

# SEMINAIRE DE FORMATION

RISQUES BATIMENTAIRES

*BUILDING RISKS*

***SD / USAR***

**ECOLE D'APPLICATION DE SECURITE CIVILE  
DE VALABRE  
- FRANCE -**

**Niveau INITIAL**

## DOMMAGES AUX MAÇONNERIES

*DAMAGES TO MASONRY*

**JOUR  
3**

*INTERVENANT: JEAN-LUC REY*

**REVISION RB 2021**



# SOMMAIRE

- 1. Introduction**
- 2. Définitions des différentes maçonneries**
- 3. Vulnérabilités caractéristiques des maçonneries non chaînées aux poussées horizontales**
- 4. Additif: Instabilité structurelle au feu de maçonneries**
- 5. Annexe: Revue de modes constructifs en maçonneries de certains pays**
- 6. Crédits images**

# 1 INTRODUCTION

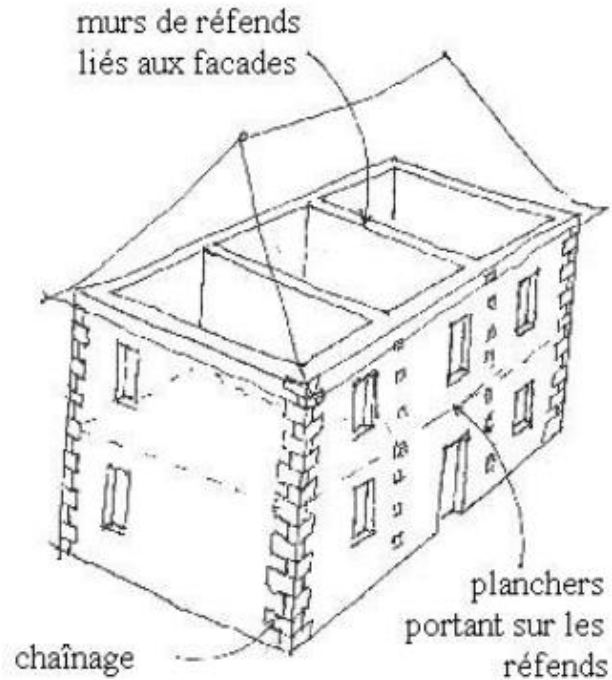
Lorsqu'un mur est soumis aux poussées horizontales violentes (séismes, explosions, mouvements de sol,..), les lits de mortier n'arrivent pas à assurer une cohésion satisfaisante entre les blocs à maçonner qui se disloquent, même pour des déformations modérées du mur. Le mortier est ainsi le lieu de ruptures « fragiles ». Par ailleurs, les blocs eux-mêmes n'acceptent pratiquement pas de déformation sans rompre (ce qui n'est pas le cas du béton armé, grâce à ses armatures).

Ainsi la dislocation partielle ou totale de la construction peut survenir pour des actions locales assez faibles si on ne prend pas la précaution de confiner (encadrer) chacun des panneaux de maçonnerie et chacune des ouvertures pour limiter les déformations.

**On doit considérer, d'un point de vue intervention SD, que la structure en maçonnerie a un comportement globalement FRAGILE, c'est-à-dire avec peu de déformations avant effondrement.**

**L'identification des précurseurs sera donc primordiale !!**

# 1 INTRODUCTION

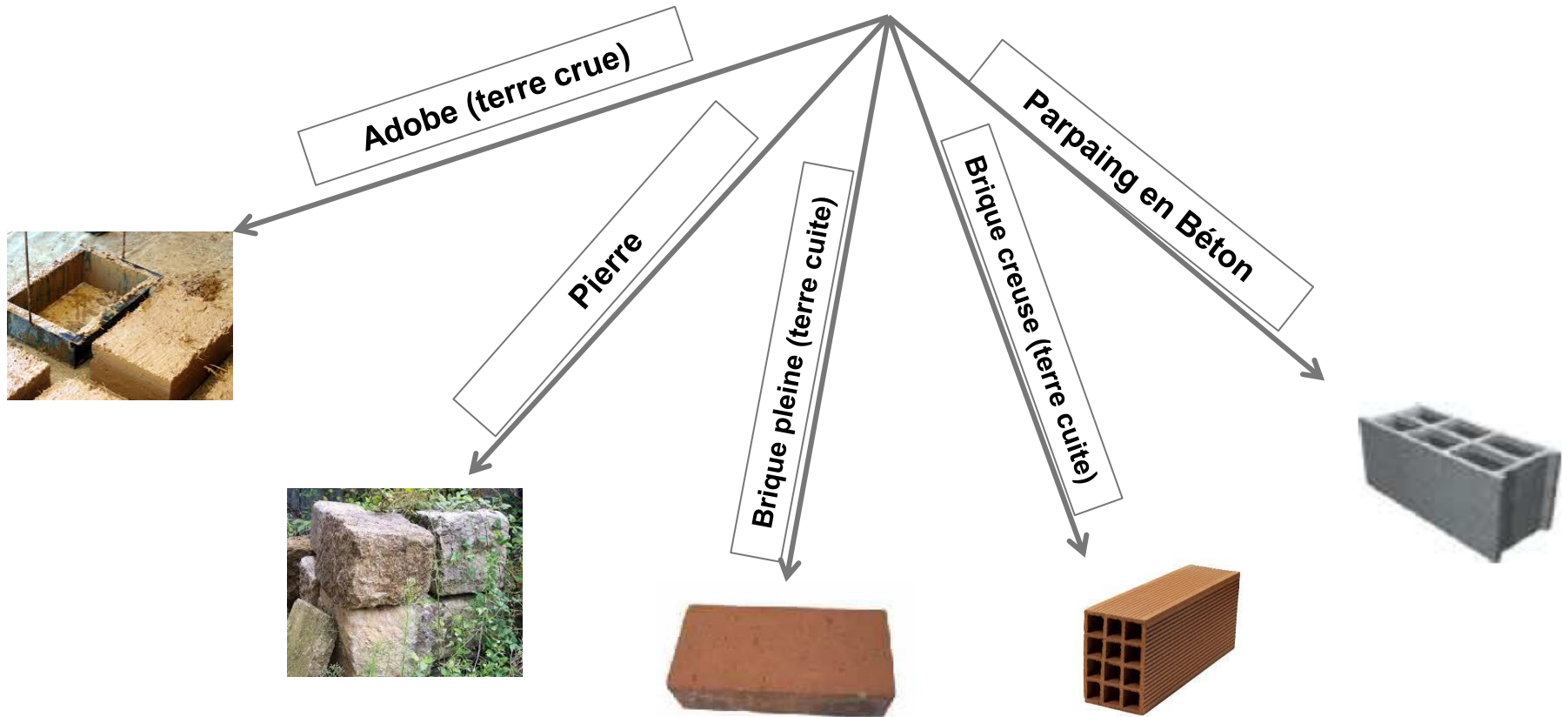


La stabilité de la structure est apportée par la collaboration mutuelle entre les planchers, la toiture et les murs.

Les liaisons entre tous ces éléments est aussi primordiale!

## Typologie de la maçonnerie

### Nature des matériaux « traditionnels »



# DOMMAGES AUX MAÇONNERIES

## 2. DÉFINITIONS DES DIFFÉRENTES MAÇONNERIES

### Nature des murs

#### Murs en pierres sèches :

Utilisés pour la construction des annexes des exploitations agricoles, bergeries, murs de clôture, murs de soutènement. Les pierres plates sont superposées les unes sur les autres sans aucun liant (chaux, ciment..).

#### Murs en pierres maçonnées :

Les pierres sont assemblées avec un liant. Ce sont des murs à simple ou double épaisseur dont les parements (la face visible d'objet améliorée par un élément ou un procédé quelconque) sont destinés à être enduits.

