



**Équipe : EMPC/DGS**

**CONTRIBUTION POUR L'ÉTUDE DE LA PERFORMANCE  
SISMIQUE DES CADRES EN BÉTON ARMÉ  
AVEC REMPLISSAGE EN MAÇONNERIE**

**KHELFI Mebarek**

# PLAN DE PRÉSENTATION

## Introduction

- Problématique
- Objectifs

## Méthodes de calcul

- Micro et Macro modèles
- Modèle de la bielle équivalente

## Amélioration du comportement sismique

## Mode de construction

- Avantages et inconvénients
- Mécanismes de rupture

## Modèle Numérique Proposé

- Validations du modèle

## Conclusions et Recommandations

# INTRODUCTION

Le séisme représente une menace sur l'homme et son environnement direct.



Face à cette relative impuissance, il faut se concentrer sur la réduction de la vulnérabilité, c'est-à-dire la **limitation** des dommages sur les **constructions**

En Algérie, Les cadres en **Béton Armé** avec Remplissages en **Maçonnerie** de brique ( ou **BAMR** tout court) représente le mode de construction le plus employé.



Photo : Carcasse d'une maison.  
Reghaia (Alger).



Ce Mode de construction est intensivement utilisé pour des fins d'habitation, commerciales ou industrielles.

Les éléments en béton sont conçus pour supporter les charges (**Éléments principaux**).

La maçonnerie en briques est utilisée comme élément de remplissage seulement (**Éléments secondaires**).

## EN CAS DE SEISME

La situation est différente

### Mathematical micromodeling

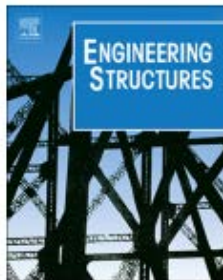
of infilled frames:

**State of the art (2013)**

P.G. Asteris,  
D.M. Cotsovos  
C.Z. Chrysostomou  
A. Mohebbkhah  
G.K. Al-Chaar  
S. T. Antoniou  
D. S. Sophianopoulos

Recent advances in research (Zarnić et al. 2001; Moghaddam 2004; Hashemi and Mosalam 2006; Rodrigues et al. 2008; Dolšek and Fajfar 2008; Kose 2009) have shown that a **strong interaction** exists between an infill masonry wall and the surrounding frame, leading to the following:

P.G. Asteris and al (2013)



# PROBLÉMATIQUE

(see Fig. 1). As a result, the necessity of incorporating infill walls into FE models used for the structural analysis of RC frame structures, while at the same time employing constitutive models capable of providing a realistic description of the nonlinear behavior of concrete, masonry and their interaction, becomes evident.

P.G. Asteris and al (2013)

Il existe encore une négligence de leur contribution pour deux raisons :

- 1- Difficulté de la modélisation de matériaux fragiles.
- 2- Dispersion des résultats fournis par les essais expérimentaux.

Les modèles mathématiques existants ne peuvent pas décrire FACILEMENT le comportement réel des BAMR.

Ce n'est pas étonnant de ne pas avoir encore un consensus sur une approche unifiée permettant l'analyse des structures en BAMR.

Malgré il est devenu évident la nécessité d'incorporer les panneaux de remplissage dans le calcul des BAMR

The widespread neglect of the contributions of infill walls during structural analysis can be attributed, in part, to difficulties associated with the modeling of the behavior of quasi-brittle materials such as unreinforced masonry (URM) or concrete. Another reason for the neglect is the scatter that pervades the available published experimental data describing the behavior of such brittle materials, as well as the effect of infill walls on the overall structural response of the frames. This scatter stems from a large number of uncertainties, discussed in detail in section 2, which are involved in the various investigations carried out to date. In view of the above, the existing mathematical (numerical or analytical) models – the formulation and validation of which is based on the available experimental data – cannot be readily relied upon to obtain a realistic description of the structural response of infilled RC frames. So, it is not surprising that no consensus has yet emerged which would lead to a unified approach for the analysis and design of infilled frame structures.

P.G. Asteris and al (2013)

# OBJECTIFS

1

- Contribution : Proposition d'un modèle numérique

2

- Conception pour l'amélioration du comportement sismique

## Maçonnerie

Mode de construction le plus ancien

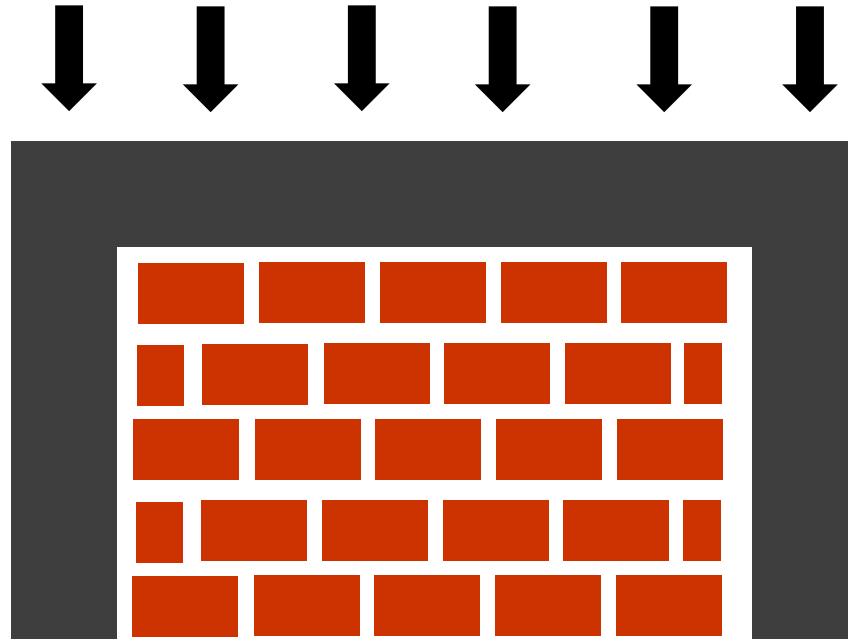


La technique d'empilement des briques est restée essentiellement la même au fil du temps.

Les briques prennent alors des formes beaucoup plus standards et régulières.



Avec le progrès du béton, les éléments en **BA** deviennent principaux pour **SUPPORTER** les charges verticales et la **MAÇONNERIE** est utilisée comme élément de **REEMPLISSAGE** seulement.



Cette **ASSOCIATION** du béton armé avec la maçonnerie fait apparaître le système de structure dit **ossatures en béton armé** avec remplissage en **maçonnerie** ou « **BAMR** » tout court.

# EXPERIENCE DU SEISME DE 2003 (BOUMERDES)

Les BAMR représentent entre **80% à 90%** des constructions dans la zone sinistrée.

*(Rapport préliminaire du séisme de Boumerdès 2003, Davidovichi. V)*



# EFFETS DES REMPLISSAGES SUR LE COMPORTEMENT DES CADRES EN BETON ARME

## AVANTAGES:

- 1- Augmentation de capacité latérale du cadre en BAMR
- 2- Augmentation de la rigidité latérale du cadre en BAMR
- 3- Augmentation de la capacité de dissipation de l'énergie sismique

## INCONVENIENTS:

1- Rigidité élevée



Efforts sismiques élevés



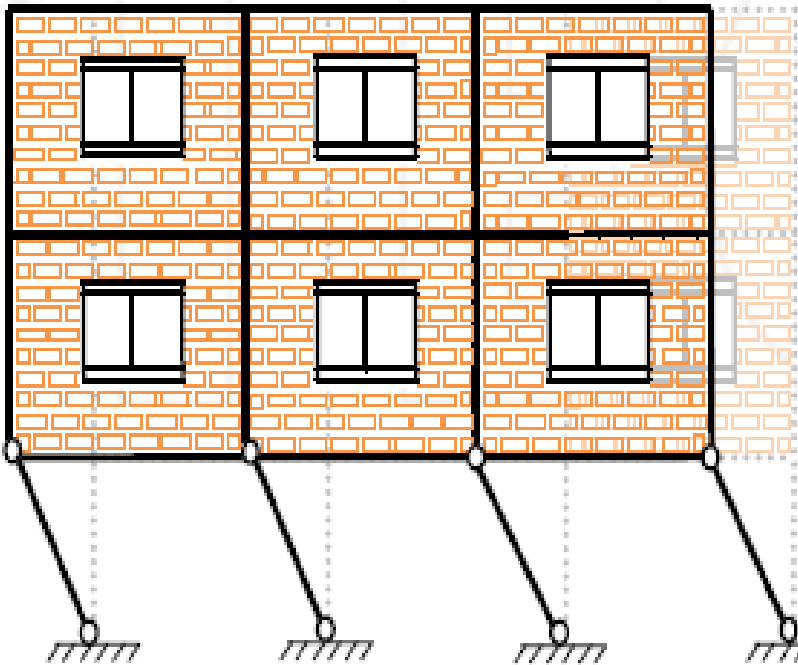
(Chlef, 1980).

2- Détachement hors plan  
des remplissages.



(Californie, 1989).

### 3- Phénomène de l'étage souple



(Boumerdès, 2003).

#### 4- Effet du poteau court



(Californie, 1994)



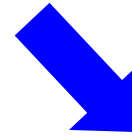
(Italie, 2002)

#### 5- Effet de la torsion.



(Kobe, 1995)

# MECANISMES DE RUPTURE DES BAMR

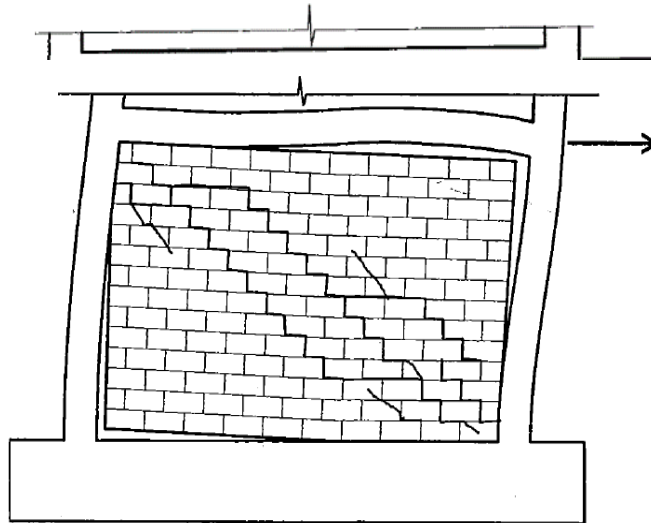


Mécanismes de rupture  
associés au **REEMPLISSAGE**

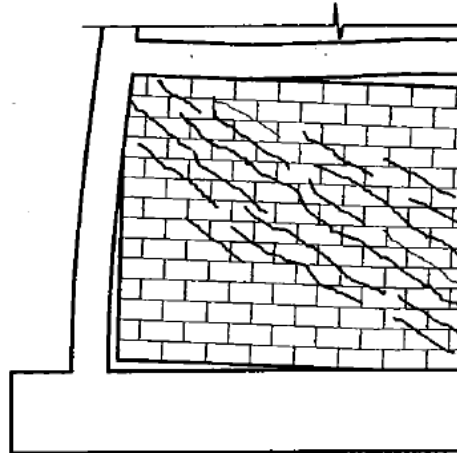
Mécanismes de rupture  
associés au **CADRE en BA**

# Mécanismes de rupture associés au **REEMPLISSAGE**

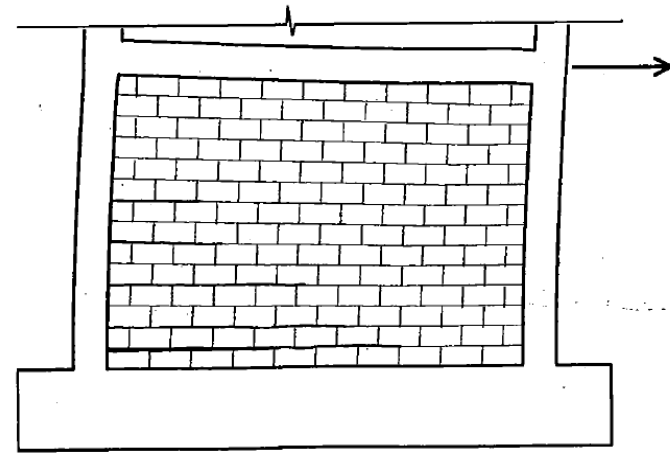
Rupture du panneau  
en Cisaillement



Rupture du panneau  
en compression



Rupture du panneau  
en flexion



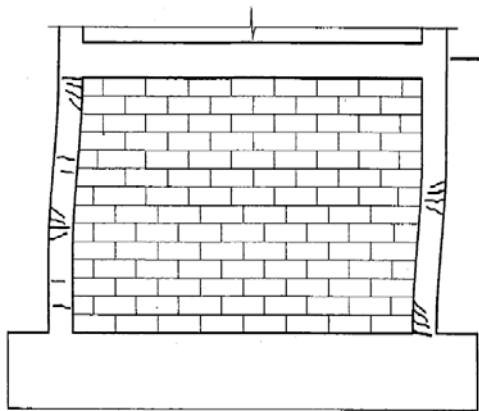
Rupture

Rupture

par cisaillement et par écrasement des briques  
diagonale

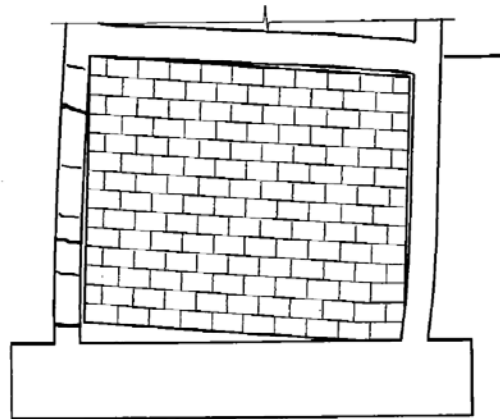
# Mécanismes de rupture associés au CADRE en BA

Flexion  
des poteaux



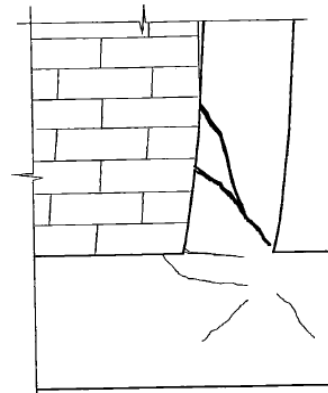
Plastification  
des extrémités

Traction  
des poteaux

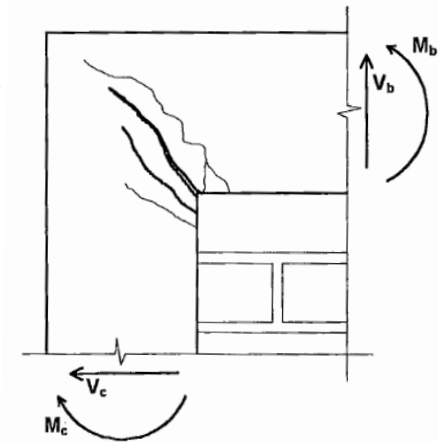


Déstabilisation  
des briques

Cisaillement  
des poteaux

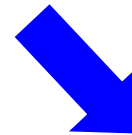


Rupture  
des nœuds



# CALCUL DES STRUCTURES EN BAMR

## MÉTHODES DE CALCUL DES OSSATURES EN BAMR



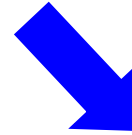
Méthodes **EMPIRIQUES**  
Wood (1958)

Méthodes **THÉORIQUES**

# MÉTHODES THÉORIQUES



Méthodes basées sur  
la théorie de l'élasticité  
(Fonction d'Airy)



