

**Centre universitaire Ahmed ZABANA Relizane**  
**Département de génie civil**  
**Master II Structure**

# **Pathologies et réhabilitation des structures**

**2019 - 2020**

# Généralités et définitions

Le **génie civil** représente l'ensemble des techniques de constructions civiles. Les [ingénieurs civils](#) ou *ingénieurs en génie civil* ([Master en Génie civil](#)) s'occupent de la conception, la réalisation, l'exploitation et la **réhabilitation d'ouvrages** de [construction](#) et d'[infrastructures](#) dont ils assurent la gestion afin de répondre aux besoins de la société, tout en assurant la sécurité du public et la protection de l'[environnement](#). Très variées, leurs réalisations se répartissent principalement dans cinq grands domaines d'intervention : [structures](#), [géotechnique](#), [hydraulique](#), [transport](#), et [environnement](#).



Génie civil est une expression qui désigne la construction en général

# Pathologies des ouvrages ??????

En construisant, l'homme fait intervenir les lois de la nature à son profit.

C'est tout au moins ce qu'il cherche, mais il ne les maîtrise pas toujours, soit qu'il ait sous-estimé l'importance de certaines d'entre elles, soit qu'il les ait totalement oubliées ou ignorées.

Les matériaux subissent l'environnement : les actions mécaniques de la pesanteur et du vent, les actions hygrothermiques et chimiques de l'air environnant ainsi que des matières agressives.

## ***1. actions mécaniques :***

Dans les calculs classiques de résistance, on néglige généralement un certain nombre de phénomènes, considérés comme secondaires, ou on en tient compte d'une manière forfaitaire.

C'est ainsi qu'on ne calcul pas (sauf exception) la valeur :

- 1- Des moments de flexion exercés dans les murs par la rotation des planchers aux appuis,
- 2- Des longueurs de flambement des poteaux portant des planchers superposés,
- 3- Des tassements différentiels entre semelles de fondation de grandeur différentes, bien qu'exerçant sur le sol la même pression.

## **2. actions hygrothermiques :**

Chaque matériau possède un équilibre qui lui est propre vis-à-vis de l'état hygrométrique et de la température de l'air environnant. Il tend vers cet équilibre, plus ou moins lentement et modifie son évolution quand l'ambiance évolue.

D'une manière générale, les matériaux augmentent de volume avec l'augmentation de leur teneur en eau et leur température et diminuent de volume dans le cas contraire.

## **3. actions chimiques et biologiques :**

L'humidité accompagnée de la chaleur favorise le développement d'organismes végétal, animal ou microbien.

Ce phénomène entraîne pour certains matériaux des dégradations.

Le bois subit un pourrissement et les calcaires peuvent se désagréger en milieux nitrurés.

Les rayons ultraviolets du soleil provoquent la polymérisation des matériaux à chaînes carbonées :

peintures et plastiques.

#### **4.interactions :**

La cohabitation des matériaux présentent des lois de comportement différentes et sont capables de s'altérer les uns les autres en causant certains désordres :

- Rupture du plus fragile quand deux matériaux mitoyens se déforment différemment (béton et brique creuse, canalisations et gros oeuvre, etc.),
- Détérioration d'un bois humidifié par le béton ou le plâtre frais.



Ces phénomènes provoquent l'apparition des **désordres** et **dégradations** dans les ouvrages  on parle de **pathologies**

Ces ouvrages '**endommagés**' doivent être remis à leur état normal  on parle de **réhabilitation**

## Définitions:

**Pathologie:** La signification de ce terme issu de la science **médicale** est la suivante: d'après le Robert : « Science qui a pour objet **l'étude** et **la connaissance** des causes et symptômes des **maladies** ».

Si l'on applique cette définition au bâtiment, les **maladies** seraient les **désordres** qui, en s'aggravant, donnent lieu à des **sinistres** ; ces derniers pouvant conduire à la **ruine** des ouvrages.

**Réhabilitation :** des travaux de réhabilitation visent à la fois à conforter un bâtiment et à le remettre en état en le dotant des éléments de confort moderne : Apport d'isolation thermique, Modernisation des installations intérieures (réseaux : électricité, chauffage, fluides, sanitaire).

## Autres définitions:

**Désordre :** Altération, perturbation, trouble

## Définitions:

**Vice** : défaut, imperfection grave, défectuosité.

Le terme 'vice de construction' est très usité. Mais, il s'applique surtout aux ouvrages neufs, plus qu'aux ouvrages dégradés par l'usage ou les agents extérieurs.

**Sinistre** : événement catastrophique naturel qui occasionne des dommages, des pertes... » ,

Ce terme est couramment utilisé en matière d'assurance. C'est en fait l'aggravation des désordres qui conduit aux sinistres et éventuellement à la ruine partielle ou totale d'un ouvrage.

**Ruine** : grave dégradation d'un édifice allant jusqu'à l'écroulement partiel ou total destruction d'un bâtiment qui tombe de lui même ou que l'on fait tomber.

En d'autres termes, la ruine constitue l'état ultime, limite ou final d'une construction ou d'un ouvrage après destruction partielle ou totale.

« Tomber en ruine » signifie « crouler, s'effondrer ». Il y a donc aggravation des dommages puisque l'on arrive à l'effondrement ou à la destruction totale ou partielle de l'ouvrage.

**Remède** : tout ce qui est employé au traitement d'une maladie

Un terme analogue est proposé est celui de « solution ».

## Définitions:

**Réparation :** La réparation d'une construction est une opération qui consiste à lui restituer, par des travaux appropriés, un niveau de service perdu. La perte de service peut résulter de la dégradation des propriétés des matériaux, utilisation intensive de l'ouvrage et les accidents et sinistres (chocs, incendies, séismes,...).

**Renforcement:** Le renforcement consiste à augmenter le niveau de service (augmentation de la résistance par exemple) d'une construction pour en permettre l'utilisation dans des conditions non prévues à l'origine ou de lui procurer une protection suffisante contre des sollicitations dont il n'a pas été tenu compte dans les calculs (séisme par exemple).

**Restauration :** les travaux de restauration visent à remettre un bâtiment ou un ouvrage dans son état originel du fait de son intérêt architectural ou historique.

**Rénovation :** Elle concerne les opérations qui commencent par une démolition. Elles sont similaires aux opérations de travaux neufs si ce n'est la phase de démolition et de libération des emprises foncières.

## Causes de dégradation des ouvrages:

Avant d'évaluer la nécessité de réparer une structures dégradée ou de choisir les méthodes et les techniques de réparation il faut au préalable bien identifié l'origine des dégradations.

En général, les causes des désordres qu'on peut rencontrer sont:

- Causes naturelles résultant de l'ambiance de l'environnement (température, humidité, vent, agressivité du milieu,....).
- Causes structurelles résultant d'une anomalies d'utilisation ou de fonctionnement mécanique de l'ouvrage (effet d'encastrement, de continuité, de fluage, de retrait et de distribution des moments,....).
- Causes accidentelles (feu, choc, séisme, explosion,....).
- Vieillessement normal dû à l'usage.

## Investigations et diagnostic:

L'étude de diagnostic est le passage obligé de toute réhabilitation. Elle a pour but de permettre au maître d'ouvrage de décider :

- s'il conserve ou non l'édifice,
- de hiérarchiser les priorités d'investissement
- de fixer le programme
- de fixer le phasage des travaux



**Un état de santé**

La formulation d'un **diagnostic** nécessite la mise en place d'un programme d'**investigations** .

Le choix des investigations dépend :

- ✓ des besoins du gestionnaire de l'ouvrage,
- ✓ du niveau de fiabilité du dossier d'ouvrage,
- ✓ du type d'ouvrage,
- ✓ de l'environnement de l'ouvrage,
- ✓ de la nature et de l'ampleur des désordres constatés.

**L'étape préalable** à toute investigation dans le cadre d'un diagnostic est **l'examen du dossier d'ouvrage**.

## **Mode d'intervention sur les édifices:**

Dans les travaux de réhabilitation structurelle des bâtiments, il convient de spécifier clairement l'objectif technique visé par l'intervention proposée. Trois approches sont possibles :

1. La restauration de la capacité portante initiale de l'élément à réhabiliter. Il s'agit, de fait, de ce que nous interprétons habituellement comme étant la réparation de l'élément endommagé ;
2. L'augmentation de la capacité portante de l'élément sur lequel nous intervenons, qui équivaut généralement au renfort de l'élément endommagé ;
3. Le remplacement fonctionnel de l'élément par un nouvel élément assumant entièrement la capacité portante requise, sans retirer nécessairement l'élément à réhabiliter.

Bien sûr, le choix de l'approche dépendra des exigences mécaniques requises ainsi que de la capacité à les satisfaire de l'objet de l'intervention.

# Déroulement du processus de réhabilitation :

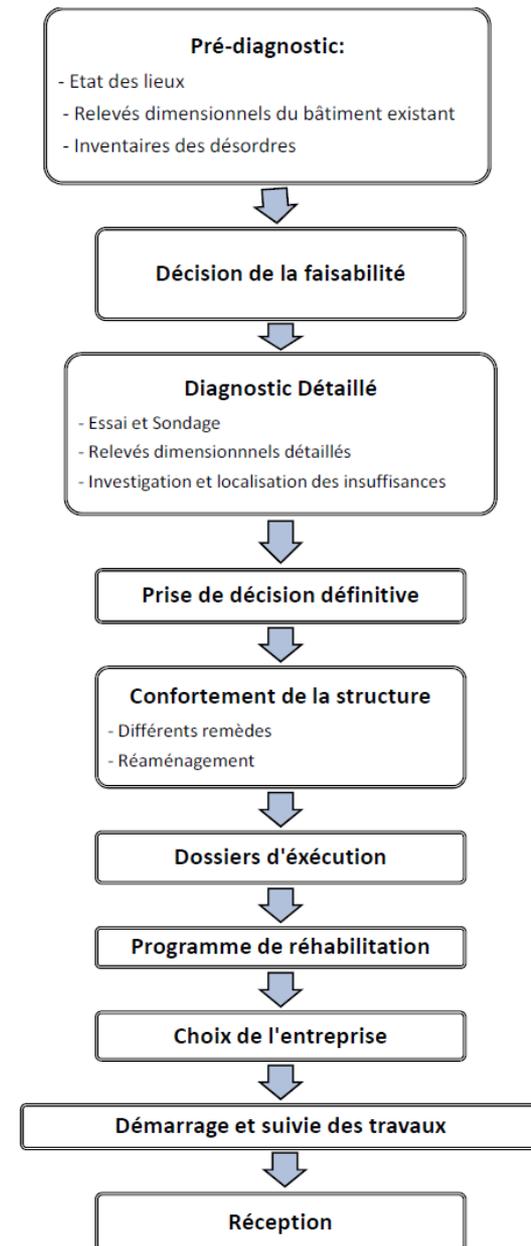


Figure : Procédure d'élaboration d'une étude de réhabilitation

# Pathologies des terrassements et des fondations

La **stabilité** d'un terrain relève de lois complexes, ce qui justifie la plus grande prudence dans les travaux susceptibles de l'affecter.

Ces travaux sont relatifs essentiellement aux **terrassements** avec leurs deux phases :

- Les fouilles ou **déblais** qui affaiblissent la stabilité des terres **avoisnantes**,
- Les **remblais**, qui surchargent et affectent la stabilité des terres **sous jacentes**.

**Les remblais:** Un terrassement par remblai consiste à mettre en place, en général par apport ou dépôt , des terres préalablement prélevées .

Les remblais peuvent être à l'origine de deux catégories de désordres :

1. Le remblais en tant que sol de fondation ;
2. Le remblais en tant que matériau d'apport ;

## **Le remblais en tant que sol de fondation:**

De nombreuses constructions sont édifiées sans précautions spéciales sur de tels terrains. Se fonder sur des remblais présente toujours un risque. A cet égard, sont particulièrement dangereux:

- les remblais récents;
- les remblais d'épaisseur variable;
- les remblais qui n'existent que sous une partie de la construction;
- enfin, les remblais qui surmontent un terrain compressible et instable;

## **Les Déblais :**

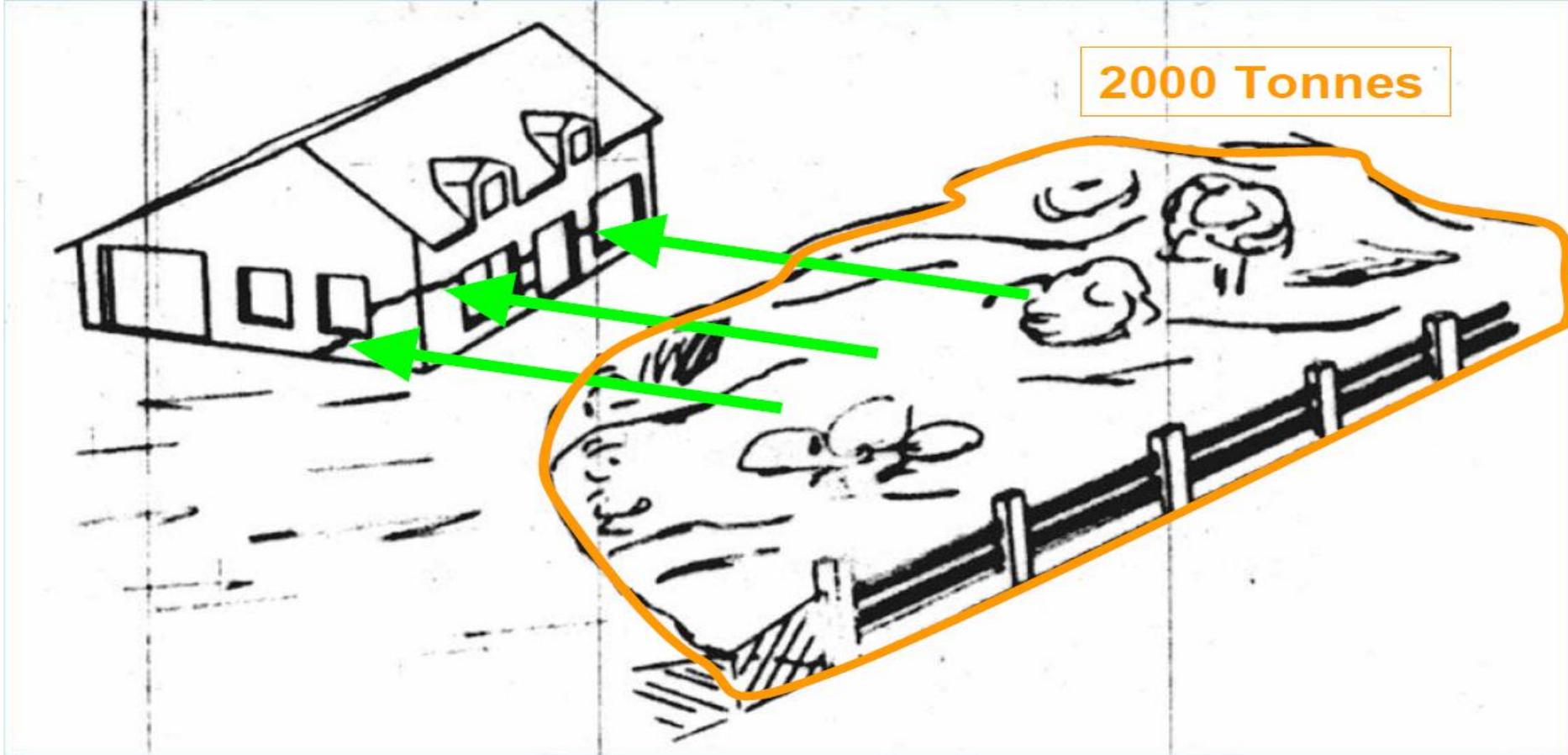
Un terrassement par déblai consiste à enlever des terres initialement en place ; ces déblais peuvent être dangereuses si elle sont réalisées:

- au pied des talus en pente;
- au voisinage des fondation d'une structure;



**Nous allons examiner des cas réels d'endommagement des structures suite aux travaux de terrassement**

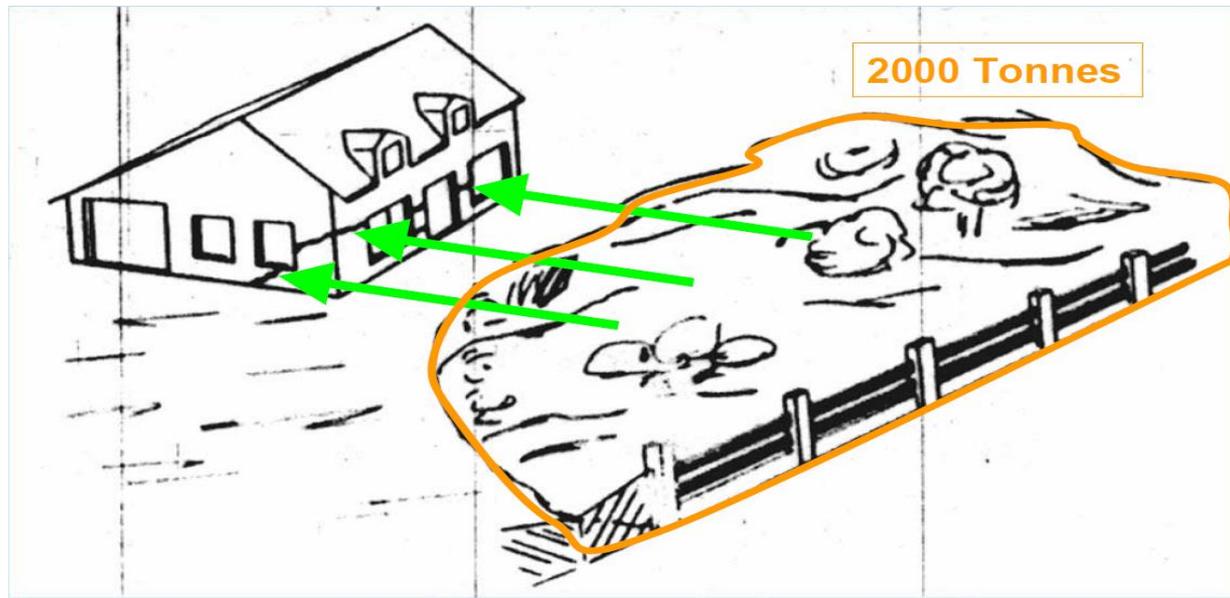
## Exemple 1



un particulier a construit une maison sur un terrain assez vaste à peu près horizontal, voulut aménager entre lui et la route une butte qui en masquerait la vue et atténuerait les bruits de la circulation.

### Désordres:

Apparition de fissures à peu près horizontales sur la façade orientée à la butée et prolongeaient obliquement vers le bas.

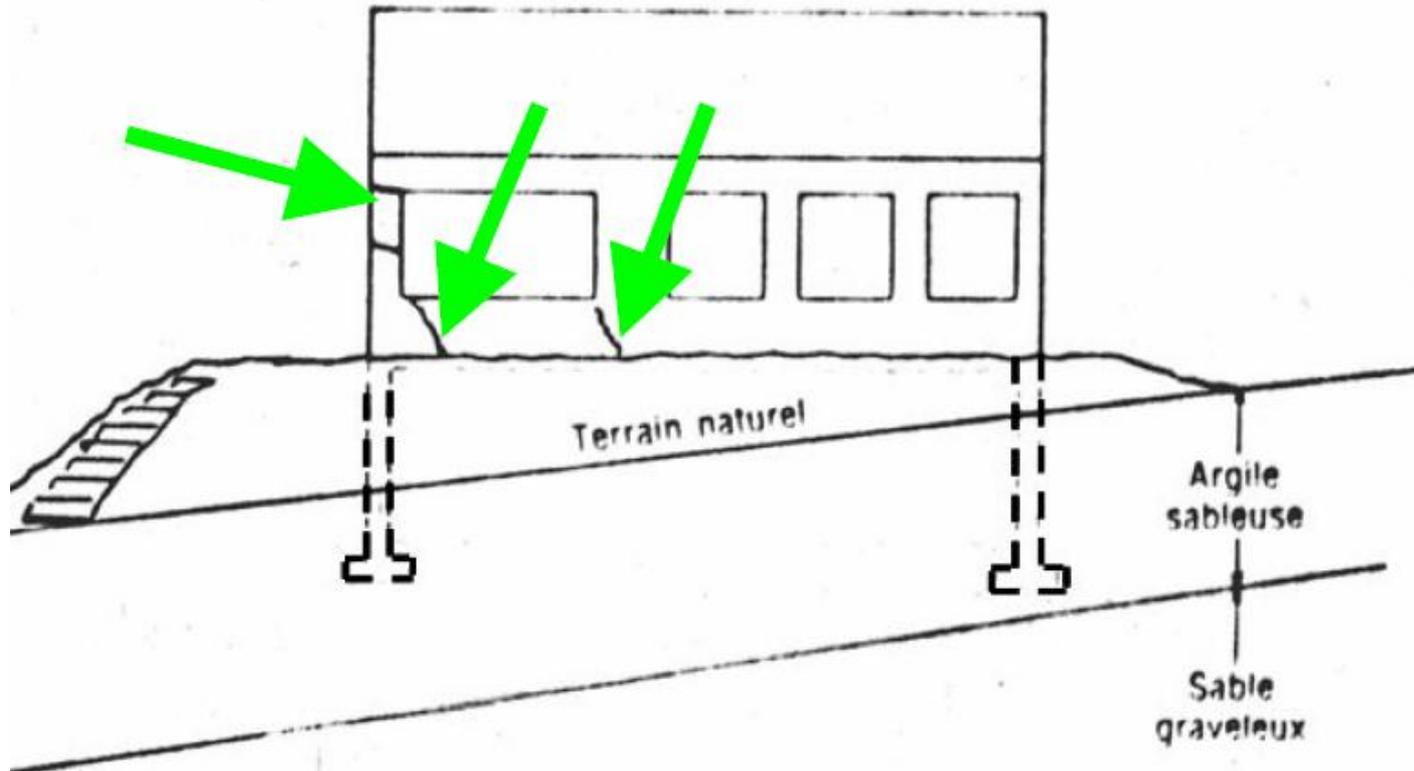


**Causes:** le terrain d'assise du pavillon est une argile sableuse relativement sèche, faiblement consolidée, qui avait à peine achevé son tassement sous le poids du pavillon de l'ordre de 200 tonnes. Les quelques 2000 tonnes de remblais apportés à proximité ont développé leur action en profondeur jusque sous le pavillon, y entraînant des tassements différentiels.