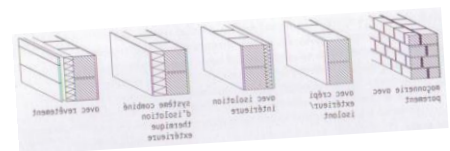
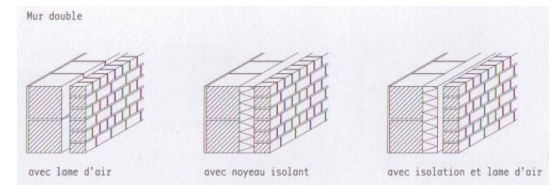
#### Murs à simple épaisseur :

On les appelle aussi murs à appareil (ensemble de pierres assemblées de façon précise pour confectionner un mur ou un élément du mur) simple, ils sont constitués d'un seul rang de pierres formant les deux parements. Ce sont des murs très fragiles à cause de leur structure peu épaisse.

#### Murs en pierres à double épaisseur :

Les parties internes de ces murs sont plus ou moins en contact.

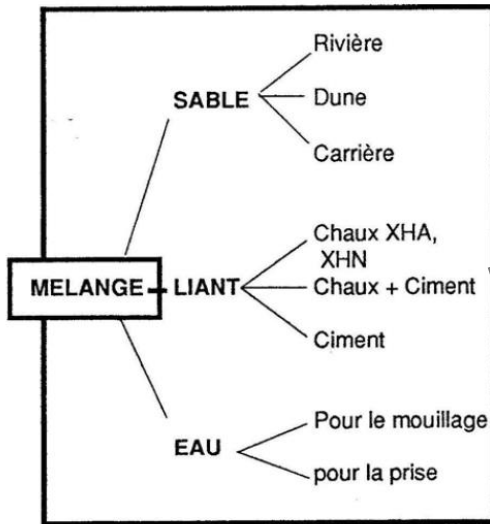
Le mortier utilisé pour hourder (relier par exemple la brique avec du mortier pour solidifier le mur) la partie centrale est la terre, alors que pour les parements, on utilise un mortier de chaux.



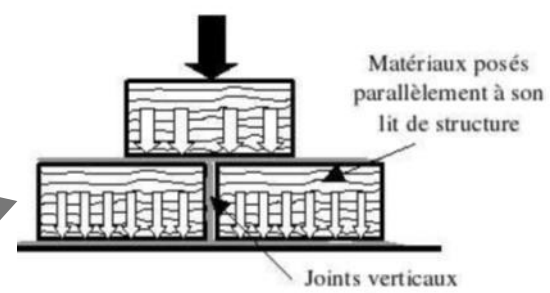
# DOMMAGES AUX MAÇONNERIES

## 2. DÉFINITIONS DES DIFFÉRENTES MAÇONNERIES

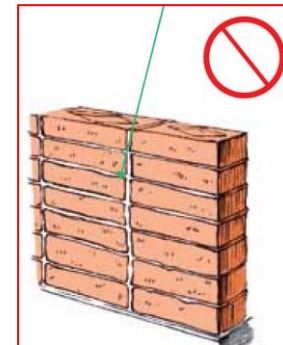
### Nature des joints



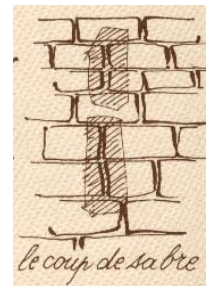
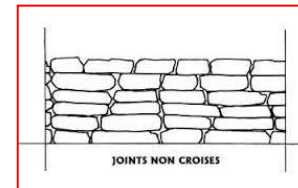
Composition du mortier



Joints verticaux continus (proscrits)



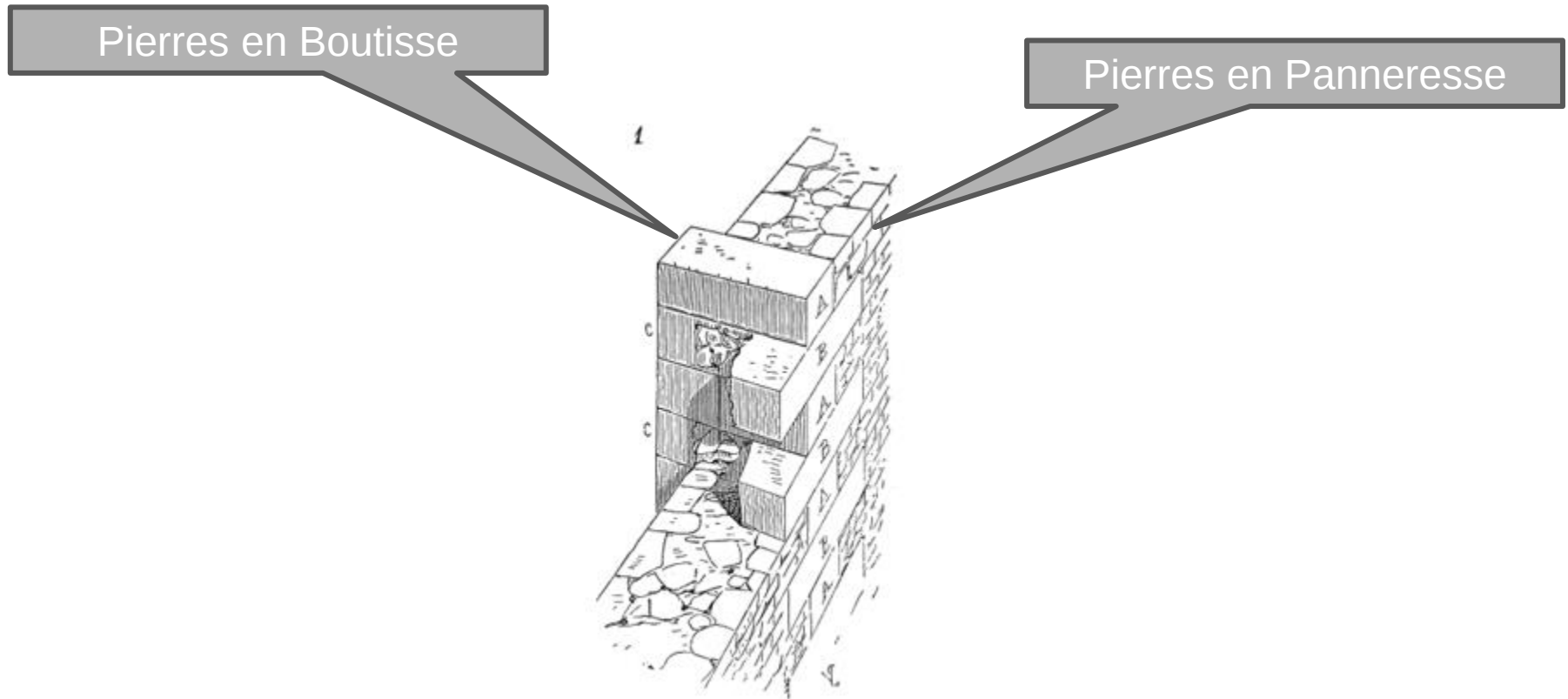
Induira un effet  
« Coup de sabre »



