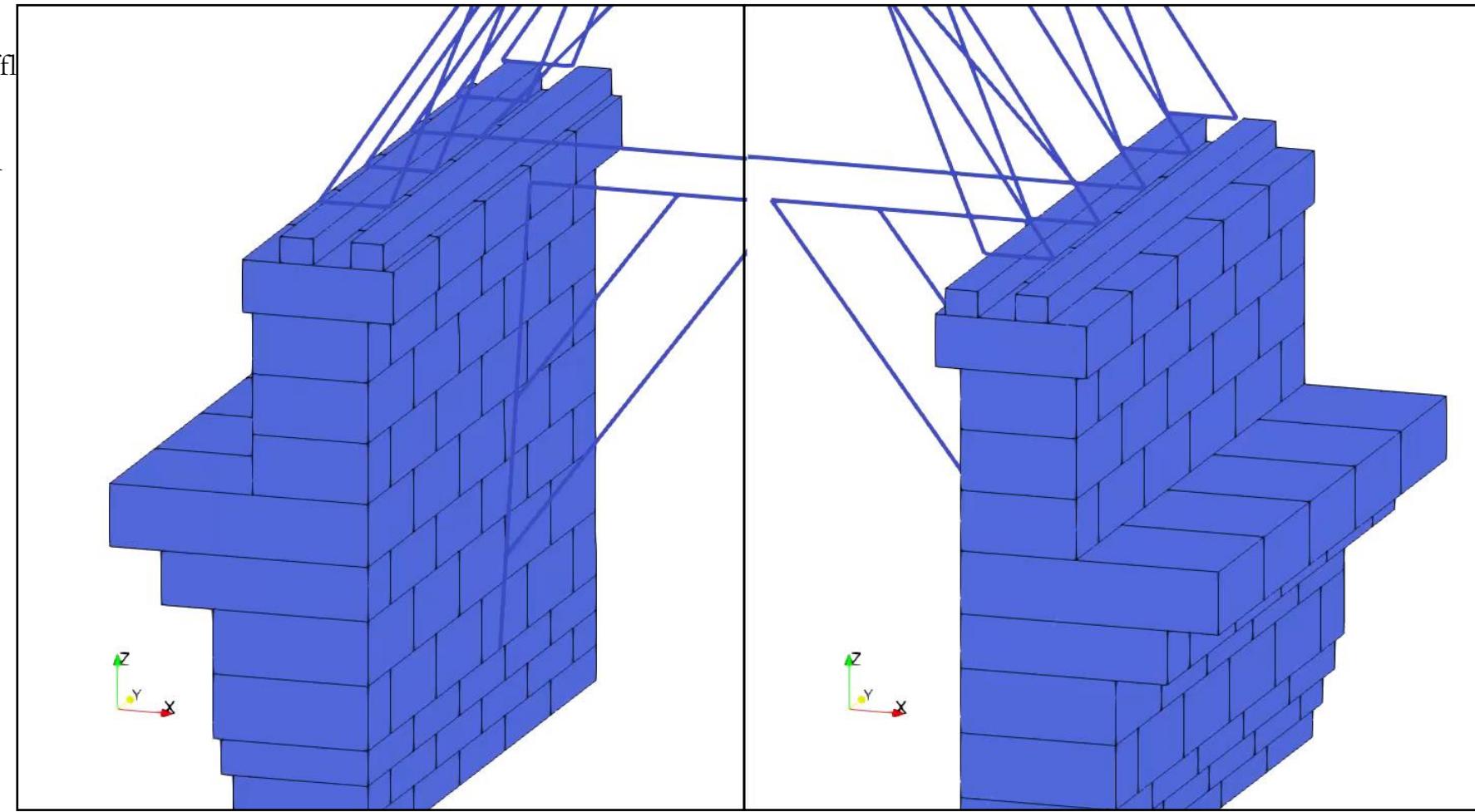
Déformée x50

Au faîte (Eurocodes + essais en souffl

- Vitesse moyenne : 80 km/h
- Vitesse de pointe : 130 km/h



Selon  $\vec{X}$  : + 37 kN  
Selon  $\vec{Z}$  : + 2 kN