**Solutions:** S'assurer que le tassement sous l'effet du remblai est achevé par la mise en place de témoins sur les murs. Puis, les fissures furent soigneusement rebouchées et les enduits et peintures réfectionnées et tout est rentré dans l'ordre.

## Exemple 2

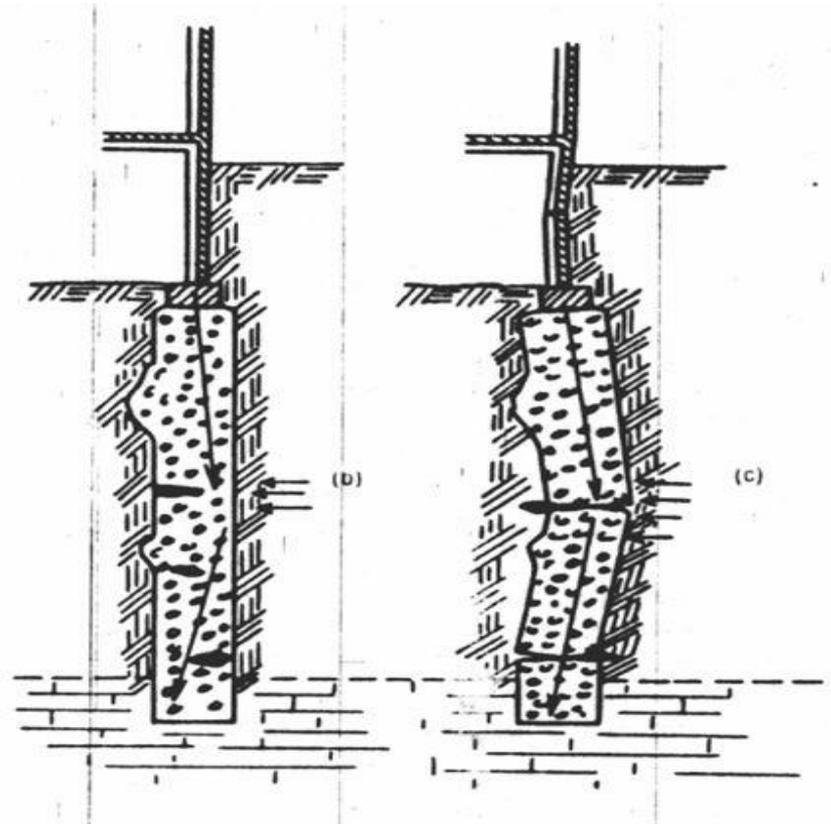
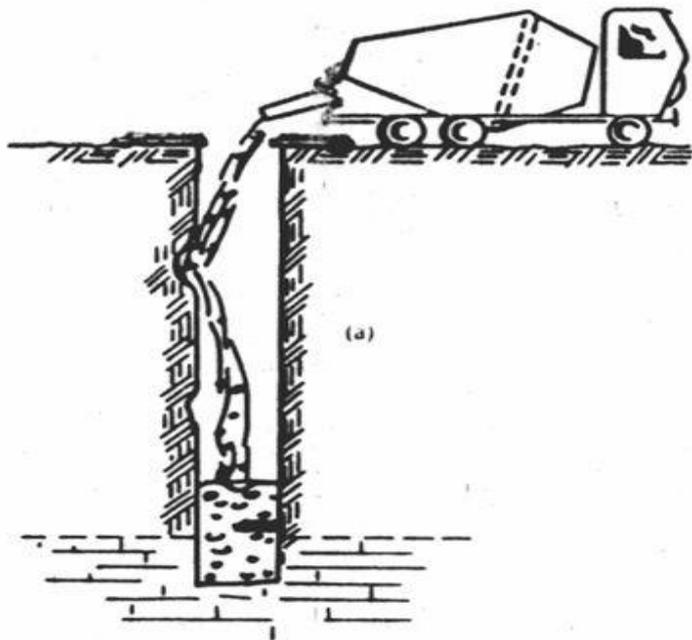
Une structure réalisée sur un terrain en pente se fissure gravement peu après son achèvement, les fissures horizontales ou en V renversé se trouvent essentiellement dans l'angle affectant le côté situé en aval de la pente.



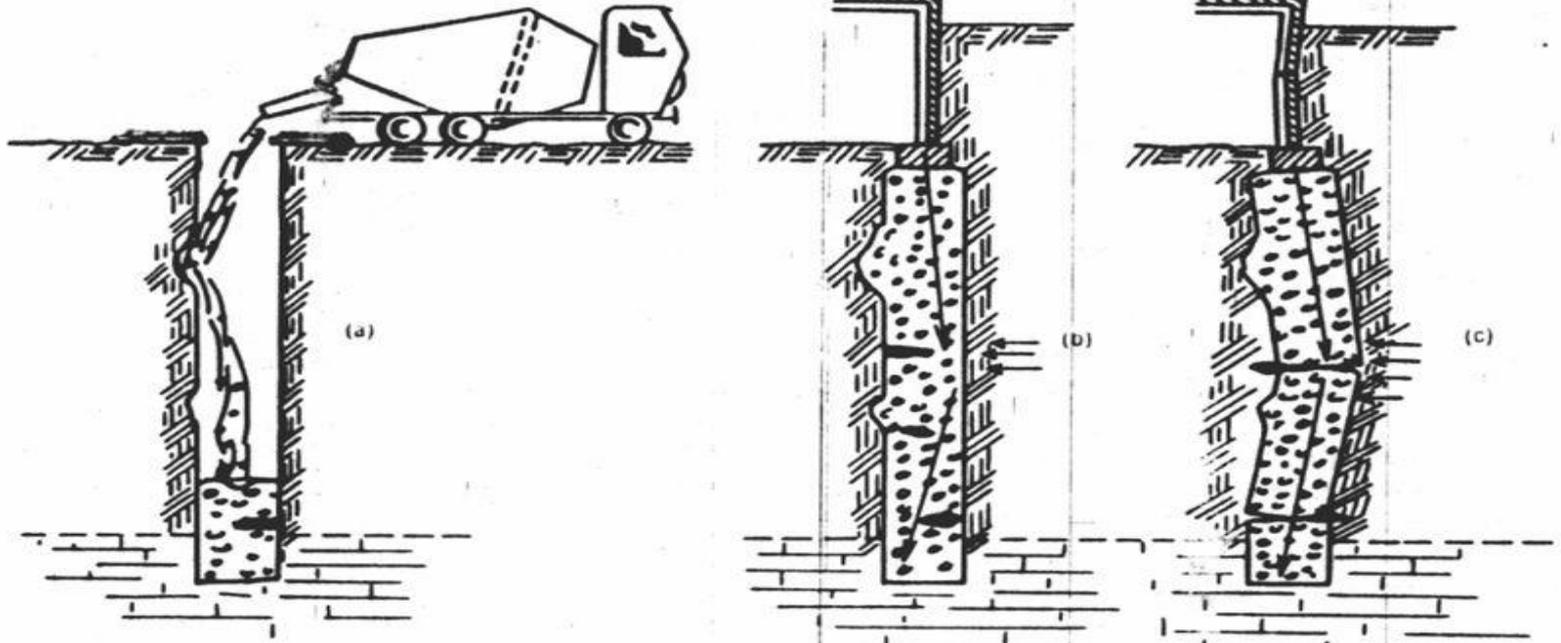
## Exemple 3

dans un immeuble en béton armé récemment achevé, fondé sur puits en gros béton, certains poteaux se fissurent d'une manière apparemment anarchique dans la hauteur du sous-sol et du rez-de-chaussée. La fondation sur puits avait été choisie pour asseoir le bâtiment sur un bon calcaire, situé sous 6 à 8 mètres d'une argile tourbeuse de très mauvaise qualité. La fissuration des poteaux s'accompagnait d'autres fissures fines, horizontales ou en voûtes, dans les murs et cloisons attenants ; ce qui semble révéler de légers tassements.

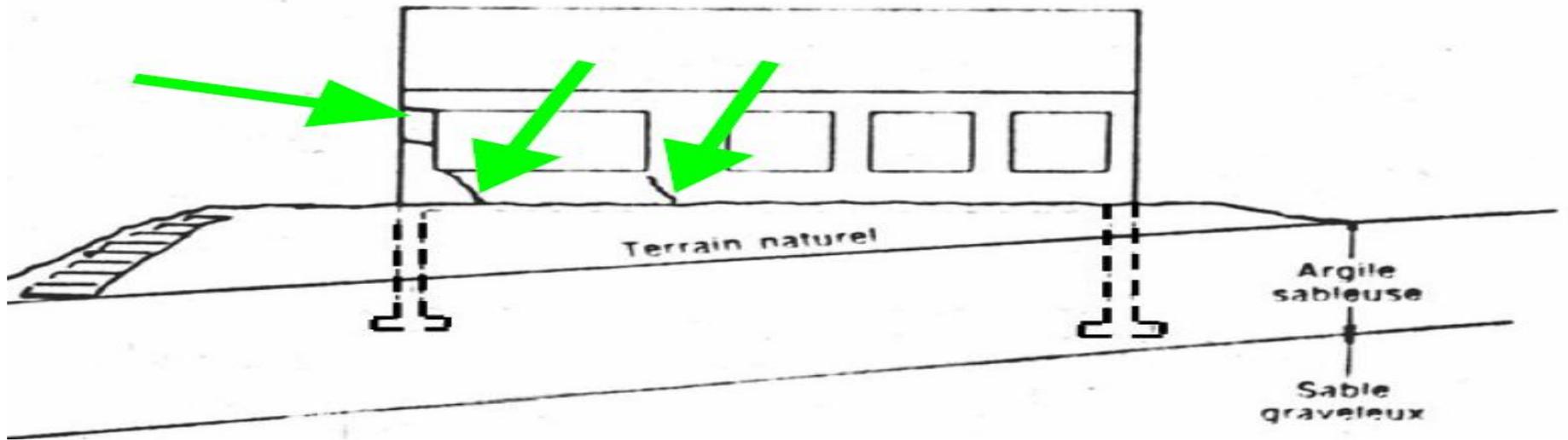
- (a) Bétonnage defectueux
- (b) Inclusions terreuses entraînant des flexions et butées parasites
- (c) Ruptures, grandes déformations non stabilisées et fissuration de la structure



- (a) Bétonnage defectueux
- (b) Inclusions terreuses entraînant des flexions et butées parasites
- (c) Ruptures, grandes déformations non stabilisées et fissuration de la structure



**Causes:** A la réalisation les fouilles n'ont pas été blindées. Au coulage, le béton n'aurait pas été déversé avec précaution. La a été projeté parfois contre la paroi latérale de la fouille entraînant par conséquent des terres. Dès lors, la charge de l'immeuble n'est plus transmise au sol que par la partie saine, amoindrie et excentrée. Durant les travaux, cette transmission se fait en mobilisant des flexions dans le gros béton du puits et des butées contre l'argile tourbeuse. Cette situation était transitoire : un gros béton non armé fléchi et se fissure et une mauvaise argile, sollicitée en butée, recule.



### **Causes:**

les fondations reposent sur une argile légèrement sableuse, surmontant une couche de sable graveleuse (à peu près incompressible), plus profondément vers l'aval que vers l'amont.

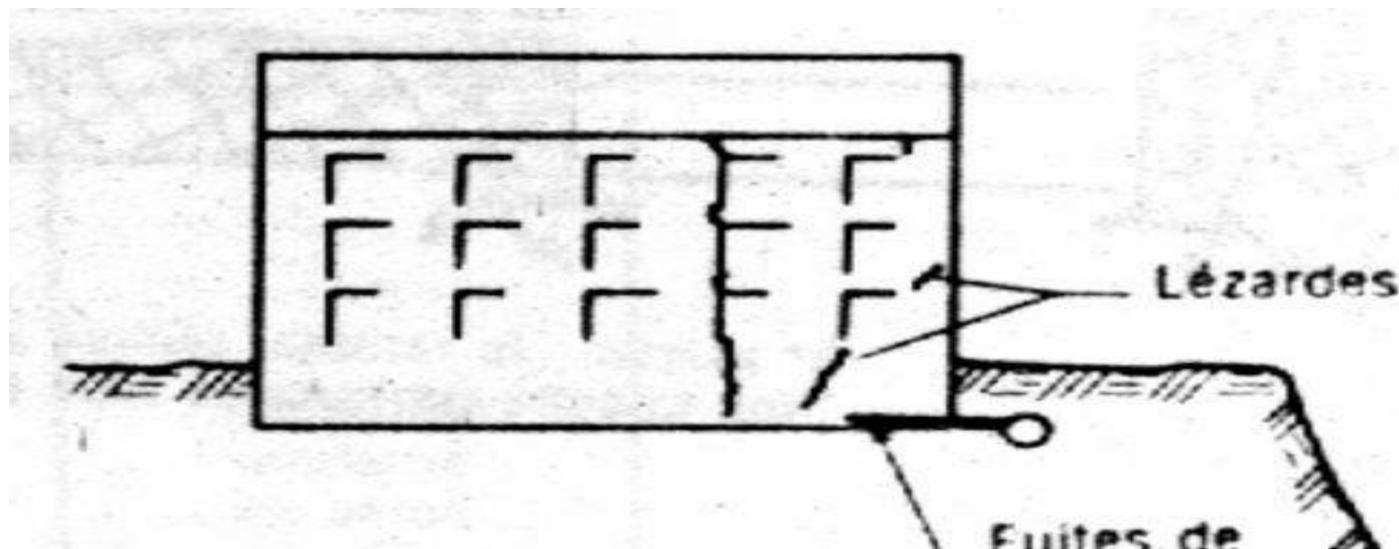
De plus, pour rattraper l'horizontalité, le talus entourant la maison était beaucoup plus important à l'aval qu'à l'amont. La plus grande charge à l'aval et la plus grande épaisseur de terrain compressible à cet endroit ont provoqué un tassement plus important.

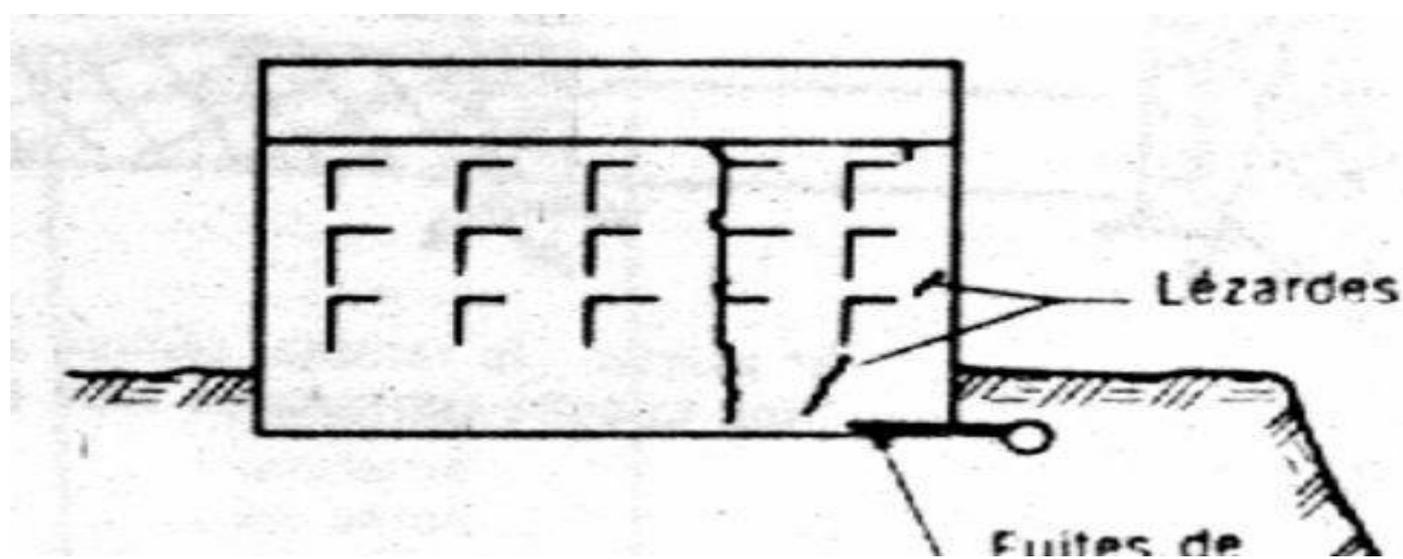
**Solutions:** Le tassement risquait de se poursuivre longtemps et atteindre une ampleur dangereuse pour le pavillon. Il faut soulager le sous-sol en aval de la pente en déblayant rapidement les terres en remblai de ce côté et construire un escalier pour reconstituer l'accès au pavillon..

**Solutions:** Il fallut ausculter systématiquement tous les puits de fondation de l'immeuble. Ceux qui se révélèrent incapables de transmettre leurs charges furent doublés par deux pieux encadrants, foncés (creusés) en sous-oeuvre en prenant appui sous les murs

## Exemple 4

un bâtiment voisin d'un grand chantier se lézarde. Les canalisations d'eaux usées se rompent dans le sous-sol. Les lézardes s'accompagnaient de déformation des baies et de coincement de fenêtres et des portes ; ces désordres provenaient manifestement des mouvements des fondations.





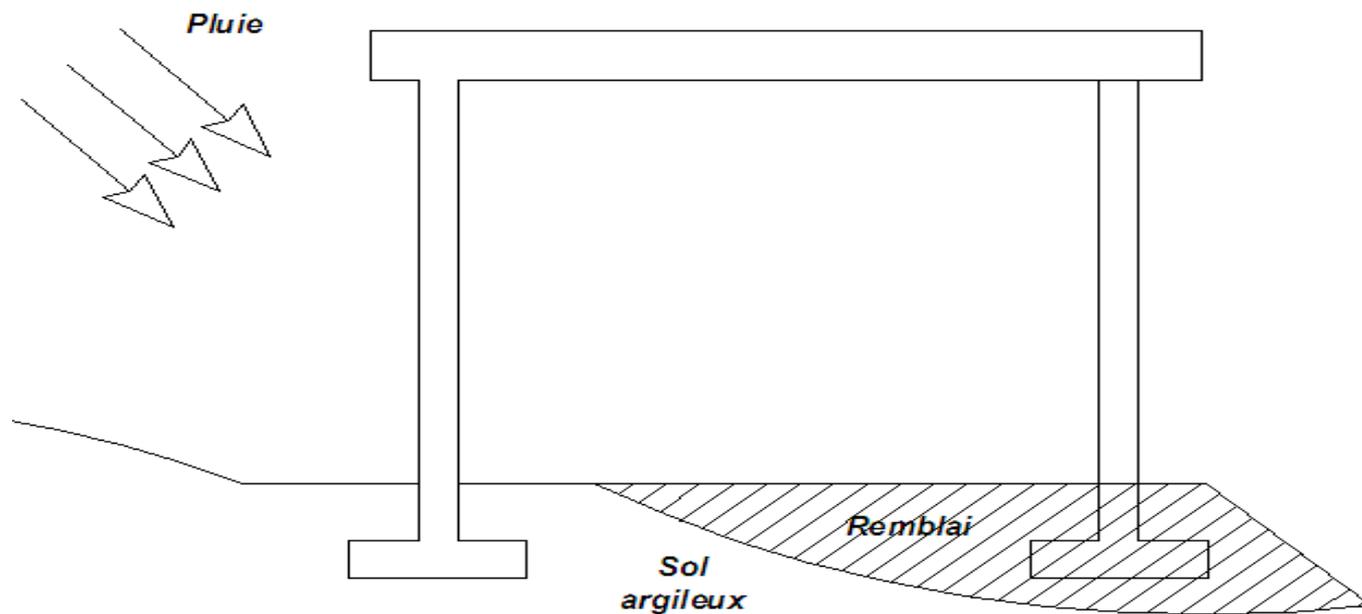
**Causes:** Après la destruction des canalisations les eaux qui s'en échappaient s'infiltraient dans le sol, noyaient la couche d'assise des fondations et réduisaient sa force portante..