## DOMMAGES AUX MAÇONNERIES

### 2. IDENTIFICATION DES CHAINAGES

Identifions un mur porteur : présence de pierres en BOUTISSE

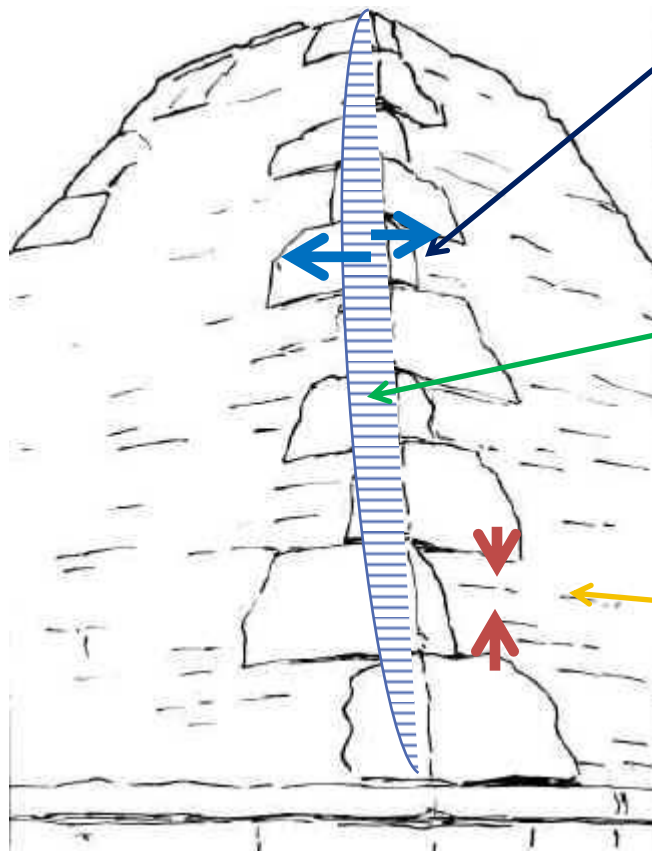


En reliant les deux parements du murs (Ext & Int), les boutisses apportent de la **RAIDEUR** transversale aux murs porteurs

## DOMMAGES AUX MAÇONNERIES

### 2. IDENTIFICATION DES CHAINAGES

**Principes de stabilité apportée par les chainages dans les Maçonnerie anciennes**



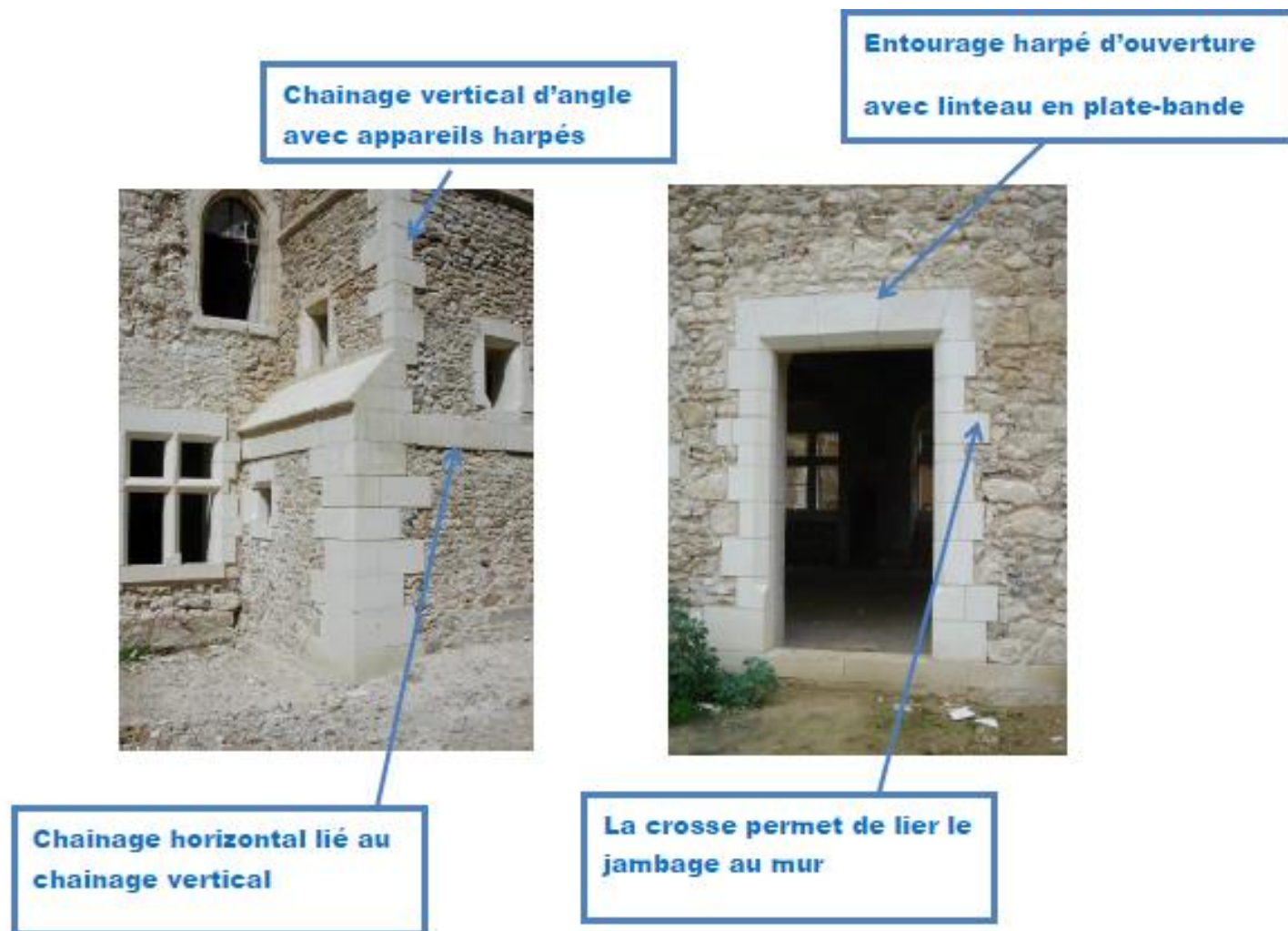
**Contraintes de Traction  
(Cisaillement local  
induit)**

**Contraintes de  
Flexion (sur la longueur  
totale de la chaîne de  
pierres)**

**Les blocs de la chaîne d'angle  
doivent exercer un effet « Tenaille »  
Sur les moellons de la partie  
remplissage**

## **DOMMAGES AUX MAÇONNERIES**

### **2. IDENTIFICATION DES CHAINAGES**



## Caractéristiques défavorables pour la tenue aux séismes

- Résistance à la **Traction** très faible
- Résistance au **Cisaillement** faible
- Ténacité** (capacité à résister à la propagation des fissures) faible
- Endurance** (capacité de résister à la fatigue) faible
- Ductilité** ( $\neq$  Fragilité) très faible

## DOMMAGES AUX MAÇONNERIES

### 3. VULNÉRABILITÉS CARACTÉRISTIQUES DES MAÇONNERIES NON CHAINÉES

#### Caractéristiques défavorables pour la tenue aux séismes

Résistance à la **Traction** et au **Cisaillement** très faible

Chacun des blocs peut avoir une bonne résistance

Mais par effet de liaison par rapport au liant,

D'enclassement ou de coincement, la rupture des joints

Apparaît rapidement (joints remplis ou non remplis) puis la dislocation du mur.

#### Chainage nécessaire:

Il se produit sous charge  $F_h$  une bielle de

Compression suivant différents angles (remplissage

Des joints et type de maçonnerie).