Méthodes basées sur  
la méthode des éléments finis



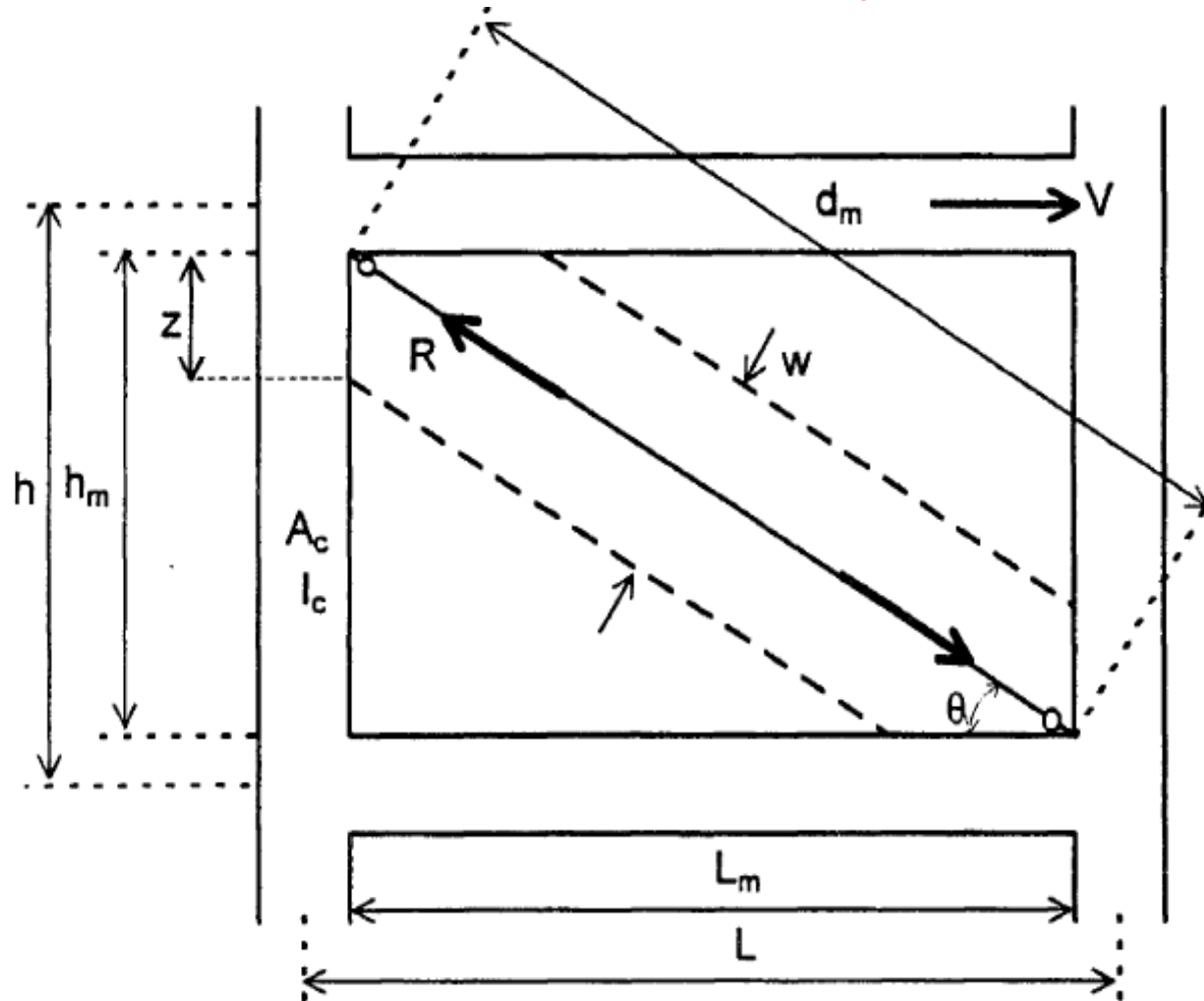
MICRO-MODELES



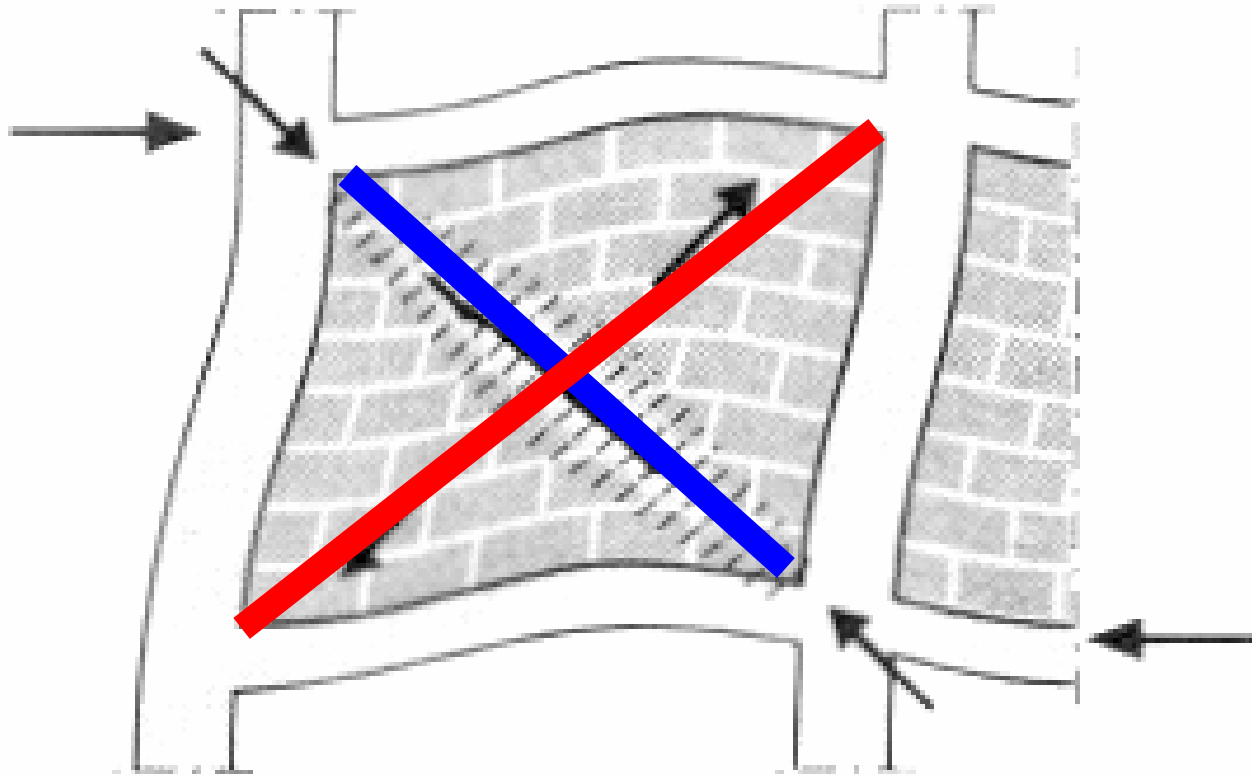
MACRO-MODELES

# MACRO-MODELES ➔ BIELLE EQUIVALENTE

Polyakov ( 1960)

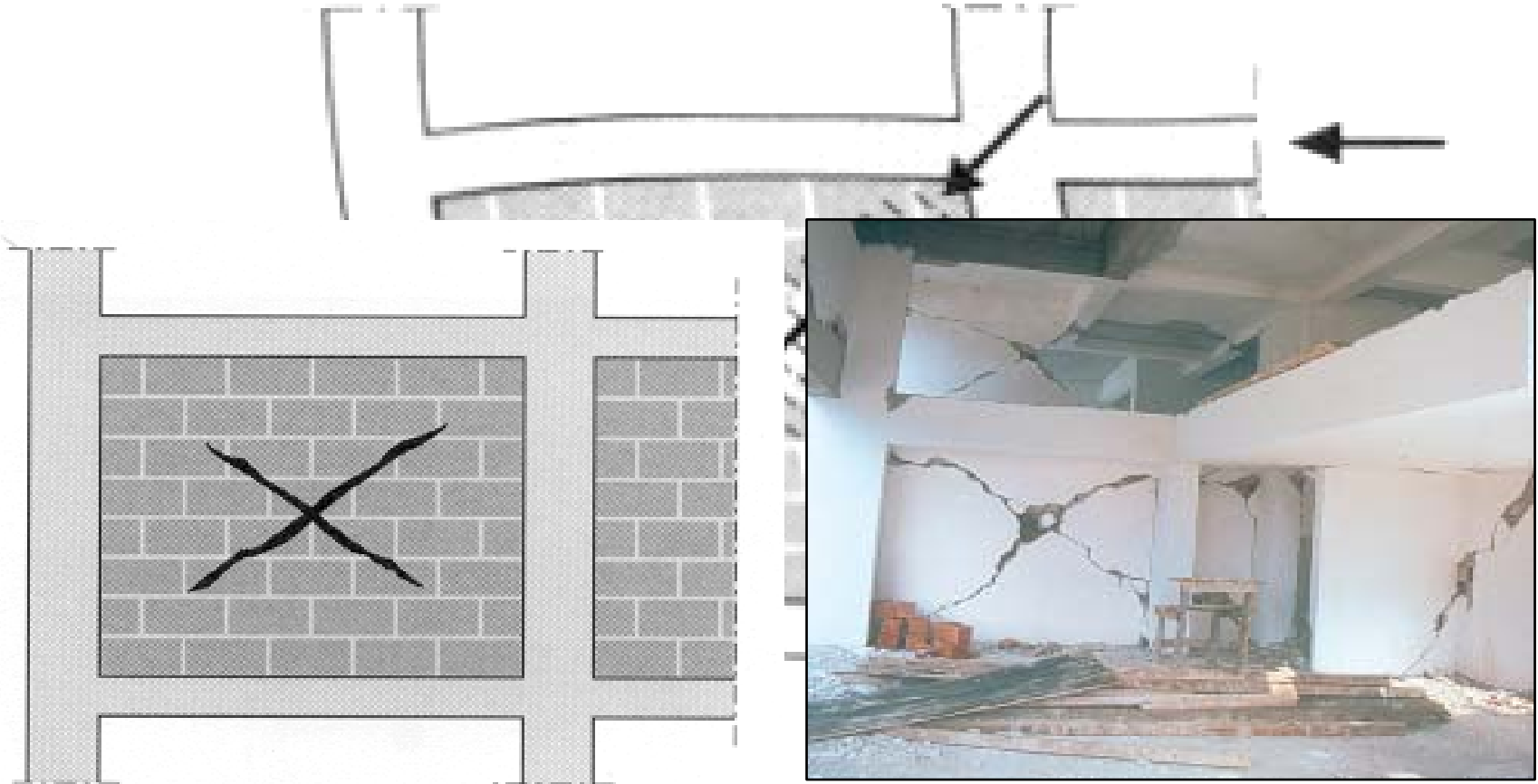


## SOUS SOLLICITATIONS HORIZONTALES



## RÉSULTAT

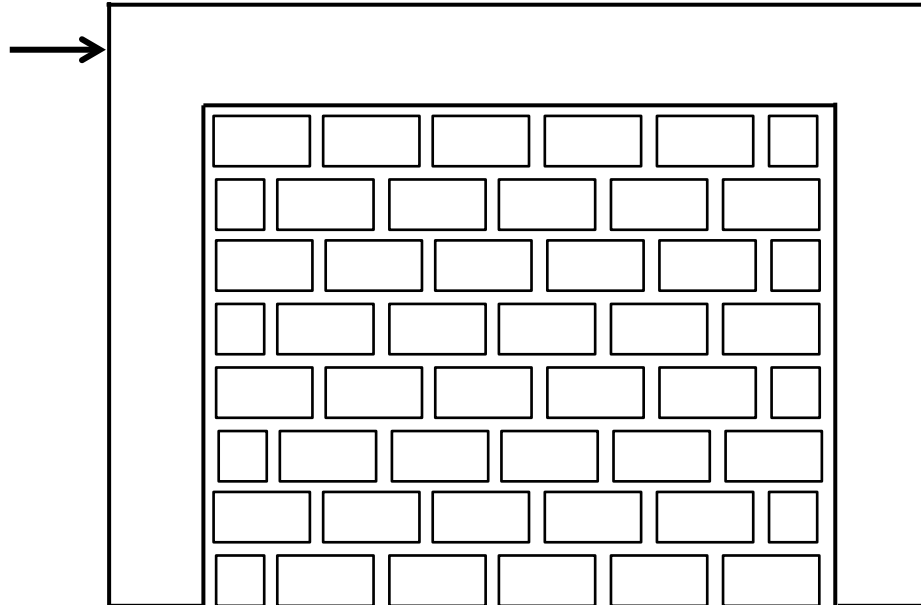
Fissure classique en X.



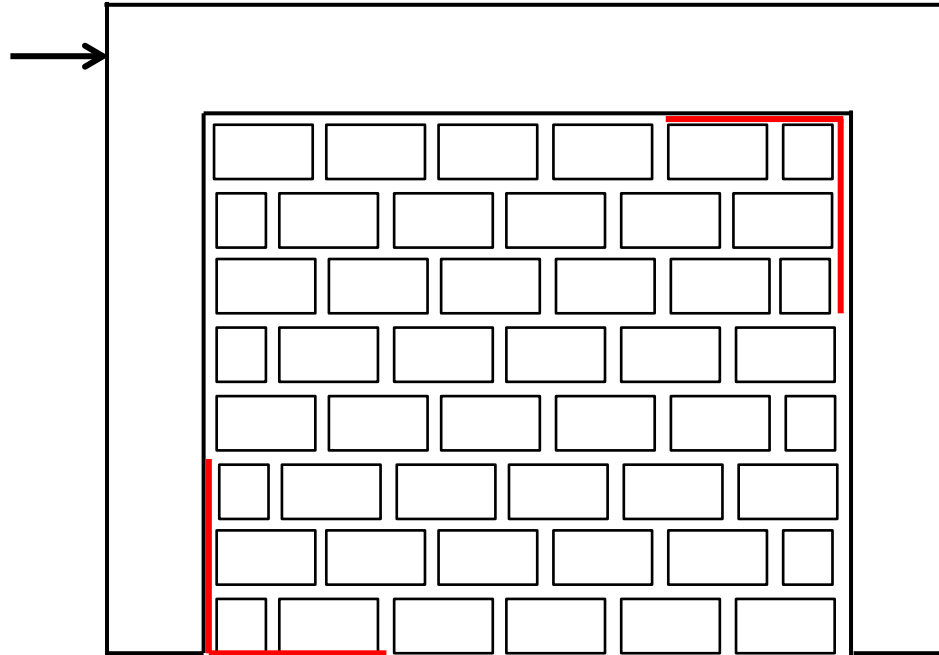
Séisme de Turquie, 1999

# PHASES DU COMPORTEMENT DU REMPLISSAGE

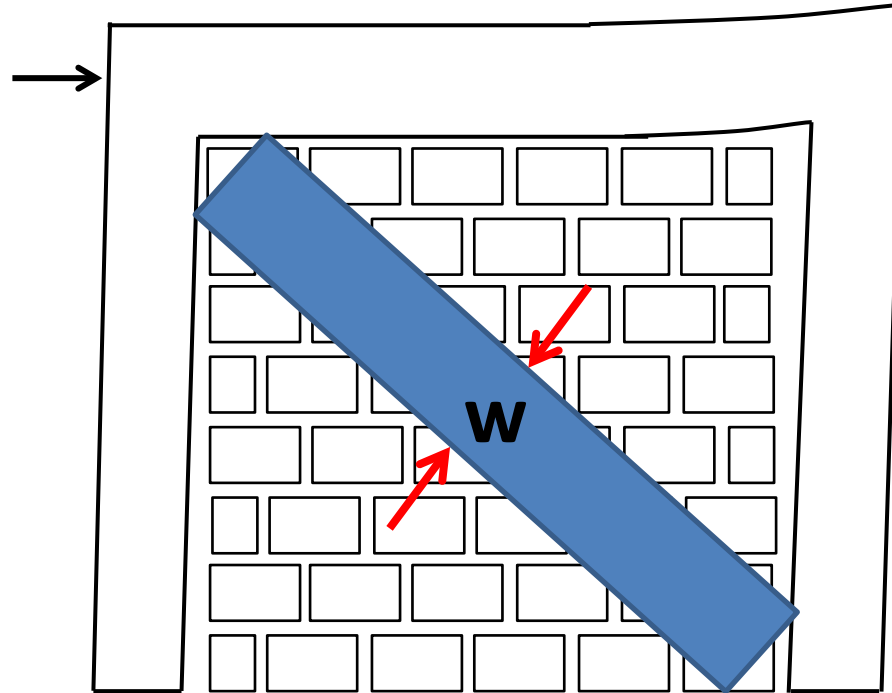
## PHASE 1 : COMPORTEMENT MONOLITHIQUE (Sous des efforts relativement faibles)



## PHASE 2 : FISSURATION ET DETACHEMENT



## PHASE 3 : FORMATION DE LA BIELLE DIAGONALE



|                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Holmes (1961)             | $w = \frac{1}{3} d_m$ ( $d_m$ : est la longueur de la diagonale)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Smith and al (1962)       | $w = 0.58 \left(\frac{1}{h}\right)^{-0.445} (\lambda_h h_m)^{0.335} d_m \left(\frac{1}{h}\right)^{0.064}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Mainstone (1971,1974)     | $w = 0.175 (\lambda_h h_m)^{-0.4} d_m$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Decanini et Fantin (1987) | <p><b>Cas 1 : maçonnerie non-fissurée</b></p> $w = \left(\frac{0.748}{\lambda_h} + 0.085\right) d_m \quad \text{Si } \lambda_h \leq 7.85$ $w = \left(\frac{0.393}{\lambda_h} + 0.130\right) d_m \quad \text{Si } \lambda_h > 7.85$ <p><b>Cas 2 : maçonnerie fissurée</b></p> $w = \left(\frac{0.707}{\lambda_h} + 0.010\right) d_m \quad \text{Si } \lambda_h \leq 7.85$ $w = \left(\frac{0.470}{\lambda_h} + 0.040\right) d_m \quad \text{Si } \lambda_h > 7.85$ |
| Chrysostomou (1991)       | Trois bielles parallèles                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| El-Dakhakhni (2000)       | Trois bielles non parallèles                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |

## Commentaires

Le choix du modèle numérique dépend des **résultats demandés**.

Les modèles Macro peuvent fournir des résultats **Acceptables** de la résistance et de la rigidité du BAMR.

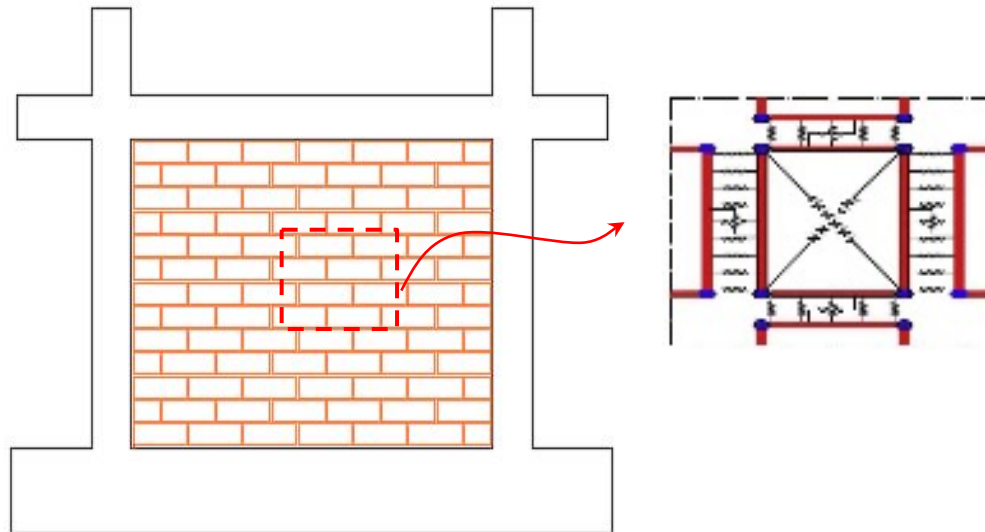
Rapidité de résolution des ces modèles favorisent leur utilisation pour les ingénieurs.