- Solutions:**
- on pose des témoins sur des lézardes pour noter leur évolution.
  - On répara les canalisations en cave et on attend que les travaux voisins soient sortis de terre et que tous les remblais soient terminés.
  - on observe les témoins. Tout en remplaçant ceux cassés.
  - Lorsque le mouvement s'arrêta, on colmate alors les lézardes.

## Exemple 5

Après la mise en place d'un remblais pour réaliser une plateforme, l'entreprise a construit un bâtiment scolaire en partie sur les remblais et les déblais.

A la suite d'un orage, la partie aval du bâtiment a tassé d'une dizaine de centimètres et à légèrement glissé dans la partie la plus épaisse du remblais.



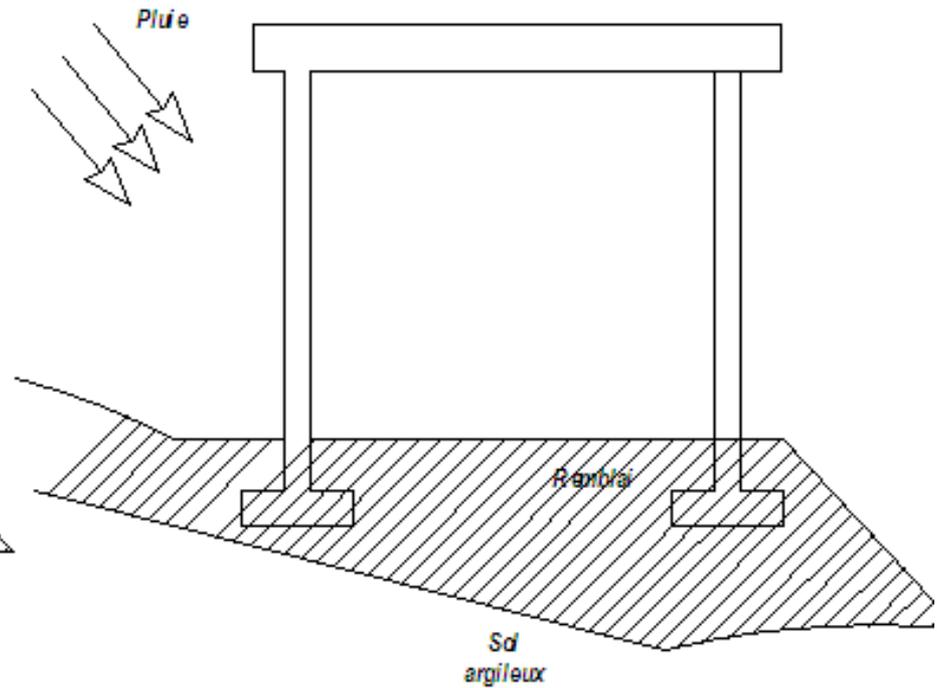
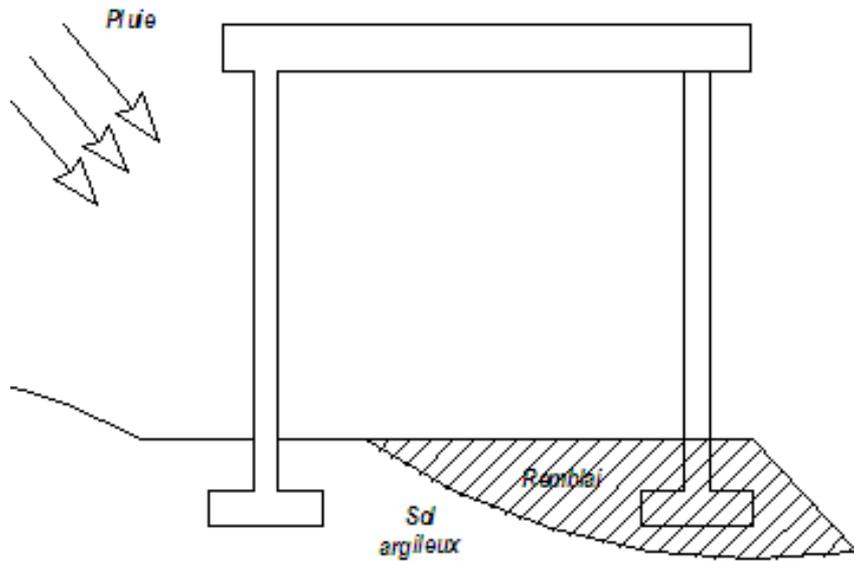
**Causes:** Le remblai a été mis en place sans compactage adéquat et sans avoir purgé le sol en place de la terre végétale et de la partie supérieure de sol altérée d'origine argileuse. L'épaisseur du remblais était variable.

L'eau de pluie n'a pas été drainée et s'est infiltrée sur la couche argileuse provoquant le tassement du bâtiment

**Solutions:** - Décapage du sol en place.

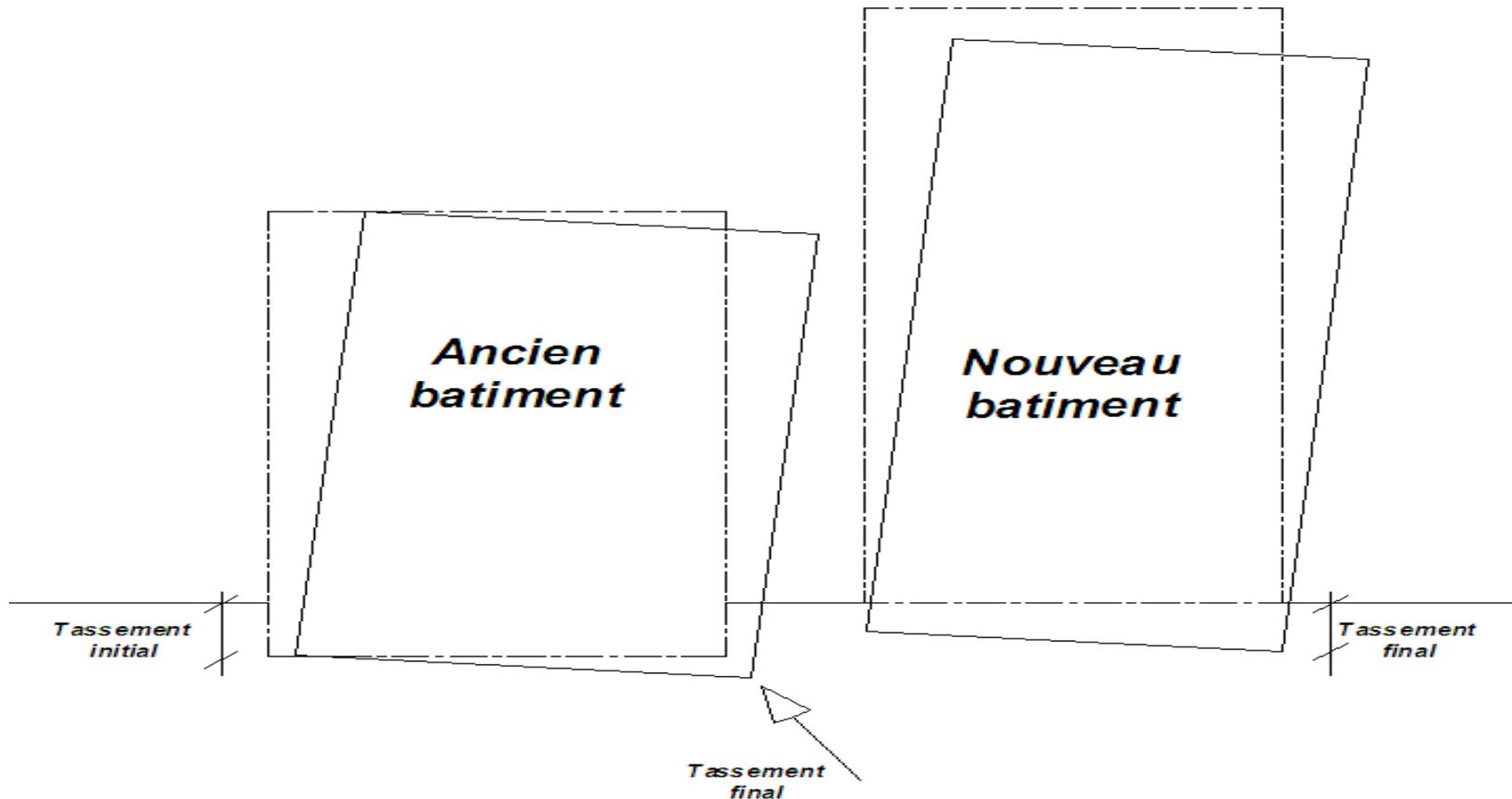
- Compactage adéquat du remblais

- Drainage et imperméabilisation des plateformes pour éviter l'infiltration des eaux de pluie dans le sol.



## Exemple 6

Un premier bâtiment a été construit sur un sol de médiocre qualité et il a tassé normalement. Un nouveau bâtiment a été construit juste à côté. Le nouveau bâtiment s'est mis à tasser de façon différentielle entraînant le basculement du premier bâtiment.

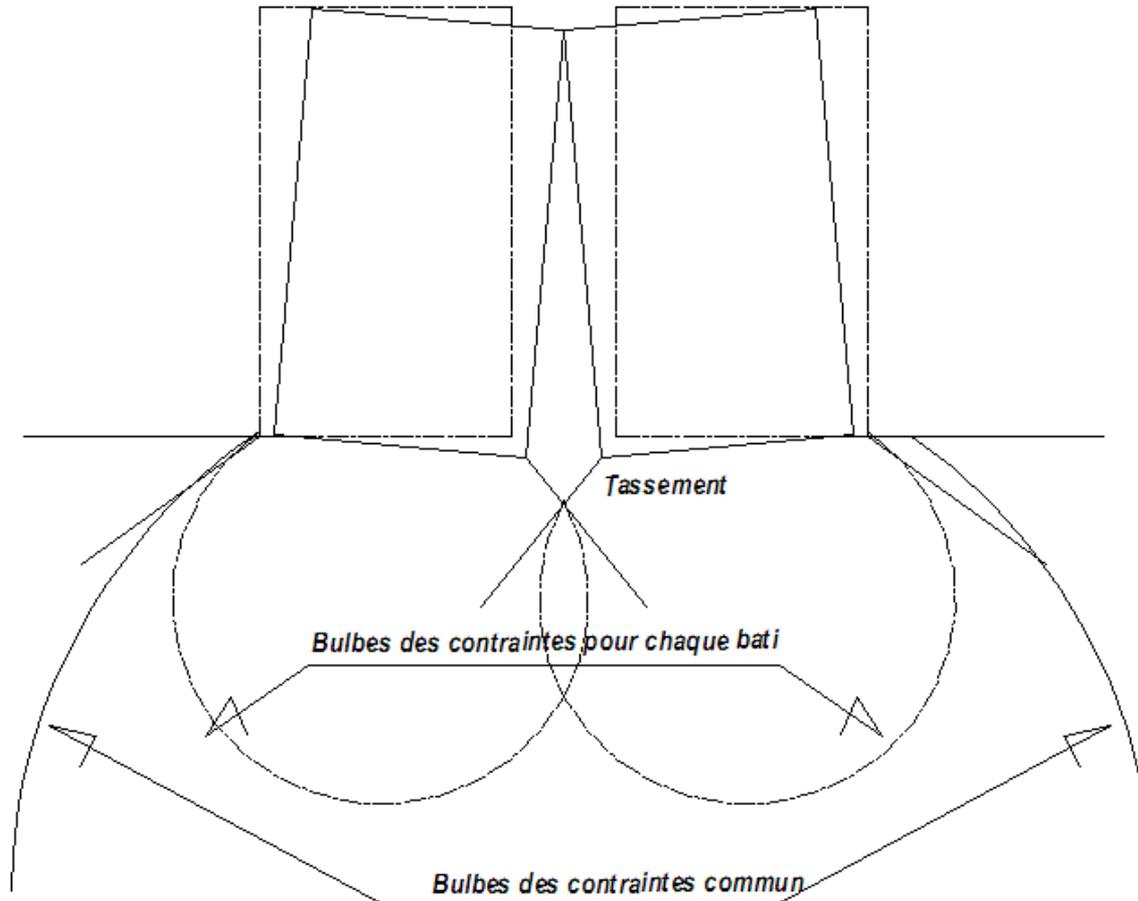


**Causes:** Le premier bâtiment a comprimé le sol. Le nouveau bâtiment s'est appuyé d'un côté sur un sol consolidé par la charge du premier et de l'autre sur un sol vierge compressible.

**Recommandations:** dans le cas des sols compressibles, la construction d'un bâtiment nouveau accolé à un bâtiment ancien nécessite des fondations profondes.

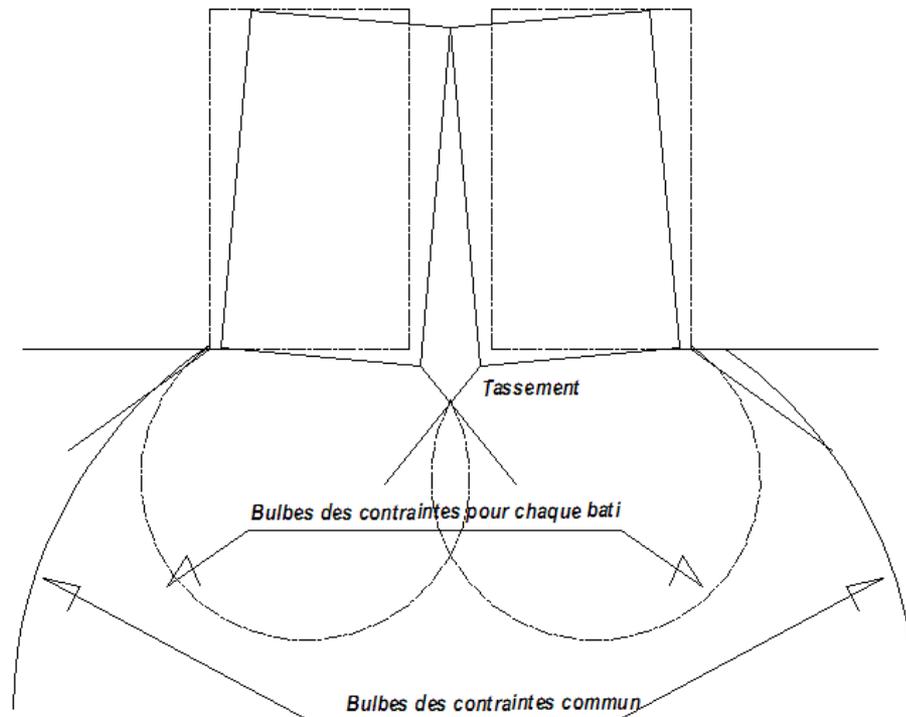
## Exemple 7

Deux bâtiments ont été construits presque en même temps à quelques centimètres l'un de l'autre. Dès la fin de la construction, on a constaté un basculement d'un bâtiment vers l'autre qui viennent se toucher en partie haute.



**Causes:** La résultante des charges, au droit de la séparation des bâtiments est plus importante que la résultante des charges à périphéries. Dans le cas d'un sol compressible, ce écart de charges se traduit par un tassement différentiel qui tend à faire basculer les bâtiments l'un vers l'autre.

**Recommandations:** La distance entre les batiments doit etre telle que l'on puisse prendre en compte les tassements. Dans ce cas on peut améliorer le sol, si non envisager des fondations semi-profondes ou profondes.



## Reprise en sous œuvre

Le terme *reprise en sous-œuvre* est utilisé chaque fois que l'on réalise un ouvrage devant assurer une nouvelle transmission des charges. Ce problème se pose dans deux cas principaux:

- excavation au droit d'un ouvrage existant;
- reprise en sous-œuvre d'éléments de structure.

## Exécution d'une fouille à proximité d'un ouvrage:

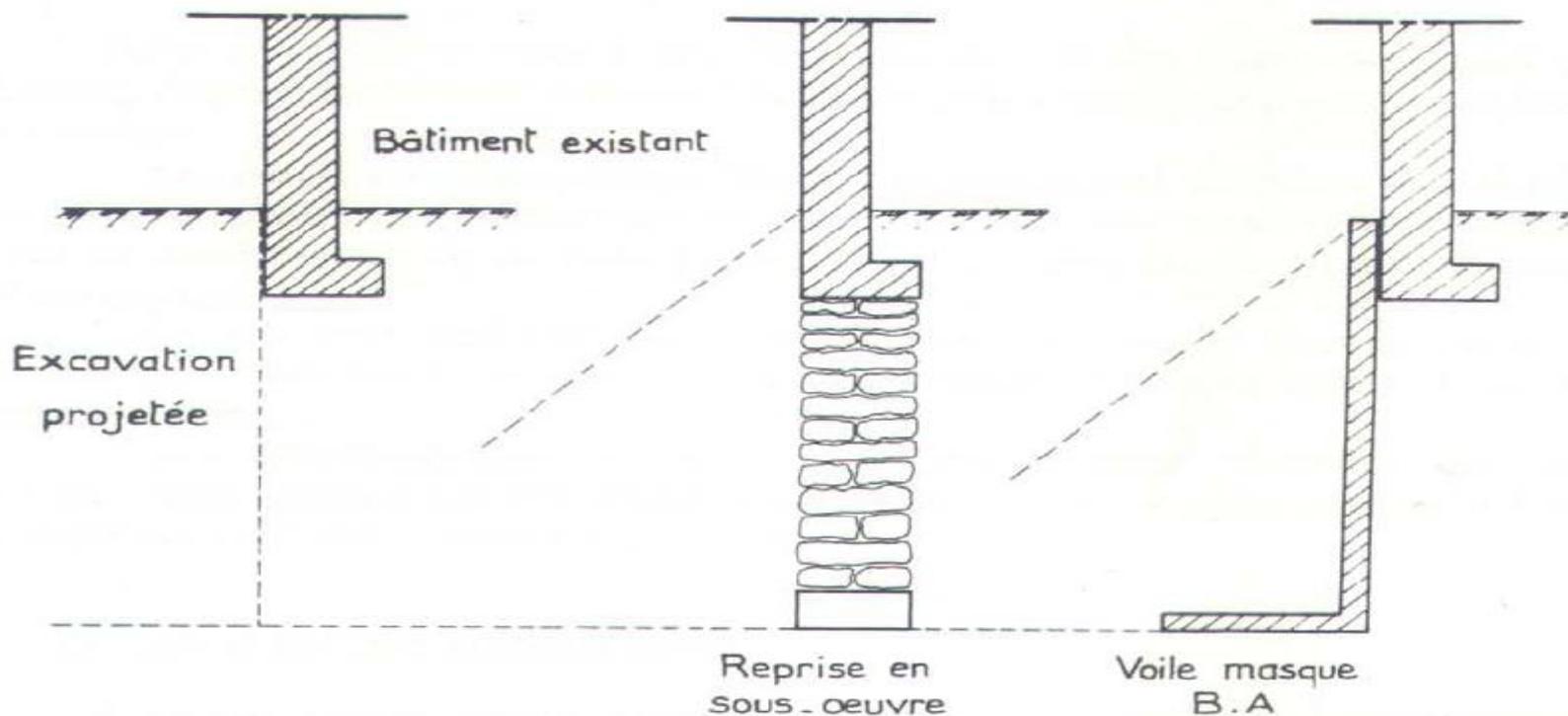
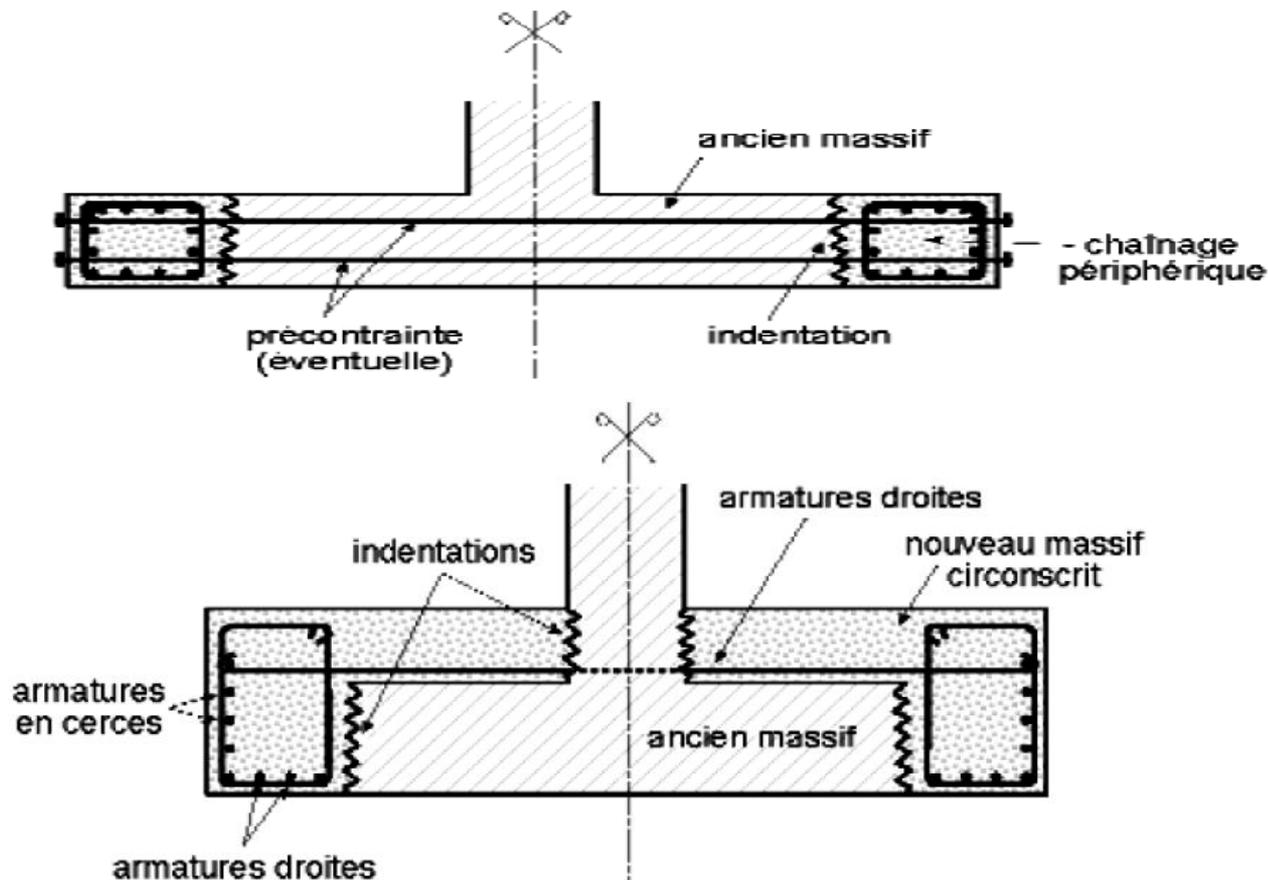