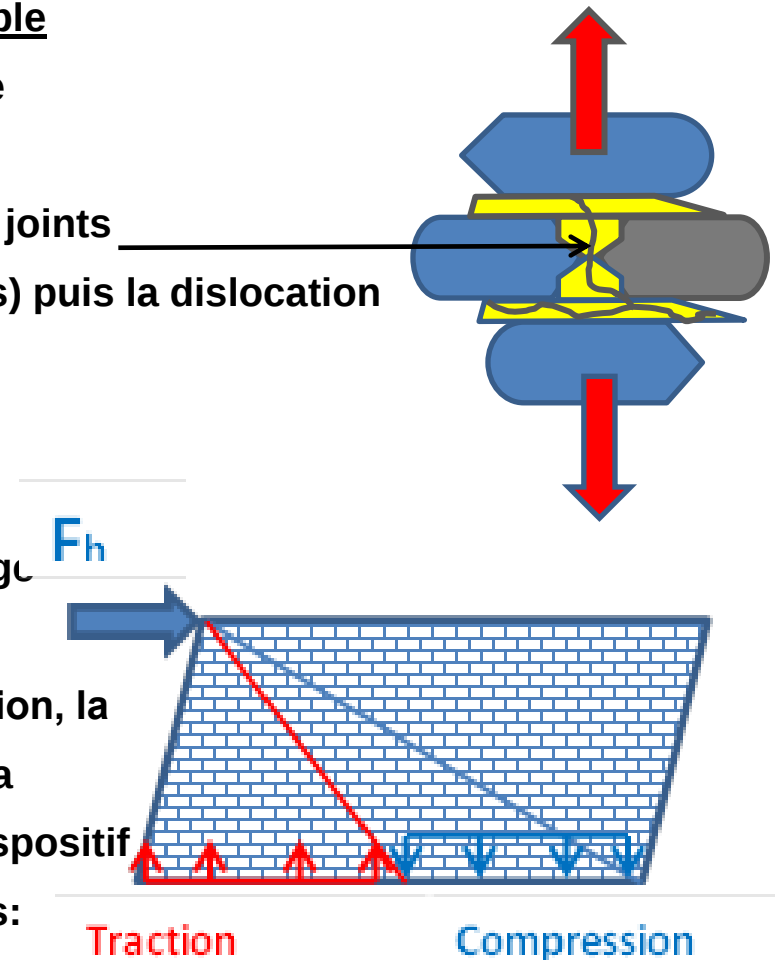
S'il n'y a pas suffisamment de résistance à la traction, la

Bielle ne peut pas être équilibrée et cela provoque la

Dislocation du panneau. Il faut donc prévoir un dispositif

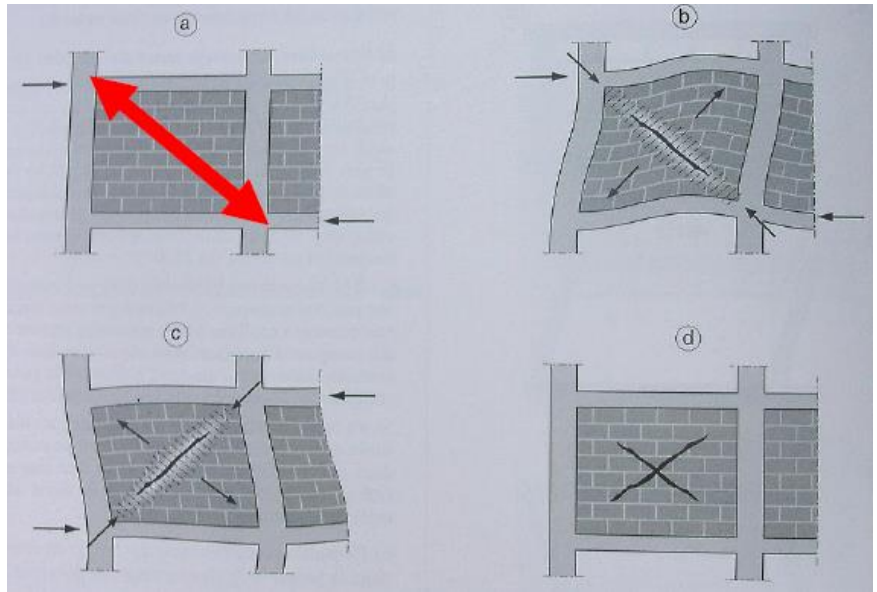
qui contraigne la Maçonnerie dans les 2 directions:

Se sera donc des Chainages Horiz. et Vert.



#### Les remplissages rigides en maçonnerie

Ces bielles ne doivent pas être trop horizontales pour que la composante verticale compression évite le cisaillement des lits de mortiers, ni trop verticales pour que le panneau ne soit pas sollicité en flexion.



## DOMMAGES AUX MAÇONNERIES

### 3. VULNÉRABILITÉS CARACTÉRISTIQUES DES MAÇONNERIES NON CHAINÉES

#### Caractéristiques défavorables pour la tenue aux séismes

##### Résistance à la **Fatigue\*** faible (Endurance)

Peu ductile et sous des sollicitations mécaniques alternées, il apparaît rapidement des Fissures sur les zones de résistances (ex. des angles) et la ruine s'en suit.

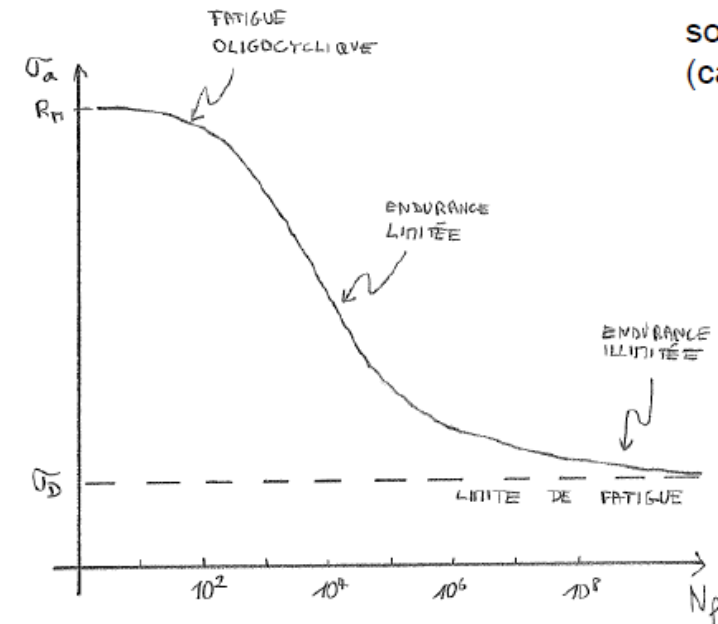
Les causes principales induisant cette faible résistance à la fatigue sont:

- Matériaux non homogène
- faible résistance à la traction

**Important:** La présence de réseaux de fissurations multiples, et pas forcément traversantes, dans ces zones (angle par exemple) font partis des signes précurseurs de ruine par fatigue lors d'une nouvelle sollicitation.

*\*fatigue de type oligocyclique*

*(faible nombre de cycles et forte amplitude des contraintes)*



**Observations des dommages les + courants sur les maçonneries  
sous C. Sismiques**

**1° Dislocation des blocs à maçonner non «confinés»:**

- Eclatement des angles, des ouvertures...
- Dislocations en chaîne.

**2° Rupture fragile entre les éléments de la structure  
pour liaisons insuffisantes**

- Déversement des façades
- Chute de toiture
- Chute de planchers

**3° Rupture de points faibles**

- Ruine de niveaux sur pilotis
- Ruine de poteaux mal situés, mal conçus, mal dimensionnés

#### Test grandeur nature sur table vibrante

Mise en évidence du mode de ruine typique des maçonneries non chaînées

1° les angles subissent les concentrations de contraintes Max

2° la perte de rigidité entraîne le balancement puis la dislocation des composants maçonnés en partie supérieure

3° Les efforts tranchants devenant Max en bas de l'édifice, se produit alors le cisaillement des parties basses