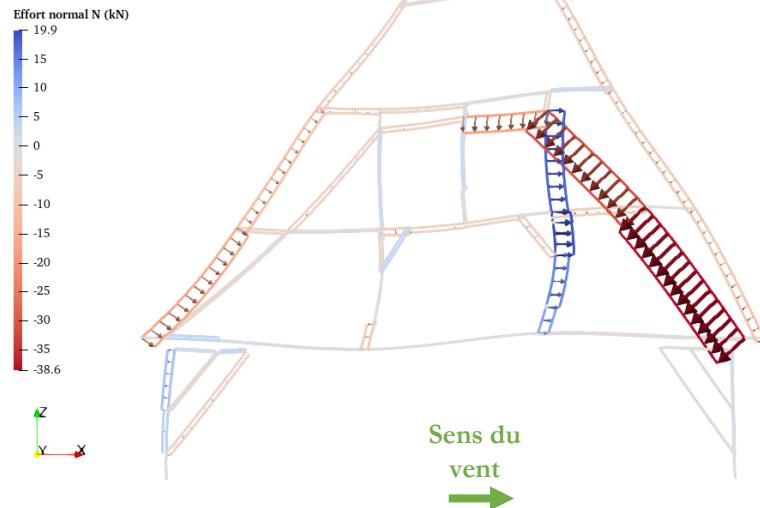


# Modélisation des interactions charpentes-maçonneries

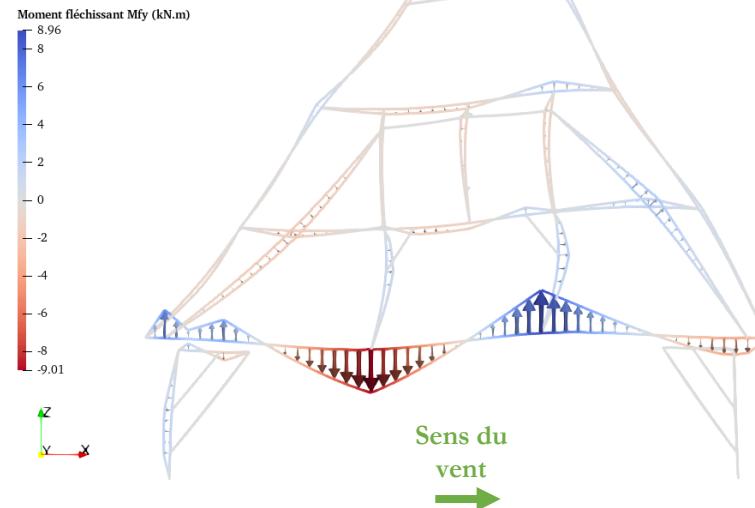
## Comportement sous charges de vent

Diagrammes d'efforts intérieurs tracés sur la déformée x100