**TOUTEFOIS** ils ne prévoient pas tous les mécanismes de rupture du remplissage.

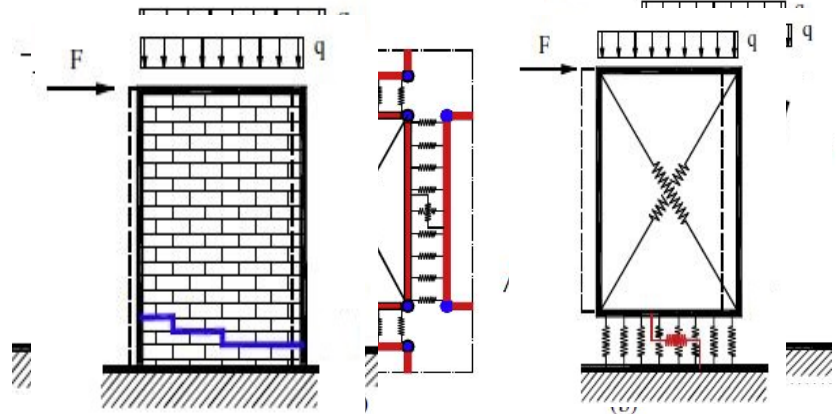
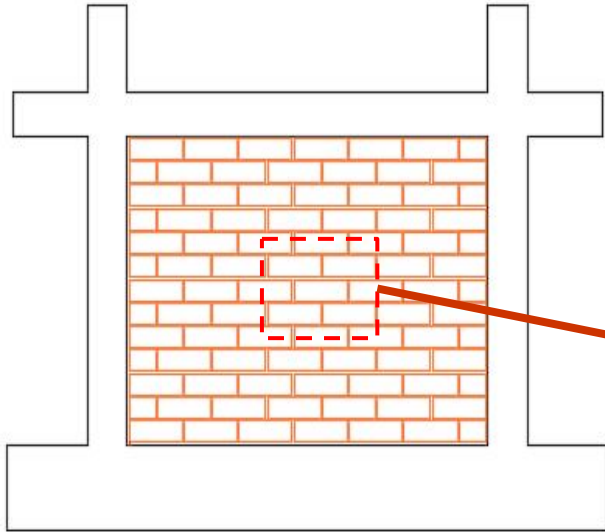
**MODÈLE QUI PEUT ALLIER LES AVANTAGES DU MACRO  
AVEC LA FINESSE DU MICRO**

## REEMPLISSAGE (OBJECTIF 1)

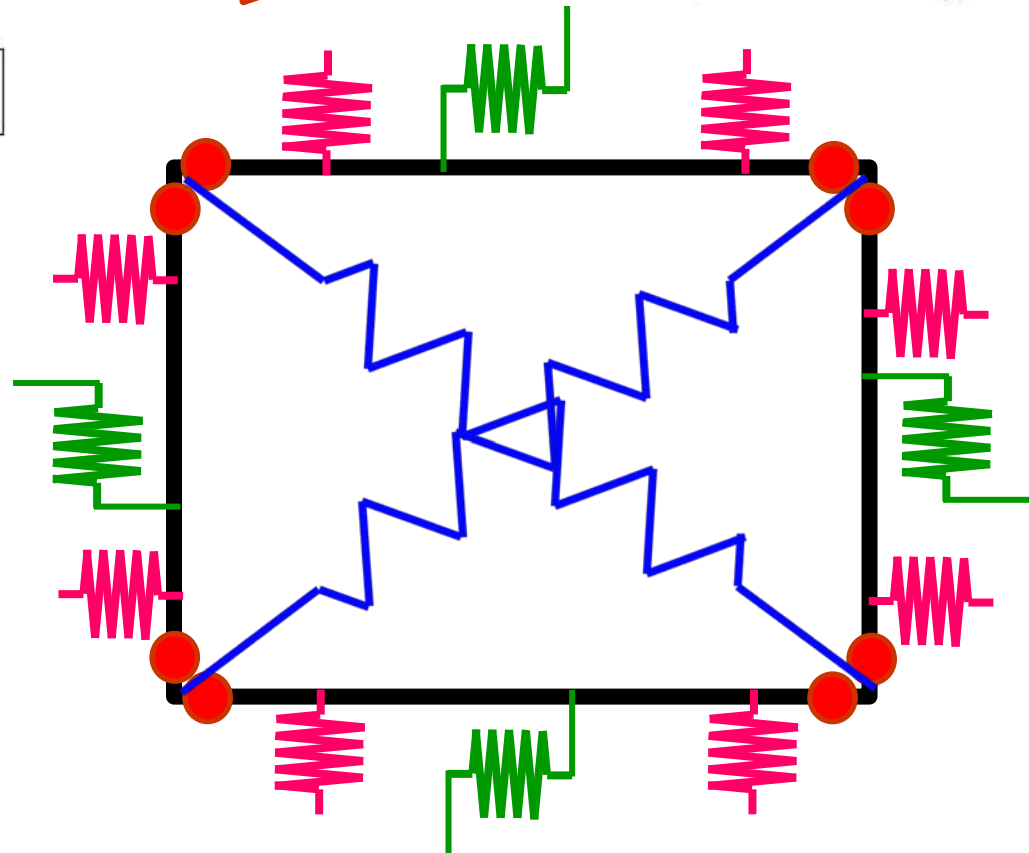
INSPIRÉ du modèle de Calìo et Pantò (2014).



# DETAILS DU MODELE NUMERIQUE



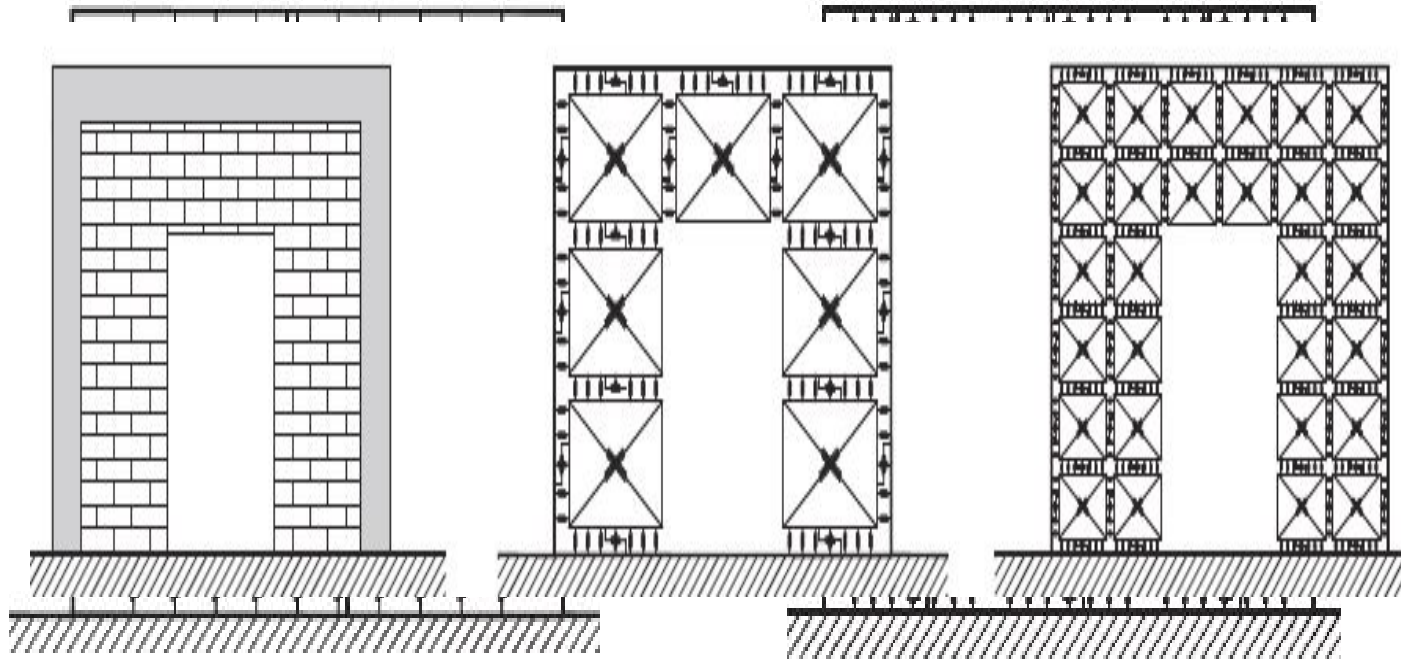
Quatre barres  
 Ressort d'interface  
 Ressort Diagonaux  
 (Compression et traction)  
 (Cisaillement)



## AUTRES AVANTAGES

ÉPOUSE la forme réelle du panneau.

POSSIBILITÉ de modéliser les ouvertures.

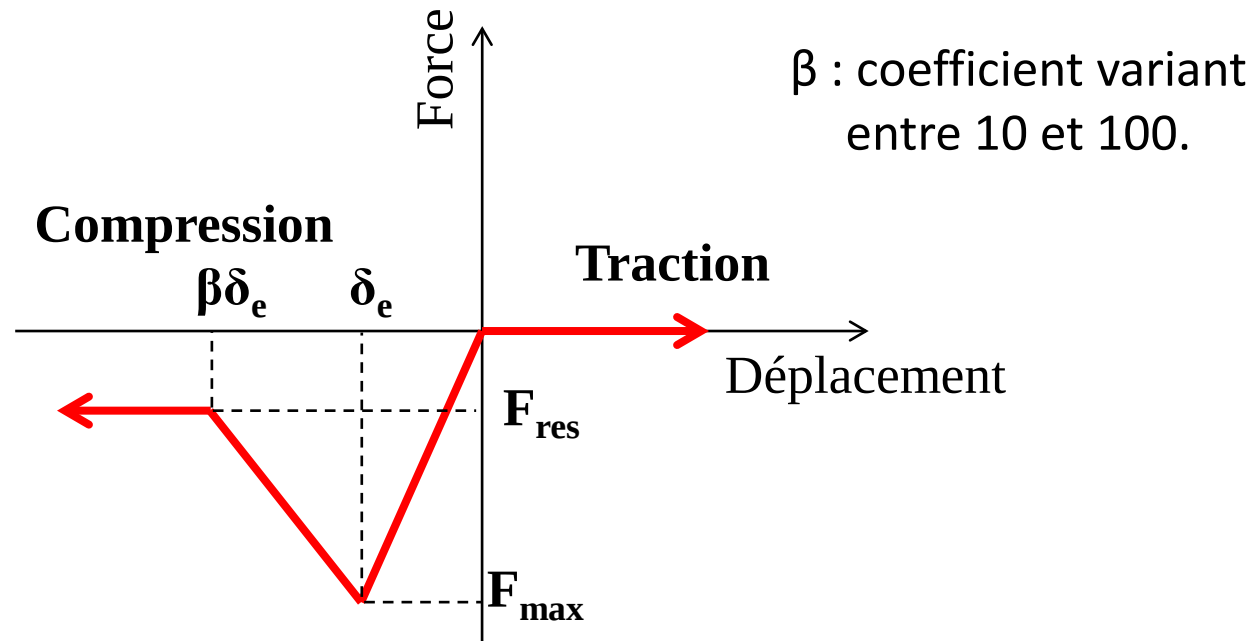


# LOIS DE COMPORTEMENT

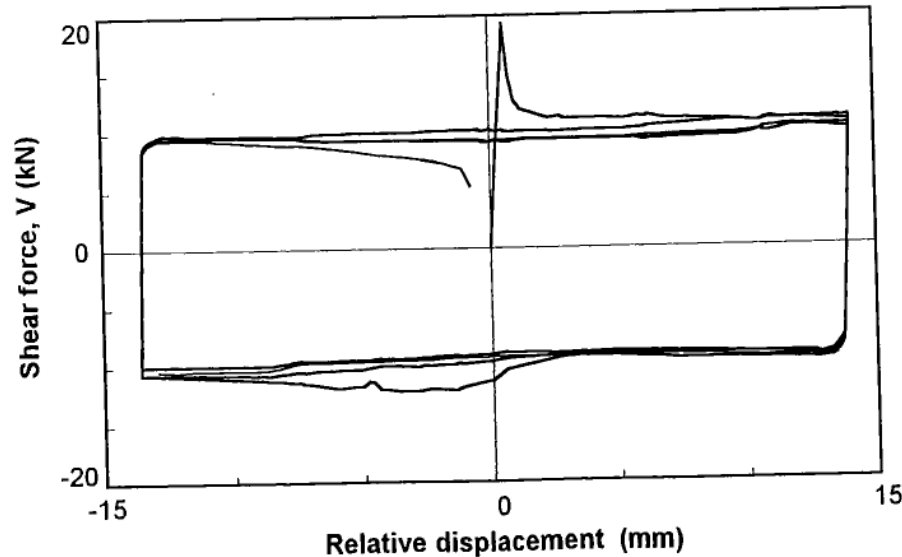
Pour les éléments d'interface une loi de comportement **ELASTO-PLASTIQUE PARFAITE** est adoptée.

## 1<sup>ère</sup> CONTRIBUTION

Adopter aux **LINKS DE CISAILLEMENT** une loi de comportement **ELASTO-PLASTIQUE FRAGILE**.



Travaux expérimentaux (Atkinson and al 1989, Crisafulli 1997) **RÉDUCTION** de l'effort interne du cisaillement .



La résistance au cisaillement est définie par la loi de **Mohr-Coulomb**

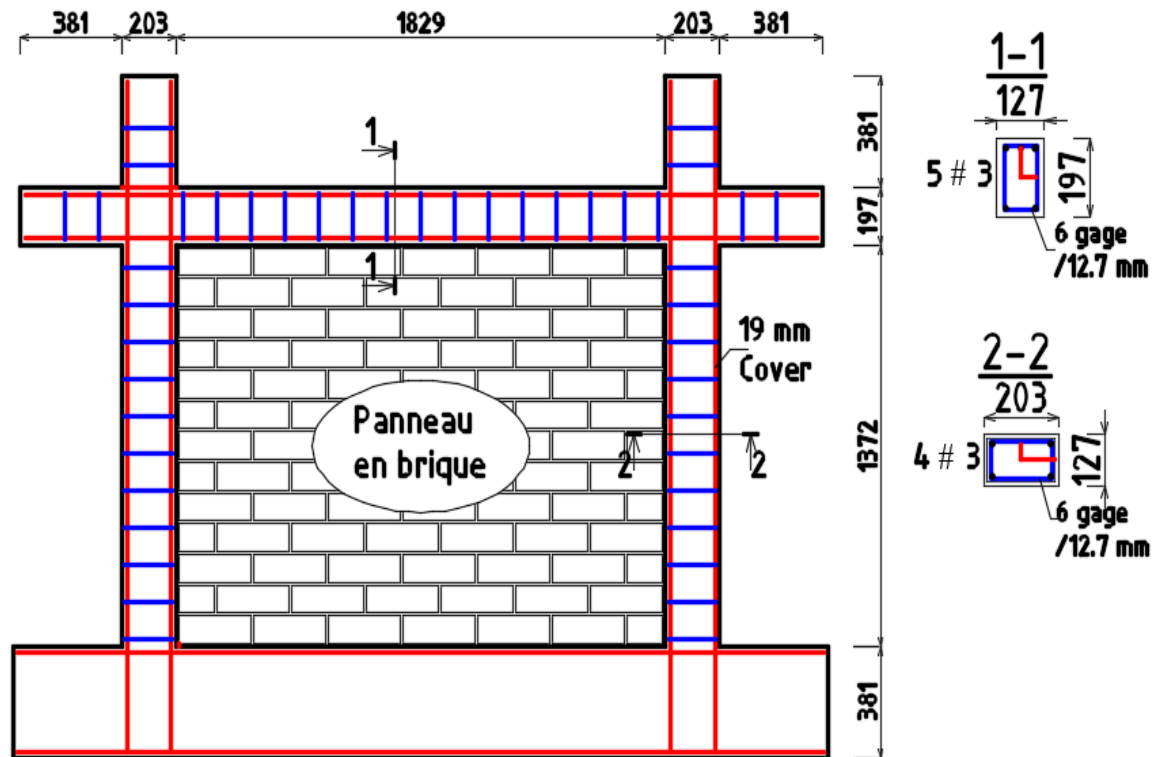
$$F_v = f_{v0} + \mu_c \sigma_n$$

Critère adopté par (EC 06)