## DOMMAGES AUX MAÇONNERIES

### 3. VULNÉRABILITÉS CARACTÉRISTIQUES DES MAÇONNERIES NON CHAINÉES

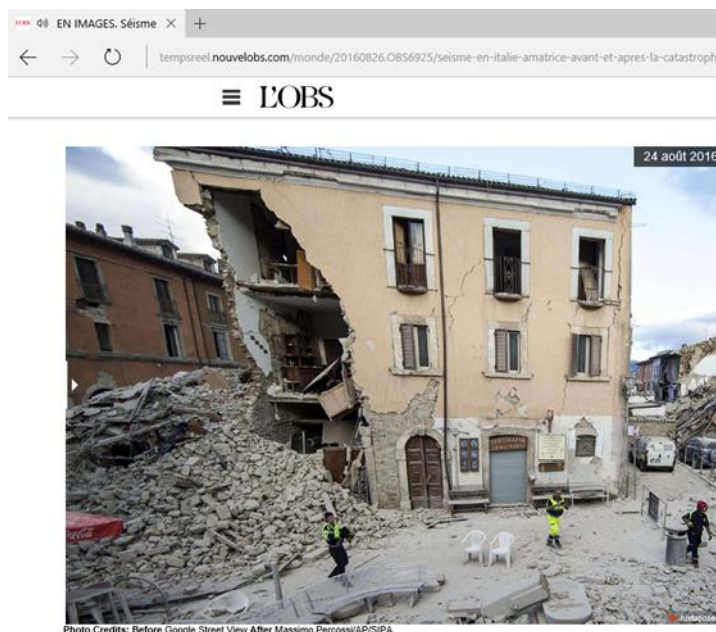
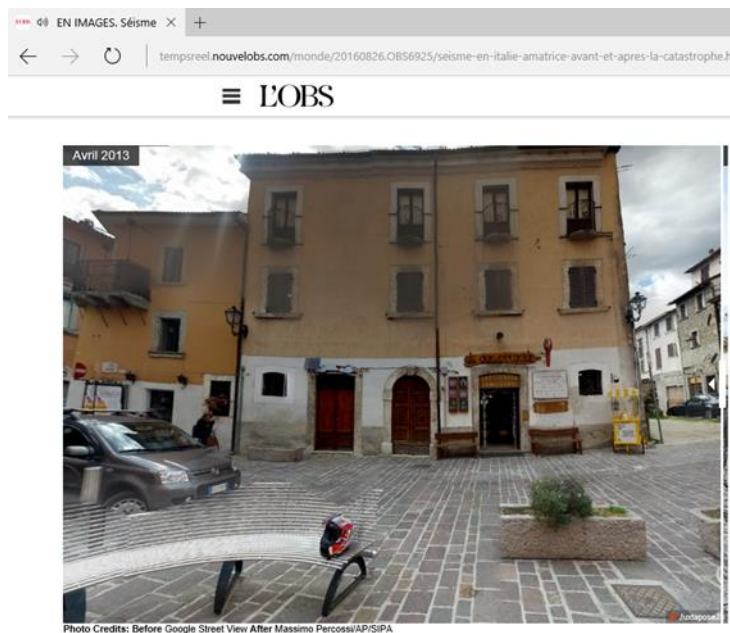


**Eclatement de  
l'angle  
Par bielle avec  
sortie de plan  
des blocs de  
maçonnerie**

19/20 NATIONAL SEISME  
Bielles de compression dans maçonnerie – **Pescaré del Tronto** 24 Aout 2016, Initial Mw 6.2 –credit France3-