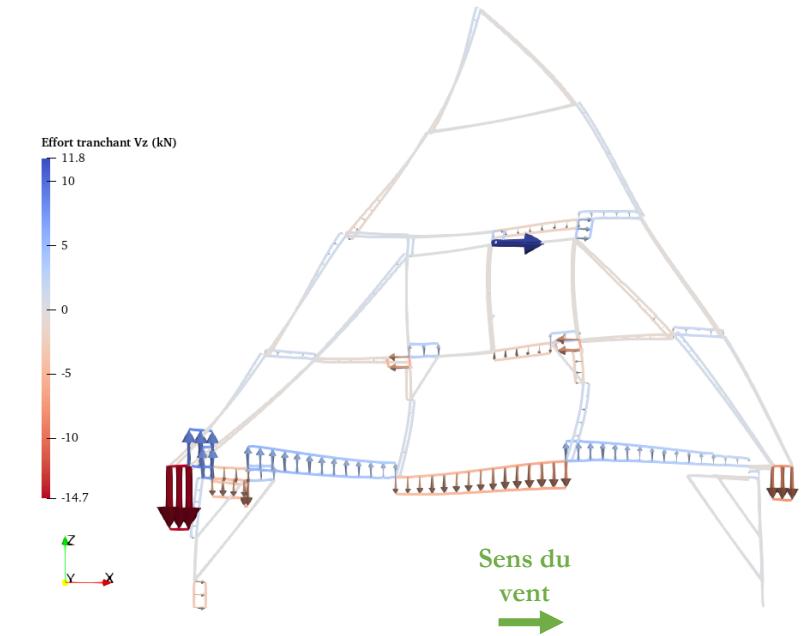
Effort normal N



Moment fléchissant Mfy



Effort tranchant Vz



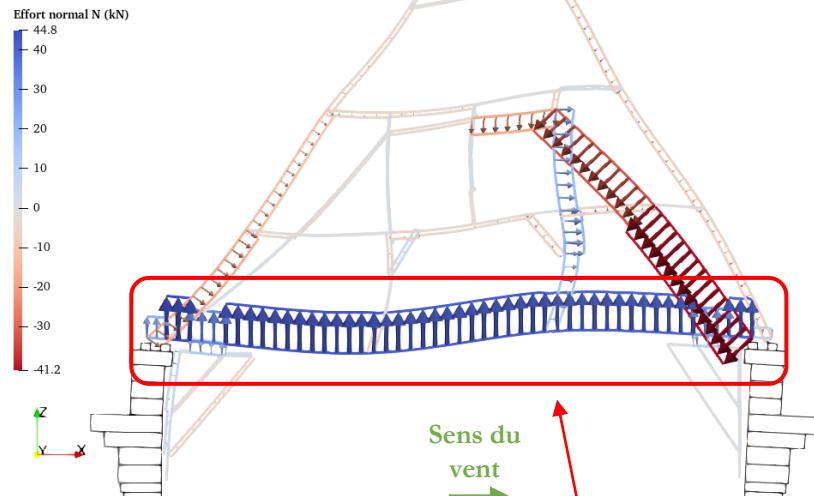
Simulation de la charpente filaire sans la maçonnerie

