

# ***Pathologies et réparations structurales des constructions***

***André PLUMIER***

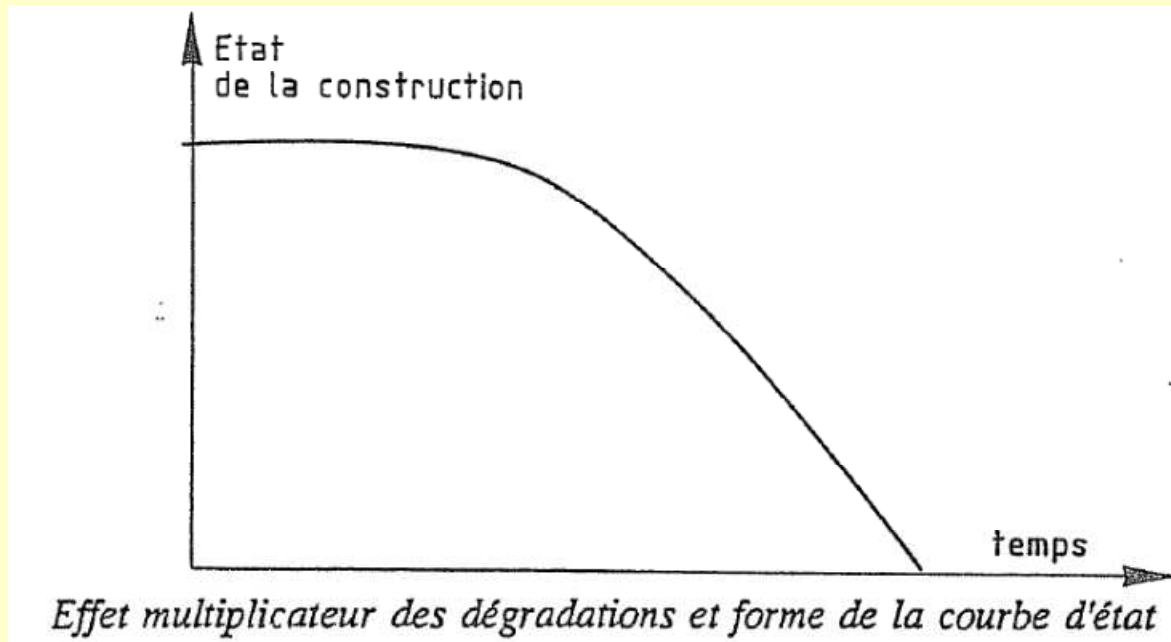
***2011***



# ***1. Pathologies des constructions.***

## REMARQUES GENERALES

## Sur les causes de dégradation



**Dommages** résultat d'une **conjonction de causes**

- mécaniques
- physico-chimiques

**Souvent** résultat d'**actions considérées secondaires ou négligées**

- Effets thermiques
- Déformations différées
- Déformations des éléments porteurs
- Fatigue
- Vibrations

## REMARQUES GENERALES

### ORIENTATION DES FISSURATIONS

#### **Caractéristiques communes des fissurations**

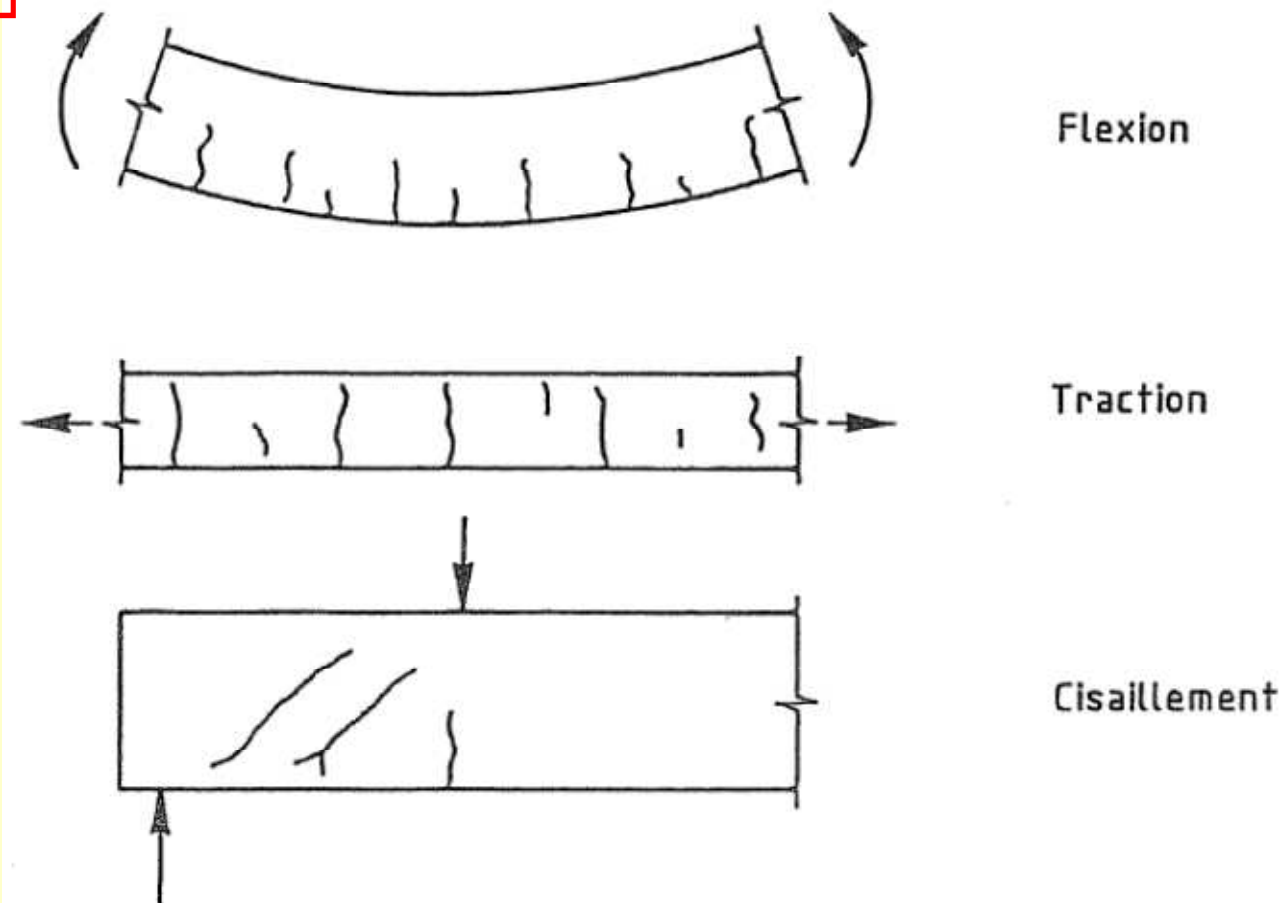
- Localisées où le rapport  $R = \text{contrainte appliquée} / \text{résistance}$  est le plus élevé
- En milieu homogène: perpendiculaires aux contraintes principales de traction
- En milieu hétérogène: fissures là où le rapport  $R$  est élevé

Ex:       aux joints de reprise de bétonnage  
          dans les zones où les armatures sont insuffisantes

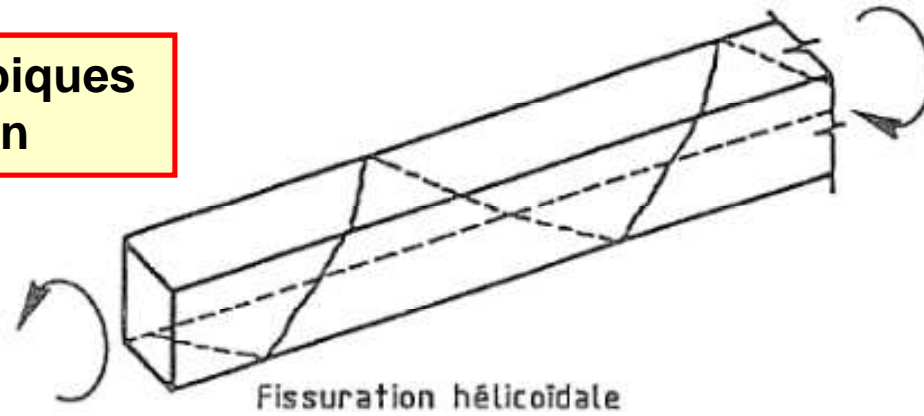
**Orientation des fissures** => état de contrainte  
                                  => la sollicitation correspondante: flexion, traction, ...  
                                  => suggère une cause

- Toujours: indice immédiat utile
- Parfois: donnée de calcul de sollicitation anormale

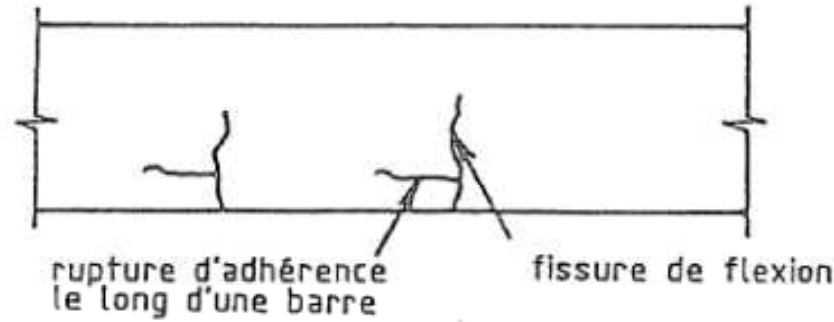
## Schémas typiques de fissuration



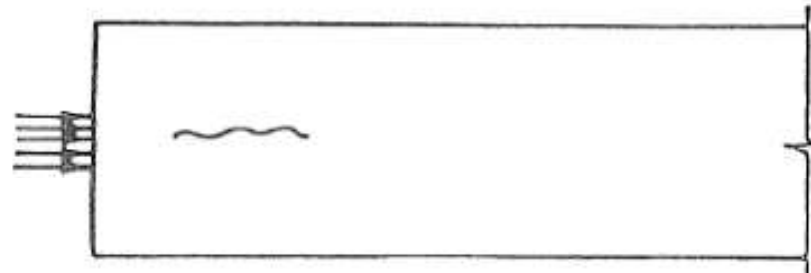
**Schémas typiques  
de fissuration**



Torsion



Défaut d'adhérence



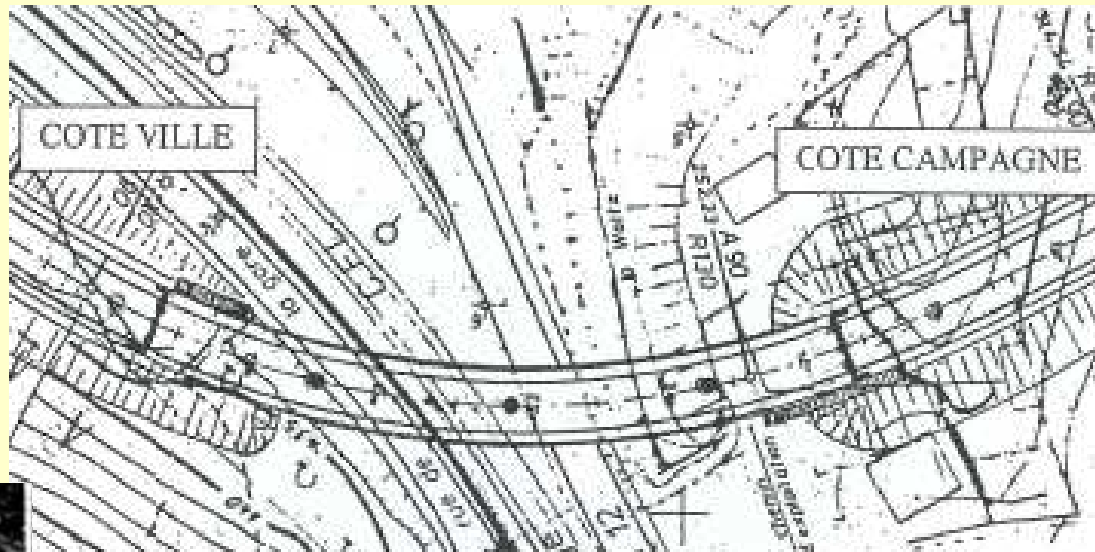
Charge concentrée



**Pression interne  
=>traction circonférentielle**

**Exemple de calcul  
au départ d'une  
fissuration  
Viaduc à Trois Vierges  
(GD Lux.)**

**Troubles:  
joints de dilatation fermés**



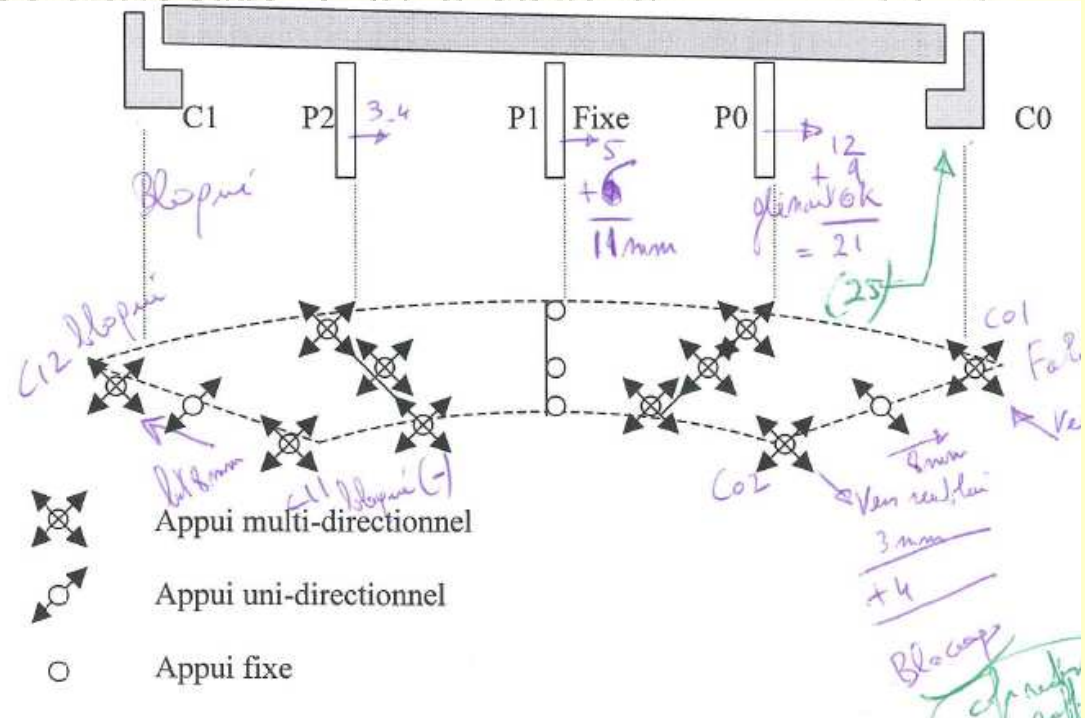
*Schéma des appuis théorique.*



Joint côté ville

Côté Campagne

Côté Ville

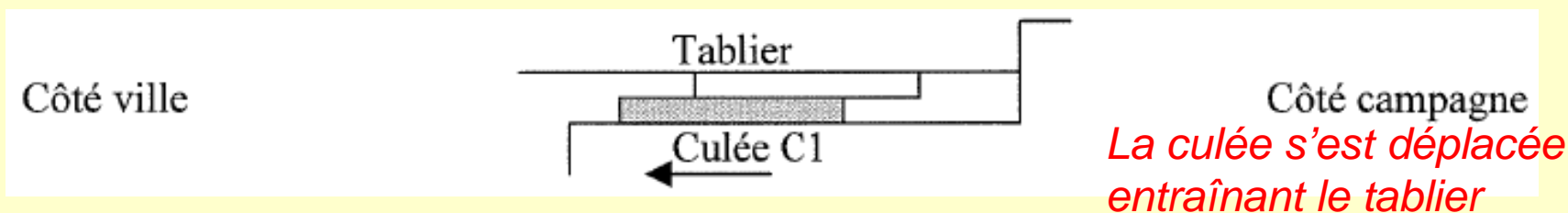


## Autres Troubles

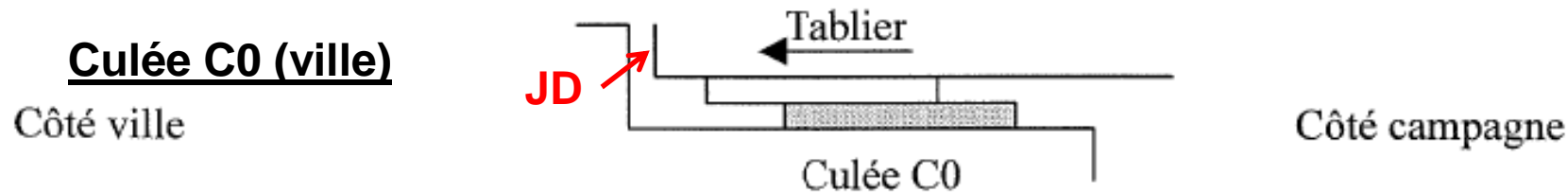
- Déformation garde corps & rail sécurité
- Déplacements visibles aux appuis



### Culée C1 (campagne)

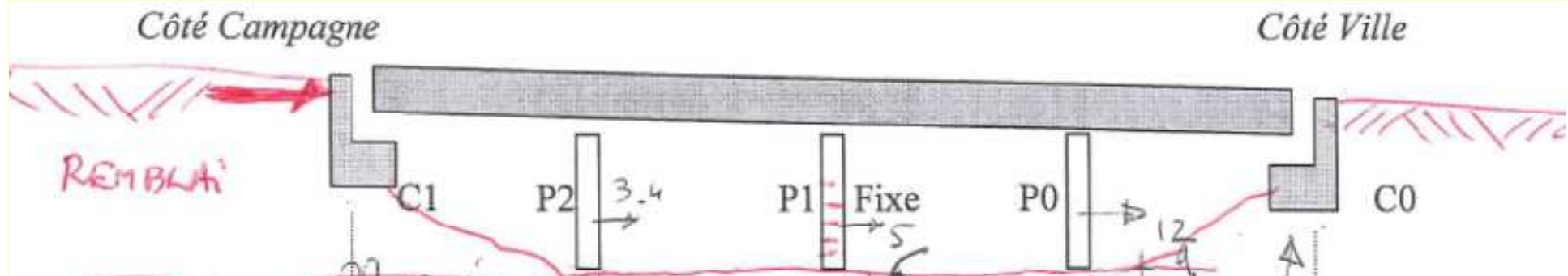


### Culée C0 (ville)



*Le tablier entraîné s'est déplacé => Joint de dilatation **JD** fermé*





**Autre trouble:** fissures horizontales à l'appui fixe Pile P1  
sur 30 à 50% sections  
Déformations => flèche horiz. estimée  $\approx 30$  mm

**Conclusion:** le talus en remblais côté campagne se déforme et pousse le pont

**Danger de ruine de la pile fixe ?**

=> Calculs

Effort normal N connu =  $N_G$  dû au poids mort G  
Moment de flexion sollicitant inconnu et problématique

Calculs Résistance  $M_{Rd}(N_G)$   
 $M_{ed} \Leftrightarrow$  flèche horiz = 30 mm ?

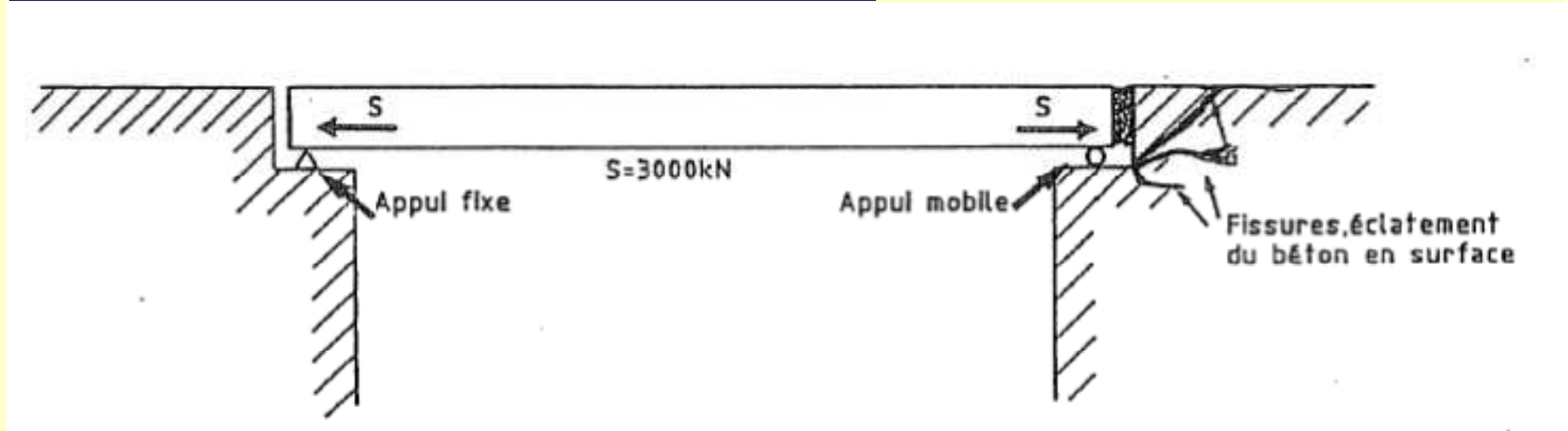
2 phases: béton non fissuré =>  $M_{fiss}$  et  $f_{fiss} = 3,5$  mm  
béton fissuré  $E_{est} = E/3 \Rightarrow \Delta M$  et  $f = 26,5$  mm

$M = M_{fiss} + \Delta M = 0,7 M_{Rd}(N_G) \Rightarrow$  **intervention requise**



## EXEMPLE

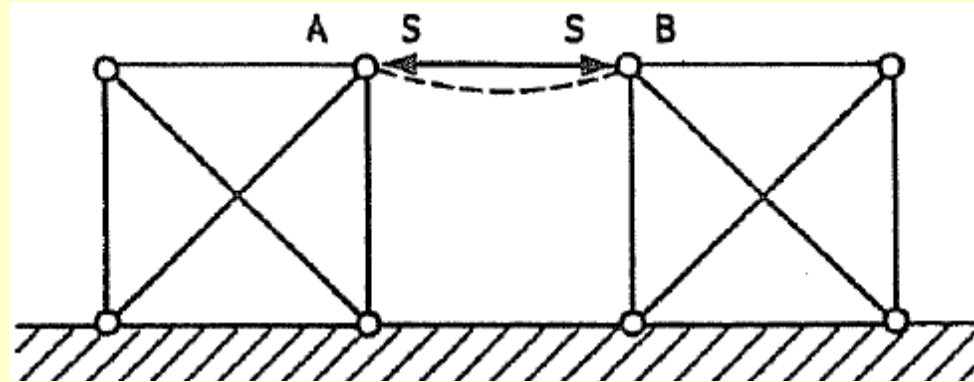
### Poutre de pont dont l'appui mobile est bloqué



Poutre de section  $A = 0,2 \text{ m}^2$   $t^\circ$  passe de  $-20^\circ\text{C}$  à  $+30^\circ\text{C} \Rightarrow \Delta t = 50^\circ\text{C}$   
Appui mobile bloqué. Effet du blocage?

- Force horizontale  $S$  max estimée:  $S = \alpha \Delta t E A = 10^{-5} \times 50 \times 30000 \times 0,2 \cdot 10^6 = 3 \cdot 10^6 \text{ N} = 3000 \text{ kN (300 t)}$
- Cause de blocage de l'appui
  - défaut de conception
  - défaut d'entretien  $\Rightarrow$  graviers, boues  
 $\Rightarrow$  blocage, au moins partiel
  - déplacement d'un appui
- Force horizontale non prévue en tête de pile ou de culée
  - $\Rightarrow$  écrasement local & fissuration du béton de culée
  - $\Rightarrow$  accès de l'eau aux armatures & ruine de l'appui.

## Flambement par effet thermique



AB, panne de rive, bloquée par les contreventements

IPE 260

6 m de portée

S235

$\Delta t = 20^\circ$  entre panne et sol  $\Rightarrow S = \alpha \Delta t E A = 10^{-5} \times 20 \times 205 \cdot 10^3 \times 2010 = 82 \text{ kN}$

$S_{d,t^\circ} = \gamma S = 123 \text{ kN}$

Charge de ruine par flambement :  $\lambda = 6000/65,8 = 91$        $\chi_{\text{axe fort}} = 0,68$

$R_d = 2010 \times 235 \times 0,68 = 321 \text{ kN}$

Même si  $S_{d,t^\circ} < R_d$ , 30 % de la résistance sous une sollicitation non comptée

Contre-mesures

espacement des structures de contreventement

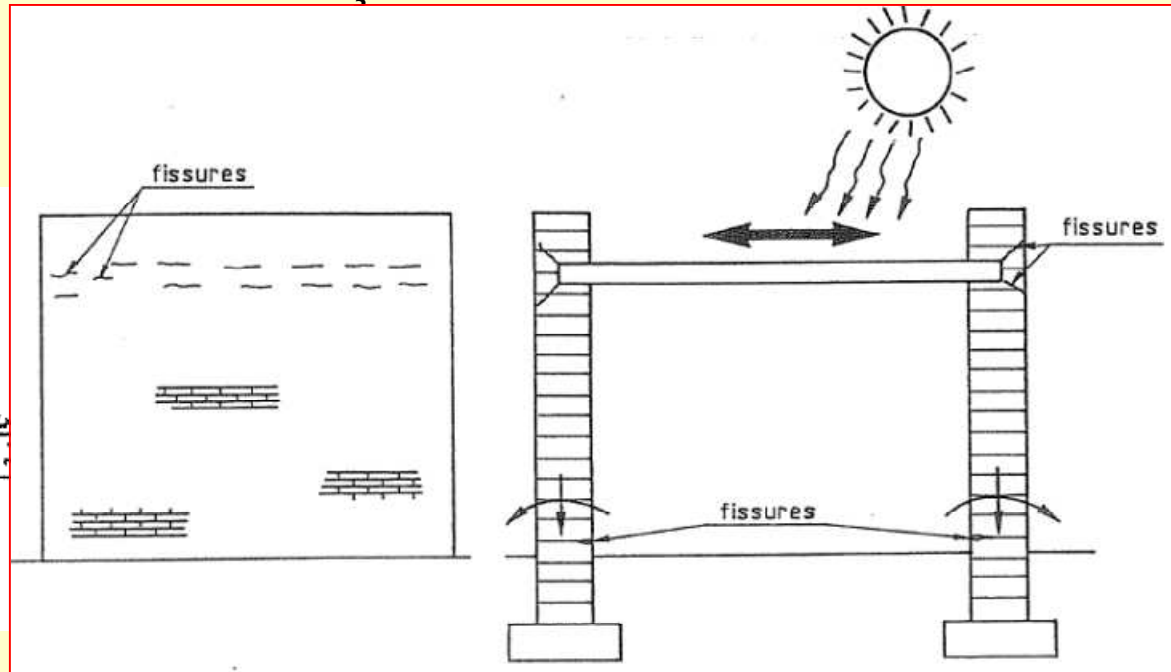
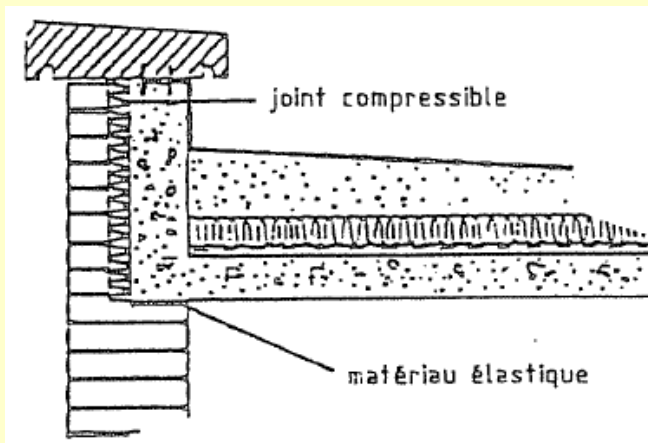
jeux dans les assemblages

## EXEMPLE.

### Désordre de façade par poussée thermique de dalle de toiture

Planchers ou dalles en béton siège de dilatations thermiques non libres

⇒ variation de température = fissures en façade.

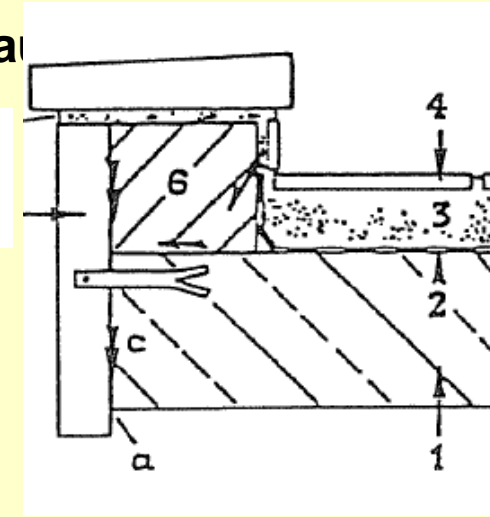
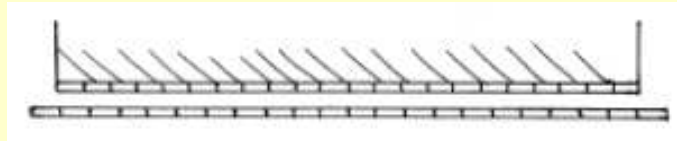


## Solutions

- Réduire l'action thermique isolants en face supérieure de la couverture.
- Permettre le libre mouvement de l'élément porteur de toiture
  - appui à glissement tôles galvanisées
  - appui déformable néoprène
- Augmenter la rigidité/résistance de la maçonnerie
  - chaînages horizontaux & verticaux
  - => aptes à résister aux forces thermiques
- Note: même problème possible aux étages intermédiaires

## EXEMPLE. Désordre dans des parements de façade

- Nez de balcons revêtu de plaques fixées dans le béton par attaches rigides bandeau horizontal sur la longueur de la façade = 27 m.
- Après 3 ans: chute de plaques aux extrémités du bandeau

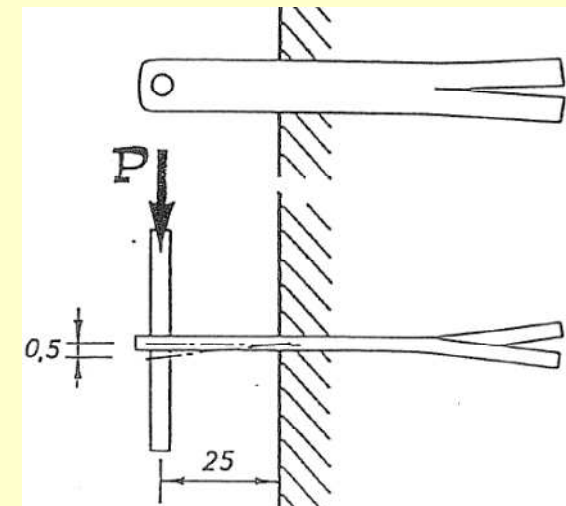


### Observations

- Rupture des attaches au ras du béton;
- Joints verticaux entre plaques remplis de mortier aucun joint souple sur la longueur des bandeaux
- Cassure des attaches => sollicitation horizontale
- Mouvement différentiel entre balcon et plaques surtout visibles aux extrémités de balcon

### Calculs

- Déformations différentielles sur  $27/2=13,5\text{m}$   
5,4 mm retrait    4,75 mm thermique  
total 10 mm
- Déformations thermiques différentielles plus néfaste: cyclique => fatigue des attaches.



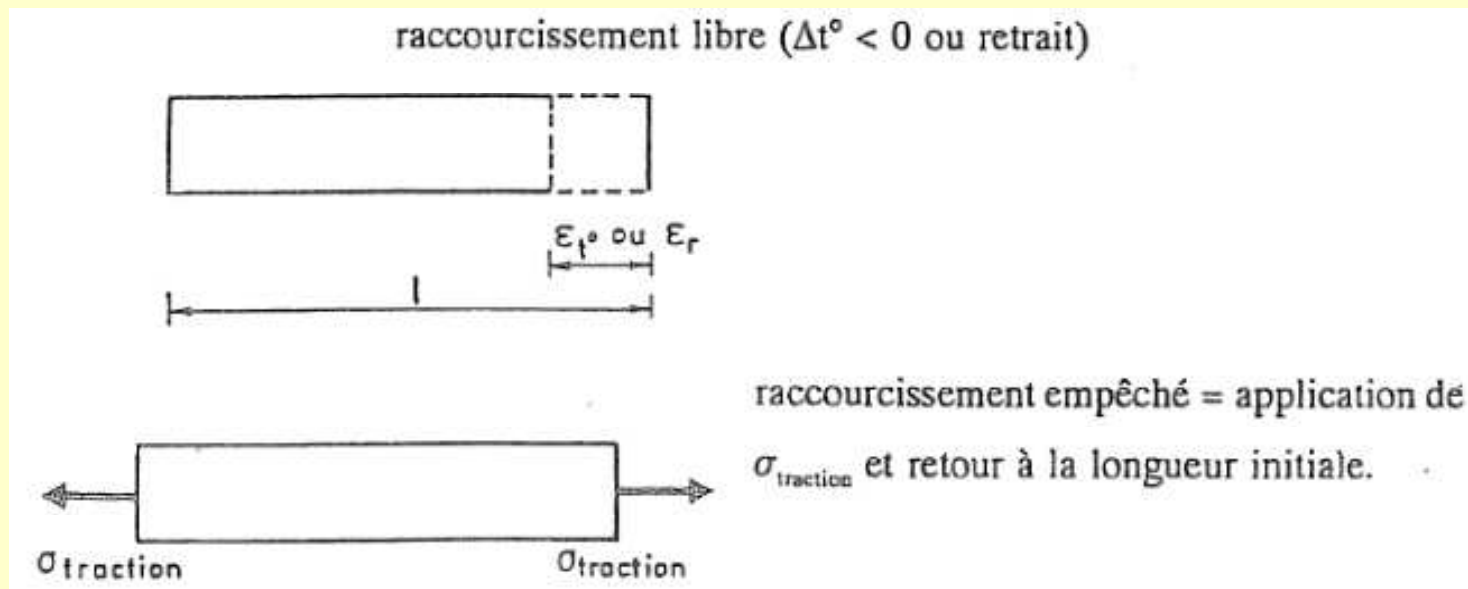
Pour  $f = 0,5 \text{ mm}$ : effort sur l'attache au droit du goujon

$$P=3EIf / l^3$$

$$\sigma = 469 \text{ N/mm}^2 > 500 \text{ N/mm}^2 \text{ contrainte de rupture d'un laiton 60/40}$$

## DIMINUTION DE TEMPERATURE OU RETRAIT UNIFORME

- Pièce de section A libre de se raccourcir soumise à une diminution de température  $\Delta t^\circ \Rightarrow \epsilon_{t^\circ} = \alpha \Delta t^\circ$
- Raccourcissement empêché:  $\epsilon = 0$   
Pour réaliser  $\epsilon = 0$ : appliquer des contraintes de traction  $\sigma = \epsilon_{t^\circ} E = \alpha \Delta t^\circ E$   
Force totale  $S = \alpha \Delta t^\circ E A$



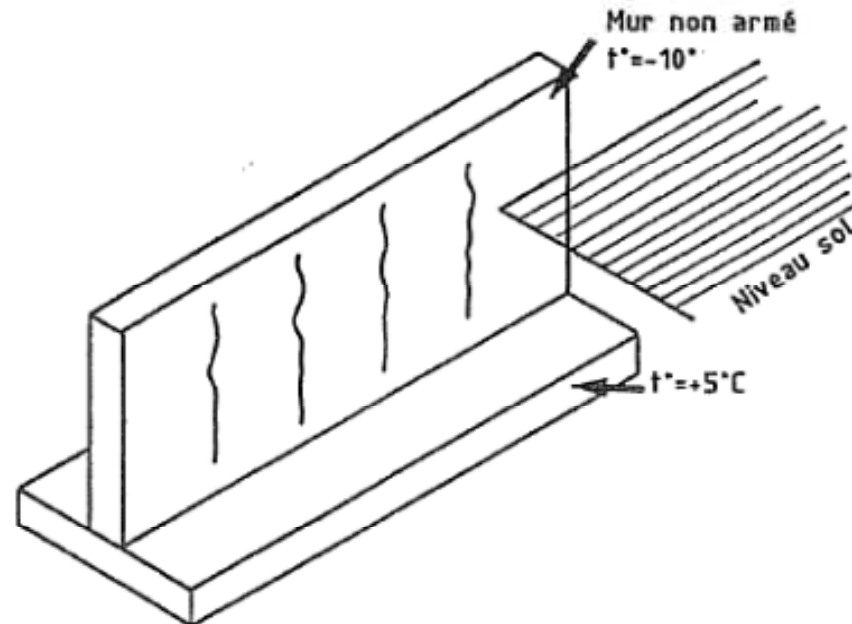
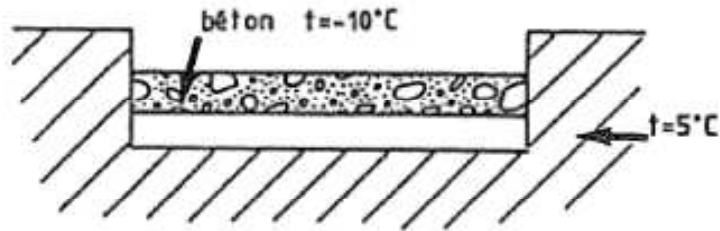
**2 solutions:**

- libre déformation
- ou résistance adéquate

## EXEMPLE

### Raccourcissement thermique empêché d'un mur en béton

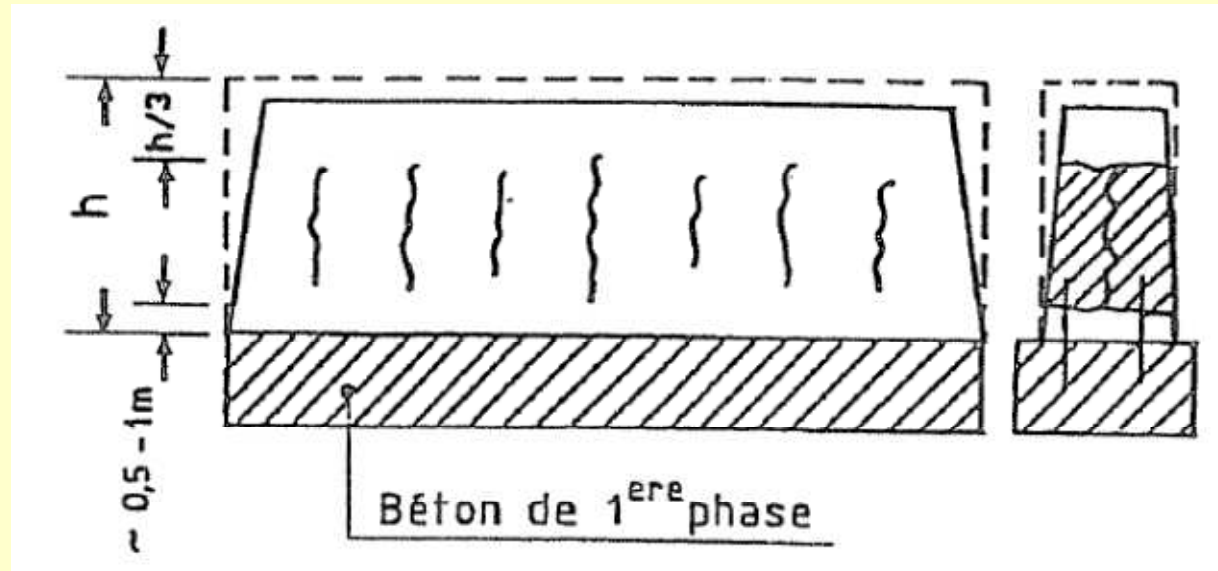
- $\Delta t^\circ = 15^\circ\text{C}$  entre le mur et sa semelle (enterrée et qui bloque le raccourcissement thermique du mur)
- $\varepsilon_{t^\circ} = \alpha \Delta t = 10^{-5} \times 15 = 1,5 \cdot 10^{-4}$       $\sigma = \alpha \Delta t E = 10^{-5} \times 15 \times 30000 = 4,5 \text{ N/mm}^2$   
Résistance à la traction d'un béton  $f_{ct} \approx 10\%$  résistance à la compression  $f_c$   
Béton C25:  $\sigma = 4,5 \text{ N/mm}^2 > 25/10 = 2,5 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow$  fissuration





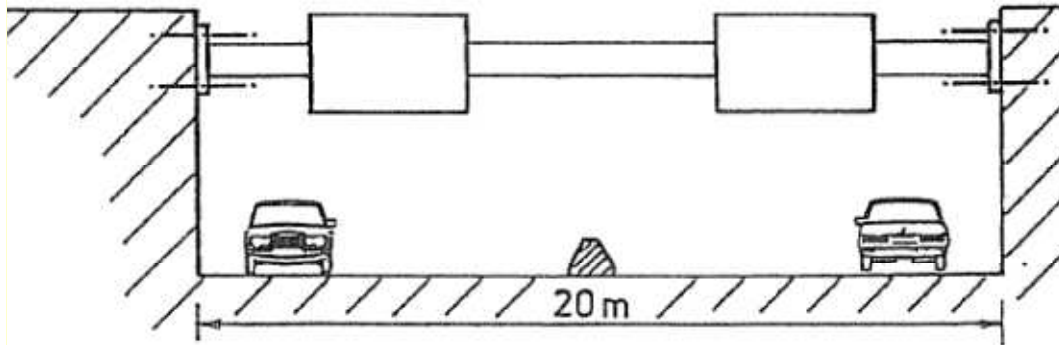
## EXEMPLE

### Retrait empêché d'un mur en béton



- Retrait, au minimum:  $\varepsilon_r = 0,2 \text{ mm/m} = 2 \cdot 10^{-4}$   
 $\approx \varepsilon_{t^0} = 1,5 \cdot 10^{-4}$  de l'exemple précédent
- ⇒ fissuration du béton
- Armature minimum en béton armé ⇒ répartir en nombreuses petites fissures
  - Vaut pour des situations standard
  - Calcul nécessaire si des situations plus exigeantes prévisibles

**EXEMPLE.**  
**Rupture d'ancrages par effet thermique**

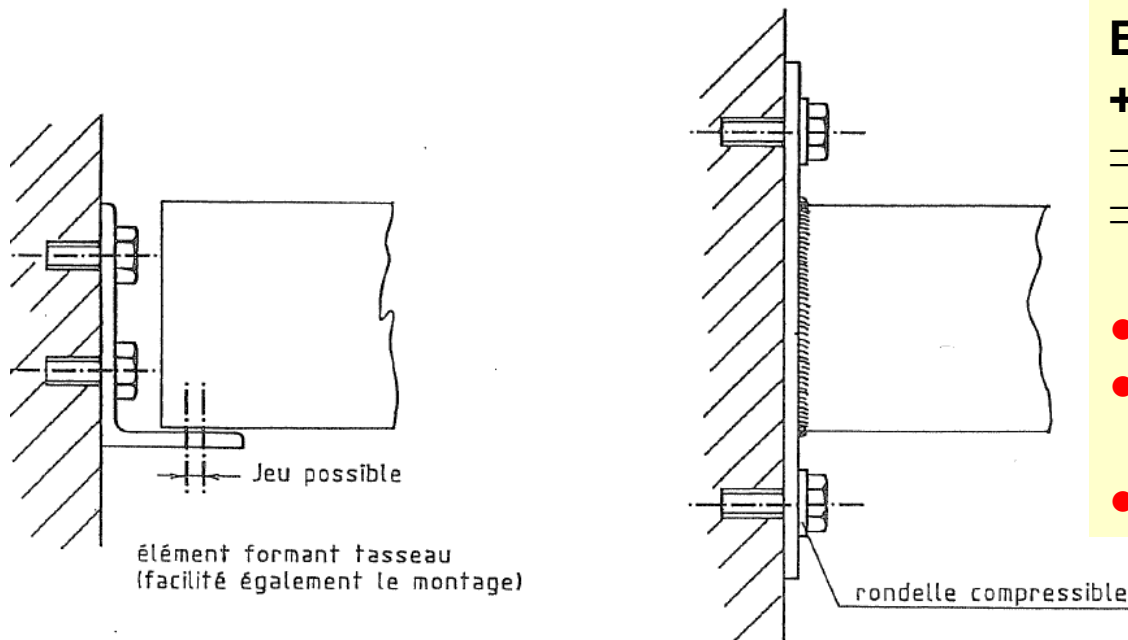


- Support de signalisation routière**
- tube 300 x 200 x 10
  - section A = 9291 mm<sup>2</sup>
  - fixé par platines d'extrémité
  - 4 boulons M27 10.9 précontraints
  - $\sigma = 500 \text{ N/mm}^2$
  - Pose en été (+ 30°C)
  - Rupture en hiver (-10°C)

$S = \alpha \Delta t E A = 10^{-5} \times 40 \times 205000 \times 9291 = 761 \text{ kN}$

Traction/boulon de fixation F = 190 kN pour une section résistante A<sub>s</sub> = 459 mm<sup>2</sup>

$\sigma = 190.000/459 = 413 \text{ N/mm}^2$



**Effet thermique**

+ M à l'encastrement:

⇒ contrainte totale  $\sigma_b = 913 \text{ N/mm}^2$

⇒  $\approx f_y$  boulon (900 N/mm<sup>2</sup>)

- ruine statique du boulon
- ruine par fatigue
- cycles thermiques
- ruine du scellement

## FISSURATION DE MAÇONNERIES

Logements groupés par blocs de 4 ou 6  
Façades de longueur 32 et 48 m  
Aucun joint de mouvement

Pour réduire le risque de fissuration:

- limiter le retrait et la dilatation

en évitant l'emploi de matériaux dont le retrait n'est pas terminé

en réduisant leur humidification

en employant des matériaux de faible coefficient de dilatation

en limitant les écarts de température;

- employer des matériaux à grand allongement à la rupture, bas module d'élasticité, ou grande résistance à la traction

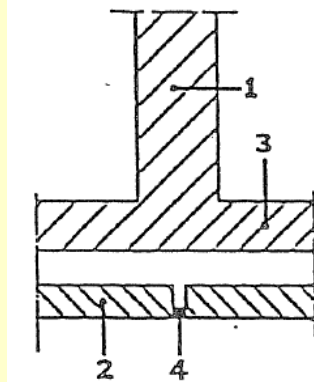
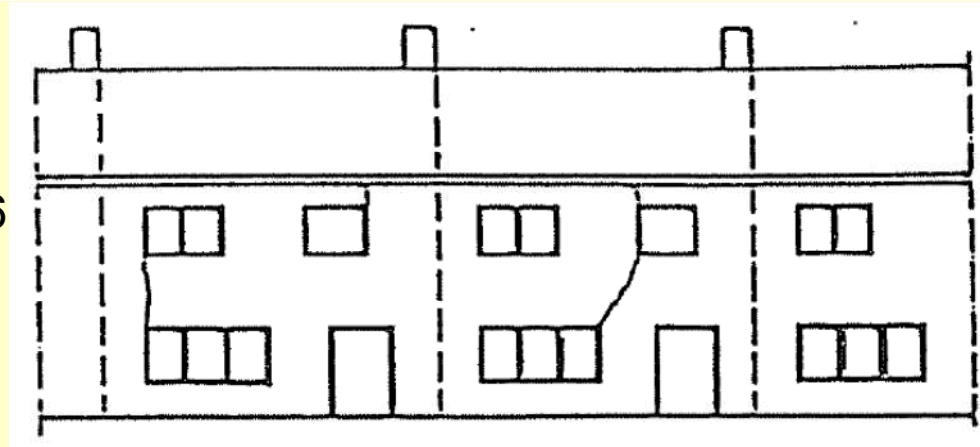
- armer la maçonnerie

- permettre la libre dilatation

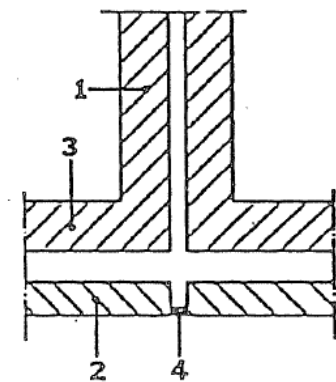
des éléments de constructions

=> joints de dilatation

- Permettre le glissement aux appuis



1. mur mitoyen  
2. parement



3. maçonnerie portante  
4. joint souple

**EXEMPLE . Poutre de parking.**

**Au voisinage d'un joint de dilatation  
les poutre d'un bloc s'appuient  
sur des corbeaux de l'autre bloc.**

**Appui mobile bloqué.**

**Retrait /Froid/Raccourcissement empêché**

**=> fissures & rupture**



## DEFORMATIONS EMPECHEES.

### ELEVATION DE TEMPERATURE OU RETRAIT NON UNIFORME SUR L'EPAISSEUR

- Élément de paroi plane de longueur unitaire, épaisseur =  $e$
- Température initiale uniforme =  $20^{\circ}\text{C}$   
Effet thermique sur une face  $\Rightarrow t^{\circ} = 50^{\circ}\text{C} \Rightarrow \Delta t^{\circ} = 30^{\circ}\text{C}$
- Allongement différentiel  $\varepsilon_{t^{\circ}}$  entre paroi chaude et froide:  
 $\varepsilon_{t^{\circ}} = \alpha \Delta t = 30 \cdot 10^{-5}$

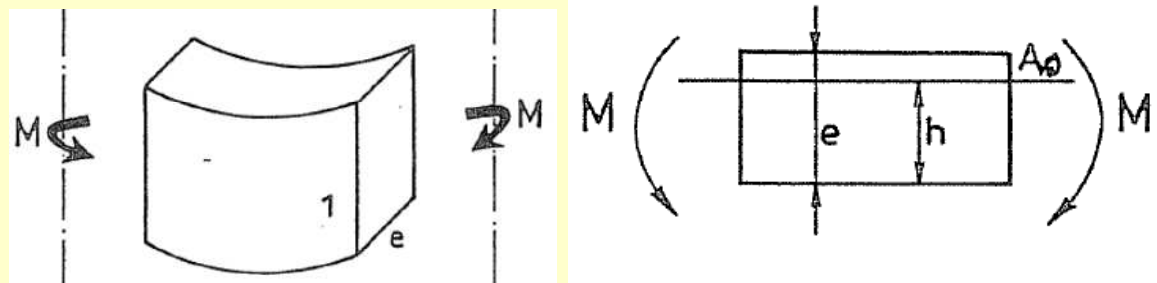
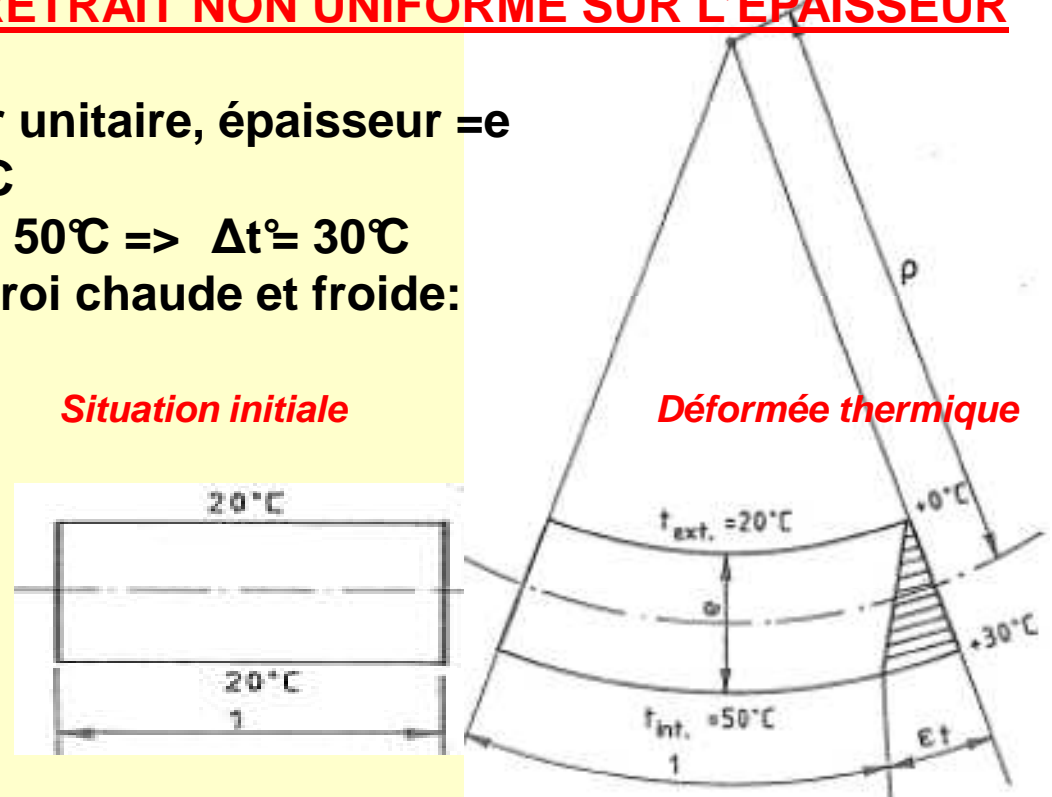
Soit dilatation différentielle libre  
 $\Delta t^{\circ}$  linéaire sur l'épaisseur  
 $\Rightarrow$  incurvation

Triangles semblables  $\Rightarrow 1/\rho = \varepsilon_{t^{\circ}}/e$

- Déformation empêchée
- Courbure nulle ?

appliquer à l'élément déformé un moment de flexion  $M$  pour le « redresser »

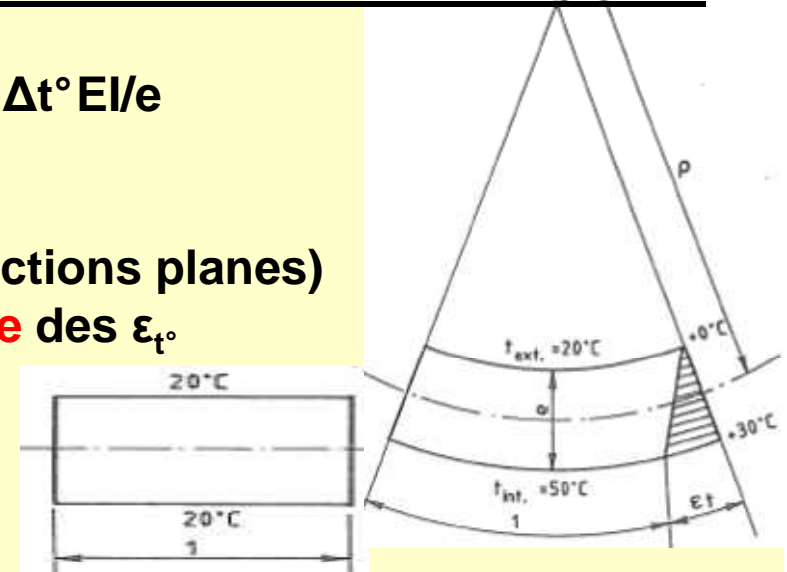
tel que:  $1/\rho = M/EI$   $\Rightarrow M$  induit par l'effet thermique différentiel:  $M = \alpha \Delta t^{\circ} EI/e$



## DEFORMATIONS EMPECHEES.

### ELEVATION DE TEMPERATURE OU RETRAIT DIFFERENTS SUR L'EPAISSEUR

- M induit par l'effet thermique différentiel:  $M = \Delta t^\circ EI/e$   
⇒ Calcul des armatures
- Distribution des  $\varepsilon$  dus à M:
  - **linéaire** sur l'épaisseur (conservation des sections planes)
  - ne peut équilibrer qu'une distribution **linéaire** des  $\varepsilon_{t^\circ}$



### Blocage des déformations ?

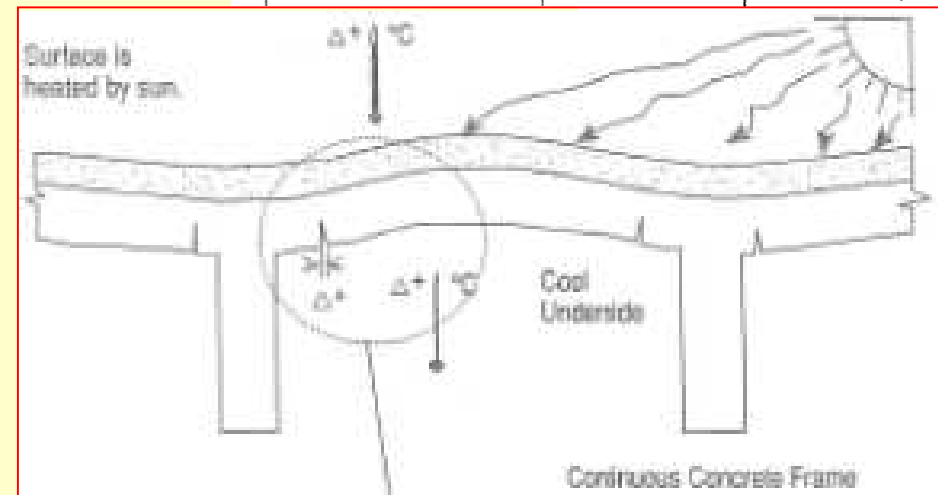
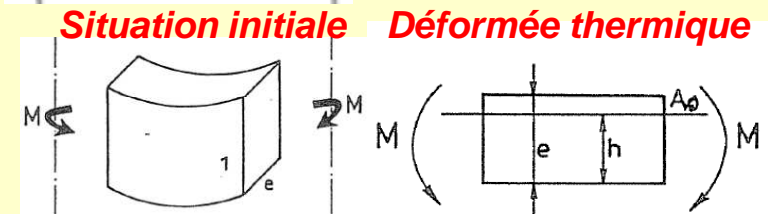
Parois planes bloquées par:

- ▶ murs perpendiculaires
- ▶ planchers

Coques cylindriques bloquées par:

- ▶ elles mêmes (anneaux fermés)

*Effet d'un échauffement différentiel sur une toiture*



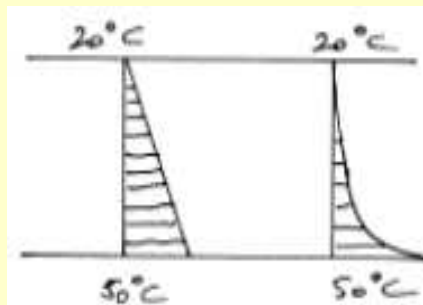
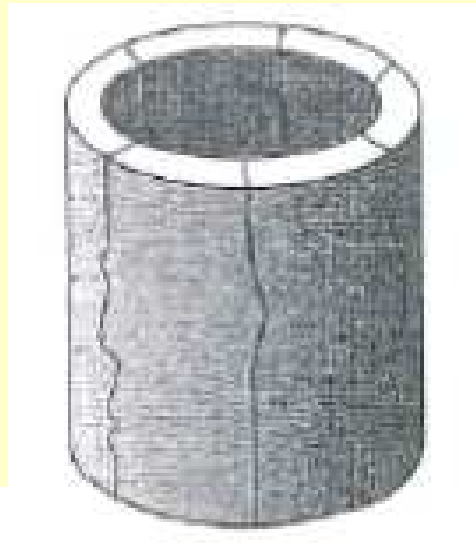
## DEFORMATIONS EMPECHEES.

### ELEVATION DE TEMPERATURE OU RETRAIT DIFFERENTS SUR L'EPAISSEUR

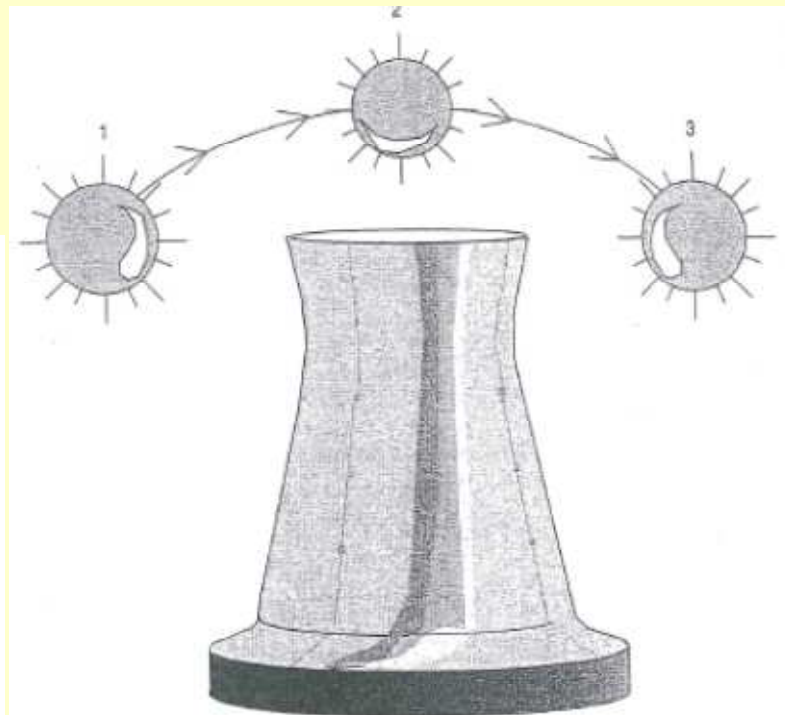
Blocage des déformations ?

Coques cylindriques bloquées par:

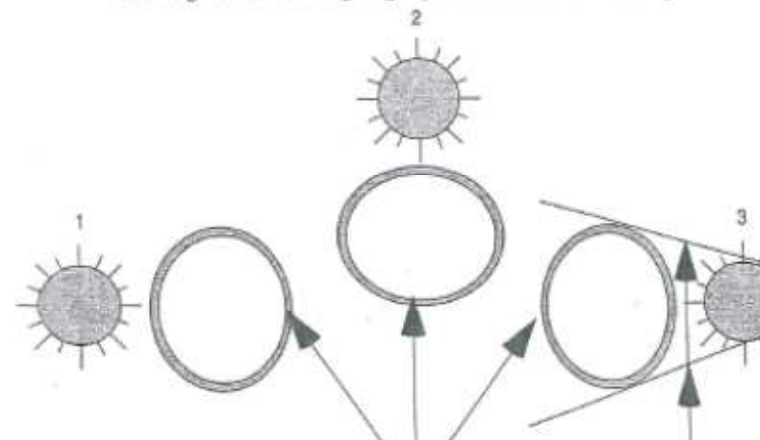
► elles mêmes (anneaux fermés)



**Distribution non linéaire des  $t^\circ$ ?**  
**Calcul plus complexe pour établir M**



Cooling Tower Undergoing Dynamic Thermal Loading



## EXEMPLE. Fissuration d'une cheminée

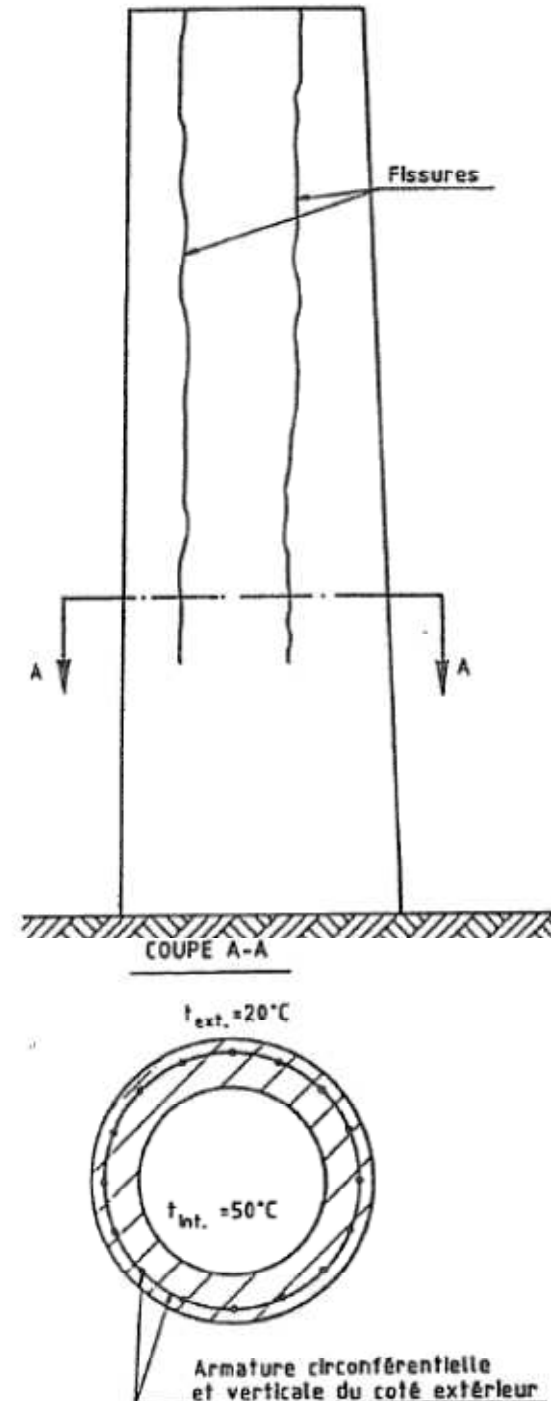
- Cheminée de centrale électrique  
Fissures verticales traversantes
- En fonctionnement:  $t_{\text{int}} = 50^{\circ}\text{C}$     $t_{\text{ext}} = 20^{\circ}\text{C}$   
épaisseur de paroi  $e = 200 \text{ mm}$   
Section de cheminée reste ~ circulaire  
car - anneaux raidisseurs en béton armé  
- effet coque

### Calculs

- Élément de dimension unitaire  $1\text{m}=1000\text{mm}$   
 $I=1000 \times 200^3/12= 666.10^6 \text{ mm}^3$
- Moment de flexion différentiel thermique  
 $M = \Delta t \cdot EI/e = 30.10^{-5} \times 30.10^3 \times 666.10^6 / 200$   
 $M = 30 \times 10^6 \text{ Nmm/m}$
- Armature pour reprise du M:  
 $z = 0,5h = 100 \text{ mm}$     $f_{yd} = 500 \text{ N/mm}^2$   
 $A_s = M/f_{yd} z = 30 \times 10^6 \text{ Nmm} / 50000 = 600 \text{ mm}^2/\text{m}$   
à placer du côté extérieur de la section  
tant verticales que circonférentielles :

### Vérif au plan:

Armatures OK pour  $t_{\text{int}} = 50^{\circ}\text{C}$     $t_{\text{ext}} = 20^{\circ}\text{C}$    ???





## EXEMPLE. Fissuration d'une cheminée (suite)

Période d'arrêt de la centrale :  $t_{\text{ext}} (\text{soleil}) > t_{\text{int}}$   
absence d'armature du côté intérieur

=> amorçage de fissures côté intérieur

=> cycles thermiques jour-nuit et propagation, puis fissure traversante  
armature requise du côté intérieur de la cheminée

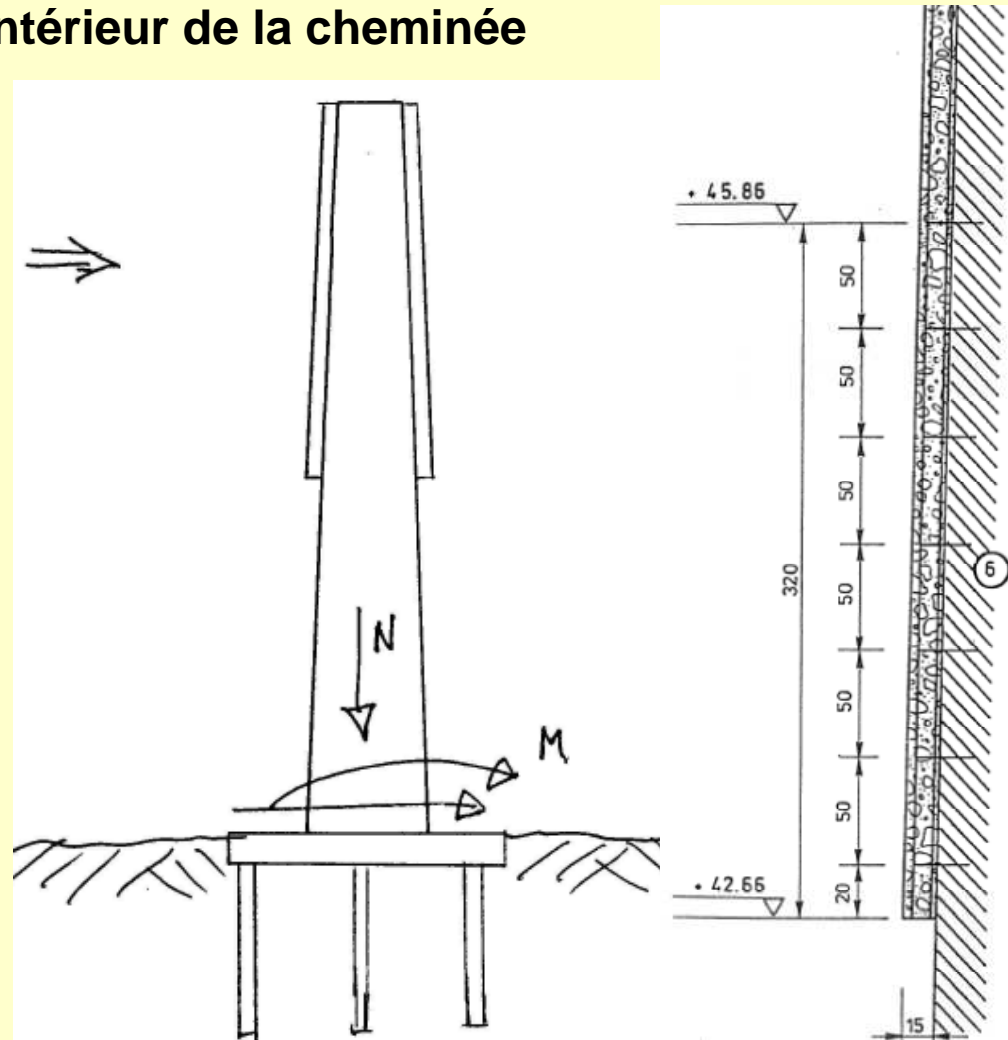
### Réparation

- Chemisage extérieur béton armé  
=> la 2e nappe d'armature

- Prise au vent augmentée
- Poids augmenté

=> Élargissement base

=> Pieux additionnels



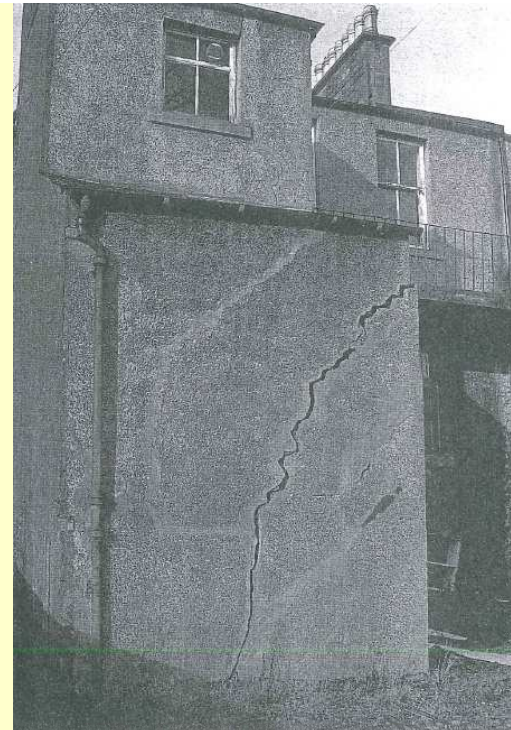
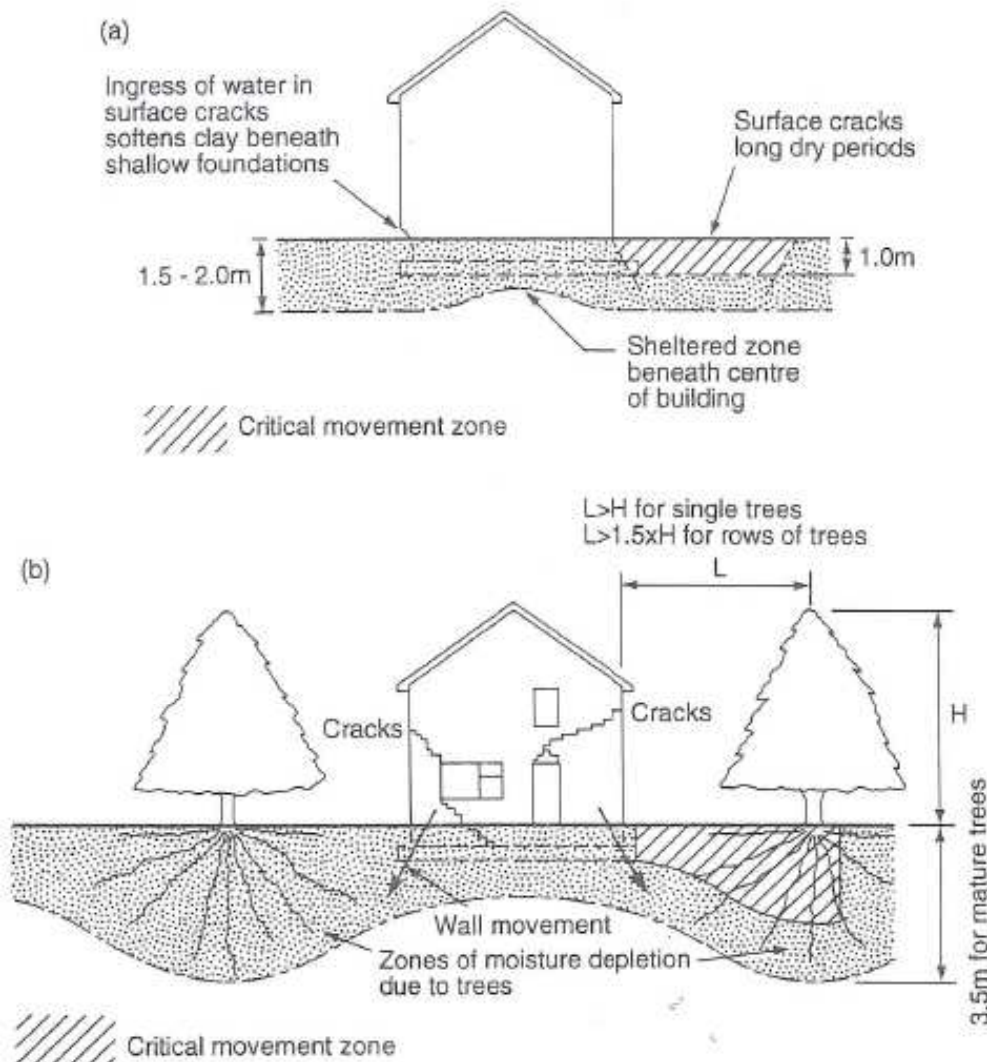
## **PATHOLOGIE. CHAPITRE 2. EFFETS DE DEFORMATIONS DU SUPPORT**

### **INTRODUCTION**

« Support » : superstructure, fondation, élément poutre ou plancher.