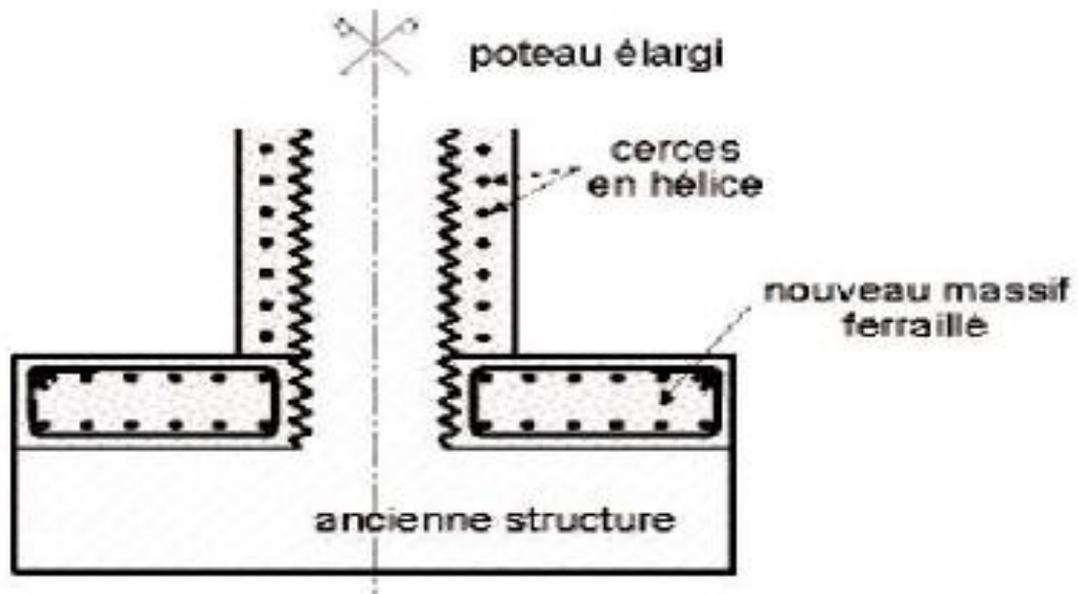
Fig. X.1

## Confortement des fondations:

### La reprise en sous œuvre

Le principe de base consiste, soit à reporter le niveau de fondation à un niveau inférieur, où est de meilleure qualité, soit à augmenter la surface de la fondation au niveau, initialement réalisée.





# Pathologies des structures en béton armé

Le **béton armé** est un matériau de base de structures largement utilisé depuis plus d'un siècle, aussi bien dans le génie civil que dans le bâtiment. Il peut se **dégrader** sous l'influence de causes liées à sa **qualité originale** ou à des **sollicitations d'exploitation** ou **d'environnement**.

Des pathologies **apparentes** ou **cachées** peuvent survenir. Afin de connaître leur nature, leur étendue et leur potentialité d'évolution, on établit un **diagnostic** nécessaire pour la prise des décisions relatives à la maintenance de l'ouvrage concerné.

Les signes apparents extérieurs des désordres d'un ouvrage en béton sont souvent des **fissures**, des **désagrégations** et des **épaufures**



**fissures**



**désagrégations**



**épaufures**

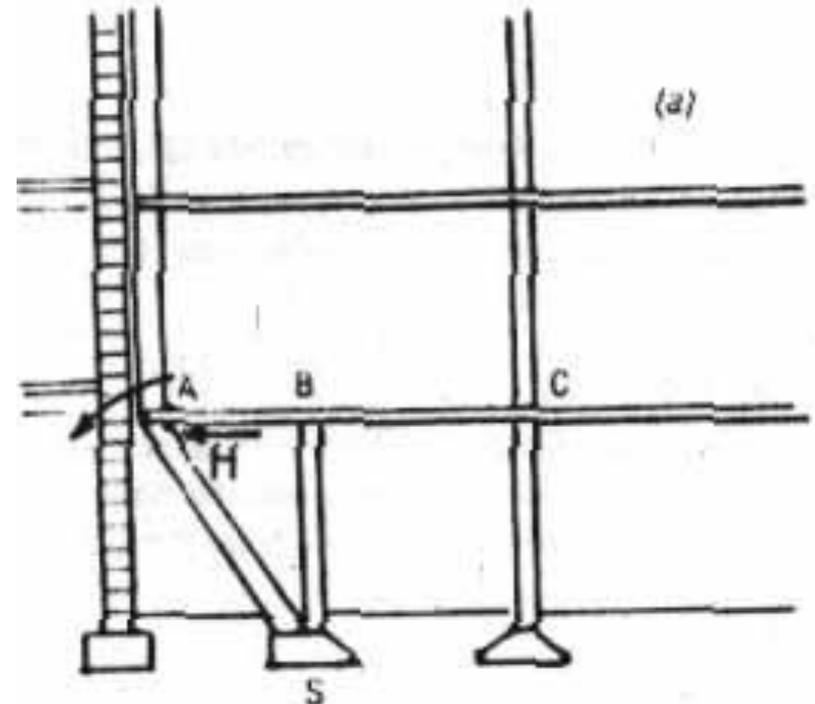
Les causes de ces problèmes sont multiples, les plus fréquemment rencontrées sont :

- Les erreurs de conception et de dimensionnement
- Les erreurs d'exécution
- Les dégradations d'origine chimique (corrosion des armatures)
- Les dégradations d'origine physico-chimique (gel-dégel)
- Les dégradations d'origine mécanique (choc)
- Les dégradations d'origine sismique
- .....

### ➤ Les erreurs de conception

#### Exemple 1:

Un bâtiment est projeté à proximité d'un bâtiment existant sur un sol médiocre. Pour ne pas déstabiliser la structure existante, le projeteur avait eu l'idée d'incliner en sous-sol les poteaux porteurs du mur de doublage en file A pour qu'ils rejoignent les semelles de la file voisine. Comme par ailleurs, les façades devaient être traitées en 'murs rideaux', les planchers portaient uniquement sur les refends, en commençant par les murs de doublage en mitoyenneté.

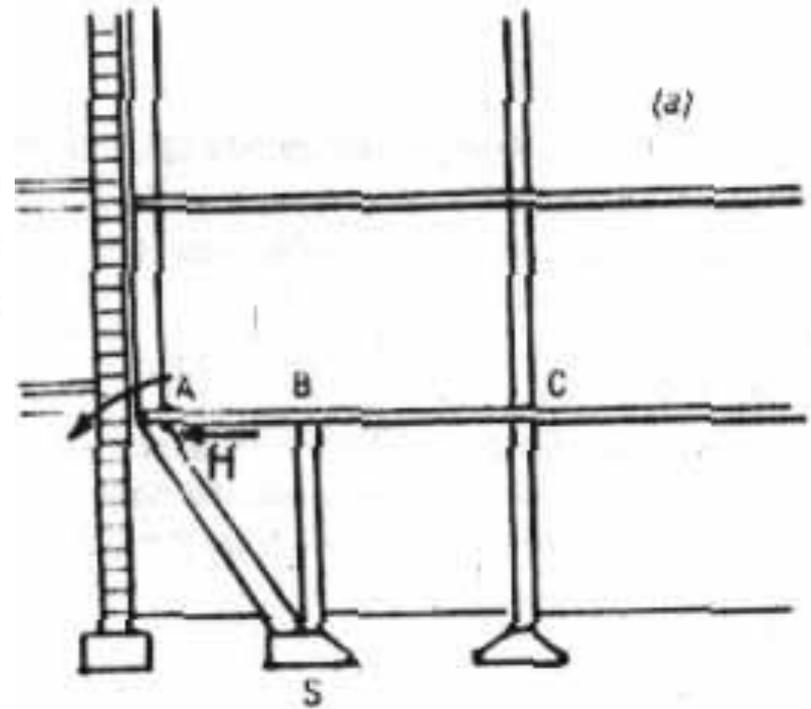


## Désordres:

Les travaux étaient arrivés au plancher haut du 1er étage quand le chef de chantier observa que le joint de tassement réservé entre l'ancien bâtiment et le nouveau n'avait plus une épaisseur régulière.

Au niveau du plancher haut du sous-sol, le polystyrène qui avait servi de coffrage était à moitié écrasé.

Après un examen attentif des lieux ils ont constaté les désordres suivants:



Les triangles formés par les poteaux inclinés, les poteaux verticaux adjacents et la travée de plancher intermédiaire étaient entrain de basculer vers la bâtiment ancien, Un bon nettoyage révéla des fissures sur la face supérieure du plancher haut de sous-sol au dessus des poteaux de la file B et d'autres transversales dans tous les poteaux du sous-sol.

La présence du bâtiment ancien qui contrebutait avait empêché un effondrement certain.

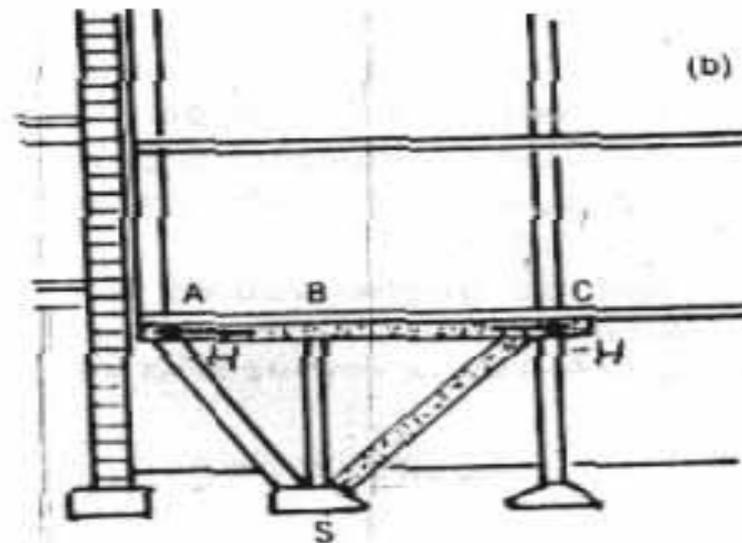
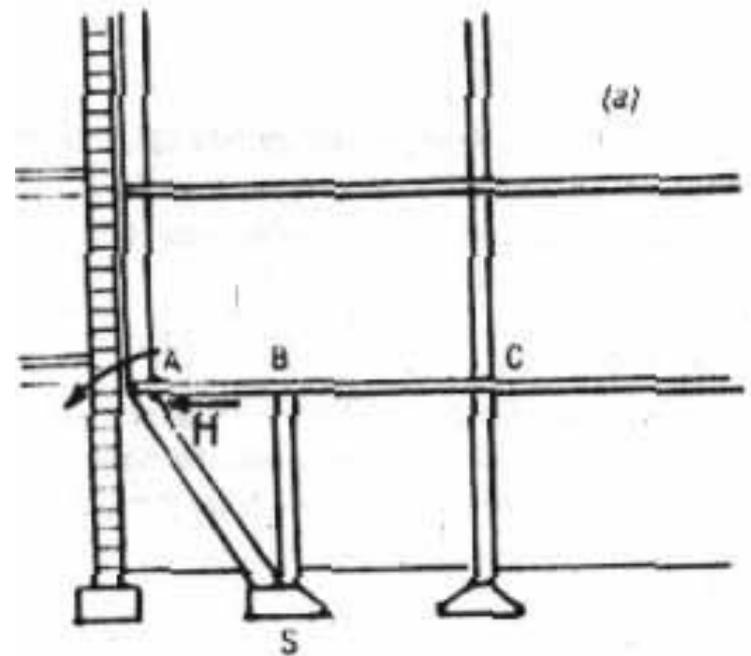
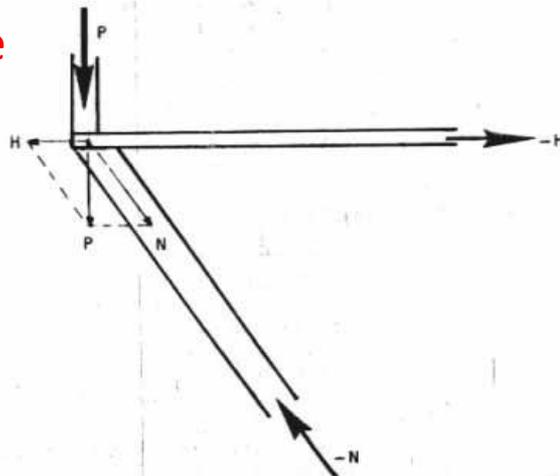
## Causes:

la composante horizontale  $H$  de l'effort dans les poteaux inclinés ne pouvait être reprise dans la structure du sous-sol du bâtiment nouveau, peut-être avait-elle même provoqué un léger glissement des semelles  $S$ .

## Remèdes:

il fallait réaliser une structure capable, soit de supprimer la poussée  $H$ , soit de l'équilibrer par une butée égale et opposée. Pour cette dernière, il fallait réaliser des diagonales  $SC$  mises en charge par vérin et des tirants  $AC$ .

Un poteau est une barre qui transmet un effort suivant sa direction. S'il est incliné, il transmet un effort incliné qui comporte par conséquent une composante horizontale

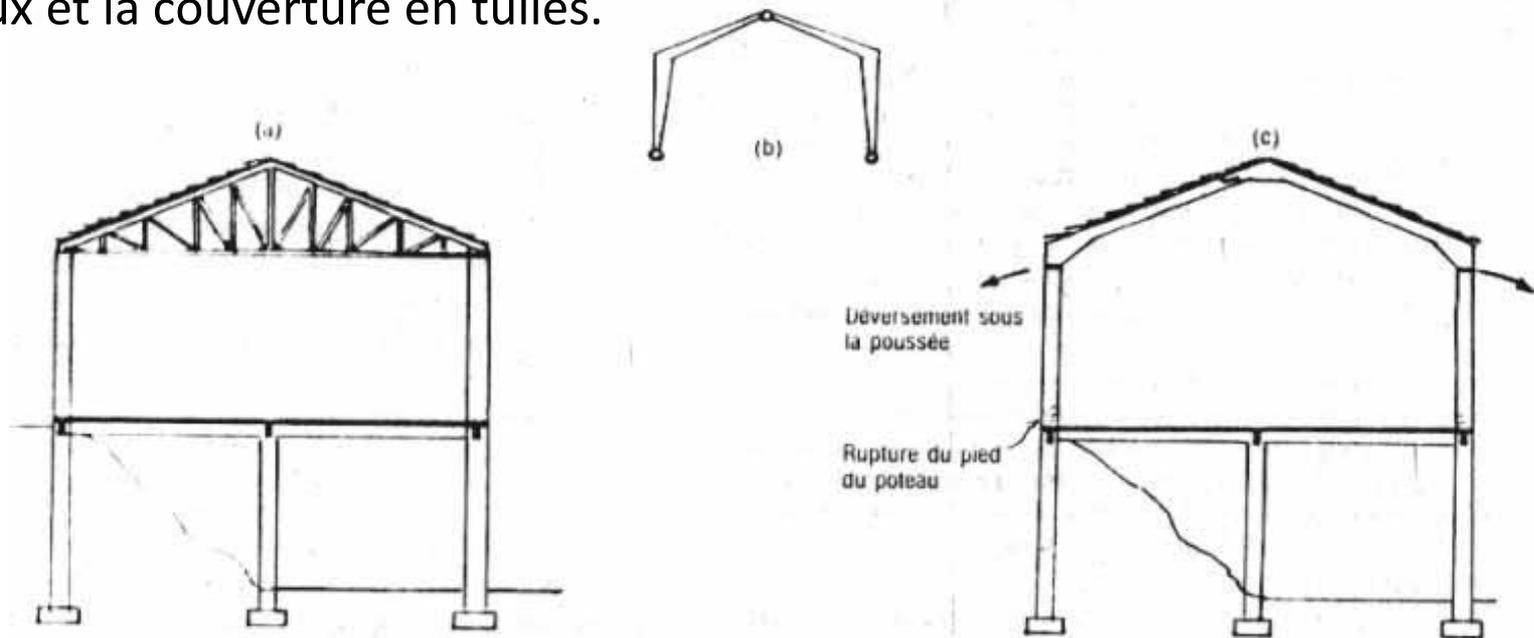


## Exemple 2:

Un propriétaire avait fait construire un bâtiment à deux niveaux, dont la toiture devait être portée par une charpente métallique de type classique à deux versants. Les fermes de forme traditionnelle à tirant, devaient reposer sur des poteaux en béton armé dimensionnés pour résister et à la charge et au vent.

Au cours de la réalisation le propriétaire trouva plus économique de remplacer la charpente métallique par des portiques en béton armé à trois articulations.

Comme les poteaux existaient, il commanda des portiques amputés de leurs poteaux. Et les fit sceller sur les poteaux en place. On posa après pannes, chevrons, liteaux et la couverture en tuiles.



(a) Projet initial.  
(b) Portique en béton armé à 3 articulations.  
(c) Ouvrage réalisé.