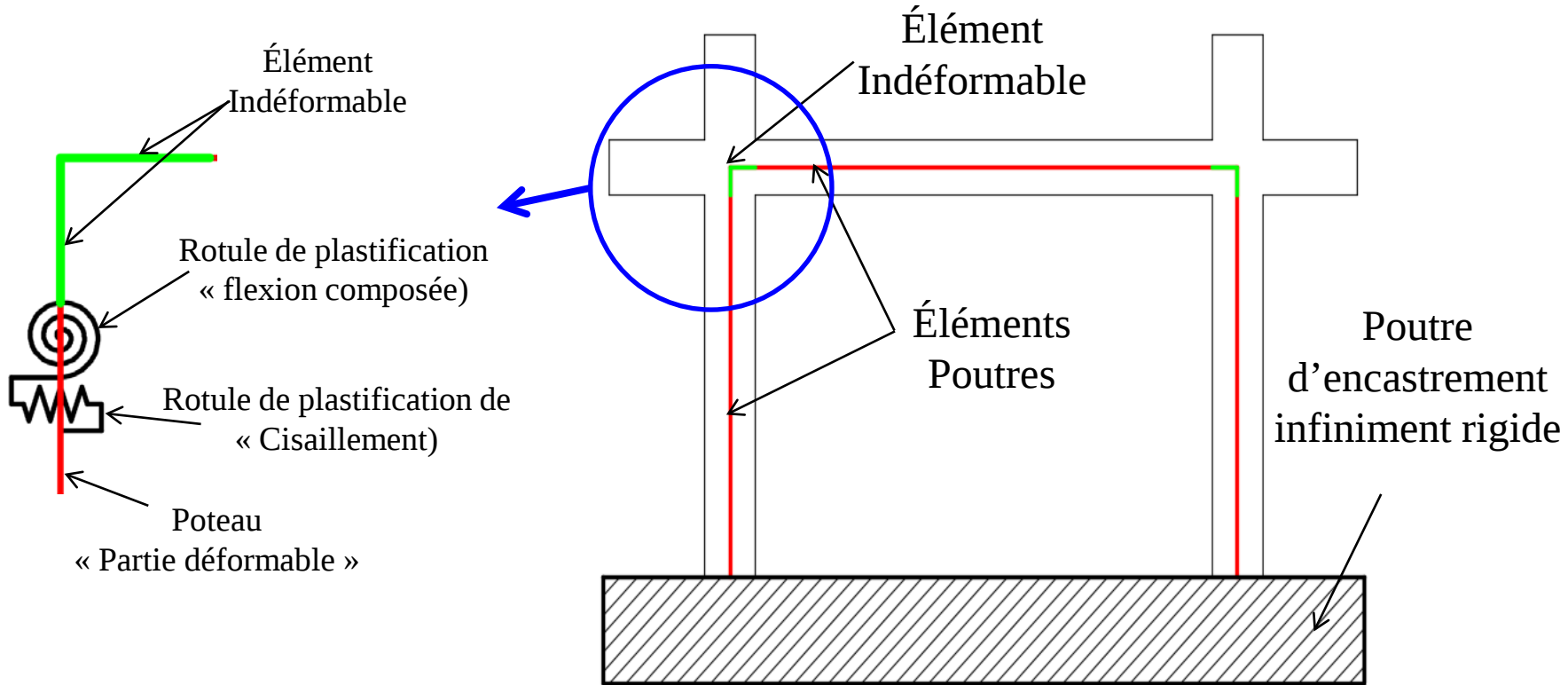
# VALIDATION DU MODELE NUMERIQUE

## Application 1

Travaux Al-Chaar.G (1998).

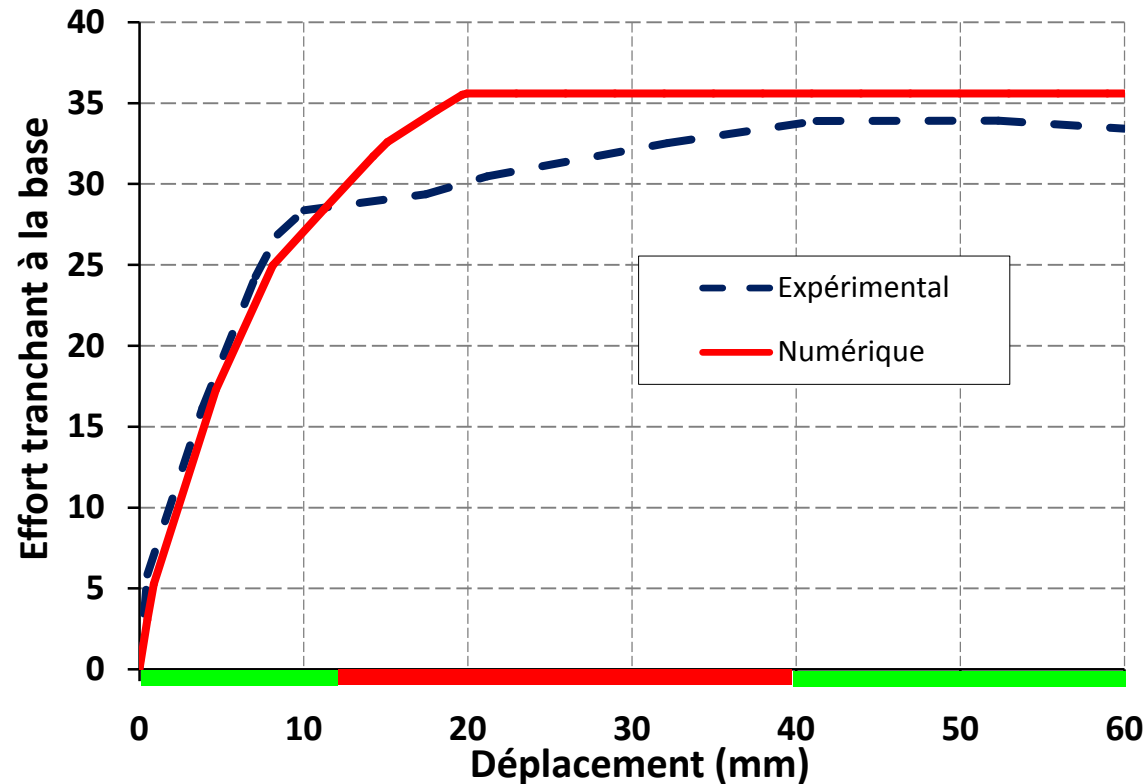


# Cadre en BA ( Cadre vide)



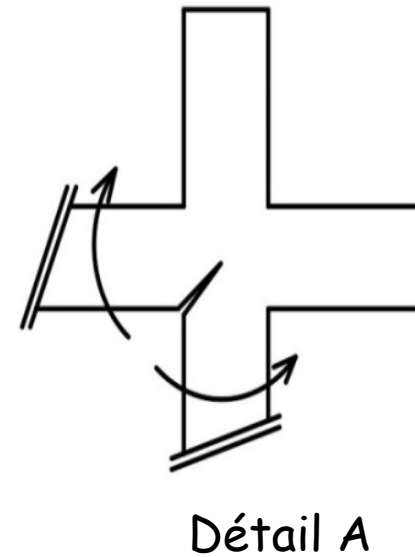
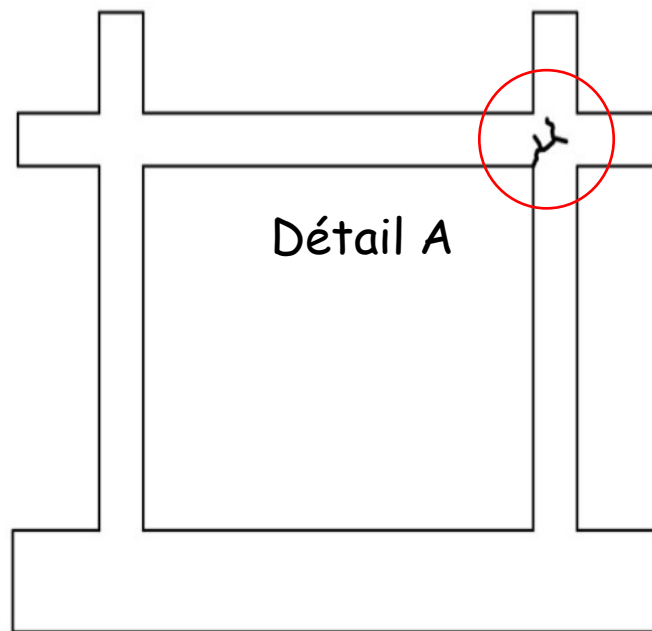
## Résultats du cadre vide en BA

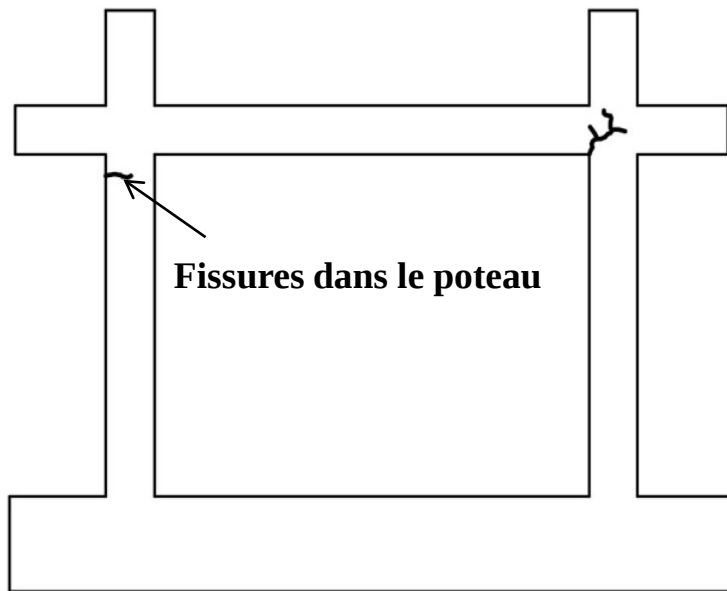
Le spécimen de référence est soumis à un test quasi-statique.



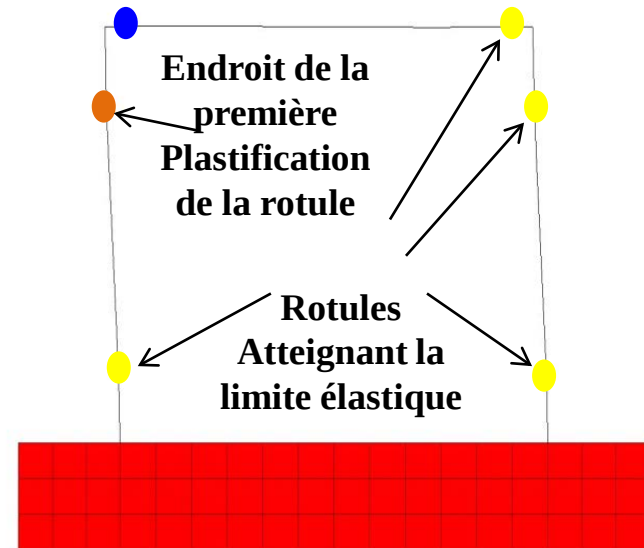
Entre [12 mm – 40 mm] l'erreur [40 mm – 60 mm] est de 5 et 18%  
maximale estimée est environ ( $\pm 5\%$ )

Fissure **prématurée** au niveau du  
**nœud Poteau-poutre** ( $\delta=12.30$  mm)



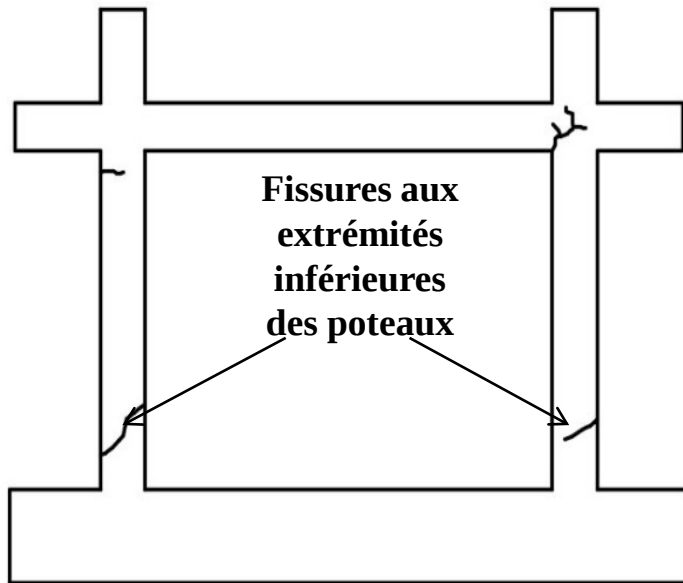


Expérimental ( 18,30 mm)

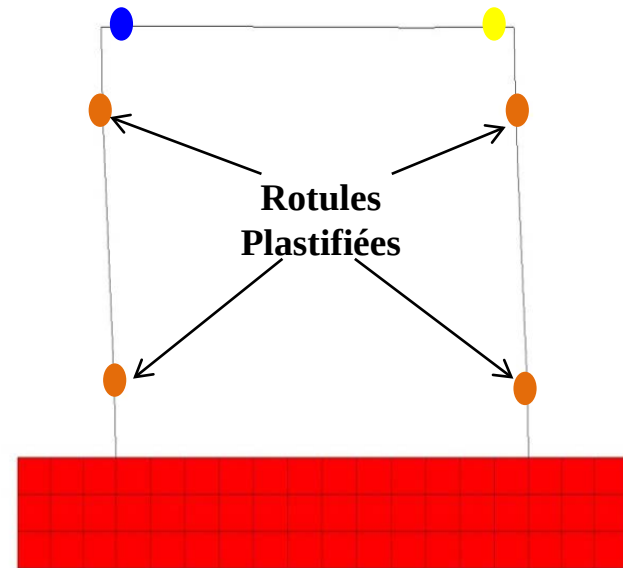


Numérique ( 18,01 mm)

## État final de rupture



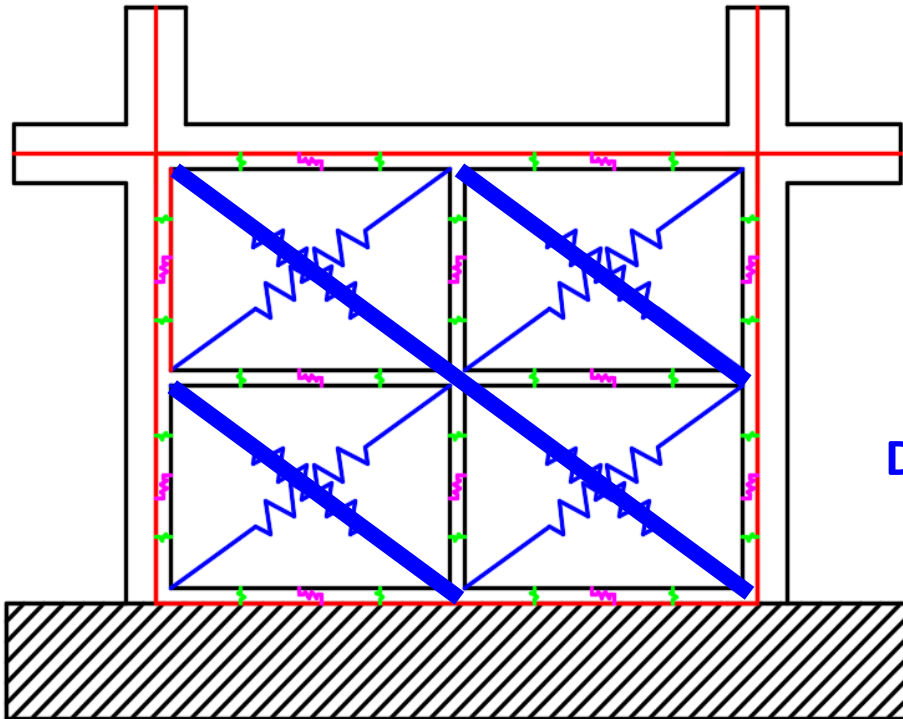
Expérimental ( 20,80 mm)



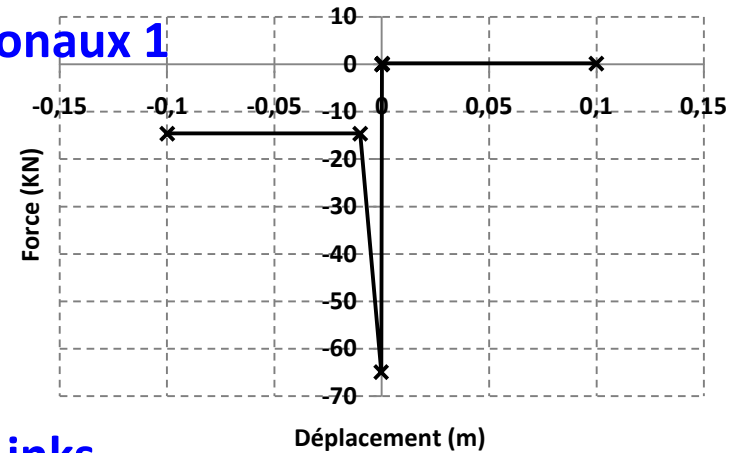
Numérique ( 19,96 mm)

# Cadre en BAMR ( Cadre remplis)

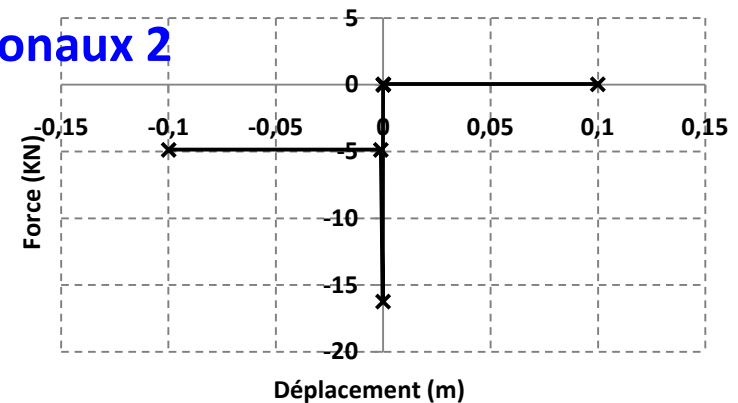
Avec maillage de (2x2) , en obtient le modèle numérique suivant :