Leurs déformations peuvent entraîner des dégradations, par:

- ▶ Omission d'aspects de la déformation: déformations différées...
- ▶ Erreurs d'évaluation, dues à
  - différence entre modèle mathématique et réalité
  - méconnaissance des caractéristiques réelles du support  
sol de fondation gonflant, remblai
  - variation des caractéristiques du sol de fondation avec le temps  
par suite d'augmentation ou de diminution de sa teneur en eau
- ▶ Variations naturelles
  - pluies abondantes
  - grandes sécheresse
  - croissance d'arbres
- ▶ Variations dues à l'homme : pompage d'eau (potable, rabattement chantier)
- ▶ Inadaptation des structures portées aux déformations des « supports »



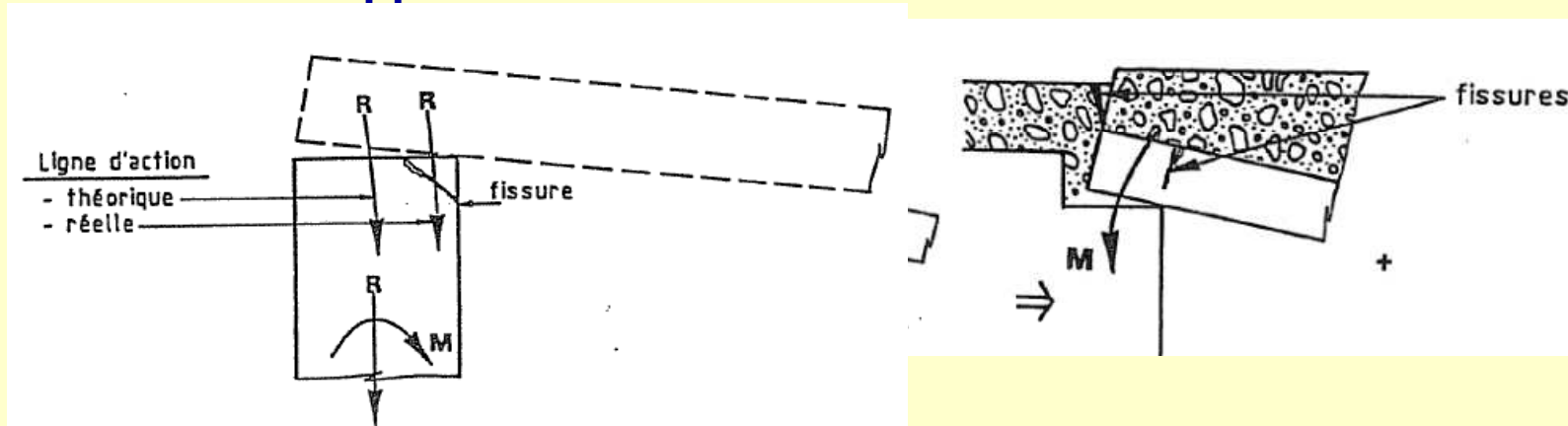
*Effet d'un tassement différentiel.  
 Cause possible: saturation du sol en eau  
 Evacuation bouchée,  
 fosse septique débordante...  
 du côté droit de la construction*

**Exemple: la dessiccation ou l'humidification du sol changent la déformabilité du sol « support » du bâtiment et peuvent entraîner des dégâts.**

*Epaissir le radier ne résout pas le problème. Il faut un radier raidi par des murs en béton armé pour réaliser la raideur requise sur de mauvais sols*

## EFFETS DES DEFORMATIONS PARFOIS OUBLIES

### Rotation aux appuis



La ligne d'action de la réaction d'appui se déplace

⇒ Fissure et éclatement de l'angle où l'appui a lieu

⇒ Moments de flexion  $M$  dans l'élément supportant la poutre

⇒ Soulèvement relatif endommageant les éléments au dessus de la poutre

⇒ Soulèvement relatif : moment  $M$ - dans la poutres, fissures

### Contre mesures

▶ Appuis + étroit que le support

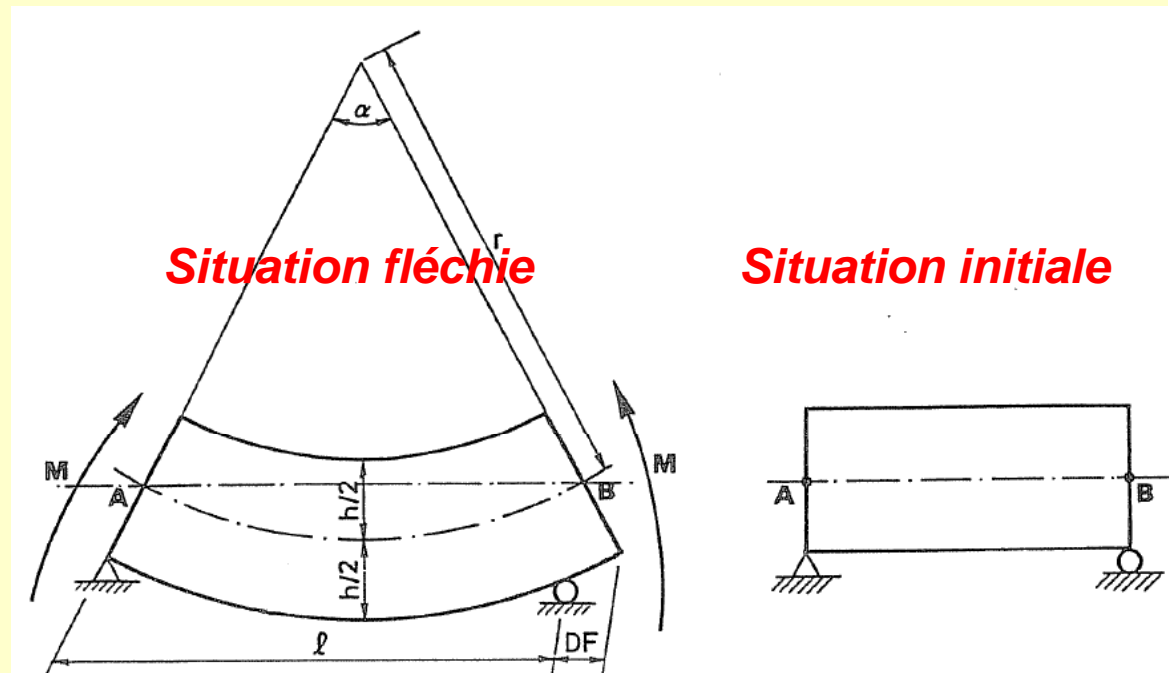
▶ Poutres +raides

▶ Armatures pour  $M$ -



## Une poutre n'est pas appuyée à l'axe neutre, mais à la fibre inférieure

- Allongement axe neutre d'une poutre fléchie = 0
- Allongement fibre tendue  $\neq 0 \Rightarrow$  déplacement horizontal D à l'appui mobile
- si D non libre:  
 $\Rightarrow$  sollicitations à l'appui



### Evaluation de D

Poutre soumise à flexion pure

►  $DF = \alpha(r + h/2) - \alpha r = \alpha h/2$

$\alpha = (Ml)/(EI)$

$\Rightarrow DF = (Mlh)/(2EI)$

► B se rapproche de A car axe neutre incurvé : arc – corde = DN =  $\alpha r - 2r \sin \alpha/2$   
négligeable pour  $\alpha$  petit :  $\alpha = \sin \alpha \approx 0$

► Total:  $D = DF - DN$

Exemple. Poutre portée 4 m      $\sigma$  acier = 240 N/mm<sup>2</sup>

DF = 2,33 mm

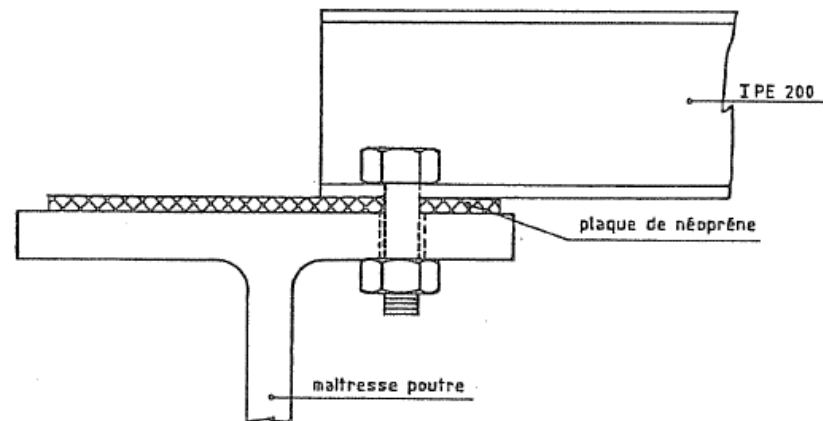
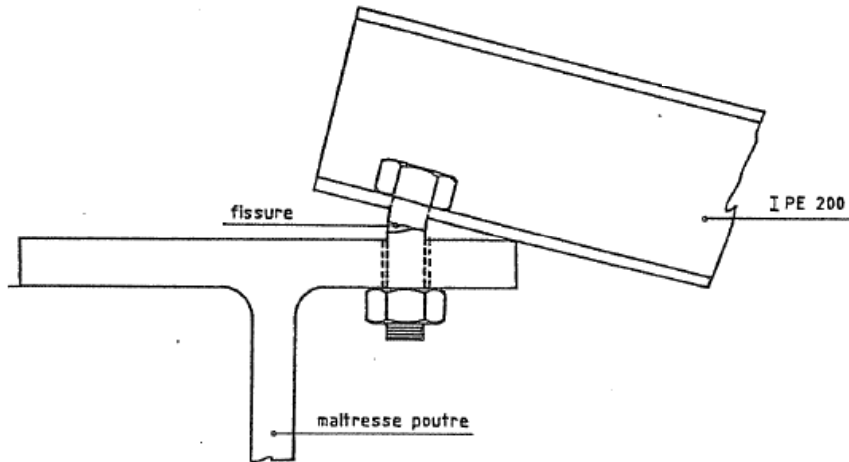
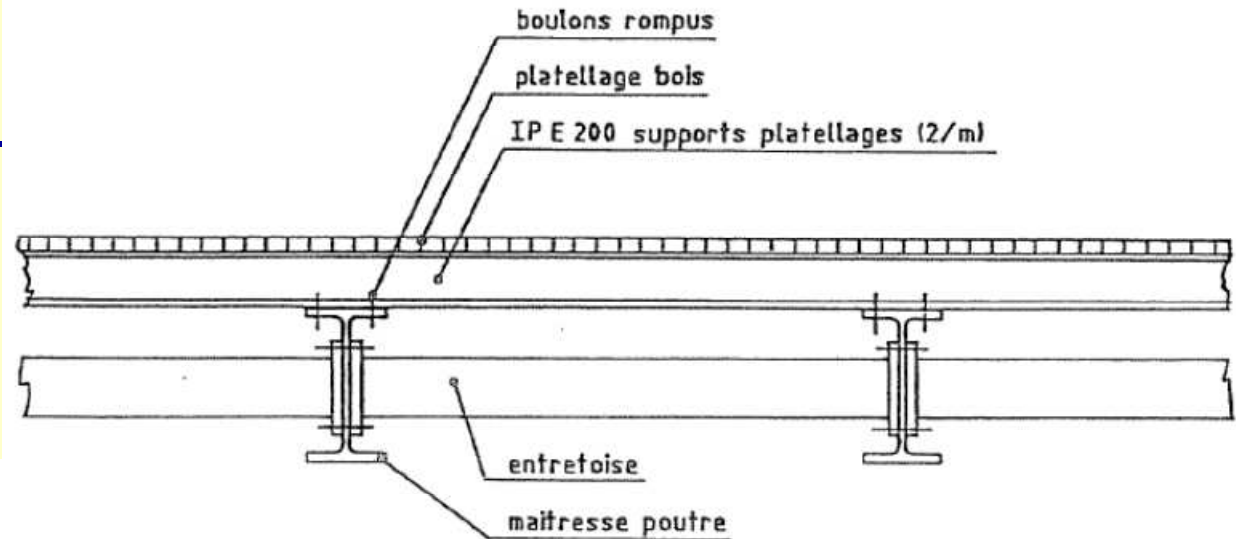
DN = 0,36 mm

D = DF - DN  $\approx$  2 mm

**DF: écartement** relatif des extrémités inférieures de la poutre

$\Rightarrow$  *Un appui mobile se justifie aussi pour cet effet des déformations*

## DEGRADATION D'UN PLATELAGE DE PONT



Les boulons sont :

- tendus par M-
- fléchis par la rotation du IPE à l'appui  
**=> effet de levier**
- cisailés

allongement semelle inférieure IPE

- sollicités par  $\Delta t^\circ$  platelage – poutres

Solution: plaque de néoprène à l'appui des IPE  
=> liberté de translation (cisaillement du néoprène)  
rotation (écrasement différentiel du néoprène).

## DEFORMATIONS DIFFEREES

**Retrait** : raccourcissement sans contrainte appliquée

**Fluage** : raccourcissement sous contrainte appliquée  
additionnel au raccourcissement instantané

### Effets

- ▶ **Forme modifiée**                      **esthétique modifiée**                      **usage modifié**
- ▶ **Contraintes internes modifiées**                      **redistribution d'efforts**  
**instabilité**
- ▶ **Troubles aux éléments portés**

### Calcul du retrait et du fluage

**Eurocode 2**

### Fondations

**Egalement sujettes à déformations différées**

- ▶ **Fluage**
- ▶ **Tassements ou gonflements des sols par cause de**
  - **humidification ou dessication naturelle du sol**
  - **modification par l'homme de l'environnement**  
**fouille    zone minière                      vibrations trafic**

### Déformations les plus dommageables

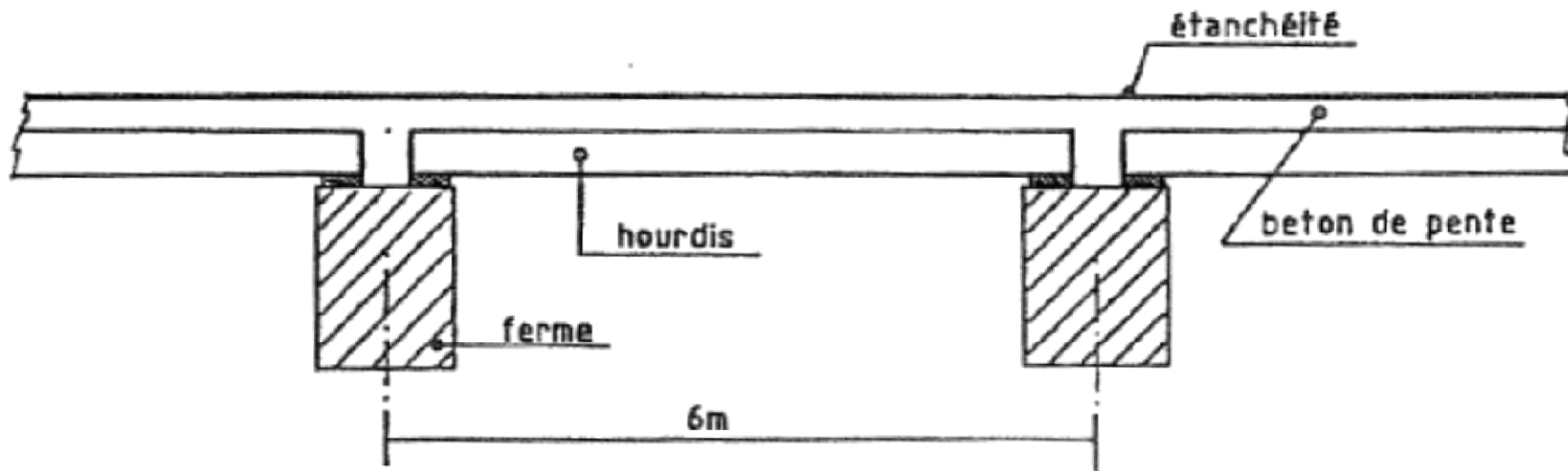
**Différentielles entre éléments ou zones de la structure**



## EXEMPLE

### Effet du retrait + fluage + rotations aux appuis

- Entrepôt industriel à toiture plate
- Fermes en béton précontraint + dalles préfab.



- Etanchéité collée sur béton de pente isolant d'épaisseur 4 à 7 cm
- Après 2 ans, en février: - étanchéité fissurée à l'aplomb des fermes  
- passage d'eau

## Causes des fissurations

- DT**
- Retrait
  - Raccourcissement thermique des hourdis
- DF**
- Raccourcissement fibre sup. hourdis flexion sous neige + fluage
- DV**
- Soulèvement extrémité hourdis (rotation à l'appui) flexion sous neige + fluage
  - Thermique différentiel entre haut et bas des hourdis

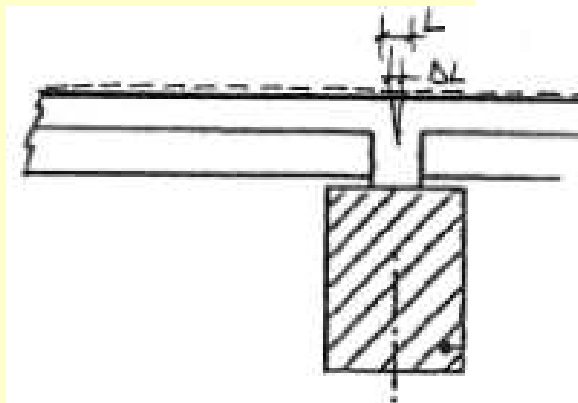
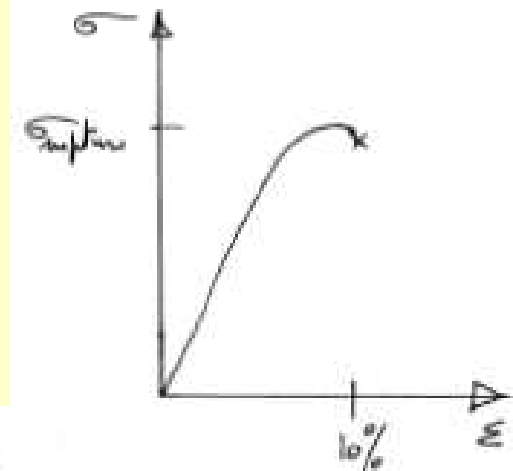
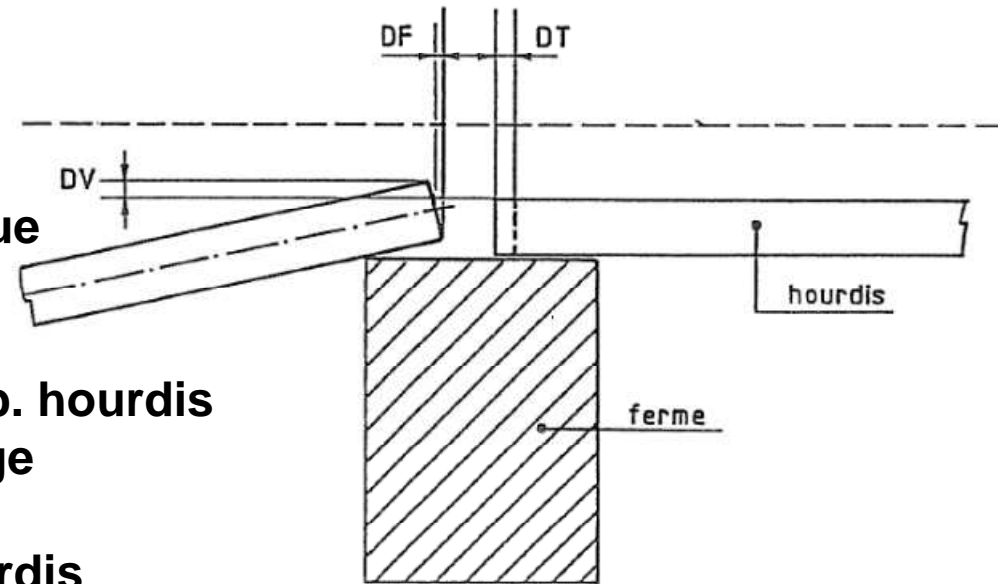
## Calcul

Ouverture de fissure  $\Delta L$  estimée à 2 mm

Base d'allongement L estimée à  $2 + 2 = 4$  mm

$\Rightarrow \Delta L/L = 2/4 = 50\%$

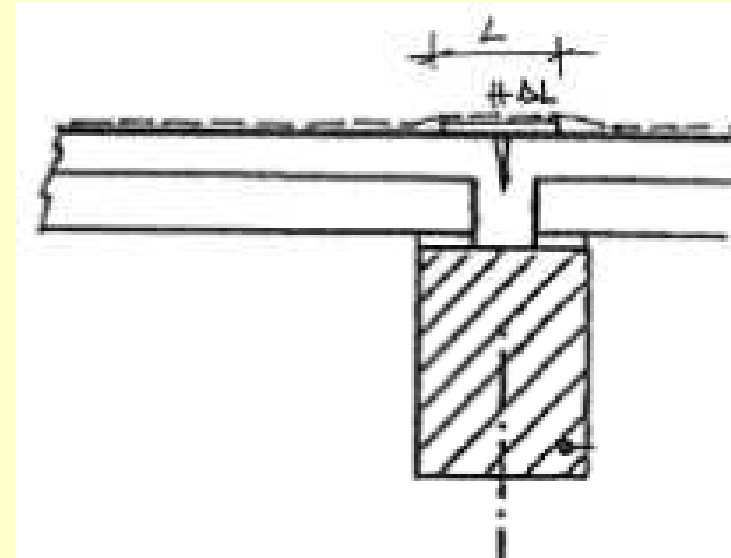
$> 10\% = \epsilon_{\text{rupture}}$  du matériau roofing



## Solutions

### En réparation

- ▶ Un matériau d'étanchéité très ductile
- ▶ Un matériau d'étanchéité peu ductile non collé sur une longueur  $L$  assez grande au droit de la fissure  
 $L$  choisi tel que  $\varepsilon = \Delta L/L < \varepsilon_{\text{rupture}}$  du matériau



### Exemple

Pour une ouverture  $\Delta L = 2$  mm des fissures, si  $L = 500$  mm non collés  
 $\Delta L/L = 2/500 = 0,004 = 0,4\% < 10\% = \varepsilon_{\text{rupture}}$  du matériau roofing

### Réalisation

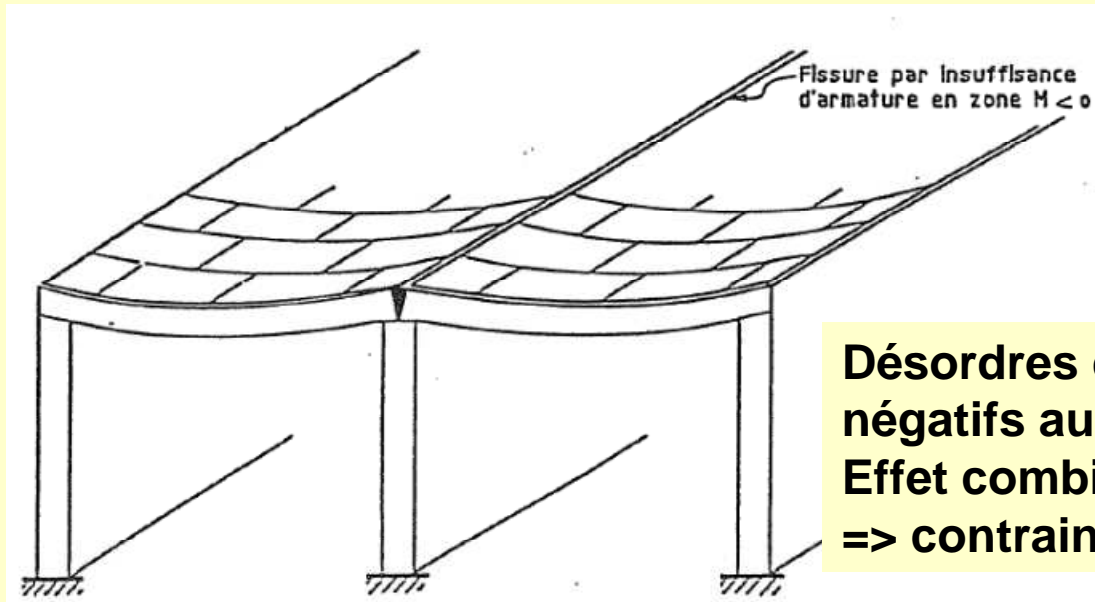
Interposition entre toiture et roofing d'une feuille non adhérente garantissant le caractère effectif de la base d'allongement longue.

### En construction nouvelle

- ▶ Réduire l'effet thermique par une isolation thermique au dessus du roofing
- ▶ Armature de continuité au droit des fermes (reprise de M- à l'appui)

## EXEMPLE.

### Effet du retrait + fluage + rotations aux appuis



**Désordres dans la zone des moments négatifs au dessus des appuis  
Effet combiné retrait + fluage + thermique  
=> contraintes de traction et fissuration**

### Solutions

#### En construction nouvelle

- ▶ Armature de continuité au droit des fermes (reprise de  $M^-$  à l'appui)
- ▶ Pose des dalles sur support indépendant
- ▶ Réduire l'effet thermique par une isolation thermique au dessus du roofing

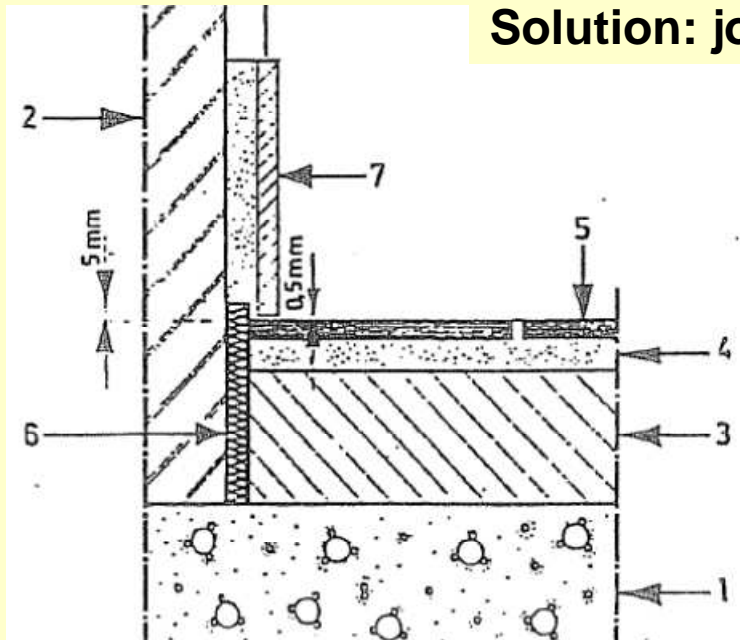
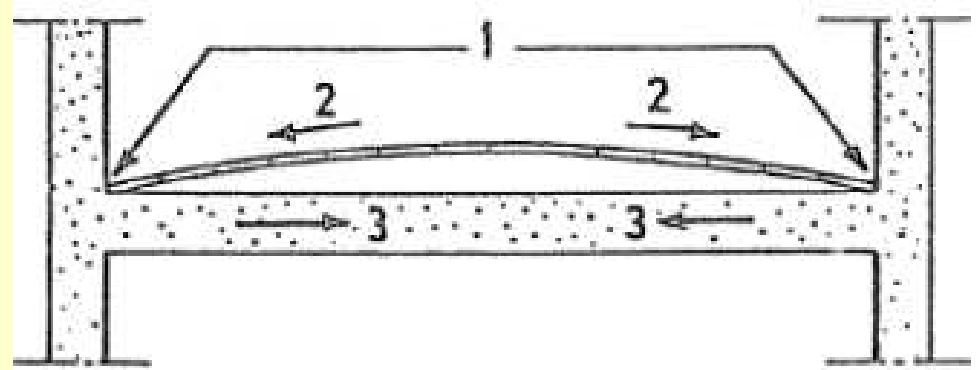
#### En réparation

- ▶ Remplissage fissures par matériau souple (bas module)  
capable de suivre les déformations thermiques cycliques

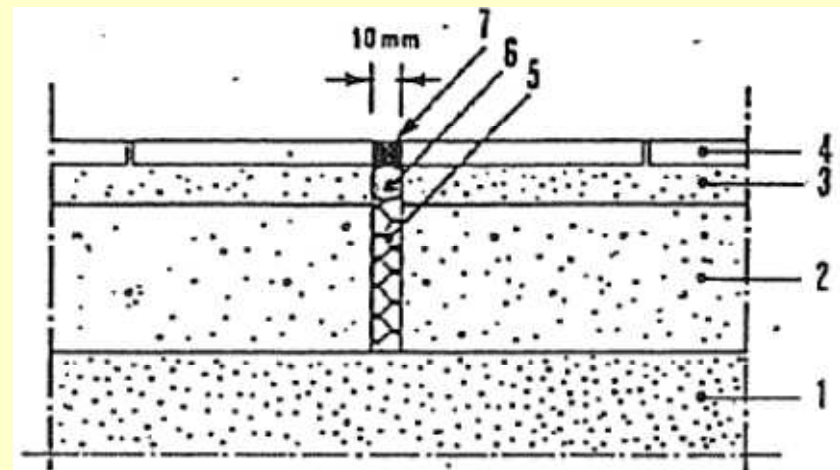
## EXEMPLE. DESORDRE DANS LES REVETEMENTS DE SOL DUR

Après quelques mois, soulèvement de carrelage et voûte flèche:  $\approx 4$  cm  
Effondrement, avec ou sans rupture de carreaux

- Raccourcissement du support:
  - retrait du plancher ;
  - fluage du plancher
  - retrait du mortier de pose
  - refroidissement du support
- Allongement des carrelages:
  - dilatation thermique des carreaux
  - gonflement à l'eau des joints des carreaux



Solution: joints de mouvement dans le revêtement



## EXEMPLE.

### DEGRADATIONS D'UN PAREMENT DE FAÇADE

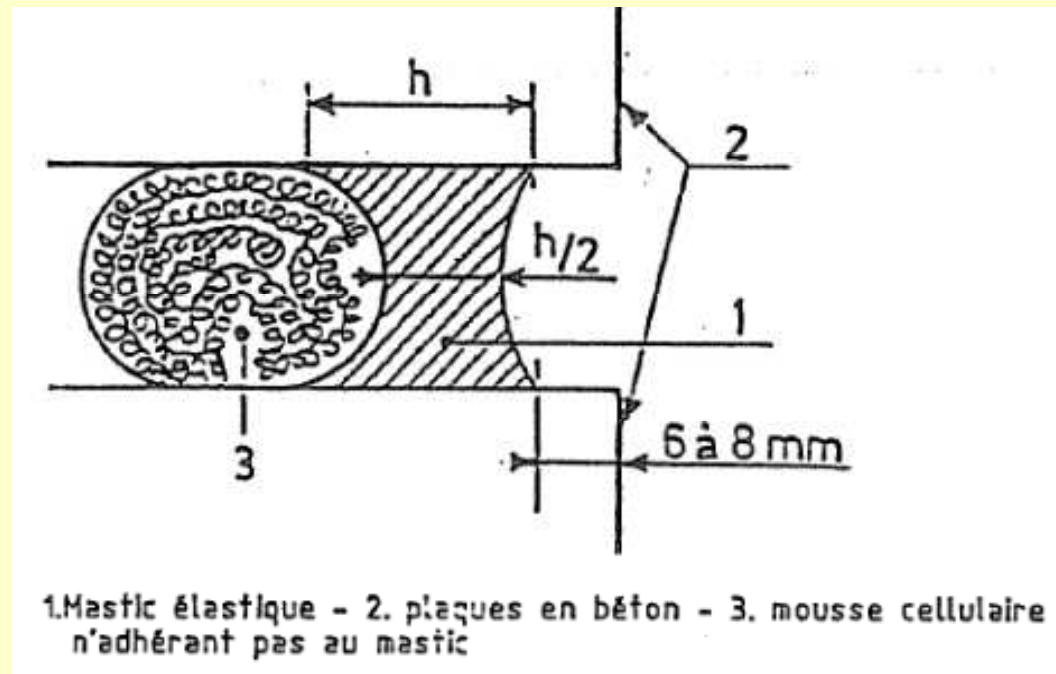
- Parement de façade  
en panneaux de pierre ou béton de teinte foncée  
agrafé sur mur en BA
- Un an après la pose: dégradations des panneaux
  - fissures verticales
  - épaufrures à certains bords horizontaux de panneaux
- Pas de tassement du bâtiment

### Causes

- ▶ Façade exposée Sud. Teinte foncée.  
**Effet thermique** => mouvement par rapport au support  
Ensoleillement d'été,  $t^\circ$  jusqu'à  $70^\circ\text{C}$   
Pose des plaques à  $20^\circ\text{C}$ ,  $\Delta t \approx 50^\circ\text{C}$  en été  
 $\Delta L = \alpha \Delta t L$   $L$  longueur de l'élément = 4 m  
 $\alpha = 10^{-5} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$   
 $\Delta L_{t^\circ} = 10^{-5} \times 50 \times 4 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 2 \text{ mm}$
- ▶ **Retrait** du mur de béton support du revêtement  
 $\approx 0,2$  à  $0,3 \text{ mm/m}$   
50% après pose =>  $\Delta L_r = 4 \times 0,1 \text{ mm} = 0,4 \text{ mm}$
- ▶ **Fluage** du mur de béton support du revêtement  
 $\approx 0,2$  à  $0,3 \text{ mm/m}$   $\Delta L_f = 4 \times 0,25 \text{ mm} = 1 \text{ mm}$



**Jointes nécessaires entre panneaux:  
ouverture > 2 + 1 + 0,4 = 3,4 mm => 5mm**



**Joint adéquat entre plaques de revêtement**

## **MODIFICATIONS DES ACTIONS COMME RESULTAT DES DEFORMATIONS**

La déformation de flexion des éléments horizontaux, poutres ou dalles, peut entraîner une augmentation des charges.

2 cas

### ▶ **Avant la mise en service des éléments**

Si le plancher/platelage n'est pas horizontal & plan:

On épaissit la chape pour horizontalité

- ⇒ Supplément de poids non prévu au calcul
- ⇒ Augmentation des contraintes et flèches différées;
- ⇒ Sécurité réduite

### ▶ **Après mise en service des éléments**

Déformation différée par fluage des toitures plates

- ⇒ Points bas (contre-pentes), accumulation d'eau stagnante
- ⇒ Poids supplémentaire
- ⇒ Sécurité réduite
- ⇒ Accidents, surtout si la charge d'exploitation est faible



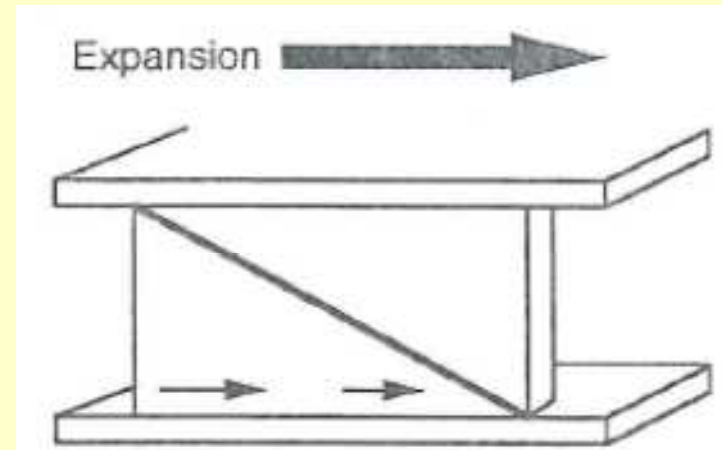
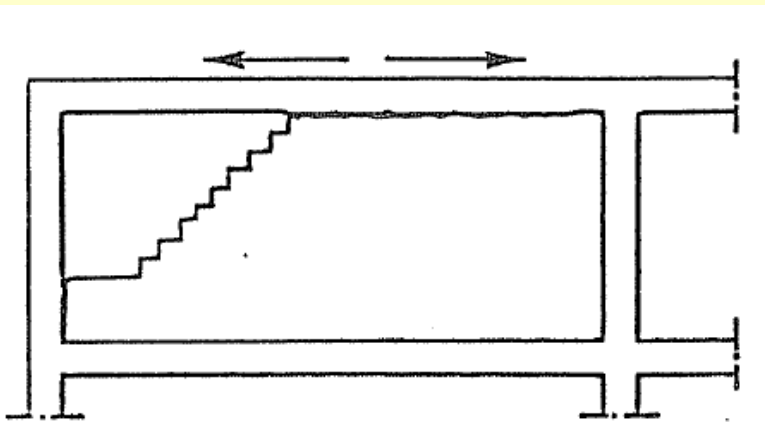
**UNE TYPOLOGIE SPECIFIQUE DE DOMMAGES**  
**RESULTANT DES DEFORMATIONS DES ELEMENTS PORTEURS:**

**LES DESORDRES DANS LES CLOISONS**

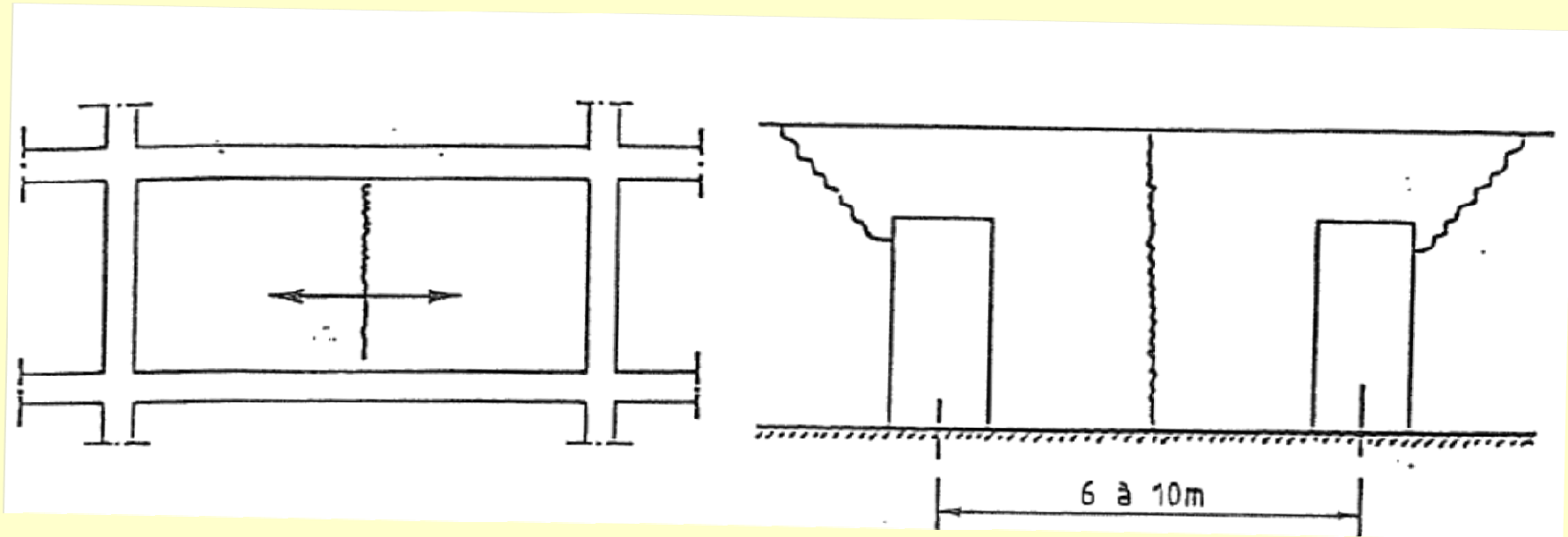
**Cloisons constituées de matériaux relativement fragiles**  
**blocs ou briques, plâtre**

⇒ **Faible capacité de déformation avant fissuration**

⇒ **Si bloquées dans la structure : les troubles sont indicatifs de leur cause**

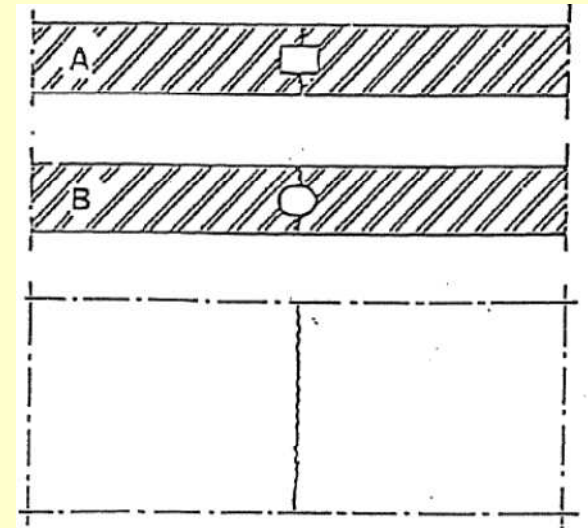


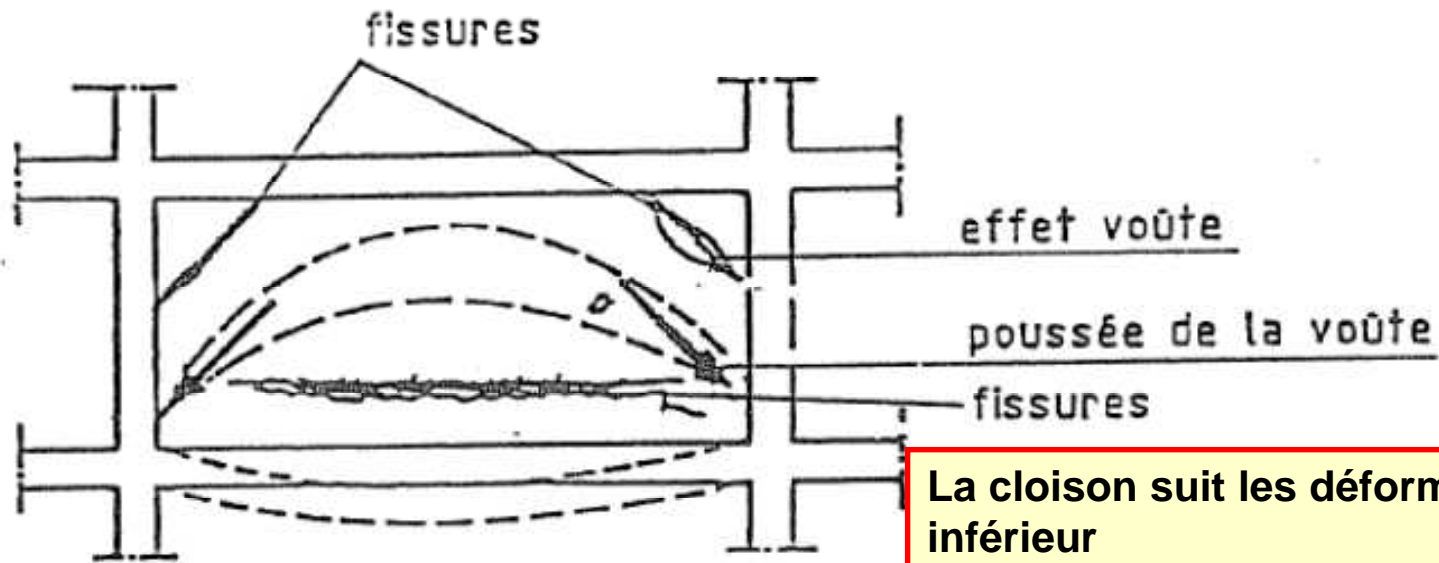
***Dilatation du plancher haut***



***Retrait de la cloison***

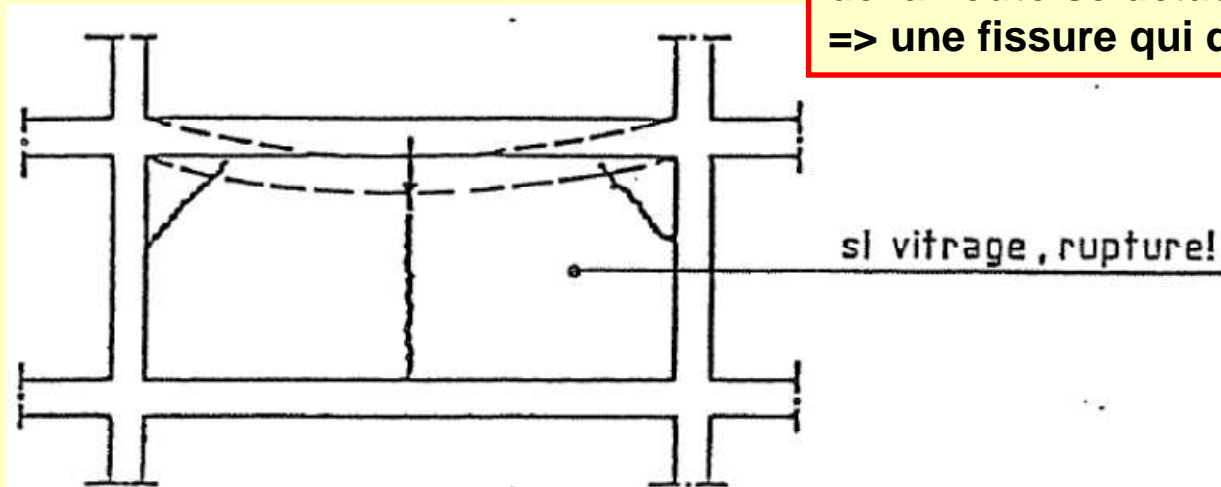
***Un affaiblissement local de la cloison  
est l'amorce de la fissuration***



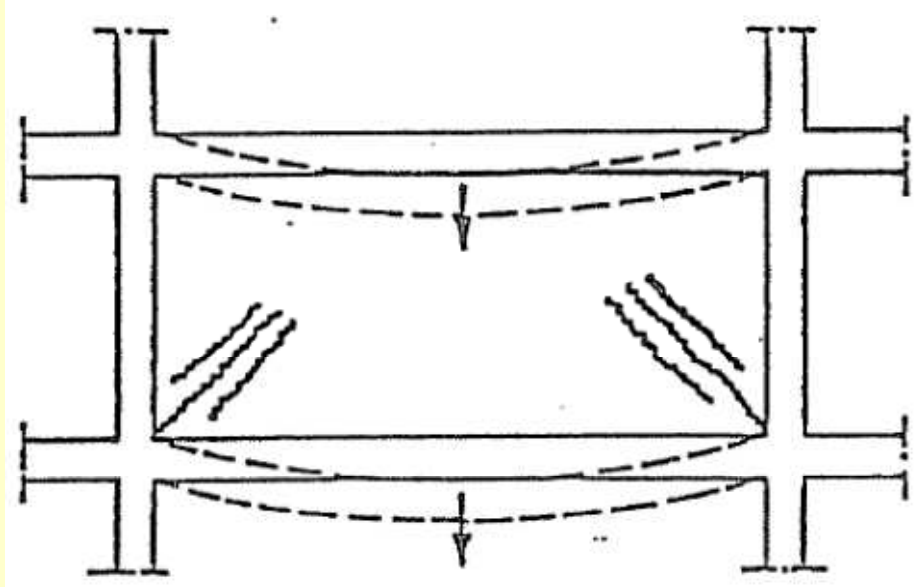


***Déformation du plancher inférieur***

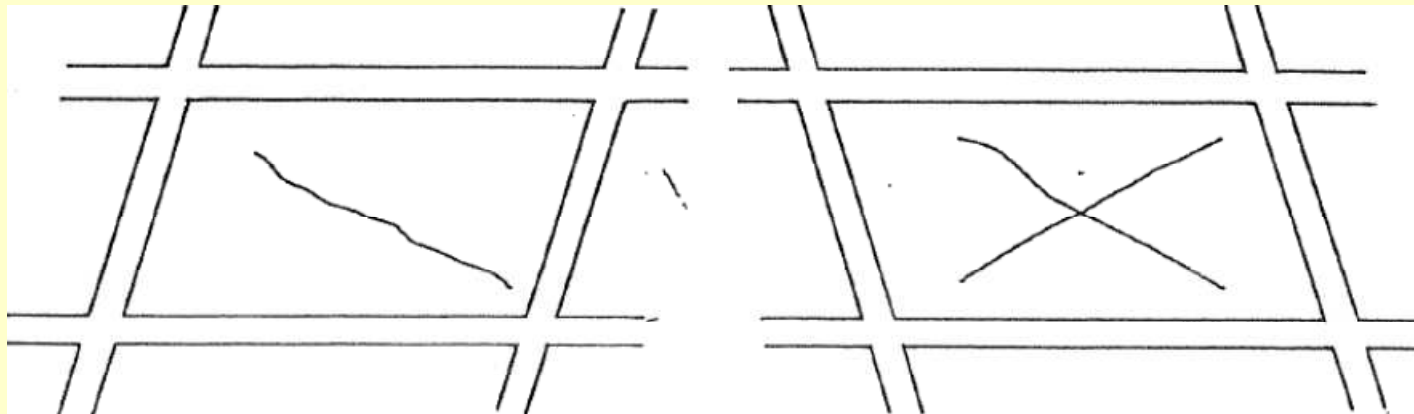
La cloison suit les déformations du plancher inférieur  
 puis il se forme une « voûte inférieure »  
 la cloison se déchargeant sur ses extrémités.  
 Si la déformation du plancher s'accroît  
 la partie de la cloison se trouvant en dessous  
 de la voûte se détache du reste  
 => une fissure qui délimite nettement la voûte.



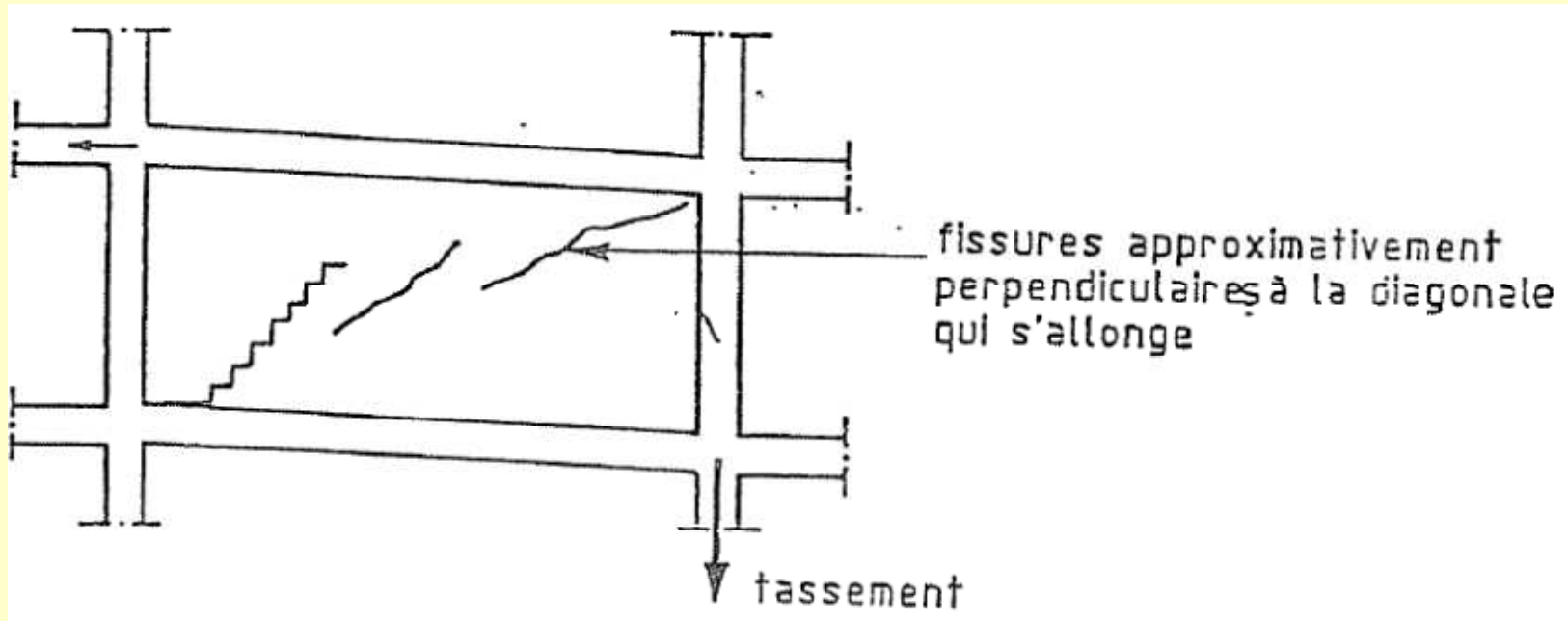
***Déformation du plancher supérieur***



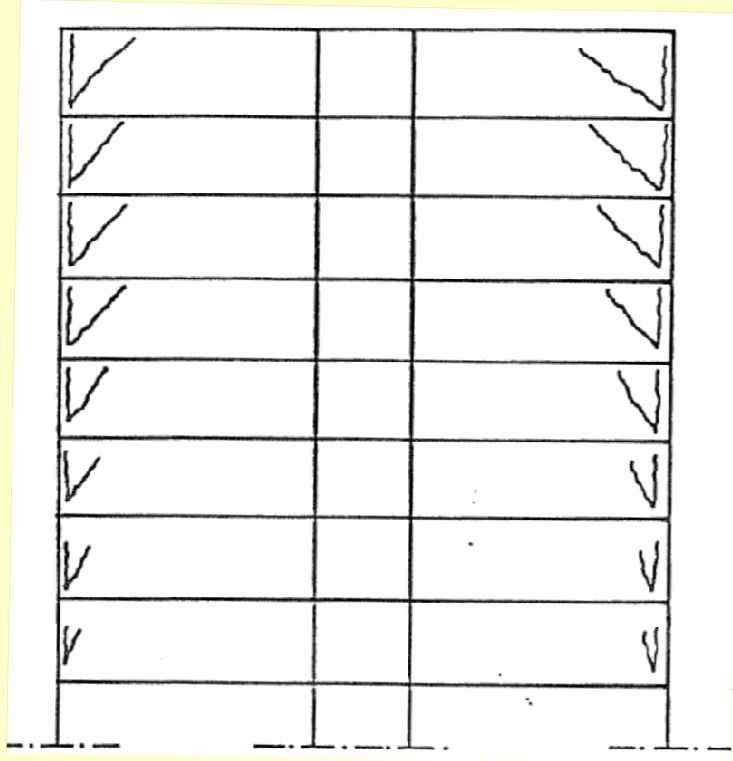
***Les deux planchers se déforment de la même façon***



***Cisaillement alterné du panneau sous forces horizontales alternées (séisme, vent)***



***Déplacement vertical différentiel des colonnes de gauche et de droite***



***Dilatation différentielle  
entre la façade et le noyau central***

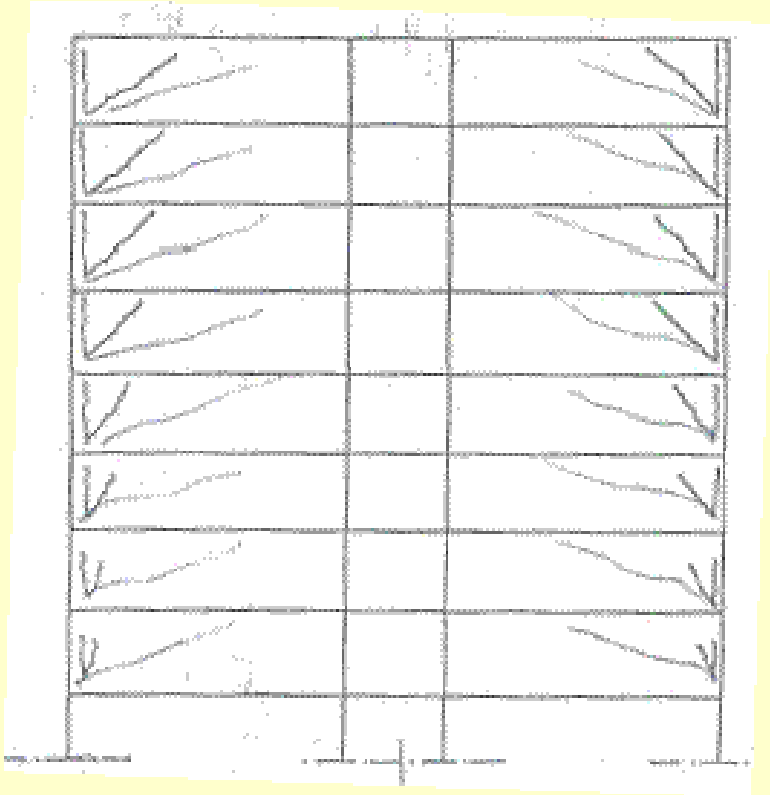
**Effet « mise en parallélogramme » et fissuration croissante avec la hauteur**

**Origines possibles**

- **Elévation de température de la structure de façade > noyau intérieur**
- **Retrait et/ou fluage du noyau > la structure de façade**

**Dans ces 2 cas, il y a:**

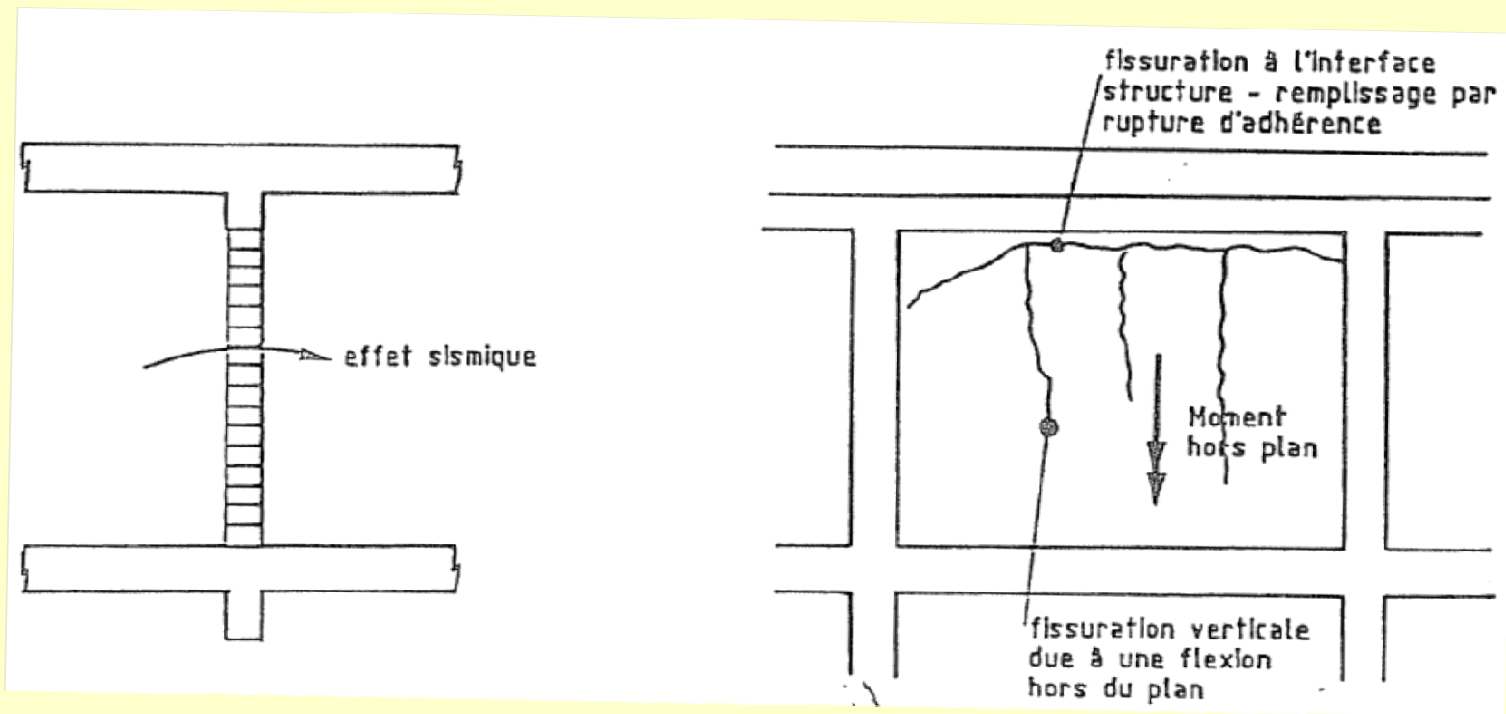
- **cumulation des déformations du bas vers le haut**
- **effets croissants du bas vers le haut**



***Dilatation différentielle entre la façade et le noyau central de l'ossature.  
Effet « mise en parallélogramme » égal à chaque niveau***

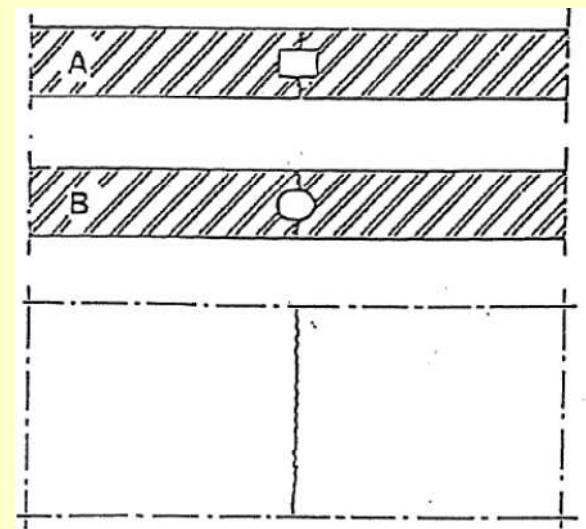
**Origine possible**

**Tassement différentiel entre noyau et structure périphérique.**



***Effet sismique perpendiculaire au plan***

***Effet d'un affaiblissement local d'une cloison***





## EXEMPLE.

### DEGRADATION DE CLOISONS DANS UN IMMEUBLE TOUR

Noyau central en béton

Ossature périphérique métallique

Un an après la fin des travaux :

- dégâts dans les cloisons
  - pente de la périphérie vers le noyau perceptible dans les étages supérieurs
- dénivellation mesurée: 150 mm

#### Causes

Fluage et retrait du noyau central

En fin de construction:

- $\varepsilon_{\text{él}}$  colonnes acier  $\approx \varepsilon_{\text{él}}$  noyau en béton
- Planchers horizontaux

#### $\varepsilon$ retrait et fluage

$$\varepsilon_r = 4 \cdot 10^{-4} \quad \varepsilon_f = 4 \cdot 10^{-4} \quad \varepsilon_{\text{total}} = 8 \cdot 10^{-4}$$

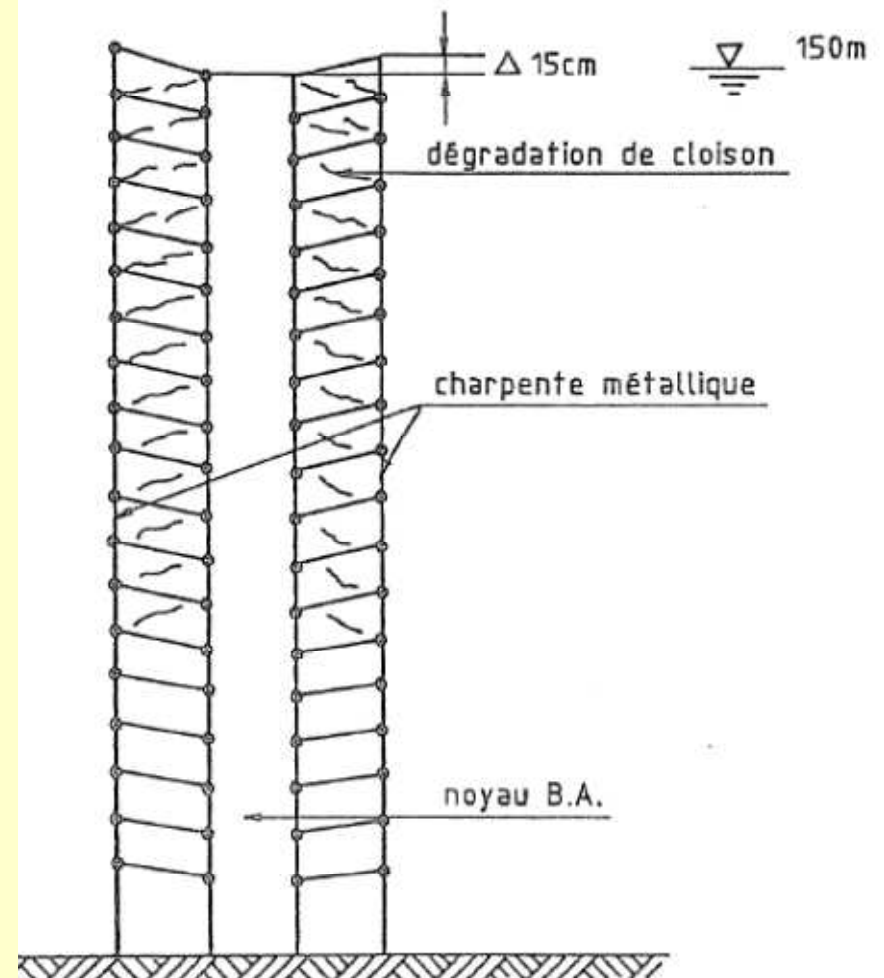
H= 150 m de hauteur

Après 1 an:  $\Delta L = 8 \cdot 10^{-4} \times 150 \cdot 10^3 = 120 \text{ mm}$

$\Delta L$  mesuré = 150 mm

- > 1/300 = 33 mm cloisons fixes
- > 1/150 = 66 mm cloisons amovibles
- > 1/250 confort visuel

Pas de problème de stabilité    Problèmes: usage (pente)    aspect (cloison)



## Réparation

- Chapes d'égalisation
- Planchers sur plots

## Conclusions

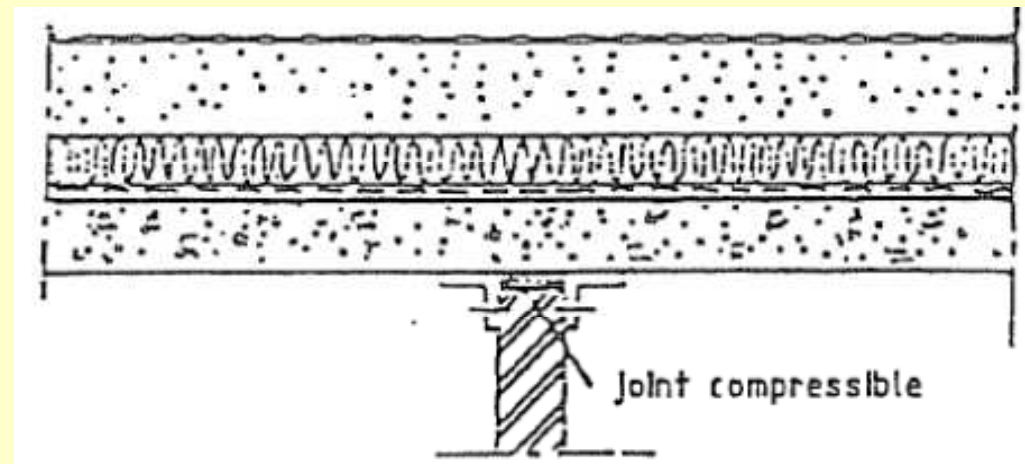
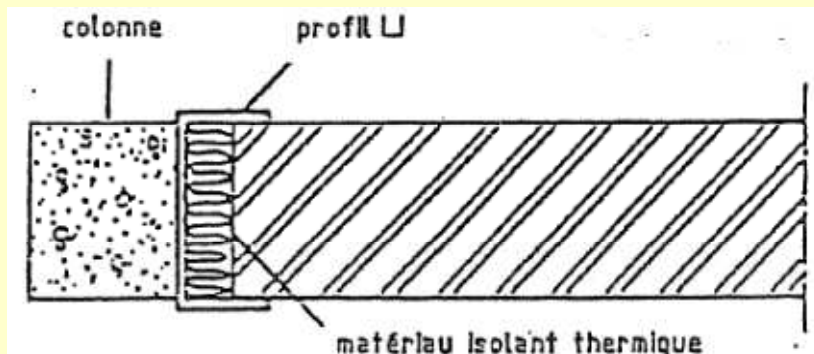
- Importance d'évaluer les déformations instantanées et différées
- Dans une structure où des éléments en acier et en béton sont mis en parallèle, intérêt de phases d'exécution permettant aux éléments en béton de réaliser une grande part de leur déformation différées avant finalisation de la structure;  
=> éléments préfabriqués assemblés par postcontrainte (barres Dywidag)  
=> coulage des noyaux béton plusieurs semaines avant positionnement de la charpente métallique;
- Intérêt de prévoir des possibilités de réglage de niveau (planchers sur plots)
- Utilité de l'indépendance relative des cloisons avec la structure portante.

## Problème similaire : ossature métallique extérieure apparente

Si  $\Delta t = 20^\circ\text{C}$  entre la charpente métallique et le noyau en béton

=> au dernier étage du bâtiment  $\Delta L$  entre périphérie et noyau :

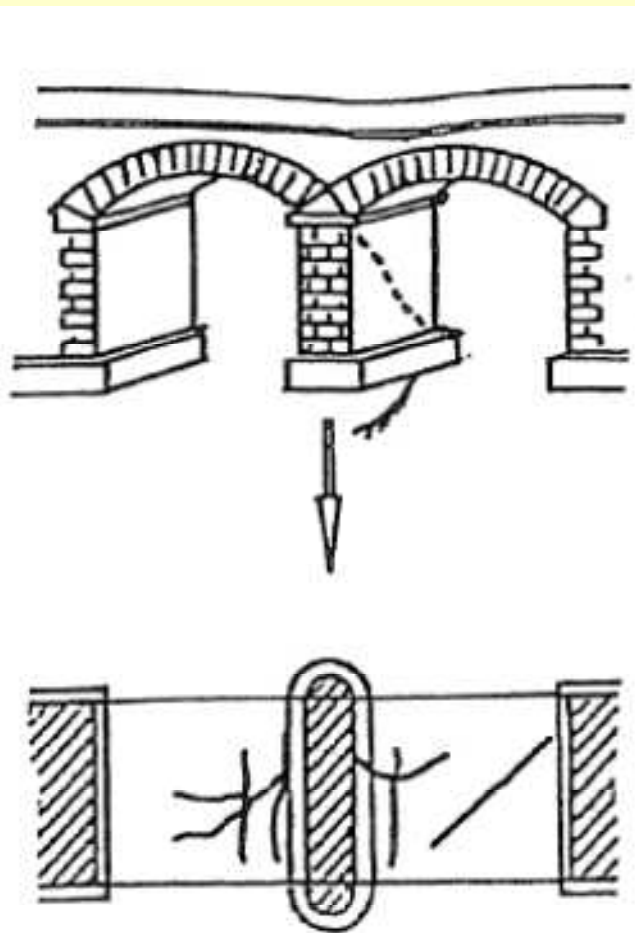
$$\Delta L = 10^{-5} \times 20 \times 150.000 = 30 \text{ mm}$$



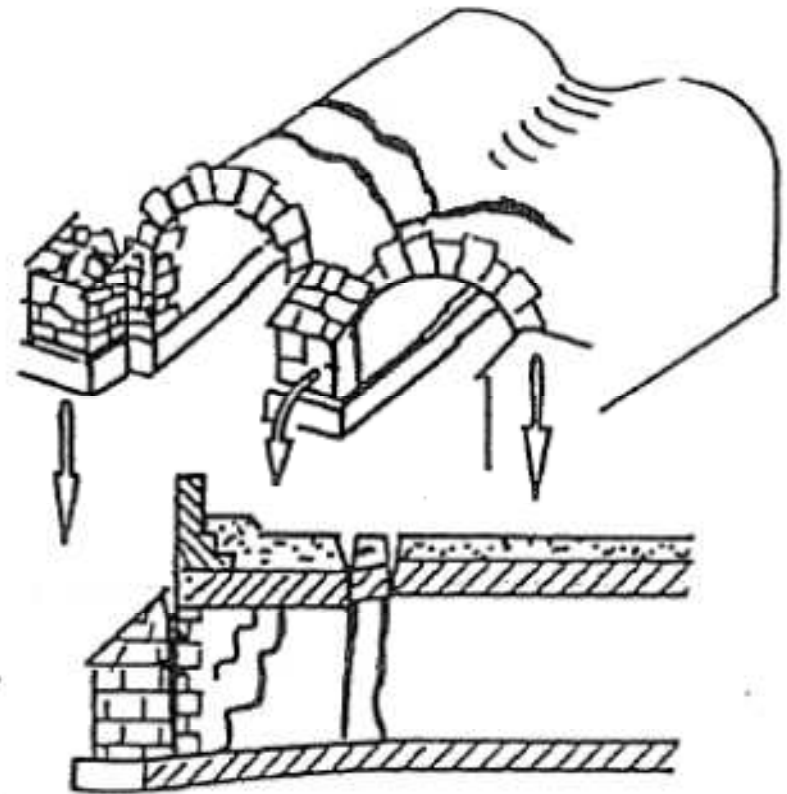
## PREVENTION DE LA FISSURATION DES CLOISONS

- renforcer la résistance de la cloison en y disposant des armatures;
- cloison indépendante du support                      interposition de couche compressible  
+ armatures dans les joints;
- cloison indépendante des colonnes et poutres  
liaison flexible avec l'ossature.