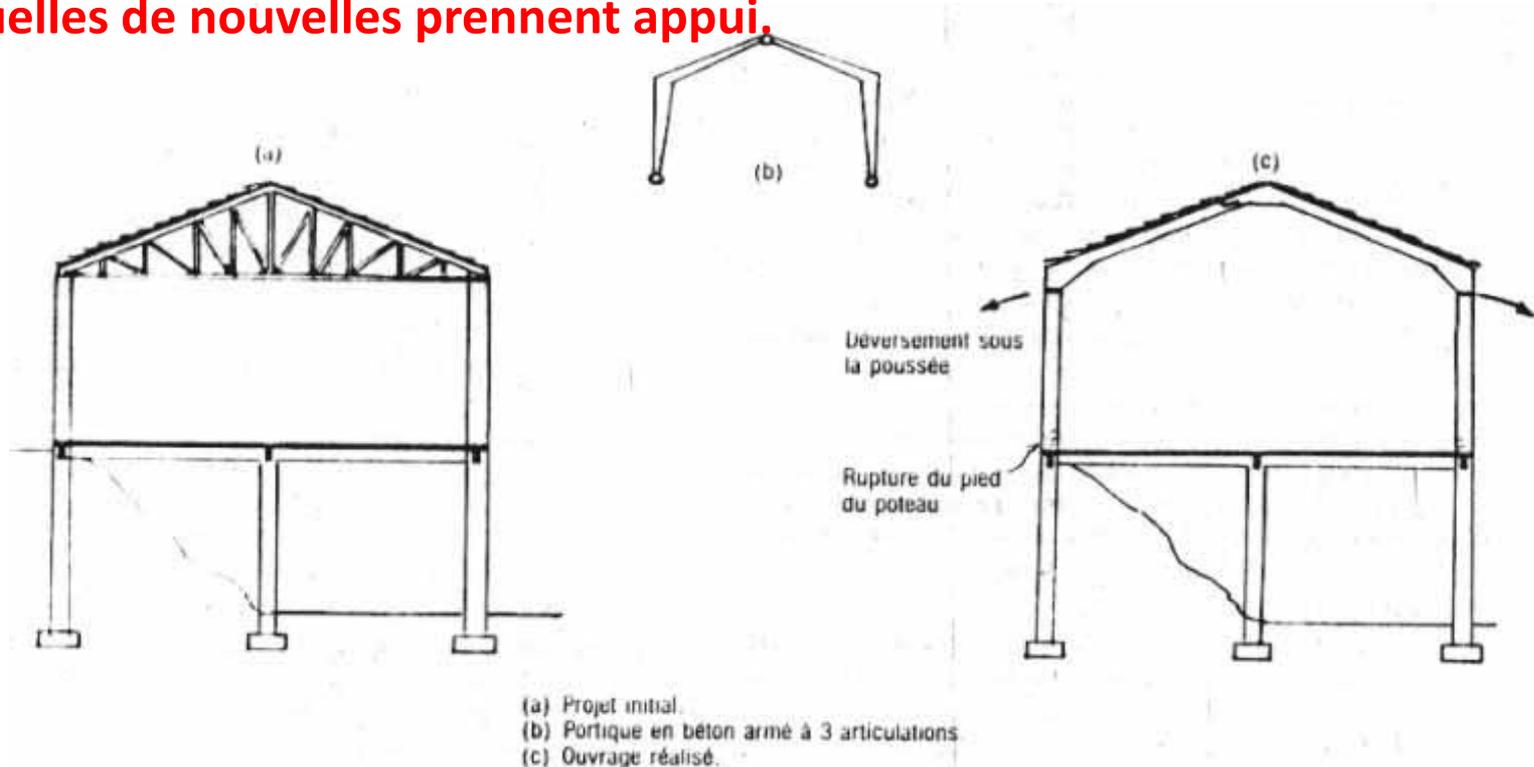
## Désordres:

Juste après l'achèvement de la pose de la tuile tout l'étage s'effondra ??????

## Causes:

la liaison réalisée entre poteaux et poutres en béton armé ne pouvait guère transmettre le moment de continuité. Dès lors, un moment considérable se développa en pied des poteaux qui n'étaient guère dimensionnés pour résister à ces efforts.

**il convient toujours de s'intéresser de très près des structures existantes sur lesquelles de nouvelles prennent appui.**



### Exemple 3:

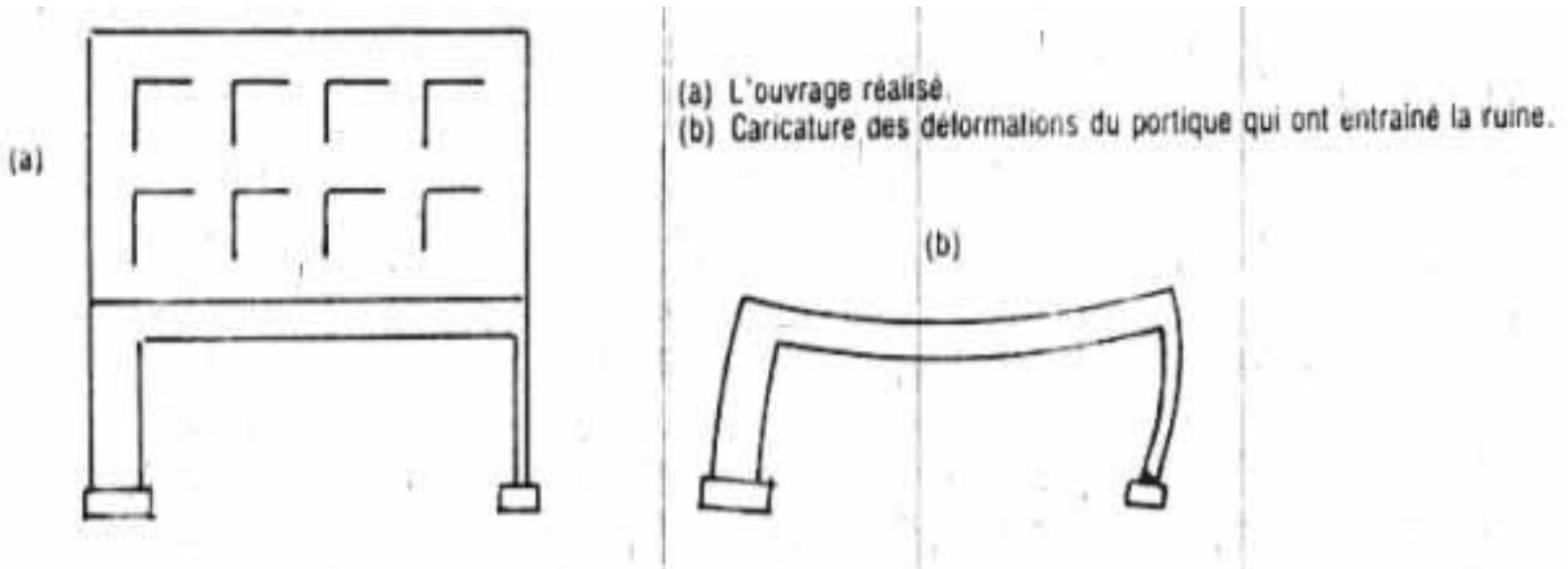
Un propriétaire souhaitait avoir une très large ouverture sur la rue pour faciliter la manœuvre des véhicules.

L'architecte projeta alors de faire reposer la façade sur une poutre de 15m de long appuyée sur 2 poteaux, l'un de largeur confortable et l'autre mince.

Le projeteur conçut une poutre de 25x110 cm, et l'arma fort correctement avec chapeaux se retournant dans le gros pilier par contre l'autre est traité comme un poteau ordinaire.

### Désordres:

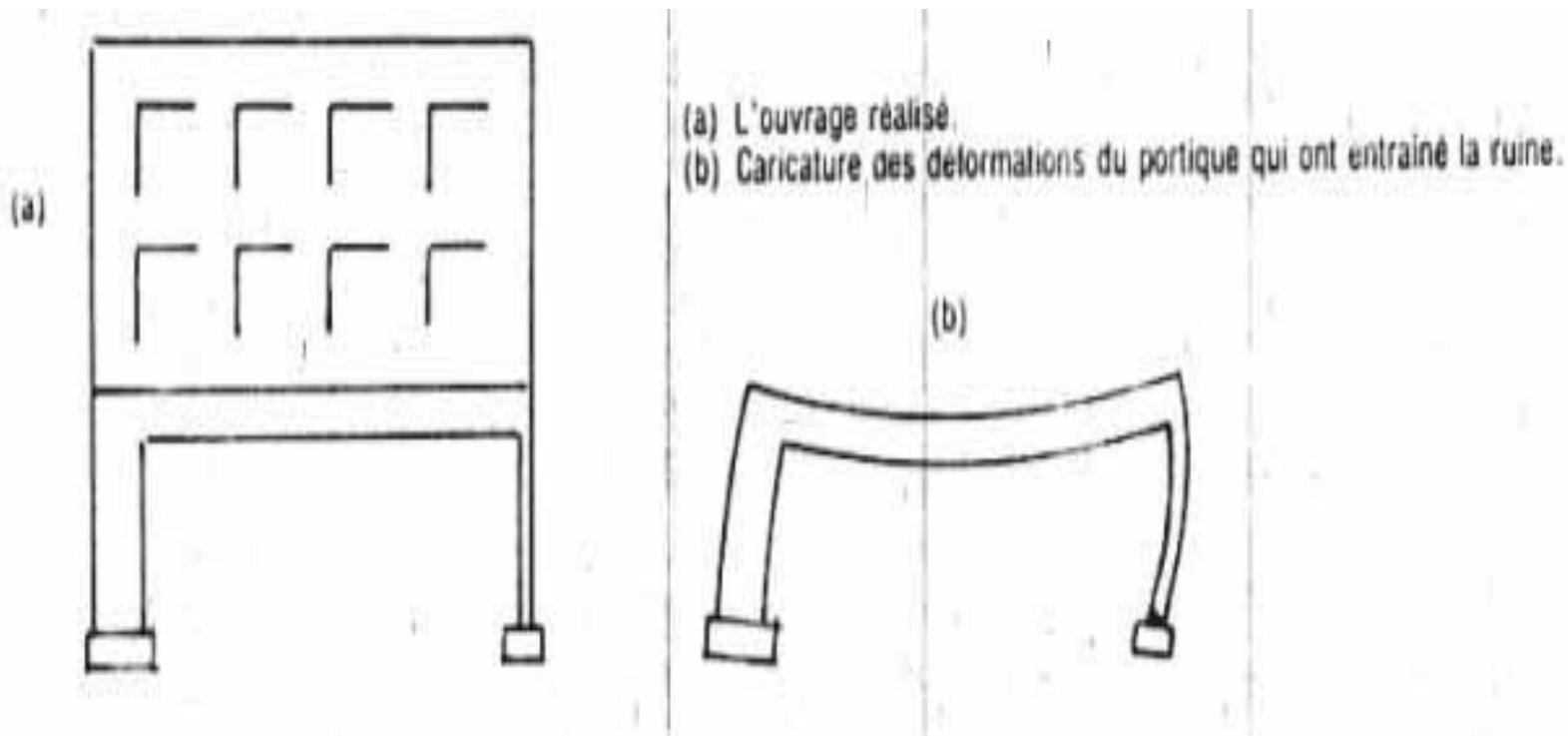
Vers la fin de la construction, l'ouvrage s'effondra.



## Causes:

l'examen des décombres révéla que le pilier mince avait fléchi vers l'extérieur. Sous les charges, la poutre avait pris sa flèche, avec rotation aux appuis. Cette rotation amenant un moment de flexion, vient s'ajouter à la charge contrée au niveau du pilier mince où les contraintes atteignirent la rupture.

Ce sinistre ne se serait pas produit si le pilier en question avait été équipé de 2 articulations.

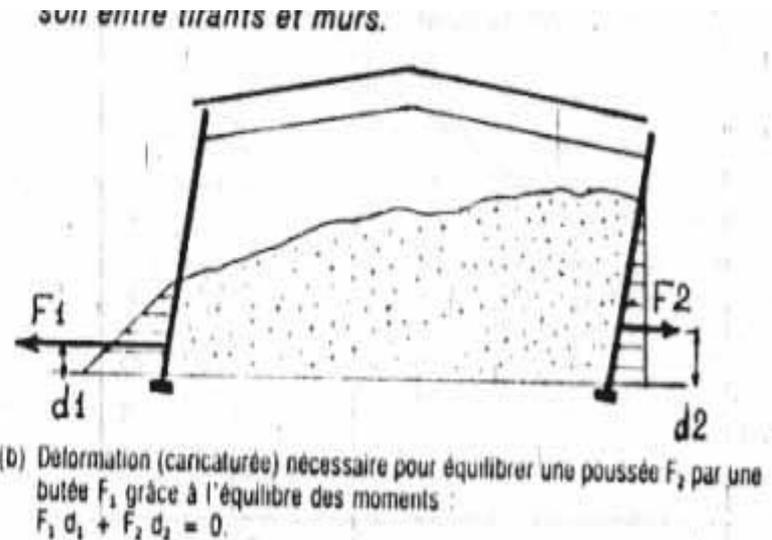
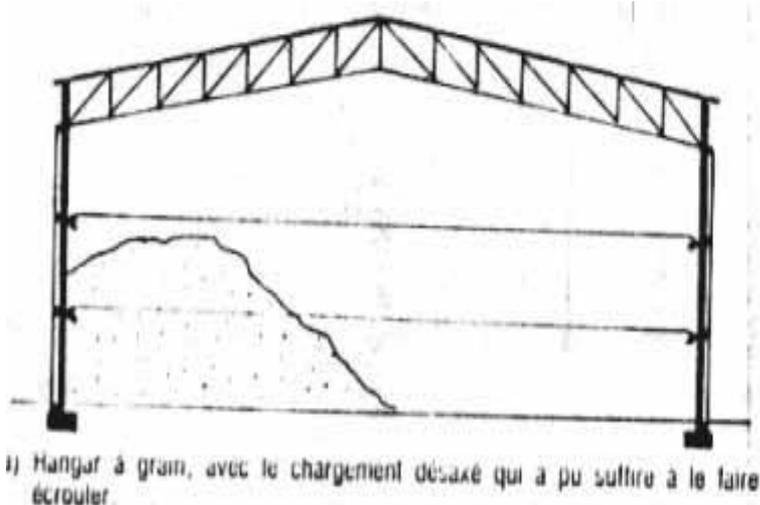


## ➤ Les erreurs de dimensionnement

### Exemple 4:

un silo à grain en forme de hangar rectangulaire s'effondre partiellement au cours du premier remplissage. Cet ouvrage carré de 17 m de côté et de 6 m de hauteur sous entrain, comportait des murs latéraux en béton armé quadrillés de nervures et une toiture légère en charpente métallique.

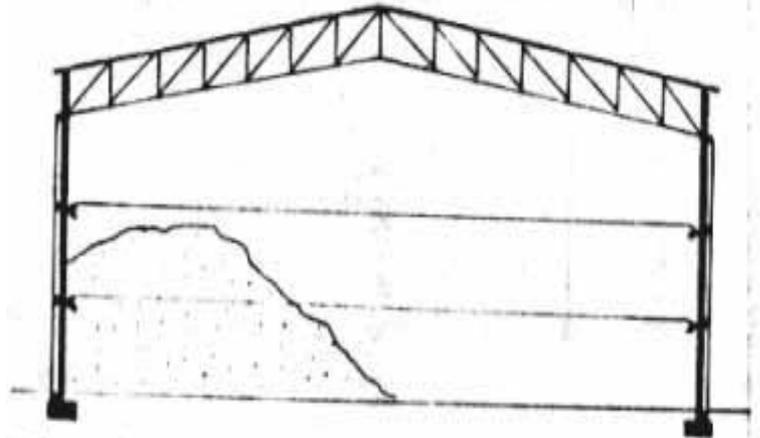
Les murs latéraux devaient travailler en flexion sous la poussée des grains, avec appui au croisement des nervures grâce à de simples tirants en fer ronds de 20 cm de diamètre qui traversaient le hall et étaient retenus de chaque côté par l'effet de poussée.



## Causes:

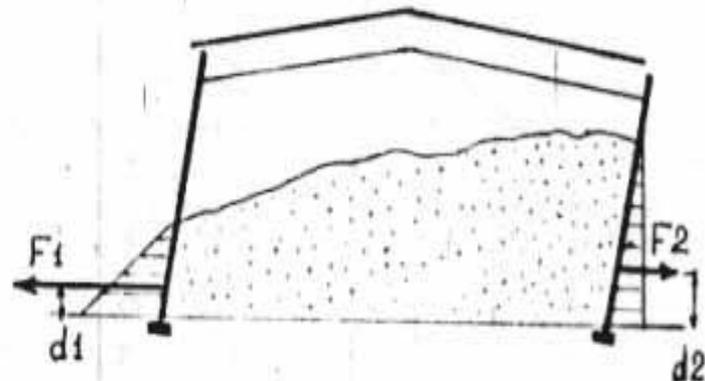
c'est une erreur de détail qui fut à l'origine de l'effondrement : les tirants de  $\Phi 20$  n'étaient même pas ancrés dans la paroi en béton, leurs extrémités étaient simplement courbées en crosse et passées dans des étriers scellés dans les murs. L'examen des décombres révéla que les crosses s'étaient ouvertes.

- 1., Il est toujours dangereux de compter sur la présence d'une charge d'exploitation pour assurer la stabilité d'un ouvrage,
- 2., La résistance d'une chaîne n'est pas supérieure à celle du maillon le plus faible. Ici, la chaîne des efforts qui devaient concourir à la stabilité passait par la liaison entre tirants et murs.



1) Hangar à grain, avec le chargement désaxé qui a pu suffire à le faire écrouler.

son entre tirants et murs.



(b) Déformation (caricaturée) nécessaire pour équilibrer une poussée  $F_2$  par une butée  $F_1$  grâce à l'équilibre des moments :  
 $F_1 d_1 + F_2 d_2 = 0$ .

## **Pour éviter ces erreurs de dimensionnement on doit:**

- 1- Apprécier correctement l'intensité des charges et leur répartition qui n'est pas
- 2- Appréhender tous les cas de charge que peut subir l'ouvrage durant sa construction et son existence.
- 3- N'oublier aucune charge.
- 4- Ne pas ajouter des charges sans la vérification des calculs.

## ➤ Les erreurs dans les plans de ferrailage

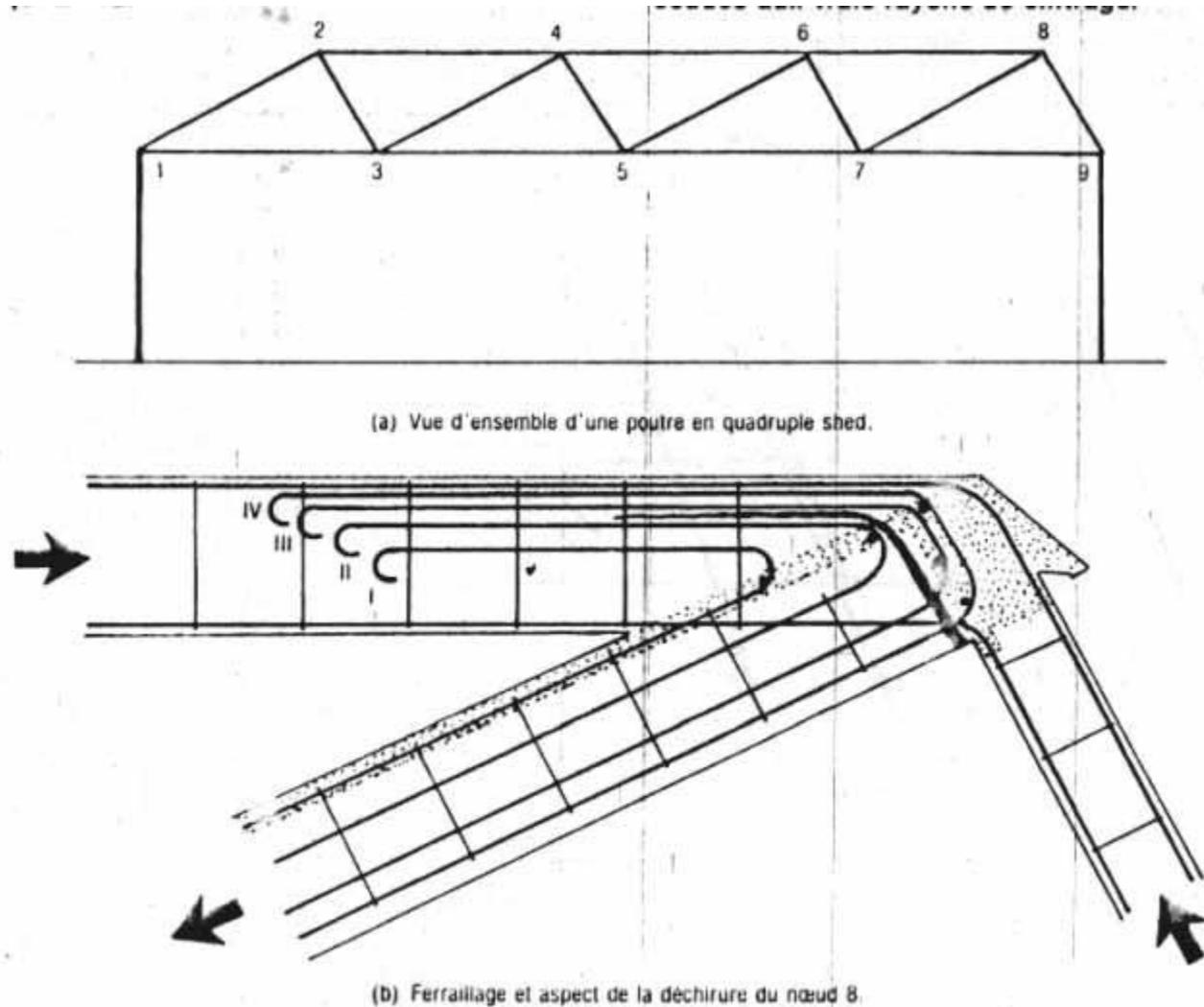
### Exemple 5:

Des poutres de 27 m de portée, devaient porter la couverture d'un vaste atelier avec dalles de béton nervurées.

Les aciers de nuance FeE24 acier doux faisaient en ce temps concurrence au FeE40 Haute Adhérence.