## DOMMAGES AUX MAÇONNERIES

### 3. VULNÉRABILITÉS CARACTÉRISTIQUES DES MAÇONNERIES NON CHAINÉES



**Dislocation à  
partir du  
bâtiment  
d'angle  
(config. en  
pâté)**

Séisme de NOCIA, Amatrice 24 Aout 2016 Initial Mw 6.2 -crédits L'OBS-



Vulnérabilité des angles  
par dislocation des  
maçonneries non chaînées

Nota: Façade porteuse  
maintenue par poutres  
plancher

Népal, 2015

## DOMMAGES AUX MAÇONNERIES

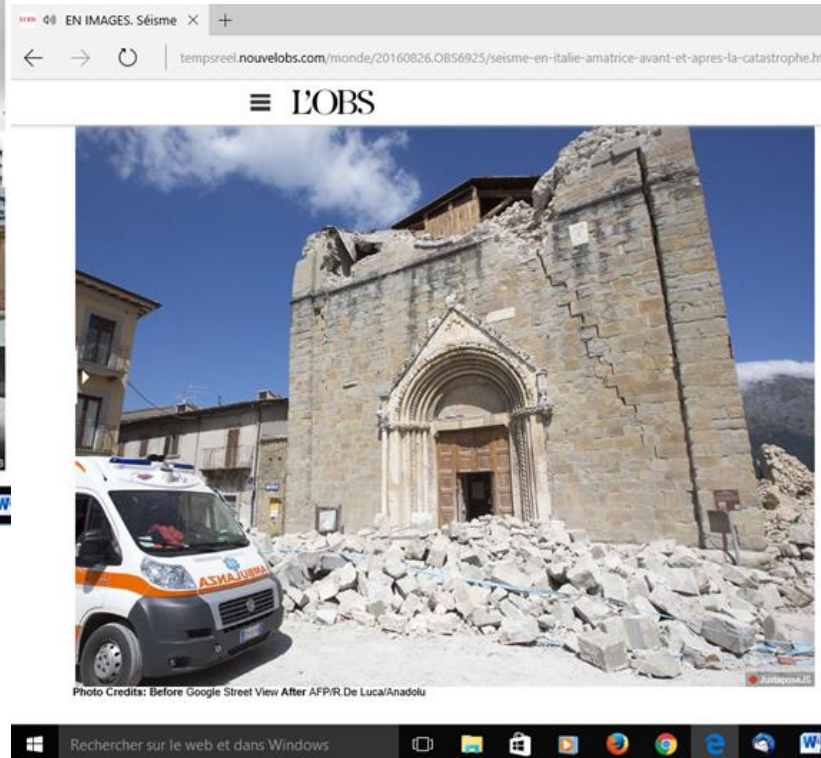
### 3. VULNÉRABILITÉS CARACTÉRISTIQUES DES MAÇONNERIES NON CHAINÉES

#### Déversement des façades



# DOMMAGES AUX MAÇONNERIES

## Dislocation de façade



Séisme de NOCIA, Amatrice 24 Aout 2016 Initial Mw 6.2 -crédits L'OBS-

## DOMMAGES AUX MAÇONNERIES



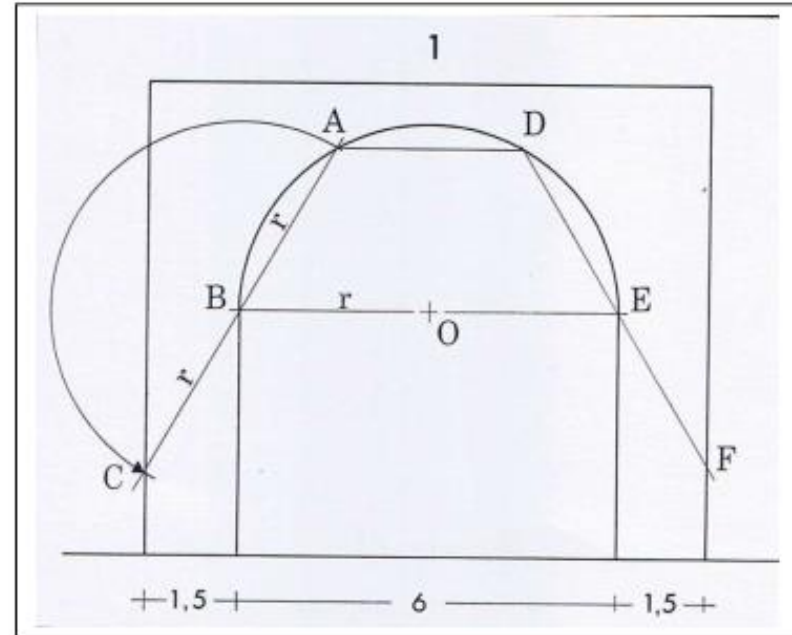
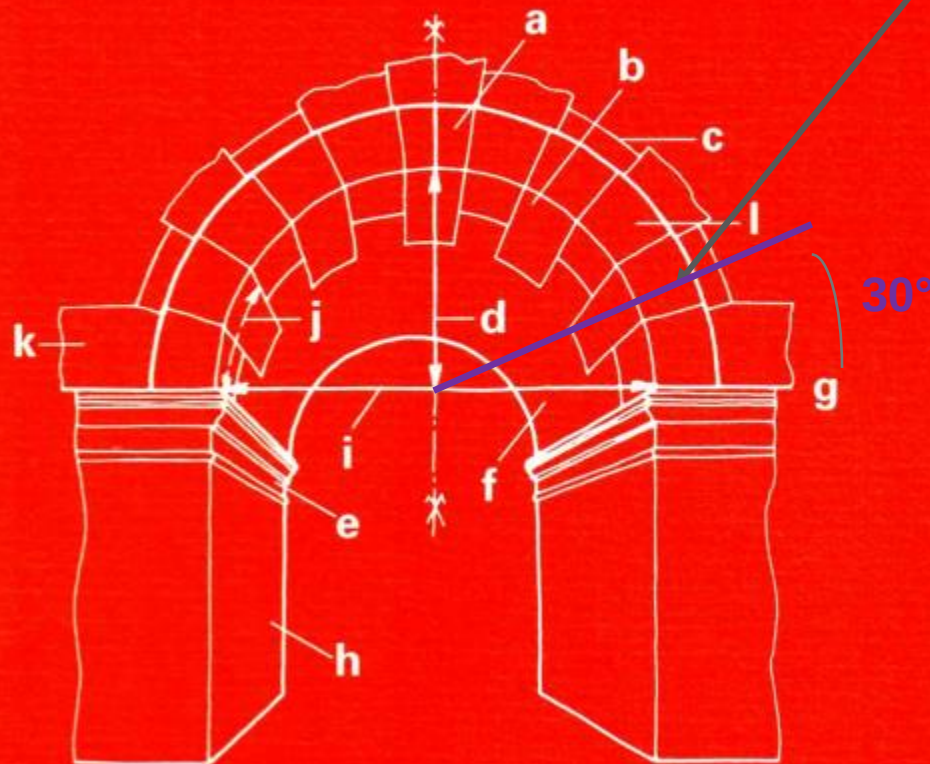
Chronologie depuis le choc principal jusqu'aux répliques de l'effondrement d'un édifice ancien en maçonnerie



## DOMMAGES AUX MAÇONNERIES: CAS DES VOÛTES

Claveau ou  
Voussoir  
(position des  
reins)

Fig. 1. Voûte en berceau. a. clef ; b. douelle ; c. extradados ; d. flèche ; e. imposte ; f. intrados ; g. ligne de naissance ; h. piédroit ; i. portée ; j. retombée ; k. sommier ; l. voussoir.

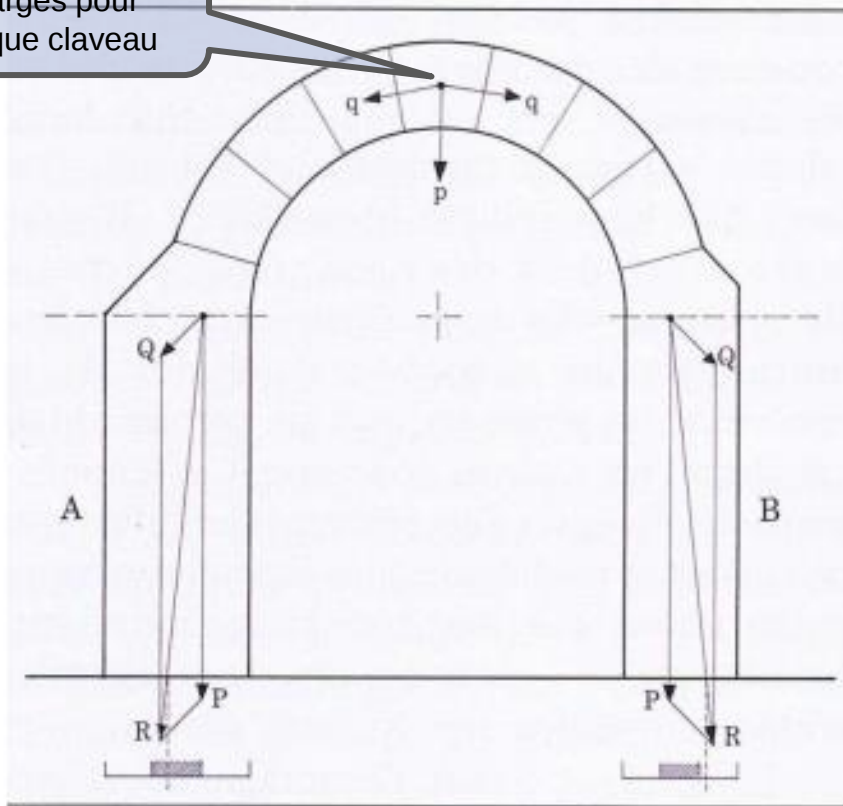


Epure ancestrale (utilisée depuis l'ère Romaine) pour le tracé des contreforts d'une voûte plein cintre (Romane). (AC) et (DE) = direction des poussées

## DOMMAGES AUX MAÇONNERIES: CAS DES VOÛTES

**Important:** La poussée exercée par une voûte est d'autant plus forte que la voûte est moins élancée en hauteur. Les voûtes « plein cintre » sont alors celles qui exercent les poussées horizontales (Q) les plus fortes (>> voûte en Ogive)

Décomposition des charges pour chaque claveau



### Principe de stabilité

**P**= ensemble des charges et poids propre

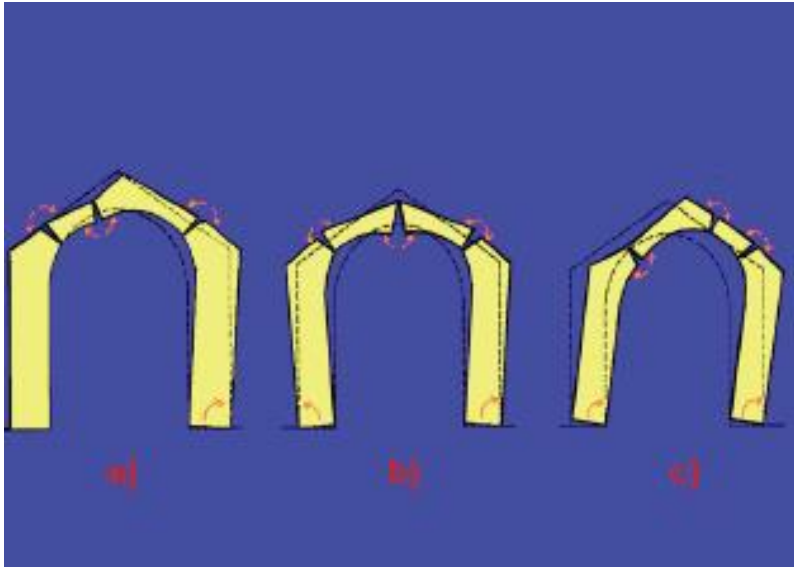
**Q**= Poussée latérale

**R**= Résultante  $P+Q$

Stabilité tant que la résultante **R** est contenue dans le tiers central du massif de culée [ cas A ]

Instabilité dans le cas [ cas B ]

## DOMMAGES AUX MAÇONNERIES : CAS DES VOÛTES



### Principe d'effondrement des voutes

Les poussées horizontales ne peuvent être compensées que par des contreforts suffisants.