Problème: l'isolation acoustique

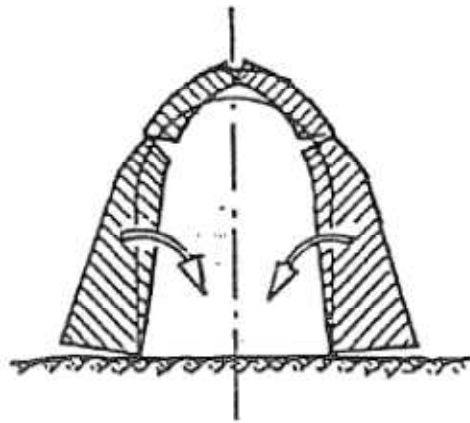


Tassement d'un appui

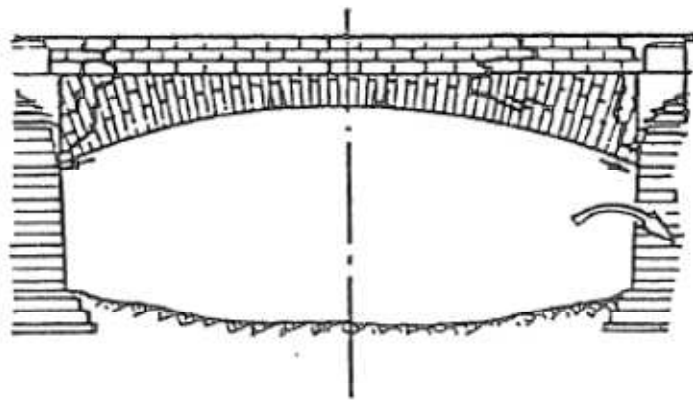


Tassement d'un coté d'un pont

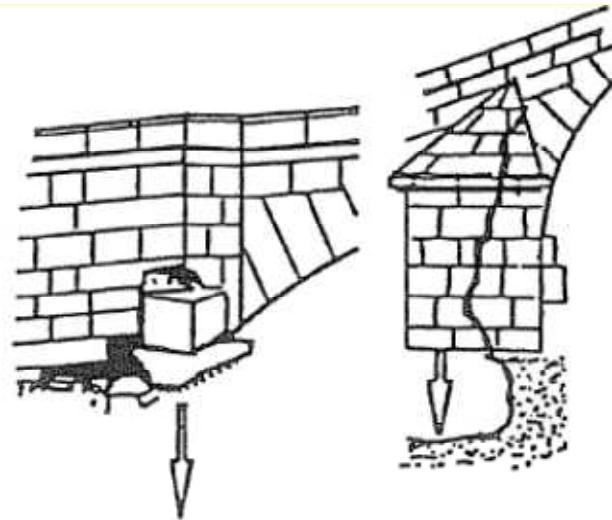
***Désordre dans des maçonneries par suite du mouvement des fondations***



Basculement des naissances d'arc vers l'intérieur

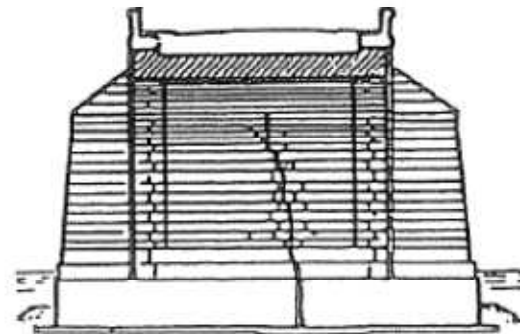


Basculement d'une culée vers le remblai



(a)

(b)



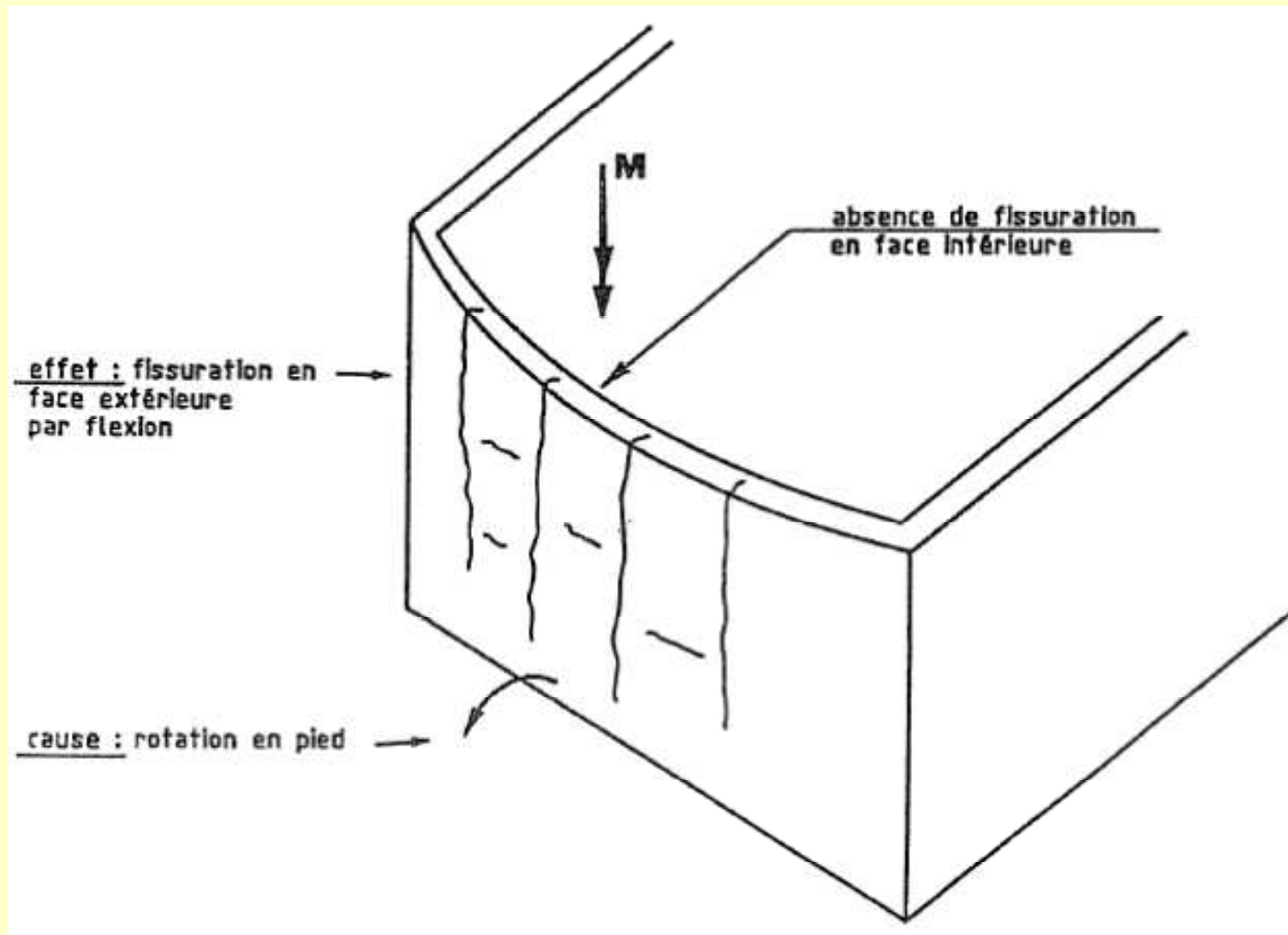
(c)

Effets d'un tassement local

***Désordre dans des maçonneries par suite du mouvement des fondations***

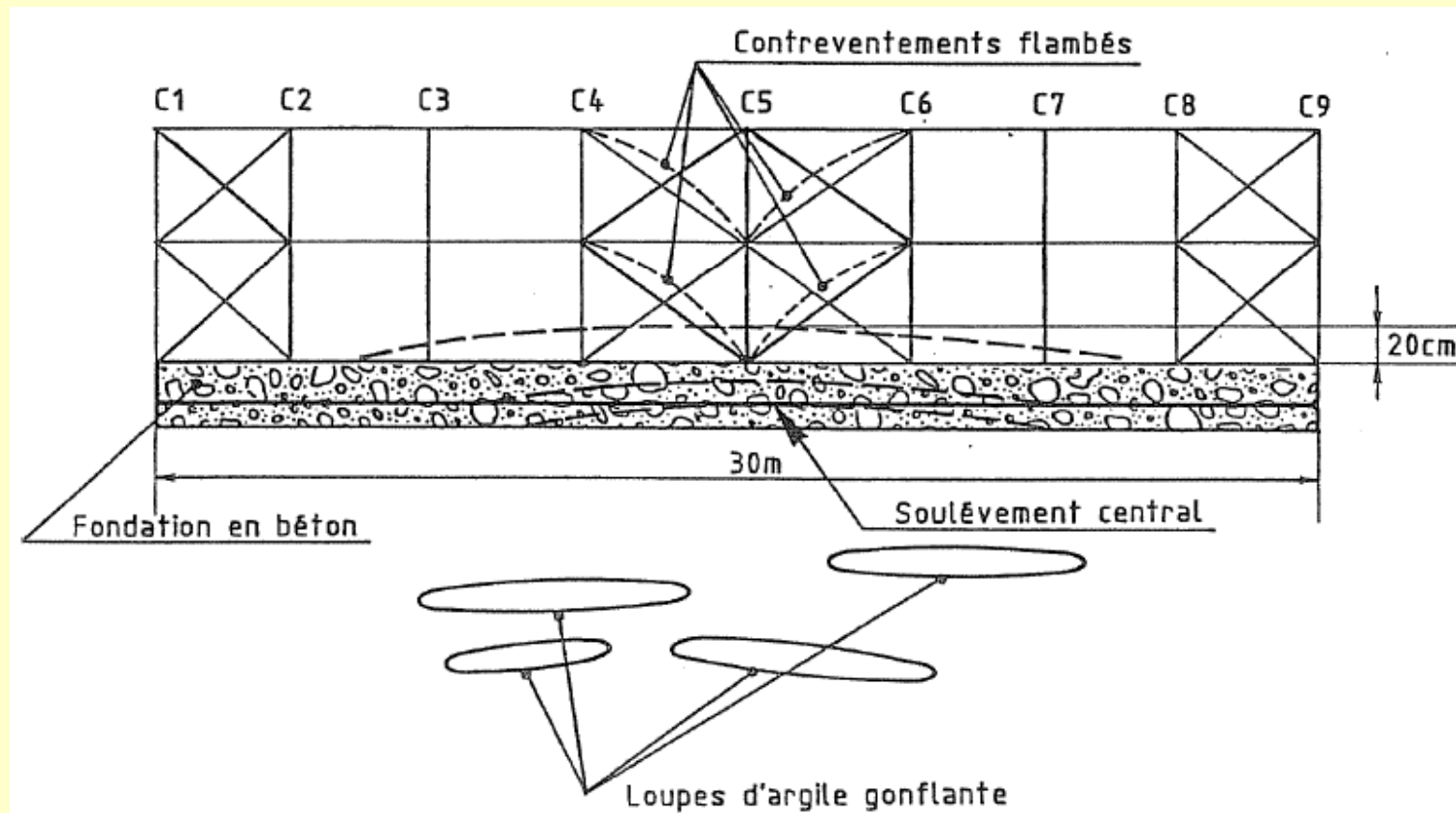


***Fissurations à deux niveaux  
dus à une réduction d'efficacité  
des appuis latéraux de l'arc***



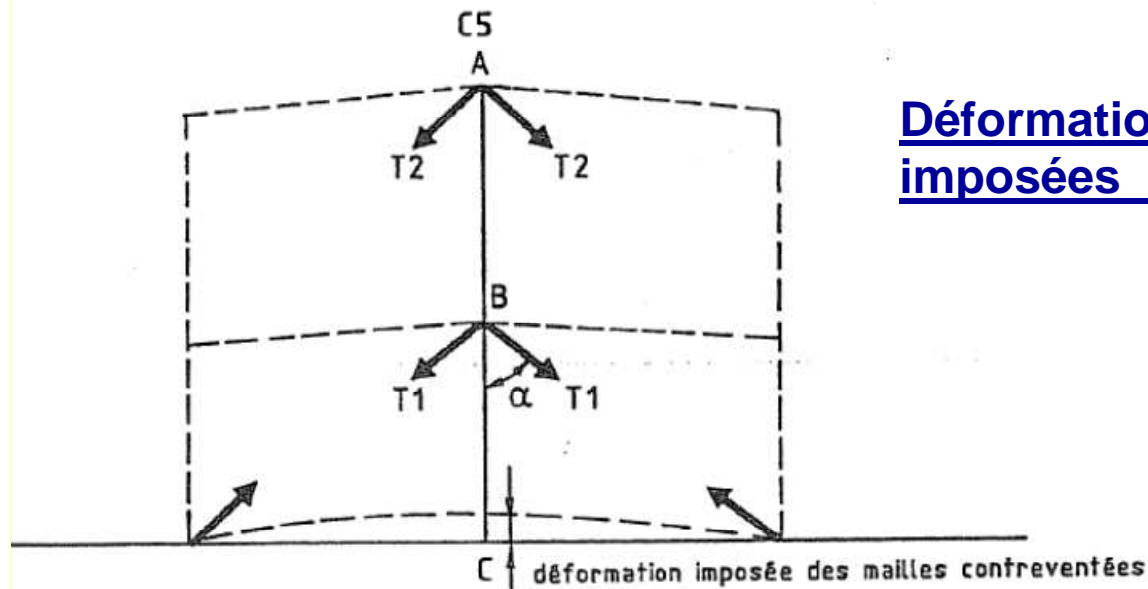
***Fissuration par flexion d'axe vertical***

## Déformations de contreventements imposées par un gonflement d'argiles





## Déformations de contreventements imposées par un gonflement d'argiles



La colonne C5 reprend les actions de poids mort  $g$  est sollicitée par des tractions exercées par les diagonales dues au gonflement du terrain

En l'absence d'action de service:  $S_{acc} = S_g + 2 T1 \cos\alpha + 2T2 \cos\alpha$

Colonne dimensionnée pour:

$$S_d = \gamma_g S_g + \gamma_q S_q \text{ cas statique}$$

$$S = S_g + \Psi \cdot S_q + E$$

cas sismique;  $E$ =tremblement de terre.

La colonne stable sous  $S_{acc}$ . (gonflement)

Si le mouvement du sol s'accroît => plastification en traction des contreventements.

$$T1 = T_{y1} \quad T2 = T_{y2}$$

Calculs=> colonne porte :  $S'_{acc} = S_g + 2 (T_{y1} + T_{y2}) \cos \alpha$  car:  $R_{dflamb} < S'_{acc}$

=> pas péril immédiat

Mais la colonne ne peut pas porter:  $S''_{acc} = \gamma_g S_g + \gamma_q S_q + 2 (T_{y1} + T_{y2}) \cos \alpha$

=> Non utilisable en service avec des niveaux normaux de sécurité.

## Déformations de contreventement s imposées par un gonflement d'argiles

### Solution

**Côté infrastructure:** ne plus alimenter en eau les argiles gonflantes

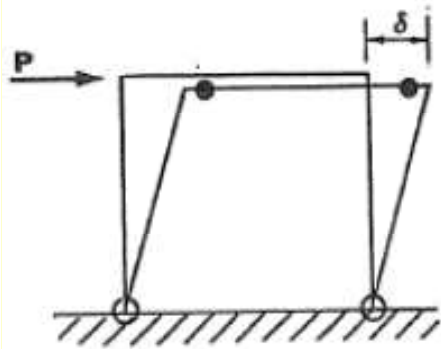
- exécution d'un nouveau réseau d'évacuation des eaux
- étanchéisation des patios et du pourtour immédiat de la structure;
- observation des mouvements de la structure;

**Côté superstructure,** quand la stabilisation est atteinte:

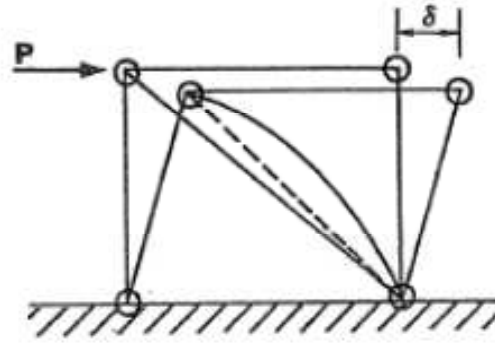
- déboulonnage des assemblages
- forage de nouveaux trous
- remises en place des boulons

⇒ on libère la structure des contraintes engendrées par les mouvements du sol

⇒ on lui rend son niveau initial de sécurité.

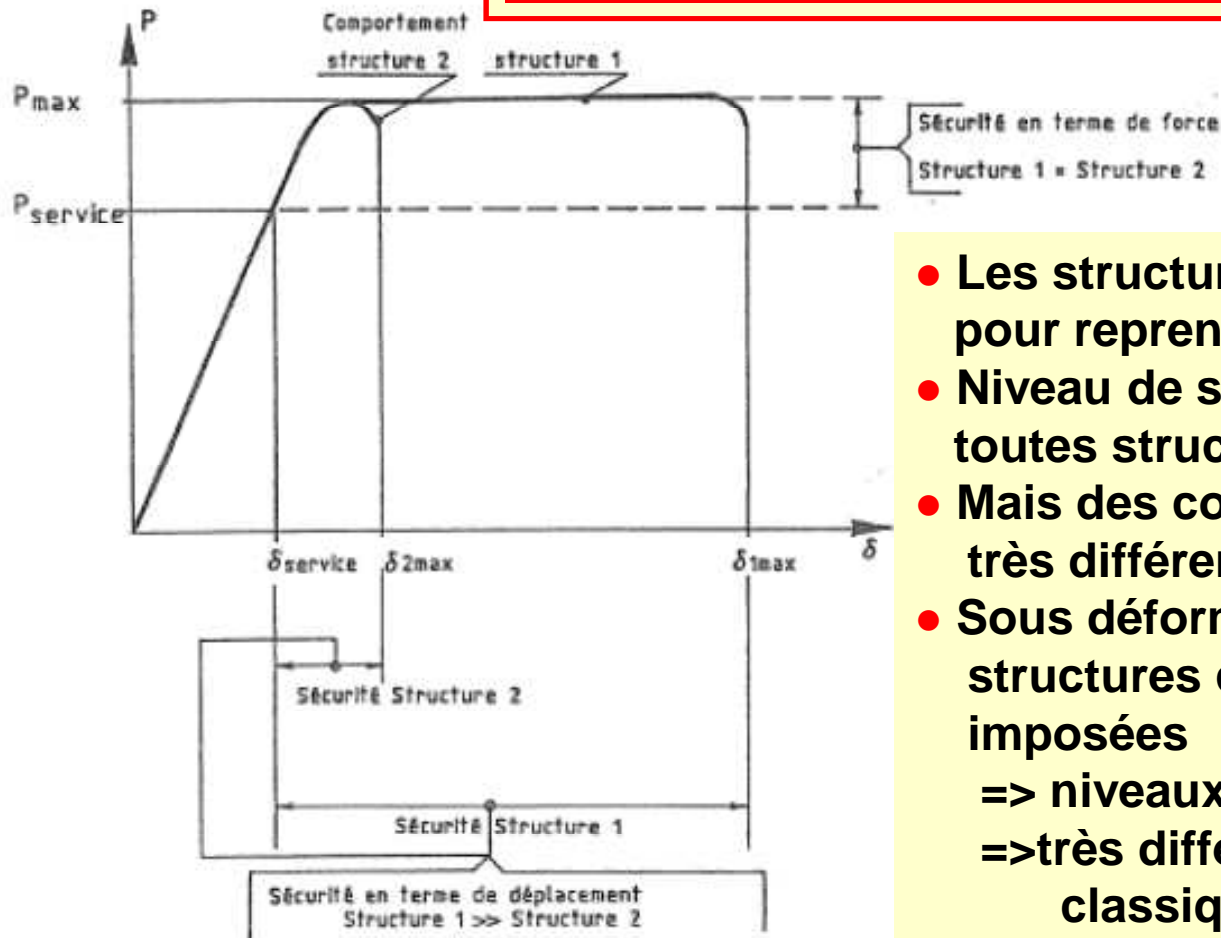


Structure 1



Structure 2

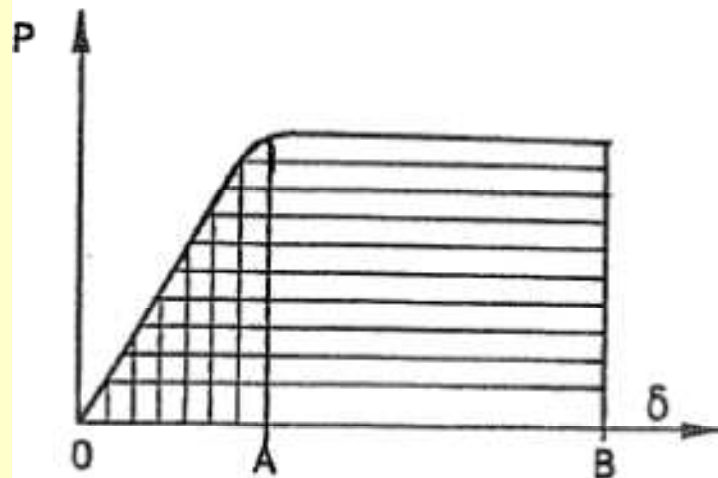
**SECURITE RESISTANCE ⇔ SECURITE EN DEFORMATION**



- Les structures sont calculées pour reprendre des forces imposées
- Niveau de sécurité homogène toutes structures:  $\gamma_q = 1,5$  &  $\gamma_g = 1,35$
- Mais des comportements à la ruine très différents
- Sous déformations imposées les structures calculées pour des forces imposées  
=> niveaux de sécurité très variables  
=> très différents de la sécurité classique « forces imposées »

## SECURITE RESISTANCE $\neq$ SECURITE EN DEFORMATION

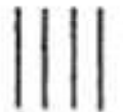
- ▶ Méconnu en calcul statique
- ▶ Connu en projet parasismique
  - La reprise de l'action sismique a lieu en terme d'énergie  
énergie = aires sous courbe P- $\delta$  caractéristique de la structure
  - Distinction : structures dissipatives  $\Leftrightarrow$  non dissipatives
    - « **Coefficient de comportement de structure q** » compris entre 1 et 6
    - q** dépend: - forme de la structure (portique ou treillis par exemple)
    - respect de conditions relatives aux matériaux sections assemblages



### Energie dissipée



Structure 1 : dissipative -  $q = 6$



Structure 2 : non dissipative -  $q = 1$

ductilité =  $OB/OA$

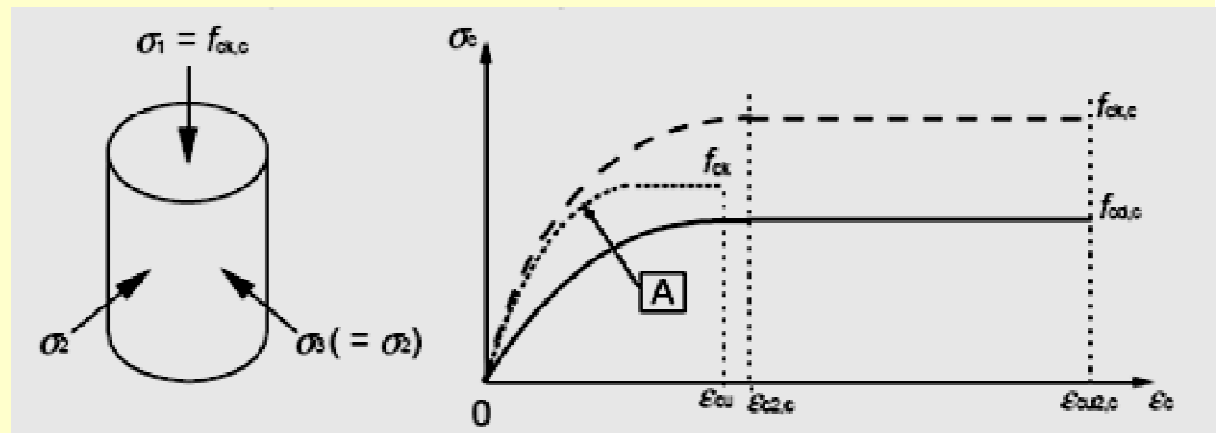
## Phénomène local ductile permettant les zones dissipatives

- ▶ Un seul mécanisme local ductile dans les éléments BA :  
**la flexion plastique**

Créer des conditions convenables de section et de matériaux

- ▶ 2 phénomènes ductiles au niveau matériau
  - Plastification de l'acier en traction
  - Raccourcissement plastique du béton

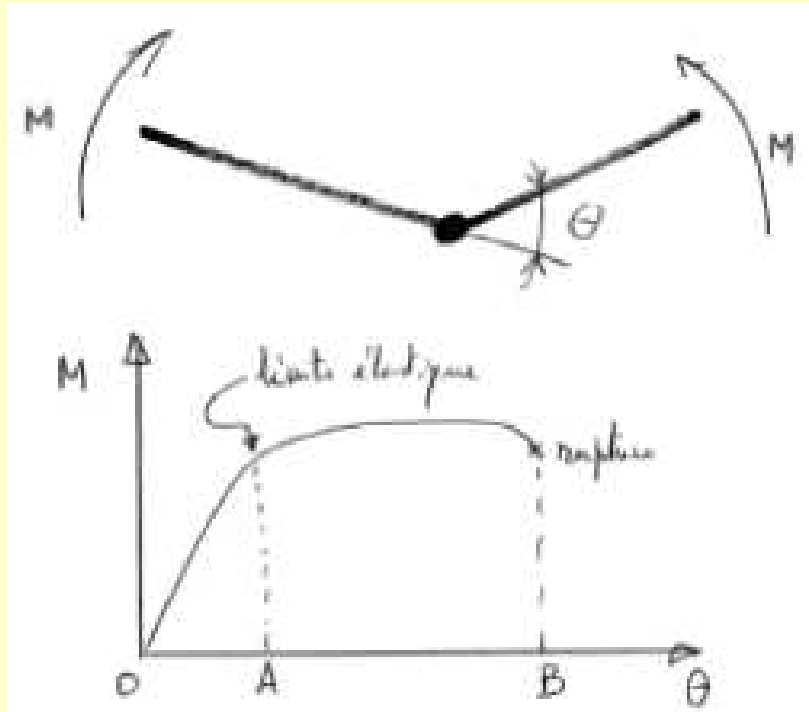
Béton **confiné** par armature transversale  $\Rightarrow \epsilon_{cu2}$  et résistance relevé de 2 à 4 fois



**Ductilité des éléments BA : plastifier l'acier & confiner le béton**

## Critères de ductilité d'une construction

- **Ductilité convenable** des mécanismes locaux
  - Rotules plastiques de capacité de rotation plastique adéquate



● = rotule plastique

Ductilité =  $\theta_B / \theta_A = \mu_\phi$   
réalisée par une condition sur le  
pourcentage d'armature tendue  $\rho$   
 $\rho = A_s / bh$   
 $A_s$  = section d'acier  
 $b$  et  $h$  dimension section béton

- **Armatures de confinement**

# Ductilité des éléments fléchis en béton armé

## Etats Limites de flexion d'une poutre

### 2 ELU matériau

- allongement acier  $\epsilon_s = \epsilon_{s,max}$  ductile car  $\epsilon_{uk} \gg \epsilon_{s,max} = 10 \cdot 10^{-3}$
- raccourcissement béton  $\epsilon_{cu2}$  fragile

### Comportement d'une section fléchie en béton armé:

- conservation des sections planes :  $\epsilon_c / h_c = \epsilon_s / (d - h_c)$
- équilibre entre efforts internes et moment appliqué  $M_{Ed}$

$$M_{Ed} = h_c \cdot b \cdot \alpha f_{cd} \cdot z = A_s \cdot f_{yd} \cdot z \quad z = d - h_c/2$$

$$M_{Ed} = h_c \cdot b \cdot \alpha f_{cd} \cdot z = b \cdot d^2 \cdot \alpha f_{cd} \cdot [1 - \epsilon_c / 2(\epsilon_c + \epsilon_s)] [\epsilon_c / (\epsilon_c + \epsilon_s)]$$

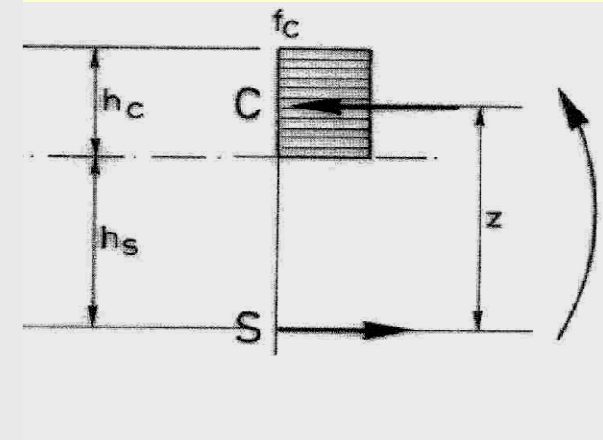
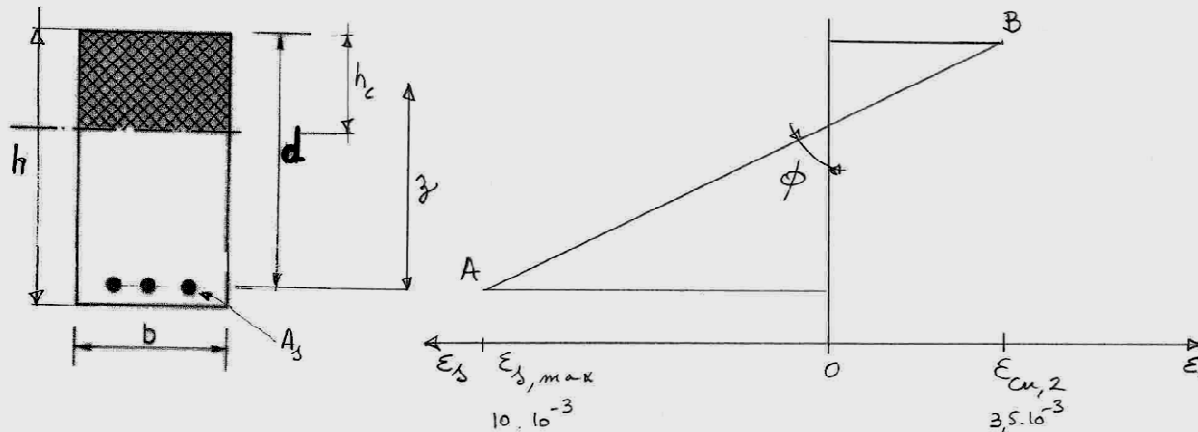
$$A_s / bd = A'_s / bd + [\epsilon_c / (\epsilon_c + \epsilon_s)] \alpha f_{cd} / f_{yd}$$

=> Ductilité  $\mu_\phi$  assurée si

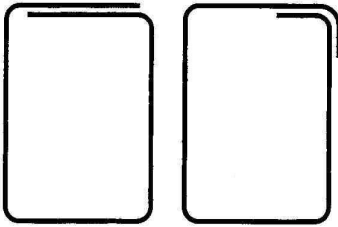
$$\rho_{max} = \frac{A_{s,max}}{b x h} = \rho' + \frac{0,0018}{\mu_\phi \epsilon_{sy,d}} \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}}$$

$$\rho' = \frac{A'_s}{b x h}$$

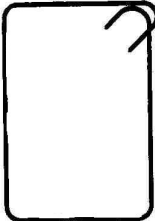
[Eurocode 8]



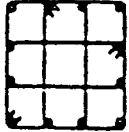
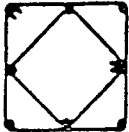
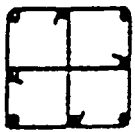
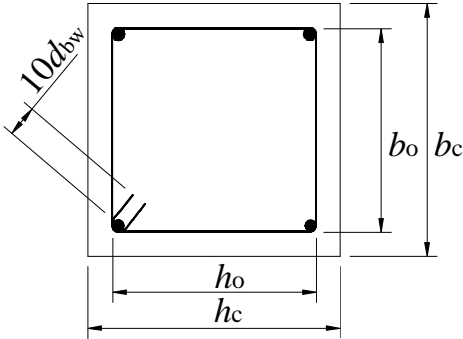
• Armatures de confinement



Incorrects



Correct pour 4 barres longit



<---Correct pour 8 barres longitudinales-----> Incorrect pour 8 barres



## Phénomènes locaux non dissipatifs

### Cisaillement alterné

Dégradations résultant de fissurations inclinées alternées

Fissures croisées => béton = amas de pierres disjointes

=> perte totale de résistance & raideur

axiale & flexionnelle

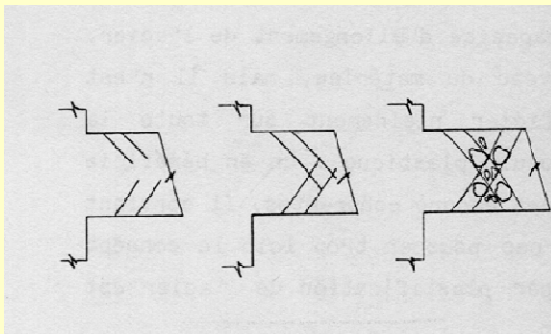
### Prévention

Surdimensionner suivant dimensionnement capacitif

- armatures longitudinales de flexion
- armatures transversales et bielles inclinées de béton

en plasticité

en régime élastique



## Phénomènes locaux non dissipatifs

### Rupture d'adhérence

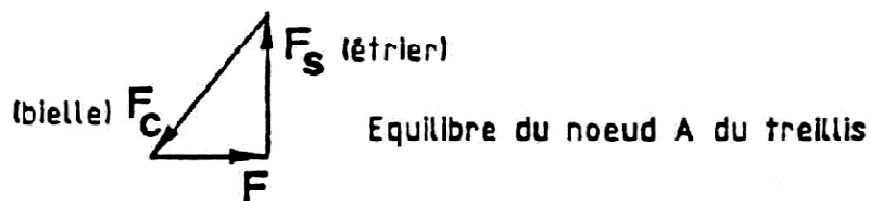
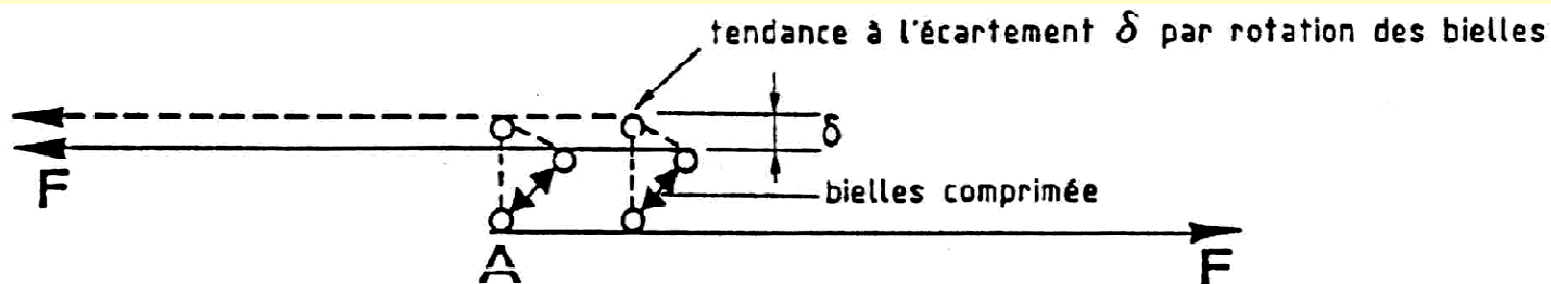
Ruine par rupture d'adhérence : fragile

=> Ancrages & transferts par recouvrement hors zones les plus sollicitées

=> A défaut, longueurs ancrage & recouvrement plus importantes

### Rappel

- *Equilibre local du mécanisme de transfert d'effort par adhérence: armatures transversales pour reprendre un effort égal à l'armature longitudinale*
- *Près d'une rotule plastique: traction plastique des barres longit. fixe les dimensions des armatures transversales*
- *Effet pratique : densification des armatures transversales par rapport à un projet non sismique*



## Phénomènes locaux non dissipatifs

### Flambement individuel d'une armature

- Barre longitudinale dans béton comprimé => flambage possible  
Surtout si la contrainte est élevée
- Zones très sollicitées :  
flexion plastique  
nœud poutre – poteau  
compression élevée
- Prévention : réduire la longueur de flambage  
=> densification des armatures transversales  
par rapport à un projet non sismique



## Phénomènes locaux non dissipatifs

**Glissement sur surface de reprise de bétonnage**

**Résistance au cisaillement sur surface de reprise de bétonnage**

**<< résistance au cisaillement de la section de béton**

**=> vérifier suivant Eurocode 2 cl 6.2.5**



## Phénomènes locaux non dissipatifs

### Localisation des déformations plastiques dans un zone restreinte

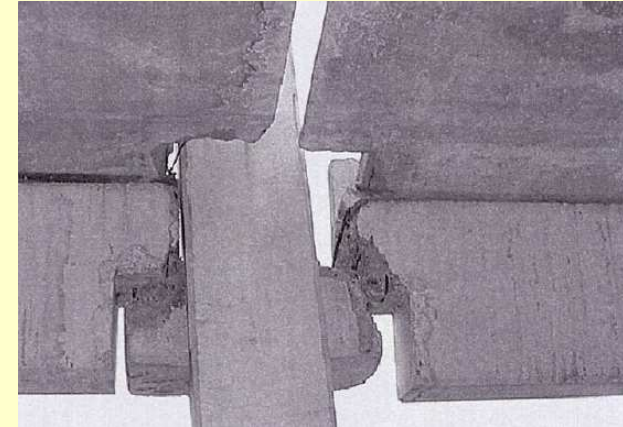
- « rotule plastique » => courbure sur une **longueur** suffisante

Si déformations plastiques sur zone restreinte

=> capacité de rotation faible

Ruine: par « localisation » des déformations

Souvent en préfab



- Compression de béton non confiné\_

Ex: section T - dalle non armée à l'effort tranchant

Le béton de la dalle se dégrade

L'âme confinée assure seule un comportement ductile du béton comprimé

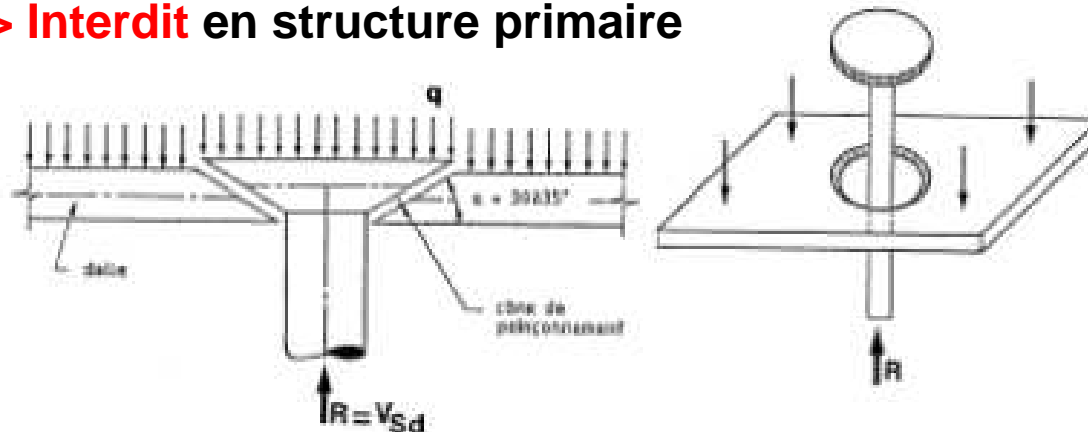
- Planchers dalles (pas de poutres)

La dalle prend l'effort tranchant + le poinçonnement

ELU par ruine de bielle comprimée de béton = fragile

+ problèmes de gaine réduisant la section résistante

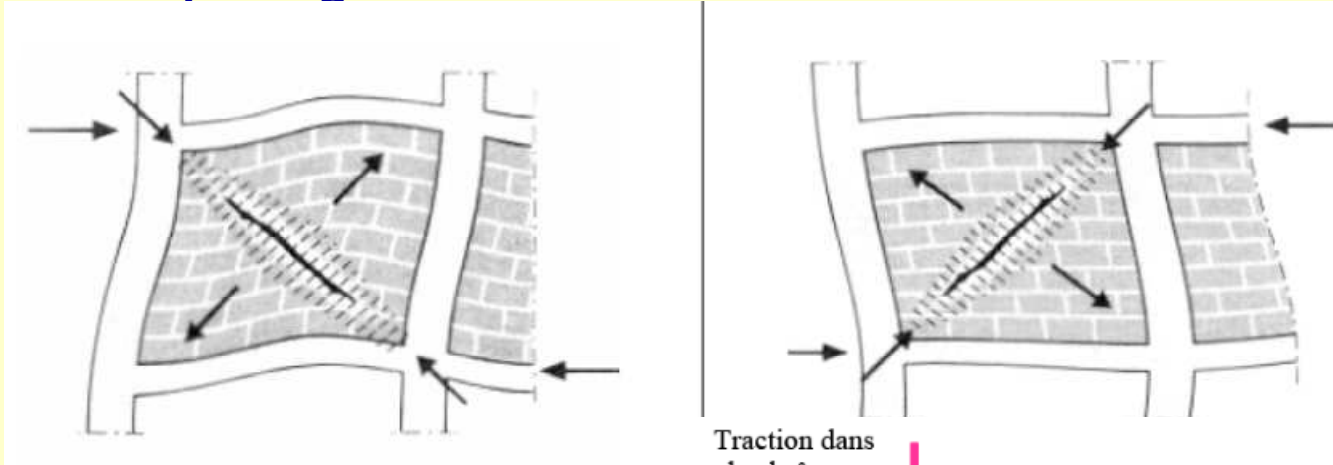
=> **Interdit** en structure primaire



Gaine électrique & chauffage

## Phénomènes locaux non dissipatifs

### Cisaillement induit par les remplissages



#### Déformation de l'ossature

=> diagonales comprimées dans les remplissages

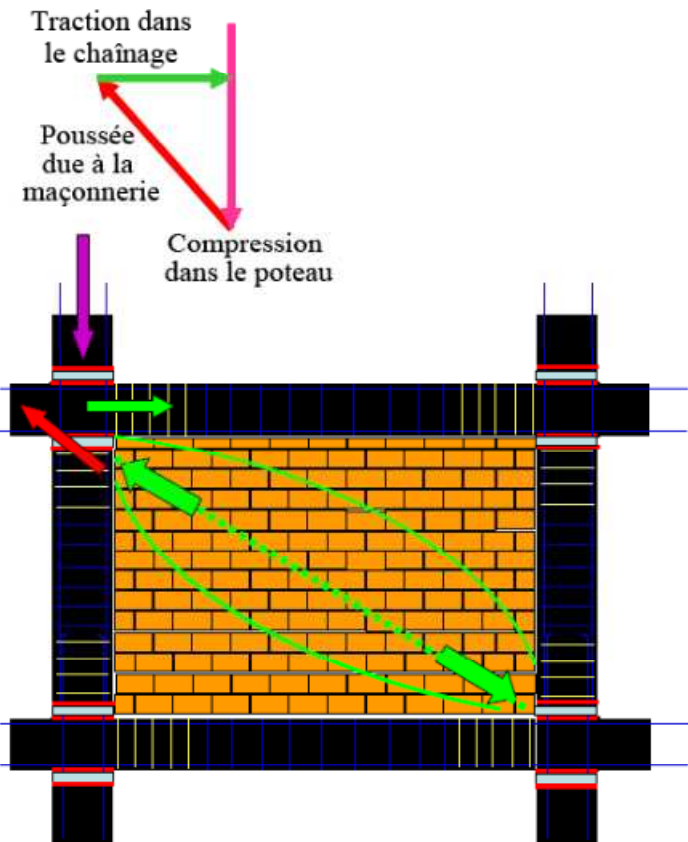
=> **cisaillement** dans les poutres et poteaux

=> ruines fragiles

=> création d'un niveau « transparent »  
à l'étage où ils sont ruinés en premier

#### Solutions

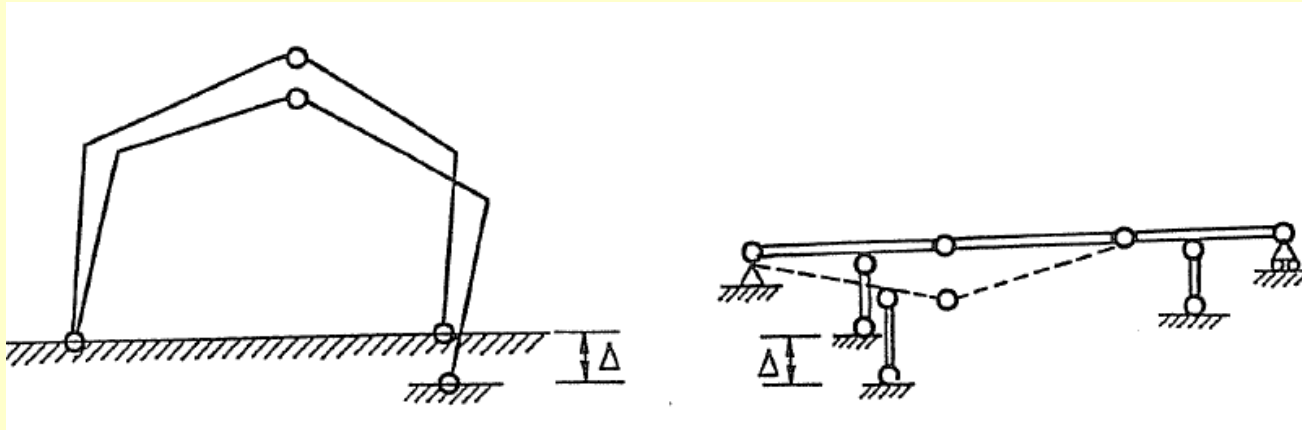
- Remplissage de résistance faible
- Joints entre remplissage et structure pour éviter l'interaction
- Tenir compte du cisaillement additionnel augmenter l'armature transversale dans les zones plus sollicitées



## Structures isostatiques

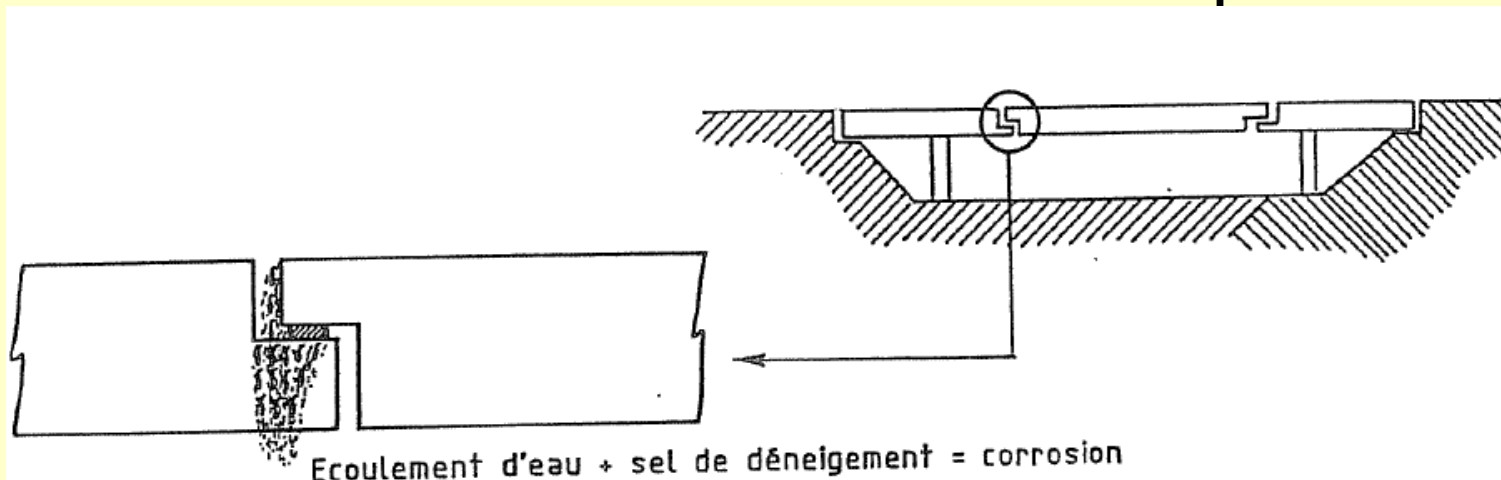
Le contexte des déformations imposées est différent du contexte sismique.

Solution particulière adaptée aux déformations imposées: structure isostatique  
Efforts internes indépendants des déplacements d'appui



Structures isostatiques = réaliser à la construction des fissures choisies = **JD**

- qui limitent les contraintes
- **mais** dont l'effet sur la durabilité de la structure peut être très néfaste

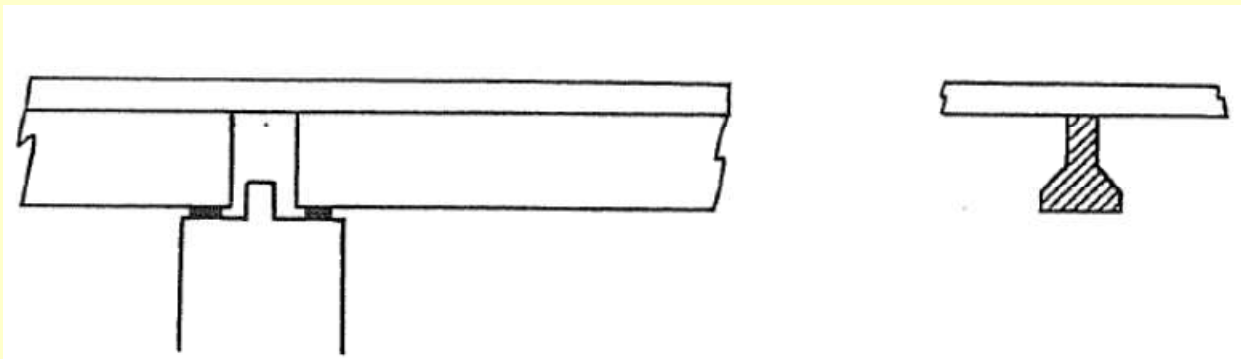


- ⇒ structures continues globalement préférables
- à l'égard des problèmes de tassements différentiels
  - à condition d'y réaliser la ductilité

**Exemple.**

**Ponts à poutres préfabriquées précontraintes**

- presque isostatiques
- continuité de la dalle au droit des appuis intermédiaires  
zone où se concentrent les rotations relatives des extrémités de travée  
sans grands moments de flexion  
aisément ductile  
absence de voie d'eau



***Continuité limitée à la dalle***



## FATIGUE

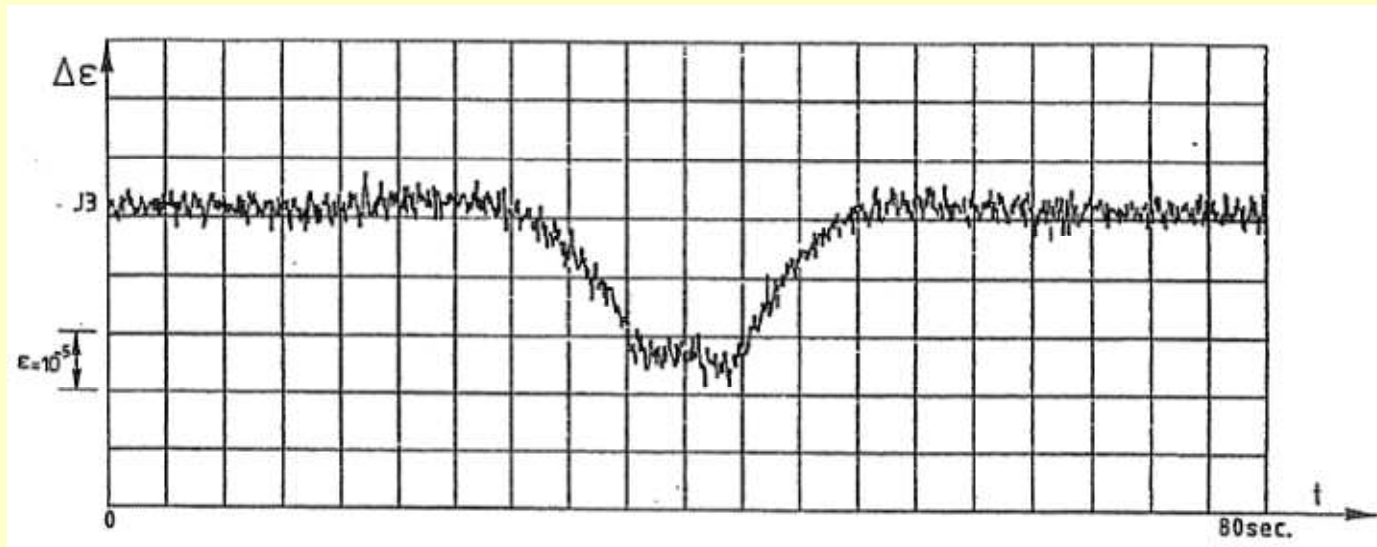
Fatigue : sollicitations répétées

En général, une action extérieure

Exemple :

- Convois ferroviaires sur les ponts rails
- Transporteurs à palette sur dalle

Répétition de sollicitations trop élevée => fissuration progressive ... ruine



*Variation d'allongement  $\Delta \epsilon$  dans le pont SNCB de Sart Bernard au passage d'un train*

## VIBRATIONS

Mise en vibration : phénomène dynamique de mise en mouvement

Dépend de :

- masse
- raideur
- amortissement

de l'élément

## Fatigue ↔ Vibrations

- Parfois confondus, car contraintes variables dans la structure
- Mais différents:

**Exemple: transporteurs à palettes sur dalle**

**La plus importante variation de contrainte: le trafic, pas les vibrations**

**=> Fatigue**

**Haubans d'un pylône**

**Vibration dues au vent      contraintes faibles**

**=> Pas de fatigue**

**Vibrations : autres problèmes que la fatigue**

- **Troubles d'utilisation : inconfort en présence de vibrations**

**Ex : Oscillations d'un plancher de salle de danse ou de salle de sport**

**Implique parfois des réparation**

- **Parfois résonnance => fortes oscillations      danger immédiat  
ou fatigue**

## VIBRATIONS

- ▶ 1 structure :  
des modes de vibration  
fonction de la distribution  
des raideurs  
des masses

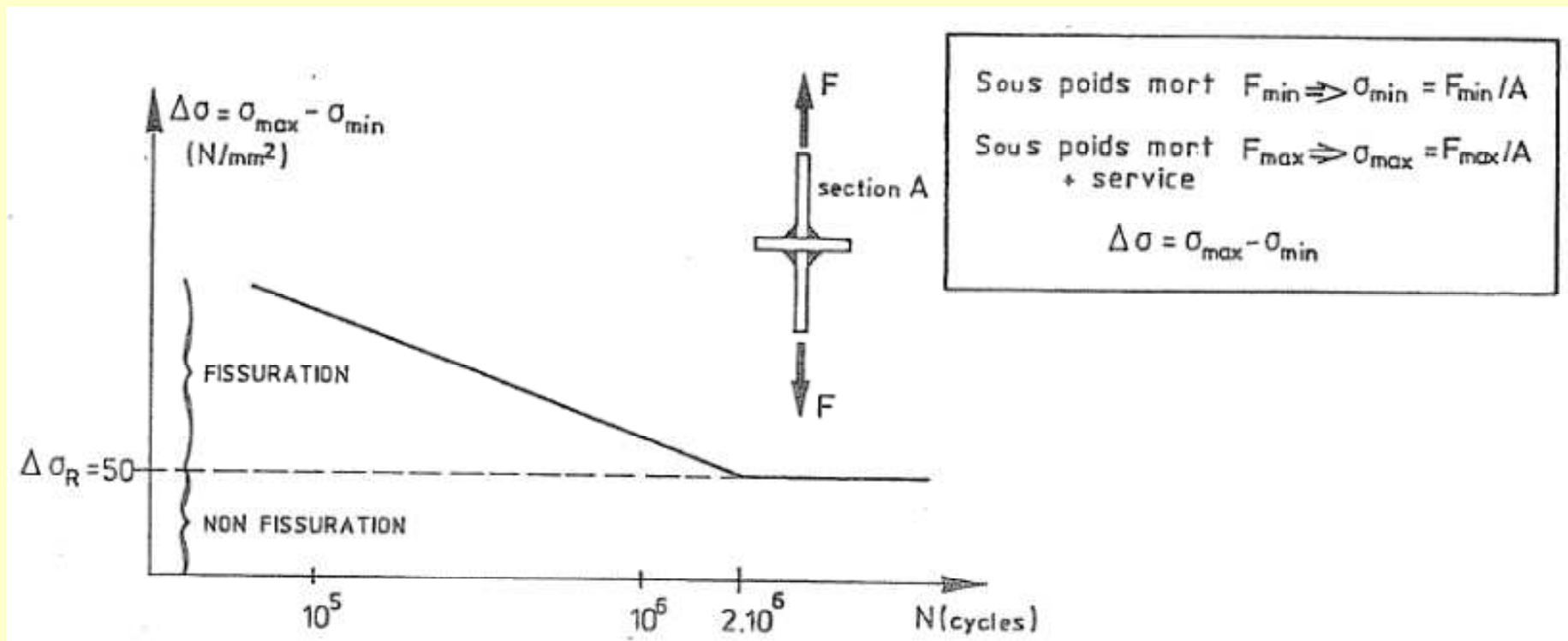
Activité	Fréquence d'excitation Hz	Type de structure	Fréquence propre recommandée Hz	Source
Piéton	1,7 à 2	Passerelle piéton	$f_1 > 2,4$ * $f_2 > 4,8$ * $f_3 > 7,2$ *	SIA 160
Sport	2,5 à 3	plancher béton	$f_1 > 7,5$ $f_1 > 9$	
Danse	2,6 à 3	acier	$f_1 > 6,5$ $f_1 > 8$	
Concert classique ou variété	3	plancher béton	$f_1 > 3,4$	
Hardrock	2,8	acier	$f_1 > 6,5$	
		plancher		



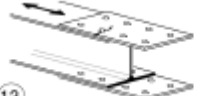


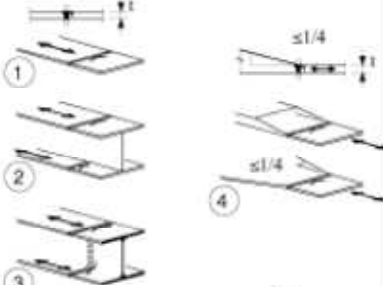

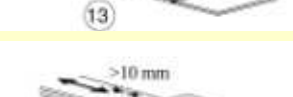
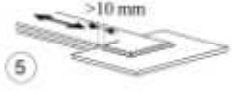
$f_i^*$  : fréquence du mode i

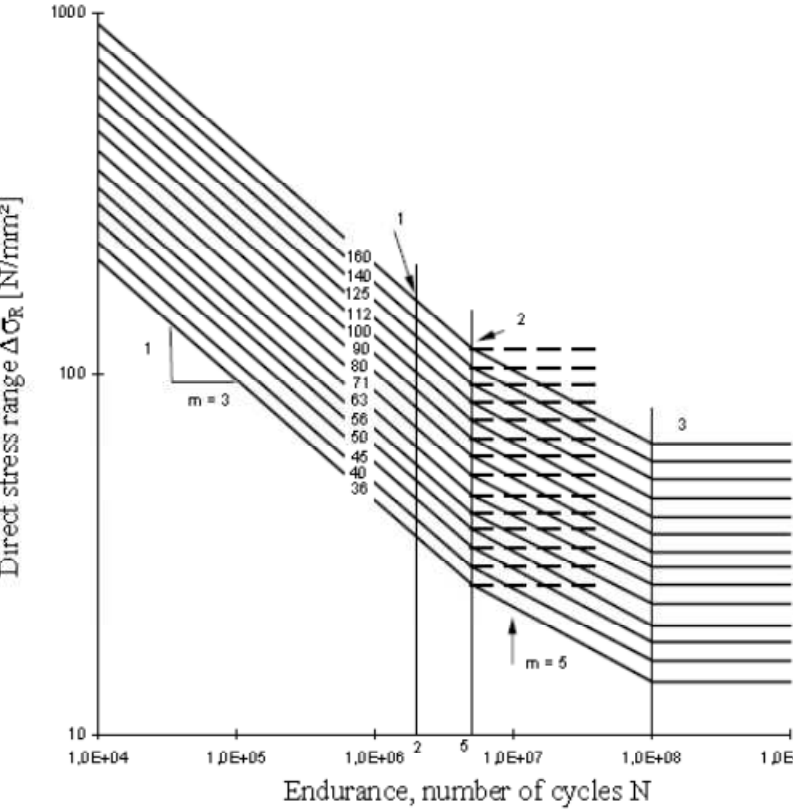
- ▶ 1 mode de vibration : période propre T (en s)  
fréquence propre  $f = 1/T$ (en Hz)
- ▶ Problèmes vibratoires: excitation de fréquence  $\approx$  fréquence de la structure  
Oscillations d'amplitude infinie, si amortissement  $\approx 0$
- ▶ Conception adéquate
  - fréquence vibration structure  $\neq$  fréquence excitation      écart min= 20 %
  - amortissement élevé.
  - Connaître:
    - action :                      fréquence d'excitation
    - réponse :                     caractéristiques dynamiques de la structure
    - critères :                     flèche, accélération

## FATIGUE. Général.

- Dans les codes de calcul, pour divers détails: des courbes de WOHLER
- Durée de vie du détail = N cycles avant rupture pour  $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$   
 $\Delta\sigma$  variation de contrainte calculée en section courante du détail
- Asymptote horizontale d'ordonnée  $\Delta\sigma_R$ :  
Si  $\Delta\sigma < \Delta\sigma_R \Rightarrow$  pas de propagation de fissure de fatigue



Detail category	Constructional detail	Description	Requirements
160		<p><u>Rolled and extruded products:</u></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Plates and flats;</li> <li>2) Rolled sections;</li> <li>3) Seamless hollow sections, either rectangular or circular.</li> </ol>	<p><u>Details 1) to 3):</u></p> <p>Sharp edges, surface and rolling flaws to be improved by grinding until removed and smooth transition achieved.</p>
112		<p>8) Double covered symmetrical joint with preloaded high strength bolts.</p>	<p>8) <math>\Delta\sigma_R</math> to be calculated on the gross cross-section.</p>
90		<p>13) One sided or double covered symmetrical connection with non-preloaded bolts in normal clearance holes. No bad reversals.</p>	<p>8) ... gross cross-section.</p> <p>13) ... net cross-section.</p>
112		<p>3) Automatic fillet or butt weld carried out from both sides but containing stop/start positions.</p>	<p>4) When this detail contains stop/start positions category 100 to be used.</p>
112		<p>4) Automatic butt welds made from one side only, with a continuous backing bar, but without stop/start positions. <u>Without backing bar:</u></p>	<p>- All welds ground flush to plate surface parallel to direction of the arrow.</p> <p>- Weld run-on and run-off pieces to be used and subsequently removed, plate edges to be ground flush in direction of stress.</p> <p>- Welded from both sides; checked by NDT.</p> <p><u>Detail 3):</u> Applies only to joints of rolled sections, cut and rewelded.</p>
112	 <p>size effect for <math>t &gt; 25\text{mm}</math>: <math>k_t = (25t)^{0.2}</math></p>	<p>1) Transverse splices in plates and flats.</p> <p>2) Flange and web splices in plate girders before assembly.</p> <p>3) Full cross-section butt welds of rolled sections without cope holes.</p> <p>4) Transverse splices in plates or flats tapered in width or in thickness, with a slope <math>\le 1/4</math>.</p>	<p>- Welded from both sides; checked by NDT.</p> <p><u>Detail 3):</u> Applies only to joints of rolled sections, cut and rewelded.</p>
36		<p>13) Butt welds made from one side only.</p>	<p>13) Without backing strip.</p>
71	 <p>size effect for <math>t &gt; 25\text{mm}</math>: <math>k_t = (25t)^{0.2}</math></p>	<p>13) Butt welds made from one side only when full penetration checked by appropriate NDT.</p>	
45*		<p><u>Overlapped:</u></p> <p>5) Fillet welded lap joint.</p>	<p><u>Details 4) and 5):</u></p> <p>- Weld terminations more than 10 mm from plate edge.</p> <p>- Shear cracking in the weld should be checked using detail 8).</p>



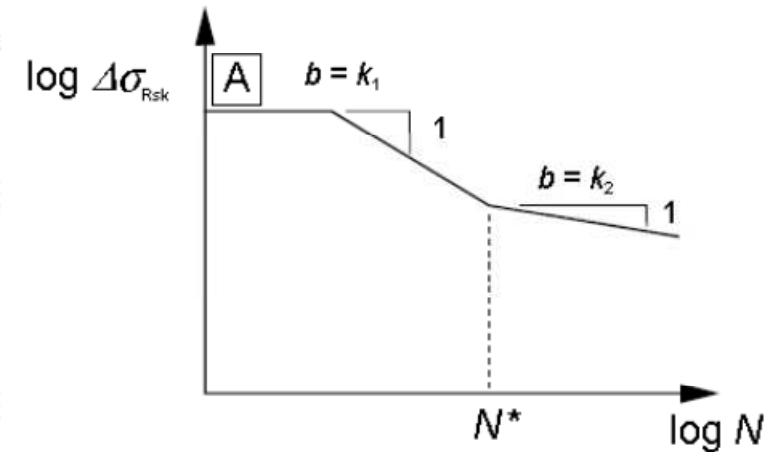
**Exemple de dépendance de la résistance  $\Delta\sigma_R$  en fatigue vis à vis des détails constructifs. D'après Eurocode 3.**

## Fatigue en béton armé. Armatures.

- $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$  dans l'armature calcul BA: section fissurée
- Action cyclique: combinée avec la combinaison de base défavorable
  - $\sigma_{\min}$  sous  $[G_{k,j} \text{ "+" } P \text{ "+" } \psi_{1,1} Q_{k,1} \text{ "+" } \Sigma \psi_{2,i} Q_{k,i}]$
  - $\sigma_{\max}$  sous  $[G_{k,j} \text{ "+" } P \text{ "+" } \psi_{1,1} Q_{k,1} \text{ "+" } \Sigma \psi_{2,i} Q_{k,i}] \llcorner \text{ "+" } \llcorner Q_{\text{fatigue}}$
- Pas de fatigue si  $Y_{F,\text{fatigue}} \Delta\sigma_{S,\text{equ}}(N^*) \leq \Delta\sigma_{Rsk}(N^*) / Y_{S,\text{fatigue}}$   
 $\Rightarrow \Delta\sigma_{S,\text{equ}}(N^*) \leq \Delta\sigma_{Rsk}(N^*) / 1,15$

Paramètres des courbes S-N pour les armatures de béton armé

Type d'armature	N*	Exposant de la contrainte		$\Delta\sigma_{Rsk}$ (MPa) Pour N* cycles
		k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	
Barres droites et barres pliées	10 <sup>6</sup>	5	9	162,5
Barres soudées et treillis soudés	10 <sup>7</sup>	3	5	58,5
Dispositifs de couplage	10 <sup>7</sup>	3	5	35
Précontrainte par pré-tension	10 <sup>6</sup>	5	9	185
Précontrainte par post tension				
- monotonous gaine en matière plastique	10 <sup>6</sup>	5	9	185
- armatures de précontrainte droites ou armatures de précontrainte courbes dans gaines en matière plastique	10 <sup>6</sup>	5	10	150



$\Delta\sigma^*_{Rsk} \ll f_{yd} !$

Barres à béton

$\Delta\sigma^*_{Rsk} = 162 \text{ N/mm}^2 \ll f_{yd} = 434 \text{ N/mm}^2$

Barres à béton soudées

$\Delta\sigma^*_{Rsk} = 58 \text{ N/mm}^2 \ll f_{yd} = 434 \text{ N/mm}^2$

Acier de précontrainte

$\Delta\sigma^*_{Rsk} = 185 \text{ N/mm}^2 \ll f_{yd} = 1500 \text{ N/mm}^2$

## Fatigue en béton armé. Béton.

$$\frac{\sigma_{c,\max}}{f_{cd,\text{fat}}} \leq 0,5 + 0,45 \frac{\sigma_{c,\min}}{f_{cd,\text{fat}}} \quad \begin{array}{l} \leq 0,9 \text{ pour } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ \leq 0,8 \text{ pour } f_{ck} > 50 \text{ MPa} \end{array}$$

$$f_{cd,\text{fat}} = k_1 \beta_{cc}(t_0) f_{cd} (1 - f_{ck}/250)$$

$$f_{cd,\text{fat}} = 0,85 f_{cd} \quad k_1 = 0,85$$

$$\sigma_{c,\max} \leq 0,5 f_{cd,\text{fat}} + 0,45 \sigma_{c,\min}$$

$$\sigma_{c,\max} \leq 0,42 f_{cd} + 0,45 \sigma_{c,\min}$$

## FATIGUE D'UN PLATELAGE DE PONT METALLIQUE

Fissurations de fatigue dans les assemblages de raidisseurs longitudinaux en U

Analyse: classe d'assemblage trop basse

Solution durable: changement de conception de l'assemblage  
passage de cordons d'angle à soudures bout à bout.

Difficile:

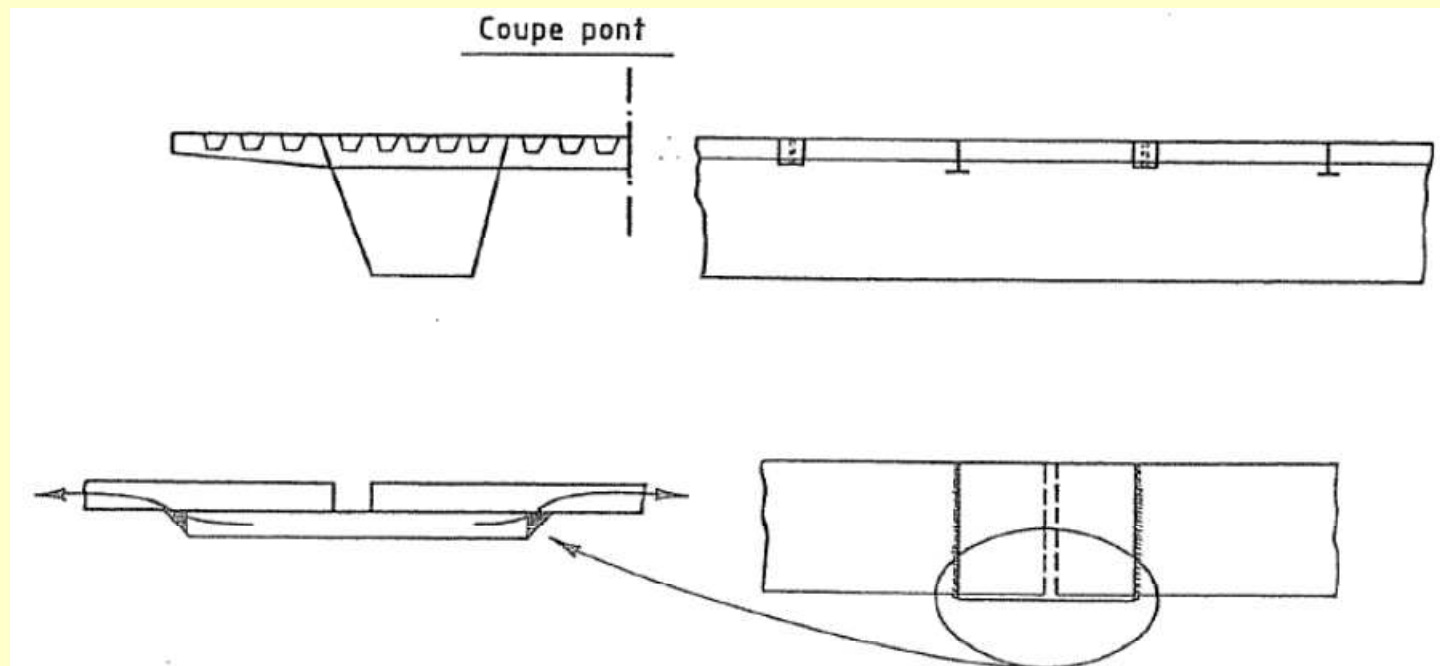
Pas d'accès intérieur au U => pas de solution boulonnée

pas de possibilité de slip à l'arrière en soudé

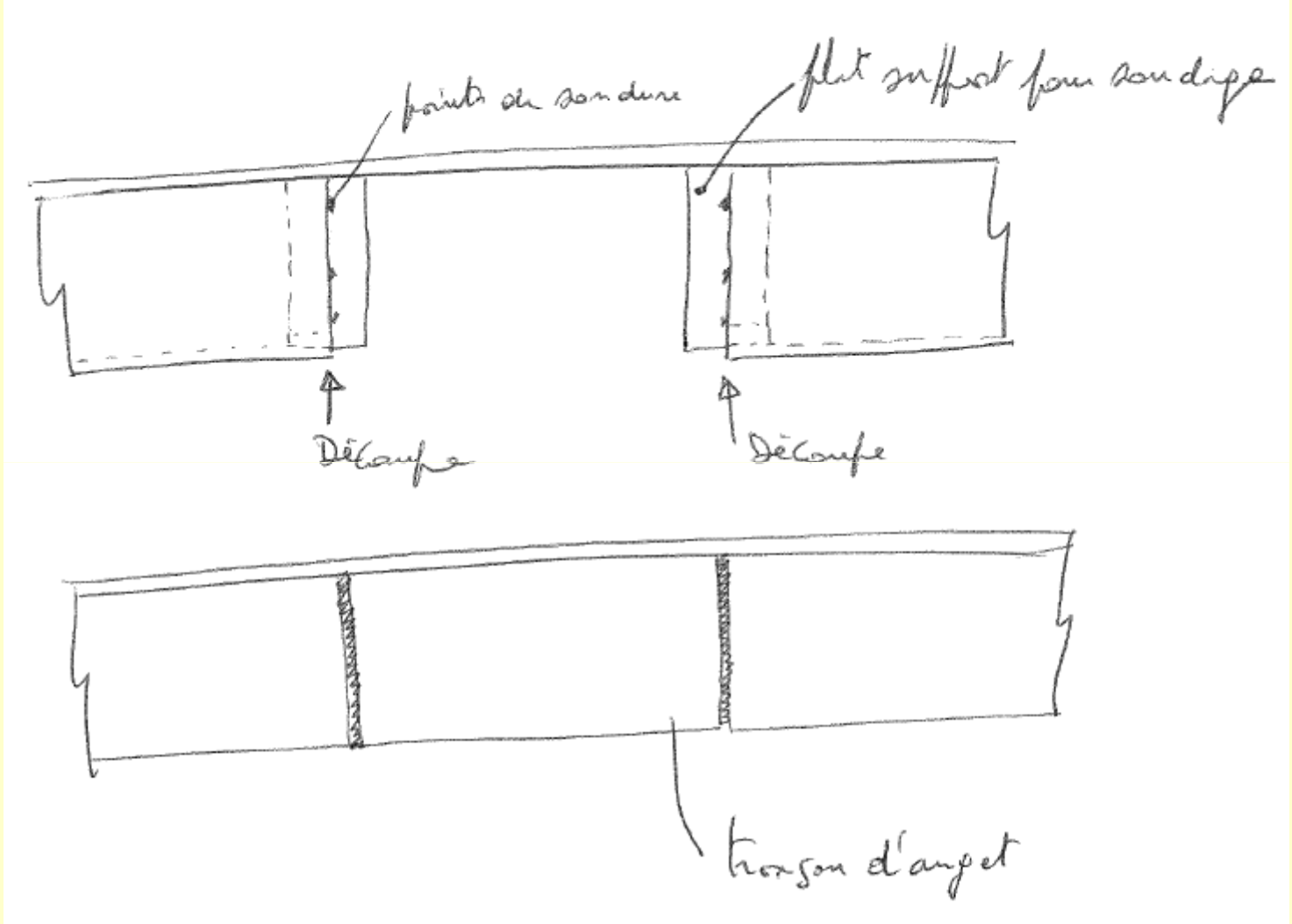
Solution soudée

sans reprise à l'arrière

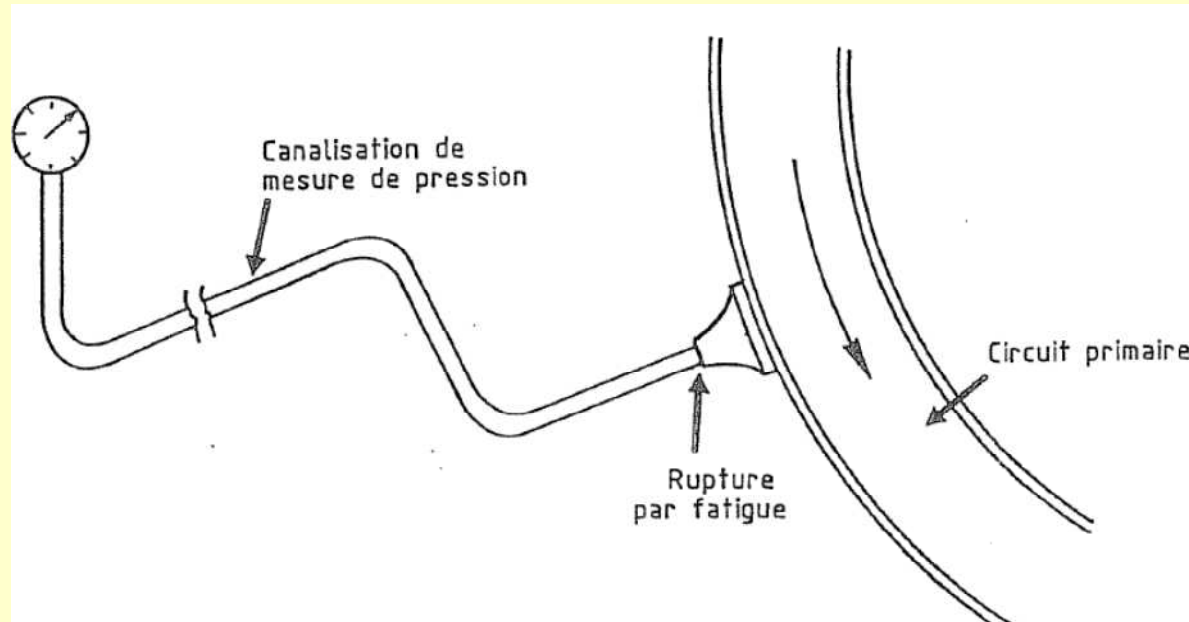
soudure au plafond, difficile à exécuter







## RUPTURE DE CANALISATION DANS UNE CENTRALE NUCLEAIRE



Conception des canalisations effectuée en tenant compte des problèmes de vibration

Excitation: la pompe 1500 t/min (25 Hz)

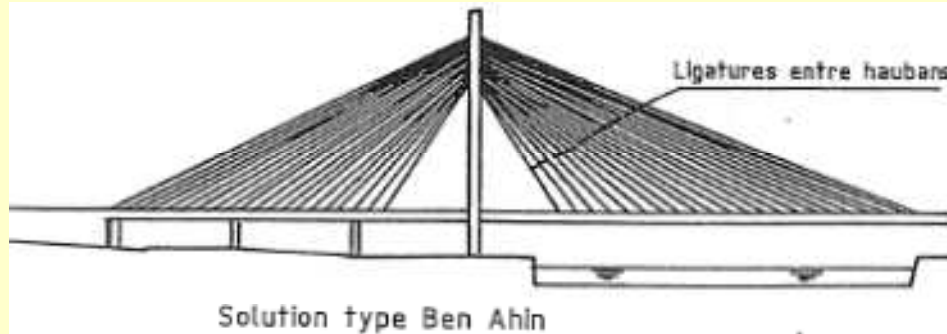
Lors de l'exécution: modification des appuis de la canalisation

Changement des longueurs des parties droites de la canalisation de mesure  
des fréquences propres de vibration

Solution:

écarter toutes les fréquences propres de la valeur de 25 Hz  
et des premiers harmoniques, soit 50 Hz et 75 Hz

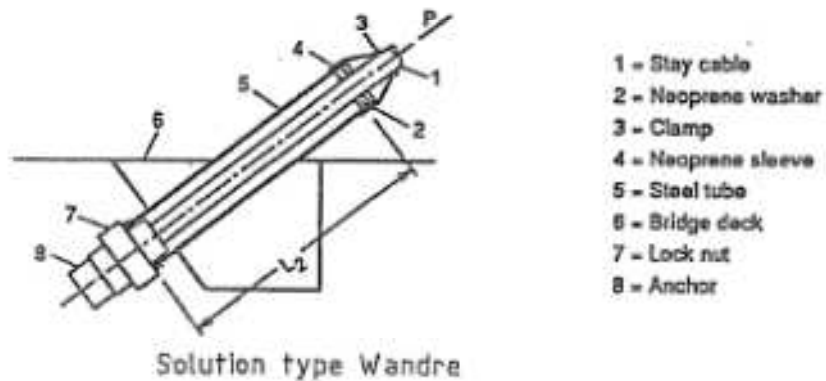
## VIBRATIONS DE HAUBANS DE PONTS



Possible fatigue.