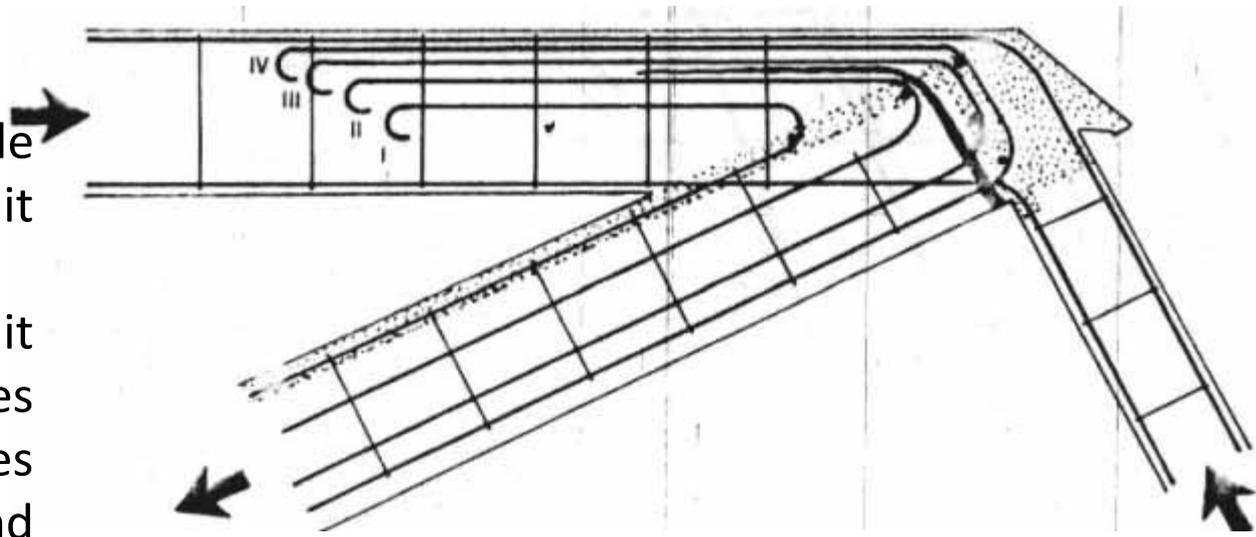
Le projeteur avait terminé ses plans quand l'entrepreneur vint lui annoncer qu'il ne pouvait se procurer la nuance FeE40 souhaitée et lui demander de revoir son projet avec FeE24.

Le projeteur augmente les sections de toutes les barres :  
\*/ les HA 14 deviennent des HA 18,  
\*/ les HA 25 deviennent des HA 32, etc.



## Désordres:

Après le coulage de l'ensemble, on avait décoffré les dalles des couvertures et l'on enlevait les derniers étais sous les nœuds inférieurs des poutres en treillis, quand des craquements se firent entendre et le nœud 8 se fissurait.



## Causes:

Les barres I et II écrasèrent le béton dans leur pliure, Les barres III et IV devenant insuffisantes pour absorber les tractions, s'allongeaient en phase plastique,

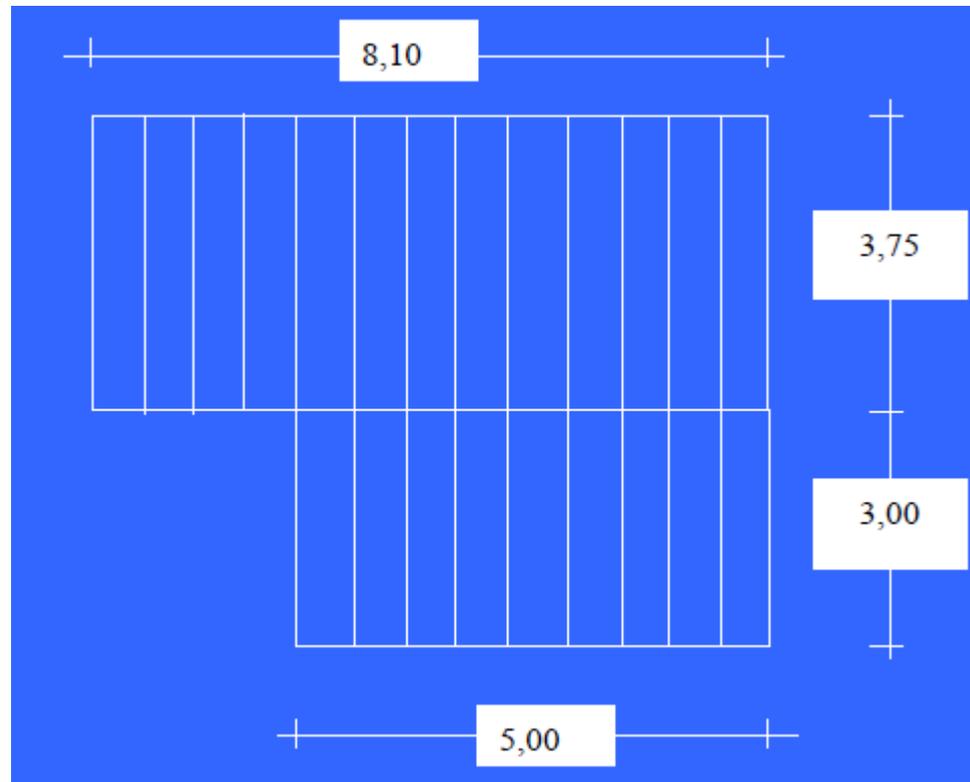
## Remède :

*Démolition du nœud 8 et les barres qui y aboutissaient jusqu'à mi-longueur et on réalisa un nouveau dispositif, mieux profilé, avec acier HA et armatures complémentaires adéquates. Les autres nœuds ne posaient pas de problèmes.*

## Exemple 6:

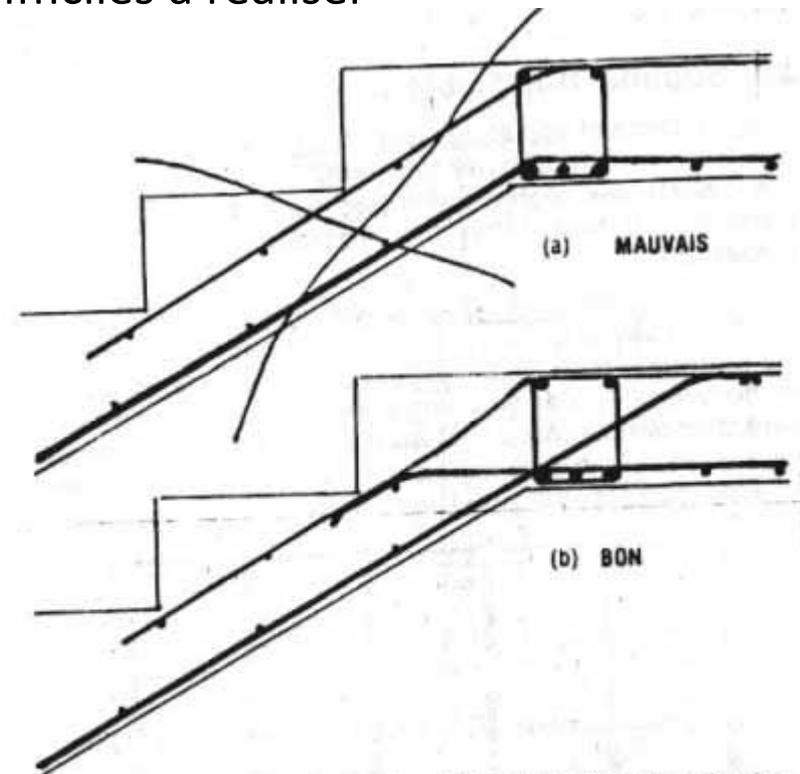
Le plancher couvrait le RDC d'un pavillon à façades et pignons en briques creuses et refends en briques pleines. Il comportait des hourdis en terre cuite surmontés d'une dalle en béton de 5 cm. Cela était traditionnel pour l'ingénieur, après un petit calcul, il se contenta d'indiquer à l'entreprise locale les armatures à placer dans les nervures. Il avait simplement négligé de préciser dans quel sens elles devaient porter. L'entrepreneur n'avait pas compris que les nervures devraient être posées dans le sens dessiné sur le plan.

### Le plancher s'effondre au décoffrage



## Concernant le ferrailage

- Les armatures doivent être suffisantes en section, longueur et ancrage.
- Le rôle des armatures étant essentiellement de reprendre des efforts de traction, l'ingénieur cherche à les adapter au mieux aux moments calculés. Si une légère sous-estimation des sections est rarement grave, une erreur de signe l'est davantage.
- Eviter les dispositions d'armatures qui sont difficiles à réaliser
- Eviter la densité excessive des armatures
- Dans les zones de ferrailage difficile il est recommandé de dessiner les armatures à grande échelle
- Eviter les dispositions dangereuses comme les poussées au vide des barres (tendu



Ferrailage d'un raccordement de poutre d'escalier et de palier :  
(a) la poussée au vide des aciers est mal reprise par les cadres de la poutre palière ;  
(b) disposition correcte.

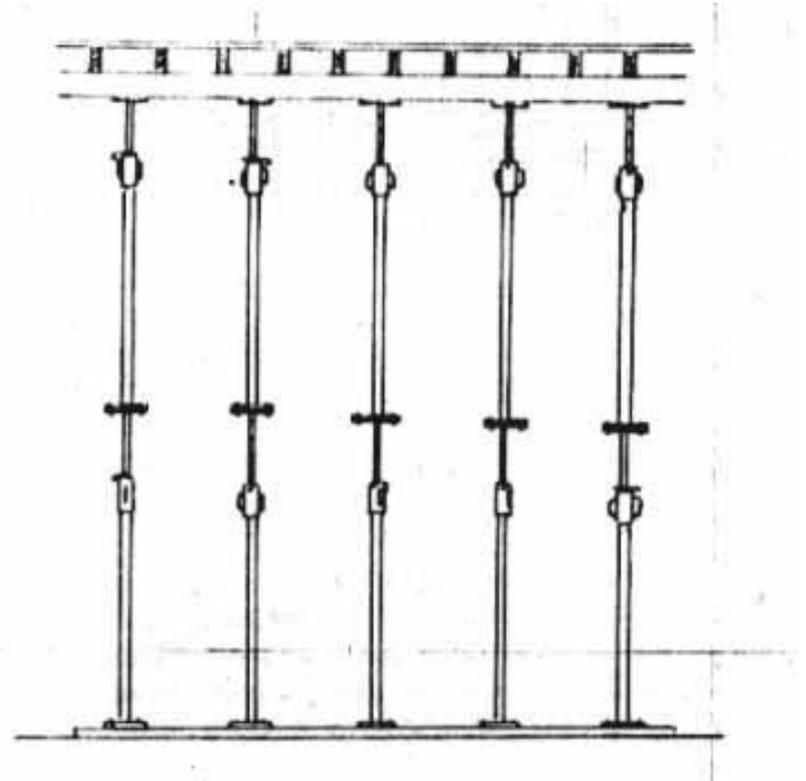
## ➤ Les erreurs d'exécution

### Exemple 7:

un lourd plancher s'effondre en cours de coulage par flambement des étais.  
Ce plancher, le dernier à réaliser, se trouvait à 5,40 m de haut et le chef de chantier ne disposait que des étais télescopiques qui lui avaient servi pour les planchers courants de 3,0 m de haut. Il eut alors l'idée de les rabouter (assembler bout à bout). Les étais avaient leurs platines percées de 6 trous, il suffisait donc de les assembler par 6 boulons – bien mince, il est vrai – pour former des étais de la hauteur voulue.

Sans aucun entretoisement, cette construction était un vrai château de cartes. Il a sans doute suffi du déversement de l'une des pièces pour que tout s'effondre.

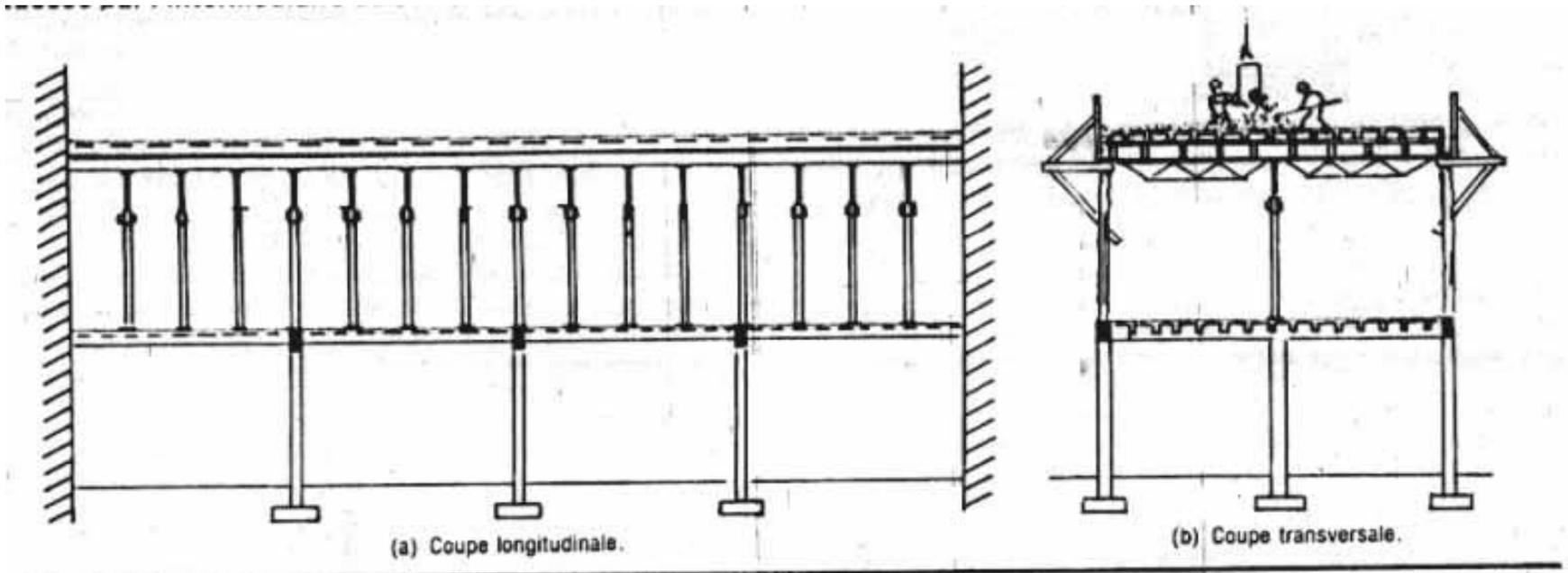
a) Vue d'ensemble  
de l'étalement.



### Exemple 8:

Une entreprise employait depuis peu de temps des étais télescopiques horizontaux, ce qui lui offrait de grandes économies sur le nombre de ses étais verticaux. Ces derniers étaient donc moins nombreux et bien évidemment plus chargés.

Cette entreprise eut à réaliser un bâtiment scolaire de 9 x 23 m d'emprise à deux niveaux. Les planchers, à nervures parallèles aux façades, reposaient sur des poutres transversales espacées de 5,50 m. Pour étayer le plancher haut du premier étage, on avait disposé une seule file d'étais à mi-distance des façades et lancer des étais horizontaux télescopiques entre eux et les façades. Les étais reposaient sur le plancher haut du RDC par l'intermédiaire des semelles en bois répartissant la charge sur trois nervures du plancher.



## **Désordres:**

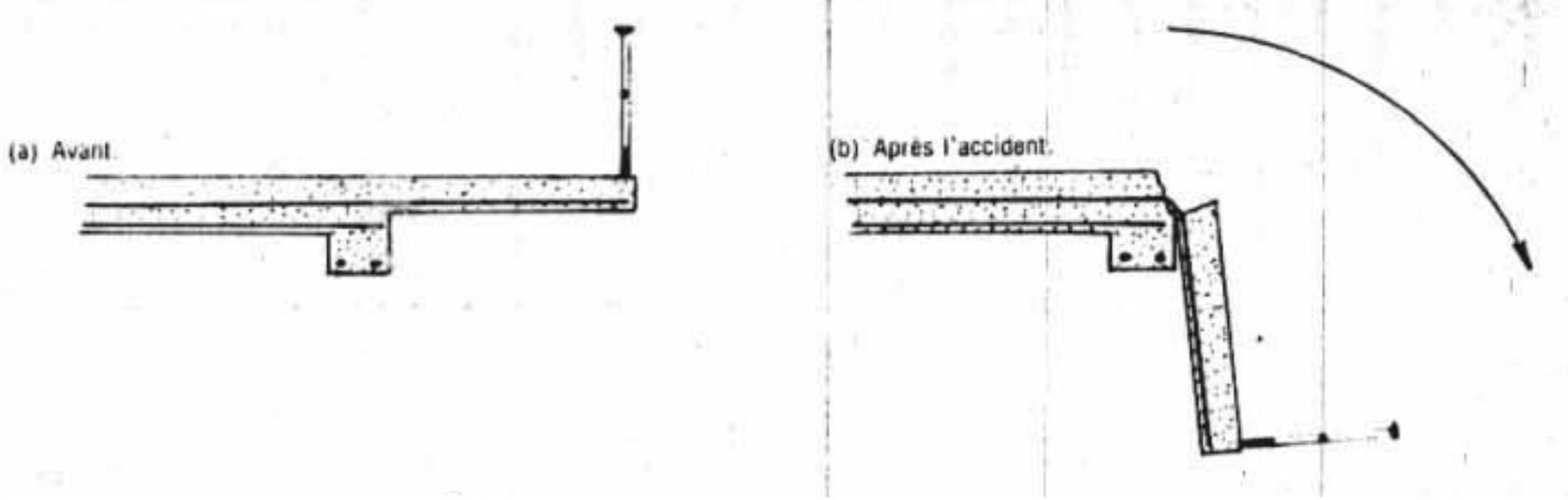
Le plancher s'effondre en cours de coulage, le plancher sous-jacent s'étant lui-même rompu sous les étais.

## **Causes:**

malgré la solidarité entre nervures assurée par la dalle coulée sur place et le soulagement partiel ainsi apporté, les trois nervures directement sollicitées étaient incapables de soutenir la charge du plancher supérieure amenée par les étais. Quand la masse du béton coulée eut atteint la valeur qui devait provoquer la rupture, elles cédèrent, entraînant le coffrage, le plancher en cours d'exécution, les ouvriers bétonneurs et aussi les façades qui basculèrent et enfin le reste du plancher bas qui céda sous le poids des décombres.

## Exemple 9:

Armatures mal positionnées ont entraîné l'effondrement d'un balcon



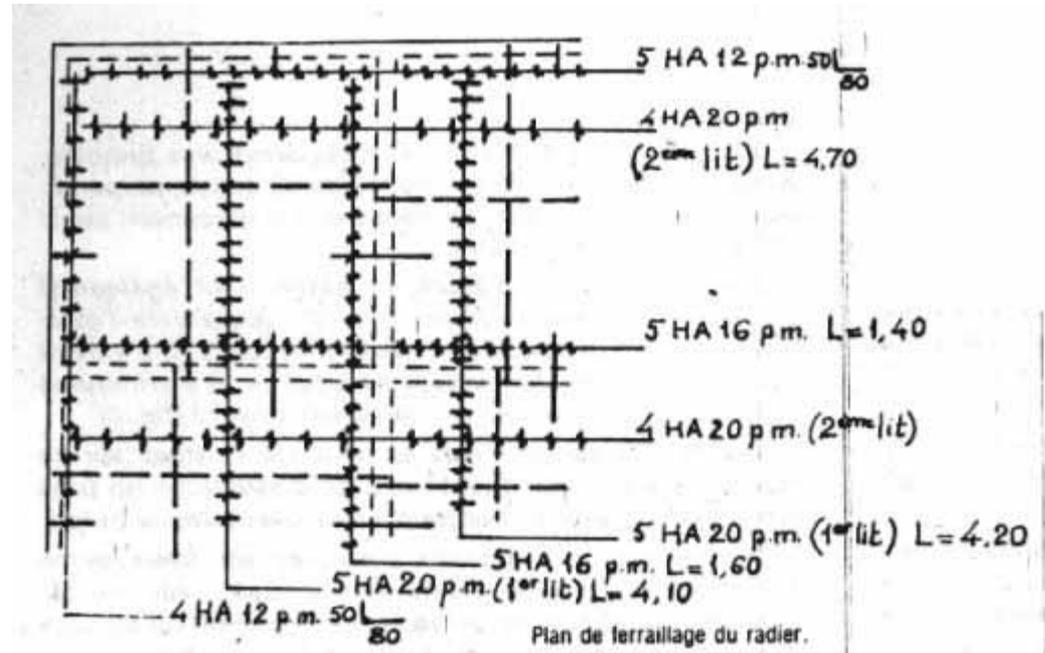
Les aciers étaient situés à 2 ou 3 cm de la sous face du balcon. Jusqu'à là le balcon avait résisté grâce à résistance propre à la traction ; puis, la charge avait été trop forte et la section d'enracinement céda brusquement. Les aciers, formant alors charnière, font tourner la dalle et la maintiennent suspendue le long de la façade.

### Exemple 10:

radier est ferraillé à l'envers.

L'erreur est heureusement découverte avant bétonnage.

Ces plans correctement dessinés, représentaient les nappes d'armatures selon les conventions usuelles qui différencient entre les aciers inférieures et supérieures. Comme le ferrailage était simple, aucune coupe ne permettait de repérer leur répartition dans l'épaisseur du radier.