Links  
diagonaux 1

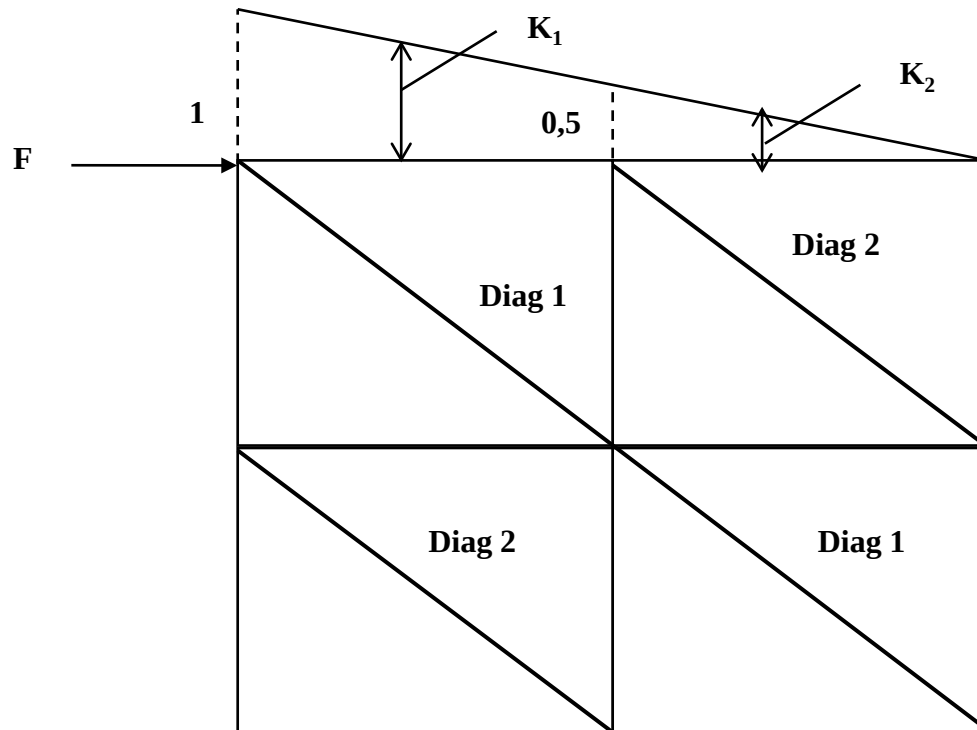


Links  
Diagonaux 2



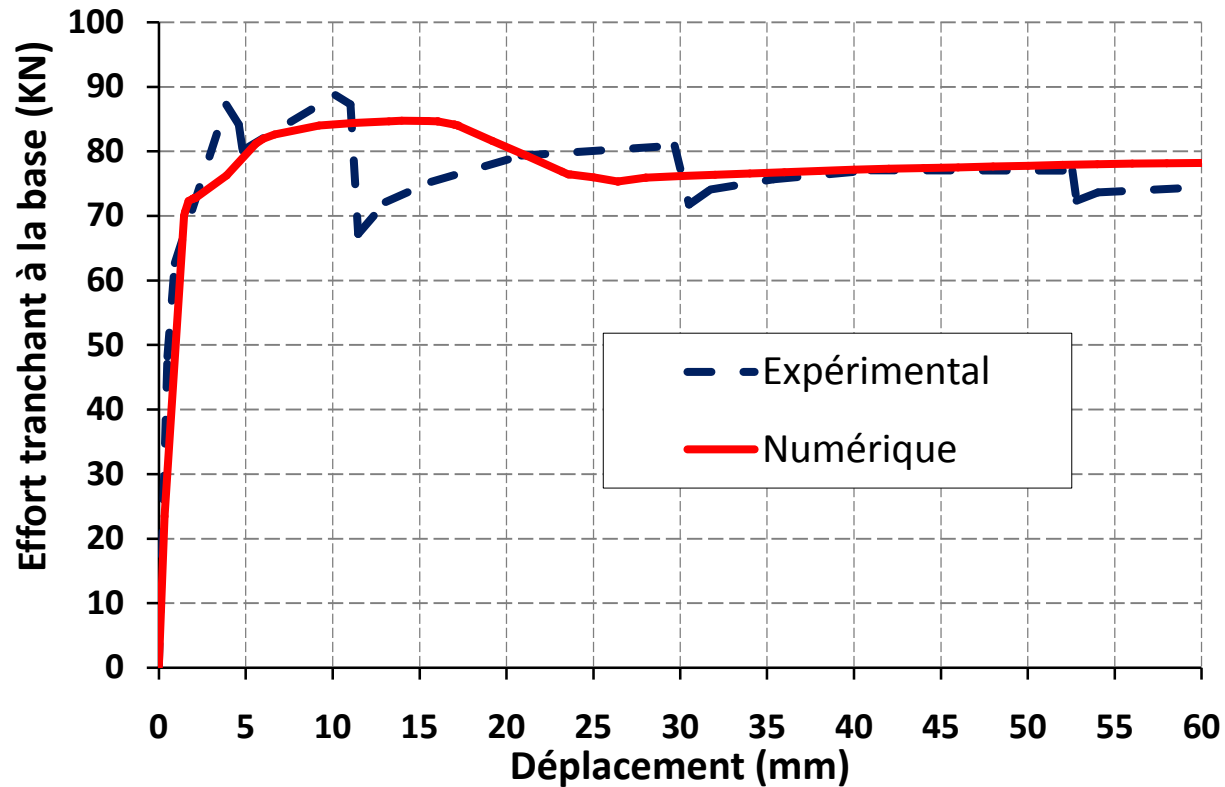
## 2<sup>ème</sup> CONTRIBUTION

Coefficients réducteurs  $K_i$  à chaque bande diagonale du maillage utilisé.

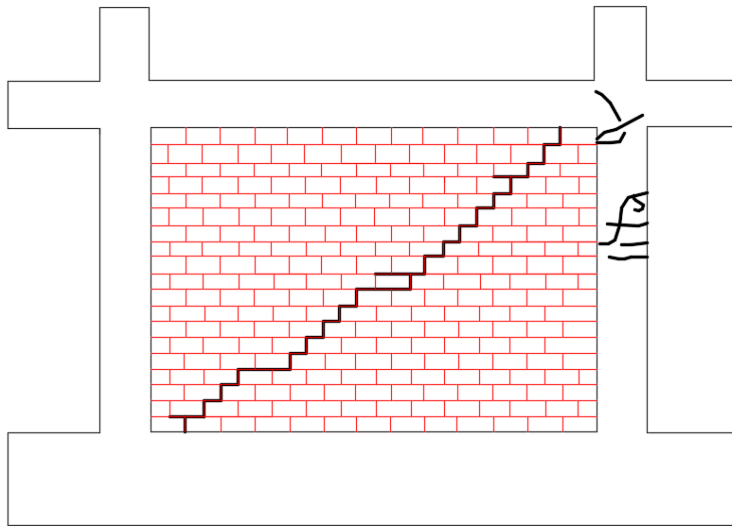


$$K_1 = 0,75$$
$$K_2 = 0,25$$

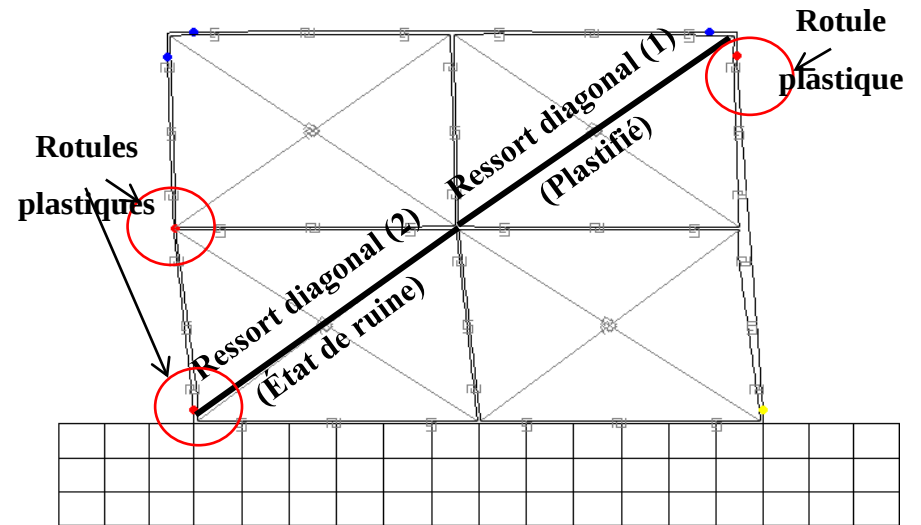
# Résultats du cadre BAMR (Remplis)



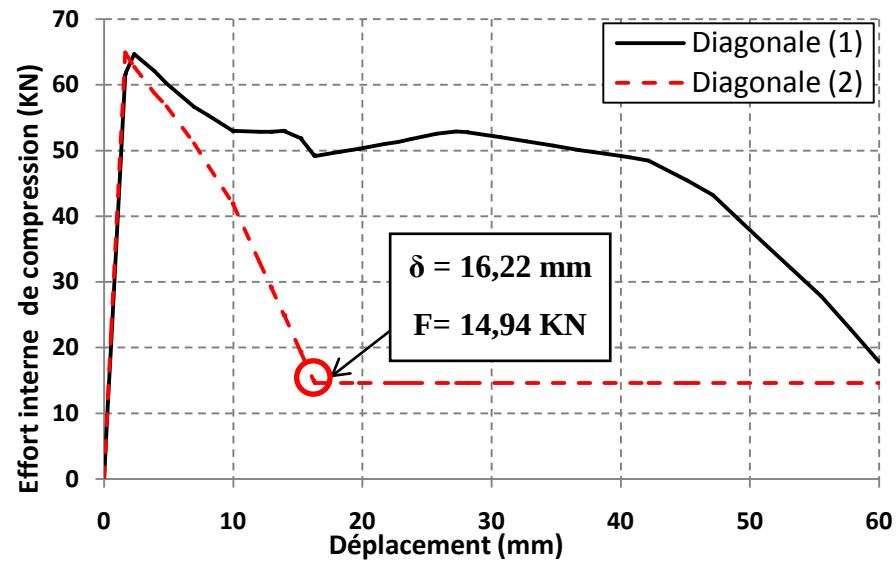
Les résultats numériques obtenus pour l'effort tranchant à la base convergent avec les résultats expérimentaux. **bonne**

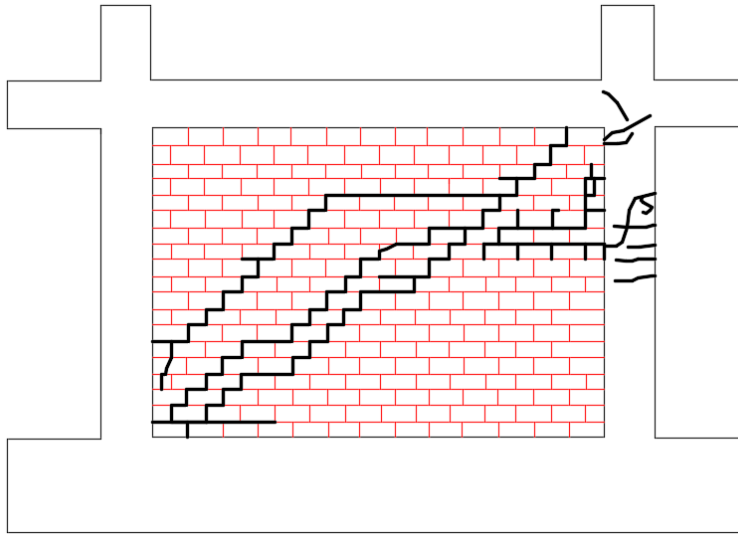


Expérimental ( 15,20 mm)

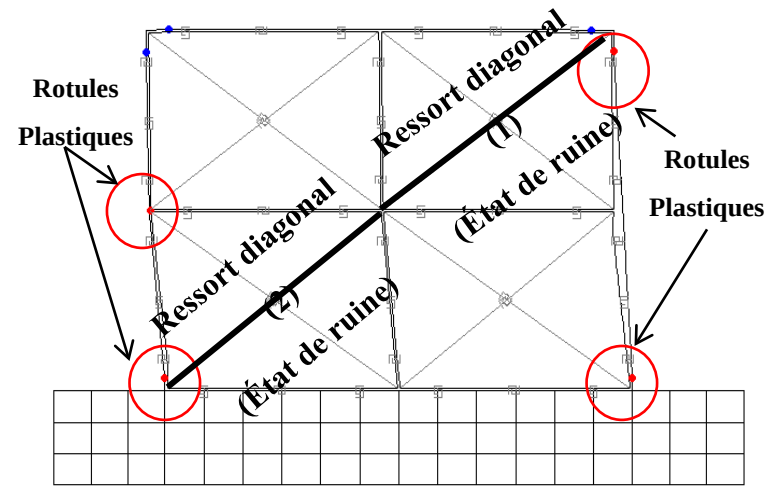


Numérique ( 16,22 mm)

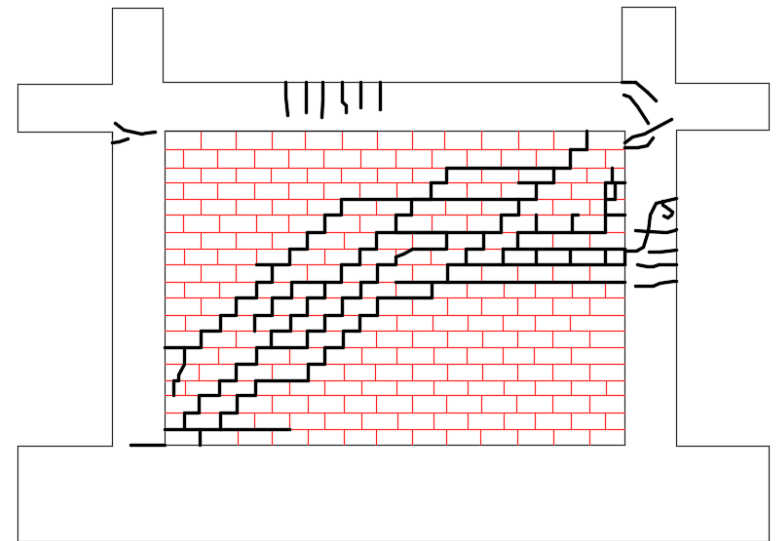
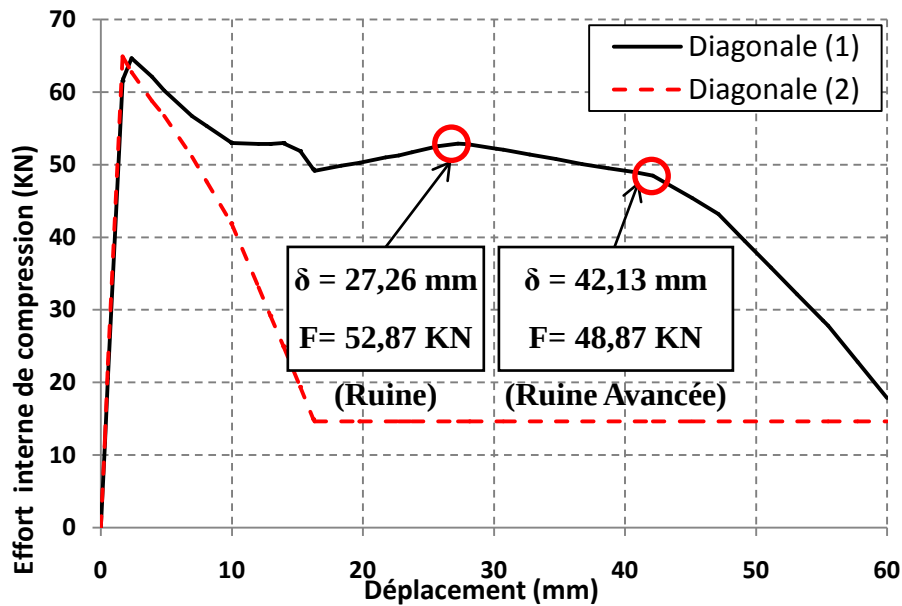




Expérimental ( 30,50 mm)



Numérique ( 27,20 mm)



Expérimental ( 50,80 mm)