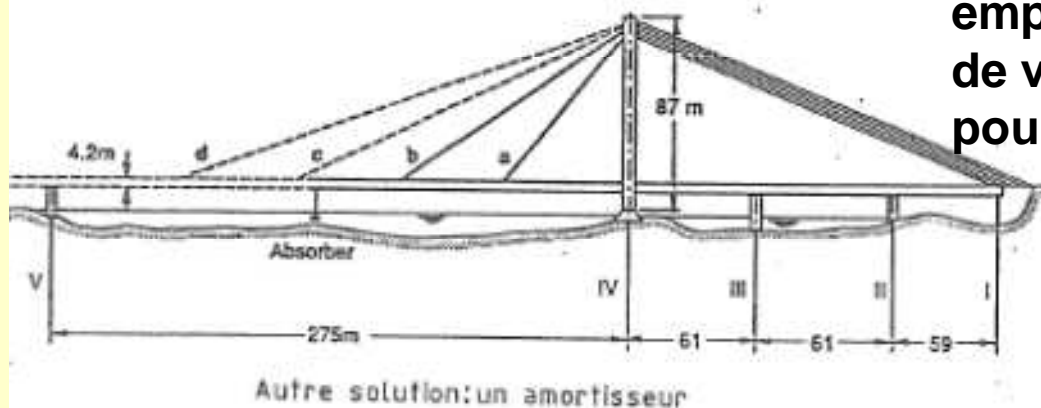
**Ben Ahin**

Changement de la fréquence propre fondamentale  $f_1$  des haubans en créant une liaison entre eux



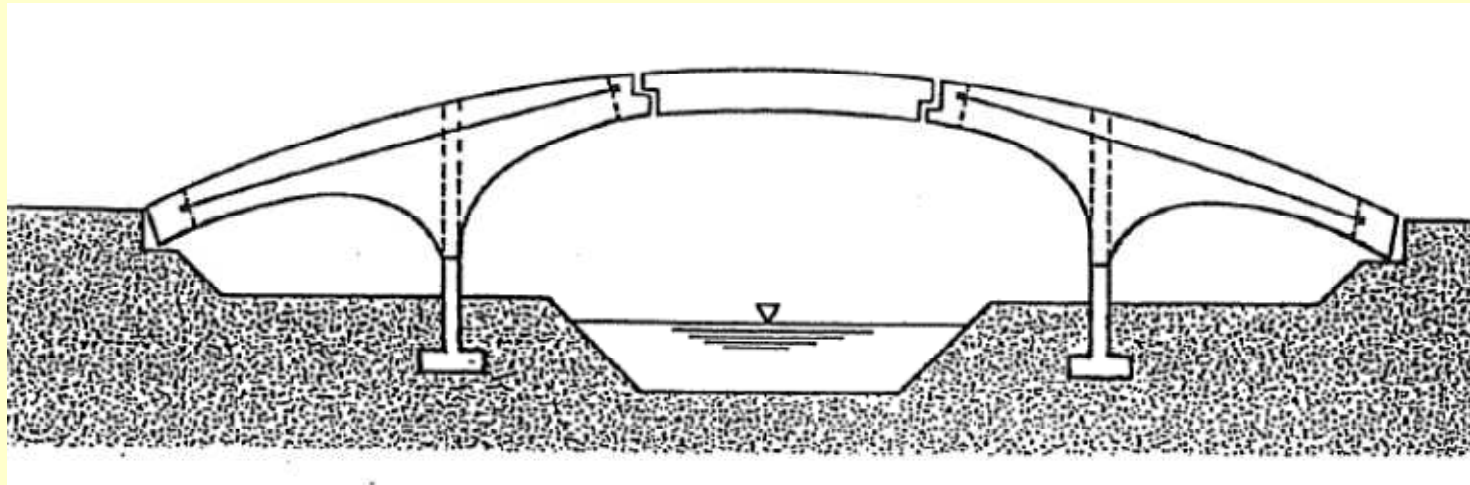
**Wandre**

Changement des conditions d'extrémité des câbles par injection de résine dans les blocs d'ancrage  
=> "encastrement" amortisseur empêchant les fortes amplitudes de vibration pour des excitations de type transitoire.

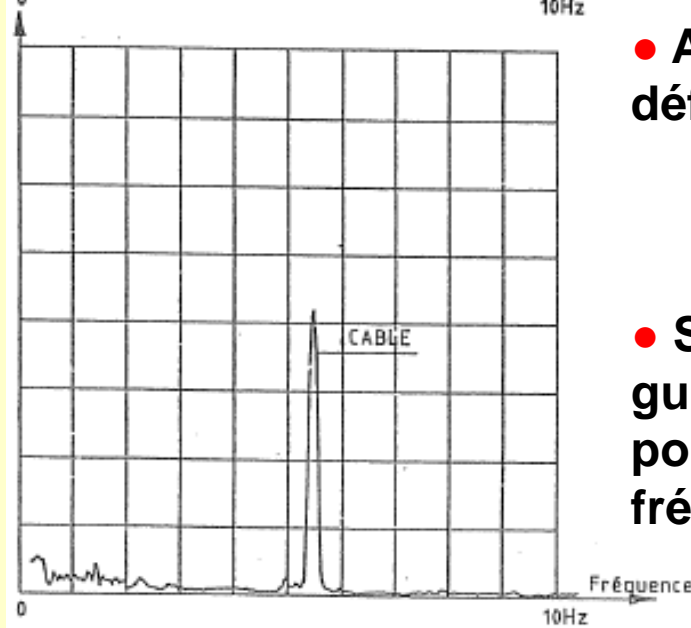
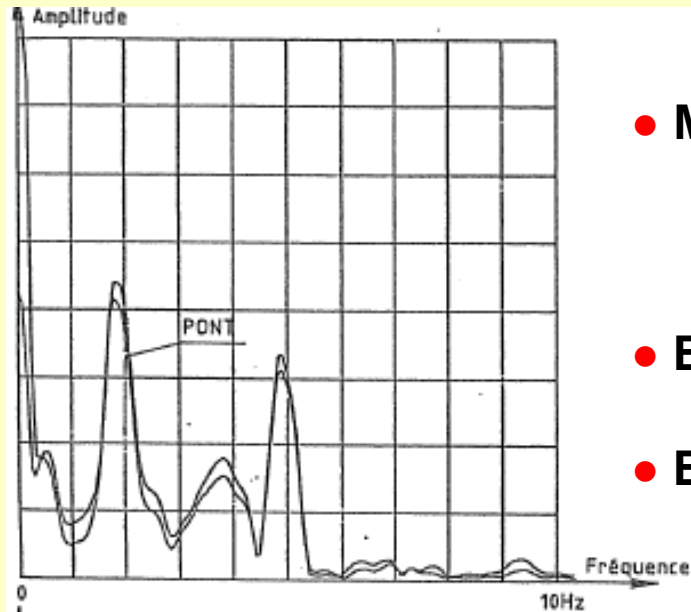


## EXEMPLE. VIBRATIONS D'ARMATURE DE POSTCONTRAINTE.

- Pont précontraint : vieillissement, perte de précontrainte
- Réparation: postcontrainte par torons intérieurs aux caissons du pont
- Remise en service : armatures de postcontrainte parfois en vibration
- Fatigue ?
- Calcul :  
fréquence des armatures de postcontrainte  $\approx$  fréquence du pont
- Incertitudes du calcul masse  $E_{\text{béton}}$  amortissement  $N_{\text{cycles}}$   
 $\Rightarrow$  mesures sur place des vibrations: armatures et pont



*Pont de Schengen-Renforcement par postcontrainte*



- **Mesures**

fréquence  $f_{1,armature} \approx 0,6 f_{pont}$

fréquence  $f_{2,armature} \approx 1,2 f_{pont}$

- **Ecart  $\approx 20\%$  résonnance improbable**

- **Excitation : véhicule sur le joint de la travée centrale  
amortissent rapide**

- **Amplitudes de vibrations des armatures faibles  
déformée de vibration  $\Rightarrow \Delta\sigma_{armature}$  OK**

**$\Rightarrow$  Pas d'intervention additionnelle**

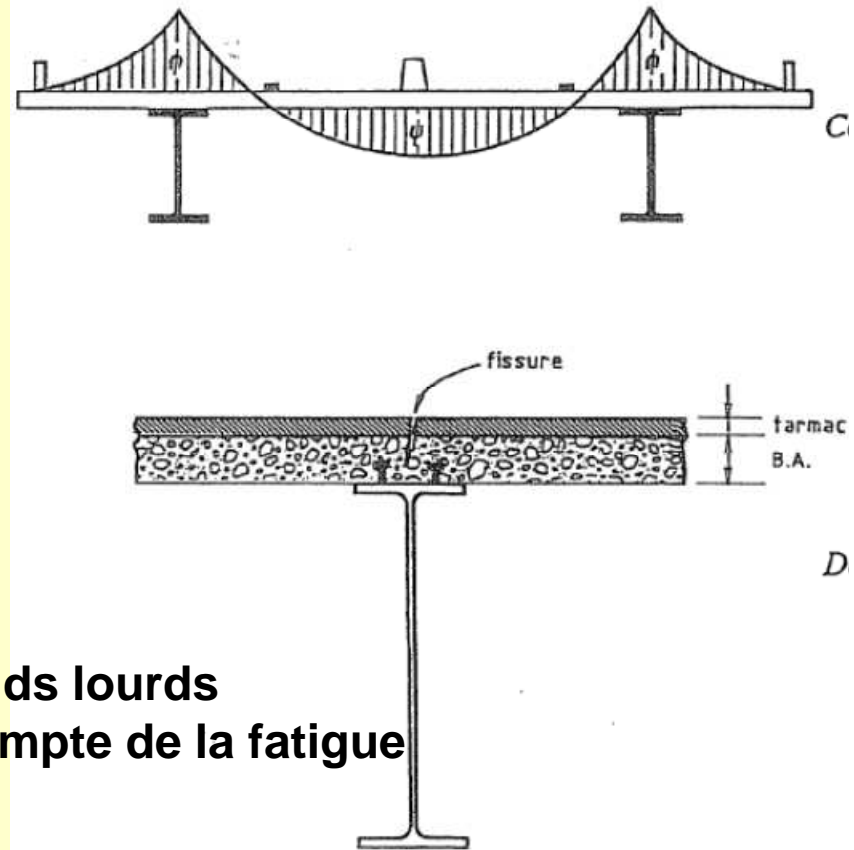
- **Sinon**

**guides complémentaires des torons de postcontraint  
points fixes dans la déformée vibratoire**

**fréquences propres des armatures multipliées par 4**

**EXEMPLE.**  
**FATIGUE D'UN PLATELAGE**  
**DE PONT MIXTE**

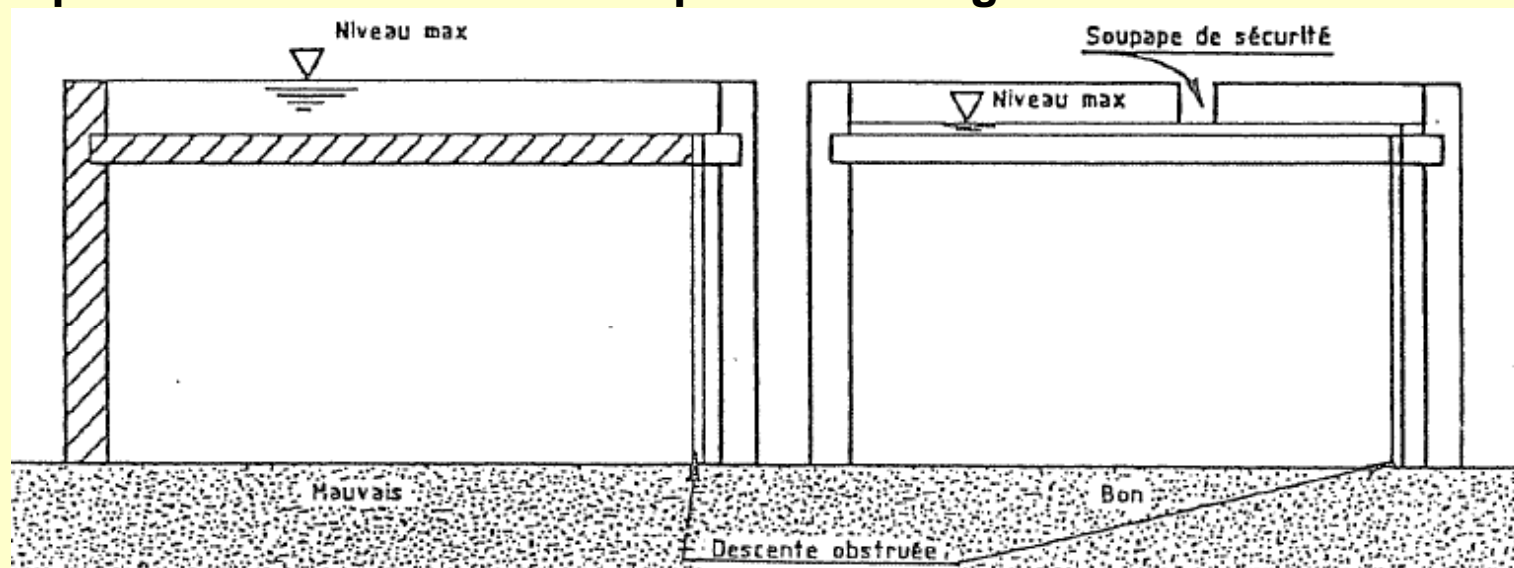
- Pont autoroutier mixte acier béton deux maîtresses poutres
- Fissures longitudinales à l'aplomb des maîtresses poutres
- Flexion transversale sous passage des poids lourds
- Dimensionnement de la dalle sans tenir compte de la fatigue
- 2 hypothèses : fatigue  
déformations excessives du béton comprimé
- de plus, armatures de gros diamètre => fissures rares, mais grosses
- Situation de déformation permanente stable atteinte  
contraintes dans les armatures respectent la limitation sur  $\Delta\sigma_{\text{armature}}$
- Réparation : injection de la fissure par matériau bas module résine epoxy



## Causes conceptuelles de dégradation des constructions

### Non prévision de situations accidentelles

- Eurocode 1: toute situation accidentelle possible doit être prise en compte  
Certaines citées : chocs, crue, incendie, tempêtes de vent, séismes
- Mais le concepteur est aussi tenu à faire preuve d'imagination



### Exemple

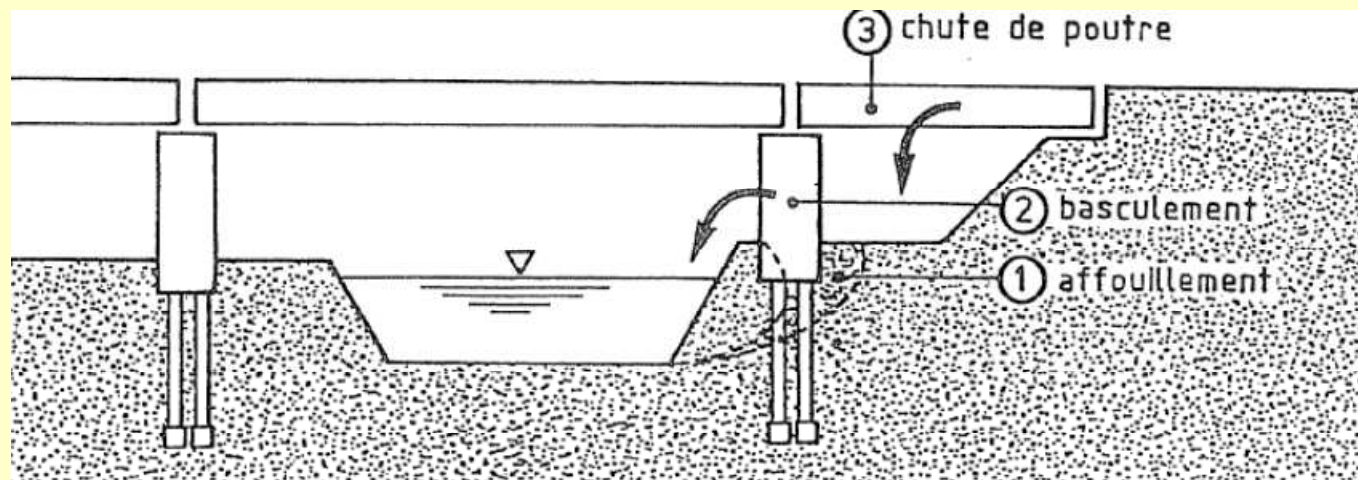
#### Toitures plates avec rehausse

- Seule évacuation d'eau : tuyaux de descente
  - Obstruction des tuyaux pluie violente
    - => niveau d'eau monte jusqu'à la rehausse
    - => voies d'eau
    - => effondrement de la toiture
- 30 cm d'eau = 3 kN/m<sup>2</sup> >> neige ou entretien

## EXEMPLE. AFFOUILLEMENT IMPREVU.

- **Affouillements** : si la vitesse de l'eau qui entoure une fondation est élevée
  - => entraînement de matière solide & massif de fondation mis à nu
  - => construction instable
- **Existent:**
  - autour de tout support de structure en rivière      écoulement perturbé au pourtour du support: vitesse d'eau élevée
  - à proximité des évacuations hydrauliques des ouvrages de retenue
- **Cause historique prédominante de destruction de ponts au cours des siècles**  
**Accidents dans les années 1960 à 2000:**
  - ponts sur torrents en Autriche & Suisse
  - pont sur le Douro au Portugal
  - pont de Pulle en Belgique

L'évacuation d'eau de l'écluse de Pulle a mis à l'air des pieux de fondation  
=> basculement d'un appui  
=> effondrement du pont                      (autoroute Anvers-Liège)





## ERREURS LORS DE LA CONCEPTION DES STRUCTURES

### Absence de robustesse.

- ▶ Eurocode 1 requiert la « robustesse »  
=> un problème local      rupture d'élément porteur (explosion ,...)  
   ne peut pas entraîner un effondrement global
  
- ▶ Bâtiments : robustesse
  - chemins alternatifs de descente de charge  
   1 poteau en moins => reprise de charge par effet cables des poutres
  - chaînages => les éléments porteurs principaux, murs, planchers, poutres  
   ne se désolidarisent pas
  
- ▶ Eurocode 2 : valeurs explicites des résistances minimum des chaînages

Position du chaînage	Résistance maximale requise
Chaînage horizontal interne	Max. 70 kN en traction
Chaînage horizontal périphérique	Max. 70 kN en traction
Chaînage horizontal de liaison des poteaux	Max. 150 kN en traction
Chaînage horizontal de liaison des murs	Max. 20 kN /m en traction
Chaînage verticaux	capacité de se substituer localement à un mur défaillant et d'assurer la descente de charge

## **ERREURS LORS DE LA CONCEPTION DES STRUCTURES**

### **Non prévision des tolérances de montage**

**Géométrie des éléments (longueurs de hourdis...) prévue au plus juste  
+ imprécisions inévitables de chantier**

- => portées d'appui des éléments réduites**
- => augmentation des excentricités**
- => sollicitations parasites**
- => dégradations diverses en service**

## ERREURS LORS DE LA CONCEPTION DES STRUCTURES

### Recherche du poids minimum et du prix minimum à la construction

- Objectif apparemment intéressant à la conception : économie
- A l'usage, intérêt plus relatif

### Evaluation qualitative, cas d'un bâtiment

- Dalle de plancher + 12 % de matière => + 40% inertie (raideur)  
+ 5% prix (un peu de béton en plus)
- Prix éléments placés = 30 % du total MO+éléments  
Main d'œuvre = 70% du total MO+éléments  
=> + 40 % inertie = 5% x 30% = + 1,5 % prix gros-oeuvre
- Finitions + chauffage + mobilier = 2/3 budget construction  
Conclusion: => + 40 % inertie = + 0,5 % budget total

**Mais si - 0,5 % => perte de satisfaction et d'argent**

### Exemples

- Un plancher qui vibre
  - le supporter pendant des années
  - le renforcer, pour >> 0,5% prix de construction.
- Pont avec problème de flèche et de rupture de tangente
  - coûts de couche de réglage, changement de revêtement,
  - joints de chaussée, avocats, experts,...

# ERREURS LORS DE LA CONCEPTION DES STRUCTURES

## Complication structurelle

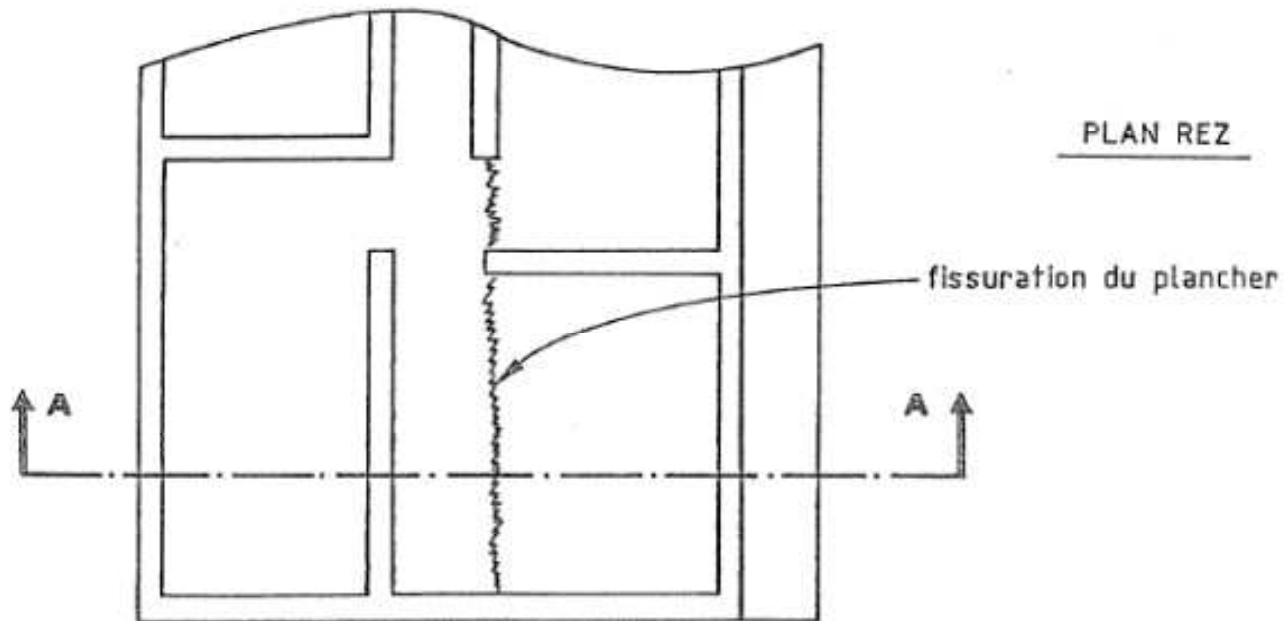
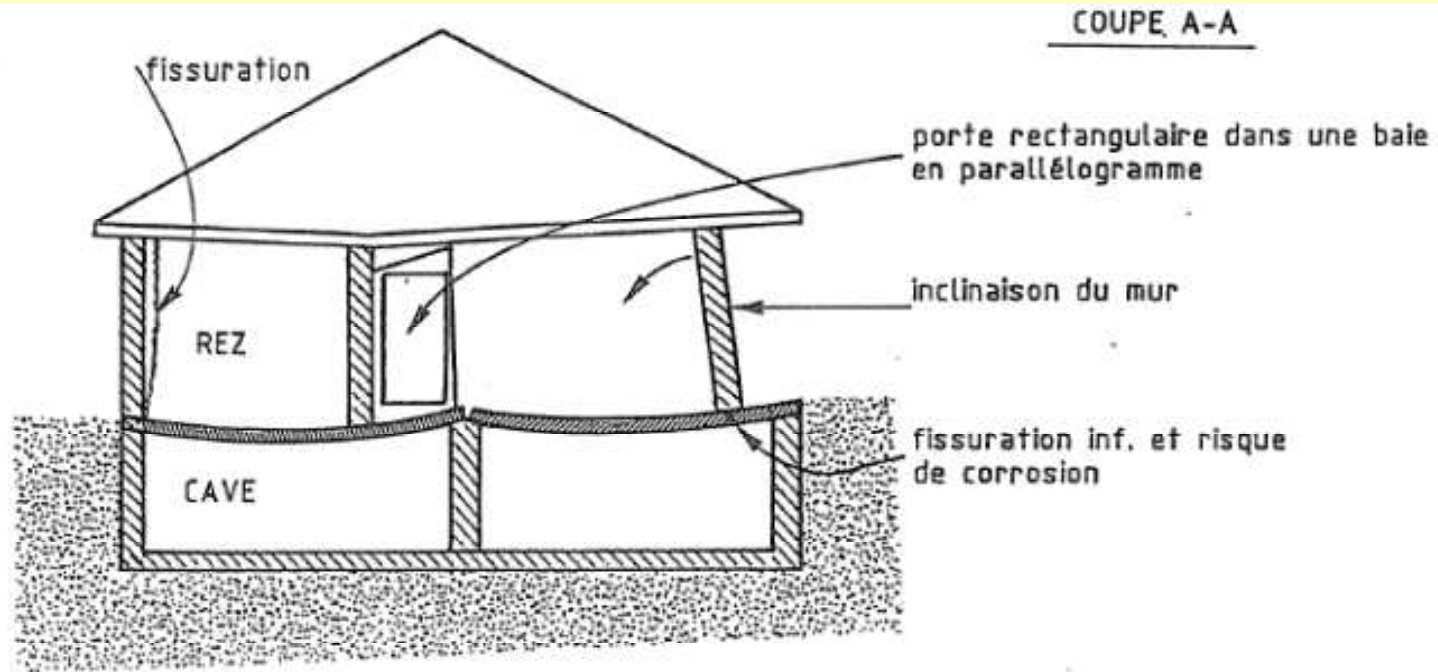
- **Idéal en projet : une saine perception des cheminements d'efforts**
- **Sinon : des cheminements compliqués et mal maîtrisés**

## **Exemple typique**

**Le plan d'un niveau conçu indépendamment du plan des niveaux sup. et inf.**

- **Résultats**
  - **des murs portant sur des dalles**
    - flèches instantanées et différées**
    - fissurations apparentes au plafond,...**
  - **des extrémités de dalles préfab. au milieu des locaux**
  - **des fissurations de revêtement à l'aplomb des murs sous jacents**
- **Origine**
  - Soucis prépondérant: utilisation et esthétique des locaux**
  - Soucis très secondaire : stabilité et de durabilité**

*Le plan d'un niveau conçu indépendamment du plan des niveaux sup. et inf.*



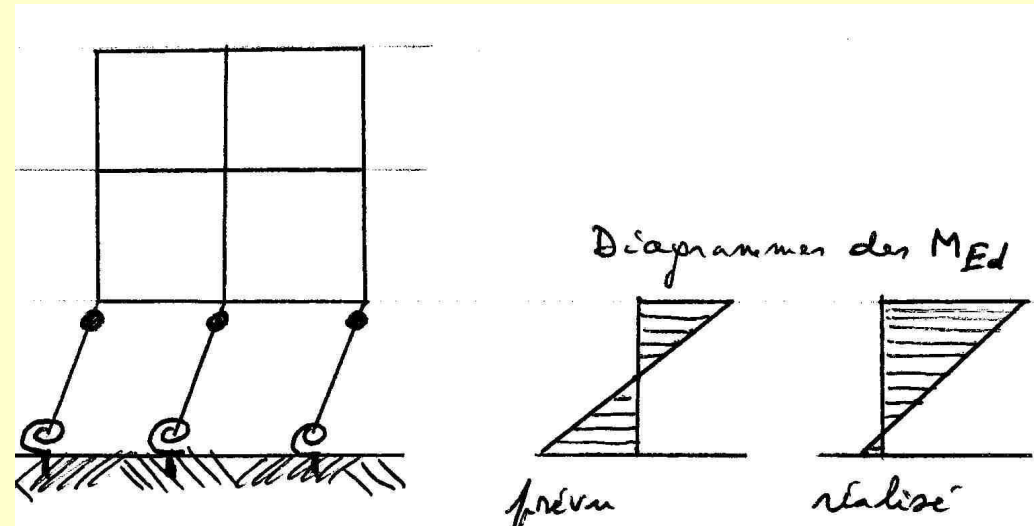
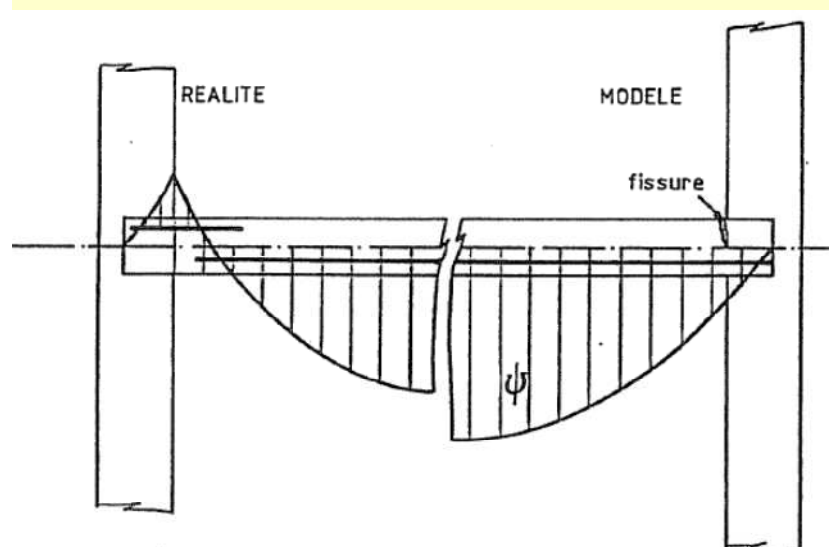
# ERREURS LORS DE LA CONCEPTION DES STRUCTURES

## ERREUR SUR LE MODELE

Considérer un schéma statique qui ne correspond pas à la réalité  
ou réaliser une structure qui ne correspond pas au schéma statique

### Exemples. Considérer:

- une poutre isostatique sur deux appuis pour une poutre encastree et placer les armatures pour les  $M, N, V$  de l'hypothese fausse
- qu'une construction est parfaitement verticale et oublier les tolérances de fabrication et de montage
  - les déformations sous charges de la structure et de sa fondation
  - les déplacements horizontaux
  - les sollicitations complémentaires dues à l'effet  $P \Delta$
- un poteau comme parfaitement encastree alors que l'encastrement est partiel;  
=> des sollicitations et déplacements réels & calculés différents



## **ERREURS D'EXECUTION**

**Une erreur d'exécution peut entraîner des effets néfastes.**

**On a connu en Belgique plusieurs cas de ponts dont le ferrailage était incorrect:**

- **oubli d'armature**
- **armatures inf. placées en haut, armatures sup. placées en bas (Pont de Bilzen)**

**Symptômes:**

- **déformations**
  - **fissurations**
- à première vue inexplicables...**

## ***2. Réparations structurales***



# REPARATIONS STRUCTURALES PROBLEMATIQUE GENERALE

## OBJECTIF

Rétablir un niveau de sécurité  $\geq$  initial

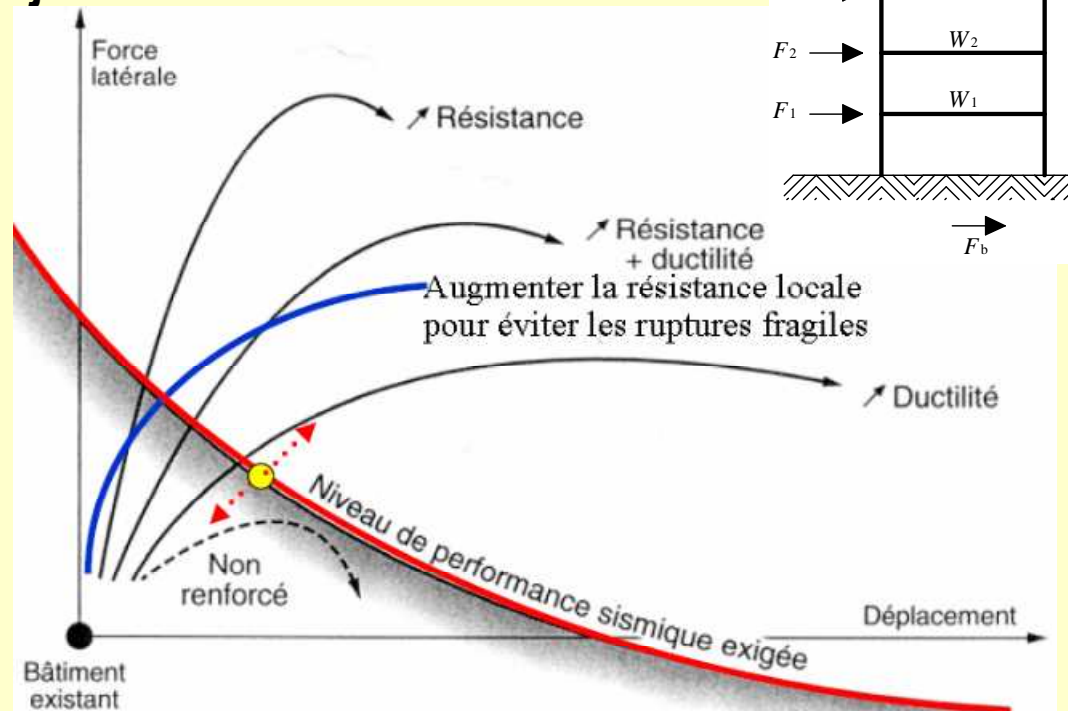
Définition de l'objectif :

**augmentation de**

**résistance ?**  
= niveau max

**raideur ?**  
= pente à l'origine

**ductilité ?**  
= déformabilité



## CONDITIONS TECHNIQUES NECESSAIRES AU BON CHOIX

Juste perception

- du mode de fonctionnement de la structure
- de l'état de contrainte
- de l'origine des dégradations
- de la résistance rémanente

Juste évaluation de la résistance/raideur/ductilité après intervention

**PRINCIPAUX  
TYPES  
DE  
REPARATION**

▶ **Remise en état conforme à la situation initiale par réparation locale ou remplacement d'éléments affaiblis**

Exemples: ● remplacement de barres corrodées  
● renouvellement de la précontrainte

▶ **Doublage de la structure existante**

Exemples: ● enrobage B.A. sur B.A. existant ;  
● doublage poutre bois par poutre métallique

▶ **Complément à une structure affaiblie ou faible depuis l'origine**

Exemples: ● appui supplémentaire d'une poutre  
● diagonales complémentaires dans un treillis  
● postcontrainte additionnelle  
● chaînages, diaphragme, renforcement en fondations

▶ **Réglages d'effort**

Exemples : ● postcontrainte additionnelle,  
● dénivellation d'appui, détensionnement

▶ **Conception révisée et remplacement de zones conceptuellement déficientes**

Exemple : ● exécution nouvelle d'assemblages soumis à fatigue

**ACTION  
SUR  
LES ACTIONS**

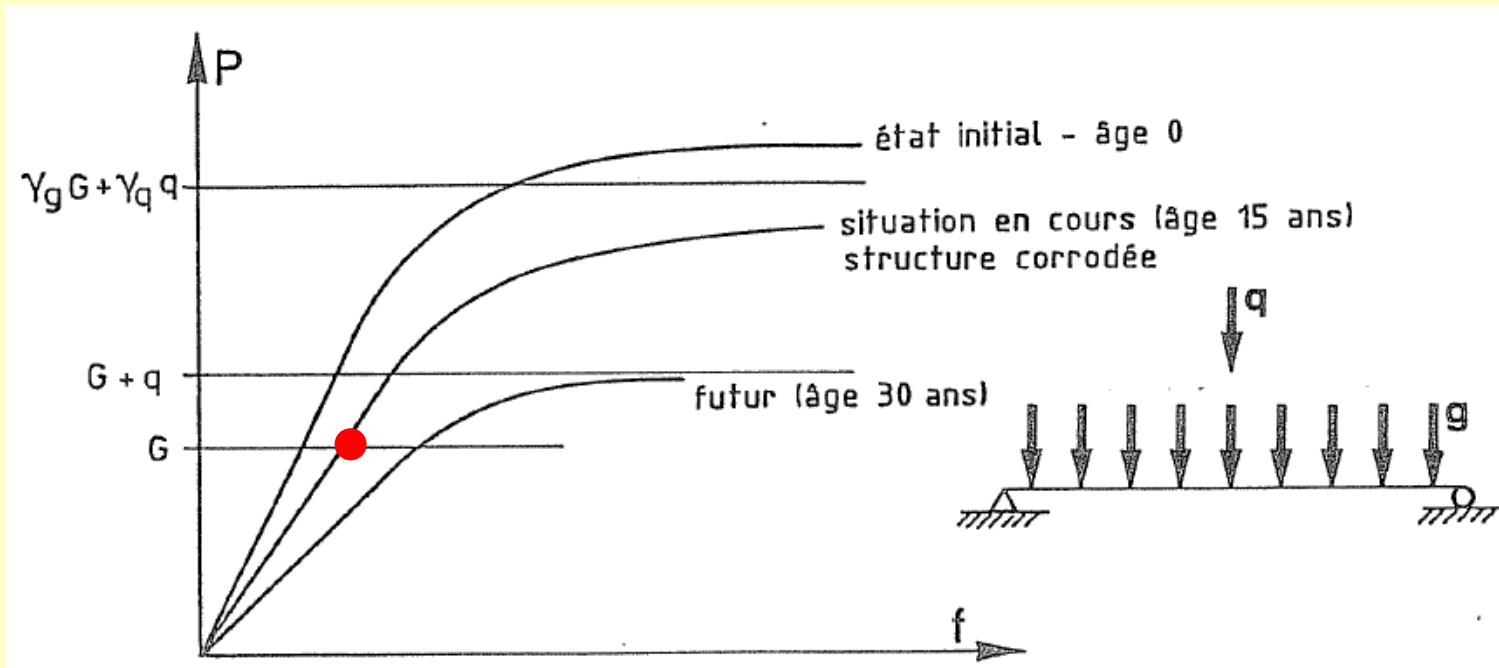
► **Réduction des actions négatives**

Exemples:

- Réduction de portée d'un élément porteur
- Réduction des actions de service  $Q$
- Réduction du poids mort  $G$   
Exemple: béton léger à la place de béton lourd
- Injection du sol  
pour augmenter la cohésion  
réduire les poussées
- Déblai  
pour réduire les poussées
- Rabattement de la nappe d'eau  
pour réduire la teneur en eau et les sous pression
- Changements aérodynamiques  
pour modifier la fréquence d'excitation
- Système amortisseur  
pour réduire les effets dynamiques
- Changement des masses  
pour modifier les fréquences propres.

<b>PROBLEMES DE CALCUL</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>▶ <b>Evaluation de la redistribution des contraintes entre ancien et nouveau</b></li><li>▶ <b>Reprise des forces de liaison entre ancien et nouveau correspondant au mode de travail homogène attendu</b></li><li>▶ <b>Reprise des forces nouvelles introduites par l'intervention</b></li></ul> <p>Exemples:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>● complément de poids en superstructure =&gt;charge complémentaire en fondation</li><li>● postcontrainte =&gt;forces transversales de traction modifications des réactions d'appui</li><li>● renforts appuyés avec excentricité =&gt;moments de flexion complémentaires.</li></ul>
<b>PROBLEME DE PHASES D'EXECUTION</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>▶ <b>Définition de la séquence des interventions, pour réduire les risques de chantier</b></li></ul> <p>Exemple:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>● réparer d'abord la superstructure, puis les fondations ?</li><li>● ou l'inverse ?</li></ul>

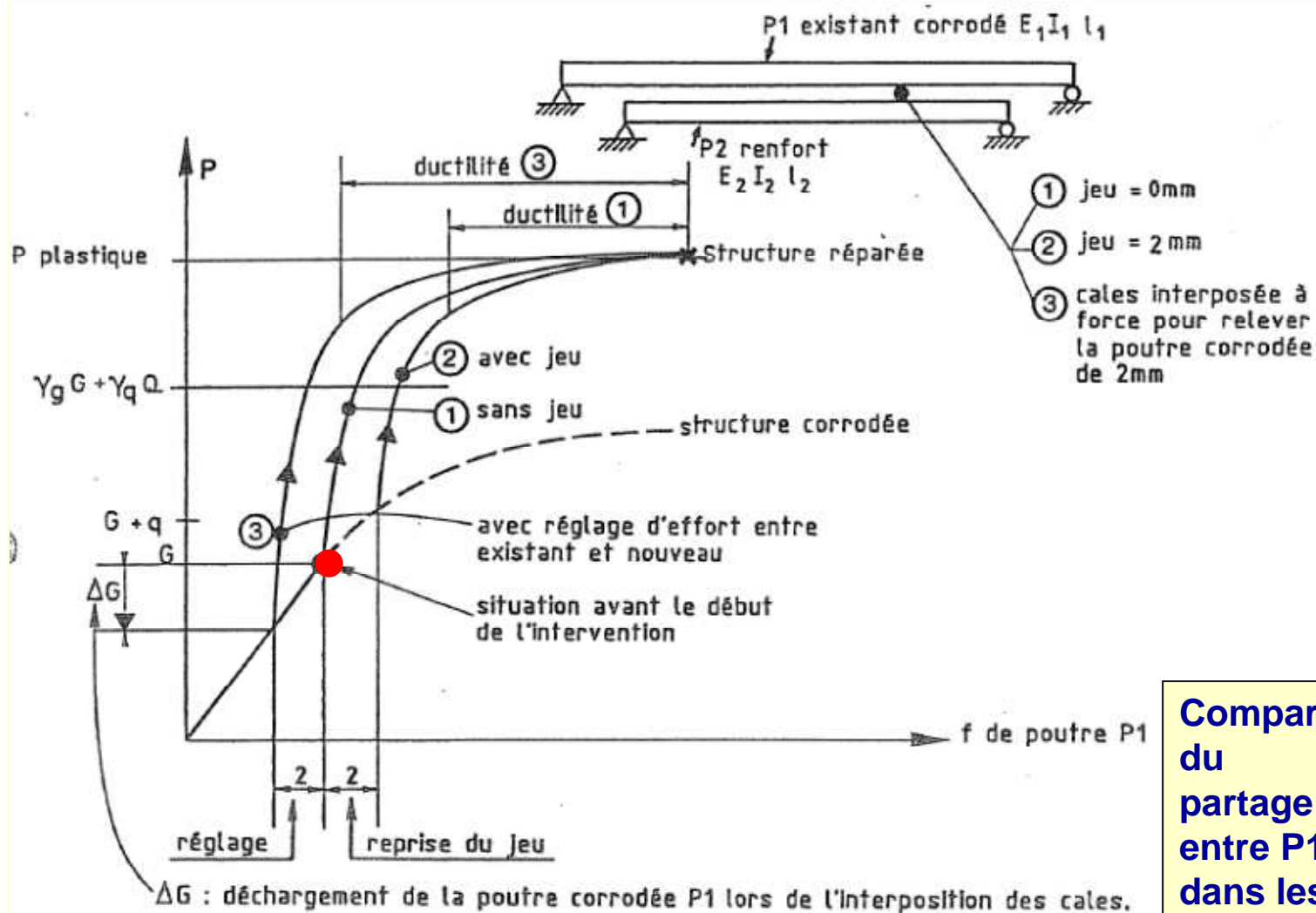
## PARTAGE DES SOLLICITATIONS ENTRE STRUCTURE EXISTANTE ET STRUCTURE COMPLEMENTAIRE.



Au départ:  $M_{Rd} \geq \gamma_g M_g + \gamma_q M_q$

Actuellement:  $M_{Rd} \geq M_g + M_q$

Si on n'intervient pas:  $M_{Rd} < M_g + M_q$  **=> ruine**



**Comparaison  
 du  
 partage des sollicitations  
 entre  $P_1$  et  $P_2$   
 dans les 3 exécutions**

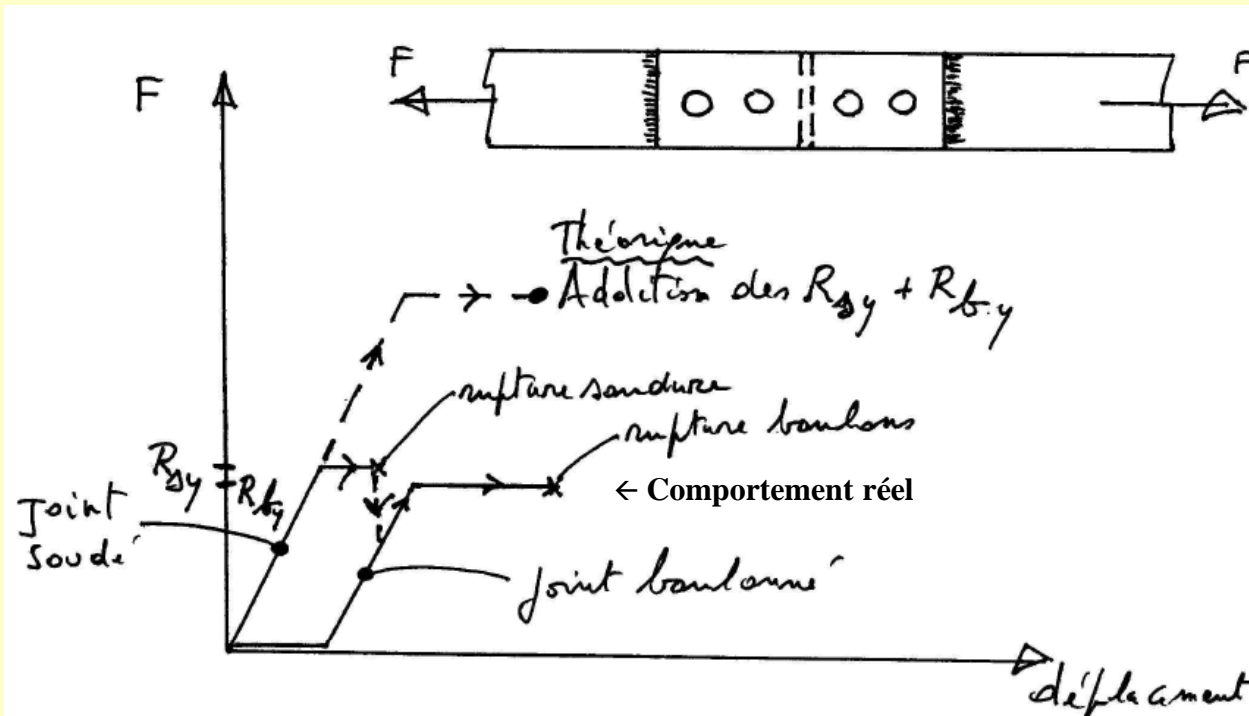
	Exécution	Poutre $P_1$ dégradée	Poutre $P_2$ renfort	Remarque
<b>Poids mort <math>G</math> seul</b>	Sans jeu	$G$	0	/
	Avec jeu	$G$	0	/
	Avec réglage	$G - \Delta G$	$\Delta G$	/
<b>Poids mort <math>G</math> + Surcharge <math>Q</math></b>	Sans jeu	$G + Q_1$	$Q_2$	$Q_1 + Q_2 = Q$
	Avec jeu	$G + Q_0 + U_1$	$U_2$	$Q_0 + U_1 + U_2 = Q$
	Avec réglage	$G + Q_1 - \Delta G$	$\Delta G + Q_2$	$U_2 < Q_2$ $Q_1 + Q_2 = Q$

## Domaine élastique

- calcul linéaire    proportionnalité forces-déformations
- suit l'historique    des actions appliquées  
des sections travaillant effectivement à chacune des étapes
- contraintes en un point :  
pas simplement fonction des dimensions de la section finale réparée
- calcul élastique des contraintes et déformations  
nécessaire, car établit le comportement de l'élément ou de la structure réparée  
sous les actions de service :    flèche    état de contrainte  
premières plastifications  
contraintes de traction non désirées ...

## Etat Limite Ultime de l'élément réparé

- Si de type plastique :  
indépendant    des contraintes internes  
de l' historique  
de la technologie d'exécution    précontrainte  
réglage d'efforts    jeu dans les assemblages
- Intéressant à calculer : la sécurité maximale qu'il serait possible d'atteindre
- Existe à sa pleine valeur  
si tous les phénomènes plastiques combinés ont une ductilité suffisante  
pour que leurs résistances soient présentes à l'ELU et donc additionnables



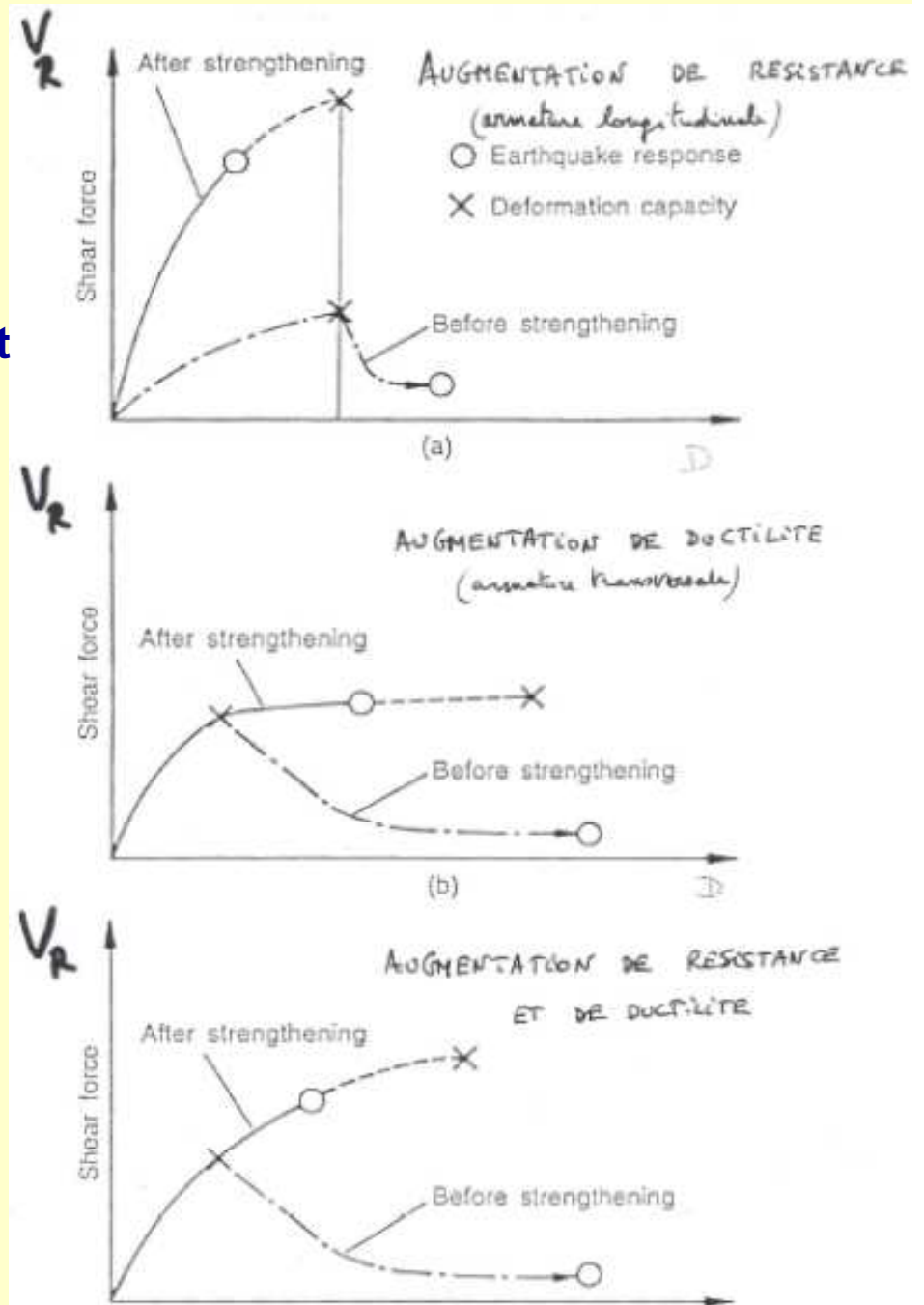
**La somme des résistances de composants différents ne représente pas le comportement réel de l'assemblage.**

**L'évaluation de l'Etat Limite Ultime de l'élément réparé doit faire l'objet d'un calcul adapté qui suit pas à pas l'historique des contraintes**



Une intervention sur un élément existant peut modifier un des 3 paramètres qui caractérisent une loi de comportement

- la raideur élastique  
pente de la courbe à l'origine
- la résistance maximum  
asymptote horizontale
- la ductilité  
rapport du déplacement à la rupture  
au déplacement à la limite élastique



## SEQUENCE DES PHASES D'EXECUTION ?

### Sécurité

Si la superstructure menace ruine

=> intervention aux fondations déconseillée

D'abord : travaux de réparation de la structure d'élévation (ossature et murs)  
ou travaux de stabilisation provisoire

Ensuite : travaux à la fondation

la partie supérieure est bien liaisonnée

risque limité de dégradations ou d'effondrement

### Absence de fissuration dans la superstructure réparée

Travaux en fondation => tassements ou rotations

D'abord travaux en fondations => dégâts à la superstructure non réparée

Ensuite en superstructure => moins de risque de fissurations ou déformations

### Séquence logique

Le plus sûr en stabilité et non dégradation des finitions:

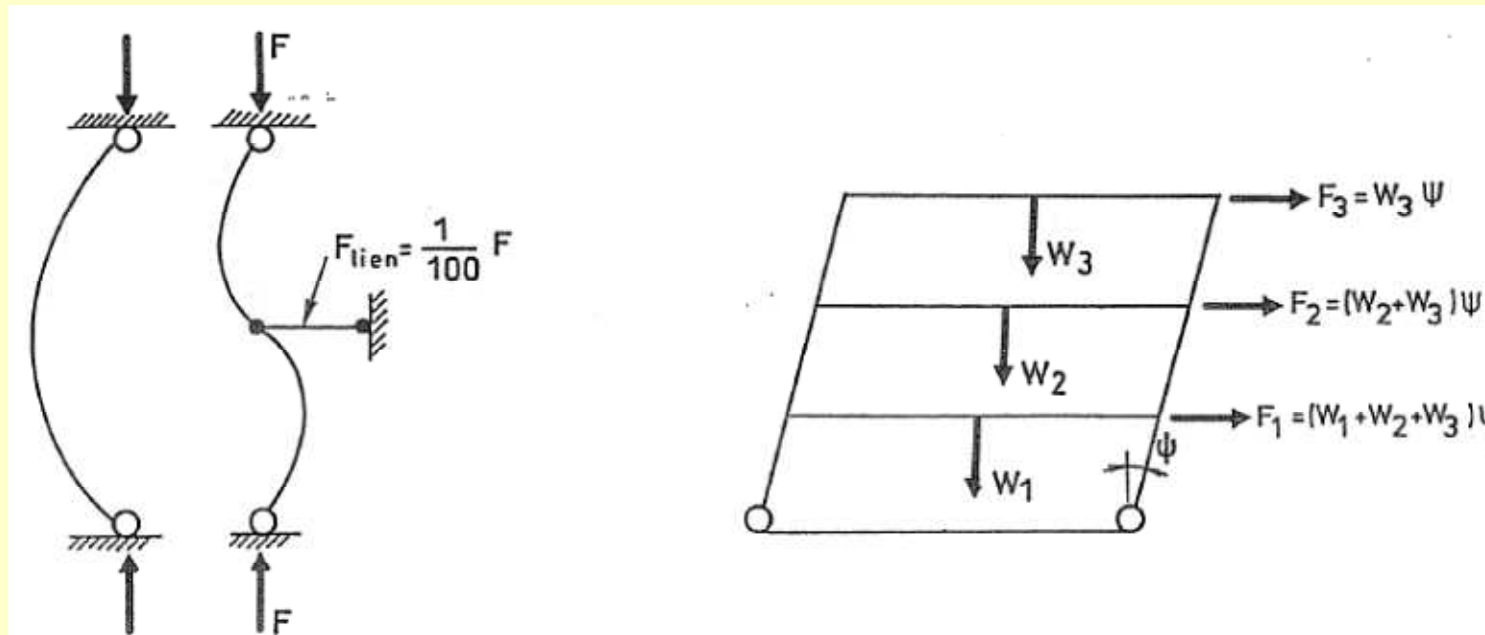
- réparations structurelles en superstructure  
ou stabilisation par étançonnement provisoire
- réparations en infrastructure
- finitions en superstructure

## EVALUATION DES ACTIONS

- Beaucoup d'actions de type force

⇒ définies par les Normes : poids mort G  
vent

charge de service Q  
neige      entretien



- Force nécessaire pour bloquer un phénomène d'instabilité ?  
≈ 1/100 de la sollicitation de l'élément instable

- Sollicitations engendrées dans une structure par l'imperfection géométrique  $\Psi$  ?  
≈ forces horizontales  $F_j$  équivalente à  $\Psi$

$$F_j = \sum_{i=1}^n W_i \times \psi$$

## CARACTERE NON TRAUMATISANT DES TRAVAUX POUR LA STRUCTURE EXISTANTE.

Réparation : souvent substitution d éléments nouveaux aux éléments existants.

- reprise en sous œuvre => assise convenable à la superstructure
- nouveau plancher d'étage

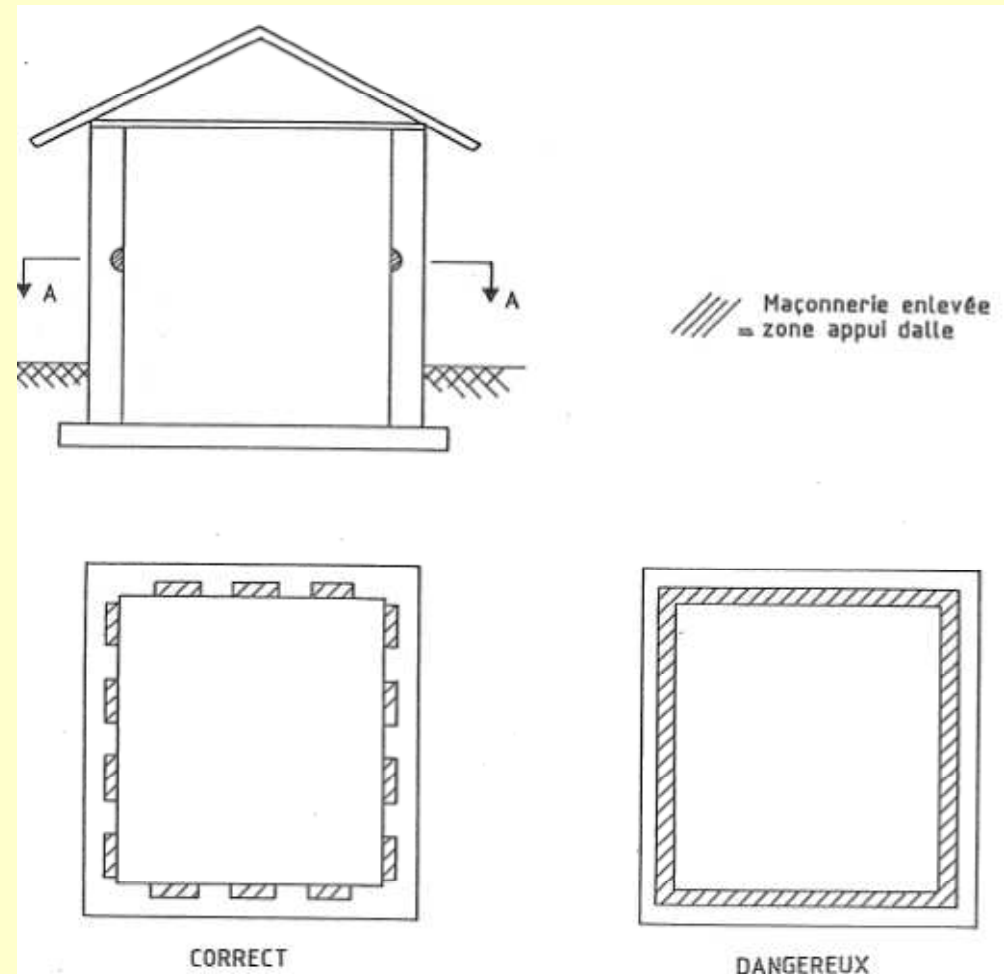
Ne pas perturber la structure existante => ≠ construction nouvelle

### Reprise en sous oeuvre

- travail en zones disjointes
- descentes de charge par les parties non enlevées ;
- report des charges sur les parties nouvelles
- mesures d'effort
- vérins plats, calages

### Dalle en béton armé dans une structure en maçonnerie

- Pas de saignées pour les surfaces d'appui de dalles
- Sinon danger
- Saignées et appuis des dalles discontinus



## **CHAPITRE 2**

### **TECHNOLOGIES ET METHODES COMMUNES AUX REPARATIONS DES DIVERS MATERIAUX.**

**ANCRAGES**

**RESINES ET MORTIERS EPOXY**

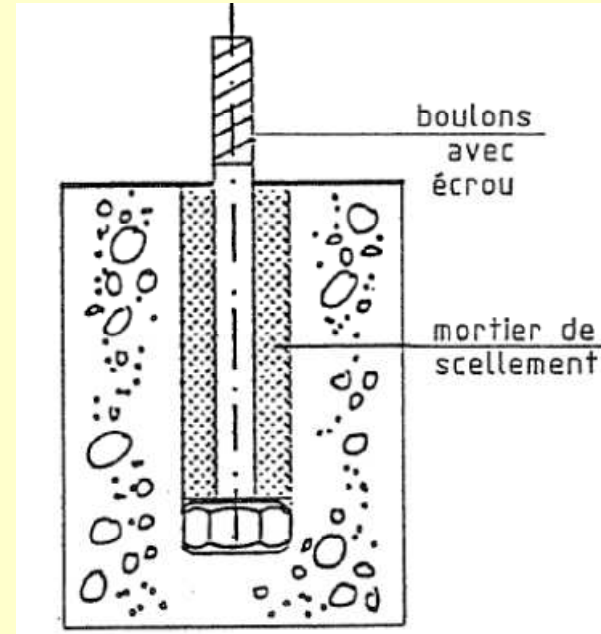
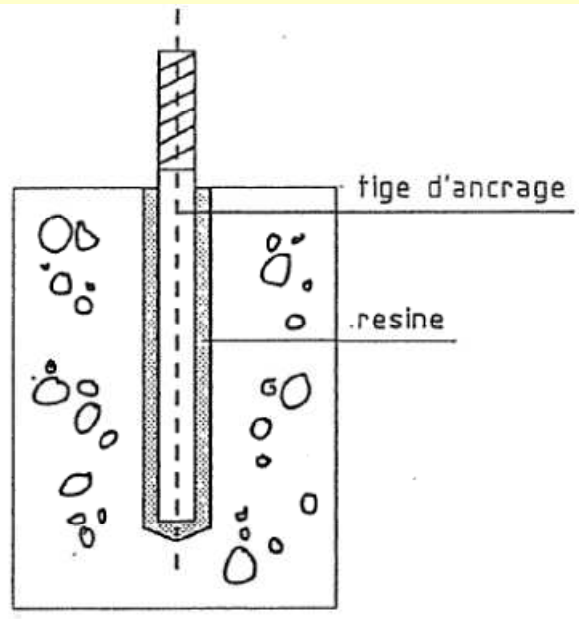
**FRETTAGE**

**REDUCTION DES PORTEES**

**BETON PROJETE**

## TECHNOLOGIES COMMUNES AUX REPARATIONS

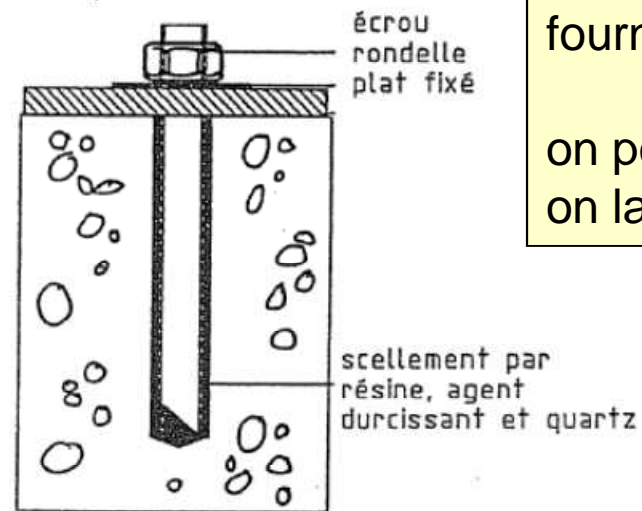
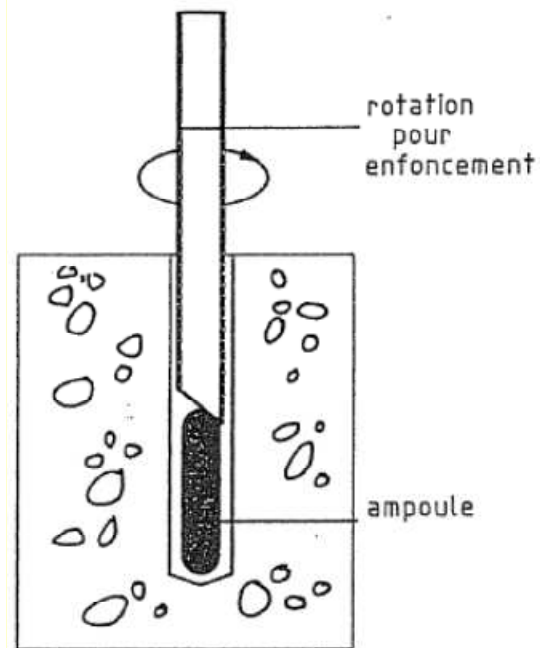
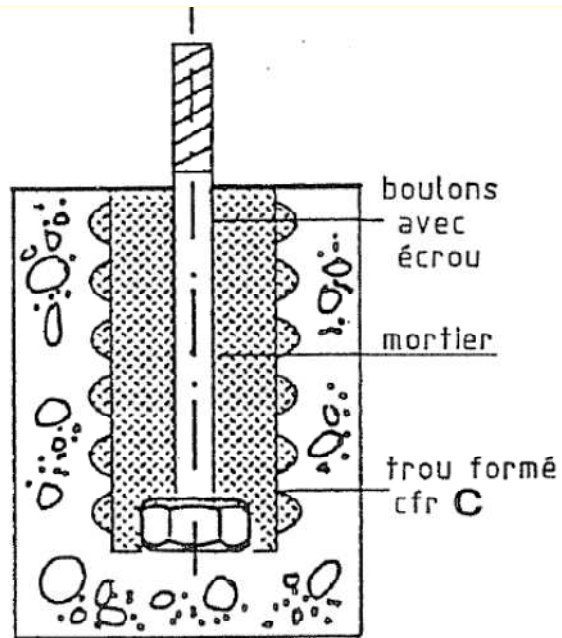
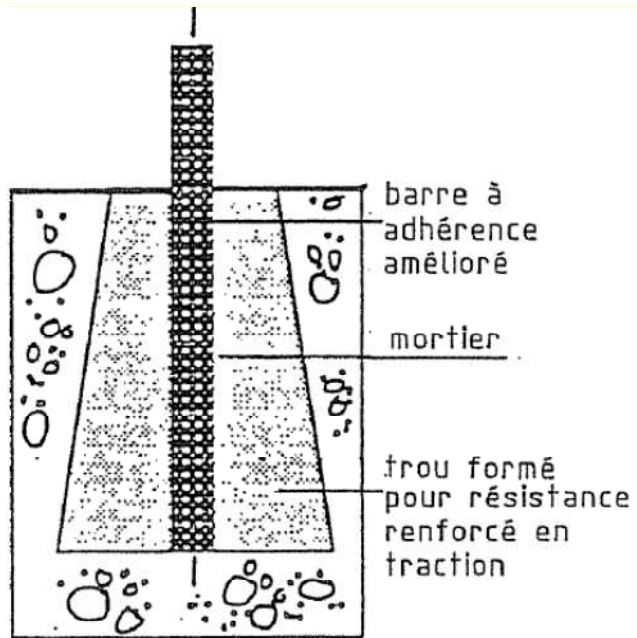
### LIAISONS ENTRE MATERIAU EN PLACE ET MATERIAU NOUVEAU TIGES SCELLEES & CHEVILLES



Tiges: ronds à bétons  
tiges filetées avec écrou  
boulons

Trous: forés nettoyés  
remplis de mortier de scellement à base de ciment Portland et de sable  
mélange préparé

Positif: mortier expansif lors de la prise  
=> contraintes de compression dans le scellement



### « Chevilles chimiques »

Mélange de scellement  
fourni dans une ampoule

on pousse l'ampoule au fond du trou  
on la rompt par la tige de scellement

## Chevilles mécaniques - Technologie

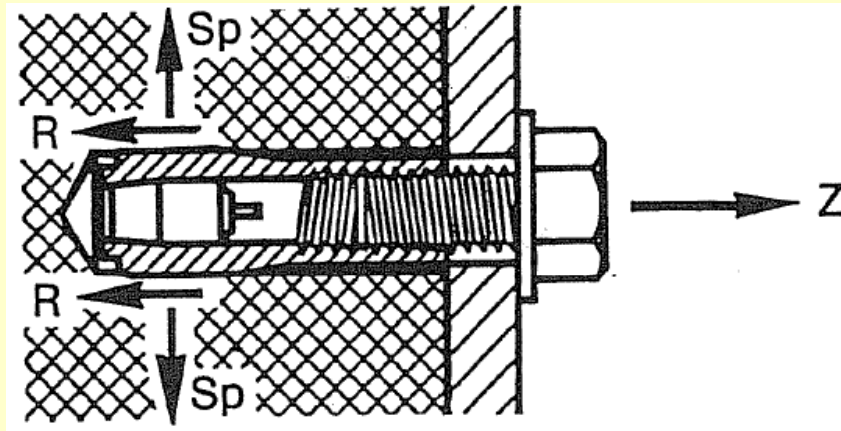
Trous forés

Tiges combinées à des éléments mobiles

Vissage ou enfoncement d'un cône => force d'expansion  $S_p$

=> coincement des éléments mobiles

Charge axiale transmise par frottement  $R$  fonction de  $S_p$



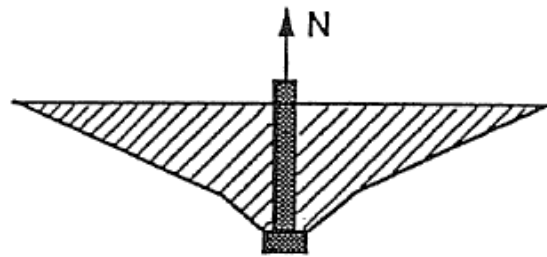
Note: réduction de  $S_p$  avec le temps (relaxation)



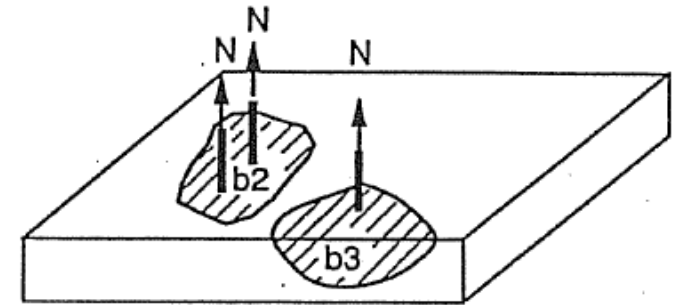
## Modes de ruine des tiges scellées et des chevilles

### En traction

- la tige en traction

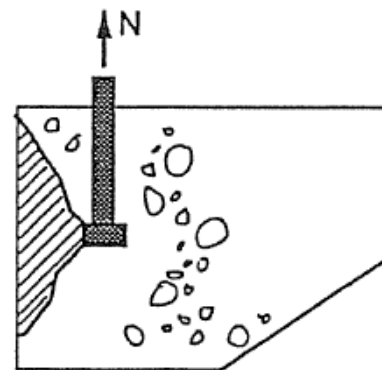


arrachement d'un cône de béton

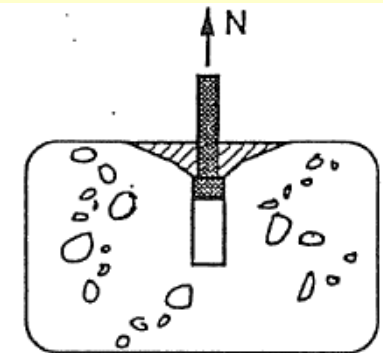


b2.-arrachement d'un groupe d'ancrage  
b3.-arrachement de bord

- le matériau d'implantation en traction
  - sur une surface d'arrachement conique dans le cas d'un ancrage isolé
  - sur toute une zone du matériau d'implantation incluant plusieurs ancrages tendus
- éclatement du béton transversal, si le scellement est proche d'un bord libre
- ruine du scellement et glissement de la tige hors du trou
- éclatement en surface.