# Modélisation des interactions charpentes-maçonneries

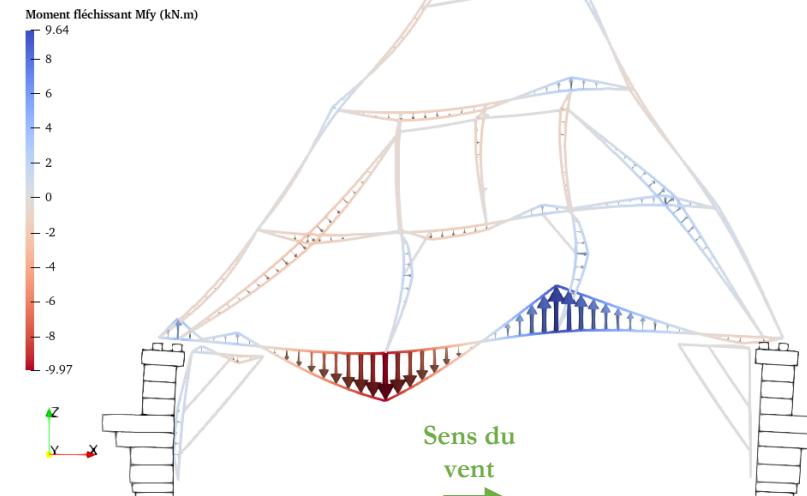
## Comportement sous charges de vent

Diagrammes d'efforts intérieurs tracés sur la déformée x100

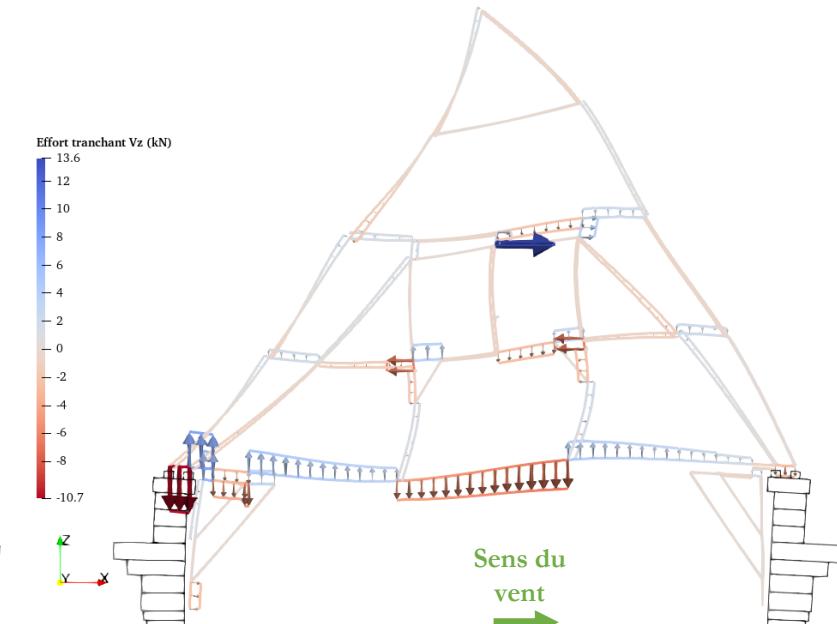
Effort normal N



Moment fléchissant Mfy



Effort tranchant Vz



Simulation de la charpente filaire avec la maçonnerie

De même que sous poids propre seul, contribution significative de l'entrait en traction dans l'interaction charpente-maçonnerie sous charges de vents

# Modélisation des interactions charpentes-maçonneries

## Comportement sous charges de vent

Suivi des réactions horizontales de la charpente filaire au cours de l'application du chargement de vent :

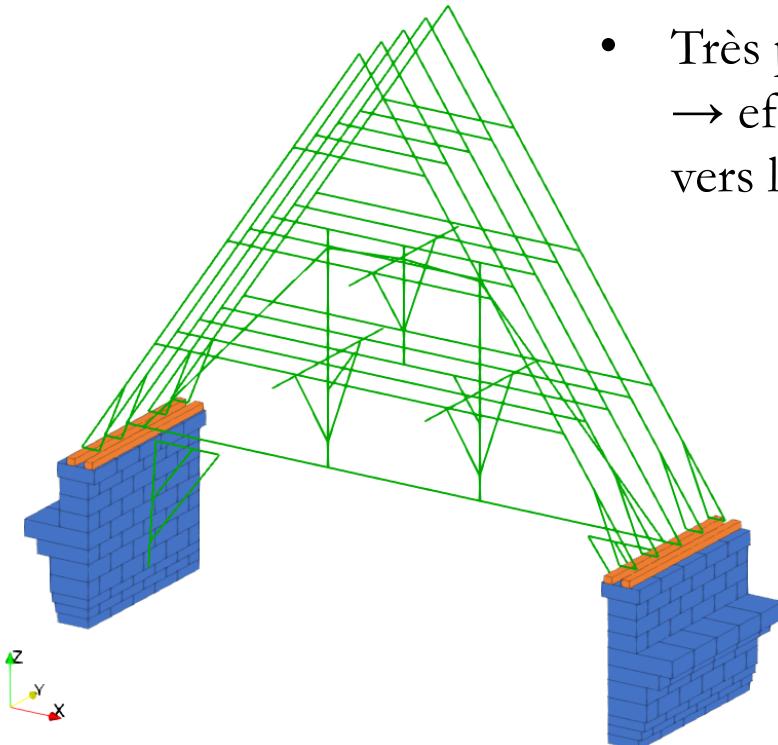


Niveau de vent nécessaire pour commencer à solliciter sérieusement l'appui de console sous le vent : après 190 % du chargement de vent max Eurocode