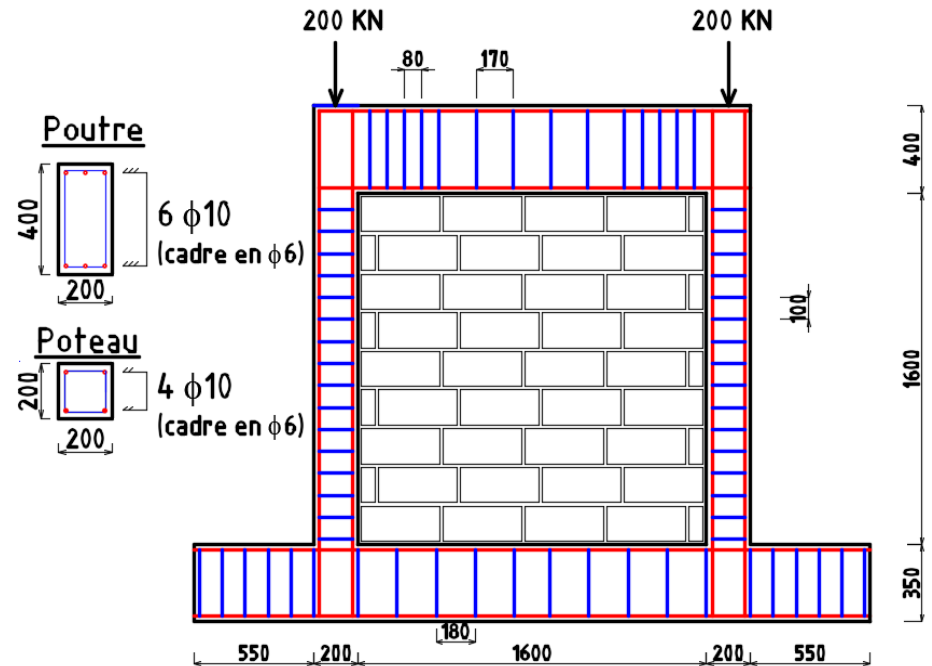
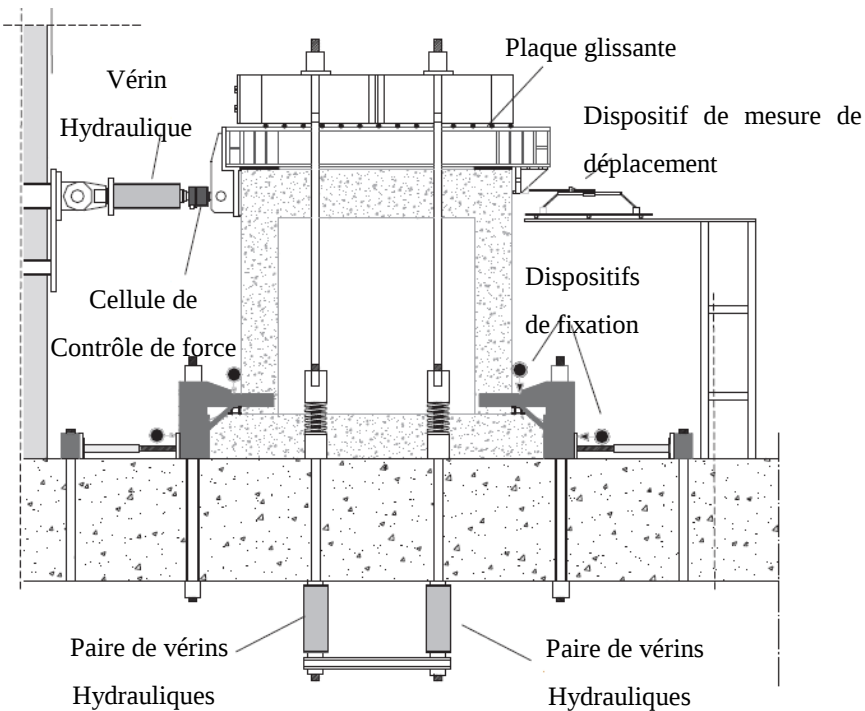
## BAMR VS Cadre vide en BA

Résistance du BAMR = 2,3 Résistance du cadre vide en BA

Rigidité du BAMR = 8 Rigidité du cadre vide en BA

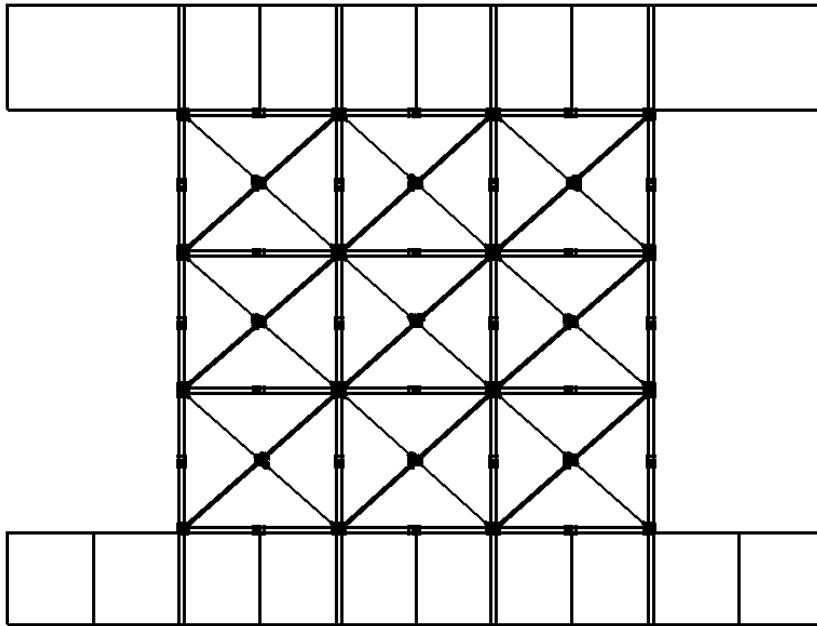
# Application 2

Travaux de L. Cavaleri et F.Di Trapani (2013).

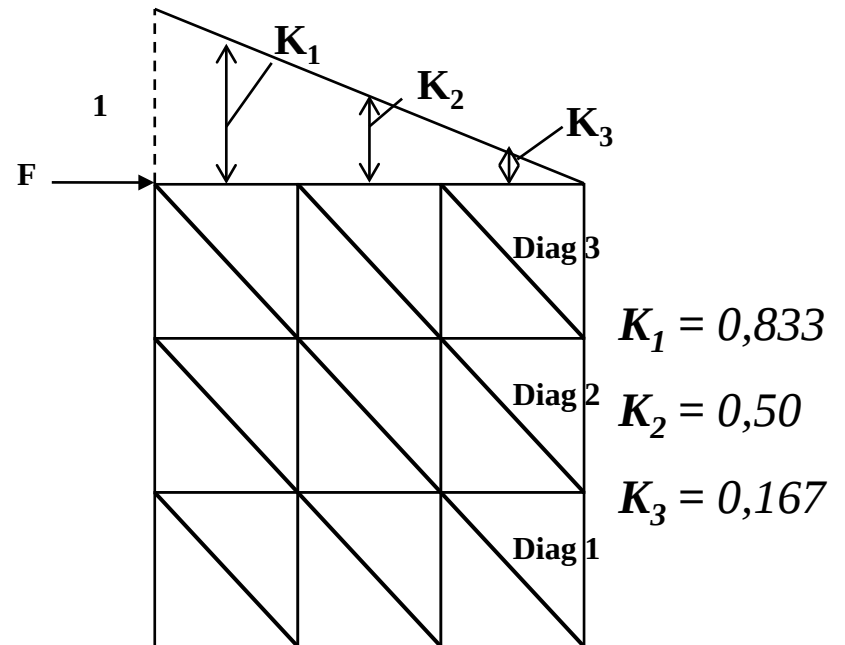


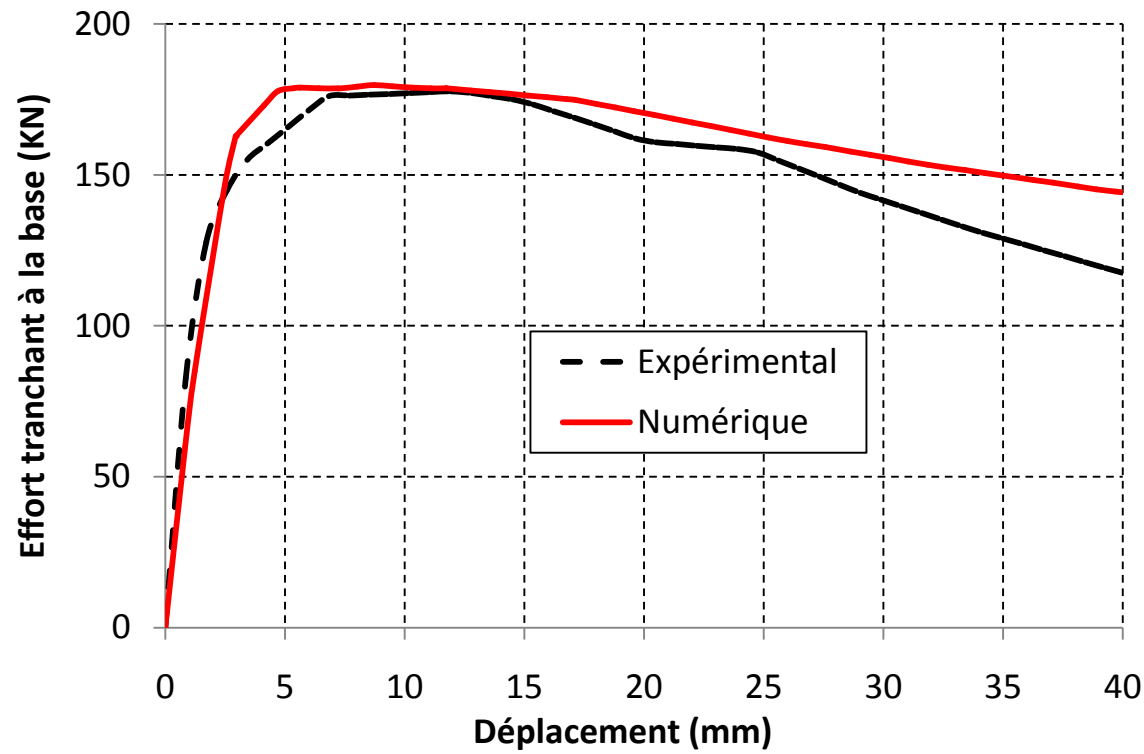
# Modèle numérique du BAMR

Maillage (3x3)



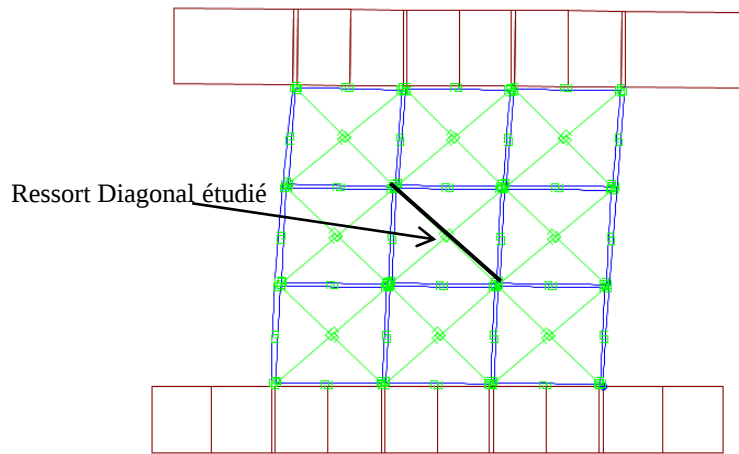
Coefficients réducteurs  $K_i$





[0mm-30 mm] les résultats obtenus sont très proches.  
La différence en terme de force n'excède pas 10%.

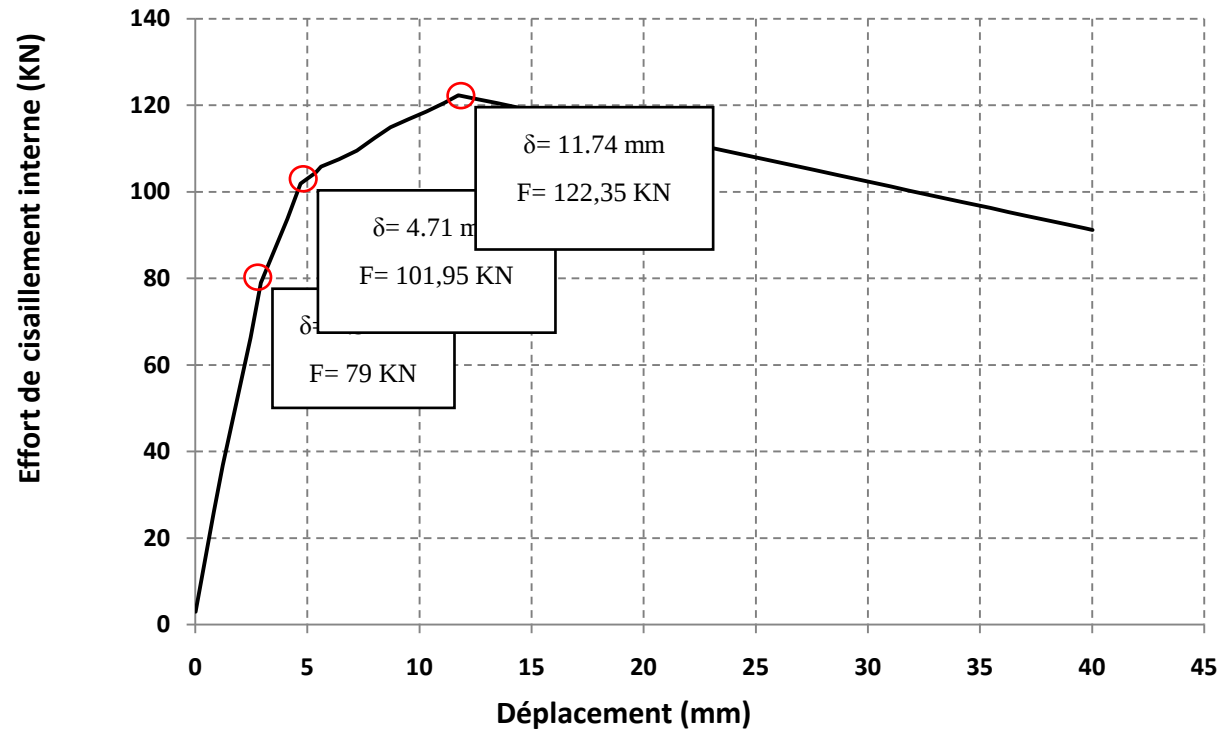
Au delà de 30 mm, les résultats divergent. la différence atteint 23% à la fin de l'essai.

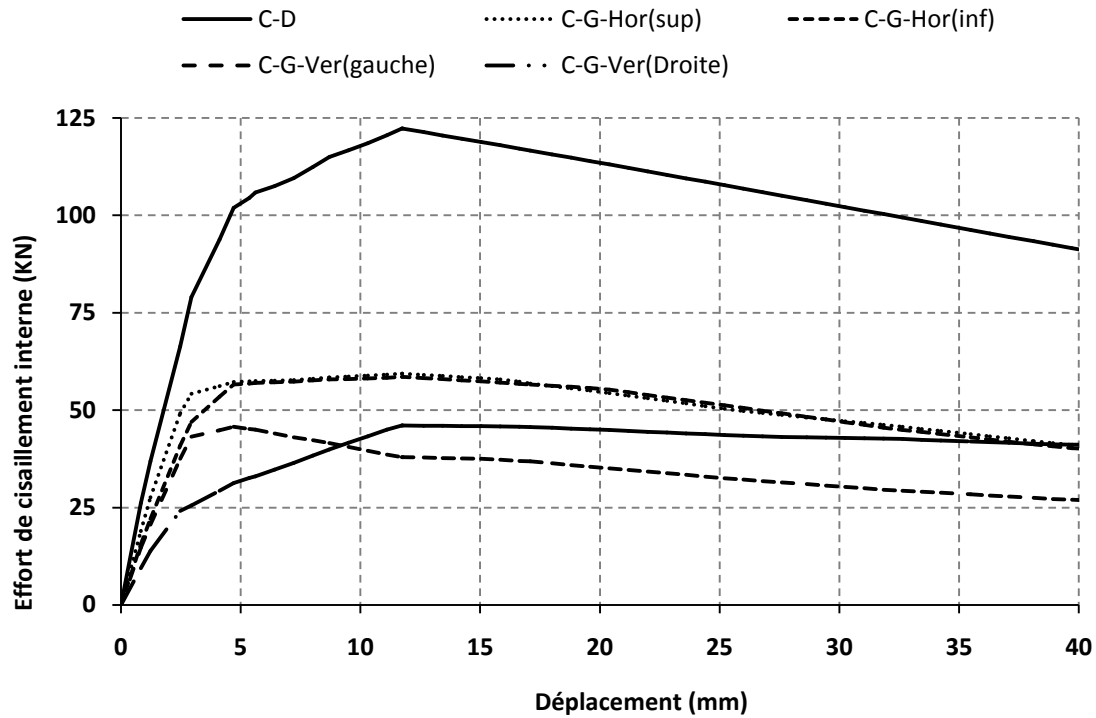
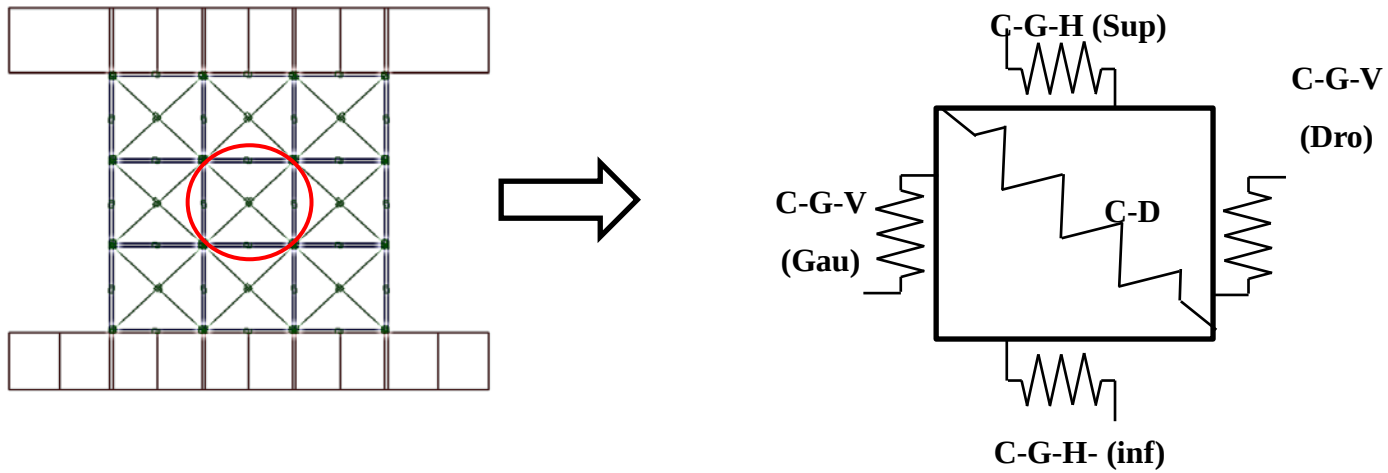