- Les barres des différents lits doivent être repérées sans ambiguïté.
- Une coupe type est nécessaire pour qu'il n'y ait pas d'erreurs d'interprétation sur l'appellation Premier lit et Deuxième lit.

## Exemple 11:

un **plancher** d'habitation se **déforme progressivement** après décoffrage. Les armatures ne **se recouvraient pas**.

Il s'agit, d'un immeuble à étages, dont les **planchers en dalles pleines** de 18 cm armées de **treillis soudés** reposaient sur des refends espacés de 4 à 6 m.

Après décoffrage du plancher terrasse, on observa une **déformation progressive** accompagnée de **fissuration** dans **l'une des travées** de 5,60 m de portée.

## Causes :

c'était le **dernier plancher** réalisé et l'entreprise écoulait le reste de ses stocks de treillis soudés. Certaines inversions s'étaient produites dans le choix des panneaux et ceux restants n'étaient pas ceux prévus.

Les ferrailleurs avaient armé la travée de 5,60 m en raboutant au mieux : il y eut **recouvrement vers le milieu de la portée** et ce recouvrement **interdit** dans cette zone, n'était même pas de **longueur suffisante**.

Par bonheur, les façades espacées de 10,75 m constituaient des appuis secondaires permettant au plancher de se comporter en dalle reposant sur tout son pourtour. Cela évita l'effondrement pur et simple du plancher sur le précédent qui, sous la charge, ne serait pas non plus resté indemne. Il fallut **ré étayer d'urgence** et creuser des saignées dans la dalle pour y **ajouter les armatures** de flexion nécessaires.

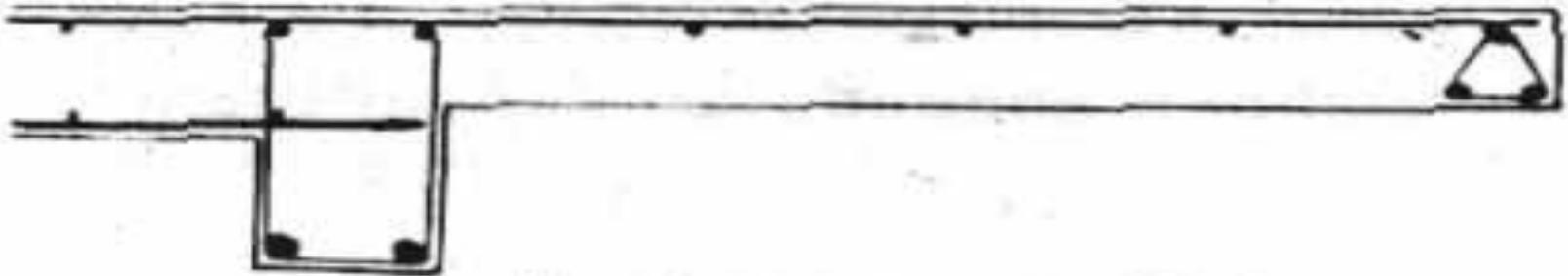
## Il faut éviter ces erreurs portant sur le ferrailage

### -Armatures mal positionnées:

-Parfois les ferrailleurs placent les armatures au mauvais coté (exemple des balcons).

- Armatures trop à l'intérieur: Ceci est préjudiciable surtout si la **hauteur utile** est faible.

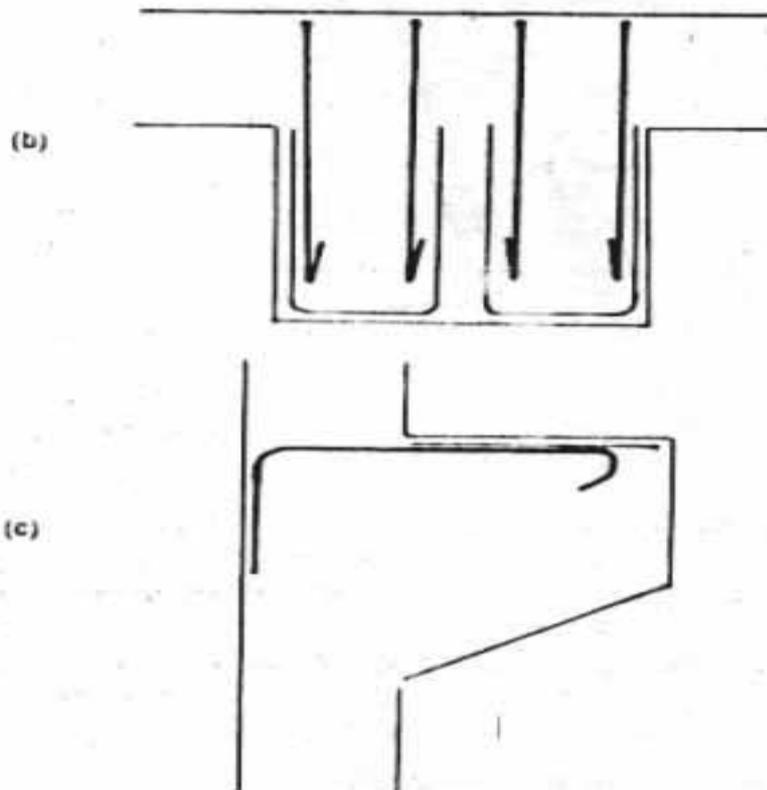
On retrouve ces défauts dans les **Balcons**. Ce mauvais positionnement est souvent causé **par les ouvriers** bétonneurs qui doivent marcher sur les armatures pour étaler et lisser le béton. Une bonne précaution pour éviter ce défaut est de **prévoir des aciers de section suffisante** et de les faire **reposer sur des chaînages transversaux**.



Poutre et chaînage de balcon assurant le maintien des armatures principales en place.

Un problème analogue concerne les **corbeaux** qui sont généralement bétonnés en **deux phases** :

Quand on met en place les armatures d'ancrage, repliées dans le coffrage, on n'a aucun moyen simple pour vérifier si, une fois déployées, ces barres occuperont bien la position prévue au plan, jusqu'au nez de console et on ne le vérifie pas. C'est pourquoi il est toujours prudent **d'ajouter des aciers en recouvrement** sur les précédents et complétant le ferrailage.



Ferrailage d'un corbeau :  
(a) coupe horizontale montrant les armatures principales repliées pour bétonnage du mur ;  
(b) vue en plan de la console ; armatures principales (trop courtes) et épingles horizontales de couture ;  
(c) coupe transversale.

## -Armatures trop à l'extérieur (non respect des enrobages)

si l'**enrobage** des armatures est **insuffisant**, on peut voir apparaître :

A l'intérieur des bâtiments, des **tâches de rouille visibles** à travers le plâtre (très corrosif) ou l'endroit de revêtement,

A l'extérieur, des tâches de rouille suivies d'**éclatements locaux** du béton causés par le caractère expansif de l'oxyde ferrique.

C'est souvent le cas des zones fragiles et **exposées** telles que les **nez de balcons**, les larmiers d'**acrotères**. L'adhérence entre béton et armatures disparaît alors très vite et si la mise à nu d'une barre se situe dans une zone à fort effort tranchant, où le gradient de tension est élevé (près des appuis), il peut se produire un glissement de la barre ouvrant des fissures.



a) tâches de rouille  
+ fissuration



b) éclatement localisé



c) éclatement généralisé

**L'enrobage** : Les aciers doivent être protégés des agressions extérieures et ne doivent pas gêner le remplissage du béton.

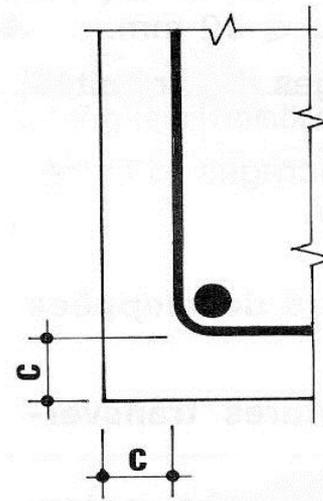
Il faut pour cela respecter une **distance d'enrobage  $c$**  (ou  $e$ ).

L'enrobage varie selon l'agressivité du milieu : 1, 3 ou 5 cm.

### **-Lits de barres trop espacés**

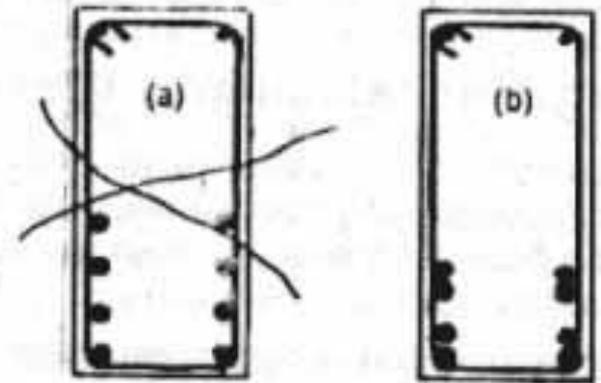
on voit parfois espacer d'une manière inconsiderable les lits des barres principales des poutres sans prétexte d'assurer une meilleure **adhérence**.

Cette précaution est illusoire et il **convient de grouper les barres deux par deux**.



### Enrobage minimal

Protection des aciers  
et  
Possibilités de bétonnage



MAUVAIS

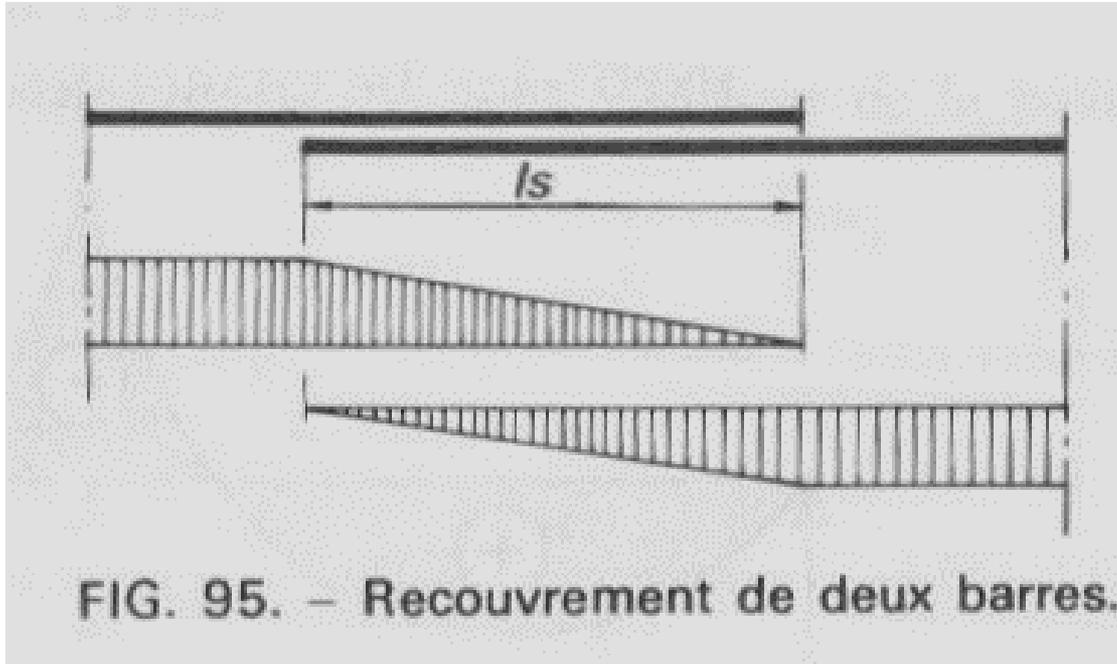
BON

Armatures inférieures en quatre lits :

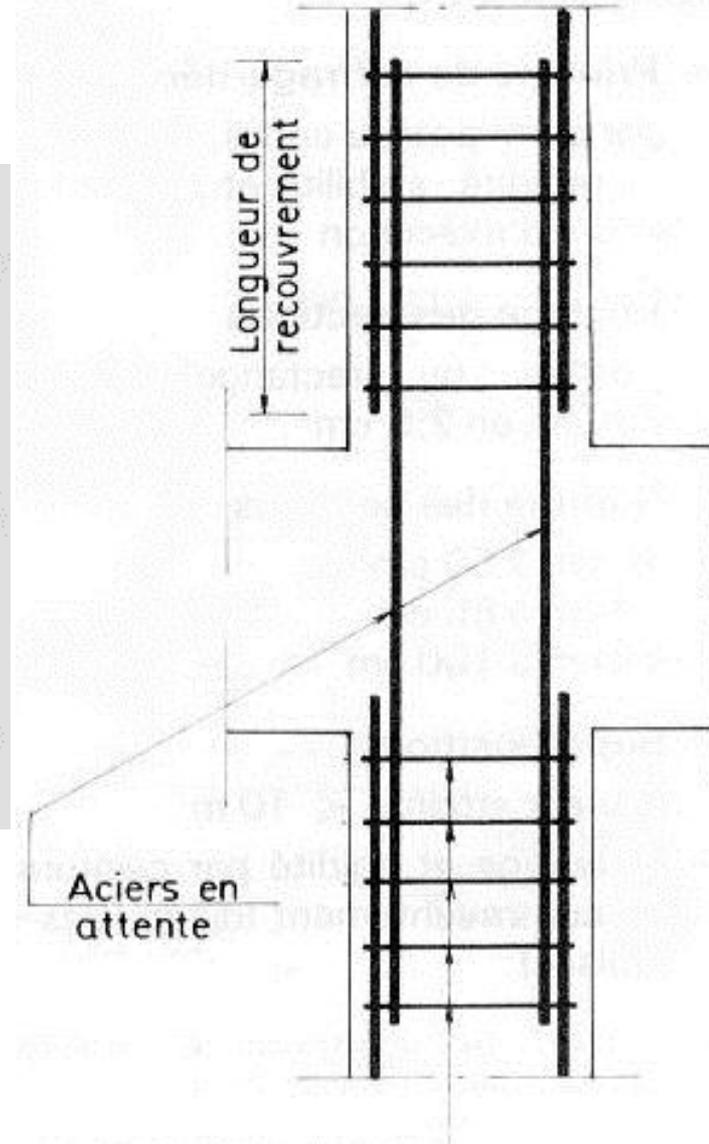
(a) lits trop espacés ;

(b) disposition correcte.

**-Recouvrements insuffisants ou trop concentrés  
ou mal positionnés.**



**Cette longueur vaut  $50 \Phi$**



Le nombre de cadres  
doit être suffisant sur la longueur  
de recouvrement  $n \geq 3$

# Les erreurs de constitution, de fabrication et de coulage du béton

## -Choix des constituants et composition

la **composition** du béton est comme une **recette de cuisine** ; le résultat ou le produit sera **bon** si les constituants sont de **bonnes qualités** et les **proportions optimisées**.

Les laboratoires spécialisés sont en mesure de réaliser les meilleurs mélanges en fonction des constituants présents, et ce en utilisant les adjuvants. Le **problème** se pose au niveau de **la qualité** des produits.

En effet, les carrières de granulats ne sont pas homogènes et les caractéristiques de ces composantes inertes sont sujettes à la variation.

- **Le ciment:** - Il convient d'éviter les ciments de classe supérieure (55) quand leur utilisation n'est pas justifiée à cause du phénomène de retrait.

-il ne faut pas hésiter à prendre une qualité de ciment résistante aux milieux agressifs quand de besoin.

- le ciment ne doit pas être utilisé, ni encore chaud car il présente une prise irrégulière ni conservé trop longtemps en contact de l'humidité car il s'évente et perd ses qualités mécaniques.

**-L'eau:** est un paramètre extrêmement délicat. Quand l'emploi des adjuvants n'est pas justifié, on a tendance d'ajouter plus d'eau que prévu surtout si les granulats sont concassés.

Le résultat est un béton **trop liquide**. L'eau qui ne sert pas à l'hydratation du ciment s'**évapore** en créant, dans la masse du béton, un réseau de canalicules qui donne un béton peu compact et peu résistant. Un tel béton présente beaucoup de retrait et faïence en surface.

un béton **faiblement résultant** présente un **faible module d'élasticité** ; les **déformations sous charge** y sont plus **grandes** et peuvent accélérer les désordres dans les éléments portés.

**- Les adjuvants:** l'utilisation des adjuvants **exige une maîtrise et des moyens**. En effet, les produits utilisés sont **actifs** et s'emploient à **faible dose**. Ils nécessitent donc des **dosages précis** et un **malaxage homogène** ; ce qui n'est pas toujours obtenu sur les petits chantiers avec les bétonnières simples.

**-Le malaxage** : cette opération va du mélange à la pelle pour les petits travaux à la centrale automatisée pour le béton prêt à l'emploi (B.P.E.).

La **centrale à béton** présente l'**avantage** de la fabrication de bétons aux formules les **plus complexes** et les **plus composites** (4 à 5 granulats, 1 ou 2 adjuvants, un E/L minimal en fonction de la teneur en eau des granulats et un minimum de ciment). Néanmoins, ces centrales robotisées présentent l'**inconconvénient du dérèglement et de la panne**.

Ainsi le **contrôle du béton** devient une nécessité ; des essais d'**écrasement** sont réalisés quotidiennement, après durcissement accéléré par "thermo-maturation". De la sorte, un défaut est décelé dès le lendemain et s'il faut démolir, la quantité d'ouvrage affectée n'est pas trop importante.

**Transport, coulage et vibration** : le béton mis en place doit être **homogène, compact et exempt de vides**.

**-Transport et mise en oeuvre** : L'homogénéité implique, un **malaxage suffisant** et un transport qui n'aura pas provoqué de **ségrégation** (la toupie meilleure que la brouette, fût-elle motorisée), un **coulage lent** avec une **hauteur de chute minimale** (source de ségrégation).

**- Vibration** : La compacité est liée à la vibration. Cette opération est censée remplir tous les vides et notamment le contour des armatures (condition nécessaire à l'adhérence) et tente de chasser les bulles d'air en les faisant remonter à la surface. Aussi, cette opération reste délicate puisque le vibreur a tendance à repousser les gravillons qui rebondissent sur son corps comme des boules de billard et a tendance à attirer le mortier, par conséquent :  
On **doit vibrer toute la masse** du béton de manière homogène sans excès à aucun endroit,

**Ne pas vibrer les armatures** puisque celles-ci vont transmettre les vibrations et repousseront les gravillons et s'entoureront d'une gaine de mortier dont l'adhérence est plus faible,

La vibration est arrêtée à un endroit quand le béton **ressue**, c.à.d. quand une fine pellicule **d'eau remonte** en surface.

- **Reprise de bétonnage** : Les reprises de bétonnage constituent toujours des **zones faibles**, soit pour les **efforts obliques** qu'elles doivent transmettre soit pour les **efforts de traction** où elles constituent des plans de fissuration privilégiés, soit pour **l'étanchéité**.

L'adhérence peut être améliorée en mouillant l'ancien béton et en badigeonnant la surface d'une résine appropriée (colle).

On doit réduire l'effet de paroi :

- par **repiquage de l'ancien béton** (création d'une surface rugueuse),
- en étalant sur l'ancien béton, une couche de mortier d'épaisseur égale à 1 à 2 cm additionnée de résine pour agir sur l'adhérence.

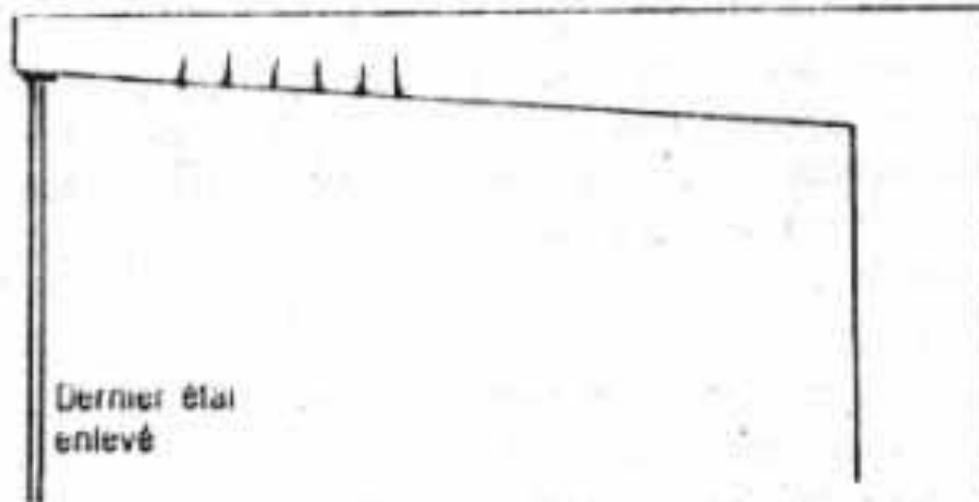
- **Cure du béton** : La cure du béton frais est accompagnée souvent par l'utilisation d'adjuvant (produit de cure) qui projeté à la surface, constitue une pellicule étanche empêchant la dessiccation prématurée des bétons exposés au soleil et au vent, sources de retrait et de fâiçage.