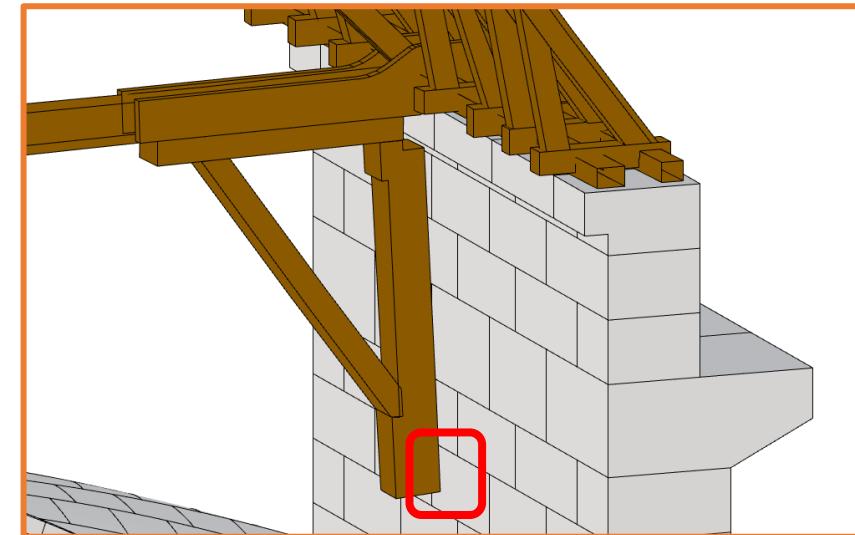
## 5. Conclusions et perspectives

# Principales conclusions

- Prise en compte des interactions entre **murs gouttereaux**, **sablières** et **charpente**  
→ influence importante sur la redistribution des charges horizontales et verticales de la charpente, sur les efforts internes de l'entrait

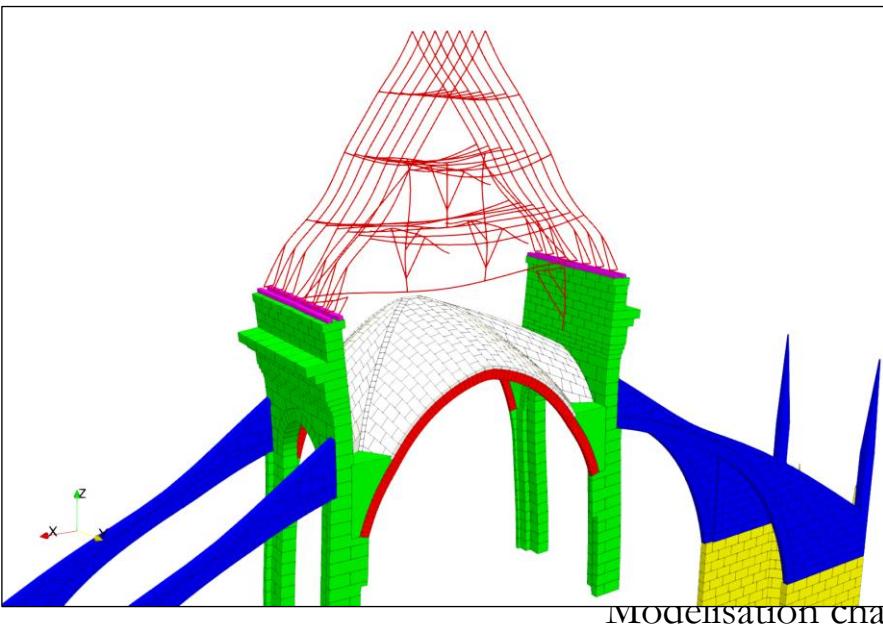


- Très peu d'efforts horizontaux transmis par les **pieds de consoles**  
→ efforts horizontaux transmis principalement par les **sablières** vers les **murs gouttereaux**