Fin de la phase élastique (2,94 mm)

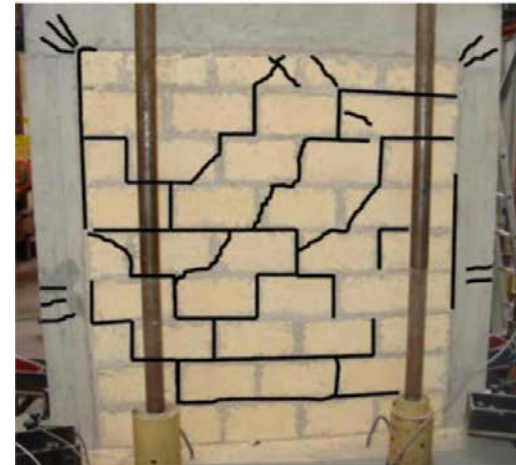
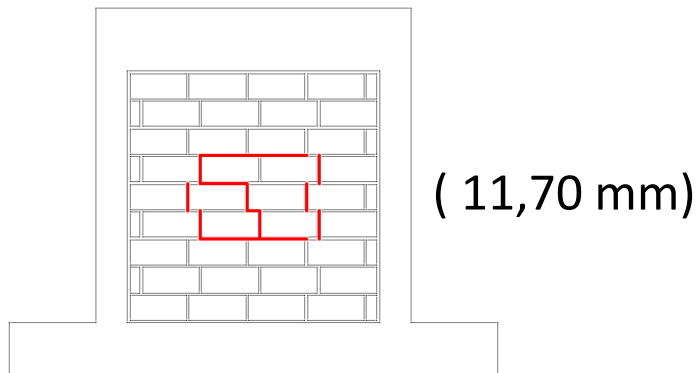
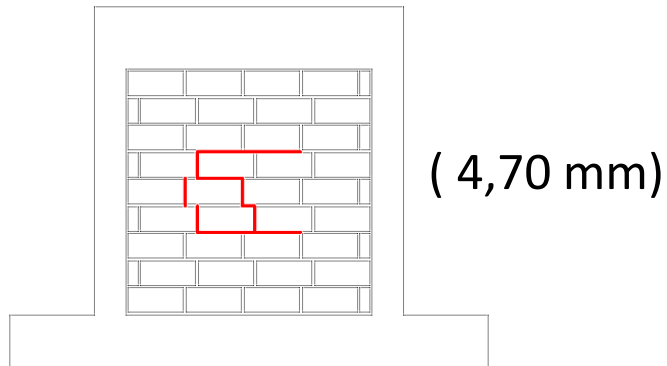
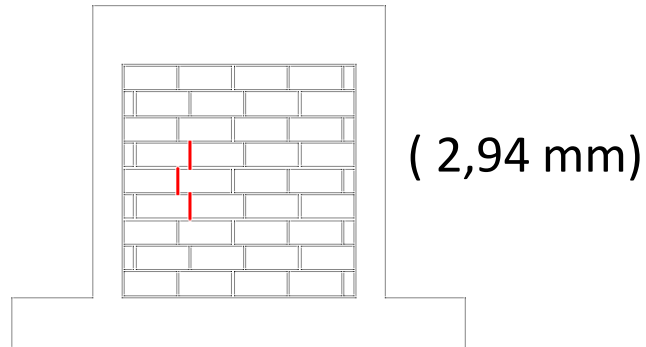
Fin de la phase Post -élastique (4,71 mm)

Atteinte de la résistance au cisaillement du  
Link (11,74 mm)

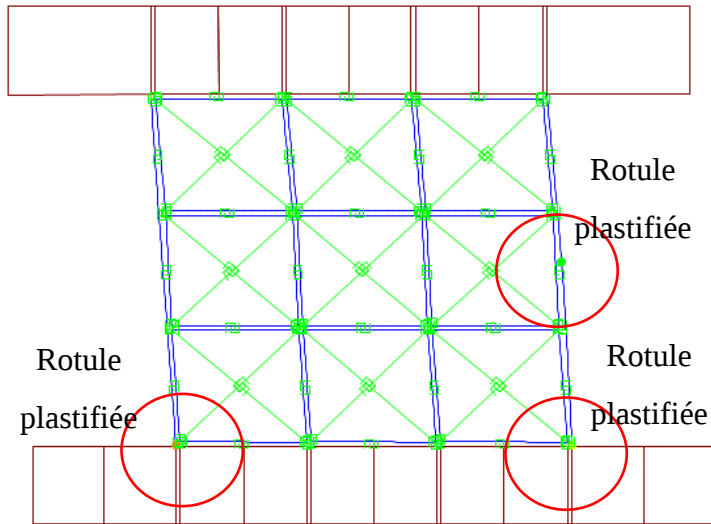




## Numérique : Scénario de propagation de fissures au milieu du panneau



Expérimental : État de fissures du spécimen  
(Fin de l'essai)



Numérique:  
État de ruine avancée du BAMR ( 28,70 mm)

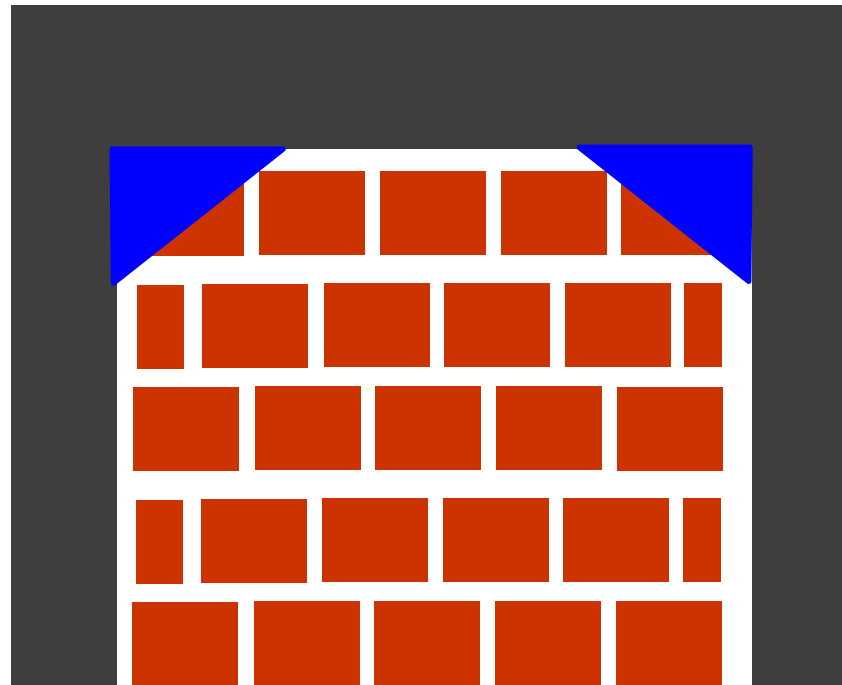
Le spécimen est fondu en:

Le modèle numérique a pu simuler le COMPORTEMENT  
Plastication des extrémités inférieures des poteaux  
et au milieu du poteau droit. ( Cadre en BA).

- Cisaillement glissant ( Ver et Hor) Combiné avec  
cisaillement diagonal ( Remplissage en maçonnerie).

# COMPORTEMENT DES CADRES EN BAMR AVEC GOUSSETS (OBJECTIF 2)

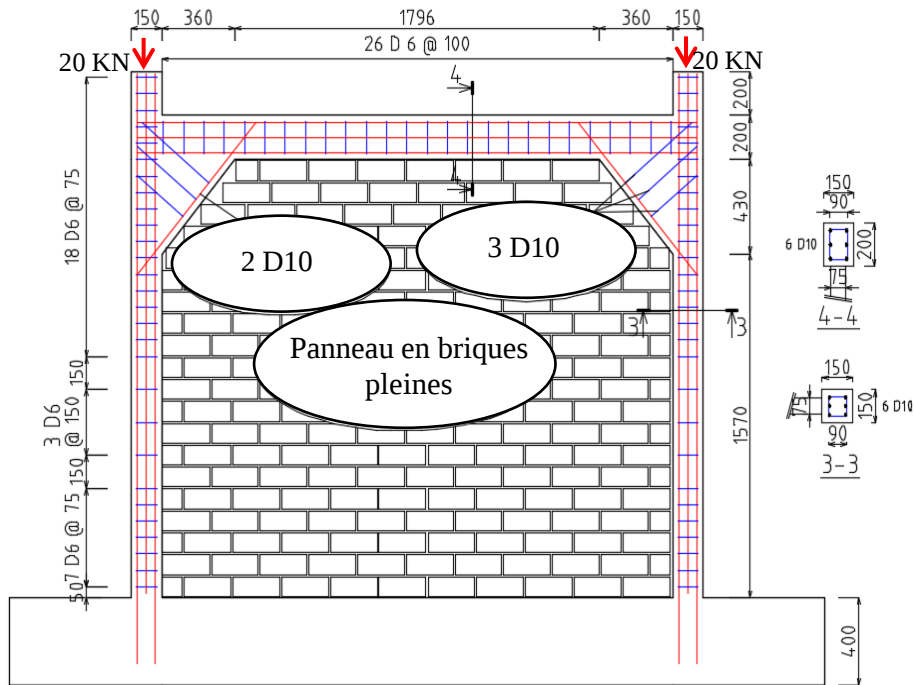
Prévoir des **GOUSSETS** aux angles du cadre en BAMR.



Crisufulli (1997)

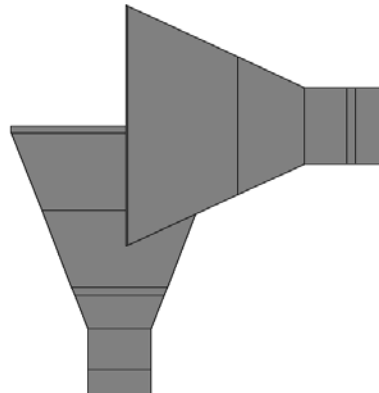
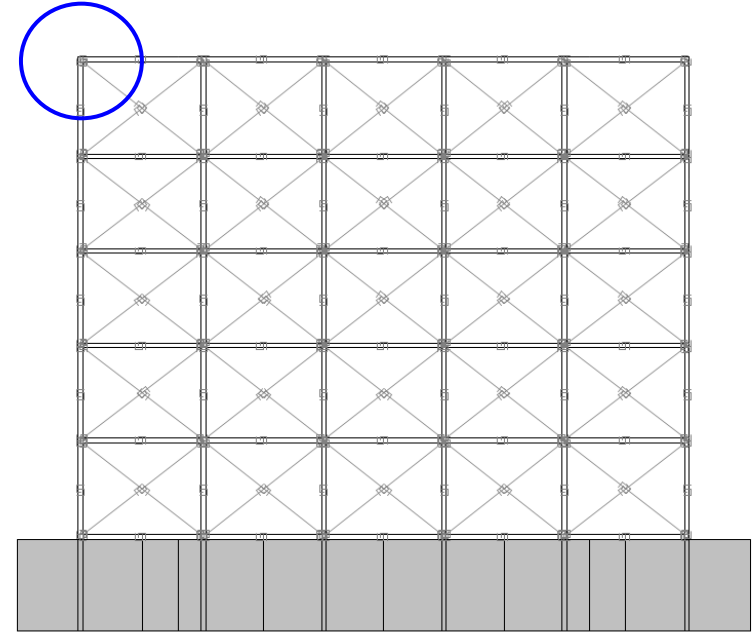
# Spécimen étudié

## Travaux de Crisufulli (1997)



# Modèle numérique

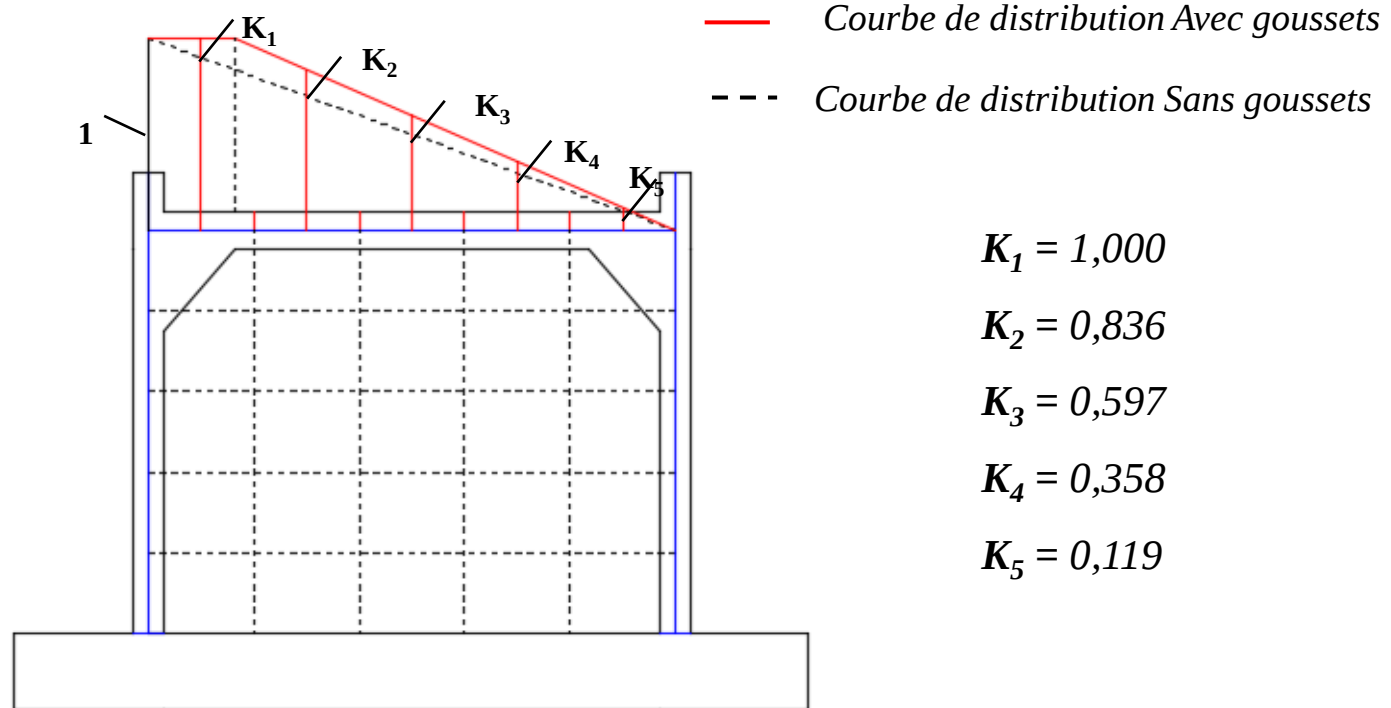
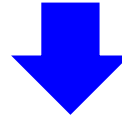
## (Maillage 5X5)



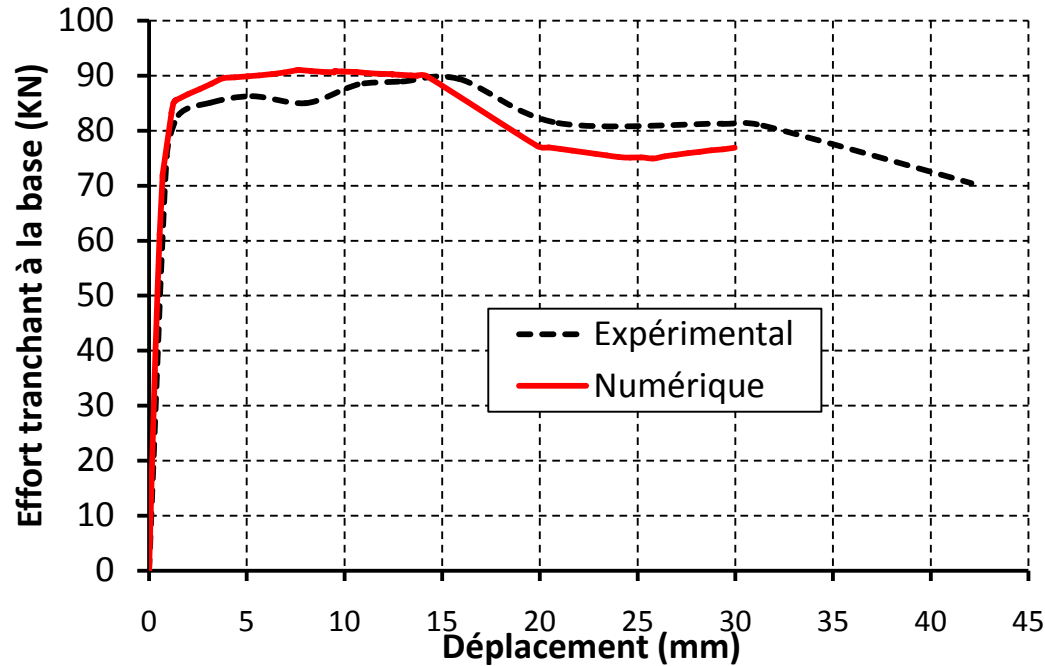
# Effet des goussets sur les coefficients réducteurs