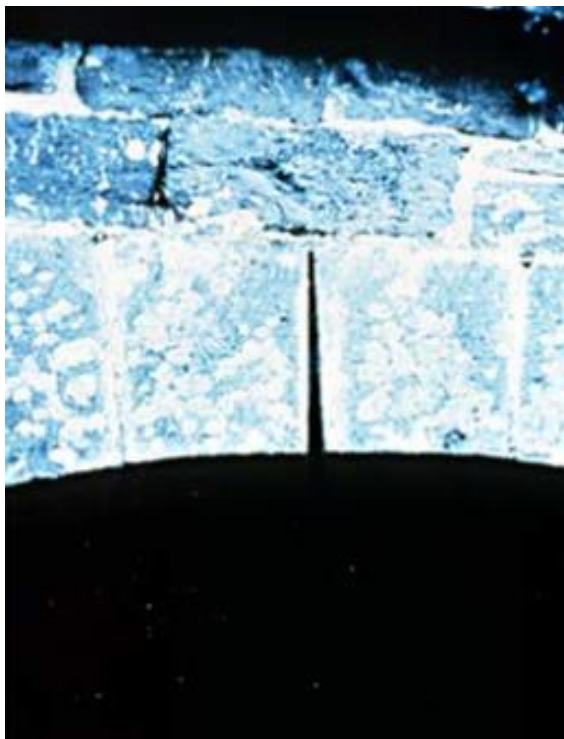
Dans le cas contraire, se produit  
L'ouverture de la clé de voute suivie des autres composant de la voute jusqu'au déséquilibre global de cette structure.



Tests sur table vibrante de la résistance au séisme d'une voute plein cintre

## DOMMAGES AUX MAÇONNERIES : CAS DES VOÛTES

### 2 Indicateurs de pathologies majeures (cas d'instabilité imminente)

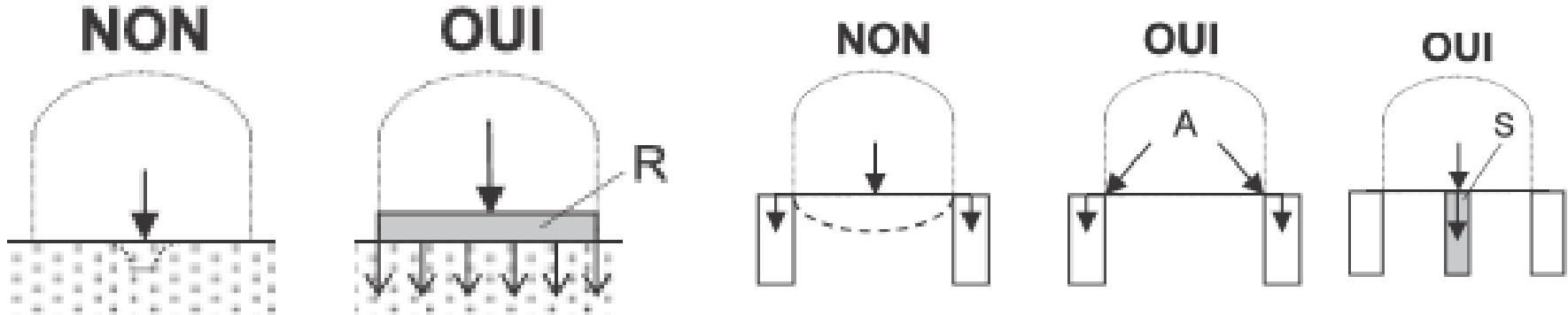


- Type de défaut: **Fissuration transversale**
- Situation: **Entre la naissance et la clé de voûte**
- Cause: **Tassement différentiel d'appui**



- Type de défaut: **Bombement d'un piédroit (culée)  
Avec projection de  
matériaux de maçonnerie**
- Situation: **en partie basse**
- Cause: **Poussée latérale excessive**

### Principe d'étaieement d'une voute plein cintre



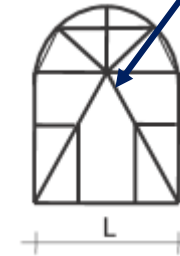
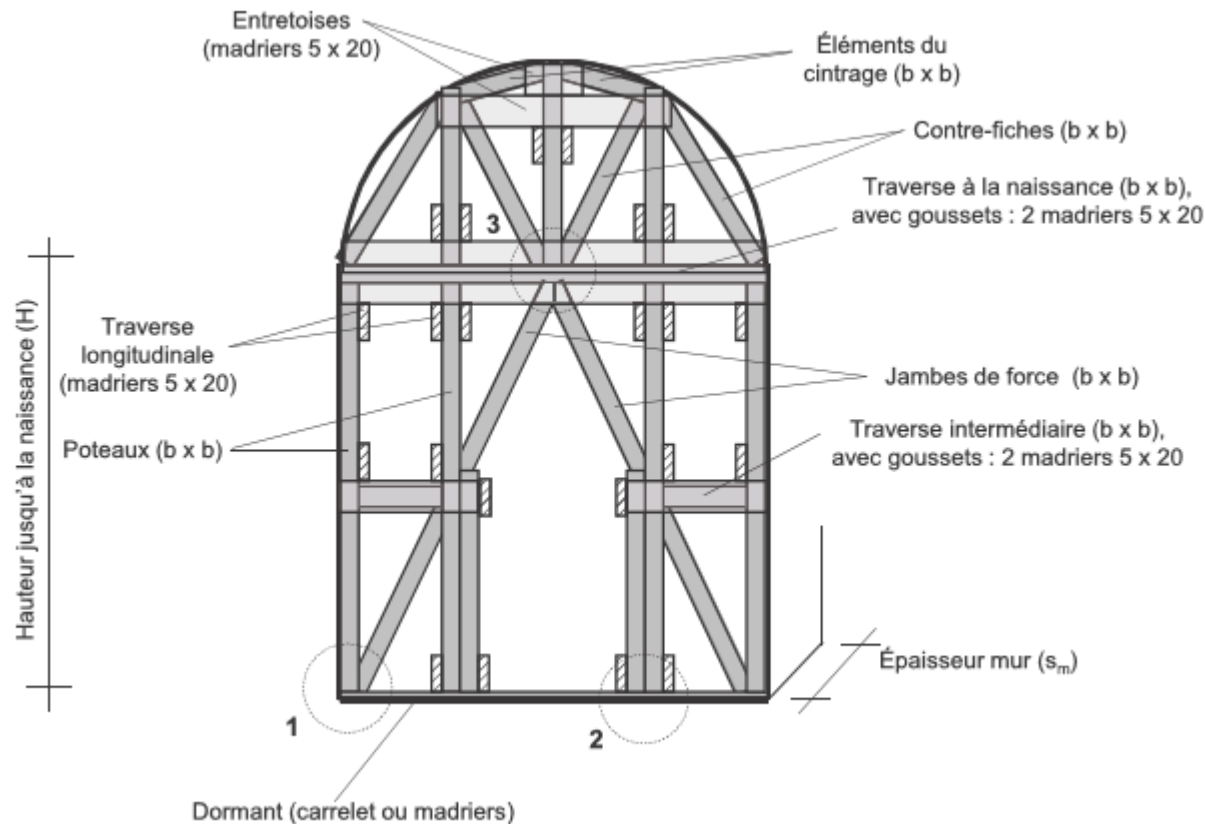
#### REPRISE SUR SOL

- **Eviter la Ligne de Décharge** (schéma de gauche)
- **Semelle d'appui répartissant la reprise des charges verticales** (schéma de droite)

#### REPRISE SUR NIVEAU

- **Eviter la Ligne de Décharge** (schéma de gauche)
- **Cintre Ouvert répartissant la charge dans les murs porteurs sains** (schéma du milieu)
- **Sinon créer une Ligne de Décharge** (schéma de droite)

### Principe d'étaie d'une voute plein cintre



Cintre ouvert

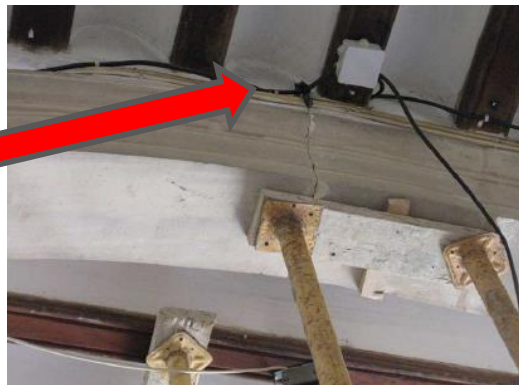
**Pour les détails constructifs, se référer au Manuel Stop guide d'étaie, page 54 (Italie/ Vigili Del fuoco)**

## DOMMAGES AUX MAÇONNERIES : CAS DES VOÛTES

Exemple de confortements sommaires !!