éclatement latéral



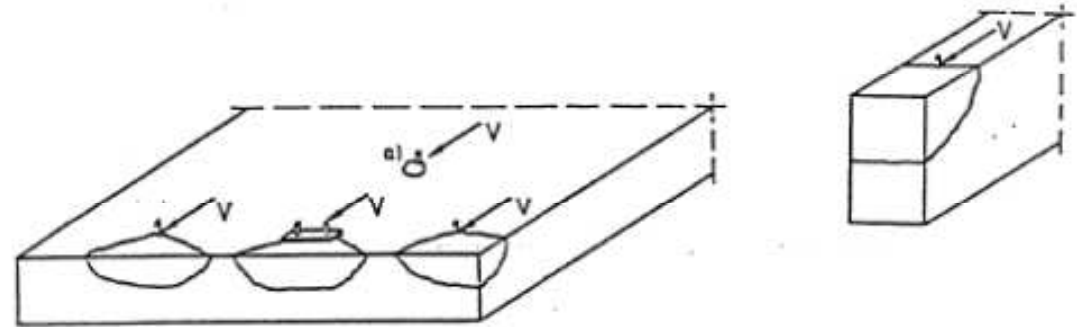
arrachement

# Modes de ruine des tiges scellées et des chevilles

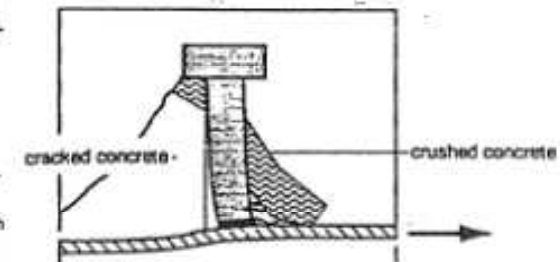
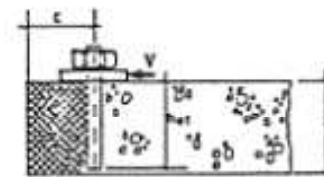
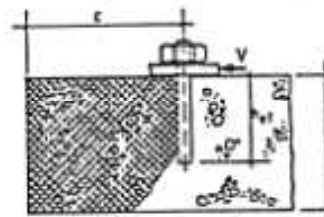
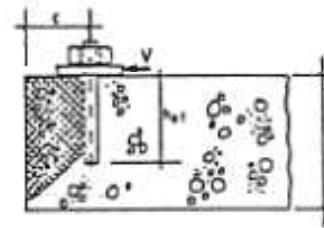
## En cisaillement

- la tige en cisaillement
- écrasement du matériau support près de la surface éventuellement suivi de fissuration au bout de l'ancrage extraction de l'ancrage arrachement de matière
- près des bords surface de moindre résistance

a) écrasement du béton



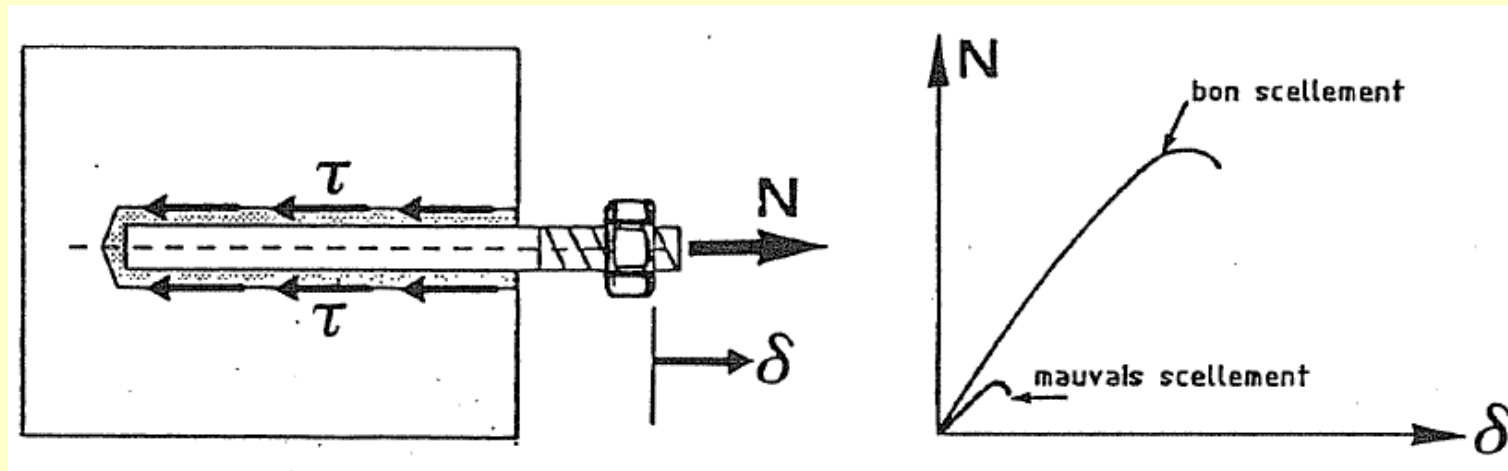
b) arrachement d'un volume de béton



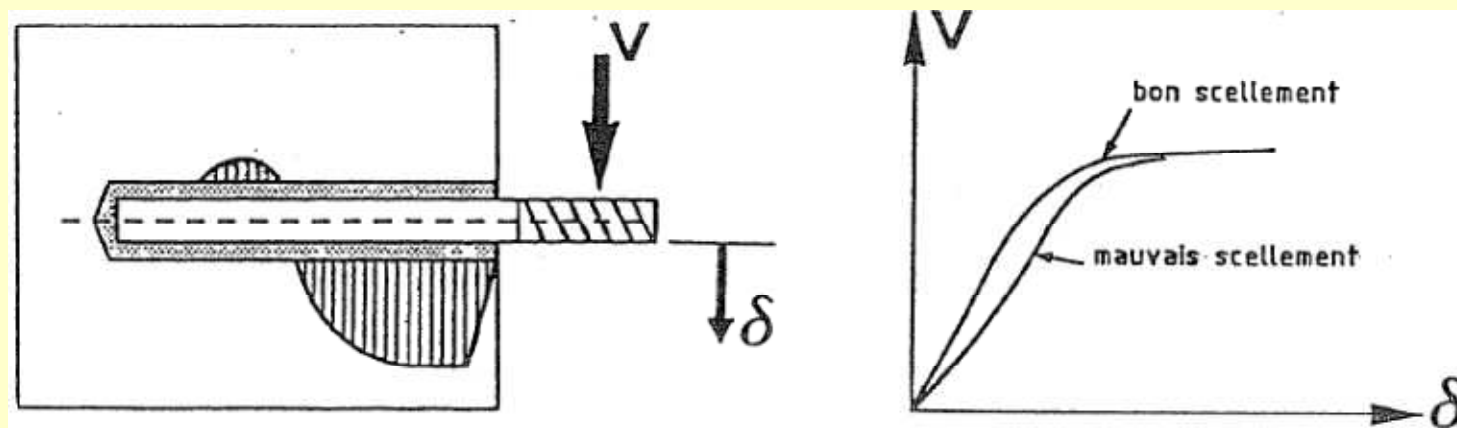
c) écrasement du béton et extraction de l'ancrage

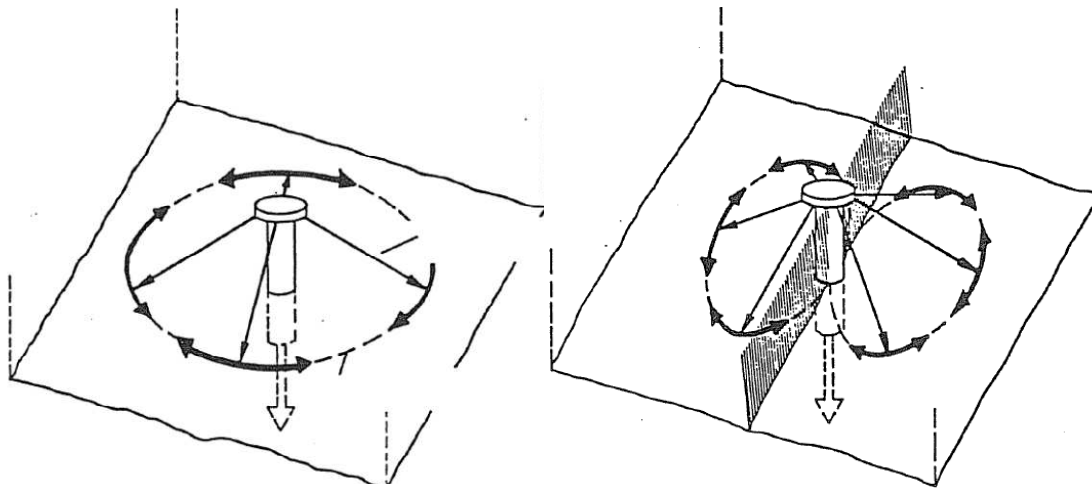
## Différence de comportement des tiges scellées en traction et en cisaillement

**Traction: résistance dépendante** du scellement



**Cisaillement: résistance indépendante** du scellement => préférer cette solution



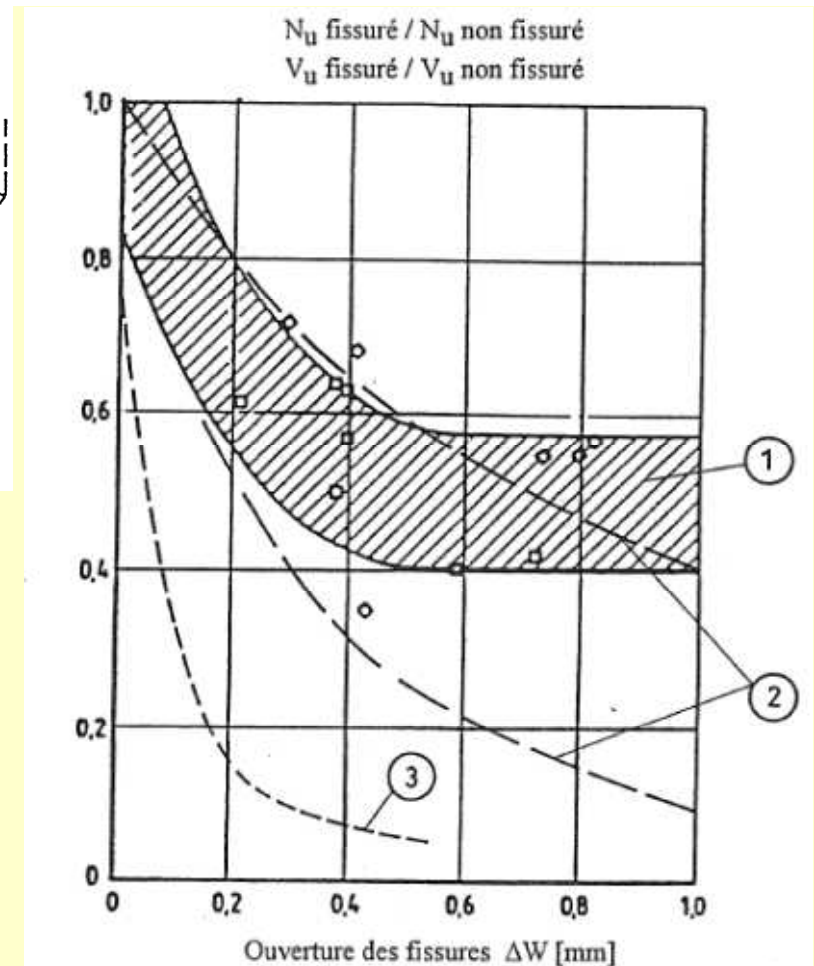


a) béton non fissuré

b) béton fissuré.

## Paramètres influençant la résistance des ancrages

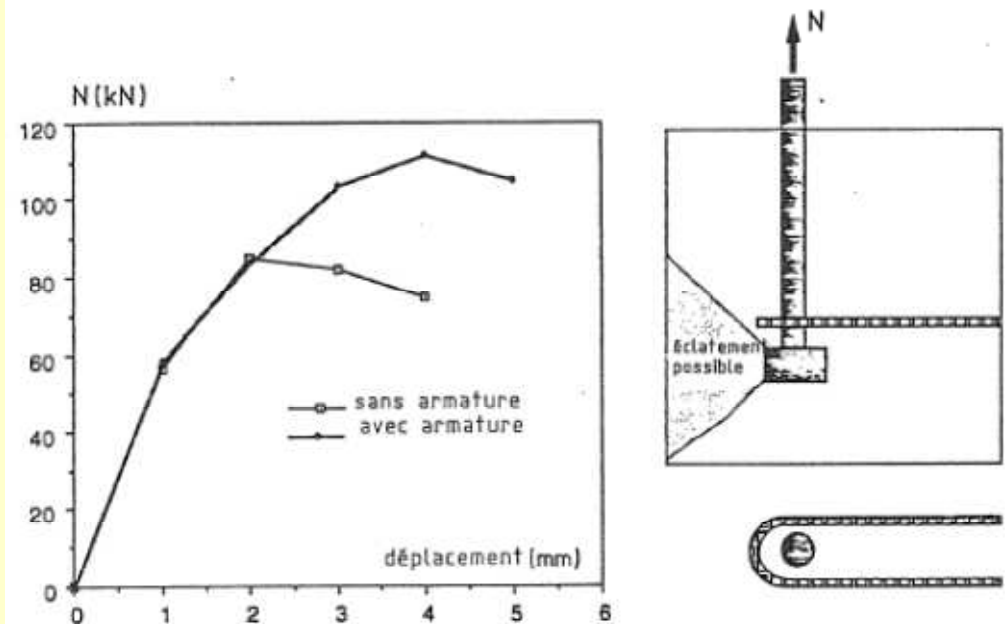
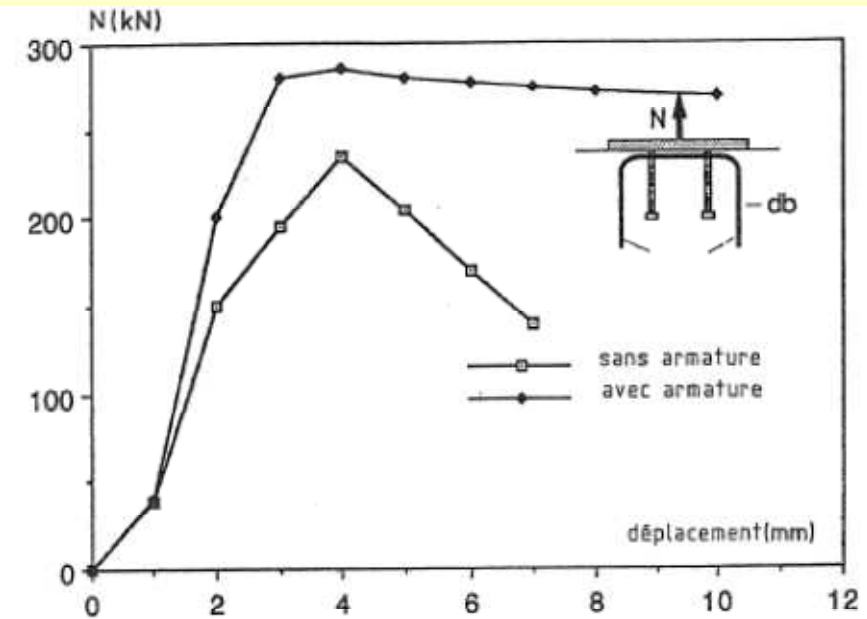
- Nature du matériau d'implantation  
béton, maçonnerie
- Résistance du matériau d'implantation  
(cfr. arrachement conique  
suivant contraintes principales de traction)
- Etat du matériau d'implantation :  
fissuration => réduction par 0,6 à 0,2
- Direction de la force appliquée
- Nature de la force appliquée  
statique  
fatigue  
choc



- 1) *ancrages avec tête ou chevilles en traction ou cisaillement*
- 2) *tige scellée simple en traction*
- 3) *limite inférieure ancrage cloué en traction*

## Paramètres influençant la résistance des ancrages

- Profondeur d'implantation  
cône d'arrachement
- Entredistance des ancrages
- Distance à un bord libre
- Présence d'armatures  
augmente la résistance de 30 % ≈
- Environnement  
corrosion  
humidité  
feu



## Tiges scellées & chevilles mécaniques: des inconvénients

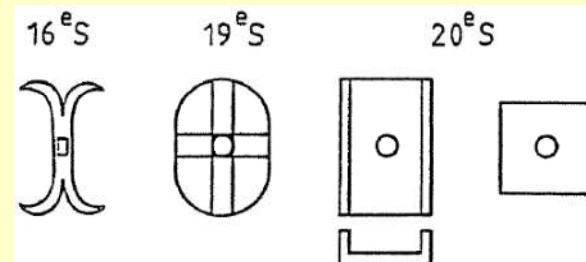
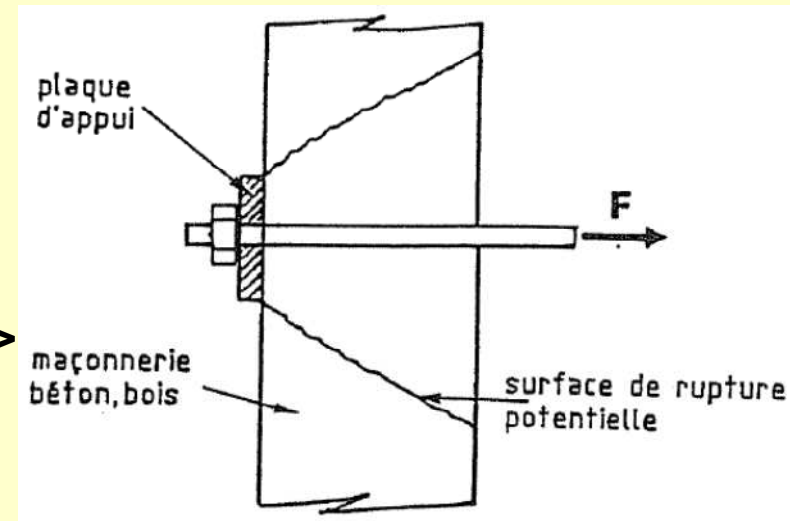
- Qualité dépendante de l'exécution (tige scellée tendue)
- Résistance en traction éventuellement insuffisante  
maçonnerie, mauvais bétons
- Incertitude sur la tenue dans le temps
- Coût : mortier, mise en oeuvre du mortier, fourniture des chevilles
- Disponibilité des produits

## Tiges traversantes et reprises à l'arrière

Inconvénients des scellement évités

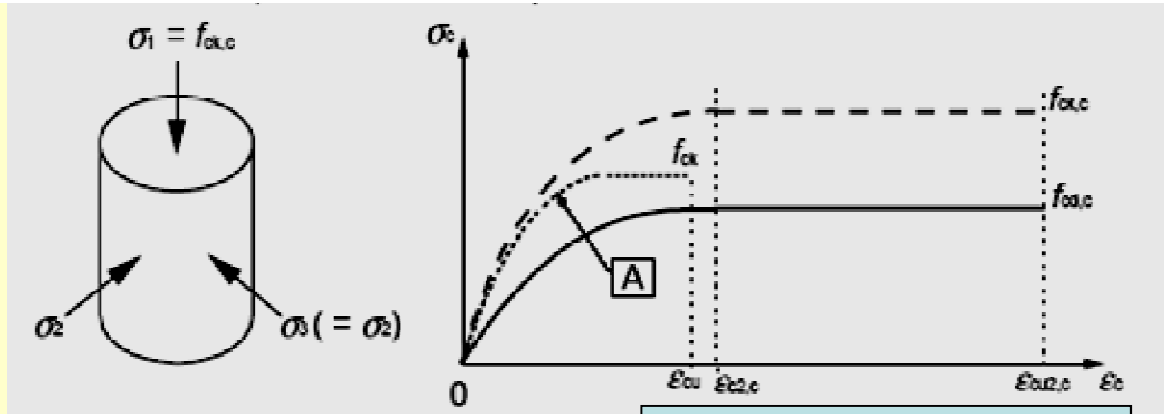
=> forage de part en part  
tige traversante  
plaque d'appui

- Surface de rupture potentielle en traction >>
- Pas d'incertitudes  
matériau existant  
qualité d'exécution
- Eléments peu coûteux et aisément disponibles



## FRETTAGE

- Matériau comprimé:  
expansion latérale  
effet Poisson  
conservation du volume



- Frettage = réduire l'expansion transversale  $\epsilon_2$  et  $\epsilon_3$   
Frettage parfait :  $\epsilon_2 = \epsilon_3 = 0$

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} \frac{(1+\eta)(1-2\eta)}{1-\eta}$$

Coefficient de Poisson  $\eta = 0,3$  (béton)

$$\Rightarrow \epsilon_1 = 0,6 \frac{\sigma_1}{E}$$

$f_{ck}$ , non confiné	courbe A
$f_{ck,c}$	= confiné

- Rupture par écrasement pour  $\epsilon_1 = \epsilon_{\text{écrasement}}$  inchangé

$$\sigma_{1,\text{comp,rupture,non fretté}} = 1,66 \sigma_{1,\text{comp,rupture,fretté}} \Rightarrow \text{résistance relevée par 1,66}$$

- Béton confiné par armature transversale

$\Rightarrow \epsilon_{cu2}$  relevé par 2 à 4

- Eurocode 2:  $\epsilon_{cu2,c} = \epsilon_{cu2} + 0,2 \sigma_2 / f_{ck} = 0,0035 + 0,1 \alpha \omega_{wd}$

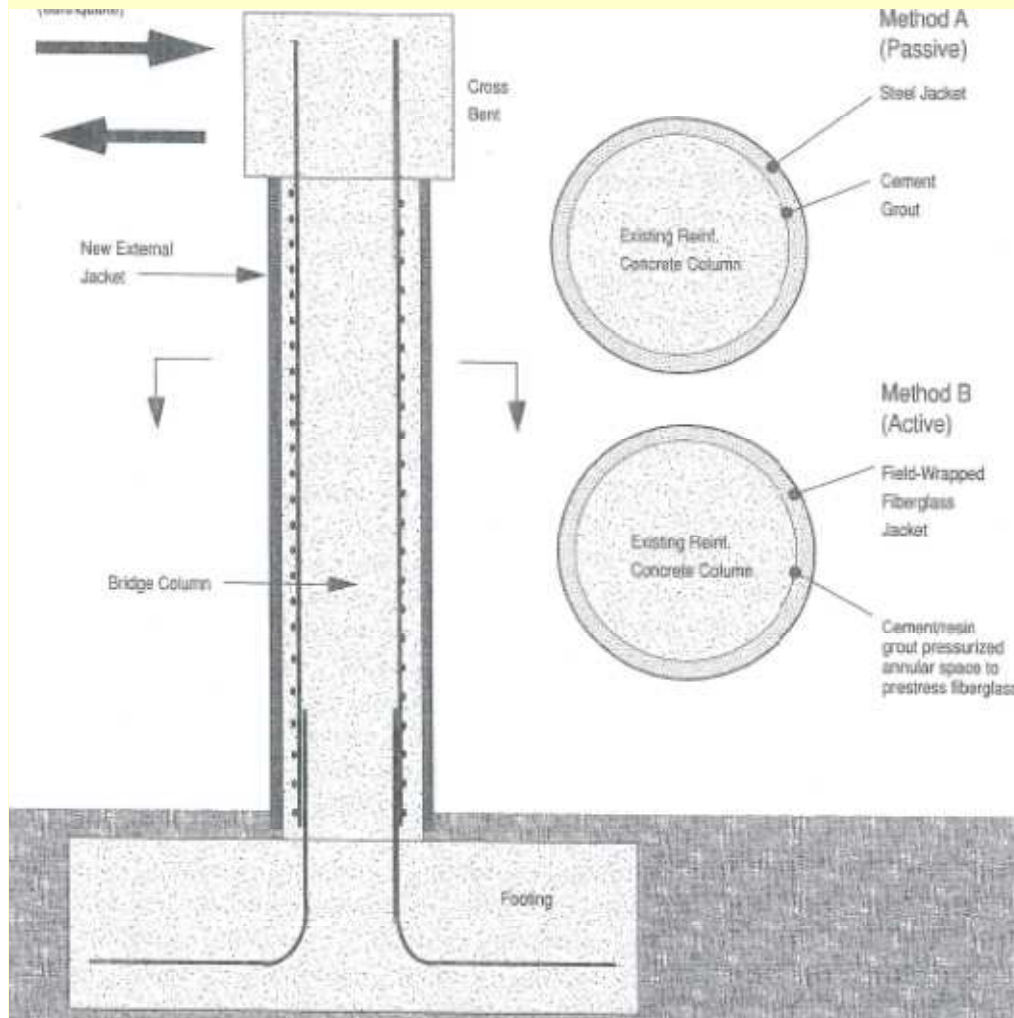
$\omega_{wd}$  rapport mécanique en volume des armatures de confinement

$\alpha$  coefficient d'efficacité du confinement.

$\Rightarrow$  Confinement = technique de renforcement (matériaux tous types, en compression)

## Application du frettage

### Renforcement d'une pile de pont par confinement ou « jacketing »



#### Méthode A

- Tube métallique « jacket »
- Mortier de ciment  
ou  
Résine injectée sous pression

#### Méthode B

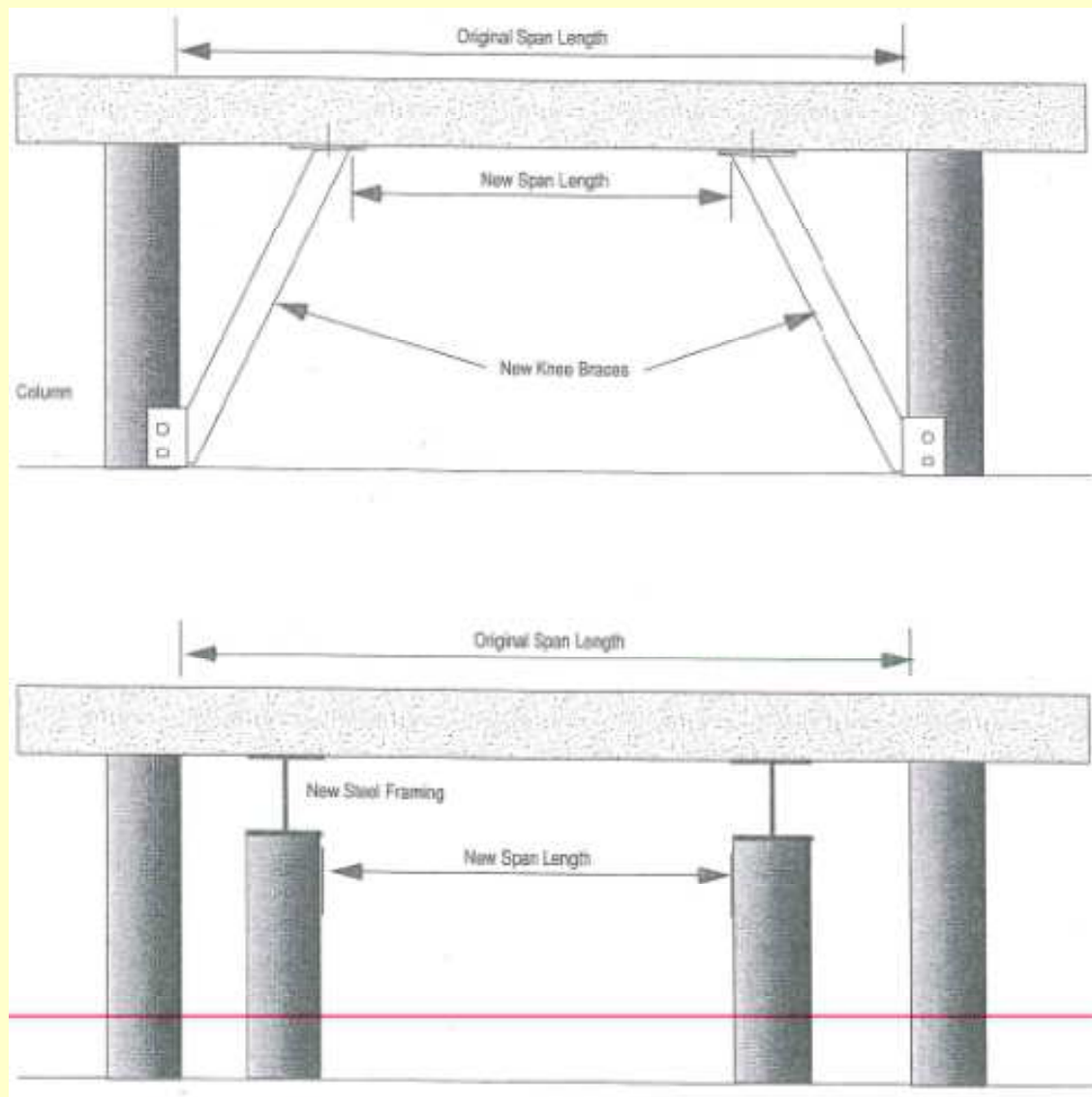
- Bandage par tissu de fibre  
verre, carbone
- Résine injectée sous pression
- Augmentation de la résistance du béton
- Résistance armatures acier inchangée
- Passage de ruine « béton » fragile  
à  
ruine « acier » ductile
- Augmentation de résistance  
en flexion-compression
- Augmentation de ductilité



## RESINES ET MORTIER EPOXY. Caractéristiques mécaniques

	<b>Système résine</b>	<b>Mortier de résine</b>
<b>Résistance en compression <math>f_{rs,c}</math></b>	<b>100 MPa( 50 - 150)</b>	<b>0,75 <math>f_{rs,c}</math></b>
<b>Résistance en traction pure <math>f_{rs,t}</math></b>	<b><math>f_{rs,t} \approx f_{rs,c}</math></b>	<b>0,50 <math>f_{rs,t}</math></b>
<b>Résistance en traction et flexion</b>	<b>0,50 <math>f_{rs,c}</math></b>	<b>0,50 <math>f_{rs,m}</math></b>
<b>Retrait (en petit volume)</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>Fluage en petit volume</b>	<b>Comme les mortiers de ciment normaux</b>	
<b>Module E</b>	<p><b>Résine: 500 MPa</b>  <b>Mortier: 30000 MPa</b>  selon le type de résine, durcisseur, charge,  selon les proportions.  <b>Ordre de grandeur :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● résines d'injection            <b>E = 1000 à 2000</b></li> <li>● résines à but général        <b>E = 2000 à 4000</b></li> </ul> <p><b>Beaucoup + déformable que les matériaux injectés</b>  <b>⇒ injection d'epoxy pour les fines fissures seulement (≈1mm)</b></p>	

## Réduction de la portée des éléments => Réduction des sollicitations



## **CHAPITRE 3**

### **REPARATION DES CONSTRUCTIONS EN BETON.**

# TRANSFERT DE FORCE A L'INTERFACE BETON EXISTANT-BETON NOUVEAU

## Compression

Conditions pour un transfert similaire au béton homogène :  
un bon engrènement béton ancien – béton nouveau

=> bon état de surface du béton existant :

- propreté, absence de déchets, poussière, huile, graisse.
- rugosité améliorée par brossage, burinage, ... => agrégats bruts.
- humidification, saturation en eau plusieurs heures avant placement du nouveau béton

Placement du nouveau béton:

pression de 0,05 à 0,1MPa

ou préparation de surface

fine couche de produit adhésif de cure à froid (Ex: résine epoxy)  
sur surface sèche juste avant mise en place du nouveau béton

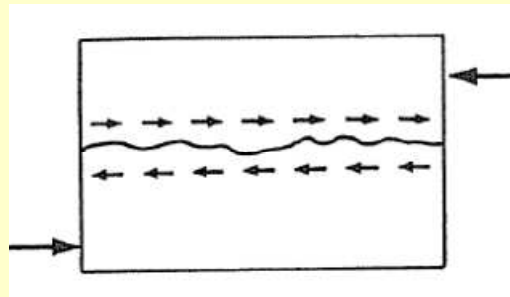
=> Résistance du béton réparé = résistance des deux bétons présents

Sinon écrasement de béton à l'interface

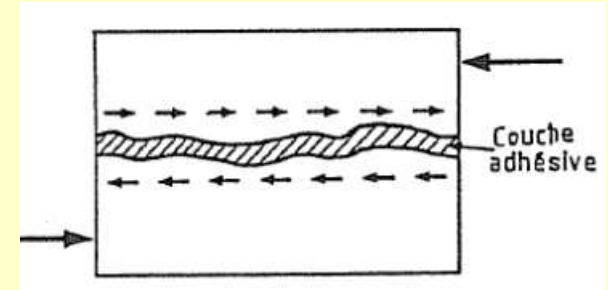
# Transferts de force à l'interface béton existant - béton nouveau

## Cisaillement

- Par adhésion chimique

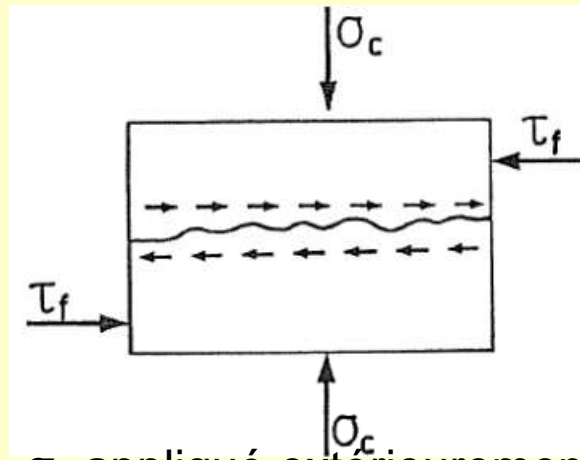


béton – béton

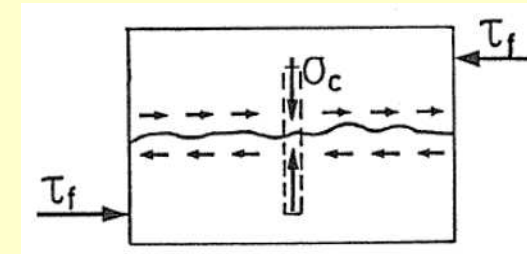


béton-résine-béton

- Par frottement béton-béton

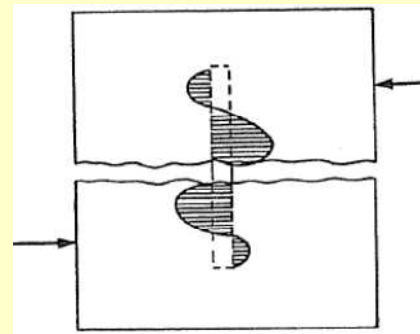


$\sigma_c$  appliqué extérieurement

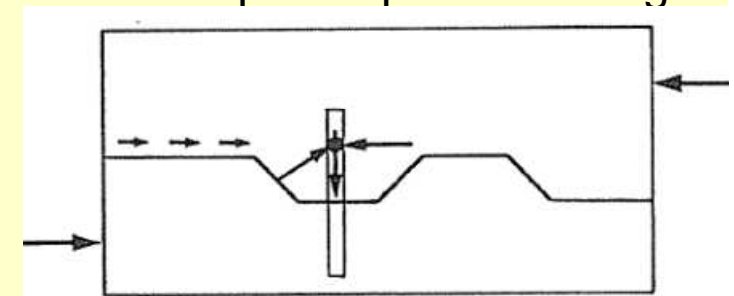


$\sigma_c$  résulte de l'écartement empêché par le clamage

- Par ancrage ou cheville



sans force d'interface



avec indentation  
transfert par bielle-tirant

# TRANSFERT DE FORCE A L'INTERFACE BETON EXISTANT-BETON NOUVEAU

## Résistance au cisaillement

### Adhésion entre béton existant et nouveau béton

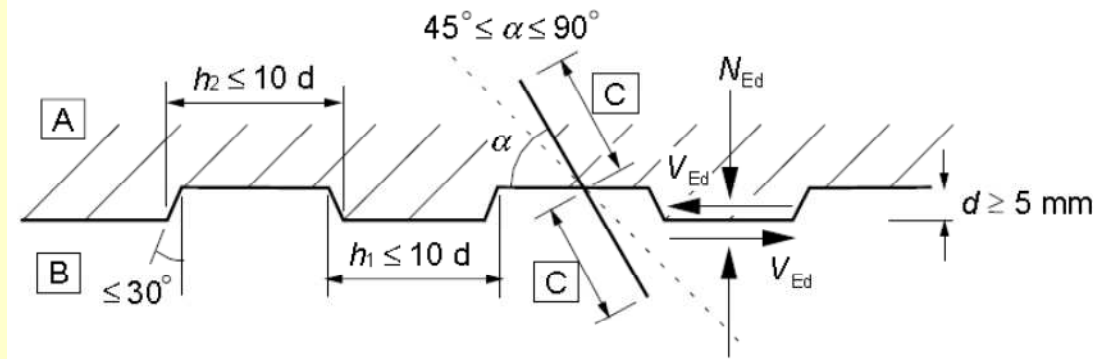
- Adhésion chimique => résistance au cisaillement:
  - $0,25 f_{ctk}$  sans préparation particulière
  - $0,75 f_{ctk}$  si la surface est rendue rugueuse
  - $1,00 f_{ctk}$  avec produit adhésif de préparation ou un béton projeté.
- Résistance au cisaillement par adhésion béton-béton:
  - faible, pour charges purement statiques, sans cycles de charge
  - pas additionnable aux résistances au cisaillement pouvant impliquer des déplacements relatifs des bords de l'interface: frottement, goujons, armatures

### Résistance au cisaillement au travers d'une couche adhésive

- Adhésif : résine à deux composants et durcisseur  
Epoxy : les meilleures liaisons, résistance et stabilité dimensionnelle
- Résistance finale influencée négativement par moisissures,  $t^{\circ}$  élevées  
Utile pour: fissures inactives, durabilité, restauration de l'intégrité structurale  
Inutile pour: fissures actives
- Fissures de 0,1 mm à 3 mm
- Résistance du joint au cisaillement >> résistance du béton au cisaillement
- Résistance en traction =  $f_{ct}$
- Force d'adhésion conservée en cas de déplacement relatif des bords de l'interface
- Résistance combinable à la résistance par frottement, ancrages scellés ou chevillés

## Résistance au cisaillement à un interface béton-béton selon Eurocode 2

$$v_{Edi} = \beta V_{Ed} / (z b_i) \leq v_{Rdi} = c \cdot f_{ctd} + \mu \cdot \sigma_n + \rho f_{yd} (\mu \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0,5 v f_{cd}$$



$v_{Edi}$  contrainte de cisaillement

$v_{Rdi}$  résistance au cisaillement

$\beta = N_{\text{béton de reprise}} / N_{\text{total zone comprimée}}$

$V_{Ed}$  effort tranchant transversal à la surface de reprise

$z$  bras de levier des efforts internes

$b_i$  largeur de l'interface

$\mu$  frottement

$\sigma_n$  contrainte normale min simultanée à  $V_{Ed}$

$\rho = A_s / A_c$   $A_s$  acier traversant l'interface

$A_c$  aire du joint de reprise

$\alpha$  inclinaison de l'armature

$v$  coefficient de réduction de  $f_{cd}$

Pas d'armature si:  $v_{Ed} < c f_{ctd} + \mu \sigma_n$

Charges dynamiques, fatigue :  $c/2$

Type de surface	c	$\mu$
Très lisse (acier, plastique, bois)	0,25	0,5
Lisse Béton, coffrages glissants, surface non coffrée sans traitement ultérieur	0,35	0,6
Rugueuse Aspérités >3mm espacées de 40mm obtenues par striage ou lavage direct	0,45	0,7
Lisse ou rugueux si risque de joint très fissuré	0,00	0,6
Avec indentations comme à la Figure sans ou avec risque de joint très fissuré	0,50	0,9

# REPARATIONS DU BETON ARME A L'AIDE D'ARMATURES POUR BETON ARME

## Précaution initiale

Armatures existantes : décapage et brossage

Si milieu corrosif ou enrobage insuffisant : passivation

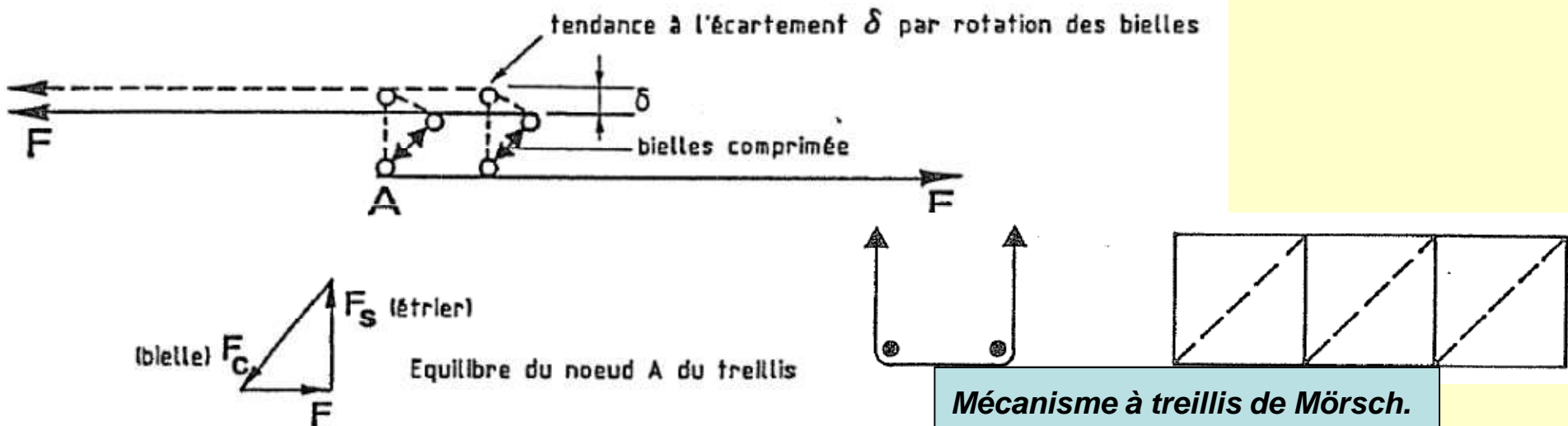
## Transfert d'effort des armatures existantes vers les armatures complémentaires

- par recouvrements géométriques ligaturés ou non  
respecter des longueurs min de recouvrement
- par soudure en recouvrement Soudures bout à bout déconseillées
- par manchonnage : manchon soudé, serti, vissé, collé...

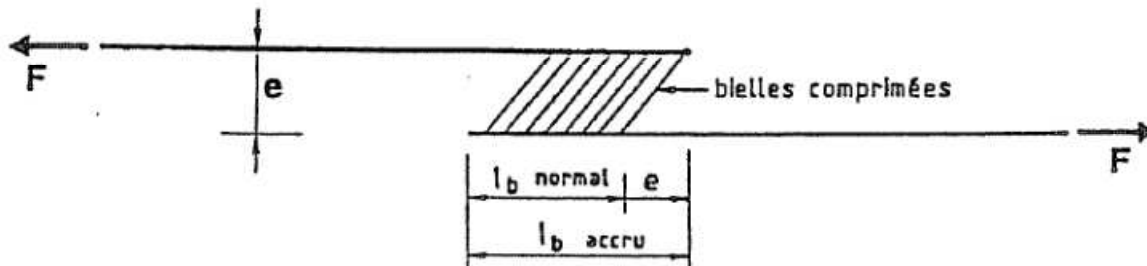
Rappel : des armatures transversales « couture » ancrées dans la structure existante pour la traction qui équilibre la compression des bielles de béton  
= effort transféré dans le recouvrement d'armatures

### *Mécanisme bielle-tirants*

### *Transfert de force par recouvrement géométrique*

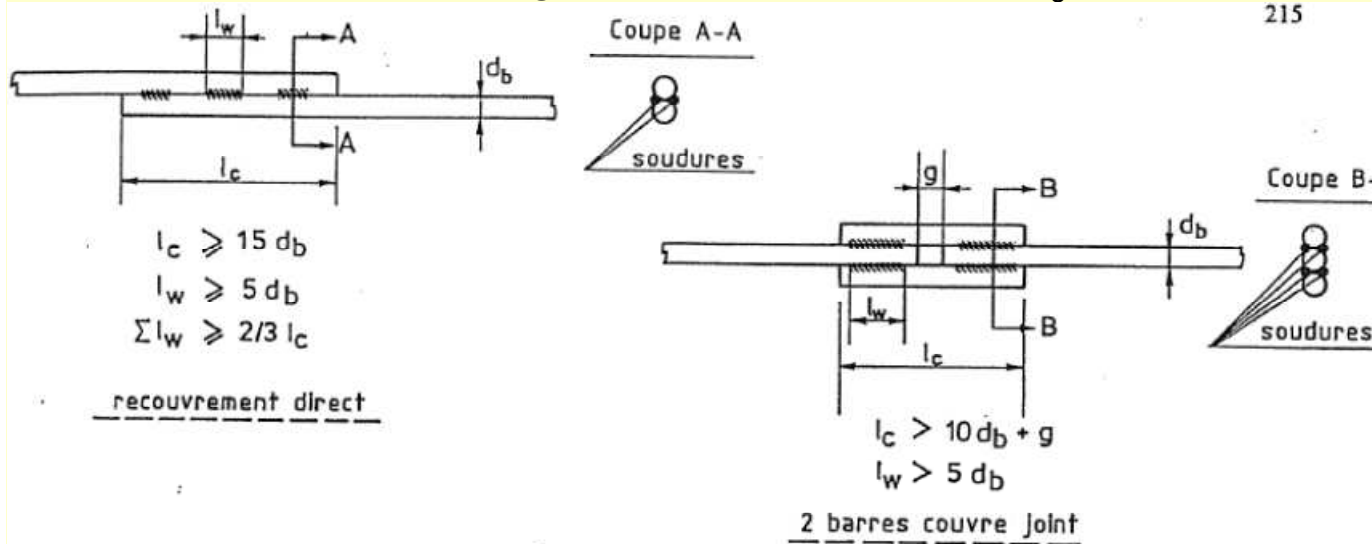




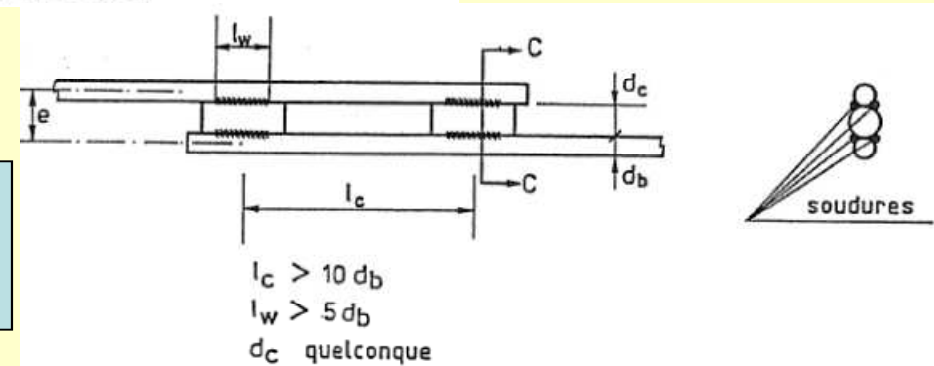


**Longueur de recouvrement en cas de barres écartées de e**

- Jointes soudés:
- aciers soudables
  - surfaces à souder nettoyées par meulage
  - assemblages par cordon d'angle car soudure bout à bout difficile
  - longueur de recouvrement  $l_c$



**Si écart e entre axes des barres: moment de flexion résultant de e contre balancé en allongeant l'assemblage**

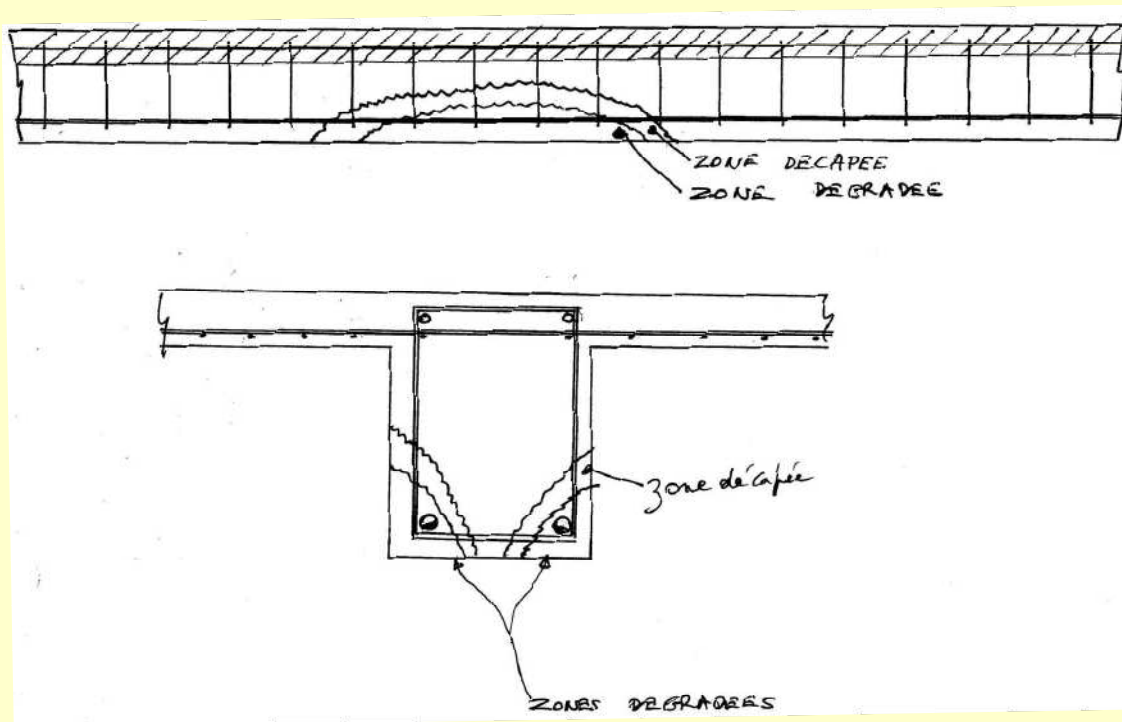


## Ancrage des armatures complémentaires

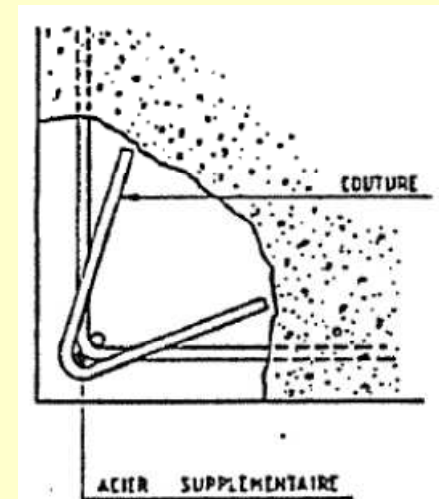
### A. Ancrage par recouvrement avec les armatures existantes

#### Mise en œuvre

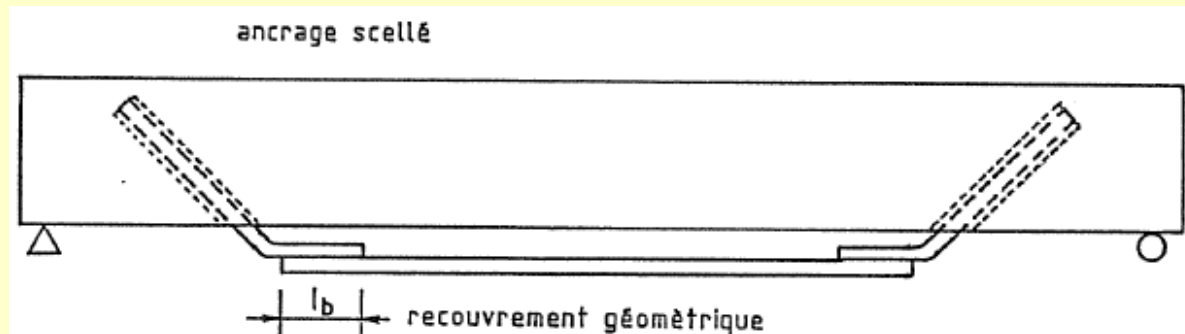
- Enlèvement du béton dégradé, de la rouille mal fixée, etc...
- Enlèvement du béton sain pour dégager des longueurs d'armature existante saine suffisante pour réaliser les longueurs de recouvrement requises  
armature longitudinales & transversales
- Mise en place des armatures longitudinales additionnelles
- Mise en place des armatures transversales « coutures »



! Profil de la découpe perpendiculaire aux faces extérieures



## B. Ancrage direct. Scellement dans le béton sain



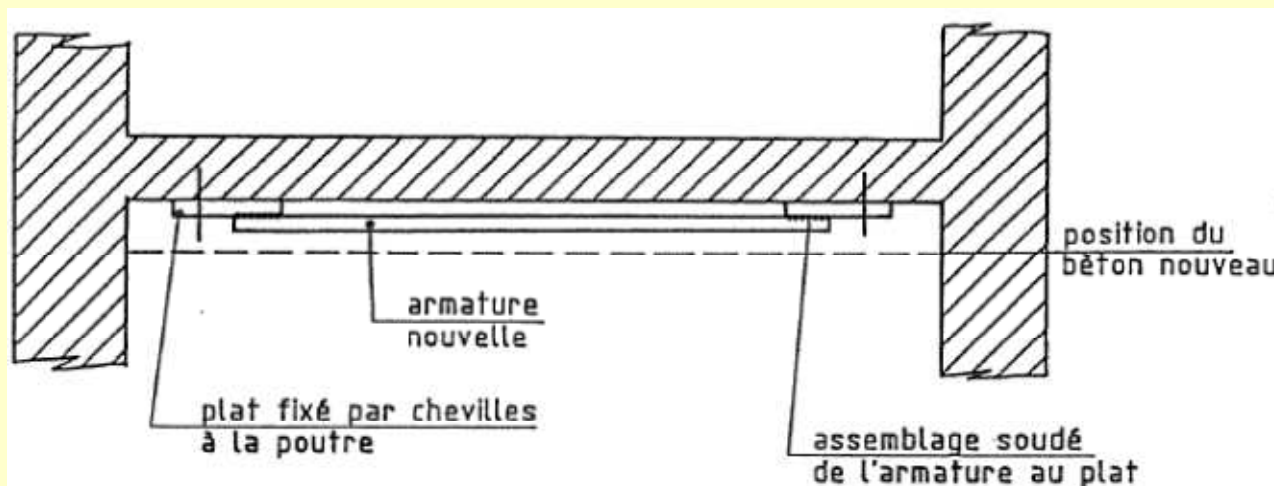
Dimensionnement du scellement fonction

du produit utilisé: mortier hydraulique, résines, chevilles chimiques  
de l'effort à transmettre

Mortier coulé dans un trou foré et nettoyé  $\Phi_{\text{trou}} \approx \Phi_{\text{barre}} + 2\text{mm}$

## C. Ancrage indirect = via chevilles...

- Plats ou profilés métalliques fixés à l'aide de chevilles ou d'ancrages scellés
- Assemblage de l'armature par soudage sur les plats ou profils



## Réparations des constructions en béton armé à l'aide d'armatures classiques

Qualité atteinte si:

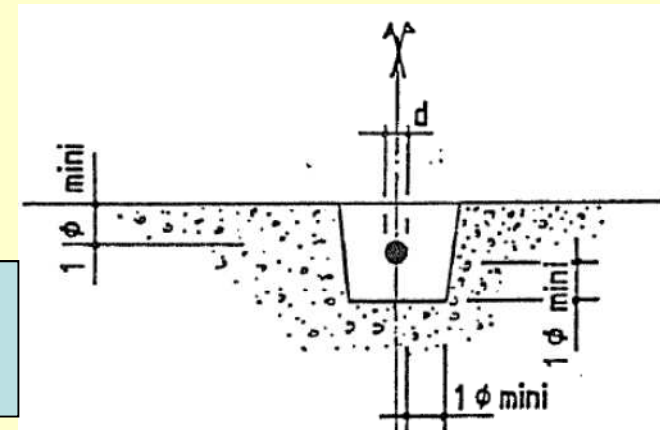
- ▶ Des **mortiers spéciaux de scellement** assurent l'ancrage des armatures de liaison
  - propriété recherchée : faible retrait
  - retrait 3 trois phénomènes : exsudation, retrait plastique, retrait hygrométrique
  - mortiers de résine : réduisent exsudation
  - effets de retrait hygrométrique
  - autre possibilités : bloquer la phase d'expansion par un coffrage rigide, des armatures métalliques et une forte rugosité de la surface ancienne
  - => retrait= expansion initiale = décompression
  - => peu de risque de glissement relatif
  
- ▶ Des **systèmes de fixation** : cheville, tiges scellées
  - précontrainte de l'interface entre bétons
  - résistances au cisaillement par
    - adhésion
    - + par frottement
    - + goujons connecteurs

## Exemples de dispositions d'armatures complémentaires

### Dalles

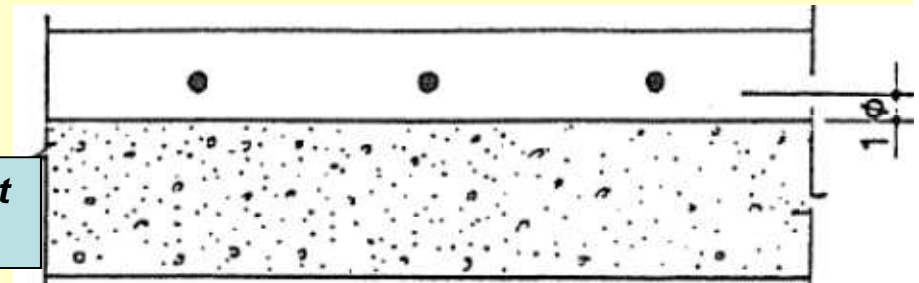
- Dans une engravure

*Résistance à l'effort rasant  
adhésion + frottement  
(effort vertical = poids chape)*

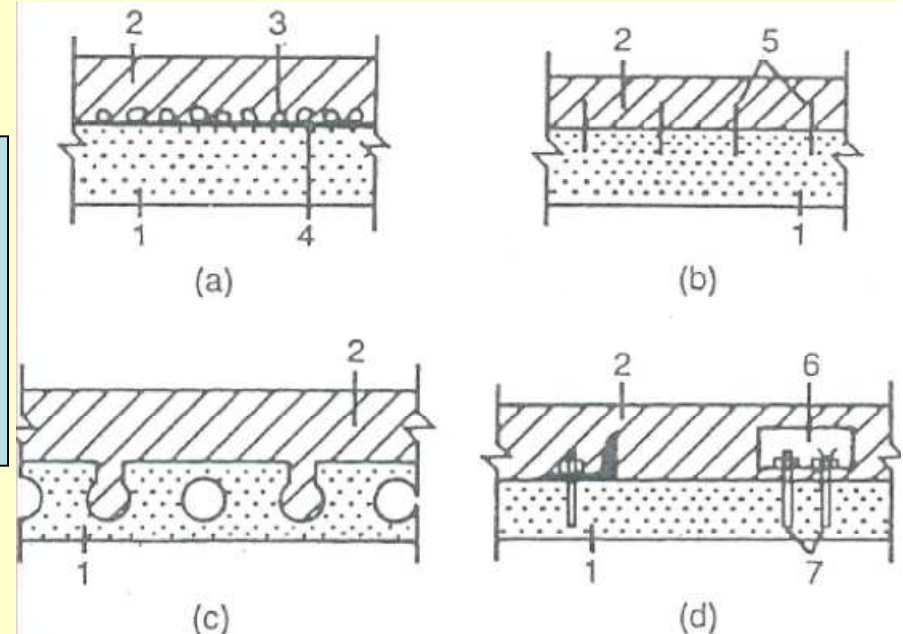


- Dans une surépaisseur de section

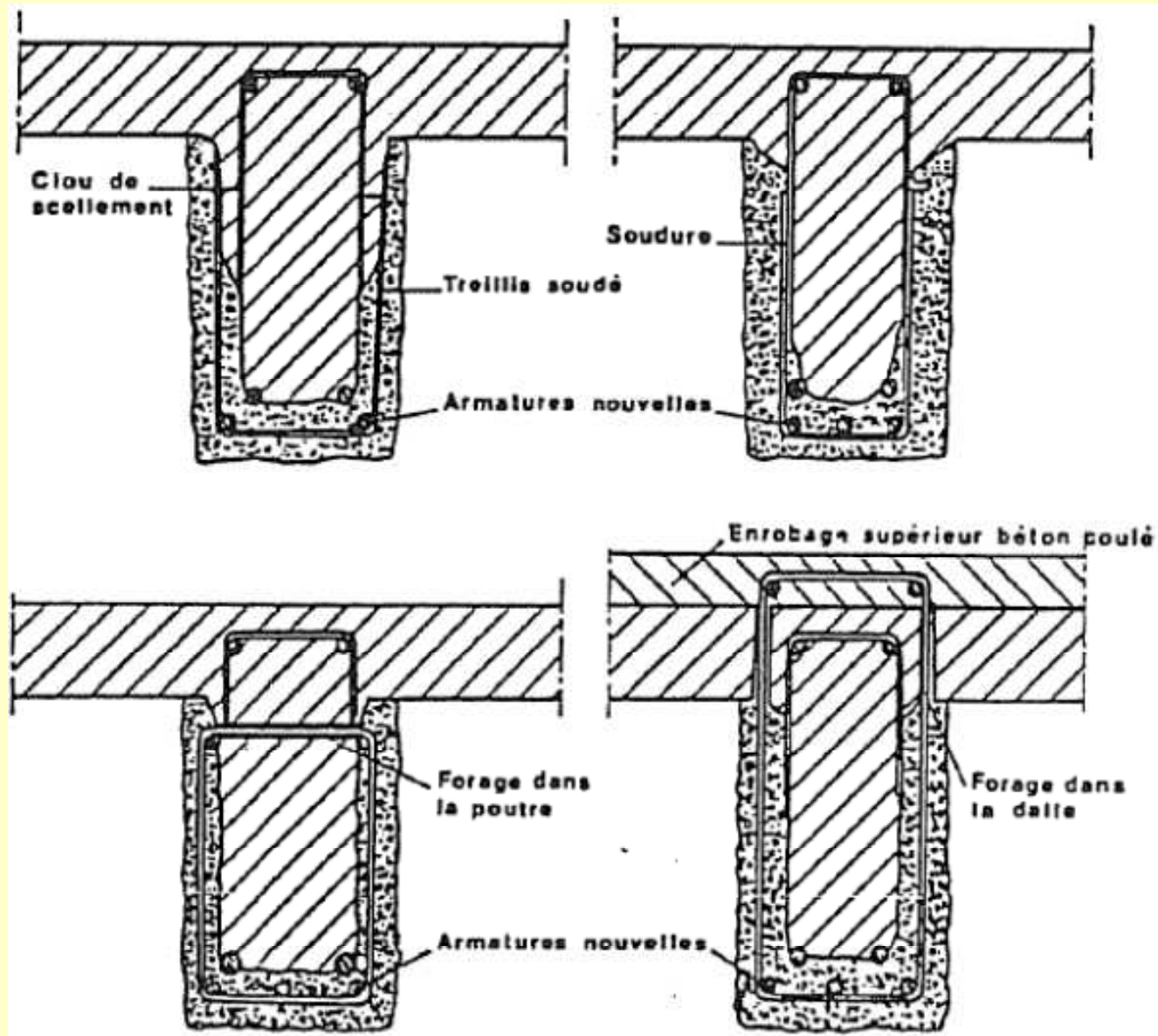
*Résistance à l'effort rasant  
adhérence béton -béton*



*Résistance à l'effort rasant améliorée par:*  
(a) *adhérence améliorée*  
*grains de sables collés à l'époxy*  
(b) *goujons ou chevilles*  
(c) « *goujons de béton* »  
(d) *cornière chevillées*

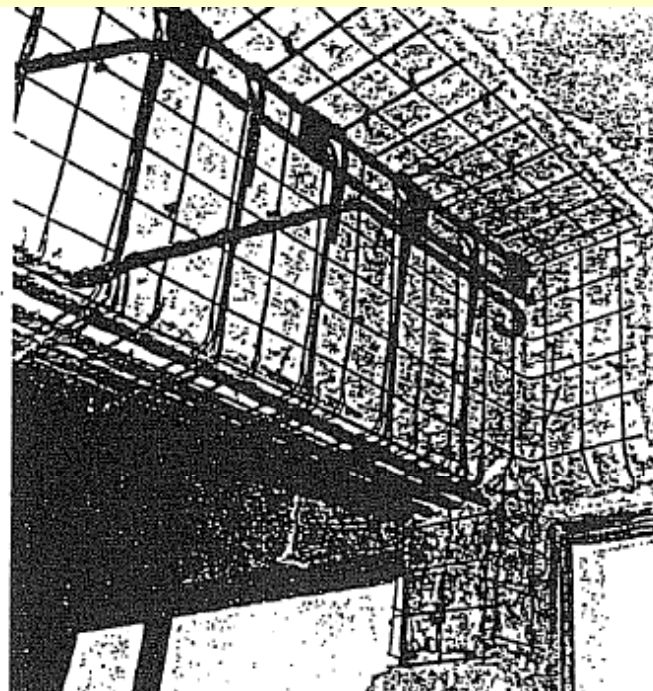


## Armatures supplémentaires en surépaisseur de poutre

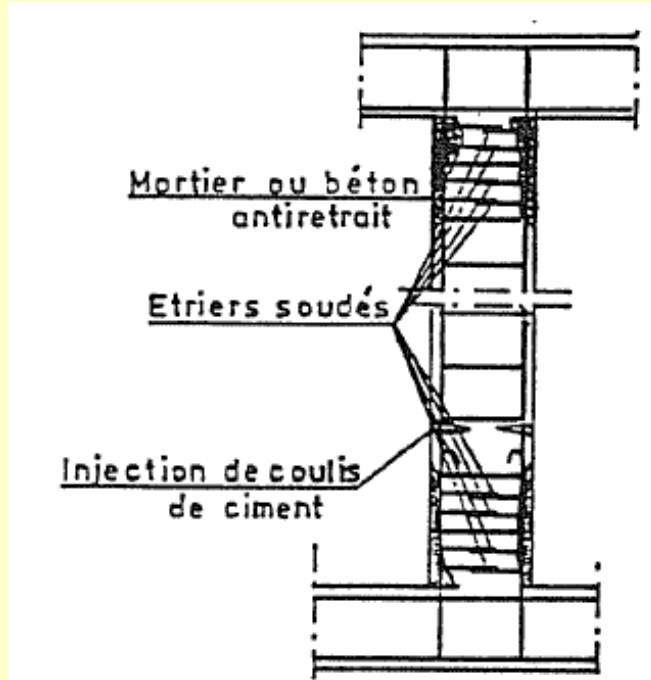


Attention: toujours transmettre l'effort tranchant correspondant à l'effort normal repris par l'armature longitudinale nouvelle = penser « coutures »

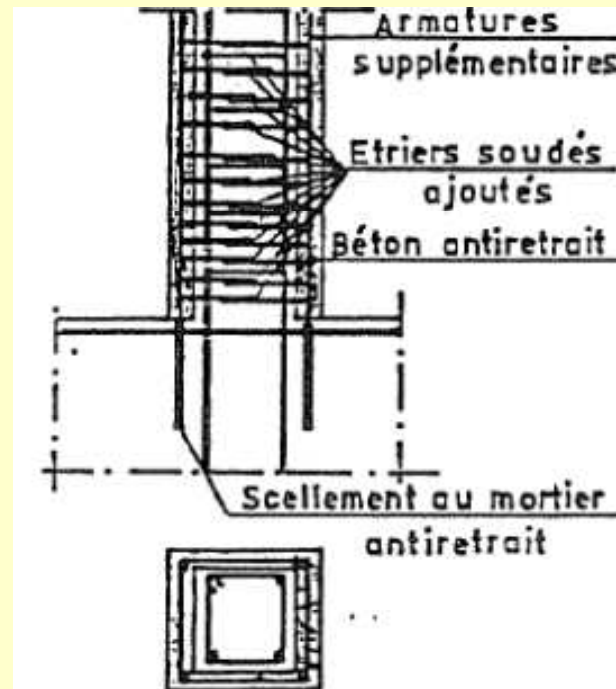
## Armatures supplémentaires en surépaisseur de poutre + dalle



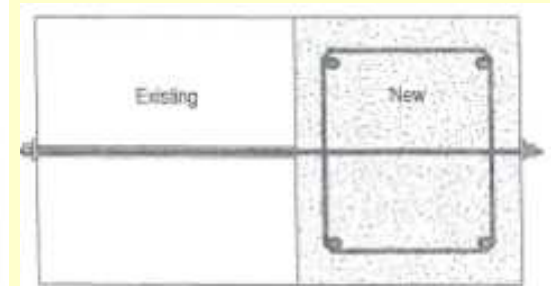
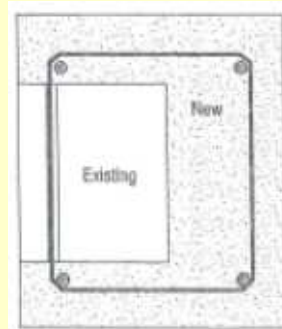
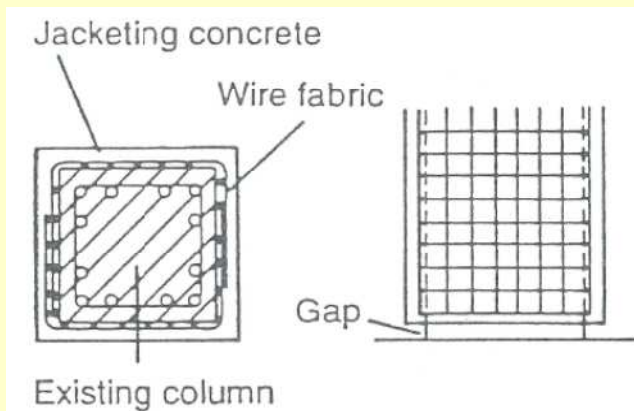
## Armatures complémentaires dans des poteaux ou voiles



*Dans les cotes d'origine*

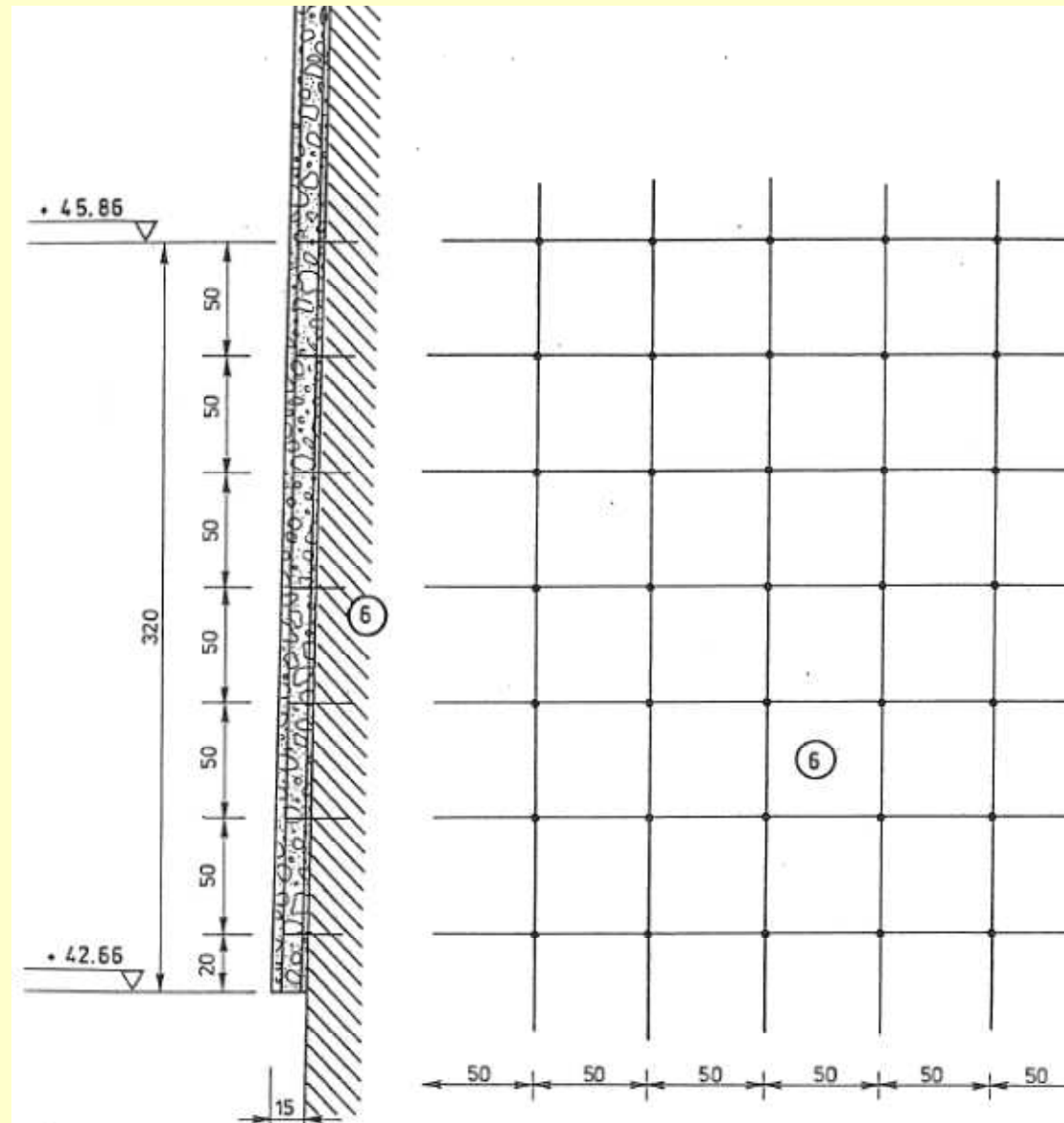
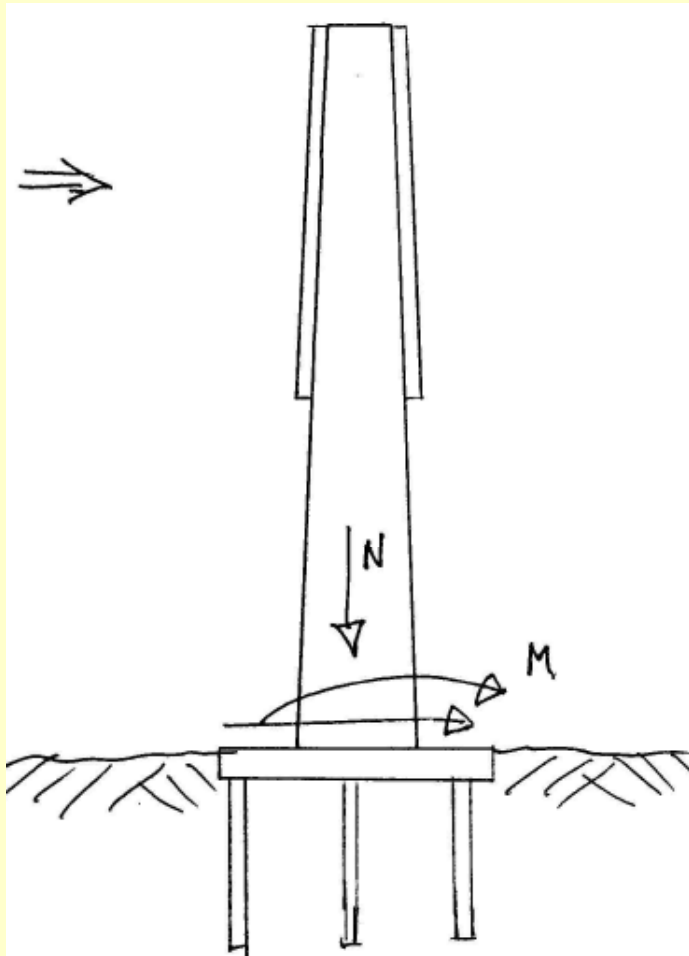


*Avec augmentation de section*



*4 possibilités d'augmentation de section*





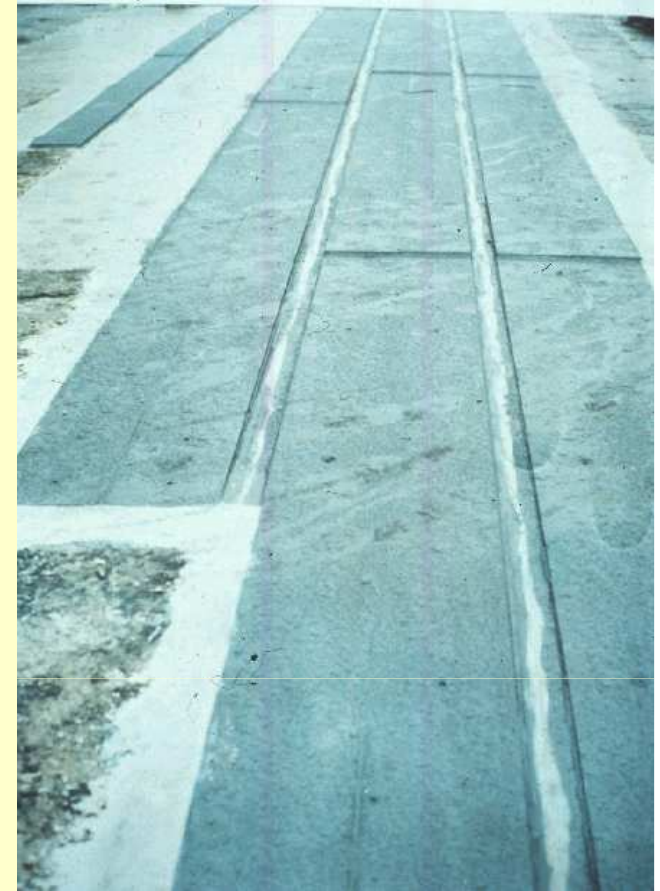
*Doublage de la partie haute d'une cheminée par un chemisage en béton armé.*

## REPARATION PAR PLATS D'ACIER COLLES



*Pont Kennedy à Liège.*

*Plats collés en face inférieure*



*En face supérieure*

### Principe

Des plats d'acier collés sur les faces extérieures du béton  
= armatures longitudinales ou transversales additionnelles aux armatures internes

## REPARATION PAR PLATS D'ACIER COLLES

### Matériaux et dispositions constructives

**Béton** : la résistance au cisaillement du béton donne la limite  
=> vérifier les caractéristiques du béton

**Colle** : Résine époxy      adhérence sur acier et béton.  
Film de colle      de faible épaisseur : 0,5 à 1 mm  
de rigidité suffisante pour transmettre intégralement  
par adhérence les efforts à la tôle  
=> pas de structures soumises à  $t^{\circ} > 70^{\circ}\text{C}$

**Tôle** : acier de qualité courante  
limite d'épaisseur  $\approx 3$  mm => suivre les courbures du support  
traction ppd à l'interface acier-béton  $\approx 0$   
Si sections d'acier importantes nécessaires: superposer des tôles  
Longueur d'ancrage par collage : minimum 100 mm  
Contrainte de cisaillement admissible: 1,5 MPa  
Efforts par cm de largeur de collage : 1500 N ( $= 1,5 \text{ N/mm}^2 \times 10 \times 100 \text{ mm}^2$ )  
Rupture effective observée = 4500 N => sécurité = 3

## Elimination des parties dégradées ou sans cohésion

METHODES - MATERIEL	EFFICACITE	INCONVENIENTS
<p><b><u>A.ELIMINATION EN EPAISSEUR</u></b></p> <p>Burinage. Outils manuels, pneumatiques ou électriques légers</p> <p>Bouchardage. Outils manuels, pneumatiques ou électriques légers à pointes de diamant</p>	<p>Bon dégagement des bétons fissurés, brûlés et pollués dans l'encombrement des armatures</p> <p>Bonne préparation des surfaces de faible importance</p>	<p>Création de micro fissurations locales dans le cas d'abattage sans précaution.</p> <p>Micro fissuration importante</p>
<p><b><u>B.ELIMINATION DE SURFACE</u></b></p> <p>Sablage à sec Sableuse pneumatique et compresseur</p> <p>Sablage humide Sableuse pneumatique et compresseur ou pompe à haute pression et ajout de sable</p> <p>Lavage à l'eau : pompe à très haute pression</p>	<p>Avec sables synthétiques agréés, bonne préparation des bétons et armatures avec utilisation de liants de synthèse</p> <p>Efficace s'il y a séchage</p> <p>Bon enlèvement des granulats dessertis et des liants dégradés. Efficace s'il y a séchage</p>	<p>Nuages de poussières. Nécessité d'un personnel qualifié, équipé de protection individuelle agréée, risques pour ce personnel</p> <p>Risque important de pollution des parties voisines, prévoir une protection efficace, nécessité d'un délai de séchage ou l'emploi d'un liant adhérent sur surface humide</p> <p>Risques pour le personnel, nécessité d'un délai de séchage ou emploi d'un liant adhérent sur surface humide</p>

## Reprise de planéité du support

Défauts de planéité max= 5 mm sous la règle de 2 m (2 mm sous la règle de 200 mm)  
Sinon : ragréage au mortier de résine nécessaire

## Préparation de l'armature

- Sablage => rugosité supérieure à 12 (classe 10 NF E 05.51)  
difficile sur site acceptable en atmosphère de faible humidité
- Revêtement de protection:
  - pellicule souple, non grasse, pelable type vernis, compatible avec la colle
  - primaire époxy de même nature que la colle  
capable d'assurer la protection temporaire de la tôle  
son adhérence ultérieure à la structure