# Perspectives

- Évaluation de l'influence de la prise en compte de l'**integralité de la demi-travée** : murs gouttereaux + demi-voûte + arcs-boutants
- Évaluation de l'influence de la prise en compte de **raideurs d'assemblages**, des auto-contraintes dues au **séchage** (assemblages réalisés avec du bois vert)
- Recherche du chargement de vent de **rupture** : prise en compte de la rupture progressive des assemblages au fur et à mesure de l'augmentation du chargement à l'aide de seuils de rupture ? Plasticité dans le bois ?



Modélisation charpente-maçonnerie de la cathédrale Notre-Dame de Paris





S. Morel, T. Parent, J.-C. Mindegia,  
J.-L. Coureau, A. Cointe



P. Morenon, P. Nougayrede



P. Taforel, F. Dubois



P. Nougayrede, T. Ciblac,  
M. Brocato (†2023)



D. Garnier



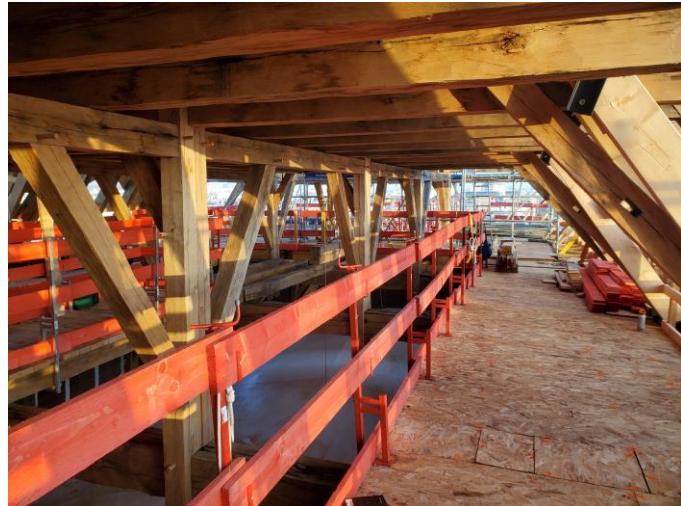
A.-S. Colas



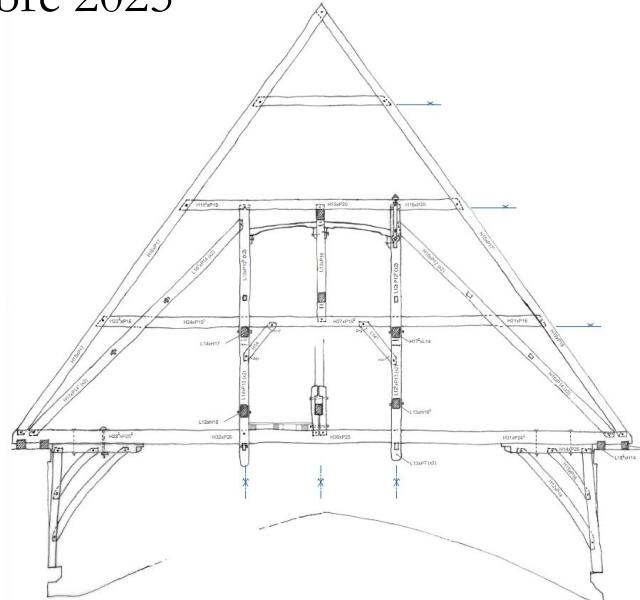
M. Bagneris, F. Cherblanc

# Modélisation de l'interaction charpente-maçonnerie de la cathédrale Notre-Dame de Paris sous charges de vent

Club Cast3m - 28 novembre 2025



P. Nougayrede, 2023



R. Fromont, 2015