## Hypothèses

- 1- Indéformabilité des zones rigidifiées
- 2- Comportement Élastique des goussets



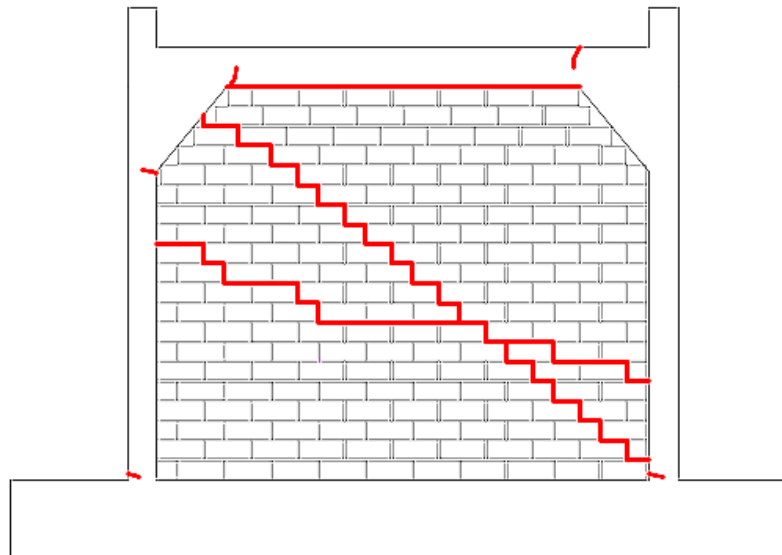
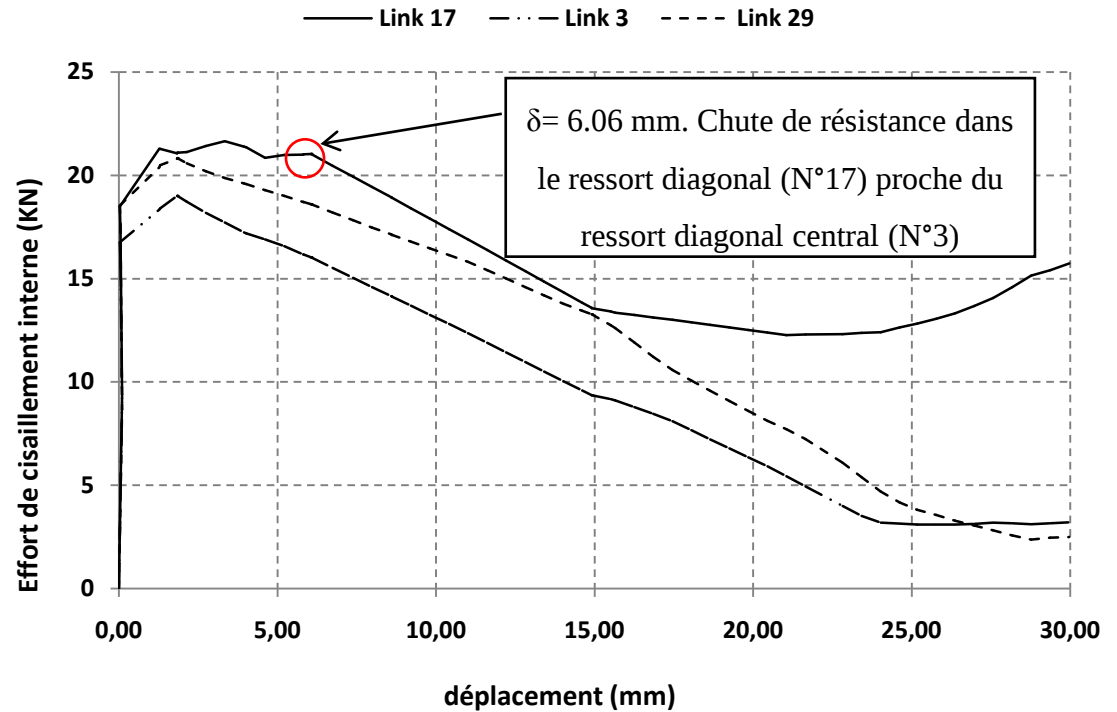
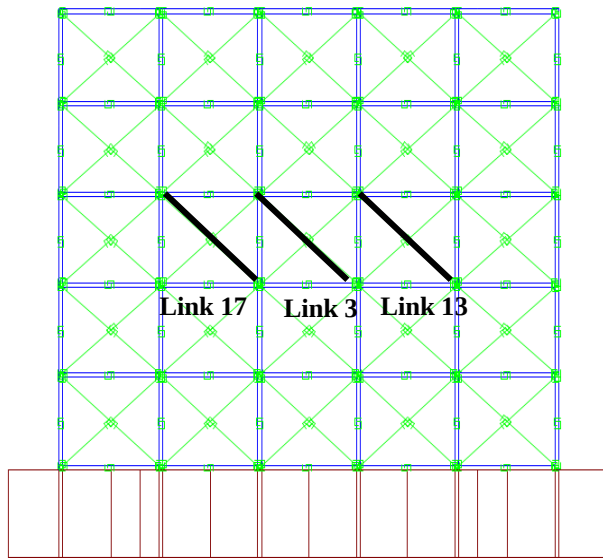
# Résultats



**Bonne Convergence** des résultats numériques avec les résultats expérimentaux.

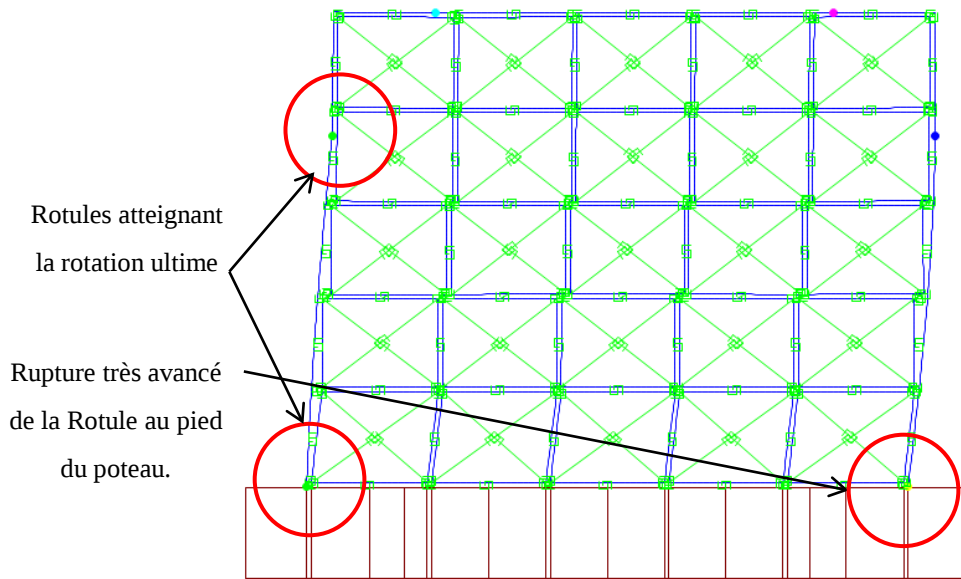
les différences fluctuent entre **-5 % et 6 %**

# Scénario de propagation de fissures

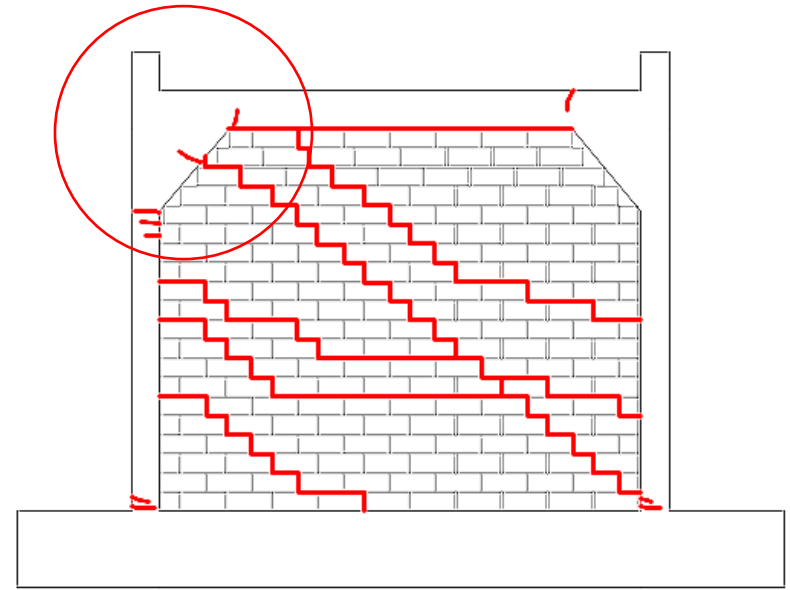


Expérimental ( 6,00 mm)

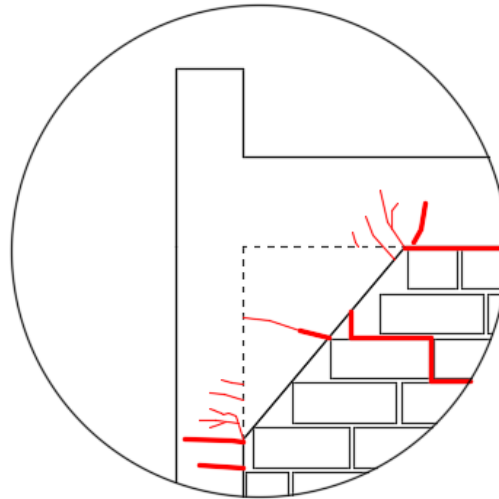
# Stade final



Numérique ( 30,00 mm)



Expérimental ( 30,00 mm)



## INTERPRETATIONS:

Influence des goussets sur le  
comportement du BAMR

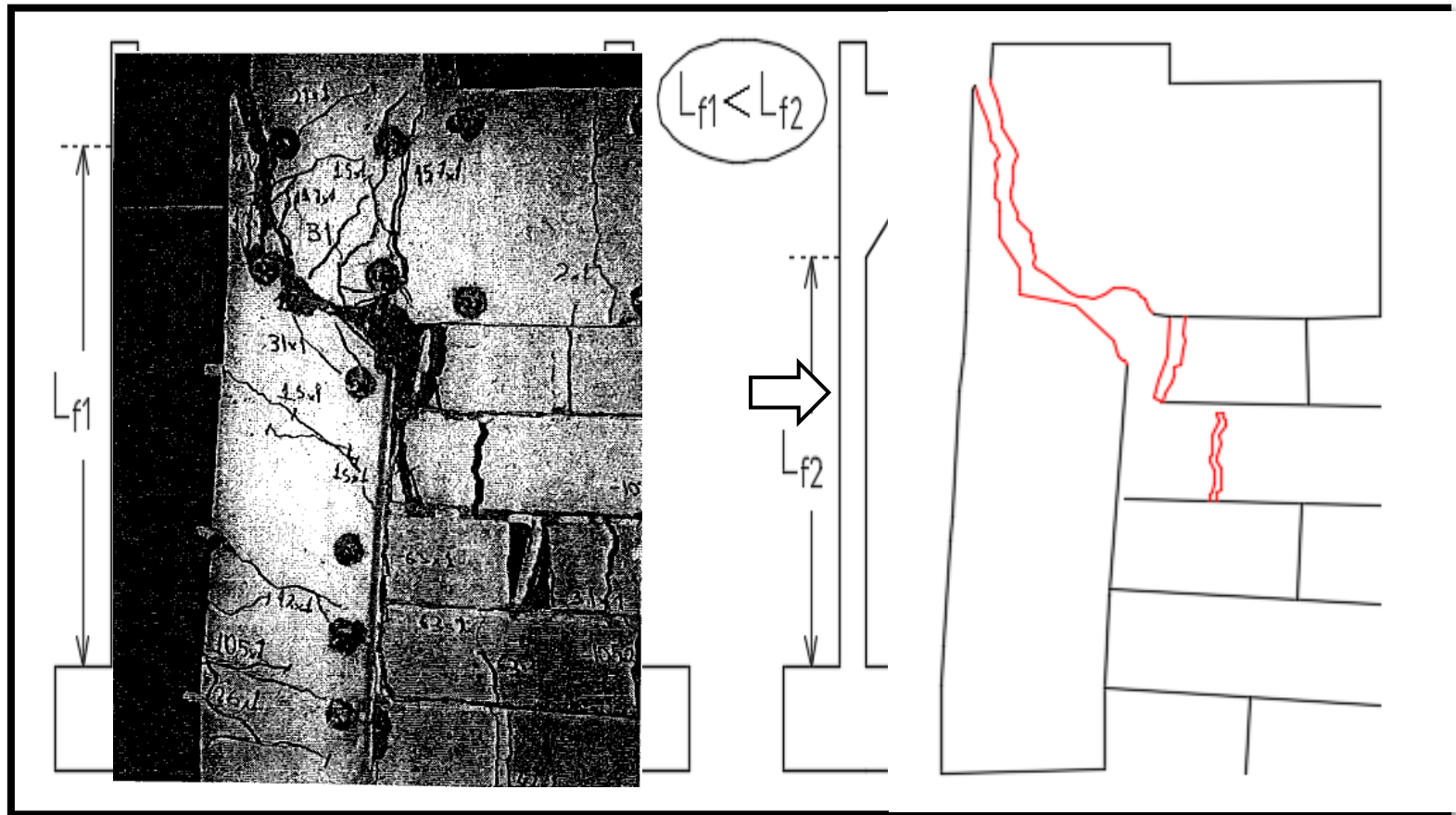


Sur Le Cadre en BA



Sur Le Remplissage

## Effet des goussets sur le cadre en BA



# Effet du gousset sur le Remplissage

Influence des goussets en terme de **Rigidité Latérale**.

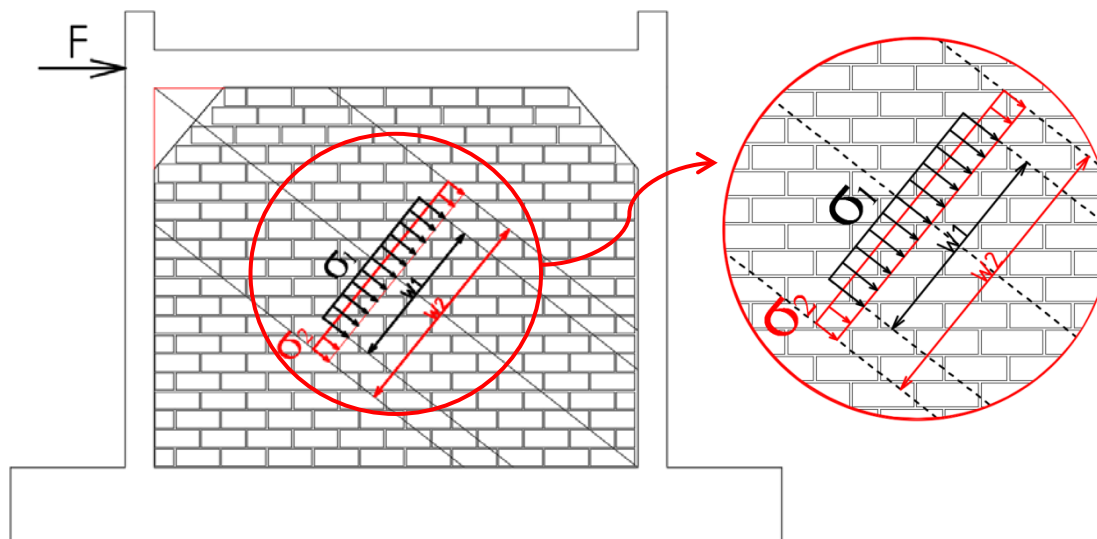
(KN.mm)

|                         | Avec remplissage | Sans remplissage |
|-------------------------|------------------|------------------|
| Rigidité Avec goussets  | 89,20            | 3,88             |
| Rigidité Sans goussets  | 51,01            | 2,34             |
| Différence              | 85,32            | 48,67            |
| Taux d'augmentation (%) | 75,30            |                  |

Influence des goussets en terme de **Résistance**.

(KN)

|                          | Avec remplissage | Sans remplissage |
|--------------------------|------------------|------------------|
| Résistance Avec goussets | 91,03            | 21,03            |
| Résistance Sans goussets | 72,93            | 16,48            |
| Différence               | 70               | 56,45            |
| Taux d'augmentation (%)  | 24,00            |                  |



## CONCLUSION GÉNÉRALE

Le comportement sismique des BAMR est régit principalement par l'interaction des panneaux en maçonnerie avec les cadres en béton armé.

Le modèle numérique proposé a pu fournir des résultats proches des résultats expérimentaux des deux spécimens étudiés et il a Aussi pu prévoir leurs mécanismes de rupture.

Le remplissage en maçonnerie influe considérablement sur la résistance du cadre ainsi sur sa rigidité latérale

Les goussets contribuent considérablement dans l'amélioration du comportement sismique du BAMR. (protègent les nœuds vis-à-vis du cisaillement et assurent aussi une dégradation progressive du BAMR )

## RECOMMANDATIONS

Compléter le modèle proposé pour étudier le comportement cyclique ou dynamique des BAMR.

Faire une étude paramétrique sur un BAMR avec différentes configurations des goussets.

Étudier l'efficacité des goussets comme une solution de renforcement des constructions en BAMR endommagées par des séismes.



MERCI POUR VOTRE  
ATTENTION