Si tôles de grande largeur >300 mm : perforer la surface à encoller

Trous de 8 à 10 mm pas =15 à 20 cm => expulsion de la colle  
=> limitation de la pression nécessaire

## Encollage

- Séchage des surfaces
- Pellicule de vernis protecteur: enlèvement par pelage juste avant encollage
- Protection par primaire: ravivée par ponçage
- Mise en place de la colle sur l'armature et sur le béton Epaisseur min: 1 mm  
Support et armature totalement encollés  
Polymérisation vérifiée par mesure du durcissement  
!: t° ambiante ⇔ durcissement

## Placage de l'armature

Maintenir la colle sous pression pendant la prise

3 objectifs :

- évacuer de la colle en excès
- réduire son épaisseur au minimum
- maintenir les tôles en place pendant la prise

## Effort de serrage

Pression courante : 0,004 MPa ( si viscosité = 100 poises)

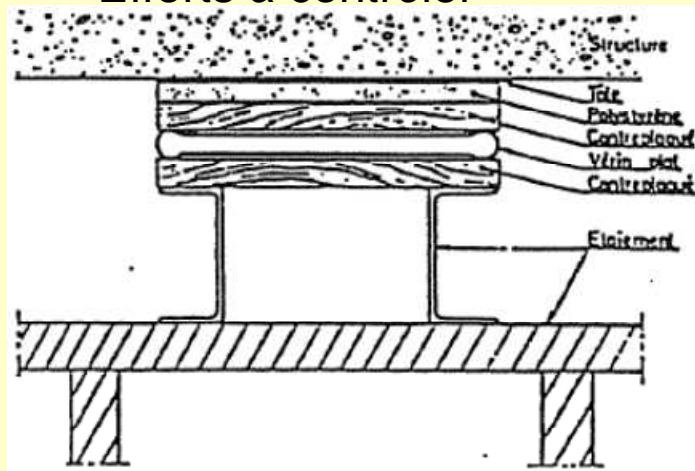
Efforts correspondants importants=> sollicitations provisoires induites à vérifier

### Moyens de serrage

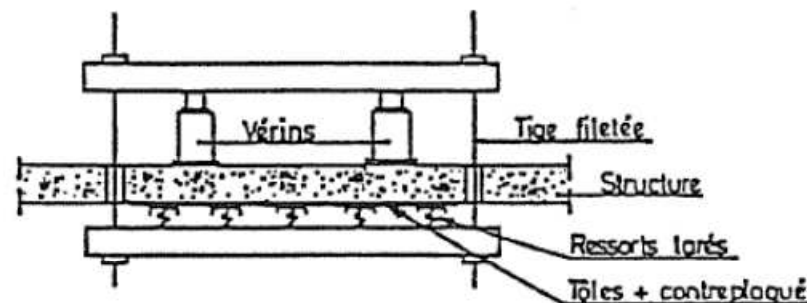
Préférer des dispositifs ne créant que des forces internes

Possibles: serre-joints, barres filetées ou boulons traversant l'élément  
boulons scellés étais coins

Efforts à contrôler



**Serrage avec appui externe**



**Serrage par système interne en équilibre**

## Recommandations pour la mise en oeuvre

- Pendant la prise: éviter vibrations, trafic, effets dynamiques de machines
- Pré-déformation: soulage la structure  
assure la participation des plats collés à la reprise ultérieure de G
- Verrous aux extrémités des armatures : pour empêcher l'amorçage d'un pelage
- Verrous : tôles d'épaisseur 1 mm collées, goujons
- Protection contre la corrosion : peinture époxy compatible avec le primaire

## Contrôle de l'encollage

- Sondage au marteau
- Défauts de plus de 100 cm<sup>2</sup> réinjectés à partir d'un évent scellé dans un trou foré  
Défaut en périphérie : tous traités  
Si plus de 5 % de défaut : recommencer
- Pression d'injection < 0,002 MPa pour éviter l'arrachement de la tôle

# REPARATION PAR PLATS D'ACIER COLLES – DIMENSIONNEMENT

## Contraintes longitudinales Méthode LCPC

### ► Dimensionnement suivant béton armé aux états limites

- Etat Limite de Service dimensionne les tôles
- Etat Limite Ultime conditionne le non-décollement des tôles à leurs extrémités
- Hypothèse: conservation des sections planes

### ► Sections d'acier à prendre en compte " $A_s$ "

2 cas extrêmes:  $A_s = K_e \cdot A_e + A_i$  bon ancrage des barres internes

$A_s = A_e + K_i \cdot A_i$  ancrage des barres internes partiellement détruit

$A_e$  aciers de renfort.  $A_i$  aciers internes  $K_e = 1,2 - 0,08 e_a$   $K_i = 0,46 + 0,08 e_a$

$e_a$  épaisseur en mm de la tôle la plus épaisse

### ► Contraintes limites dans les aciers

• aciers internes: " $f_y$ " =  $\sigma_i = 2/3 f_{yd}$

• aciers externes tôles au contact du béton " $f_y$ " =  $0,47 f_{yd}$

tôles additionnelles superposées " $f_y$ " =  $0,24 f_{yd}$

0,47 et 0,24 tiennent compte des flexions locales des tôles au droit des fissures de la non-linéarité des  $\sigma$  entre 2 tôles superposées

- Moment résistant :  $M_{Rd} = A_s "f_y" z < M_{Sd}$   
 $M_{Rd} = \mu b d^2 \alpha f_{cd} < M_{Sd}$



## Ancrages des extrémités de bandes collées

### ► Extrémités des bandes collées = zone délicate:

- Décollement plus facile qu'en section courante.
- Contraintes de cisaillement plus grandes vers les appuis  
= vers les extrémités des plats
- Transfert par adhérence => contraintes de traction dans le béton  
car pas d'étrier autour du plat collé

### ► La ruine par "pelage" du plat collé à son extrémité est :

- Fragile : propagation rapide du décollement
- Sensible à tout défaut de matière ou d'exécution
- Dépendante de la résistance en traction du béton, fort aléatoire

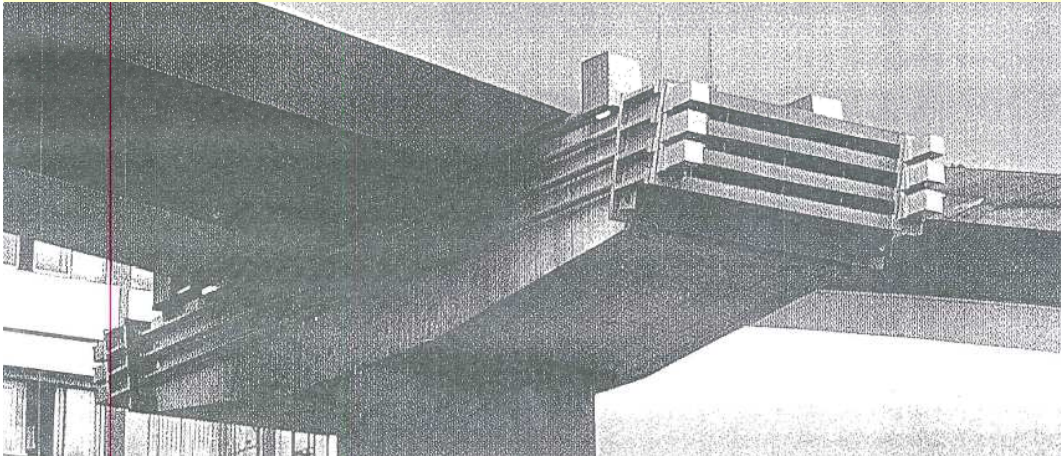
⇒ compléter la liaison collée par une fixation mécanique  
ancrages tendus qui compriment le plat à l'interface

- Ancrages calculés pour:
  - au max la force de traction plastique  $A_s f_{yk}$  du plat
  - une fraction de  $A_s f_{yk}$  fonction des contraintes calculées dans le plat

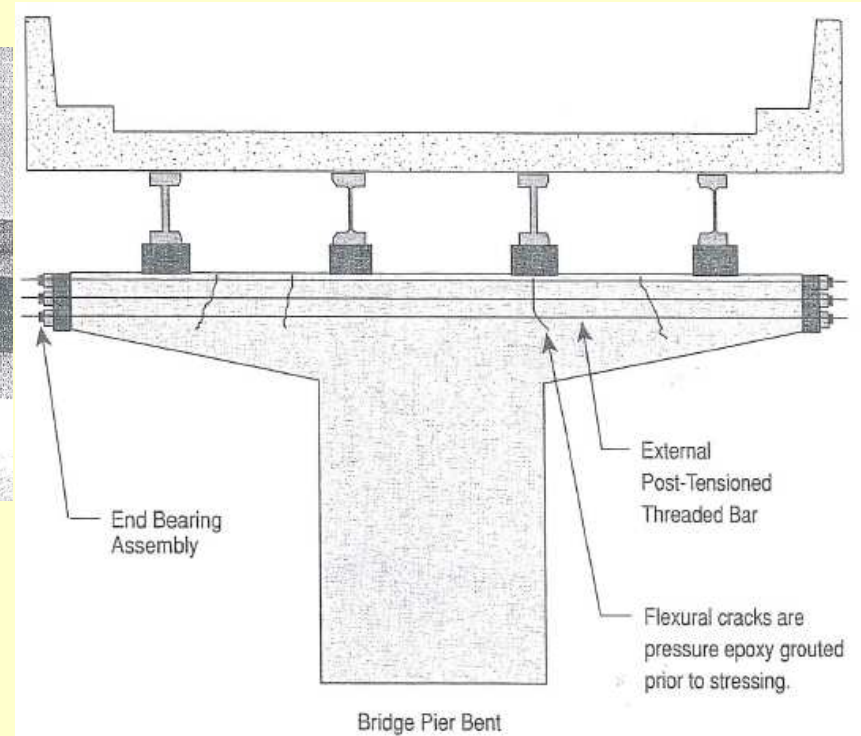
# REPARATION OU RENFORCEMENT PAR PRECONTRAINTE ADDITIONNELLE

## Objectifs

- Rétablir l'intégrité d'un élément structural BA ou BP par compression du béton décomprimé/fissuré
- Créer une compression dans un élément BA pour bénéficier de la raideur de section non fissurée



***Renforcement d'un chevêtre par précontrainte extérieure à l'aide de barres Dywidag***



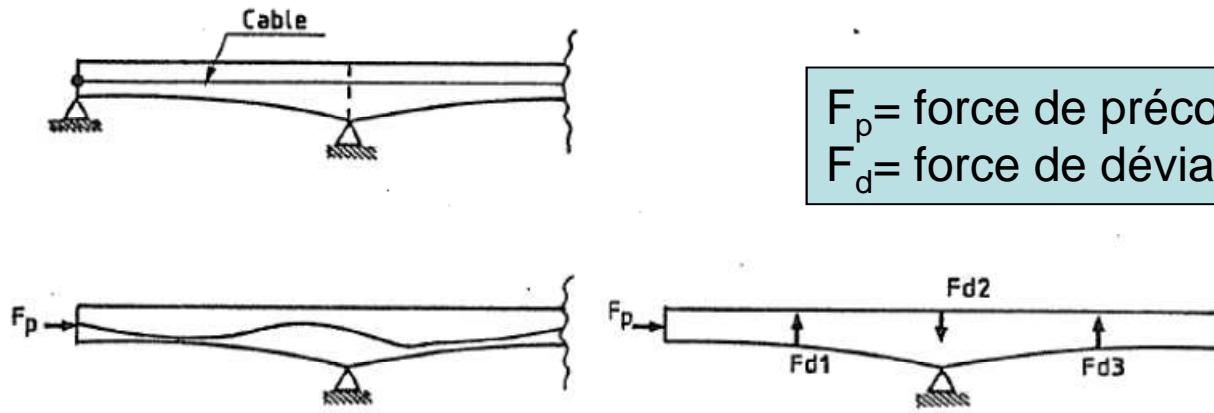
## Tracé des armatures de précontrainte additionnelle

### ► Rectiligne

- Simple, facile à mettre en œuvre
- Améliore peu la résistance au cisaillement
- Efforts complémentaires aux 2 extrémités de l'armature

### ► Polygonal

- Plus compliqué à mettre en œuvre
- Améliore la résistance au cisaillement
- Exige des déviateurs => pertes de précontrainte par frottement
- Efforts complémentaires aux 2 extrémités d'armatures + déviateurs

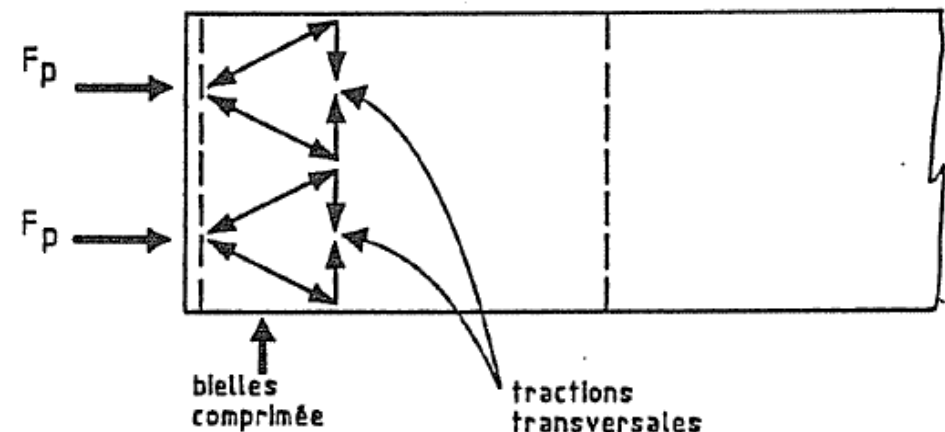


### ► Introduction de forces concentrées $F_p$

- => sollicitations transversales
- => armatures transversales

### ► Poutres hyperstatiques

- => modification des réactions d'appui

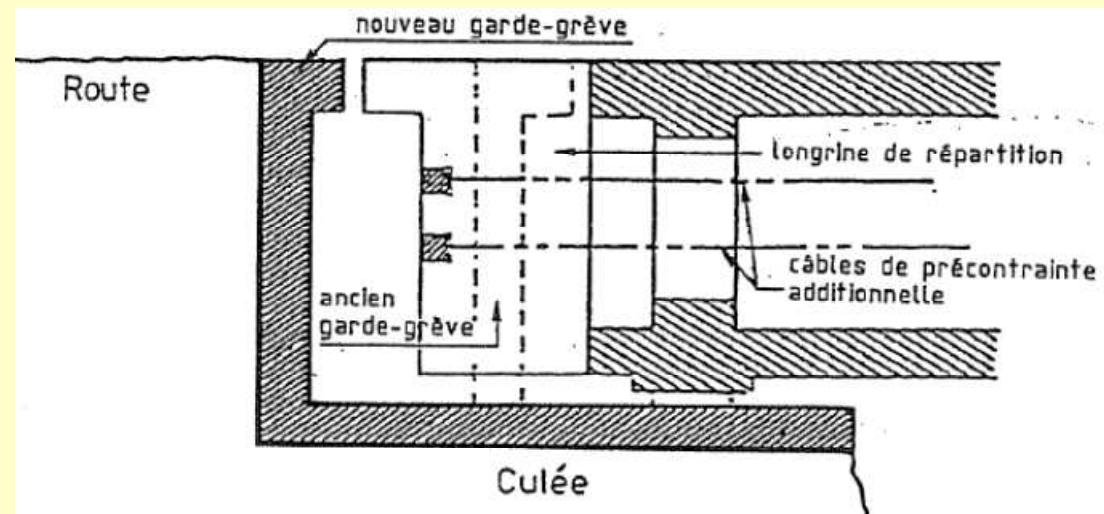
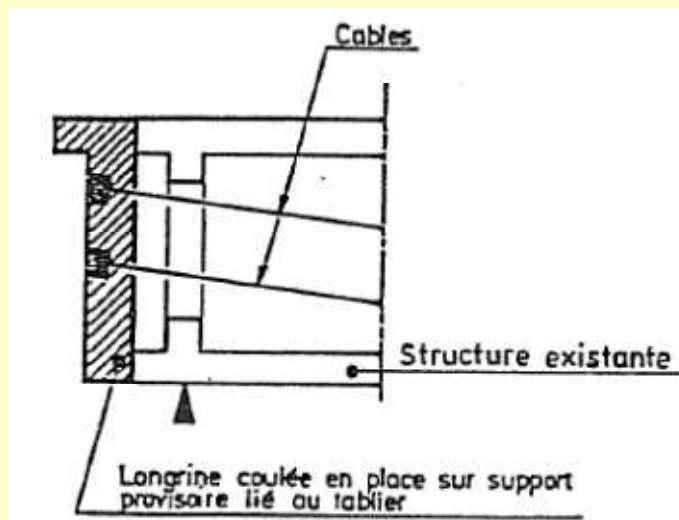


## Dispositifs d'ancrage et de déviation des armatures de précontrainte

Si la structure existante offre la résistance: entretoises d'extrémités ou intermédiaires  
Sinon, la précontrainte s'appuie sur des pièces ajoutées et solidarisées à la structure

### Ancrage sur massifs d'extrémités rapportés

- une pièce massive à l'extrémité de l'ouvrage
- on y place les ancrages des armatures longitudinales
- le massif reporte les efforts sur les âmes et les semelles des poutres
- Evite les efforts concentrés importants
- Bien adapté aux structures minces peu armées



### **Inconvénients:**

- prolongement parfois inutile des câbles dans les travées de rive
- difficulté de réalisation si culées creuses ou tabliers très biais
- interruption du trafic
- construction d'un nouveau garde-grève

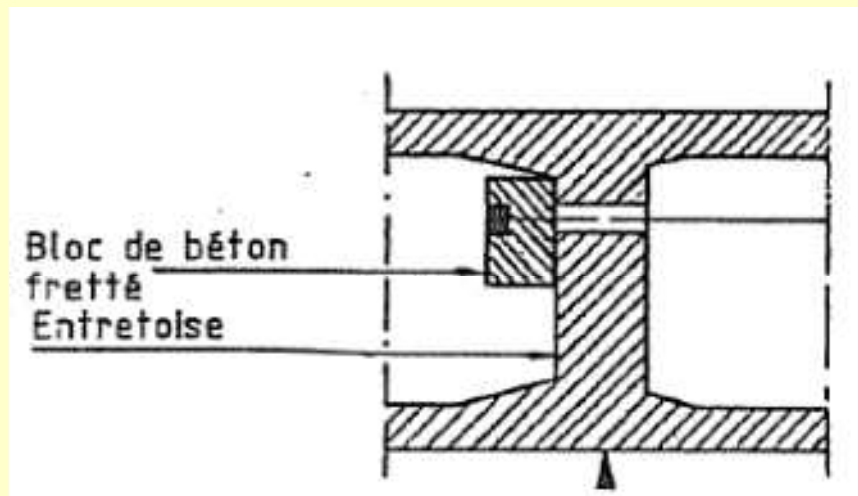
## Ancrage sur les entretoises existantes

OK si entretoises de résistance suffisante bien connectées aux âmes et ailes

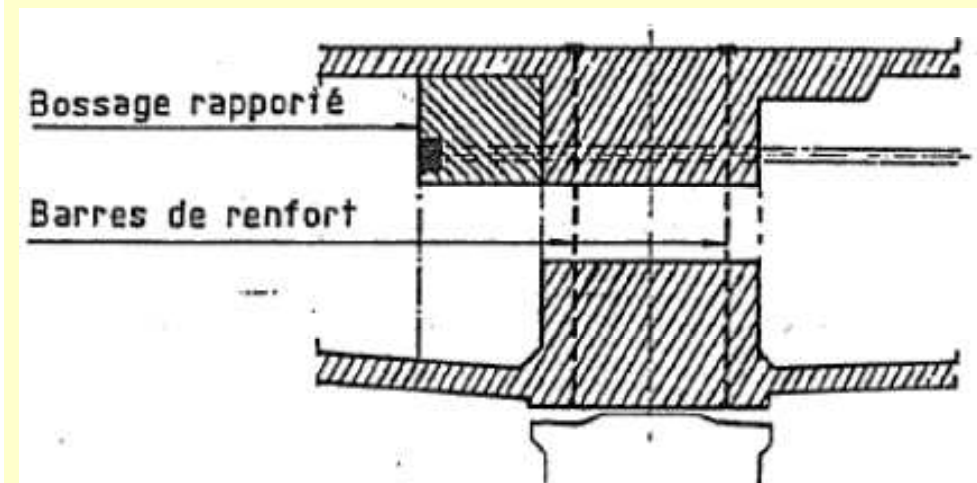
Renforcements envisageables Ex : précontrainte transversale complémentaire

Repérage des armatures transversales éventuelles

Forage au travers de l'entretoise



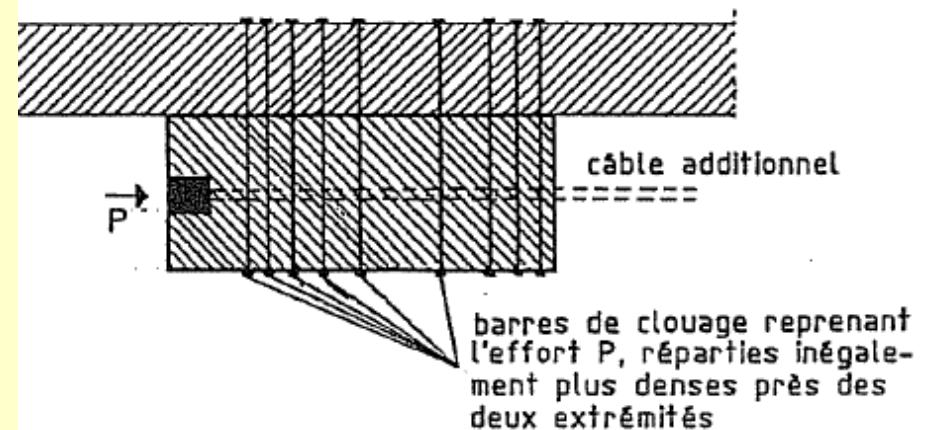
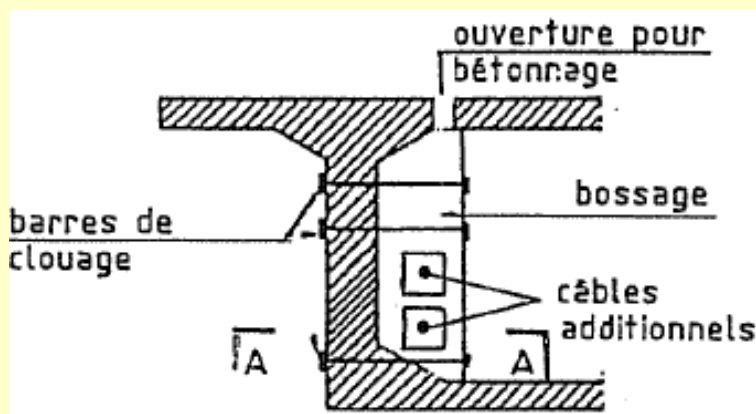
*Bossage d'ancrage sur entretoise existante*



*Renforcement d'entretoise existante par précontrainte transversale verticale*

## Greffe de bossages d'ancrage de la précontrainte sur la structure existante

- Efforts locaux importants : diffusion de la précontrainte
- Bossages: près des nœuds âme-fond de caisson ou âme-dalle  
zones raides en flexion
- Clouage à l'aide d'armatures ou tiges  
Effort de clouage  $\gg$  effort de précontrainte car sécurité au glissement  
Délicat : variation d'allongement des barres de clouage  
 $\Rightarrow$  perte élevée de leur précontrainte  $\Rightarrow$  glissements voire ruptures
- Exécution correcte de bossages:  
Traitement de la surface de reprise entre bossage et structure existante: indentations  
Technologie limitant les pertes par défaut de calage des ancrages  
Sous estimation du coefficient de frottement si bossage métallique  
Distribution de l'effort d'ancrage sur la longueur totale du bossage



Coupe verticale

Coupe horizontale

Clouage d'un bossage sur l'âme

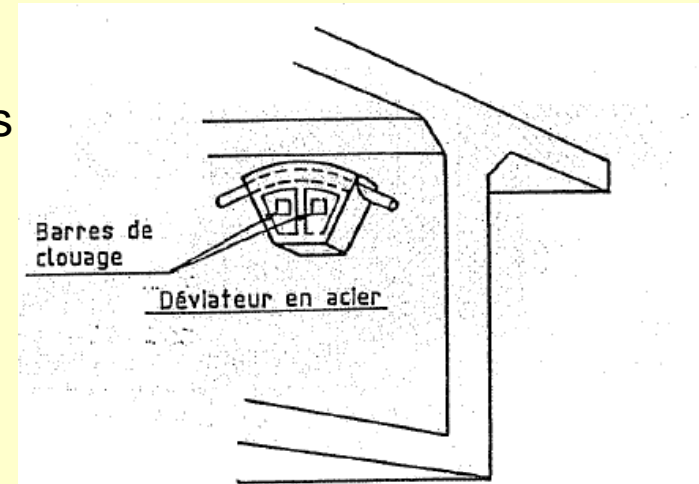
## Déviateurs

Tracé polygonal

=> câbles déviés par des pièces spéciales « **déviateurs** »

### Les déviateurs

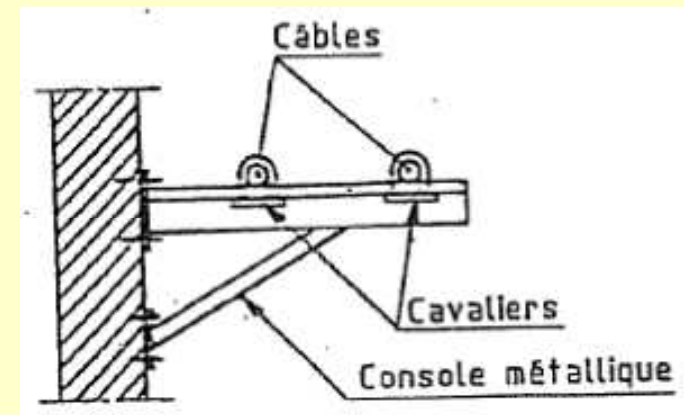
- Supportent la poussée au vide des câbles
- En béton armé ou en métal
- Clouage : comme les bossages



## Guidages

Fixations transversales des câbles:

- Contre le risque *d'instabilité élastique* des poutres comprimées
- Pour réduire la longueur des câbles entre points de fixation
- Pour s'opposer au risque de *mise en vibration des câbles* (résonance, si fréq. câble  $\approx$  fréq. Structure)
- Limite la possibilité de fouettement en cas de rupture de câble
- Distance min entre supports  $\approx 15\text{m}$



## Injection des fissures

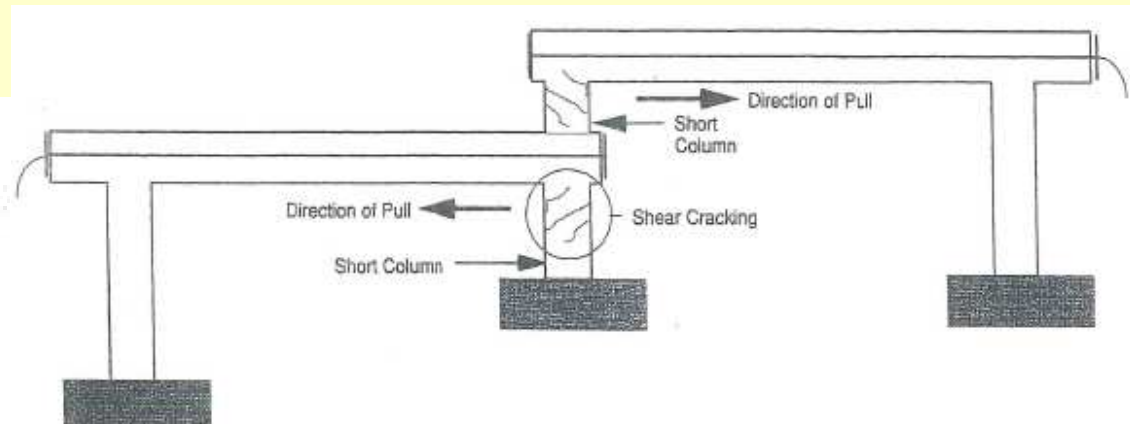
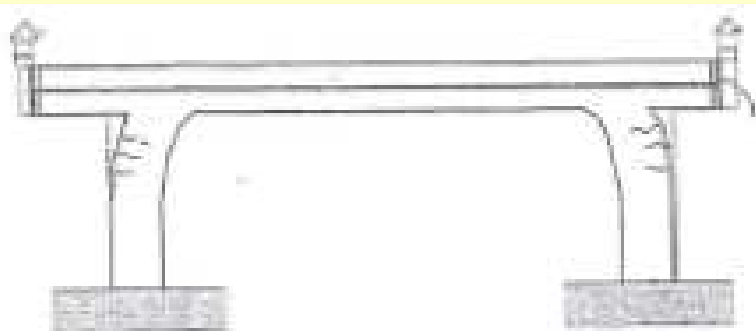
- Mesure sage avant une précontrainte additionnelle
- Bloque le mouvement relatif éventuel des lèvres des fissures
- Eviter le transfert d'effort par des points durs
- Mise en tension des câbles additionnels : au plus tôt après injection des fissures

## Sollicitations parasites introduites par la postcontrainte

Postcontrainte => raccourcissement élastique

=> sollicitations dans les éléments de la structure

Le renforcement des éléments peut être nécessaire





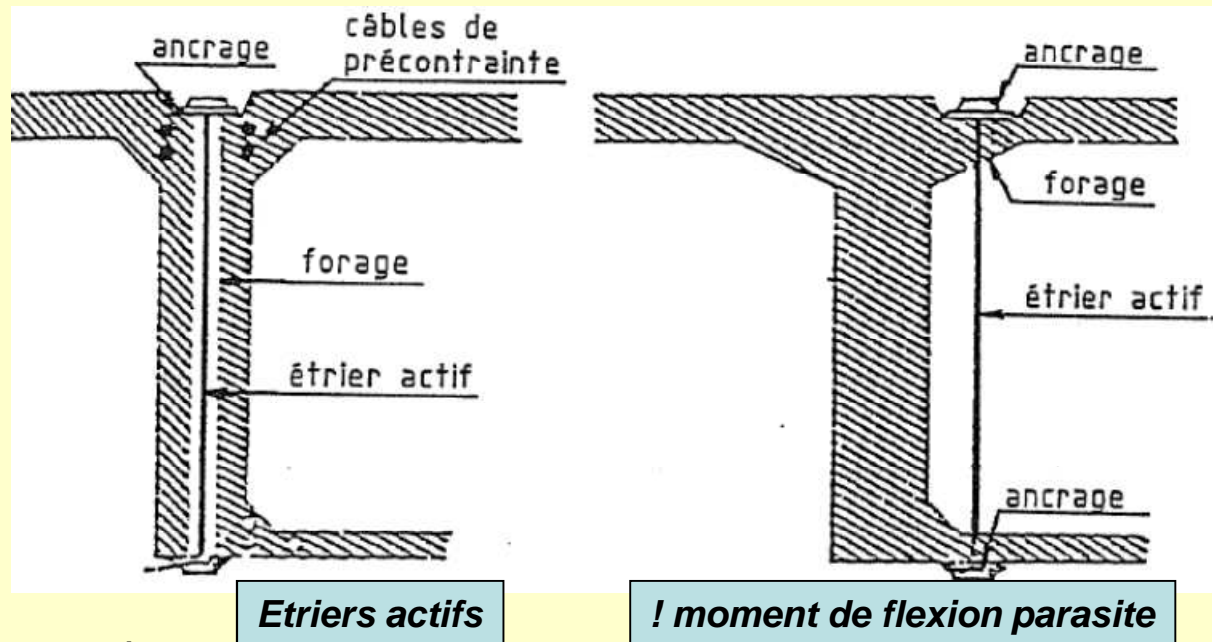
## INSUFFISANCE A L'EFFORT TRANCHANT REPARATION PAR PRECONTRAINTE ADDITIONNELLE

Insuffisance à l'effort tranchant: fissures inclinées situées dans les âmes des poutres

### Principes de la réparation

Compression verticale de l'âme endommagée par :

- inclinaison de câbles additionnels si insuffisance simultanée en flexion
- mise en place d'étriers actifs



### Etriers actifs

- Fils, barres ou torons de précontrainte disposés à l'intérieur d'un forage réalisé sur toute la hauteur de l'âme  
disposés au voisinage de l'âme et ancrés dans les ailes
- Fissuration existante: plastification des étriers d'effort tranchant possible  
=> dimensionner les étriers actifs en négligeant la présence des étriers passifs

Exemple.

Bâtiment de résistance sismique insuffisante



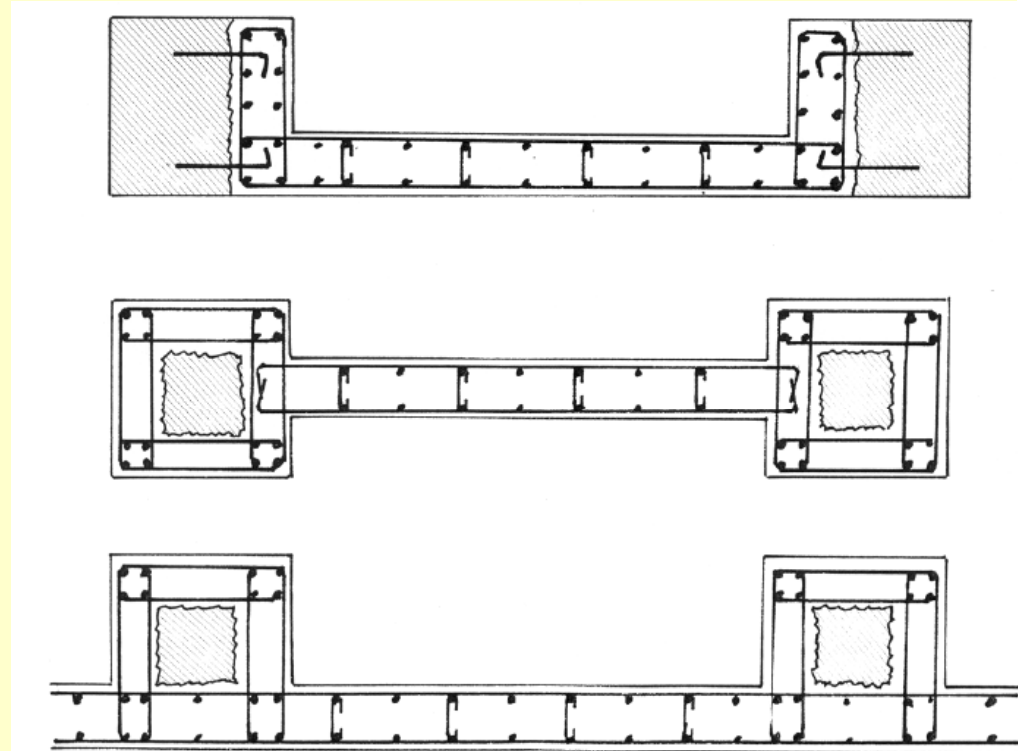
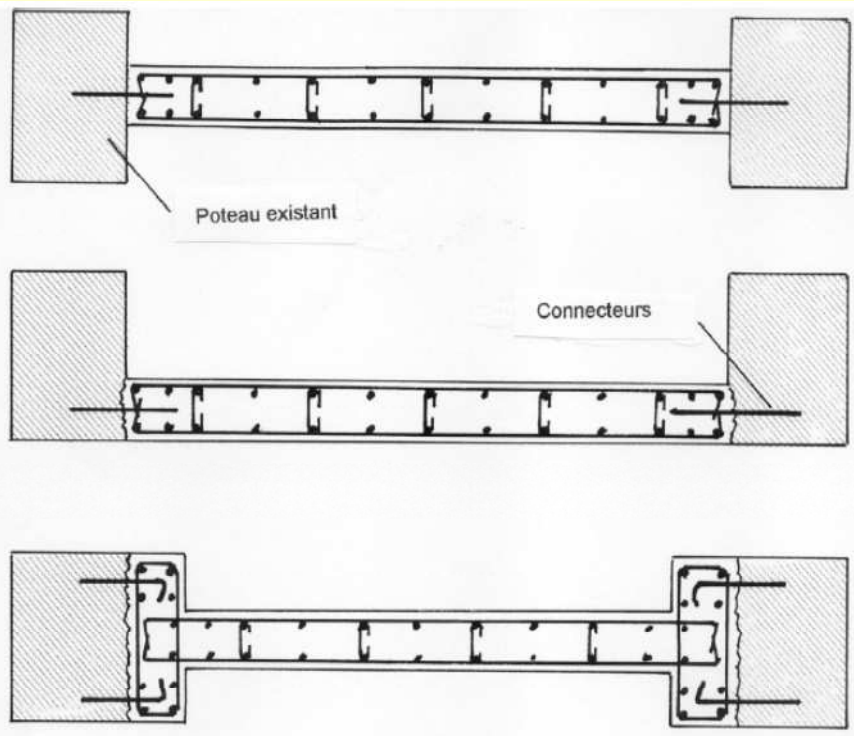
Voile en B.A.

Précontrainte

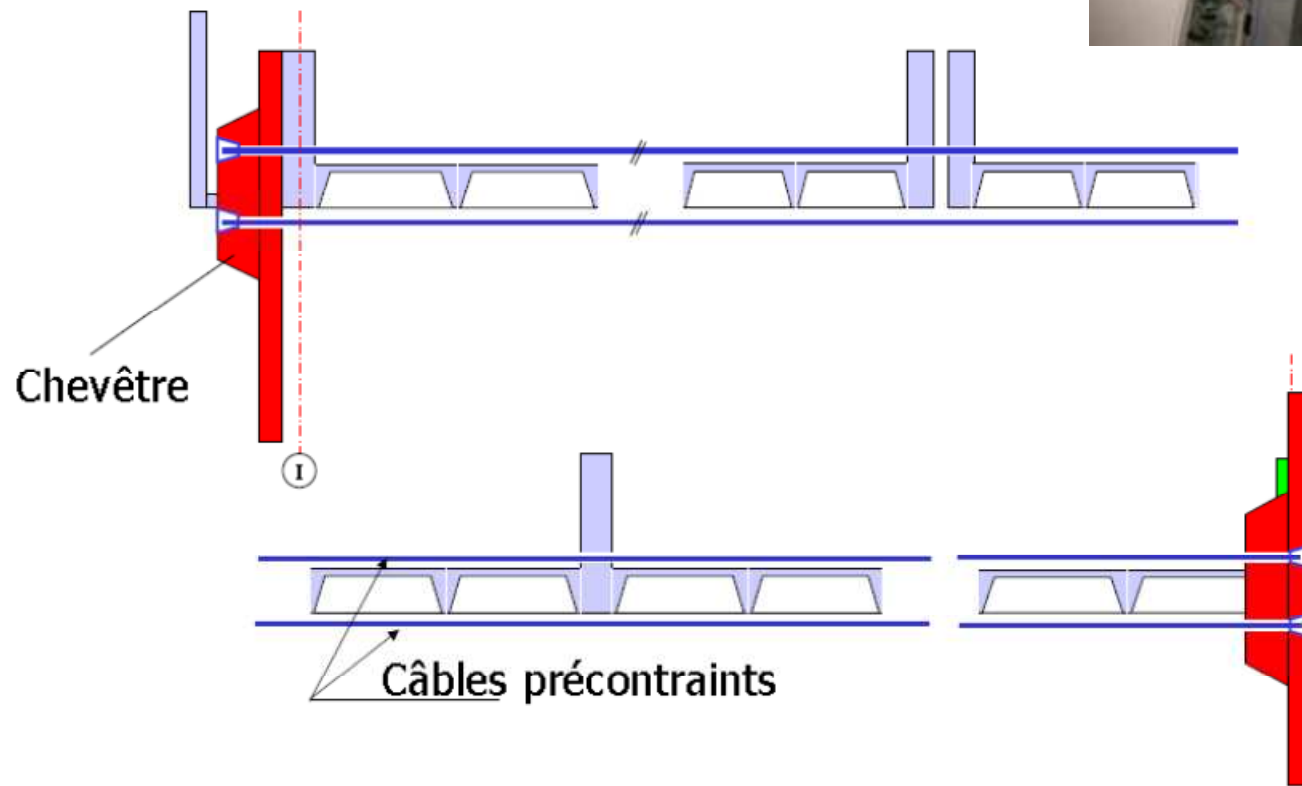


Le projet

Transformation des portiques en murs en béton armé  
Les poteaux sont des ailes du murs



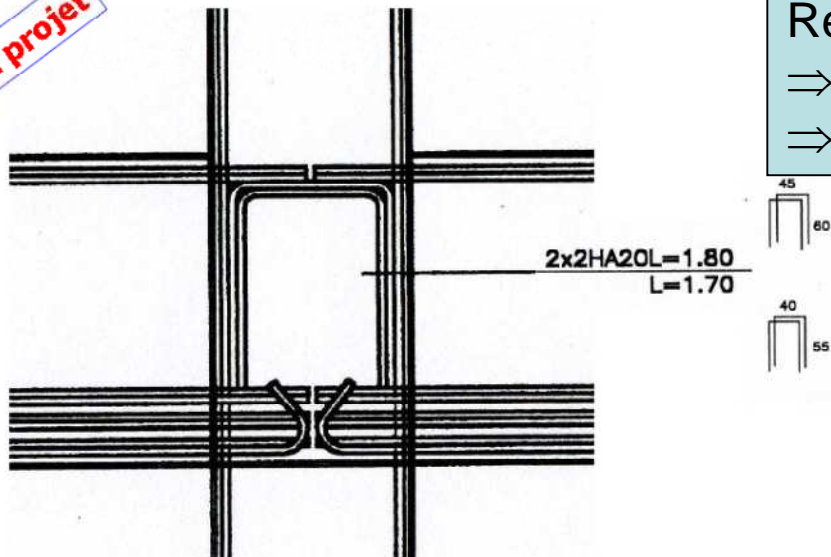
# Précontrainte des planchers pour assurer leur rôle de diaphragme



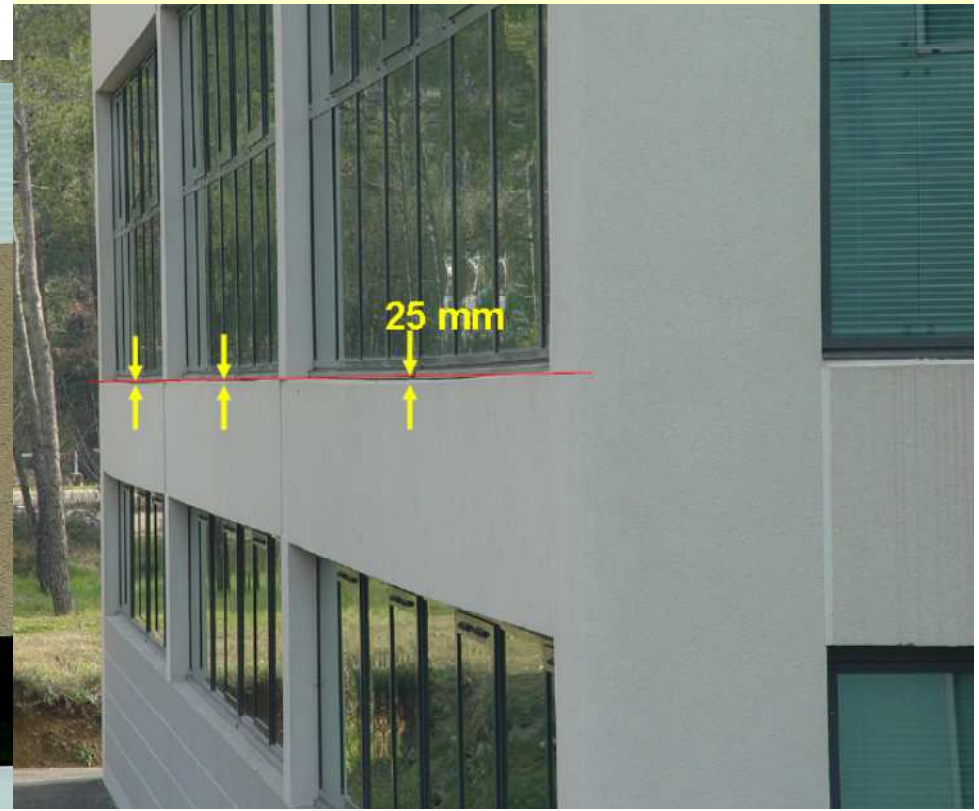


Jonction poutres-poteaux en façades

Dessin projet

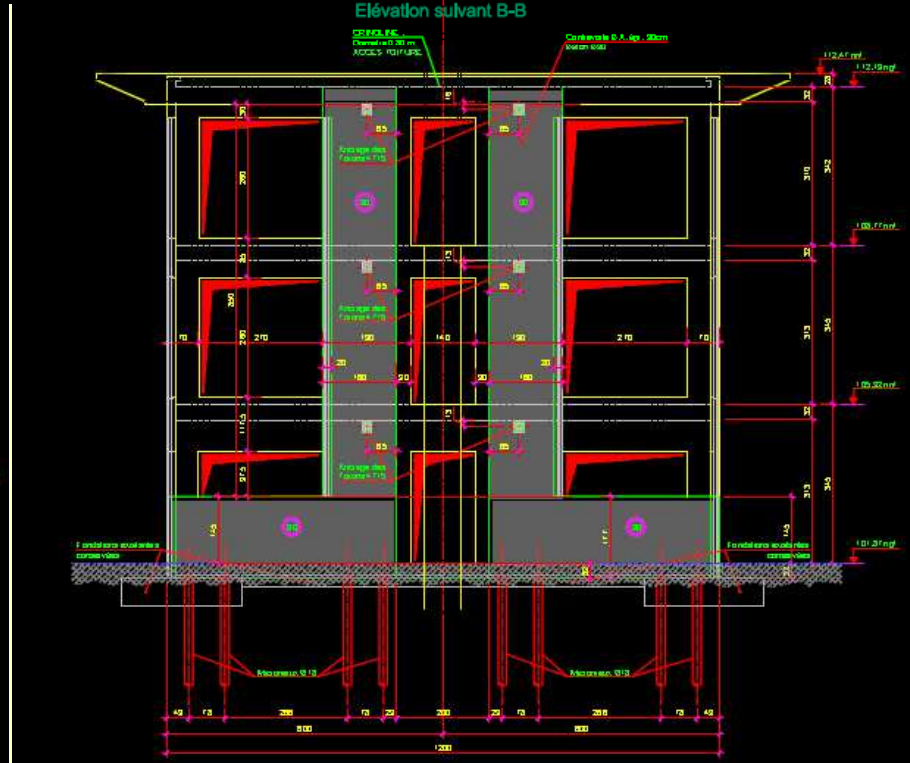
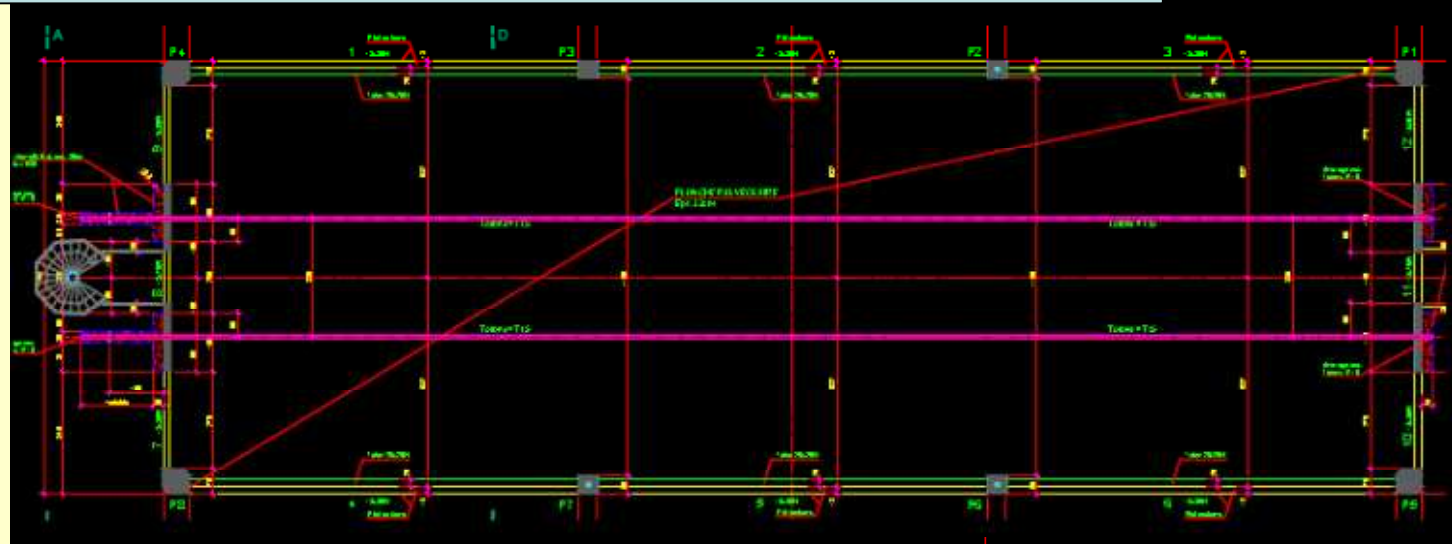


Erreur d'armaturage  
Résistance en flexion insuffisante au nœud  
⇒ Résistance sismique globale insuffisante  
⇒ Et flèches des poutres



Solution: 2 contreforts extérieurs en x  
Précontrainte en x

4 contreforts intérieurs en y



# REPARATION OU RENFORCEMENT A L'AIDE DE PROFILS METALLIQUES

## Principe et modalités pratiques

- Augmente la section résistante d'éléments en béton armé par des profilés ou plats métalliques Matériaux et sections standards  
Résultat : structure mixte acier-béton
- Des liaisons entre béton et acier => Travail homogène
- Qualité de la solution ⇔ qualité des liaisons acier - béton armé

## Avantages

- Rapidité de réalisation sur chantier pièces métalliques préfabriquées en atelier  
montage à l'aide d'ancrages
- Légèreté des éléments à monter car tronçonnage possible
- Caractère sec de l'intervention pas d'écoulement d'eau ou de béton frais

## Inconvénients

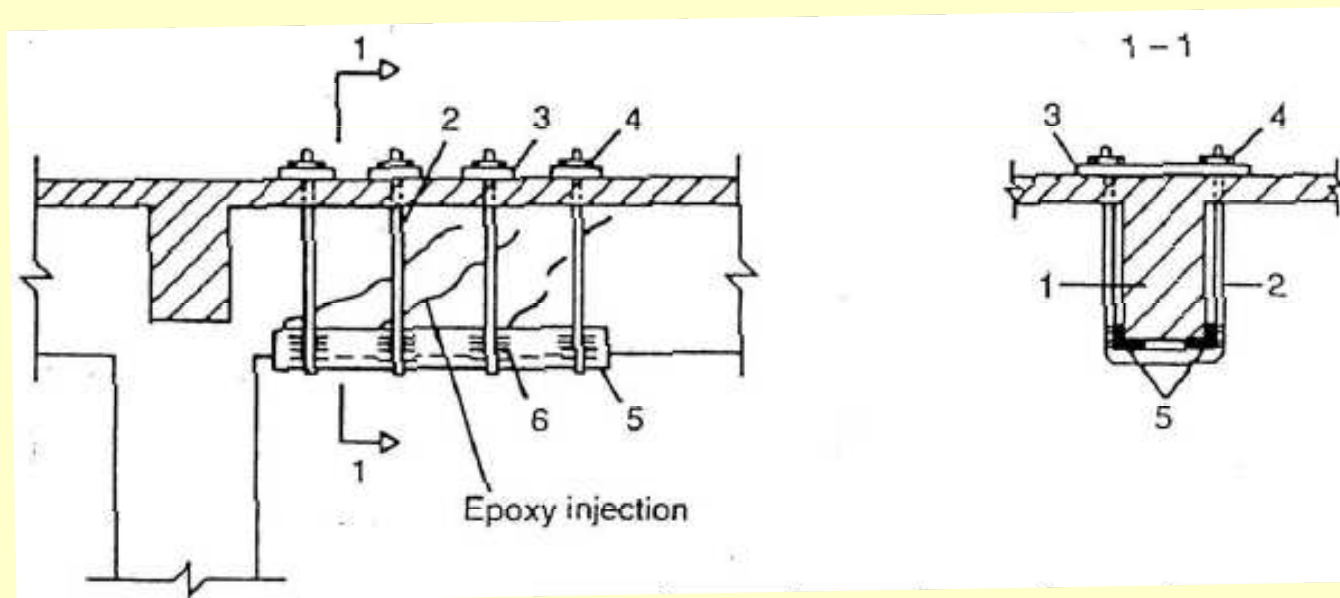
- Précision requise lors du mesurage de la structure existante de la fabrication des éléments métalliques
- Possibilités d'ajustement au montage à prévoir
- Positionnement correct des forages  
présentation des pièces métalliques préforées en position finale (ou l'inverse)



## Exemple

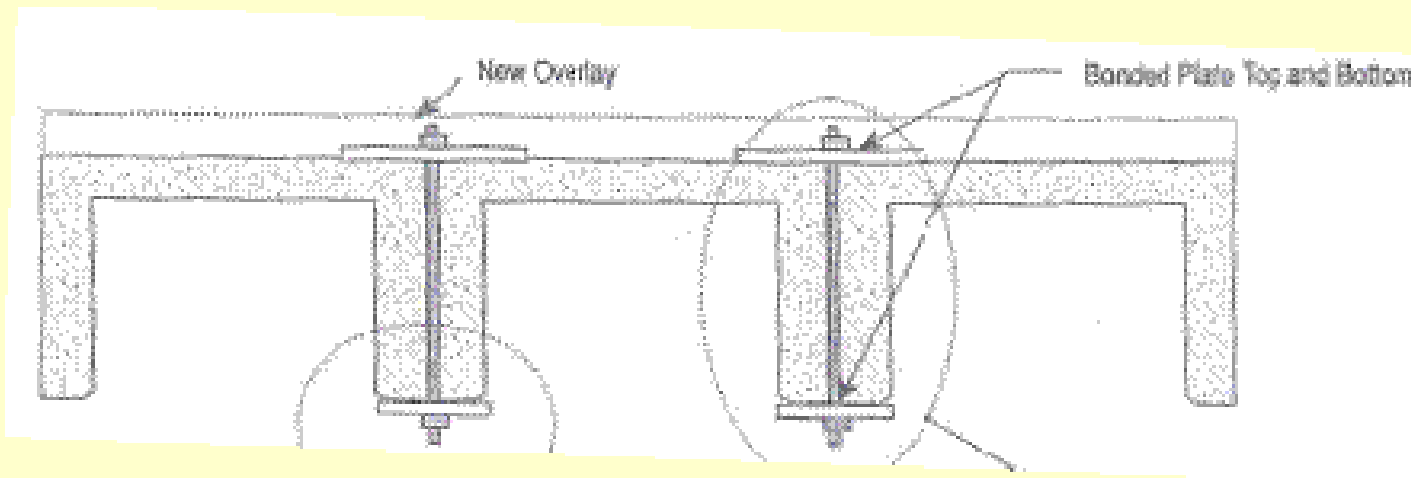
### Renforcement de résistance à l'effort tranchant

- Cornières + barres filetées
- Efficacité immédiate du système  
mise en traction des barres verticales (serrage des écrous)
- Intervention couplée « postcontrainte par étriers actifs + profils aciers »



## Renforcement à l'effort tranchant et à la flexion

- Plats longitudinaux collés  
=> augmentation de la résistance en flexion
- Barres verticales dans des trous forés  
=> augmentation de la résistance à l'effort tranchant
- Serrage des plats collés par mise en traction légère des barres verticales  
serrage des écrous
- Eventuellement, après prise de la colle, précontrainte des barres verticales  
=> Intervention couplées « postcontrainte par étriers actifs + plats collés »
- Coulage ultérieur d'une chape recouvrant plaques, barres et boulons  
dépassant à la partie supérieure
- Ou dégagement préalable d'une engravure contenant boulons dépassants et plats

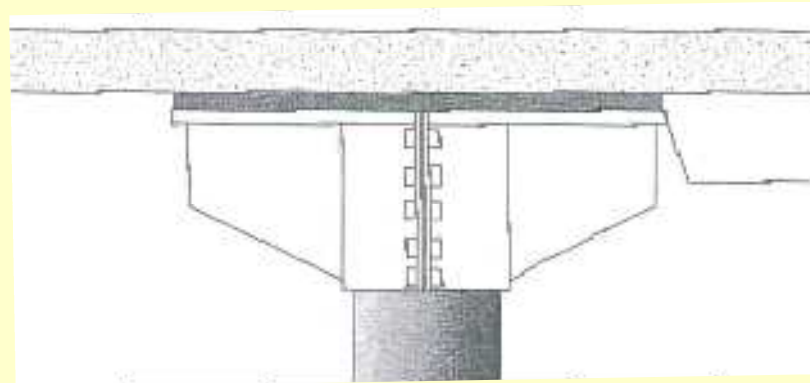
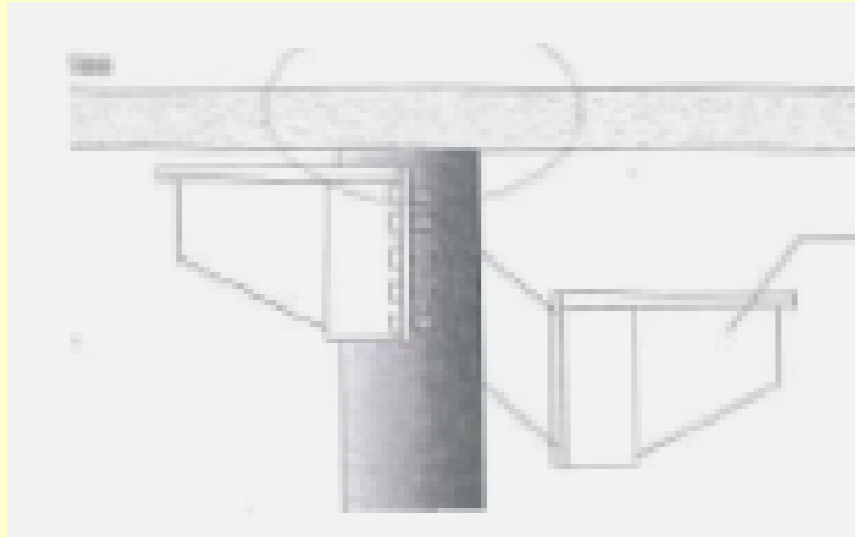


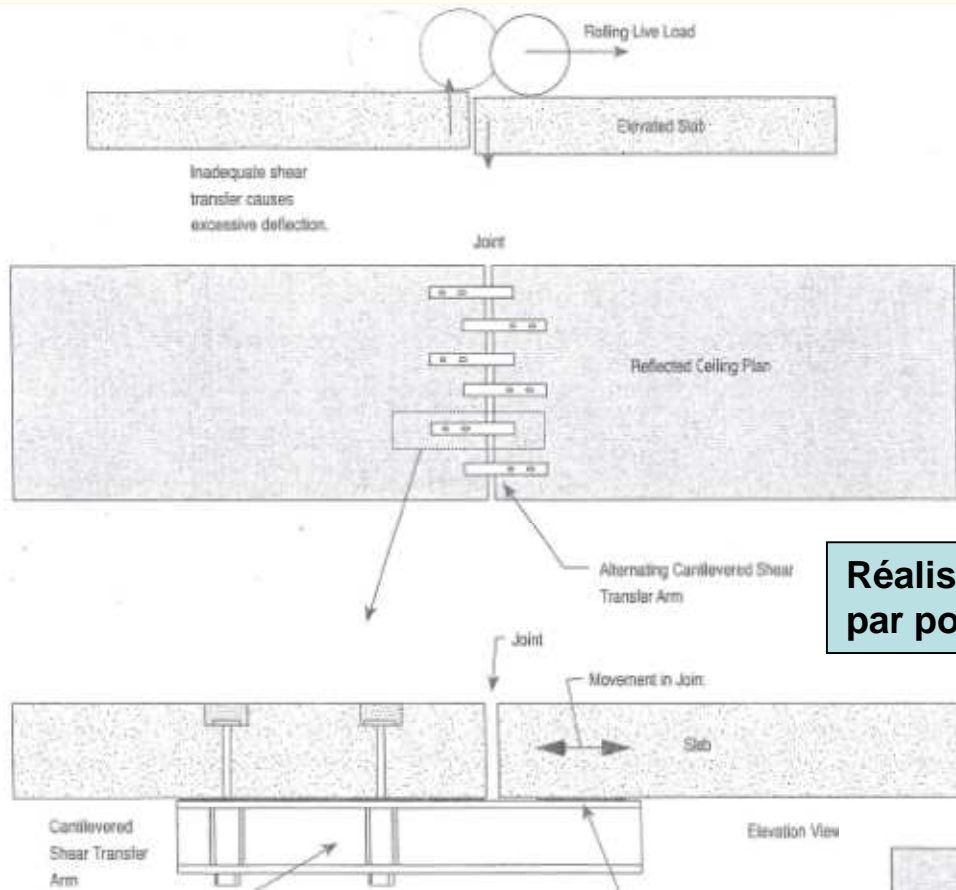
## Renforcement de la résistance au poinçonnement d'un plancher dalle

Consoles d'extension d'appuis utilisant des pièces métalliques

Objectif: augmenter la longueur de la ligne de rupture au poinçonnement

Autre possibilité : console « champignon » en béton armé

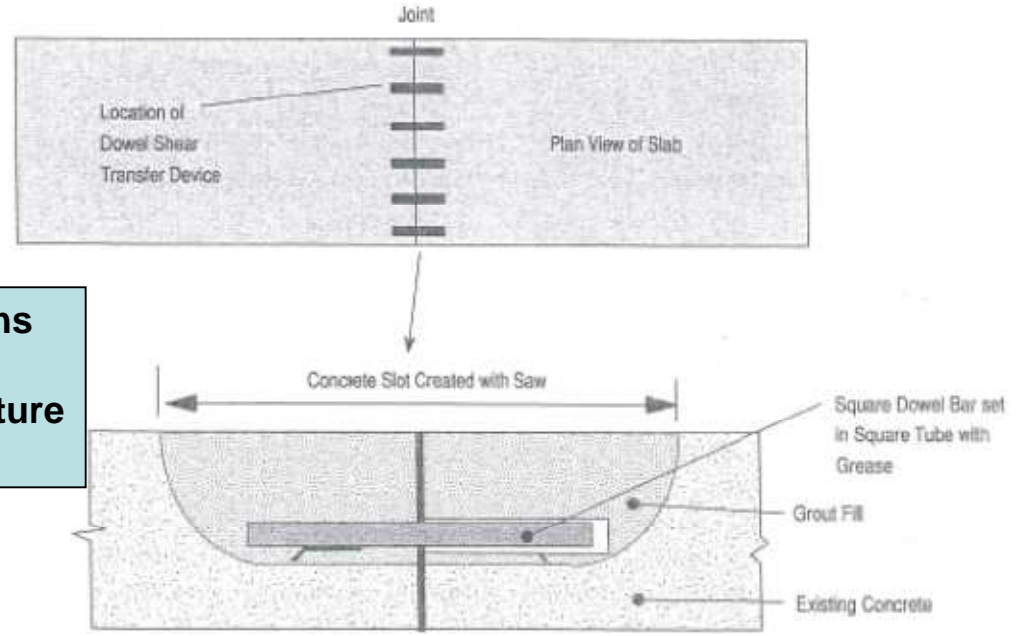




**Réalisation d'une continuité entre dalles préfabriquées**

**Réalisation d'un appui cantilever par poutrelle**

**Réalisation d'un appui cantilever par goujons**  
**Note: suppose qu'il existe 2 nappes d'armature**  
**Sinon cisaillement du béton**

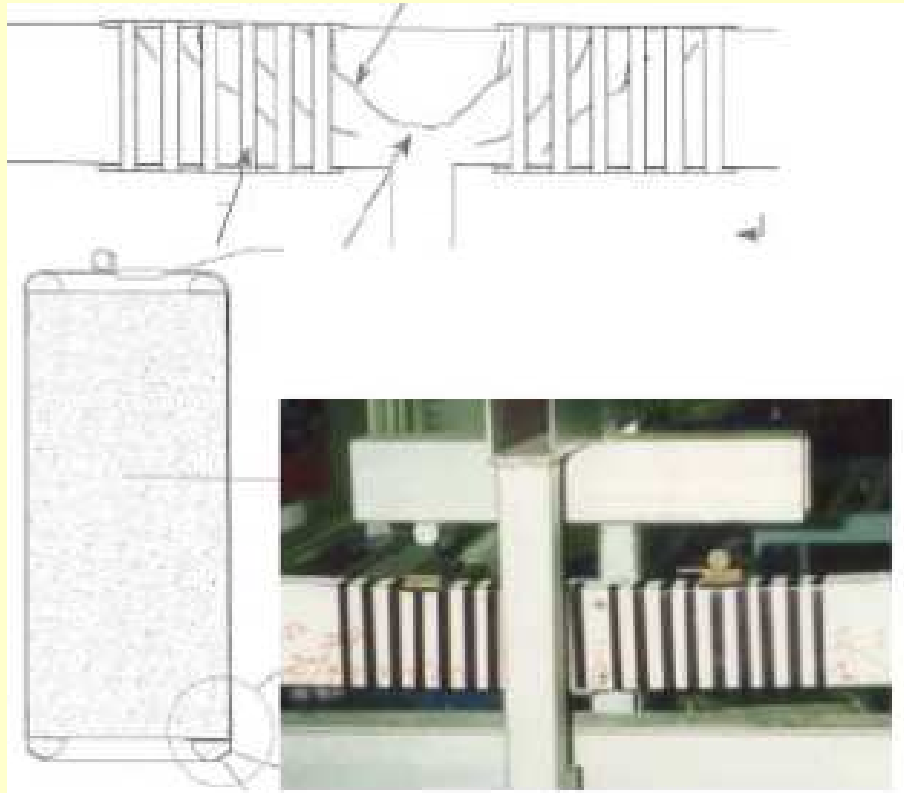


## Frettage d'une poutre par des lanières métalliques

Lanières métalliques = une armature d'effort tranchant externe à la section BA

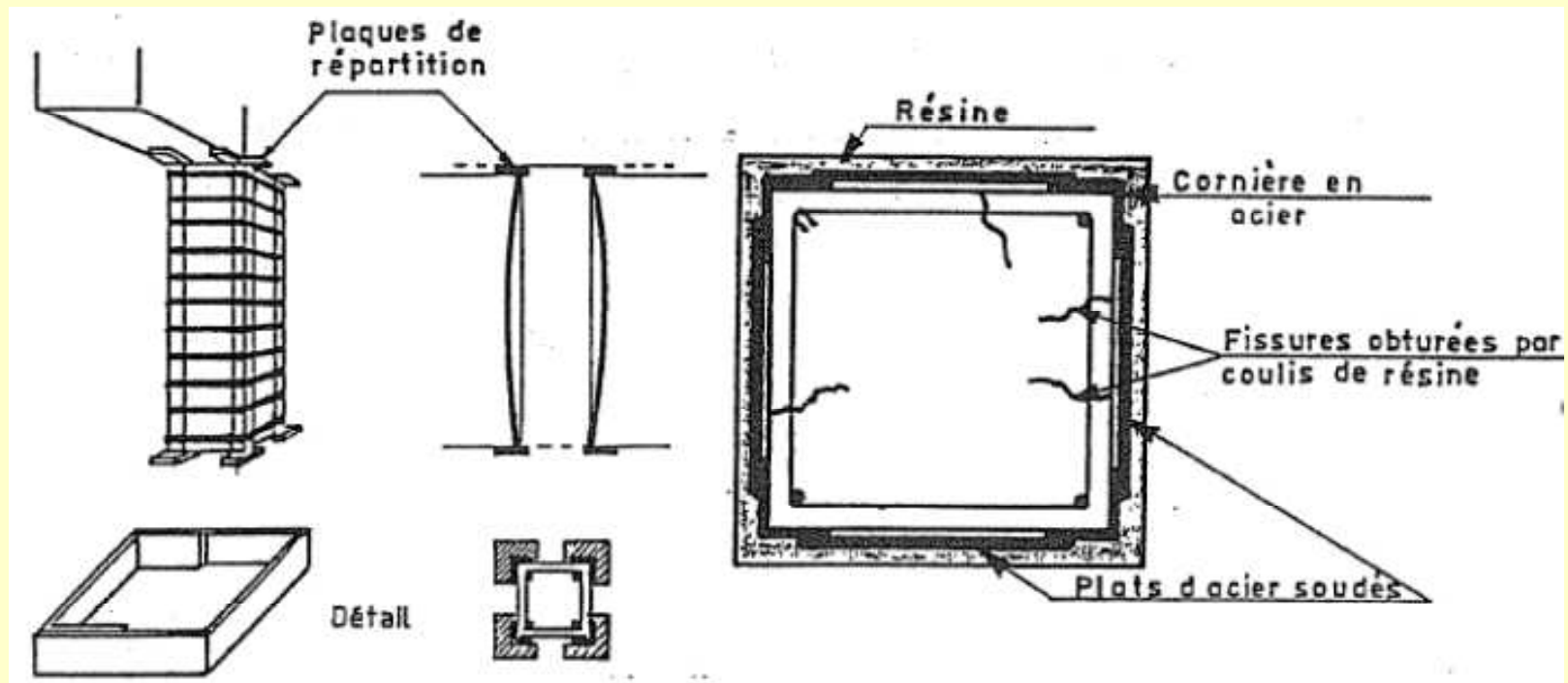
Si précontraintes: reprise de l'effort tranchant dû au poids mort  $G$   
à l'action de service  $Q$

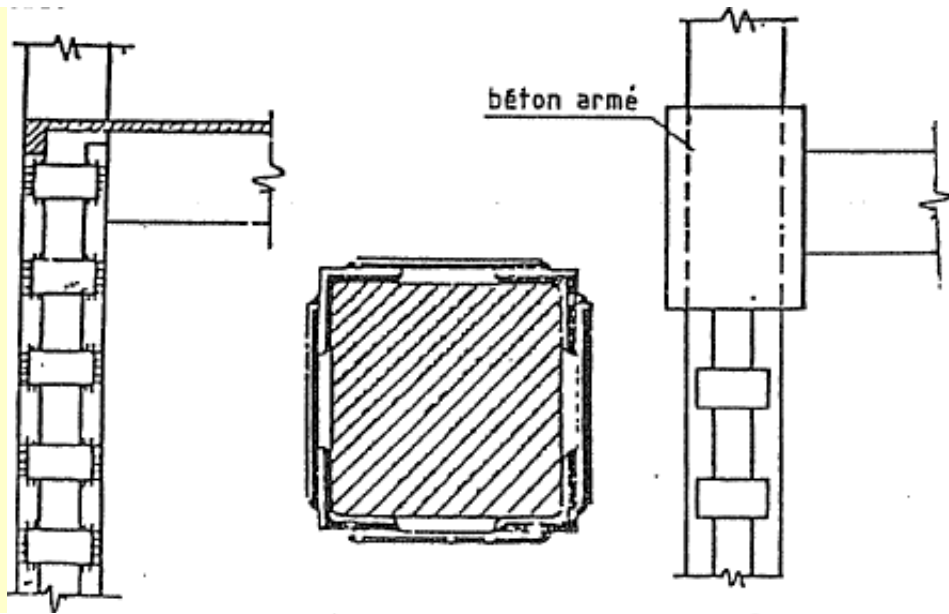
Non précontraintes: reprise de  $Q$  seulement



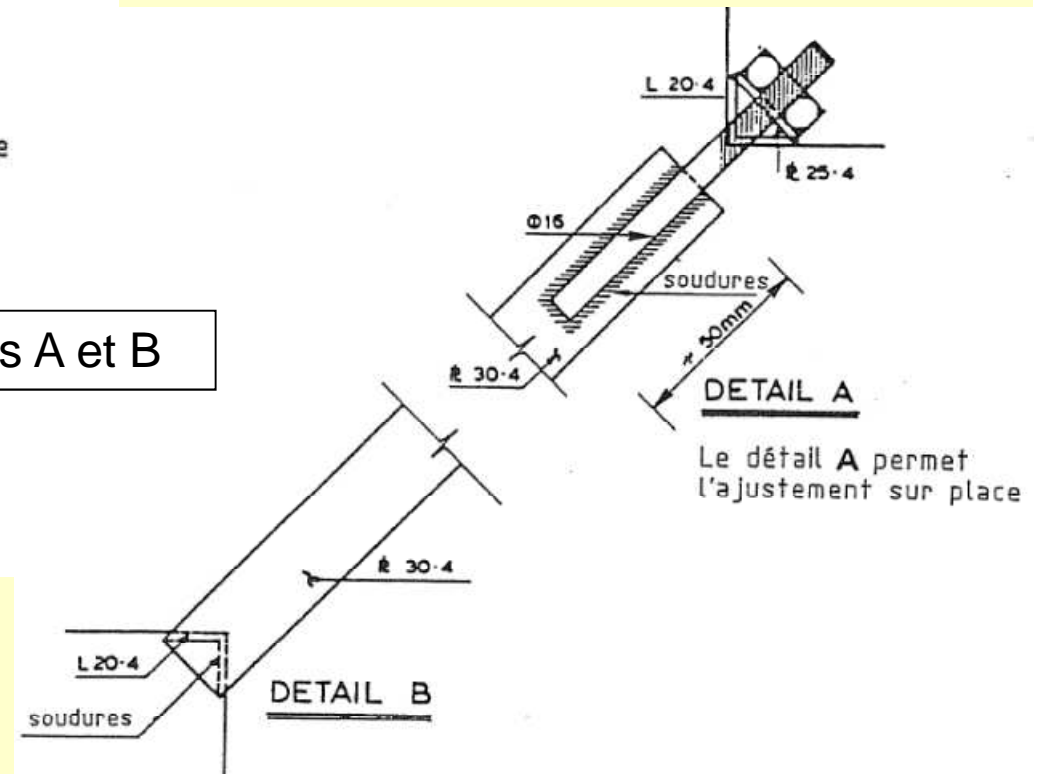
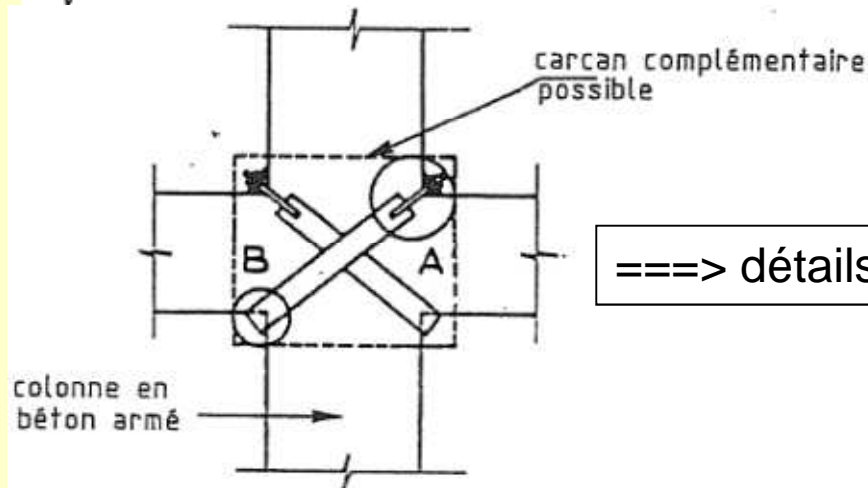
## Renforcement de colonnes endommagées

- 4 cornières aux 4 coins de la colonne  
=>apport de résistance en compression et en flexion
- Collaboration des cornières à la reprise de compression de la colonne  
pré-compression par coins  
ou surlongueur et vérinage
- Carcans sur la hauteur de l'élément  
armature transversale extérieure pour la reprise de l'effort tranchant  
augmentation de la résistance du béton par frettage