Séisme de Lorca, 2011, doc AFPS  
Ouverture de la clé de voute



Séisme de Lorca, 2011, doc AFPS  
Fissure longitudinale de la voute de la nef



Séisme de Lorca, 2011, doc AFPS  
Église Avant et Après le séisme

## LES REGLES DE L'ART

Bon exemple de maçonneries correctement conçues pour résister aux séismes et diverses poussées H



**Exemple de maçonnerie (mixte avec bois) conçue parasismique  
Prototype pour HAÏTI; test à  $M=7,3$  sur table vibrante au centre Technique du Bois de  
Bordeaux, juin 2014, Mission REPARH, ONG**

**ADDITIF**

# **INSTABILITE STRUCTURELLE DUE A LA VETUSTE DES MAÇONNERIES**

## DOMMAGES AUX MAÇONNERIES

### DOMMAGE CARACTERISTIQUE DES MURS A DOUBLE PAREMENT

Mur dit « *BOUFFANT* »



c'est souvent un mur qui a "flambé", c'est-à-dire que les deux parements se sont désolidarisés, créant un vide dans le mur;

## DOMMAGE CARACTERISTIQUE DES MURS A DOUBLE PAREMENT

Mur dit « *BOUFFANT* »  
*Au droit des appuis de  
charges verticales*



Fissuration de traction

### DOMMAGE CARACTERISTIQUE DES MURS EN PISE

=>Action des eaux de pluie (par les soubassements et par l'action de sape des murs)



Nota sur IM:

- pas d'étalement car instabilité extrême
- Evacuation & PS

-Dislocation en blocs massifs lourds (rappel: densité ~ + de 2T/m3)  
-aucune reprise des confortements possibles

**ADDITIF**

# **INSTABILITE STRUCTURELLE AU FEU DE MAÇONNERIES NON CHAINEES & NON ARMEES**

# CAS D'INSTABILITE STRUCTURELLE : MURS EN ADOBES

## SDIS 82 –NOVEMBRE 2012 –LTN THIERRY TOURNIE

### IDENTIFICATION RAPIDE DE LA STRUCTURE EN TERRE CRUE (adobes)

- 1- par le décollement massif des enduits (comme pour le pisé)
- 2- par la présence de coulées de boue sur les murs
- 3- avec le mode de fissuration des murs en « coup de sabre »



# CAS D'INSTABILITE STRUTURELLE : MURS EN ADOBES

## SDIS 82 –NOVEMBRE 2012 –LTN THIERRY TOURNIE

Déversement subite d'un mur pignon très élancé et n'étant plus contreventé par les pannes du toit



video-2012-11-14-14-20-19.mp4



# ANNEXE

## REVUE DES MODES CONSTRUCTIFS EN MAÇONNERIES DE CERTAINS PAYS

# DOMMAGES AUX MAÇONNERIES

## 5. Revue des modes constructifs en maçonneries de certains pays INDE (Région montagneuse du Nord)



Portiques béton et remplissage briques de terre



Plancher et toiture en poutres bois et terre



Toit  
terrasse



Poteaux bois non  
encastés  
(reprise des C.Vert.  
Uniquement)

# DOMMAGES AUX MAÇONNERIES

## 5. Revue des modes constructifs en maçonneries de certains pays INDE (Région montagneuse du Nord)

| ELEMENT    | CARACTERISTIQUE                                                                | COMPORTEMENT                                      |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Maçonnerie | Brique de terre crue<br>(terre+paille+eau) L=30 cm                             | Non chaînée, disloquement rapide                  |
| Structure  | Murs ou/et Portiques béton<br>Avec remplissage rigide<br>Pas de murs de refend | Mauvaise tenue<br>(faible ou nul contreventement) |
| Hauteur    | R+2 en général                                                                 | Massique                                          |
| Plancher   | Poutres Bois et terre                                                          | Pas d'effet de diaphragme                         |
| Toiture    | Toit terrasse                                                                  | Masse Pendulaire                                  |



Fabrication des briques de terre crue (ADOBE)



Parfois R+3 !!

Documents issus du site Habitat du monde, [www.6climats6habitats.com/intro\\_habitat.htm](http://www.6climats6habitats.com/intro_habitat.htm)

# DOMMAGES AUX MAÇONNERIES

## 5. Revue des modes constructifs en maçonneries de certains pays INDE (Région du Sud)



Séisme de BHUJ  
2001  
M=7.5

Effondrement du à la dislocation  
des maçonneries



Effet toiture lourde

| ELEMENT    | CARACTERISTIQUE                           | COMPORTEMENT                            |
|------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Maçonnerie | Pierre naturelle                          | Non chaînée,<br>disloquement rapide     |
| Structure  | Murs                                      | Mauvaise tenue<br>(contreventement nul) |
| Hauteur    | R+ 1 max                                  | Massique                                |
| Plancher   | Poutrelles métalliques<br>de récupération | Pas d'effet de<br>diaphragme            |
| Toiture    | Toit terrasse très lourd                  | Masse Pendulaire                        |

# DOMMAGES AUX MAÇONNERIES

## 5. Revue des modes constructifs en maçonneries de certains pays EGYPTE



| ELEMENT    | CARACTERISTIQUE                                       | COMPORTEMENT                                         |
|------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Maçonnerie | Brique de terre crue<br>(terre+paille+eau) L=30<br>cm | Non chaînée,<br>disloquement rapide                  |
| Structure  | Murs                                                  | Mauvaise tenue<br>(faible ou nul<br>contreventement) |
| Hauteur    |                                                       | Massique                                             |
| Plancher   | Poutres Bois et terre                                 | Pas d'effet de<br>diaphragme                         |
| Toiture    | Toit terrasse                                         | Masse Pendulaire                                     |

# DOMMAGES AUX MAÇONNERIES

## 5. Revue des modes constructifs en maçonneries de certains pays IRAN



Séisme de BAM  
2003  
M=6.6

Images BMPM M D'OLIVEIRA

| ELEMENT    | CARACTERISTIQUE                         | COMPOTEMENT                                          |
|------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Maçonnerie | Petit appareil                          | Non chaînée,<br>disloquement<br>rapide               |
| Structure  | Murs<br>Et portique avec<br>remplissage | Mauvaise tenue<br>(faible ou nul<br>contreventement) |
| Hauteur    | R+1                                     | Massique                                             |
| Plancher   | Poutrelles<br>métalliques               | Pas d'effet de<br>diaphragme                         |
| Toiture    | Toit terrasse                           | Masse Pendulaire                                     |

# CREDITS

Crédits images, photos et illustrations

- Patricia BALANDIER, DDE Martinique
- B.M.P. Marseille, M D'Oliveira
- Milan Zacek, construire parasismique, éditions Parenthèses
- AFPS –Rapport final du séisme de Lorca (Espagne)
- Quotidien de presse L'OBS
- France3
- Mémoire de Baptiste Barbotin- Stabilité des constructions en pierres: cas des voûtes
- SETRA- Voûtes en maçonnerie
- CNVVF- Ministère de l'Intérieur, Corps National des sapeurs Pompiers- Vigili Del Fuoco-Etalement de soutien en bois-
- SDIS 82, Ltn Thierry TOURNIE
- SDIS 56, Adj Christophe RIPOSI
- SDIS 63, Cdt s Richard Faure et Franck Bénédict
- ORTP Marignane