## Renforcement de colonne et noeud poutre-colonne



### Solution efficace

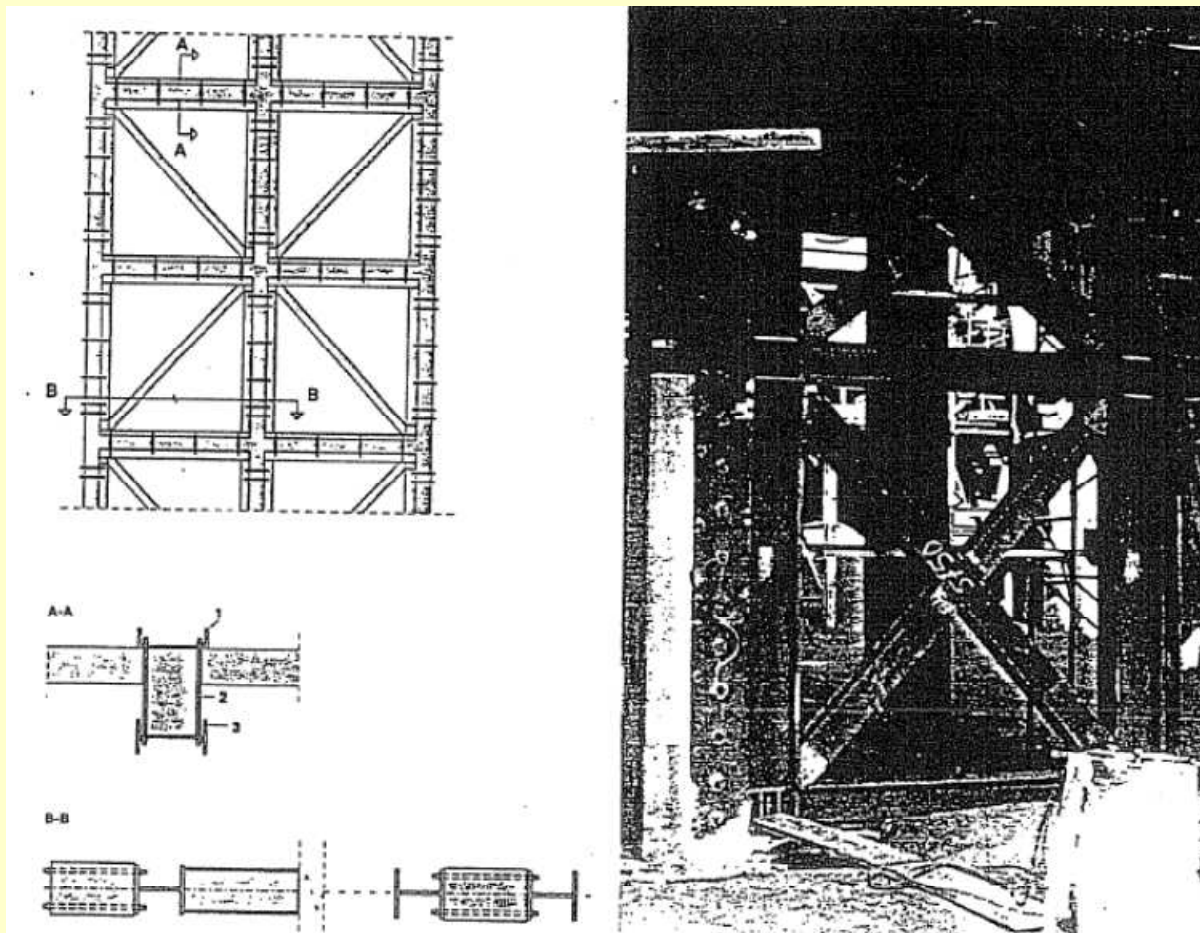
- si des bielles de compression sont mobilisables au noeud  
=> noeud non fissuré
- ou noeud réparé par injections préalables à la mise en place des carcans

## Renforcement d'une ossature en portique BA par des triangulations centrées

Augmentation de la résistance d'une structure en béton armé aux forces horizontales par des triangulations des cellules rectangulaires de portique

En transformation de bâtiments existants      Raisons d'usage ou de sécurité  
Renforcement antisismique

Exemple : insertion de diagonales métalliques + renforts de poutres et colonnes

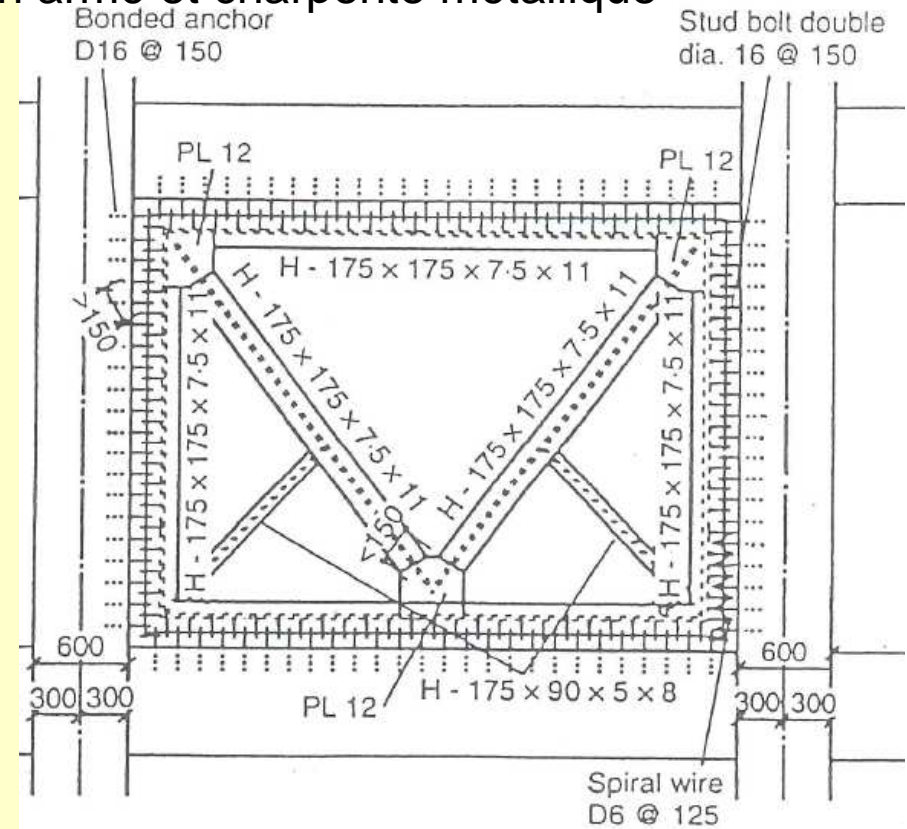
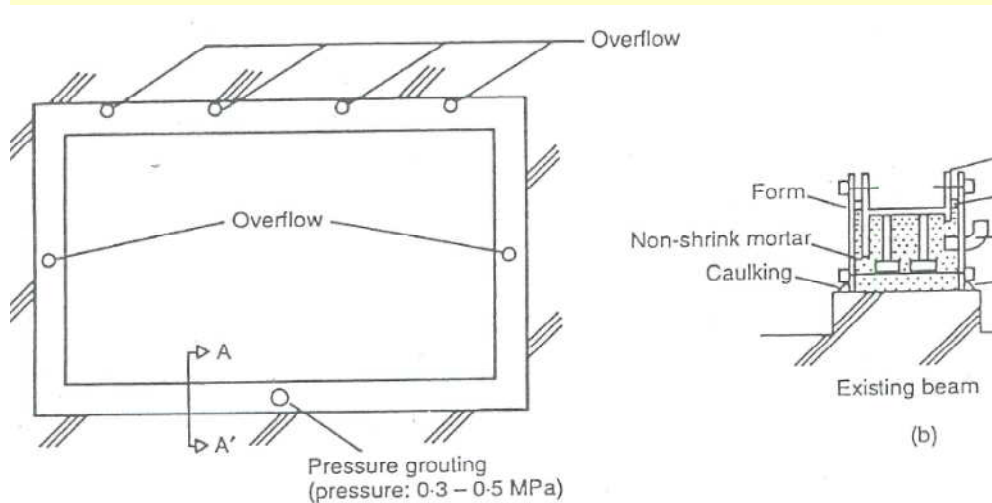




## Renforcement d'une ossature en portique par des triangulations centrées

### Triangulation dans le plan des portiques BA

! Assurer la continuité de matière entre béton armé et charpente métallique  
peut être coûteux



## Renforcement d'une ossature en portique par des triangulations centrées

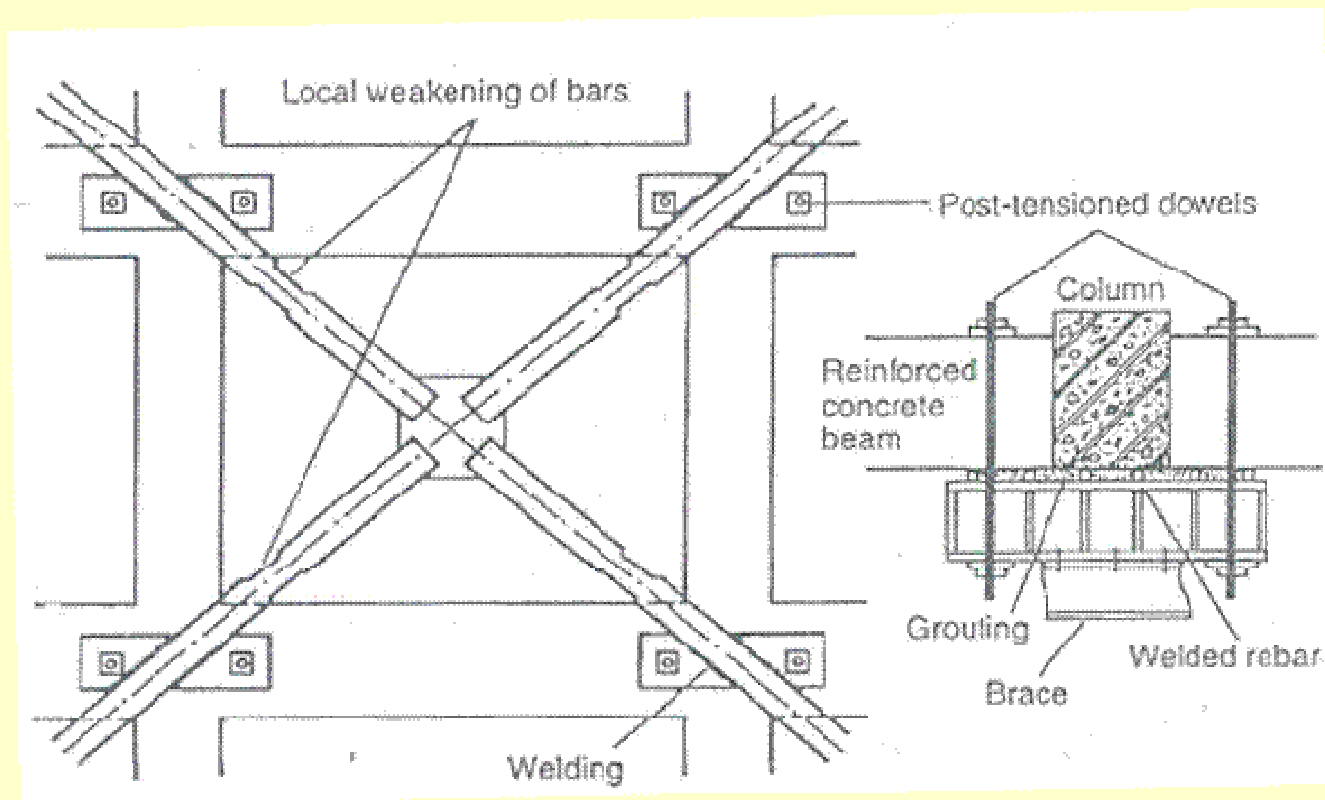
### Triangulation hors du plan des portiques BA

la charpente métallique dans un plan parallèle au portique en béton armé

- Simplification d'exécution:
- Mais flexion parasites résultant de ce décalage des plans

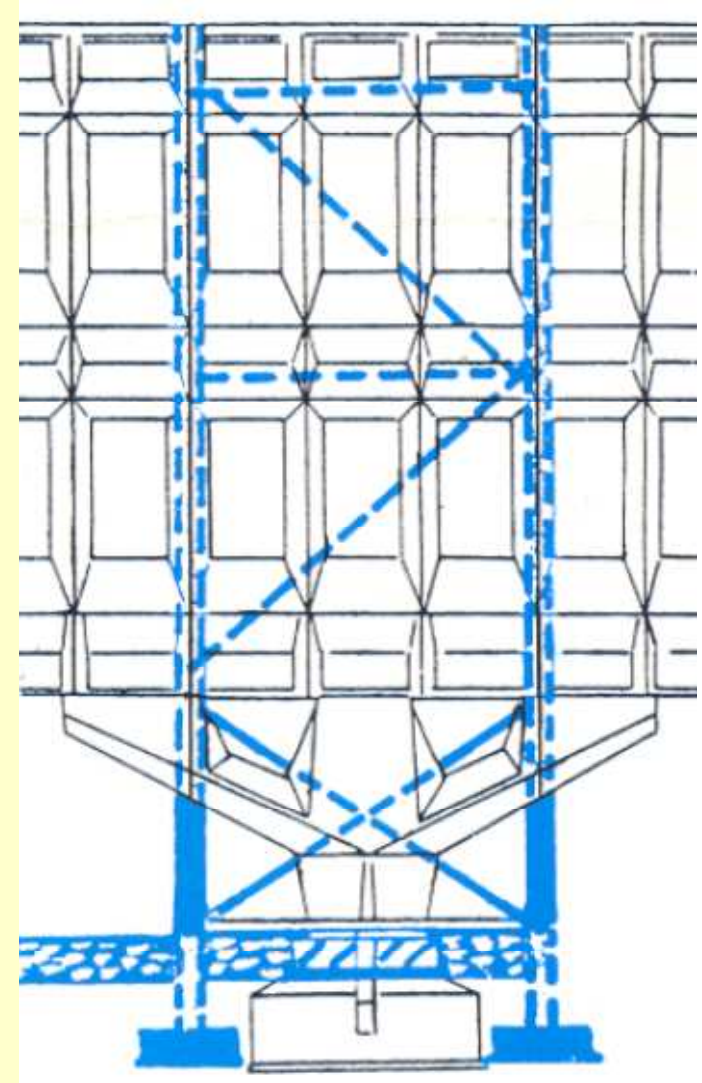
⇒ assemblages pour reprendre ces flexions

⇒ Vérifications des barres en flexion composées



## Renforcement d'une ossature en portique par des triangulations centrées

Exemple: bâtiment IBM – La Gaude - France



Renforcement  
d'une ossature en portique  
par des triangulations centrées

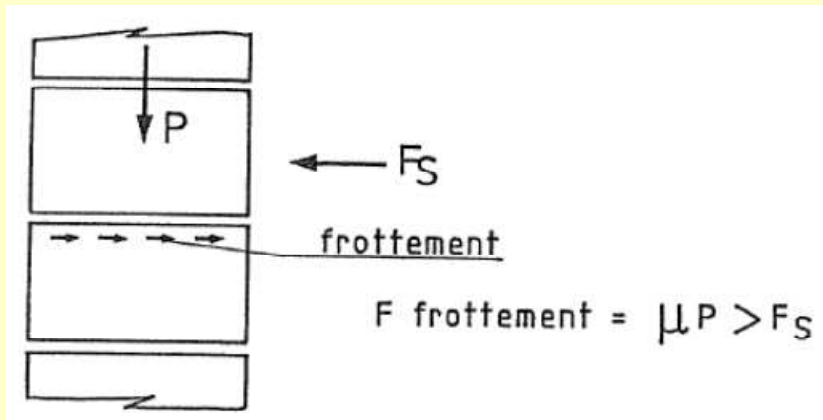
Exemple: bâtiment IBM – La Gaude  
France



# Réparation des ouvrages en maçonnerie

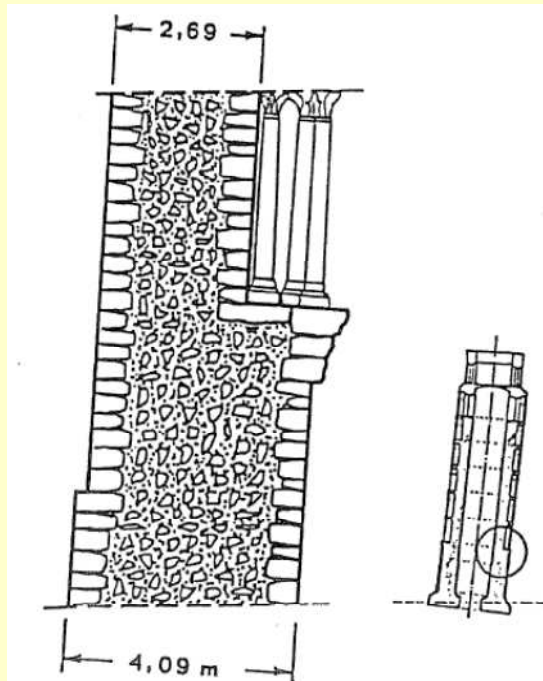
## *Réparations structurales*

## Maçonneries Caractéristiques spécifiques



force verticale = une précontrainte  
*Utilité du frottement*

*Humidité*  
= réduction du coefficient de frottement  $\mu$   
= réduction de résistance



*Les murs anciens ne sont pas homogènes*

*Coupe dans un mur ancien (Pise)*

## Maçonneries

### Caractéristiques spécifiques

Taux de travail moyen : faible

1/10 contrainte de rupture

Logique, car: ● distribution réelle des contraintes mal connue

- hétérogénéité interne    modules d'élasticité différents joints-briques  
variabilité des mortiers  
variabilité dimensionnelle des composants...
- hyperstaticité interne

### Vérifications

= des ordres de grandeur

déterminés dans un cheminement simplifié des forces statiquement admissibles

### Réparations de base :

Assurer la continuité de la matière

Rejointoyage

Injection

Remplacement des éléments dégradés

## Vérification de stabilité

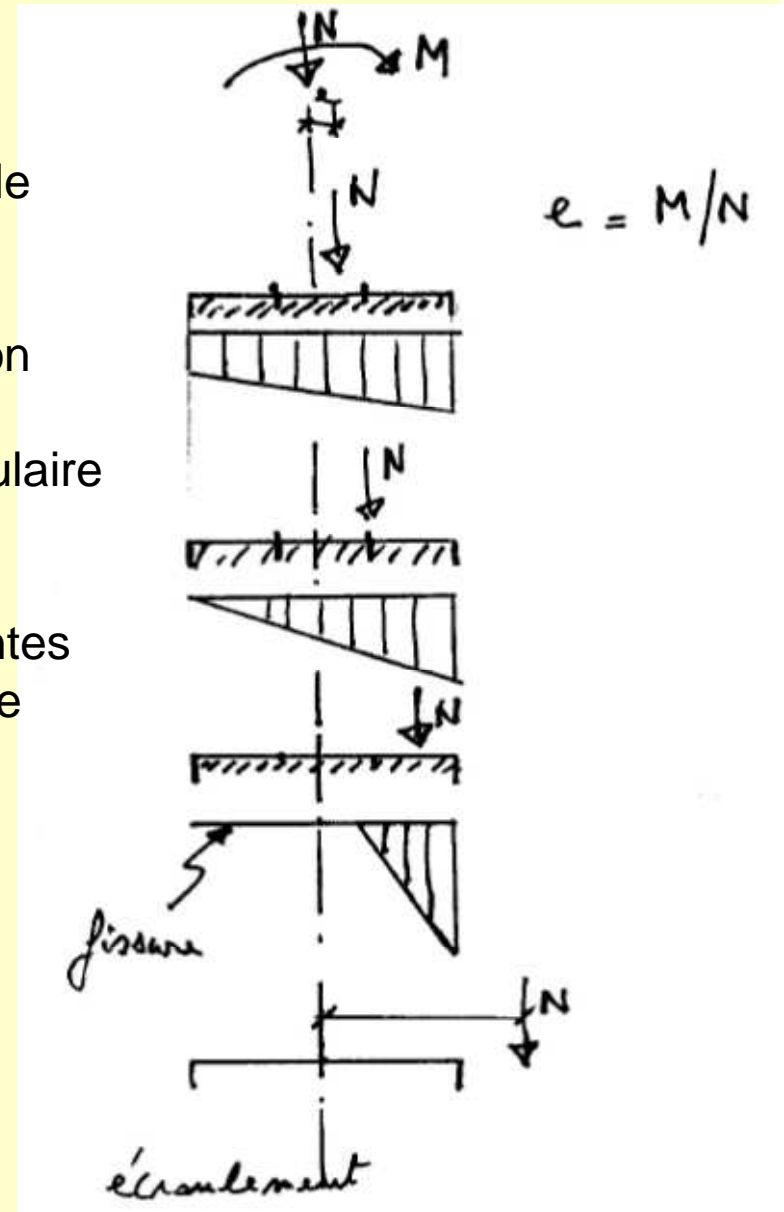
= trouver un système de force en équilibre avec les charges extérieures

= statiquement admissible

Les maçonneries ne résistent pas à la traction :

=> compression  $N$  à l'intérieur des sections  $M=Ne$

- $N$  dans le noyau central  
=> contraintes de compression sur toute la section
- $N$  à la limite du noyau central, distribution triangulaire
- $N$  hors du noyau central mais dans la section  
=> équilibre distribution triangulaire des contraintes  
Vérifier : contrainte max < contrainte limite  
ouverture de fissures côté traction
- $N$  hors de la section : effondrement.





## Essentiel: la géométrie => N dans le noyau central des sections

notion de **ligne des pressions**

Réduction de l'importance relative des flexions

=> Réduction de  $e=M/N$  en augmentant N

dans les voûtes des charges de poids mort

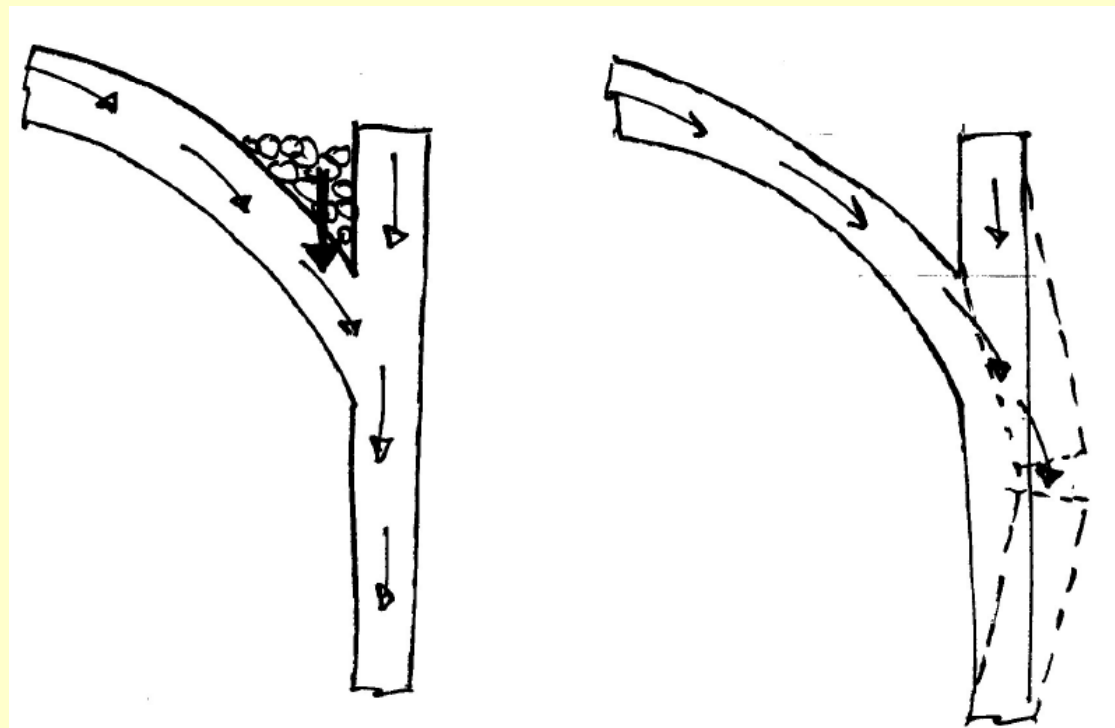
=> ligne des pressions dans la maçonnerie

*une forme de précontrainte, réalisée par des poids, de l'antiquité à nos jours*



### Exemple de précaution

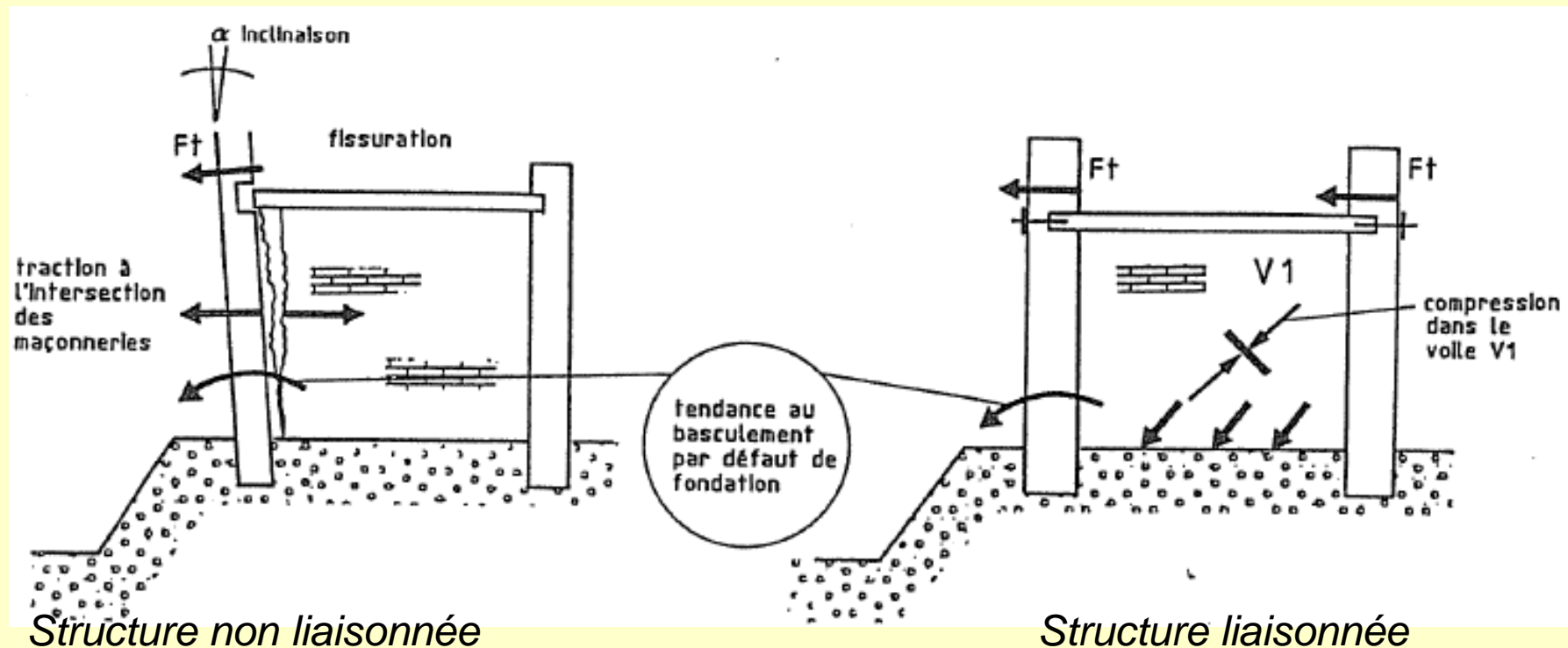
- Ne pas évacuer les matériaux pierreux disposés au-dessus d'une voûte
  - les enlever = réduire N  
= augmenter e
- ⇒ fissurations  
⇒ effondrement

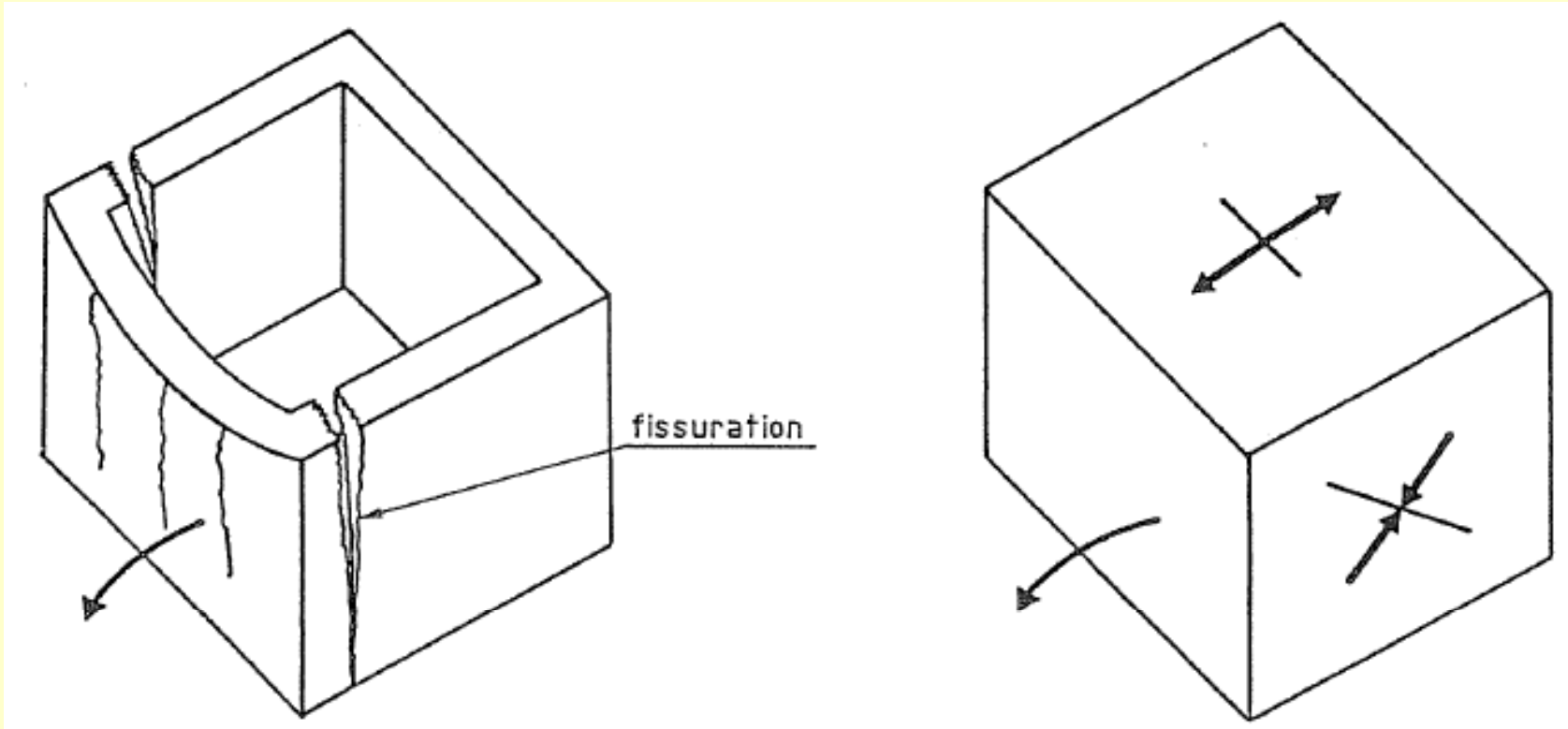


## Assurer la stabilité globale = d'abord stabiliser la géométrie de l'ouvrage

Constructions conçues pour supporter des actions essentiellement verticales

- Une structure en maçonnerie faite de murs et de planchers est stable si elle constitue une « **boîte fermée** »
  - planchers = diaphragmes = faces horizontales de la « boîte »
  - liaisons positives entre les éléments horizontaux et verticaux
- Distribution des murs assez uniforme pour éviter les effets de torsion  
Plus importante que hors plomb ou fissuration
- Objectif structural premier : "**fermer la boîte**"





*Boite ouverte*

*Boite fermée*

## Forage de trous dans les maçonneries

Non traumatisante

Sans fissures

- Structure instable, sensible aux vibrations, roches tendres ou de briques  
forage à l'aide d'un carottier diamanté
- Structures plus massives  
forage électrique rotatif avec percussion
- Structures massives roches ou briques dures si trous profonds nécessaires  
forage à l'aide d'outils pneumatiques à percussion

## REJOINTOIEMENT.

Doit permettre aux efforts de se transmettre convenablement  
d'un élément de la maçonnerie à l'élément voisin

Objectif : combler les vides entre pierres ou briques  
par un matériau présentant résistance et l'adhérence adéquates

### Rejointoiement manuel

Réfection de maçonneries localement dégradées

traitement des joints étroits <1cm

Humidification des joints et regarnis sur la profondeur dégarnie

bouillage au fer =>adhérence du joint

lissé au fer ou à la truelle

## **Rejointoiement mécanique**

Réfection de maçonneries dégradées sur des surfaces importantes  
= projection de béton => voie sèche ou voie mouillée

### **Voie sèche**

- Compactage énergique vitesse de sortie du produit
- Rejointoiement profond: 20 à 25cm contre 15cm au plus en voie mouillée.  
exige des joints larges d'au moins 2 à 3cm
- Résistance mécanique et adhérence élevées
- Traitement des parties en plafond (intrados d'une voûte par exemple)
- Dosage en ciment 300 à 350 kg/m<sup>3</sup> de mélange sec

### **Voie mouillée**

- Rejointoiement limité à 15cm de profondeur
- Joints moins larges < 2 cm
- Résistance mécanique et l'adhérence moins élevées
- Traitement de parties en plafond : précautions grandes, utilisation d'un raidisseur
- Le dosage en ciment 400 à 450 kg/m<sup>3</sup>  
Risques de fissuration par retrait plus accentuées  
Plus propre

## **Préparation des joints**

- Dégarnissage : atteindre la partie saine du joint
- Joints épais (plus de 1 cm) dégarnis mécaniquement  
burin pneumatique disque abrasif
- Joints étroits dégarnis manuellement au burin et au marteau
- Joints de consistance insuffisante peuvent être dégarnis à l'eau sous pression
- Profondeur minimale du dégarnissage : 5cm moellons 3cm briques
- Dégarnissage par zones successives  
Chaque dégarnissage et nettoyage immédiatement suivi du rejointoiement  
Parfois : calage provisoire entre pierres ou briques  
pour conserver la géométrie de la construction
- Dégarnissage suivi d'un lavage

## **Rejointoiement**

En alternance avec le dégarnissage

### **Cas d'un mur**

- Projection en une seule passe jusqu'à refus
- du bas vers le haut pour ne pas souiller les parties à traiter ultérieurement

### **Cas d'une voûte**

- Dans l'ordre piédroits reins clé
- Joints larges et profonds dans les zones de rein et de clé
- 2 passes pour éviter la décompression et le décollement du mortier sous poids propre

## Matériaux de rejointoyage

- le + courant : mortiers liant ciment ou chaux hydraulique ou aérienne ou mélange
- ciment Portland à éviter risque de taches inesthétiques  
car ajout = laitier ou cendres volantes
- Paramètre du choix protection de la structure  
esthétique couleur forme
- Dosage indicatif rejointoiement mécanique par projection:  
400 à 500 kg/m<sup>3</sup> voie mouillée,  
300 à 350 kg/m<sup>3</sup> voie sèche.
- Granulat : sable tamisé et lavé, de bonne qualité et d'origine alluvionnaire
- Eau mortier mis en place onctueux non coulant.
- Produits spéciaux => essai de convenance

## REPARATION PAR INJECTION.

### Produits d'injection.

- réparation minimale des fissures= coulis de ciment      intégrité et raideur initiale
- fluidité suffisante      résistance élevée  
faible retrait      caractéristiques stables dans le temps
- mortier courant + silice très fine ou pouzzolane      rapport eau/ciment <0,8
- adjuvants fluidifiants et anti-retrait
- quantité de granulats 10% du ciment      dimension granulats < 0,4 x largeur fissures
- Fissures très fines => résines epoxy
- mortiers "rhéoplastiques" avec polymères de synthèse  
limitation du retrait  
1,5 à 3 litres par 100kg de ciment  
fluidité aisément obtenue      rapport E/C faible (0,4 à 0,5)  
résistance = + 20%  
amélioration de l'adhérence





**RENFORCEMENT DE MACONNERIE**  
**PAR DES ARMATURES DE COUTURE**

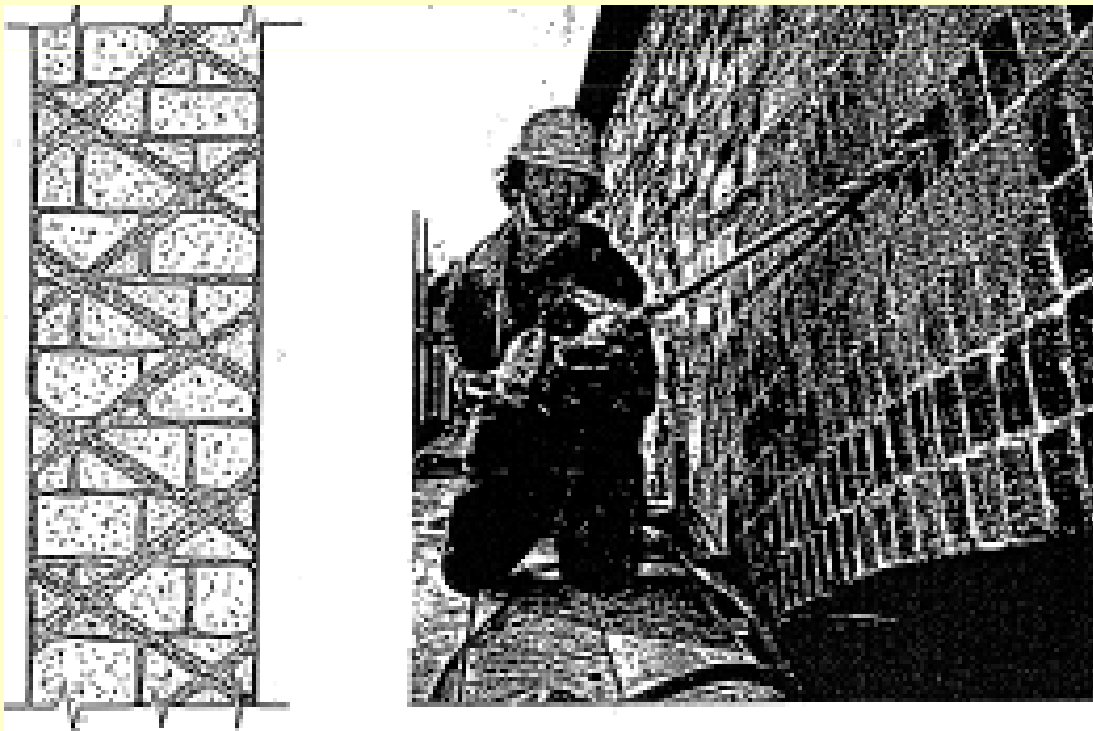
## RENFORCEMENT DE MAÇONNERIE PAR DES ARMATURES DE COUTURE.

Insertion d'un maillage de barres métalliques dans la maçonnerie  
recoupant les fissures ou les zones affaiblies

Trous de diamètre 35 à 50 mm forés, puis injectés d'un coulis de ciment ou de résine  
Barres de diamètre 16 à 30 mm

Ne modifie ni l'esthétique, ni la statique de départ

S'applique aux parois épaisses: murs de petits moellons d'épaisseur > 50 cm  
murs de briques d'épaisseur > 30 cm



Similaire  
au béton armé de fibres

Augmente la résistance en cisaillement et en traction, mais difficile à quantifier

Longueur des trous: 3 à 4 x épaisseur de paroi

Nettoyer les débris par jets d'eau ou d'air

Eviter la formation de plans de coupure préférentielle

=>forages d'orientations différentes

Armatures à adhérence améliorée

Nombre d'armatures de couture: 3 à 4 trous par m<sup>2</sup>

Coulis d'injection : normalement à base de ciment Eau/Ciment de 1,0 à 1,5

Injection à faible pression 0,1 à 0,2 Mpa

Champ d'application vaste

Renforcement de zones très localisées

angles de mur, jonction entre murs et planchers

Renforcement de parois entières

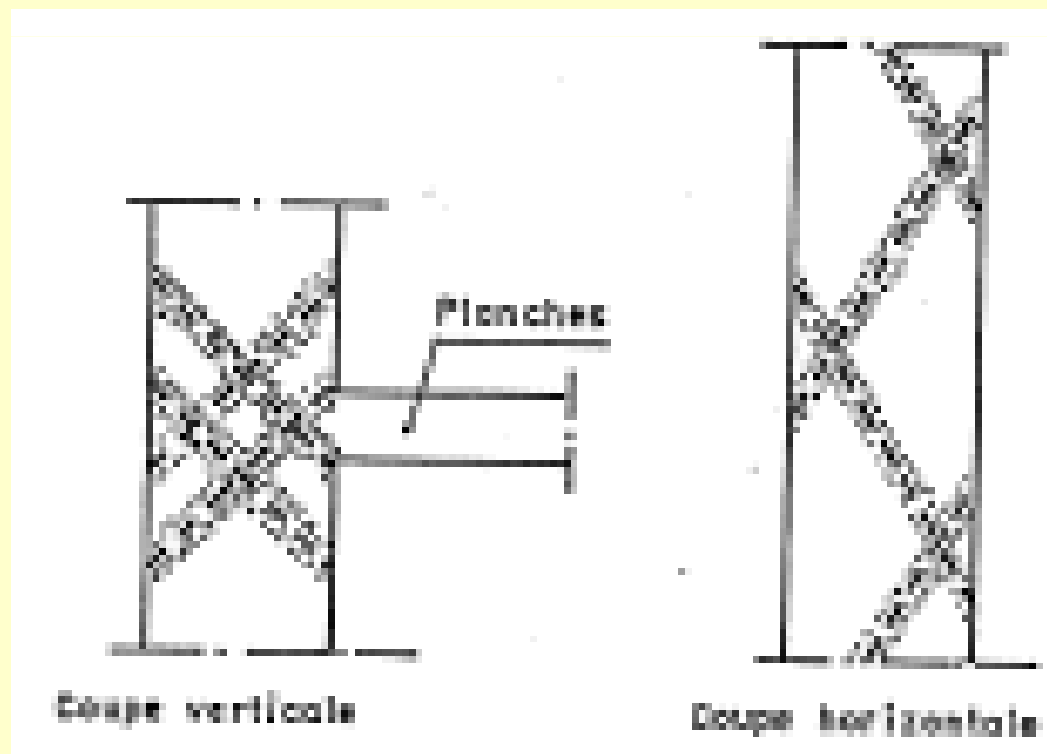
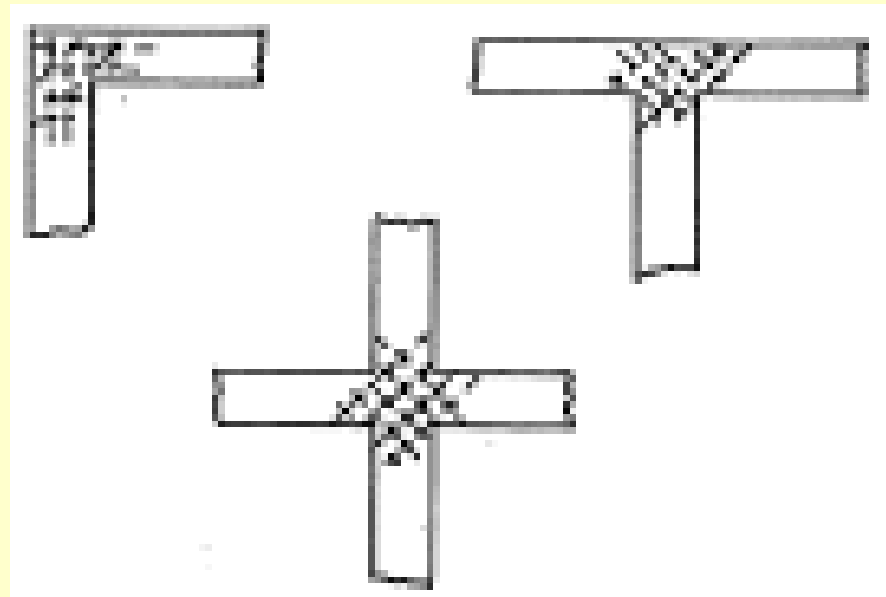
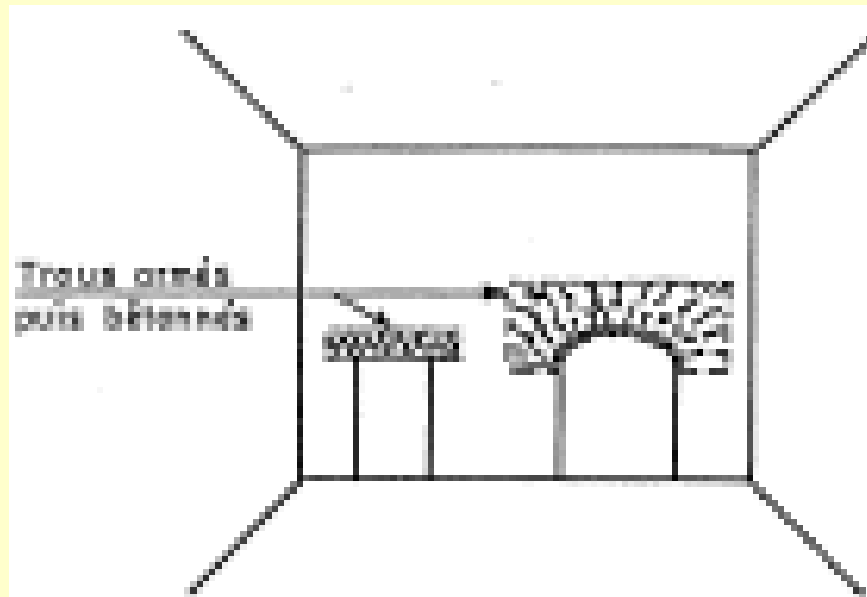
Renforcement des piles de ponts fissurées par tassements différentiels, sous dimensionnées, surchargées, ...

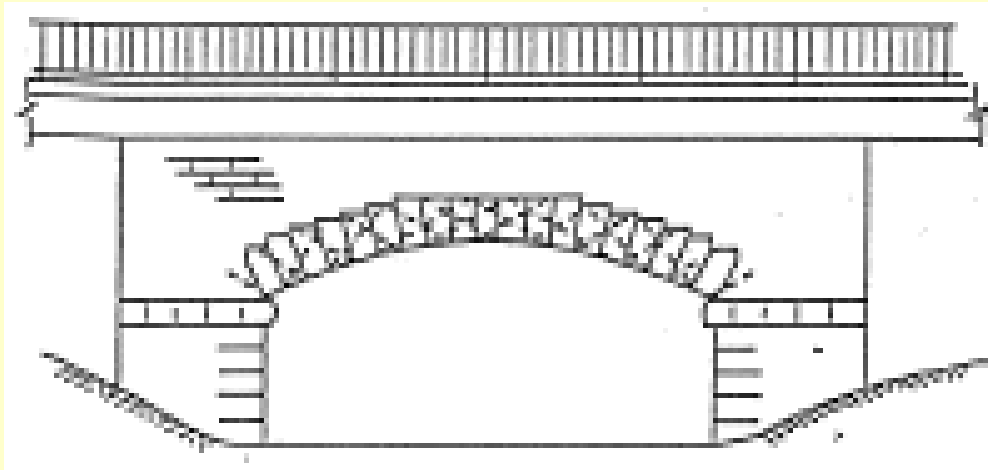
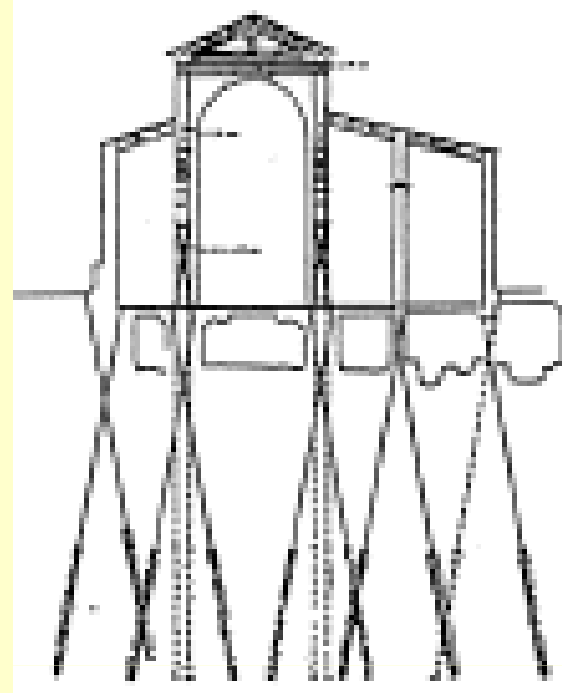
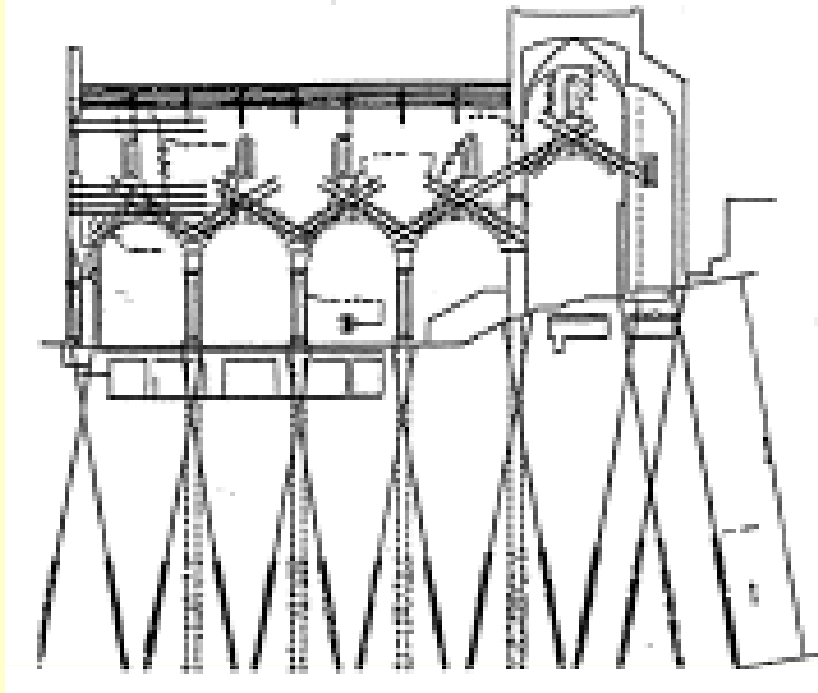
Consolidation d'arcs pour réduire leur déformabilité.

Renforcement de tunnels affaiblis par des mouvements de terrain.

Renforcement de murs surchargés par la consolidation de sol à l'arrière.

Liaisonnement de parties dissociées de structure.





**RENFORCEMENT DES MACONNERIES**  
**PAR DES ELEMENTS EN BETON ARME**

## RENFORCEMENT DE MAÇONNERIE PAR DES ELEMENTS EN BETON ARME

Les renforts: poutres ou équerres en béton armé traversant la zone fissurée à l'intérieur ou non du volume apparent de la maçonnerie existante

Recouvrement de la maçonnerie à réparer par 1 ou 2 couches de béton armé coulé ou projeté  
liaisons à la maçonnerie.

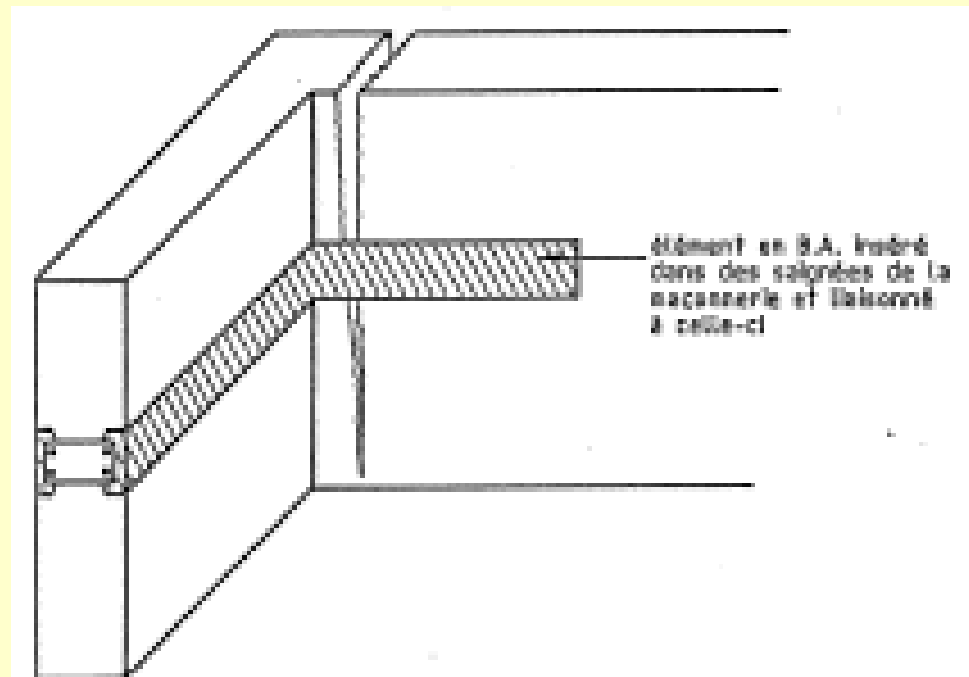
Efficacité dépendante de : soin d'exécution

mode de liaison au reste de la structure

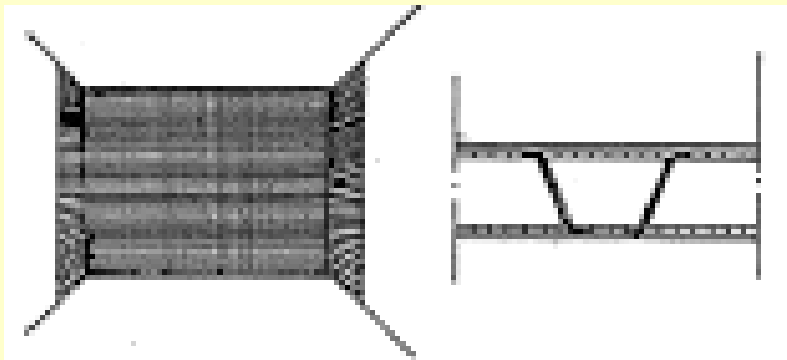
extensions > 50 cm des murs perpendiculaires

éventuellement liaison au plancher ou à la fondation

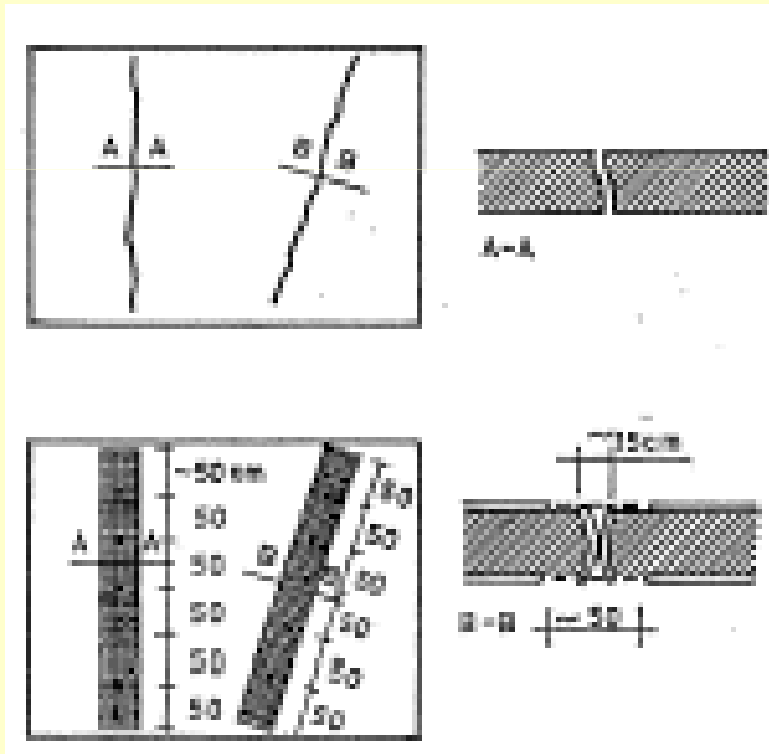
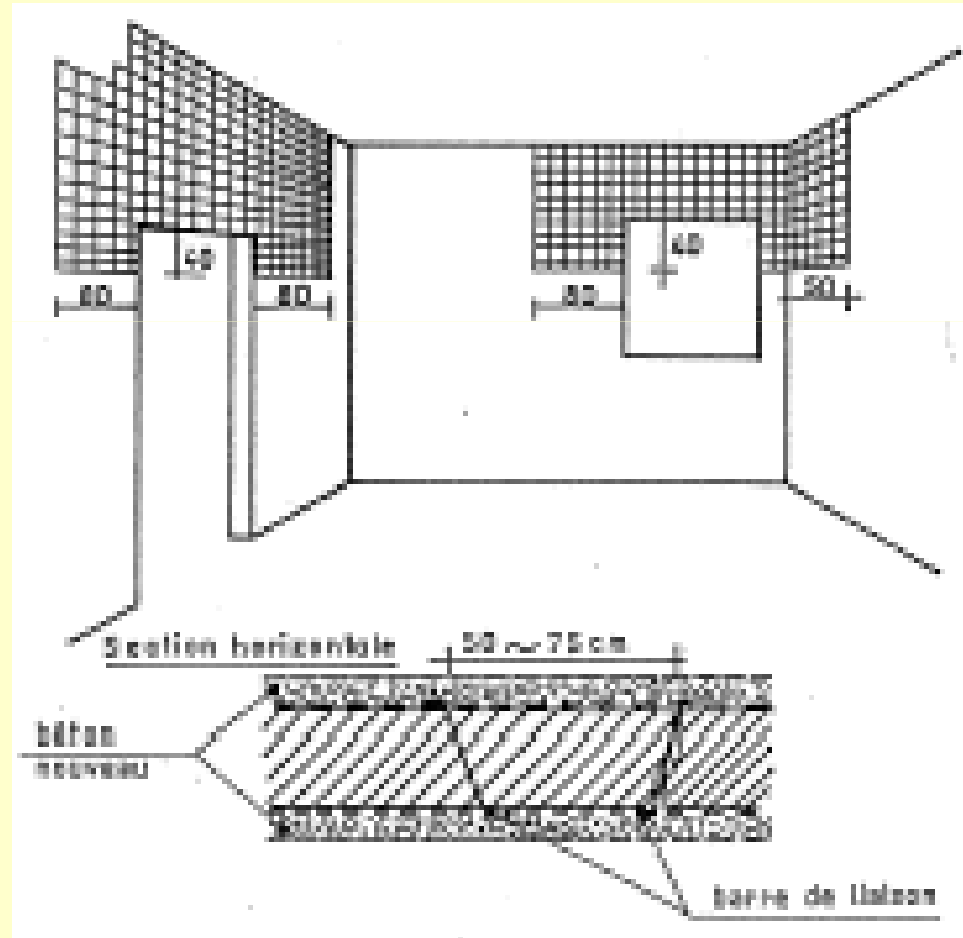
Inconvénient : modifie l'aspect du mur







Doublage complet



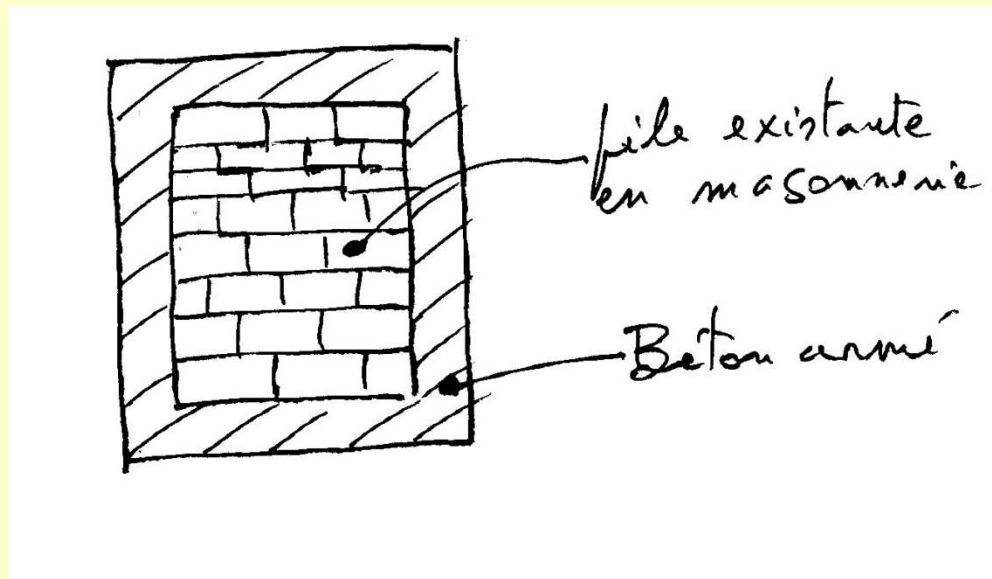
Doublage local

## Chemisage en béton armé d'une maçonnerie

Ceinture fermée enserrant tout ou partie d'ouvrage Ex.: pile de pont

Rôles : protection de surface contre les chocs, érosions et effets mécaniques  
contre les agressions hydrauliques ou atmosphériques  
éventuellement freinage des maçonneries => meilleure stabilité

Remplissage : béton traditionnel ou béton immergé, coulis ou injection de mortier



## Construction d'une contre-voûte sous une voûte dégradée

Voûte non adhérente => hypothèse de calcul : la contre-voûte supporte la totalité des charges appliquées à la voûte en cours de dégradation

=> substitution de structure portante plutôt que réparation

=> peut être préfabriquée et ripée sous l'ouvrage ancien ou mise en oeuvre par coulage

Voûte adhérente => participe à la reprise des efforts appliquée à la voûte confortée

=> des appuis transmettant aux fondations les charges

Contre-voûte coulée : épaisseur min 25 à 35 cm

en béton projeté avec armatures épaisseur 10 à 15 cm, max 20 cm

Adhérence : béton projeté par voie sèche OK sans connecteurs

béton coulé: connecteurs nécessaires

## Phases d'exécution en béton projeté:

Réalisation des appuis de la contre-voûte

Forages et scellements d'armatures de couture (4 à 6  $\Phi$  8 à 12 /m<sup>2</sup>)

Sablage + nettoyage + humidification sous faible pression.

Projection d'une couche d'accrochage de 2 à 4 cm, comblement des cavités.

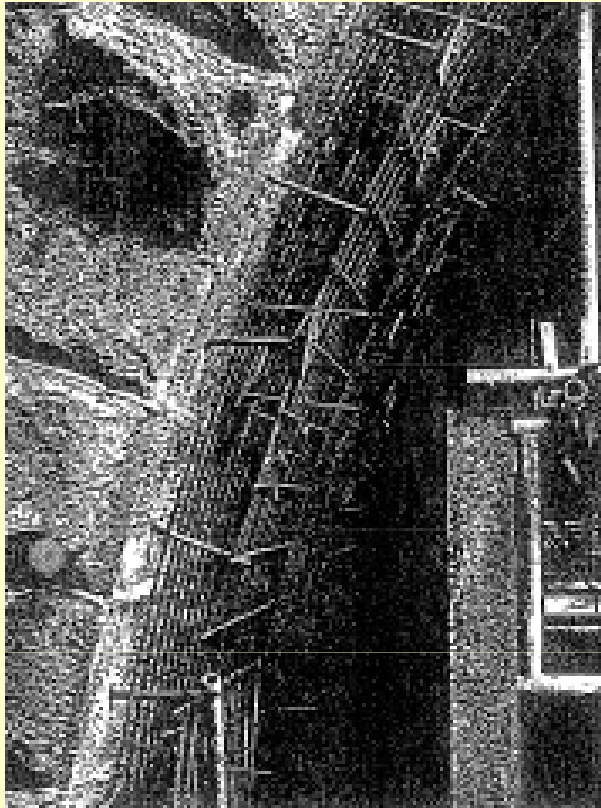
Fixation de la 1<sup>e</sup> et 2<sup>e</sup> nappe d'armature sur les supports.

Bétonnage par couches successives jusqu'à l'épaisseur prévue ;

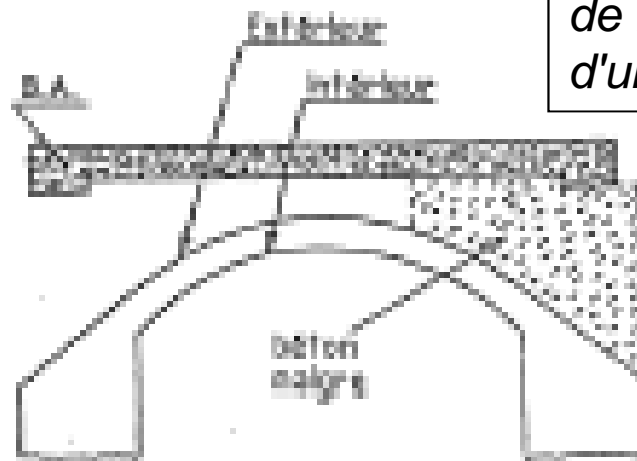
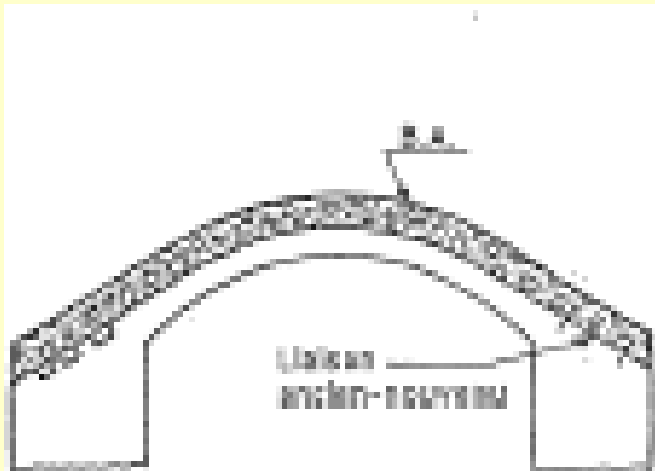
chaque projection est suivie d'une cure

Bétonnage dans l'ordre: piédroits, reins, clé

Arrêt de bétonnage : un chanfrein à 45°



*Renfort d'un arc en maçonnerie par un arc en béton projeté*



*Autres possibilités de renfort d'un arc en maçonnerie*

**RENFORCEMENT DES MACONNERIES**  
**PAR DES TIRANTS**

## REPARATION DE MACONNERIE AU MOYEN DE TIRANTS.

Deux objectifs :

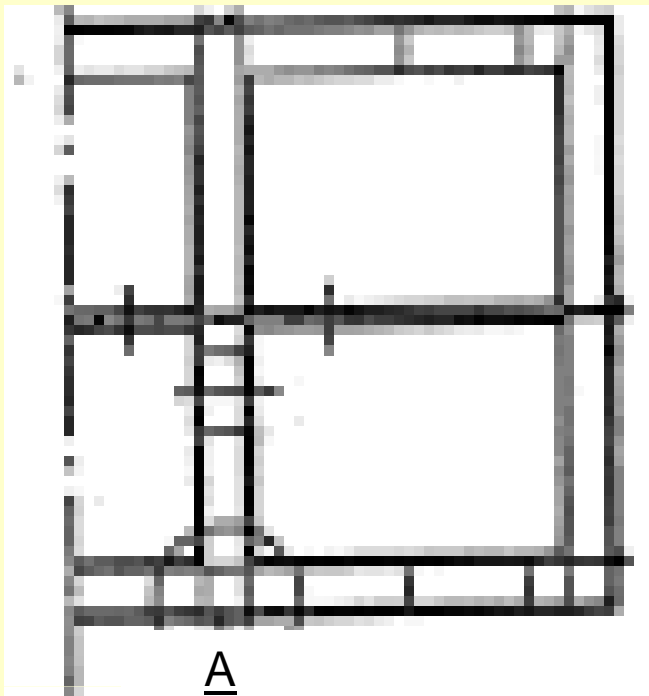
- assurer une liaison efficace entre les structures portantes (absence de diaphragme)
- et donc « fermer la boîte »
- éventuellement créer une compression qui  
réduit les tractions résultant des actions de service  
donne un comportement plus ductile à la construction.

Possibilités :      tirants horizontaux      verticaux  
                         tirants en acier                      tirants en béton précontraint

Le plus courant : barres de  $\Phi$  14 à 18 mm  
par paires de part et d'autre des murs

Section définie pour la résistance et la raideur ( limitation du déplacement relatif)  
=> grosses barres

Combinable avec la remise en état des maçonneries par injections



A

détail A

Coupe verticale

Tirants verticaux

Tirants horiz.

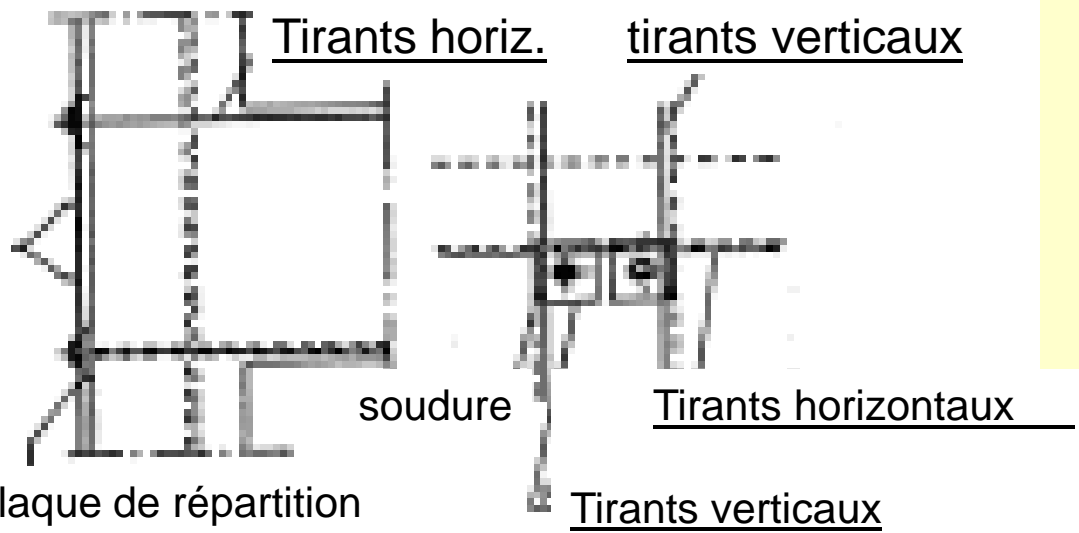
tirants verticaux

soudure

Tirants horizontaux

Plaque de répartition  
et tirant boulonné

Tirants verticaux



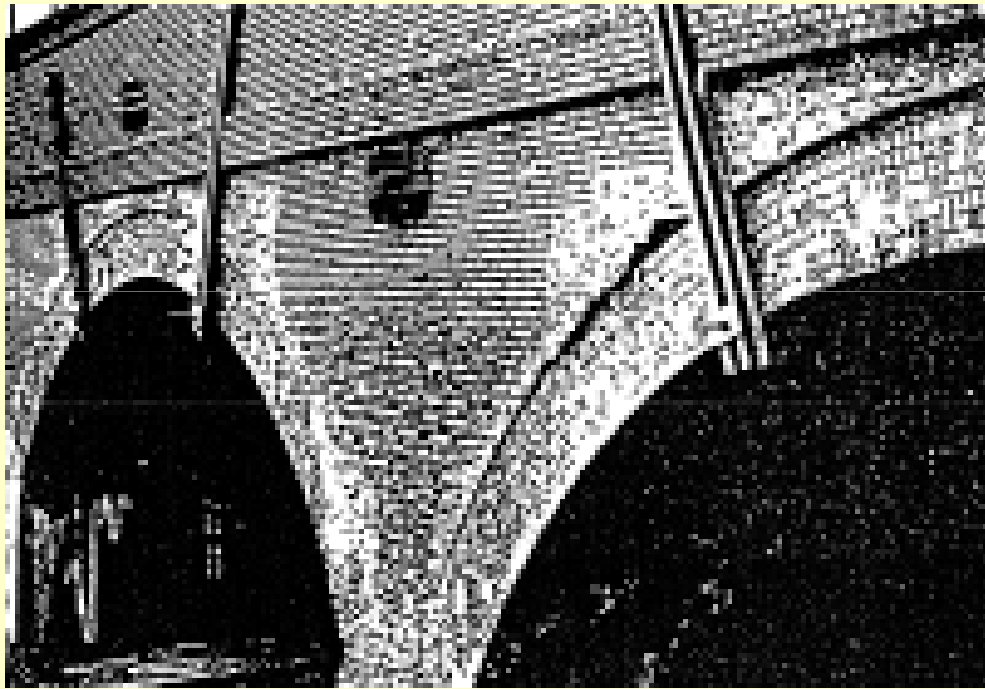
## Dans les ponts

Tirants souvent utilisés pour limiter les déformations transversales des bandeaux, des tympans

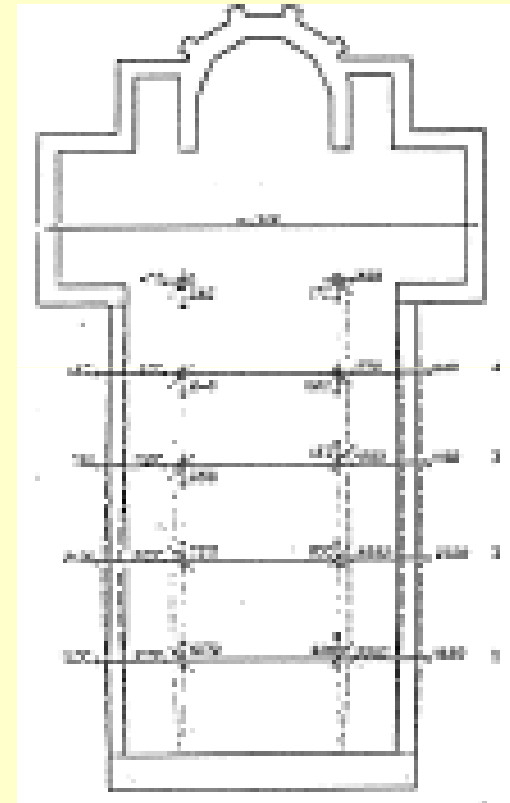
Les armatures peuvent être traversantes

scellées ponctuellement dans la maçonnerie

scellées sur toute la longueur



*Stabilisation des tympans d'une voûte  
par des tirants et poutres de répartition*



*Stabilisation par tirants  
de la cathédrale  
San Lorenzo à Perugia*



**RENFORCEMENT DES MACONNERIES**  
**PAR DES PLATS ET PROFILS ACIER**

# REPARATION DE MACONNERIE AU MOYEN DE PLATS ET PROFILS ACIER.

## Intervention locale

Piles en maçonnerie

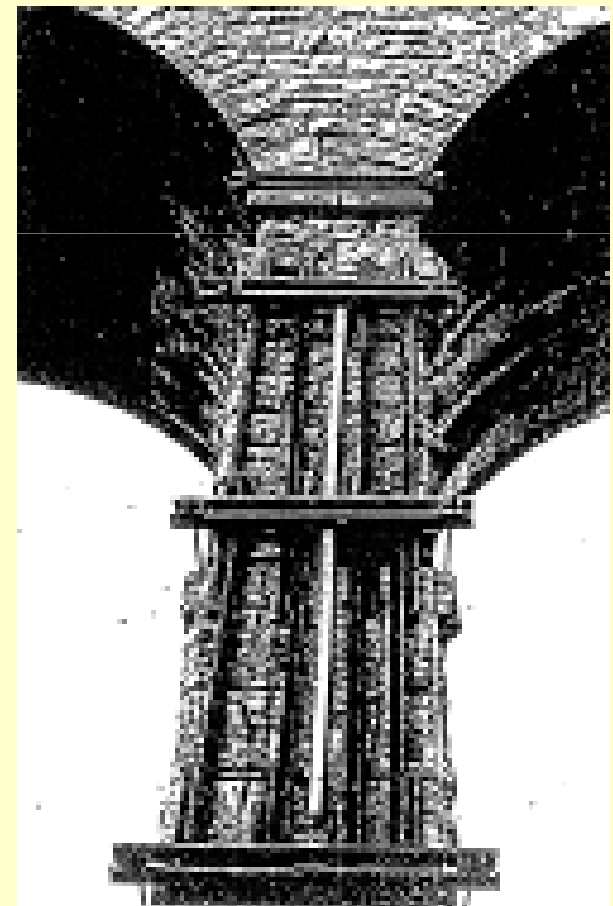
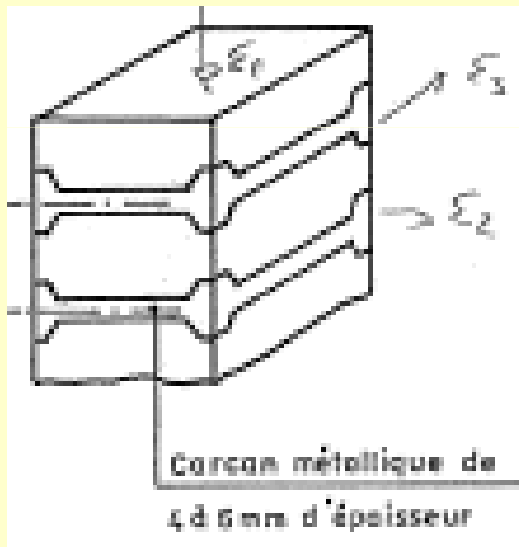
renfort historiquement très ancien

frettage par cerclage au moyen de carcans d'acier

Les plats d'acier peuvent être mis en traction

par boulonnage

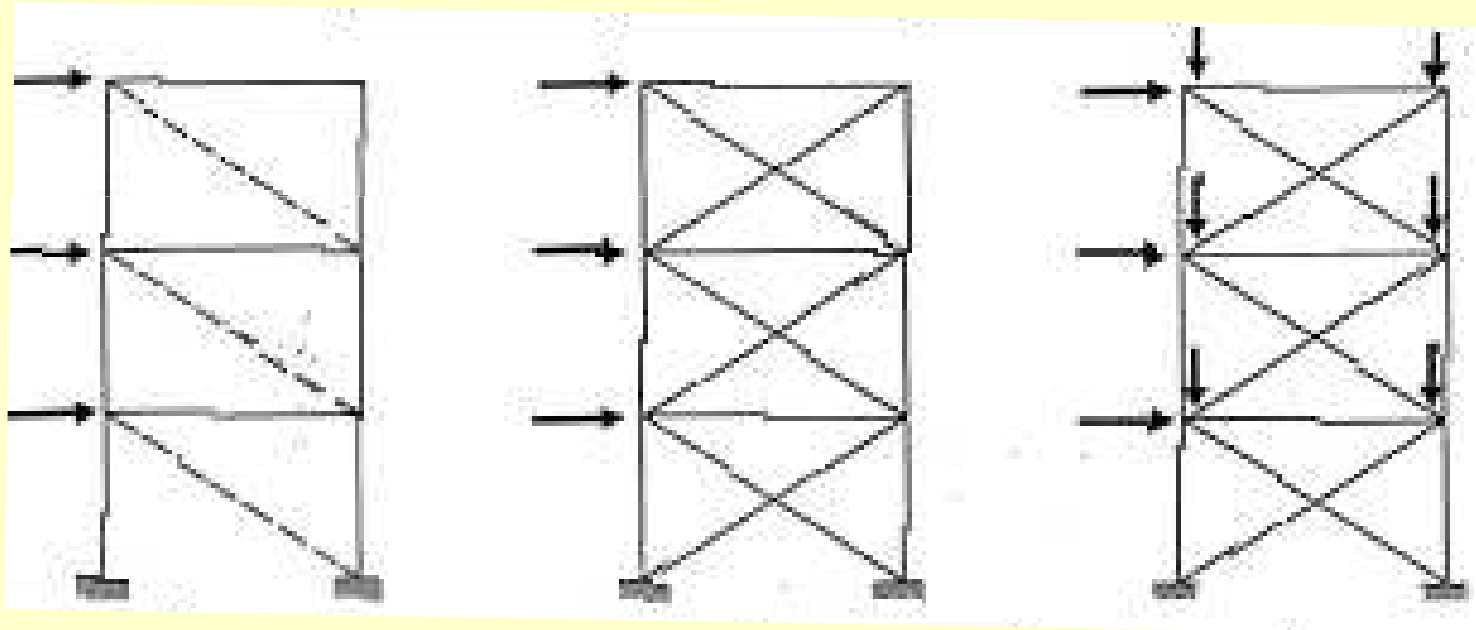
par soudage (retrait de soudage)



## DOUBLAGE PAR UNE STRUCTURE METALLIQUE

Le renforcement par une structure métallique demande un projet global  
Il faut envisager le schéma statique d'ensemble de la structure  
définir les compléments à apporter.

On peut calculer selon diverses hypothèses de partage des sollicitations  
entre structure ancienne et nouvelle .

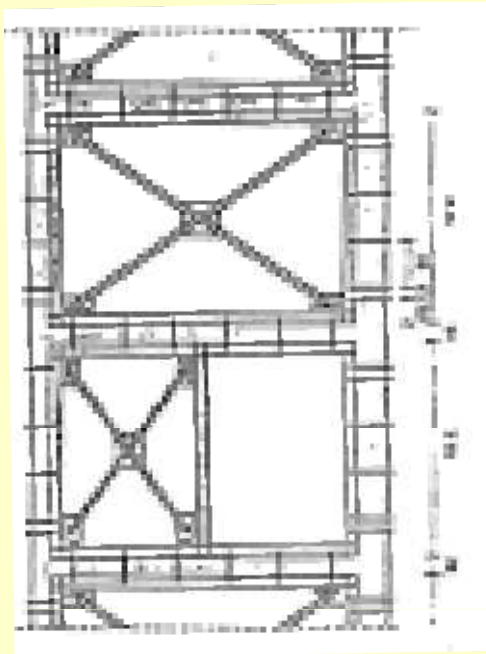


par contreventement avec  
diagonales en maçonnerie.

par contreventement avec  
diagonales métalliques.

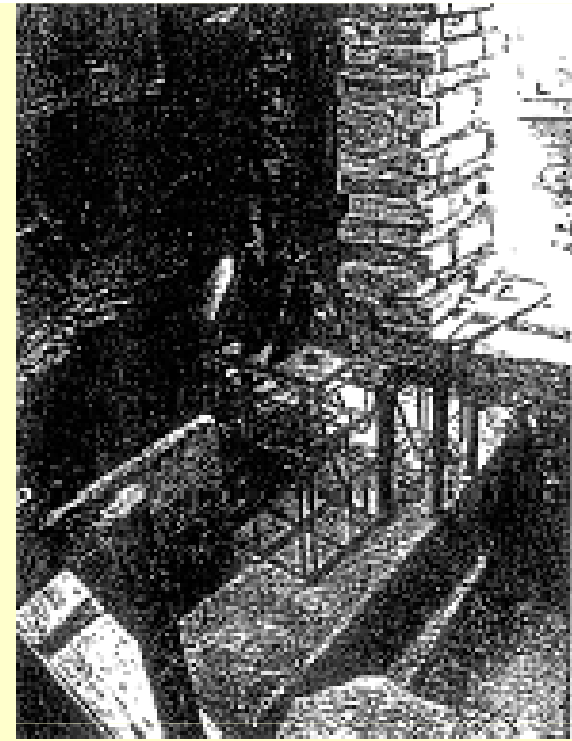
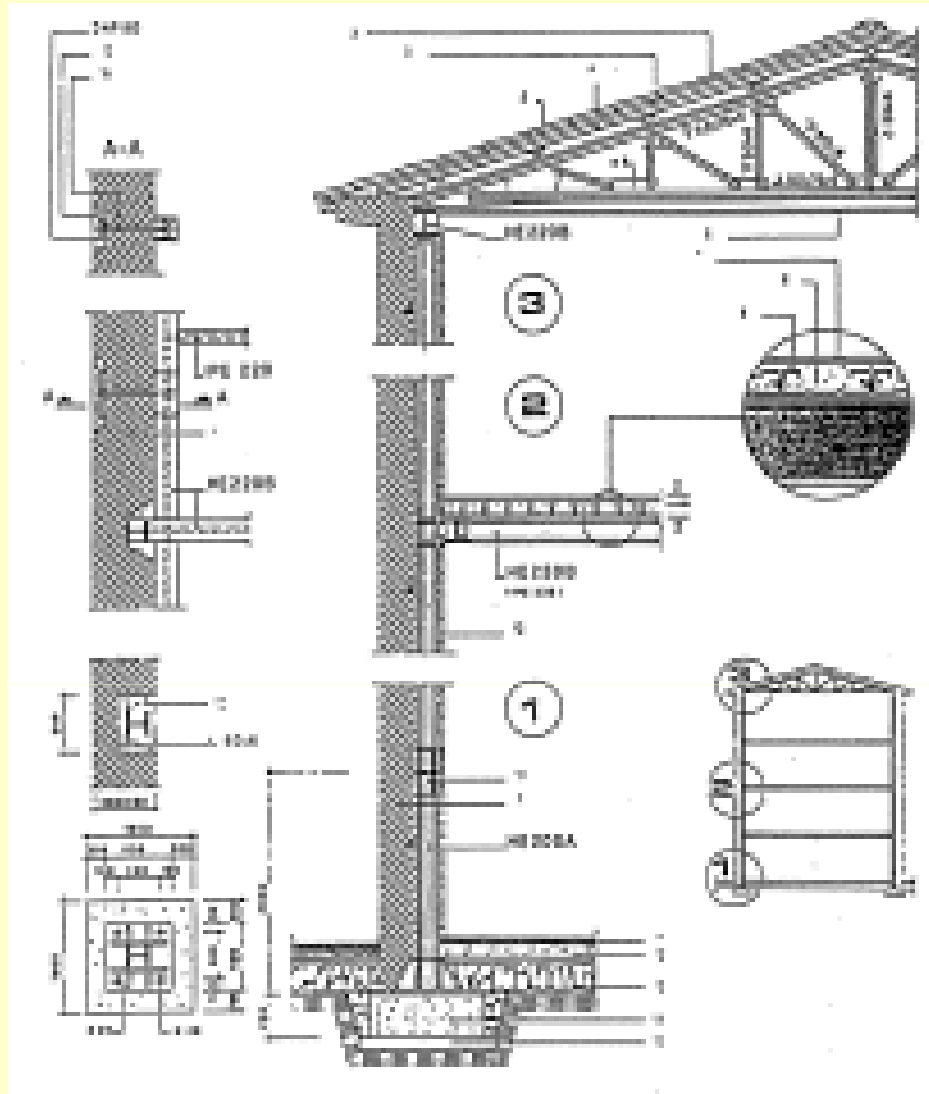
nouvelle descente  
de charges verticales  
+ contreventement

*Renfort d'un bâtiment  
pour la reprise  
des actions horizontales  
seulement*



*Renfort d'une voûte  
par un intrados  
et des pénédroits métallique*





**REPARATION**

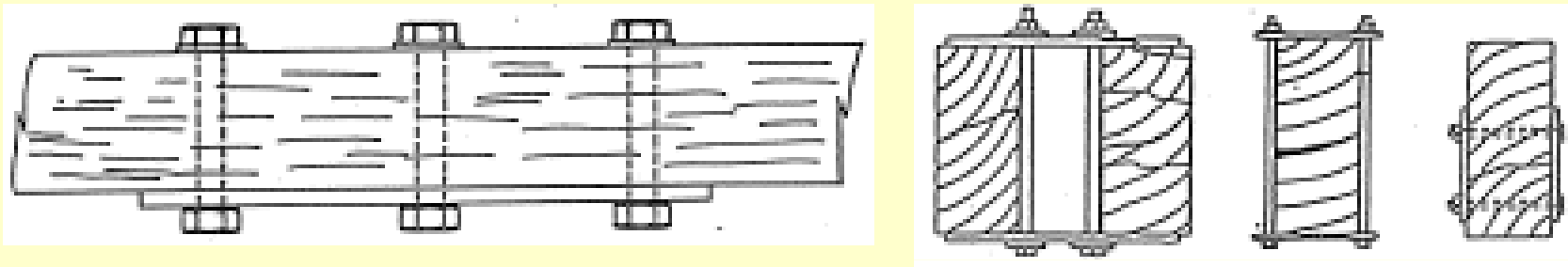
**DES CONSTRUCTIONS EN BOIS**

## REPARATION DES CONSTRUCTIONS EN BOIS. Généralités

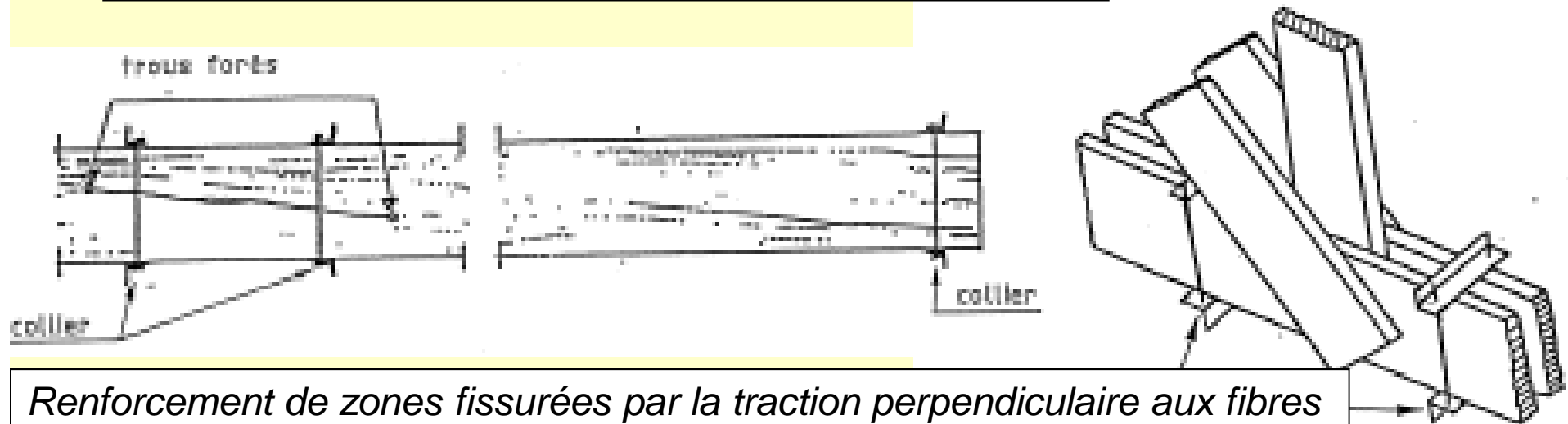
- Bois - matériau anisotrope      résistance ppd fibres  $\approx$  **1/10** résistance sens fibres
- éléments longilignes comme les profils acier => bonne association

### 2 méthodes de réparation/reinforcement

- ▲ Restituer la capacité portante locale à chaque élément de structure

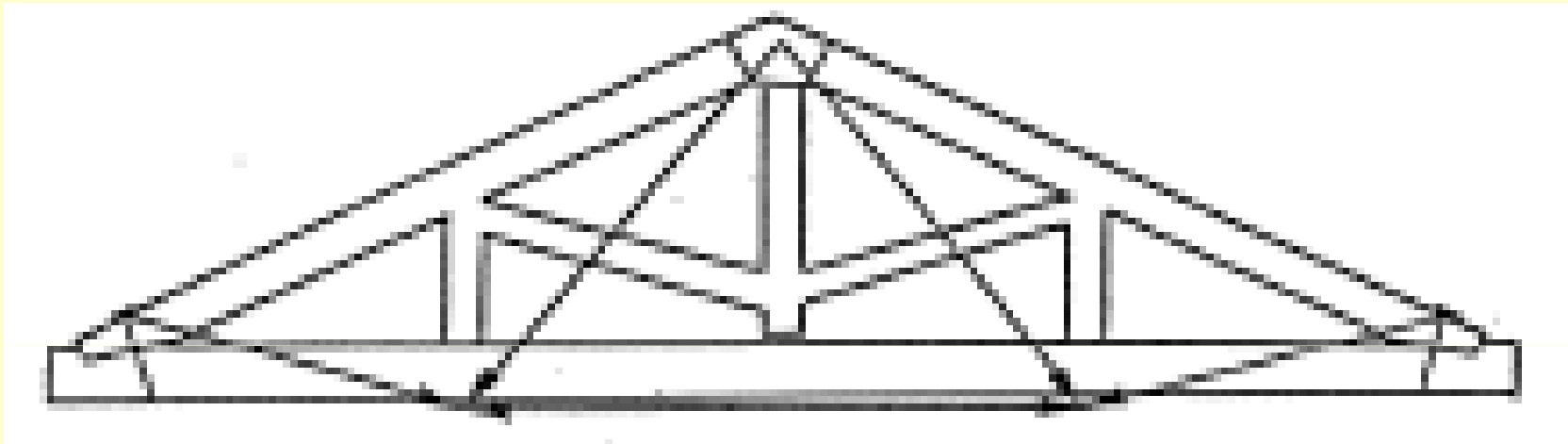


Réparation/reinforcement local d'un élément par frettage



*Renforcement de zones fissurées par la traction perpendiculaire aux fibres au moyen de colliers de serrage*

▲ Nouveau système structurel qui renforce ou supporte la structure endommagée



Modification du système structurel par addition de barres d'acier



## RENFORCEMENT DU MATERIAU.

Le bois peut s'affaiblir par l'environnement : climat, insectes, champignons  
dégâts de surface, éclatements, fissures, trous  
traitements de protection = techniques de renforcement

### Traitements préservatifs

S'applique aux nouveaux éléments en bois de la réparation  
sur les zones dégradées de la structure existante : fissure, éclatement

Techniques - imprégnation sous pression ou sous vide  
- diffusion (pièce nouvelles)  
- immersion (pièce nouvelles)

Pénétration des produits : dépend de la nature du bois

Choix du produit : compatibilité avec les assemblages (collés par exemple)  
la protection finale (peinture éventuelle)

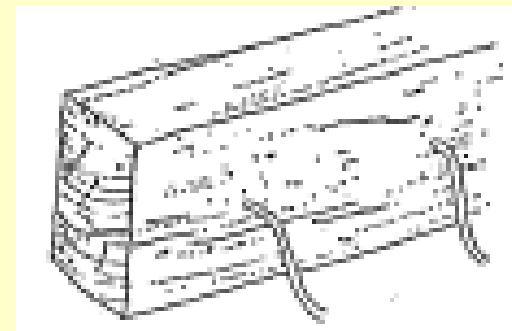
### Traitements réparateurs

Rendent une continuité au matériau : coulage

injection de résines

Comblent les trous et fissures

Relèvent les caractéristiques mécaniques du bois



*Injection de résine dans du bois*

## REPARATION DES NOEUDS.

Technologie standard des nœuds en construction nouvelle:

utilisation d'éléments métalliques plats, boulons traversants

=> possible pour renforcer/remplacer les nœuds d'ossature traditionnels en bois

Respecter les conditions de projet entre-distances des trous, distances aux bords

Contrôler l'état du bois des zones assemblées par éléments métalliques :

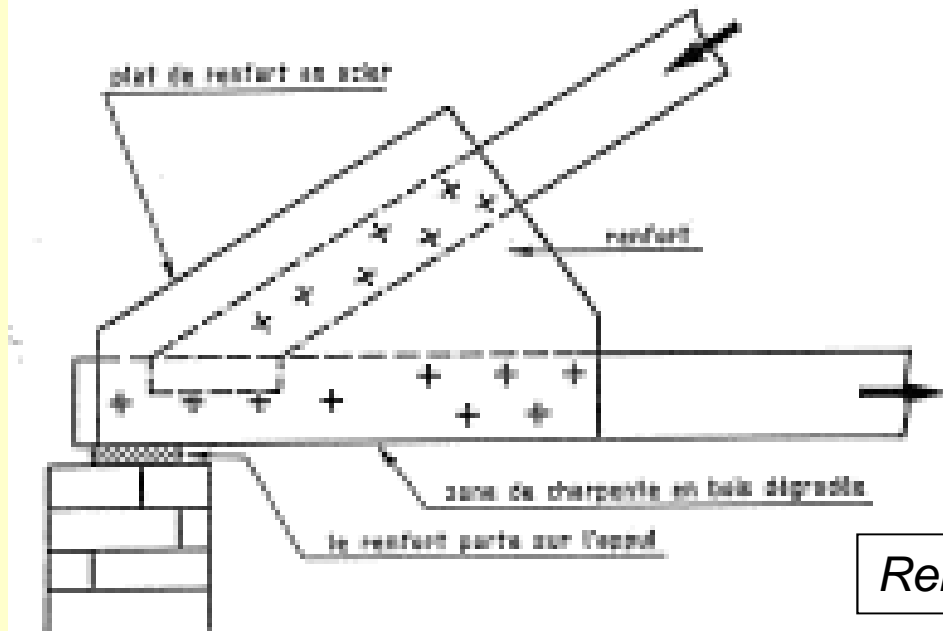
absence de fissure, trou de ver, moisissure, mэрule

Eventuellement compléter la section de bois existante

par des pièces de bois clouées, vissées ou collées

pour garantir la mobilisation des éléments additionnels en acier

Offrir des sections planes aux parties métalliques qu'on serre sur les sections de bois



*Renforts de noeuds par plats métalliques*

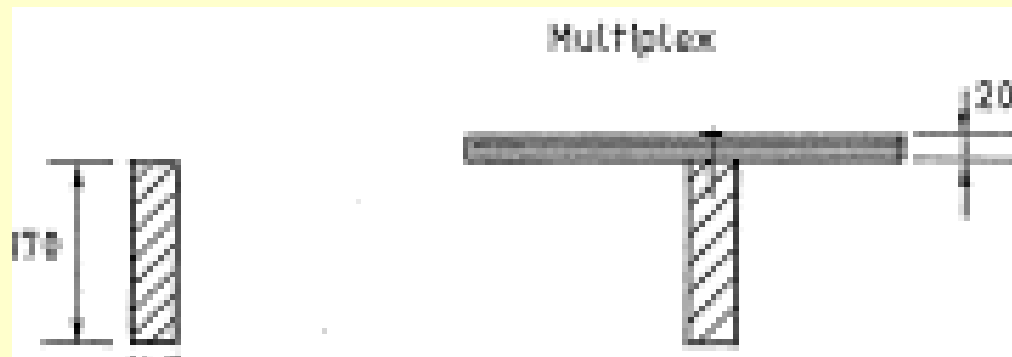




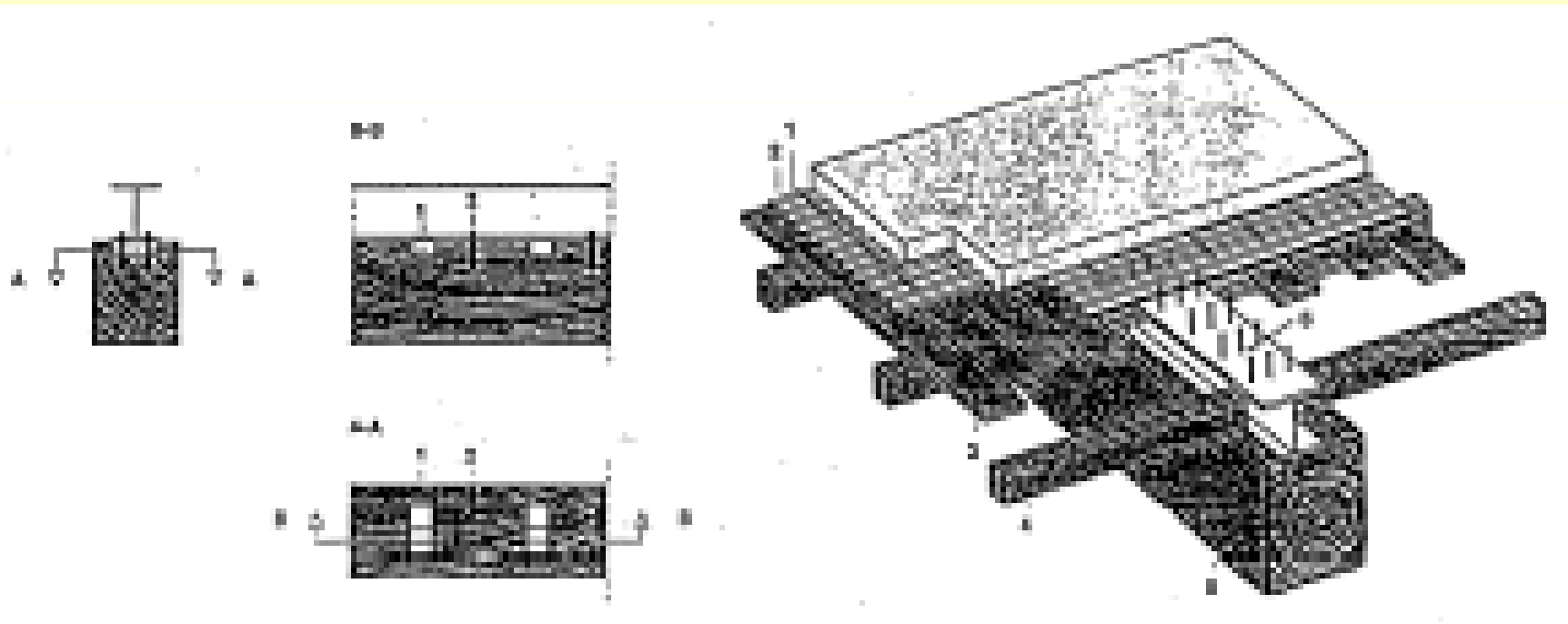


## Renforcement en section courante

### Par augmentation d'inertie



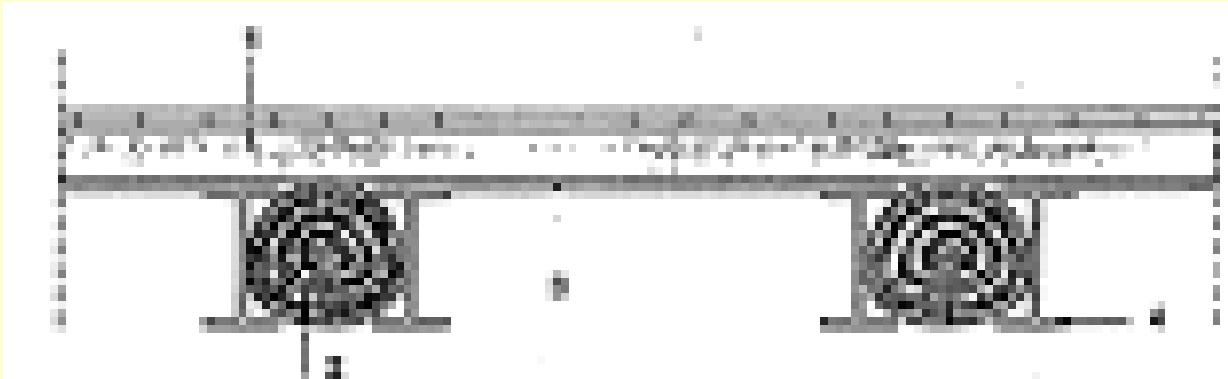
*Augmentation d'inertie  
par clouage d'un panneau Multiplex  
Assemblage pour transfert du cisaillement  
Panneau continu sur la portée*



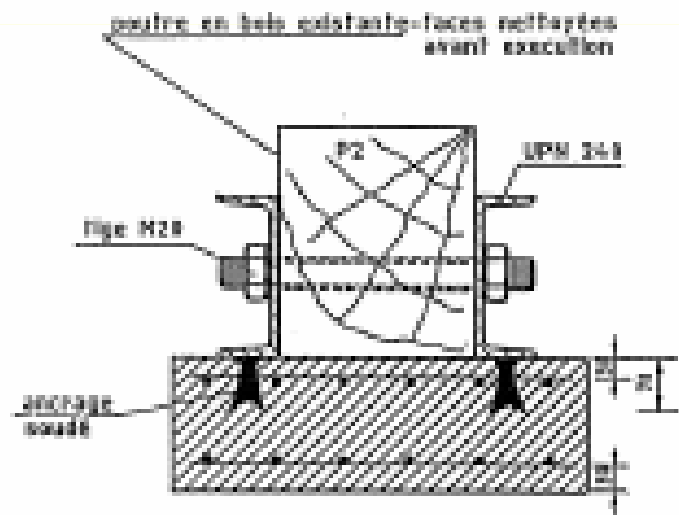
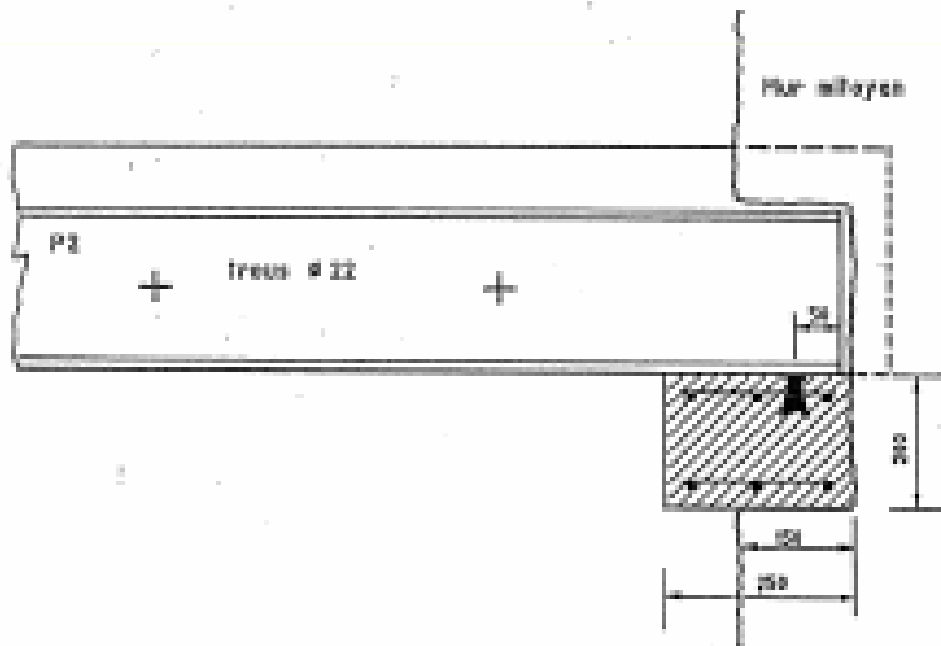
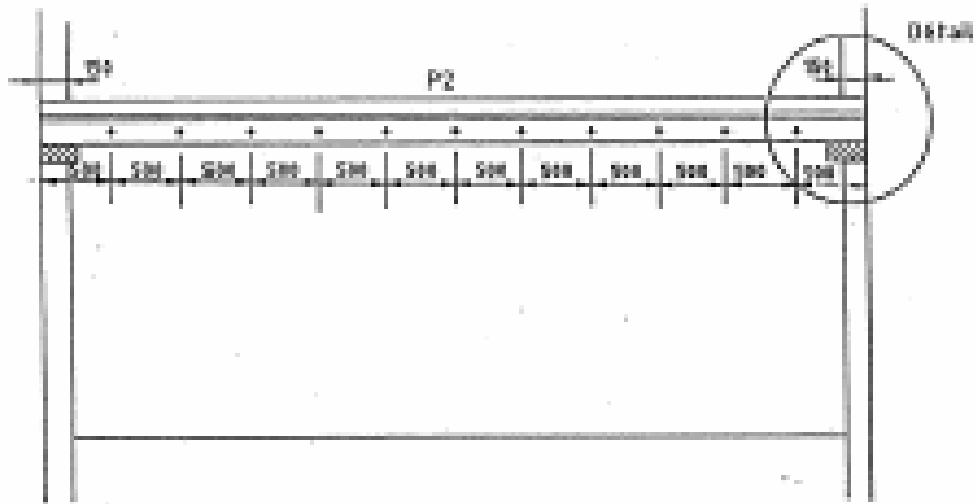
*Réparation - renforcement par profil métallique assemblé par vis + dalle béton*

## Renforcement en section courante

### Par doublage de la section bois par des profils acier

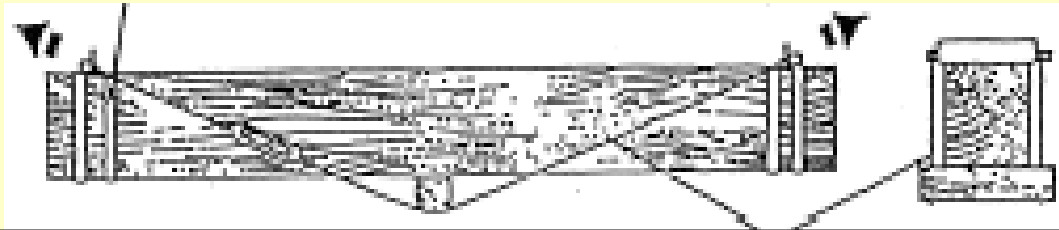


Autre avantage: réduction des portées dans le sens transversal

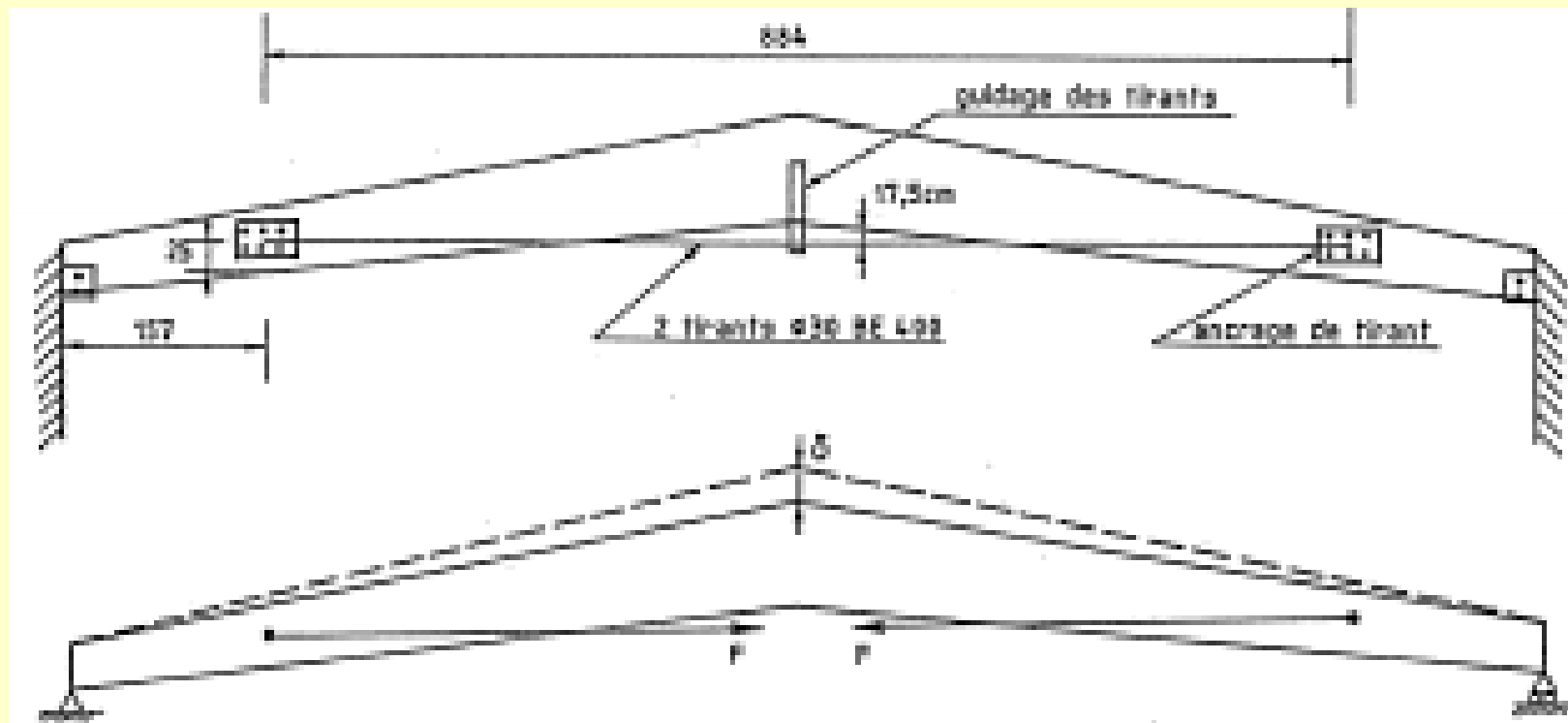




## Renforcement par un nouveau schéma statique



*Renforcement par passage d'une poutre simple à une poutre à poinçon  
la poutre existante est aussi la membrure comprimée d'une poutre en treillis*



*Redressement et augmentation de raideur d'une poutre en bois lamellé collé  
par précontrainte extérieure.*

***REPARATION ET RENFORCEMENT  
DES CONSTRUCTIONS METALLIQUES***

## REPARATION - RENFORCEMENT A L'AIDE DE BETON.

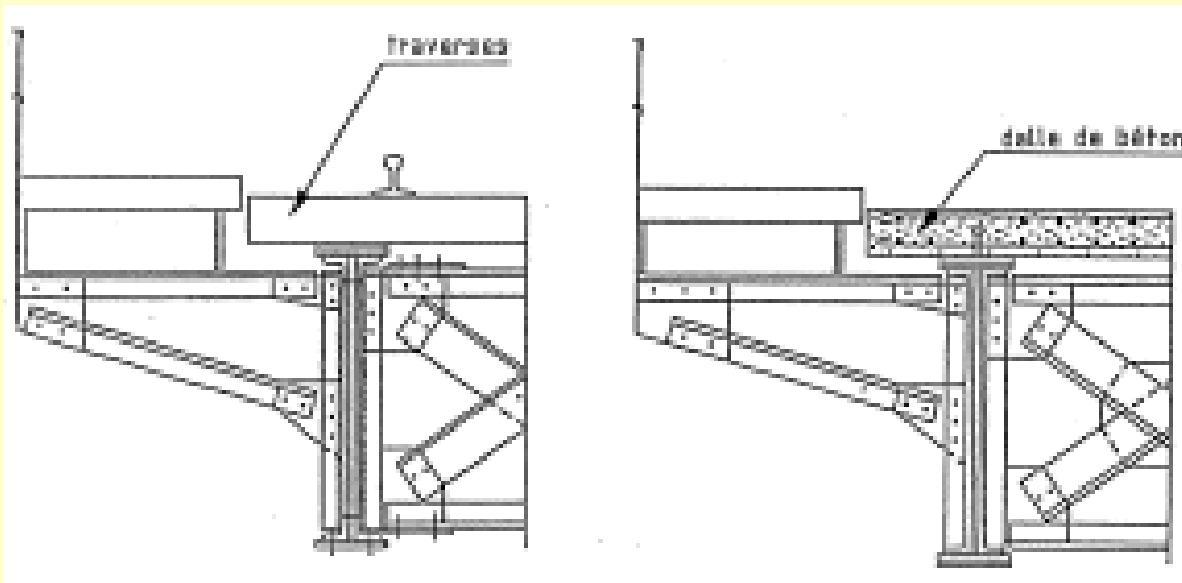
Utilisation de béton pour constituer des éléments mixtes :

- ⇒ augmentation de résistance  $M_{pl}$
- ⇒ augmentation de de raideur Inertie
- ⇒ protection contre la corrosion apportée par le béton
- ⇒ protection contre l'incendie.

Avantage : évite les problèmes de précision des mesures  
précision de fabrication des pièces de renfort

Collaboration acier – béton effective:

=> des connecteurs aux interfaces pour transmettre le cisaillement



*Renforcement d'un pont rail  
métallique par  
transformation en structure  
mixte acier-béton*

## REPARATION - RENFORCEMENT A L'AIDE D'ELEMENTS METALLIQUES.

*Solution la plus naturelle.*

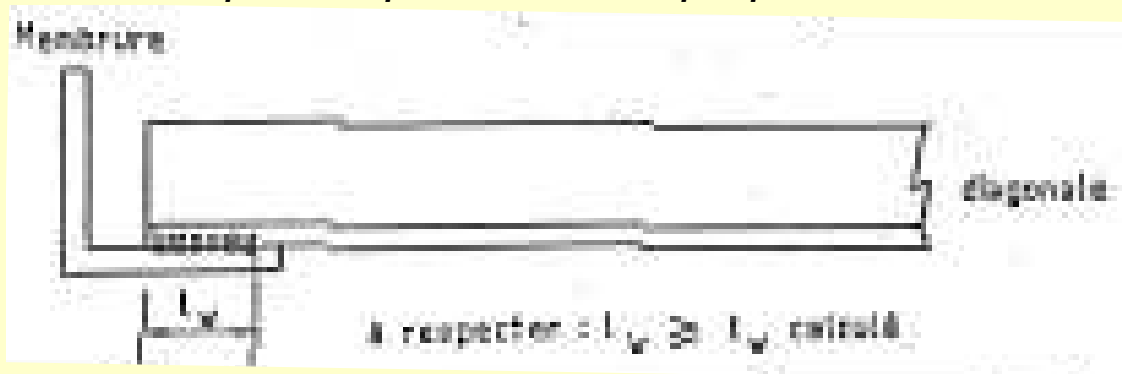
*Peut consister en un remplacement pur et simple d'une partie endommagée  
en l'addition à la partie endommagée d'éléments complémentaires*

### Réparation par soudage. Problèmes à examiner

- soudabilité de l'acier existant
- préparation des joints soudés (meulage, chanfrein)
- respect des tolérances d'accostage des pièces
- atmosphère adéquate pour le soudage (absence d'humidité)
- qualité de soudures dépendante de la position du cordon (en corniche, au plafond)
- disponibilité d'un soudeur agréé
- disponibilité d'une source de courant
- risque d'incendie.

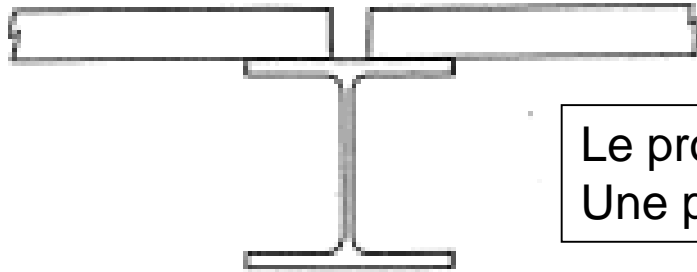
*Avantage : grande adaptabilité sur site*

*peu de précision des préparations si assemblages par cordons d'angle*

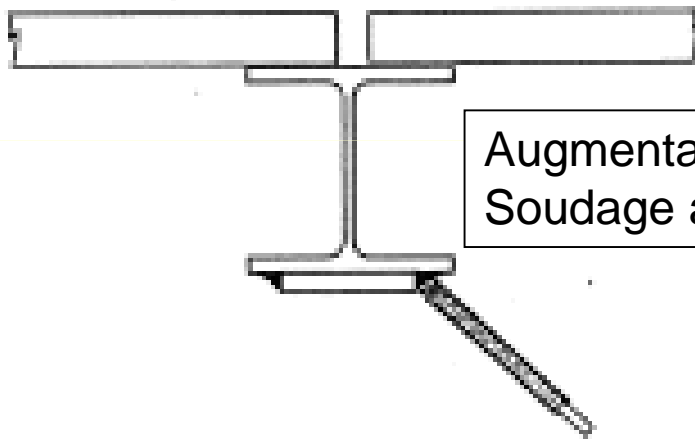


*Exemple d'assemblage  
requérant peu de précision*

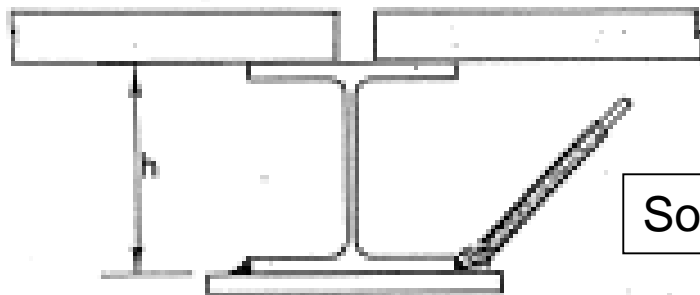
## Réparation par soudage. Exemple 1.



Le problème:  
Une poutre support de plancher trop flexible



Augmentation d'inertie par soudage d'un plat de renfort  
Soudage au plafond : difficile, écoulement bain de fusion



Soudage en corniche : plus simple si  $h$  est suffisant

## Réparation par soudage. Exemple 2. Structure fissurée.

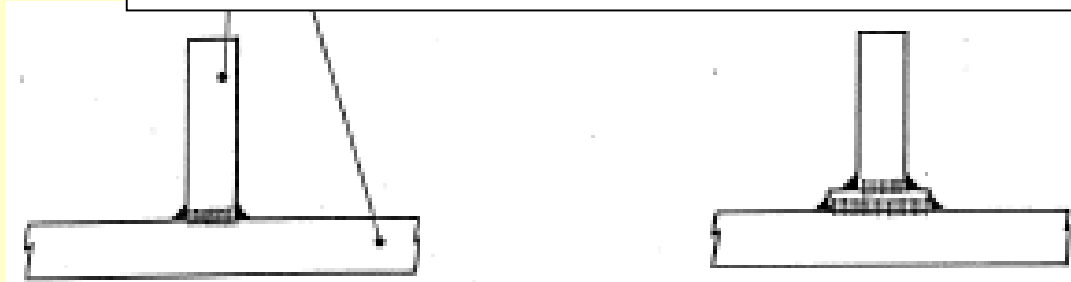
Origine : fatigue

Fissure pouvant entraîner la rupture

La réparation ne peut pas consister à reproduire le même détail sinon la fissuration se reproduira.

⇒ changement de conception

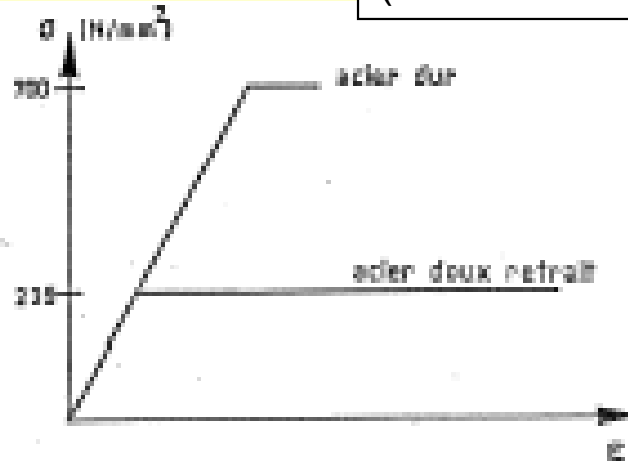
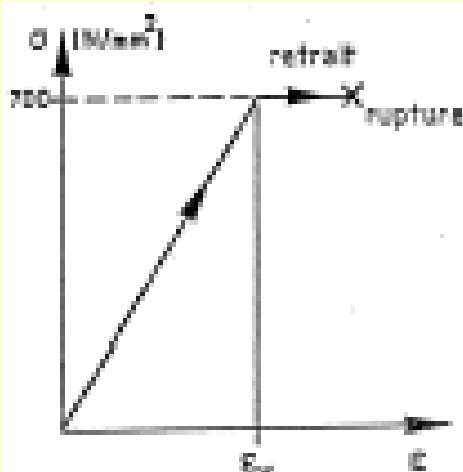
parois et pale d'un cylindre de concassage réalisées en acier dur peu ductile pour résister à l'usure ( $f_y > 700 \text{ N/mm}^2$ )



**Problème** Fissuration lors du soudage par manque de ductilité des matériaux (retrait de soudage entraînant la rupture en traction de l'acier) puis propagation d'une fissure par fatigue

### Solution

Interposition d'un élément d'assemblage en Fe360 reprenant la totalité du retrait de soudage (car  $255 < 700$ )



## Réparation par boulonnage.

### Problèmes à examiner

- précision des forages (les trous en face des trous) ;  
souvent réaliser certains forages sur place, difficile en forte épaisseur
- prévoir des épaisseurs intercalaires (fourrures)  
pour rattraper jeux et décalages de plans
- nécessité de sablage sur site des éléments existants  
si assemblages par boulons HR travaillant par friction

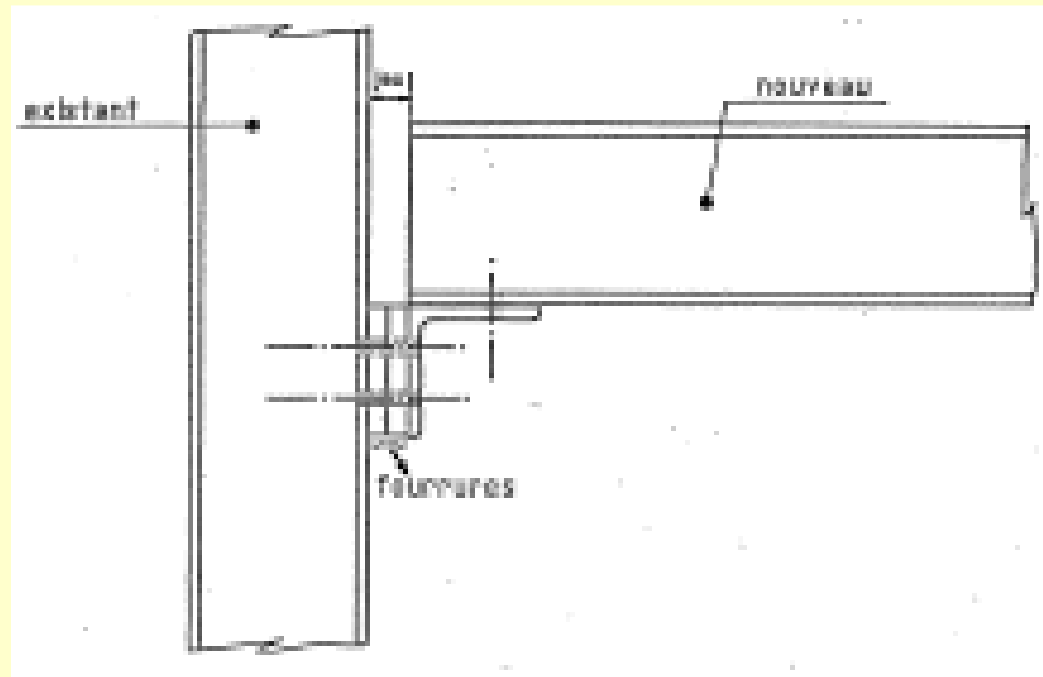
### Avantage

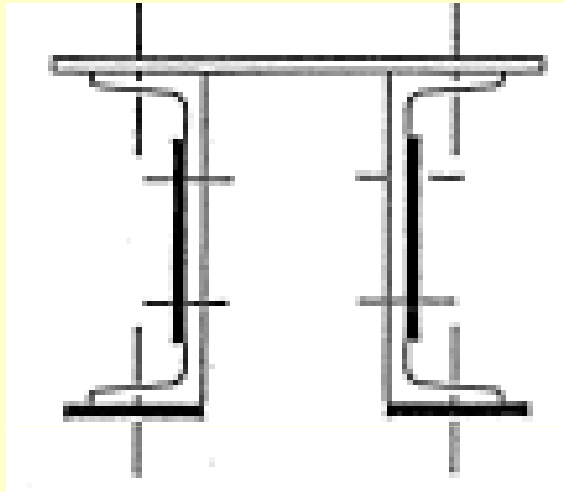
qualité finale de la réparation peu dépendante de la qualité de l'exécution.

### Inconvénients

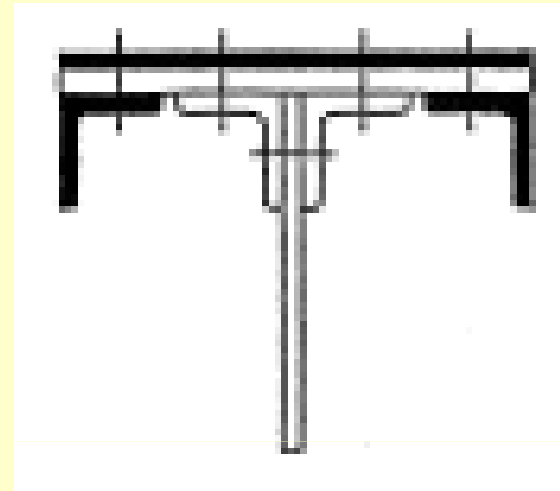
- lourdeur des préparations  
=> exécution globale plus lente
- aspect plus lourd

*Exemple de jeu et fourrures nécessaires au montage d'une solution boulonnée de réparation.*





sans enlèvement des rivets existants



avec enlèvement des rivets existants

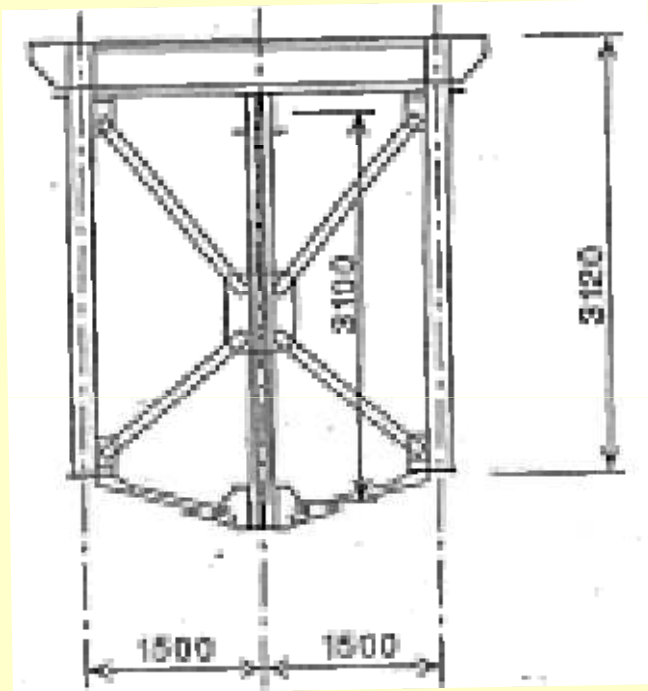
*Renforcement d'une membrure rivée  
utilisant le boulonnage de sections complémentaires*



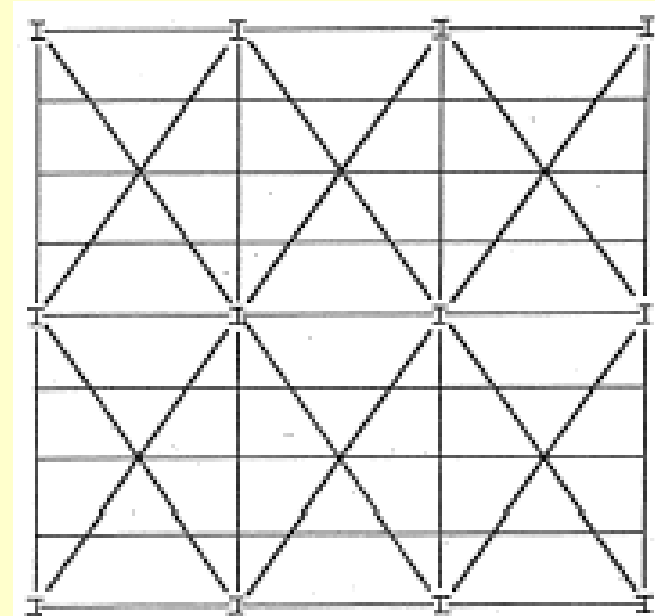
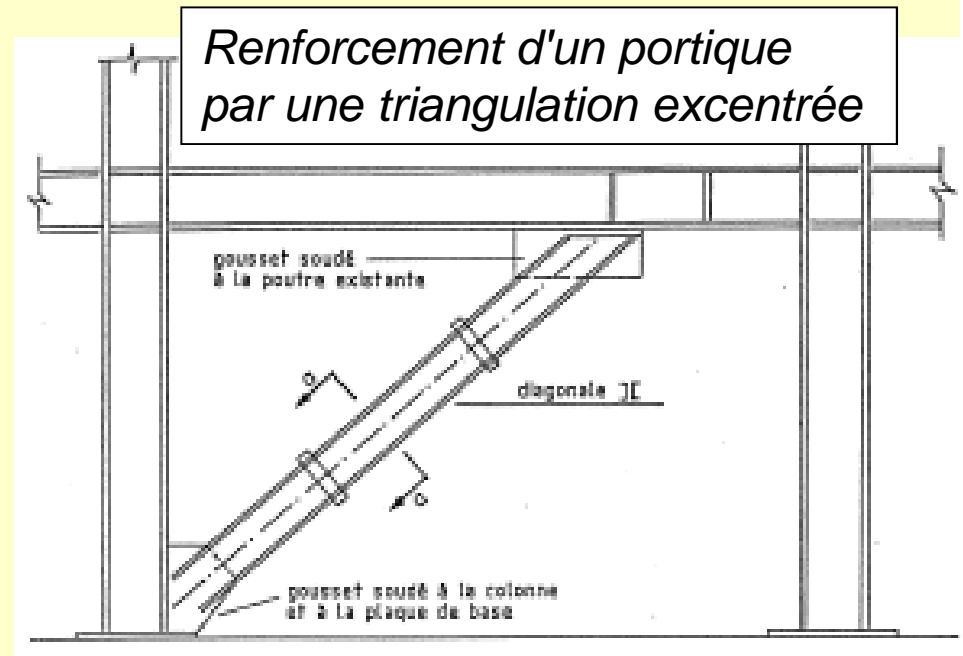
## Addition d'éléments structurels

*Pont rail*

*Mise en place d'une 3<sup>e</sup> maîtresse poutre*



*Renforcement d'un plancher en portique plan par une triangulation.*



***RENFORCEMENT***

***DE FONDATIONS ET SOUTÈNEMENTS***

***PAR REPRISE EN SOUS OEUVRE***

## **REPRISE EN SOUS OEUVRE. Objectifs et principes d'exécution**

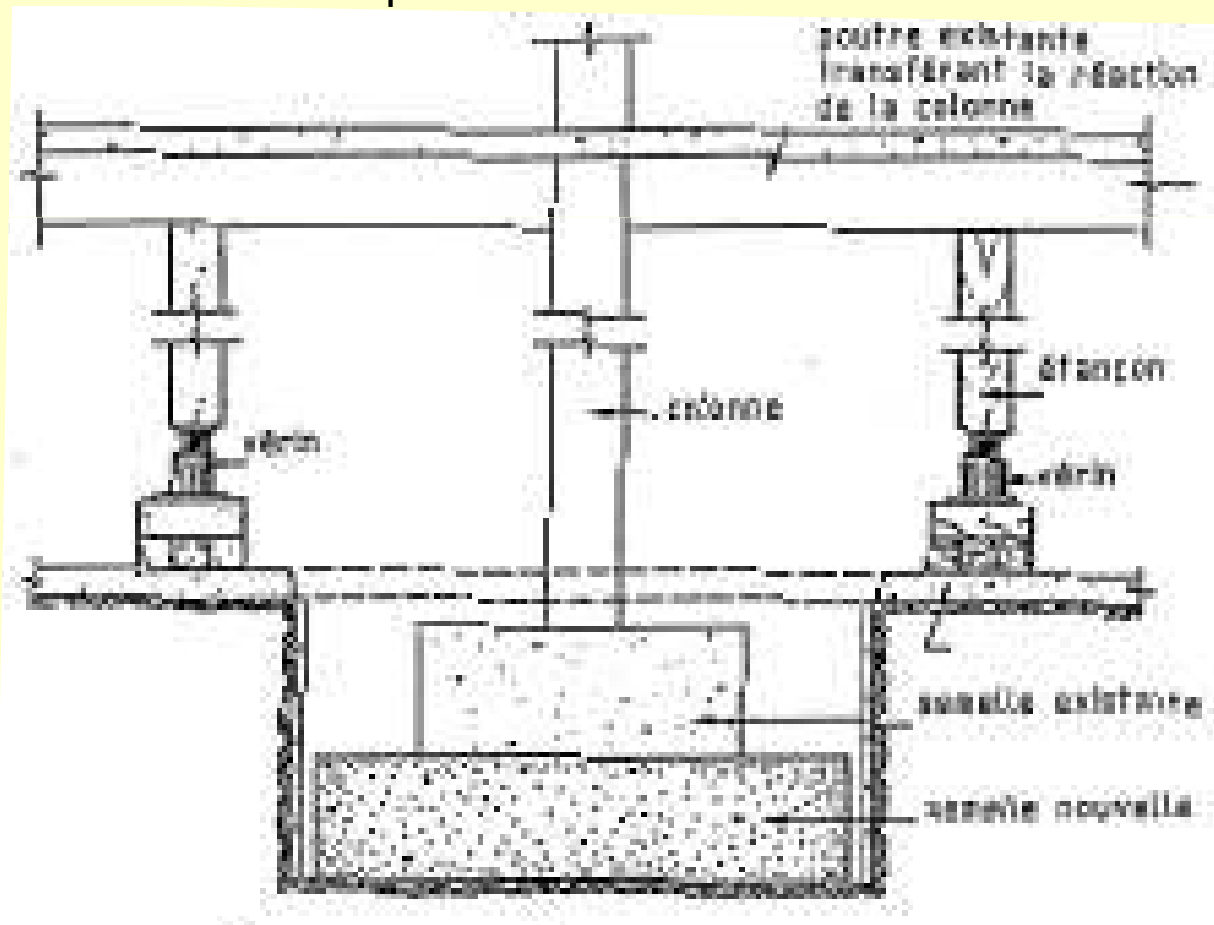
- Objectifs :
- Report des sollicitations à un niveau inférieur (sol de meilleure qualité)
  - Ou augmenter la surface de la fondation au niveau de réalisation initiale

Principe d'exécution: travail par parties une partie = tranche verticale de quelques m<sup>2</sup>

Stabilité assurée par report des efforts sur les tranches latérales.

A l'issue de 1<sup>er</sup> phase, 1/2 nouvelle fondation réalisée

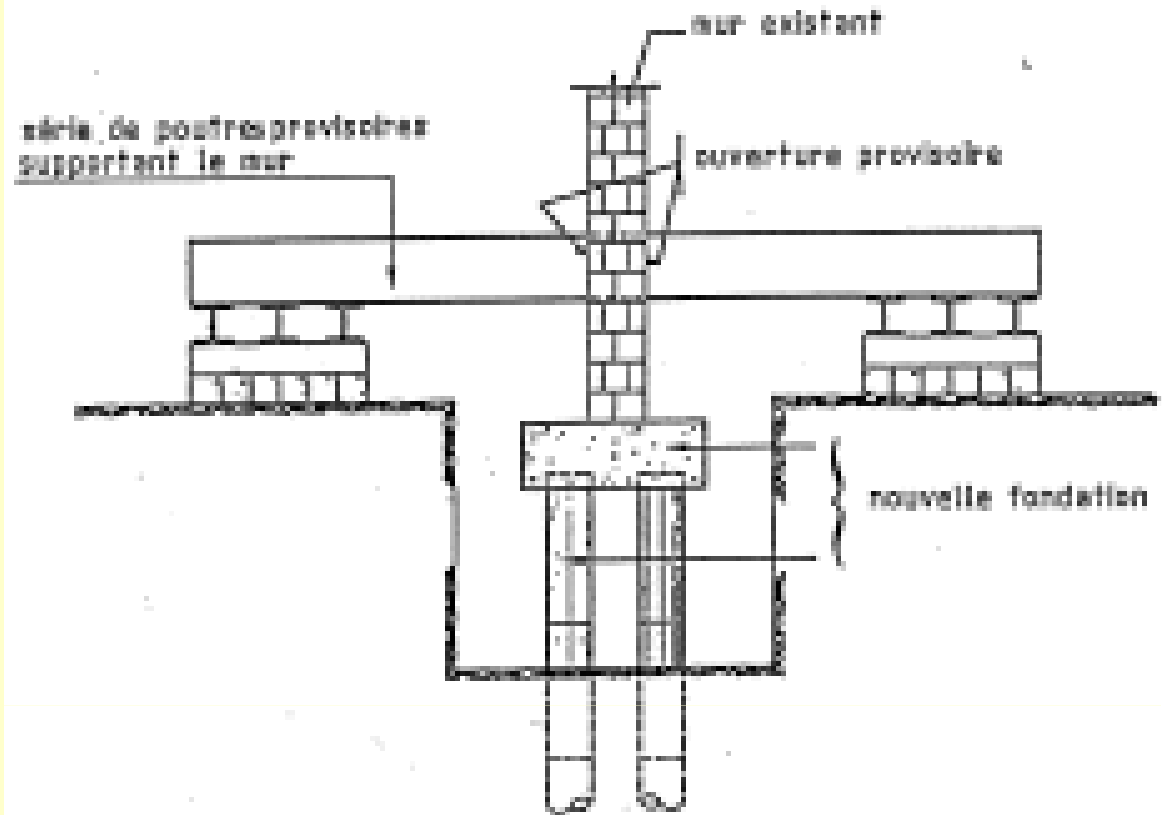
Seconde phase : les autres tranches



## Transfert des charges.

Report sur des longrines  
ou chaînage horizontal, pontage

Poteaux porteurs :  
transfert complexe



### Transfert passif

contact avec un appui provisoire  
s'active lorsqu'on excave la zone voisine

Problèmes: déformation de la structure, tassements

Utilisé si on estime que des reports internes de sollicitations ont lieu dans la structure  
que les appuis provisoires sont placés par sécurité

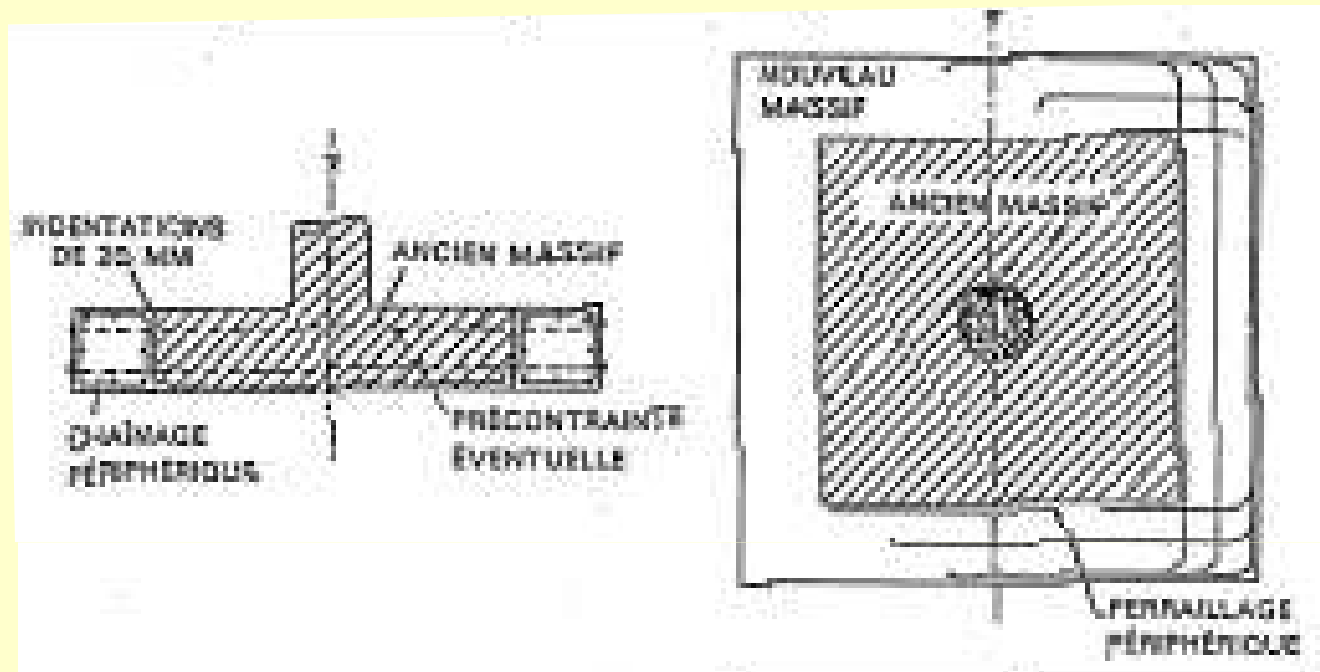
### Transfert actif

On met en charge le système d'appuis provisoires par des vérins

On contrôle les niveaux

On règle avec les vérins pour qu'il n'y ait pas de déplacement en superstructure

## Exemple 1

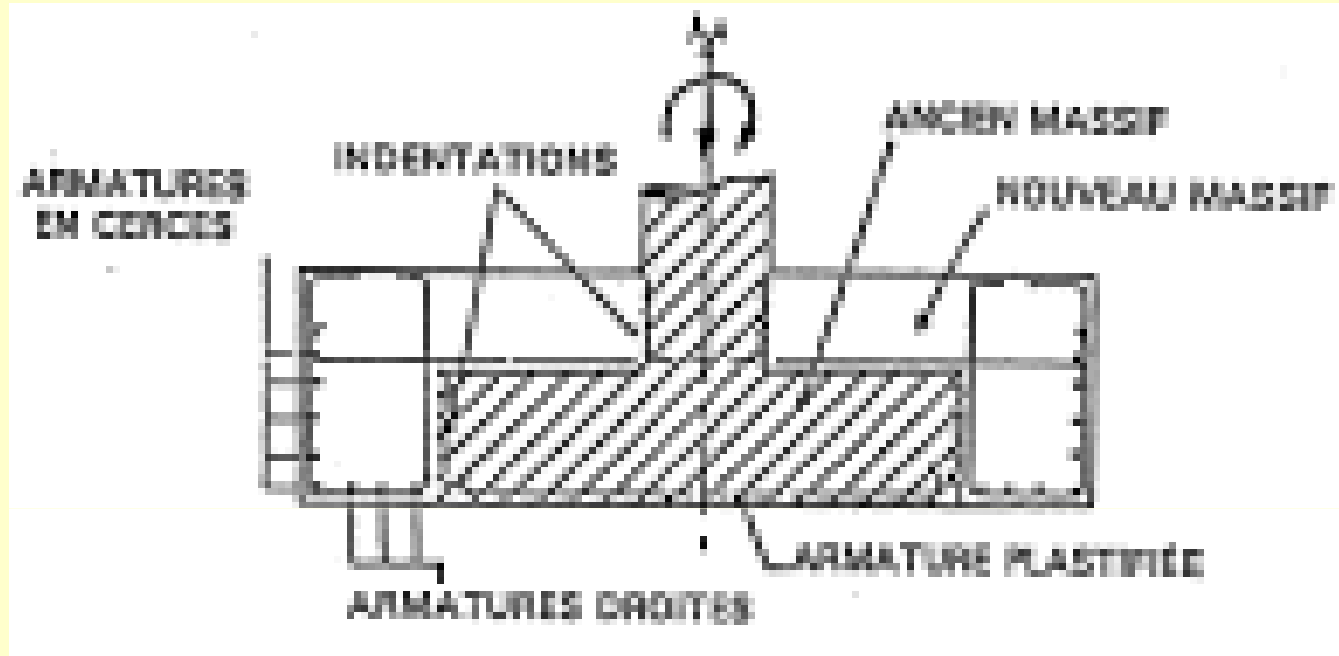


*Renforcement de fondation au niveau d'origine  
par augmentation de surface sans surépaisseur de la semelle*

Objectifs :

- réduction de la pression sur le sol  
sous les sollicitations M et N additionnelles au poids mort
- augmentation de la capacité portante (modification d'usage)
- renforcement du ferrailage (dégradé) de la semelle

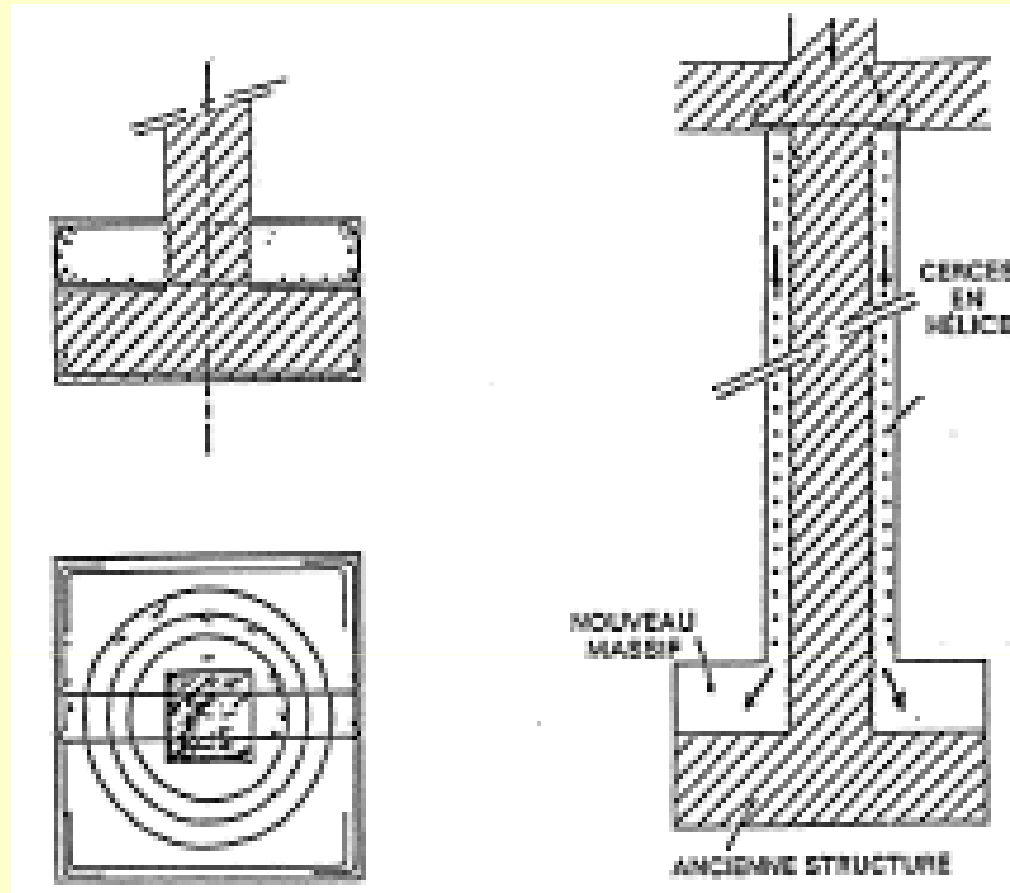
## Exemple 2



*Renforcement par augmentation de surface  
avec augmentation d'épaisseur de la semelle*

- Objectifs :
- réduction de la pression sur le sol  
sous les sollicitations M et N additionnelles au poids mort
  - augmentation de la capacité portante (modification d'usage)
  - renforcement du ferrailage (dégradé) de la semelle
  - augmentation de la rigidité et renforcement du ferrailage de la semelle

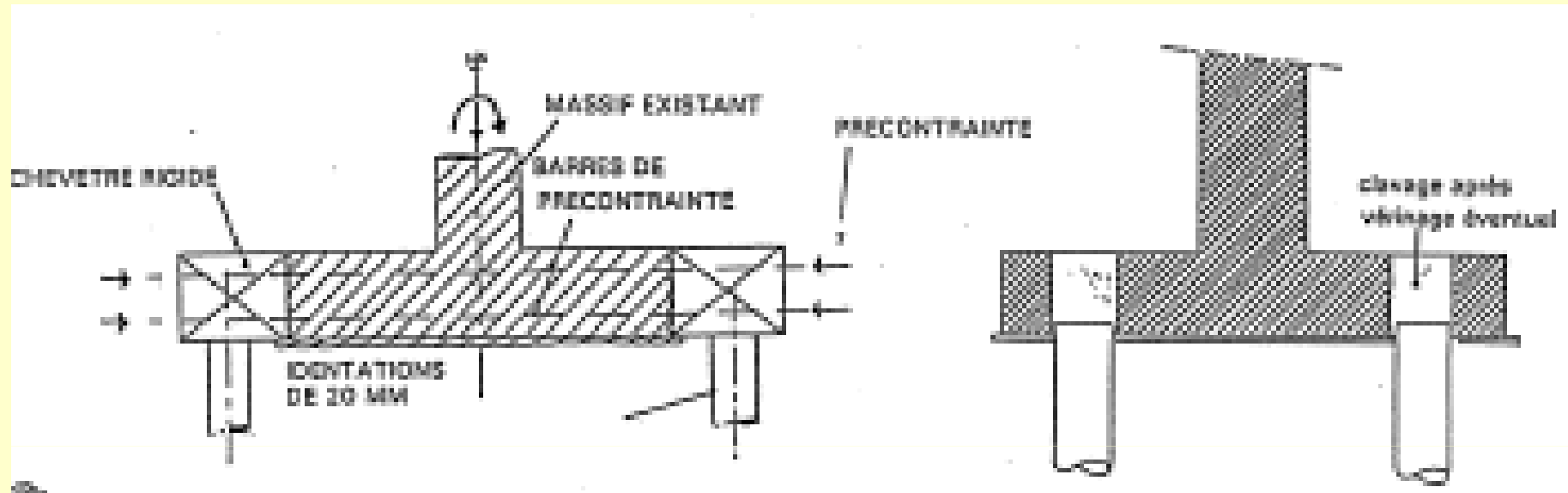
### Exemple 3



*Renforcement de fondation par surépaisseur de la semelle sans augmentation de surface*

Objectifs : - augmentation de section et de capacité portante du poteau  
- augmentation de la rigidité de la semelle  
valable si la surface d'assise est telle que la pression sur le sol soit acceptable

## Exemple 4



### *Renforcement par pieux ou micropieux*

Objectif : augmentation de la capacité portante (modification d'usage)

Moyen: reporter les charges des superstructures dans les terrains sous-jacents au moyen de pieux ou de micropieux forés ou battus