## - Désétalement, Décoffrage :

-**Délai** : on ne doit évidemment décoffrer que lorsque le béton a **acquis la résistance suffisante** pour résister aux contraintes dues à son propre poids sans fluage.

-**Désétalement** : le désétalement d'une grande pièce doit **commencer** par un débridage dans un ordre permettant à la pièce de travailler comme elle est conçue, cela afin d'éviter la fissuration du béton jeune.

Ainsi, les étais d'une console sont à desserrer en progressant du nez vers l'encastrement. Maintenir bridé l'étais d'extrémité le ferait travailler comme une poutre sur appuis simples, alors qu'elle n'est pas armée pour cela.



Fissuration d'une console dont le désétalement a été fait de l'encastrement vers l'extrémité

# Pathologies des bâtiments endommagés par les séismes

Les dommages causés par un séisme **sont nombreux** et prennent naissance dans **une partie** ou dans **l'ensemble** de l'ouvrage endommagé.

✓ **Pathologies des bâtiments dues aux séismes:**

## **1 Maçonnerie non renforcée**

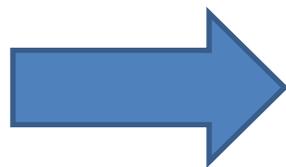
Cette figure montre le mode ruine d'une **construction en maçonnerie non renforcée** avec des planchers en béton armé à Frioul en Italie (1976). Les grandes fissures diagonales dans les murs et la perte de continuité entre les murs externes indiquent des **dégâts structuraux graves**.



Cette figure montre une construction en maçonnerie en pierres brutes. Une partie des murs porteurs a cédé, causant un effondrement partiel du toit et des poutres des planchers. Il s'agit de **dégâts structureaux graves**.



**Selon l'RPA**



Seul le système de construction en **maçonnerie** porteuse **chainée** est permis en zones sismiques

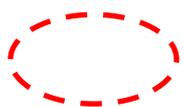
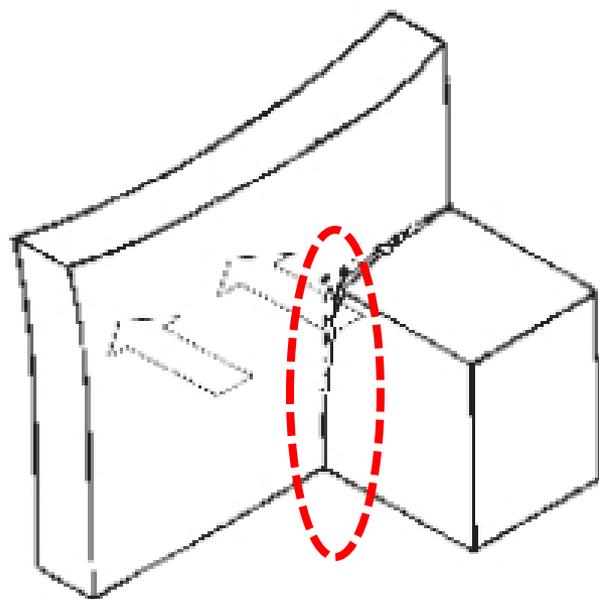
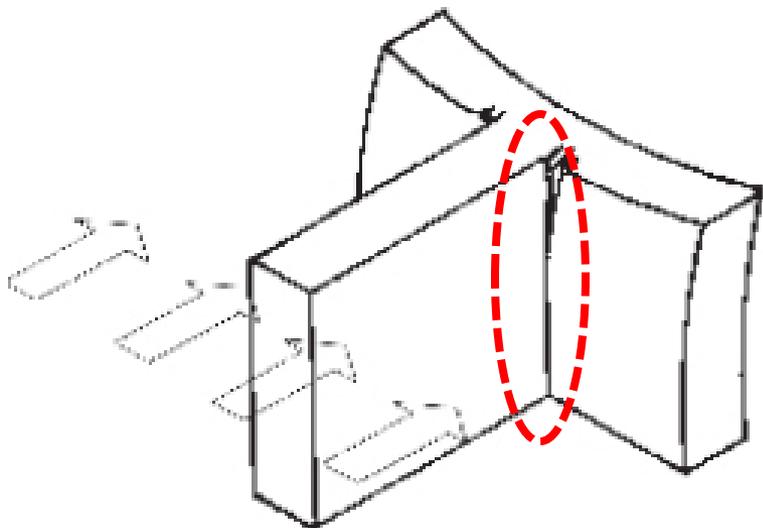
## 2. Irrégularité en plan

Cette figure montre les dommages dans les angles rentrants dus aux oscillations différentielles (séisme de Kobé, Japon 1995). Le bâtiment est conforme aux **règles parasismiques** mais le choix architectural d'une forme en **L sans présence de joints ou de renforts** a conduit à des dommages au niveau de l'angle rentrant dans le plan horizontal.



Parmi les principes d'une conception parasismique **la simplicité**

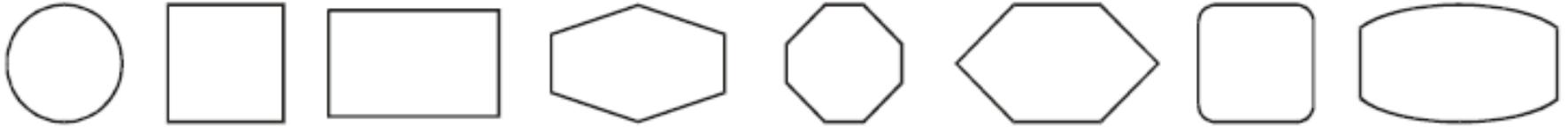




**Concentration de contraintes**

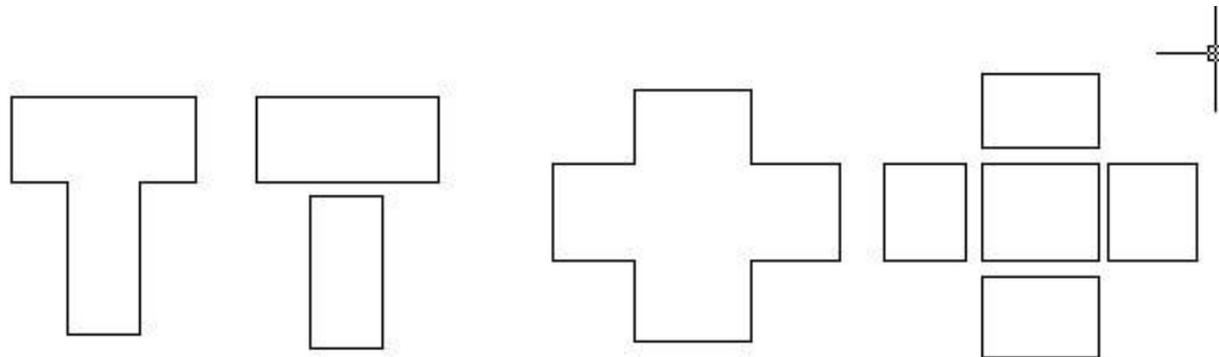
## Solutions:

1. Opter pour des formes simples (carrée, rectangle,...)



Formes favorables : plans simples à 02 axes de symétrie

2. Fractionner le bâtiment en volumes simples par des joints parasismiques



## **C'est quoi un joint????**

Un joint est une coupure réalisée dans un ouvrage pour le diviser en plusieurs parties, chaque partie pouvant se déplacer ou se déformer librement sans que les sollicitations auxquelles elle se trouve soumise n'influencent l'autre partie.

## **Différents types de joints????**

**1. Joint de dilatation**

**3. joint de tassement**

**2. joint de rupture**

**4. joint sismique**

## 1. Joint de dilatation????

Il évite les effets :

- des variations hygrothermiques,
- du retrait et du gonflement des bétons

C'est pourquoi les règlements imposent une distance entre joints, pour les constructions en béton armé, d'une façon générale :

- de **25m** pour les régions à fortes variations thermiques ou très sèches (montagne, désert).
- de **50m** dans les régions humides et tempérées.

Ces distances sont **doublées** pour les constructions en **acier** (conductivité thermique plus élevée que celle du béton).

Dans les règles C.B.A.93, (article B521) on préconise :

- **30m** pour les wilayas côtières à l'exception d'Oran, Temouchent, et Tlemcen pour lesquelles on conseille **25m** ainsi que les wilayas du Tell, des Hauts Plateaux, et de l'Atlas Saharien et
- **20m** pour le Moyen sud et pour l'Extrême Sud.

## 2. Joint de rupture????

S'il y a une différence importante de charges transmises entre deux éléments

## 3. Joint de tassement????

Il est prévu si le sol n'est pas homogène (éviter les tassements différentiels)

## 4. Joint sismique????

Éviter l'entrechoquement de deux parties d'une construction susceptibles d'être mises en mouvement lors d'un séisme

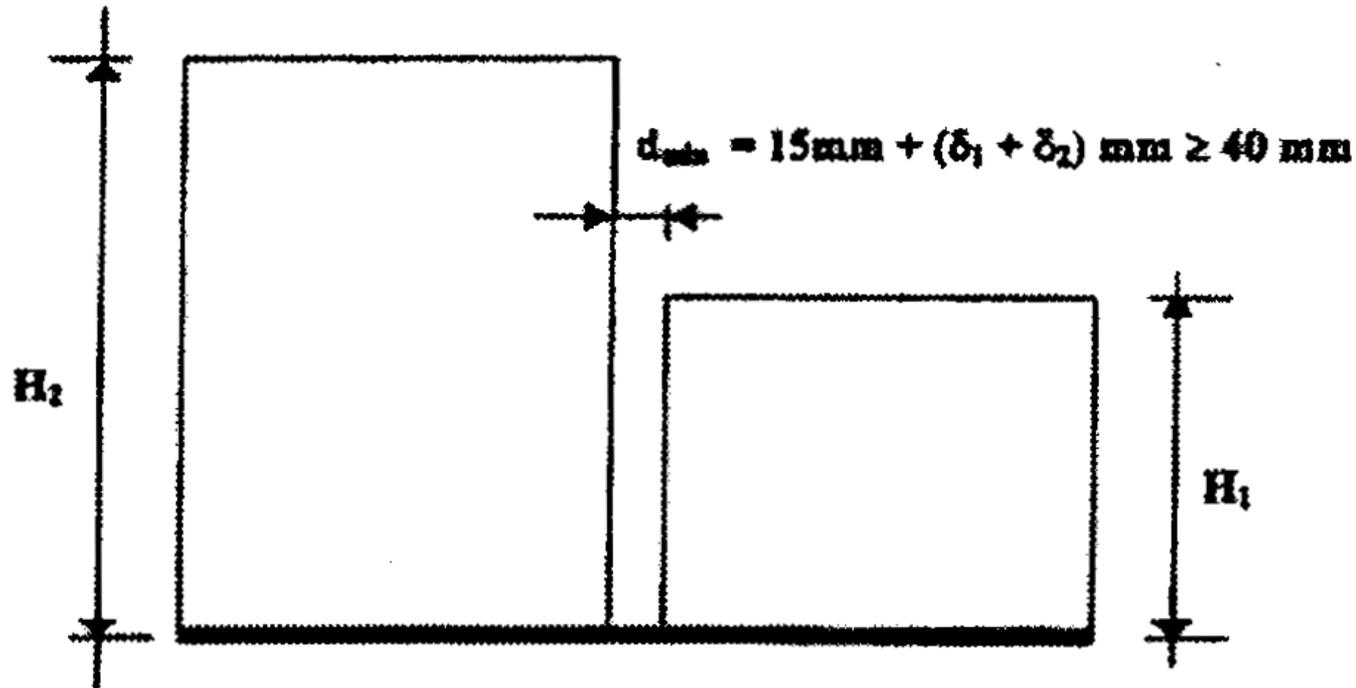
### Recommandations RPA

- Article 2.5.2 des RPA99 : la disposition des joints sismiques peut **coïncider** avec les joints de dilatation ou de rupture. Ils doivent assurer l'**indépendance complète** des blocs qu'ils délimitent et empêcher leur entrechoquement.
- En cas de sol de fondation **homogène**, il n'est pas nécessaire de les poursuivre en fondation. Les joints doivent être **plans**, sans décrochement et **débarrassés** de tout matériau ou corps étranger.

Ils sont disposés de façon :

- A **limiter des longueurs de bâtiments** trop importantes
- A **séparer** les blocs de bâtiments ou ouvrages accolés de géométrie et /ou de rigidités et de masses inégales.
- A **simplifier** les formes en plan de bâtiments présentant des configurations complexes (forme en T, U, L, H,...).

## Epaisseur du joint sismique???

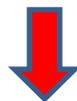
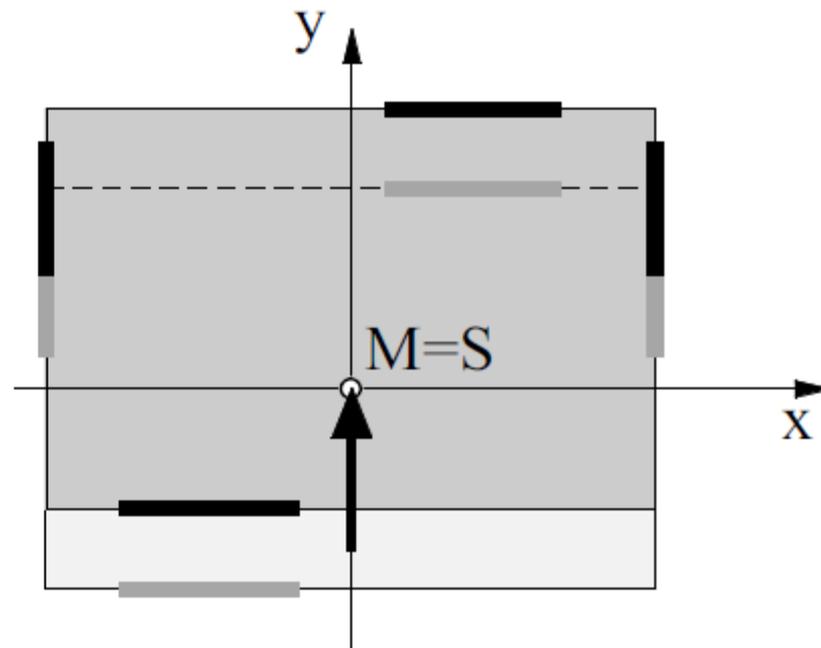
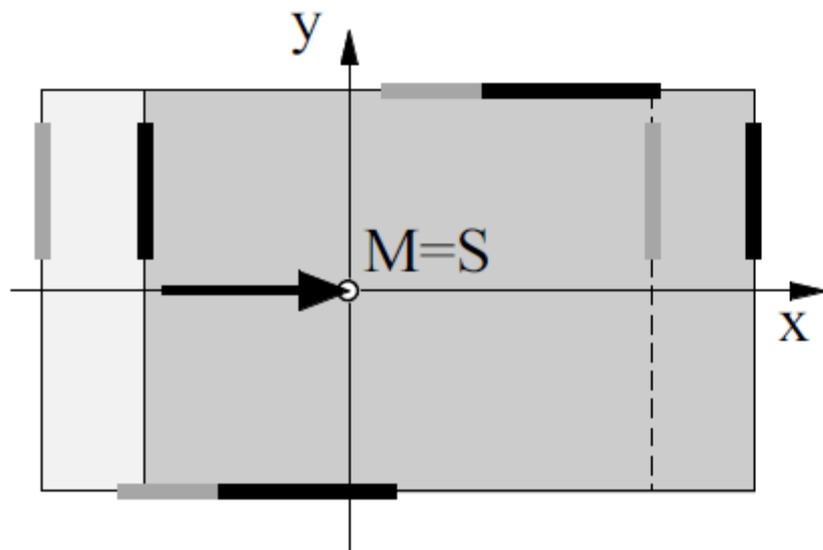


*Figure 5.1 : largeur minimum du joint sismique*

$$d_{\text{min}} = 15_{\text{mm}} + (\delta_1 + \delta_2)_{\text{mm}} \geq 40_{\text{mm}}$$

# Comportement des bâtiments réguliers et des bâtiments irréguliers en plan:

Bâtiment symétrique:

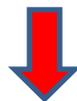
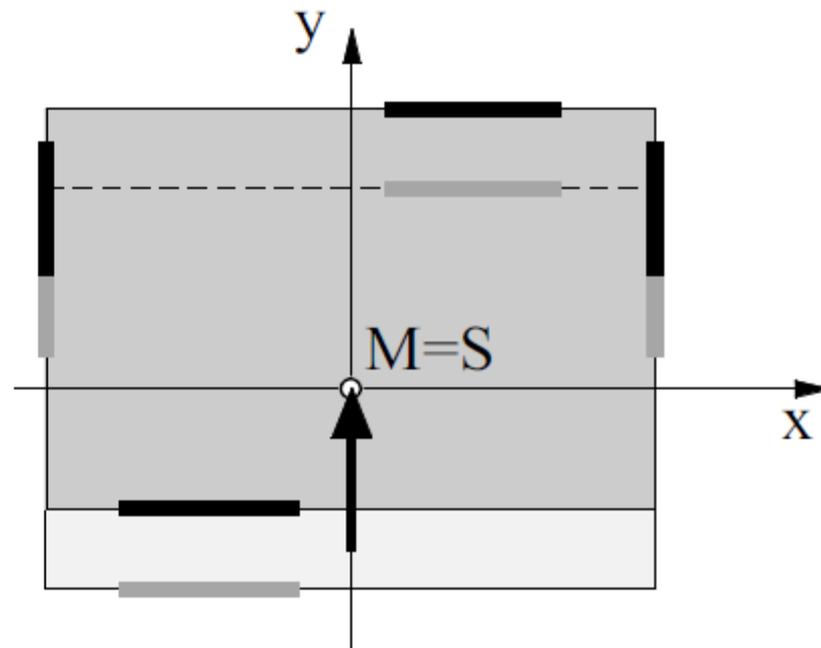
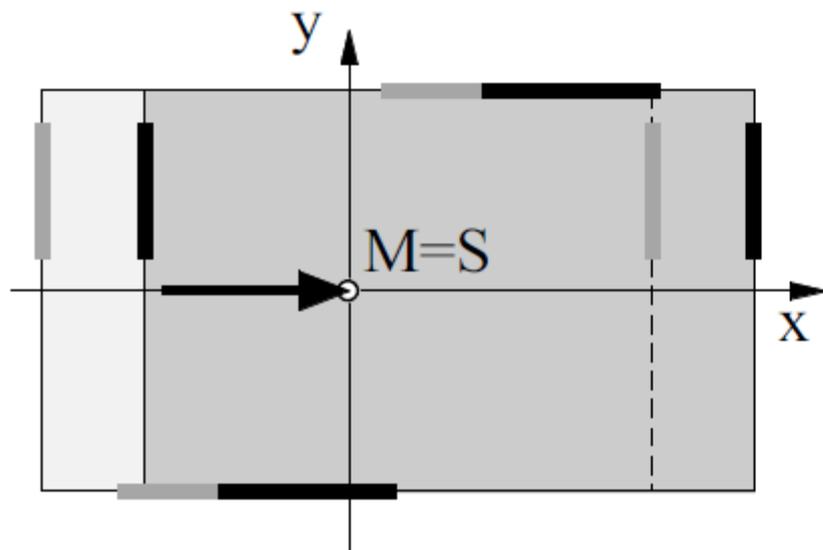


Translation selon l'axe X et translation selon l'axe Y

M: centre de masse S: centre de cisaillement = centre de Rigidité

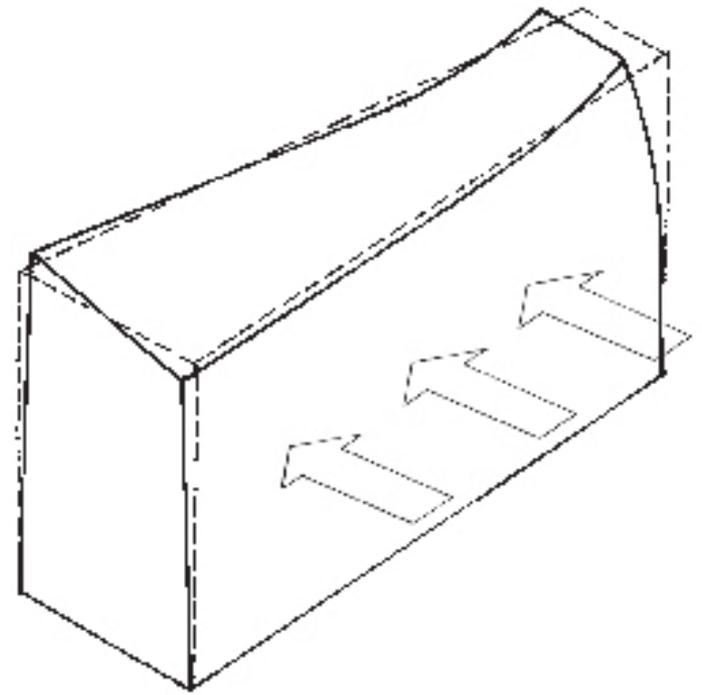
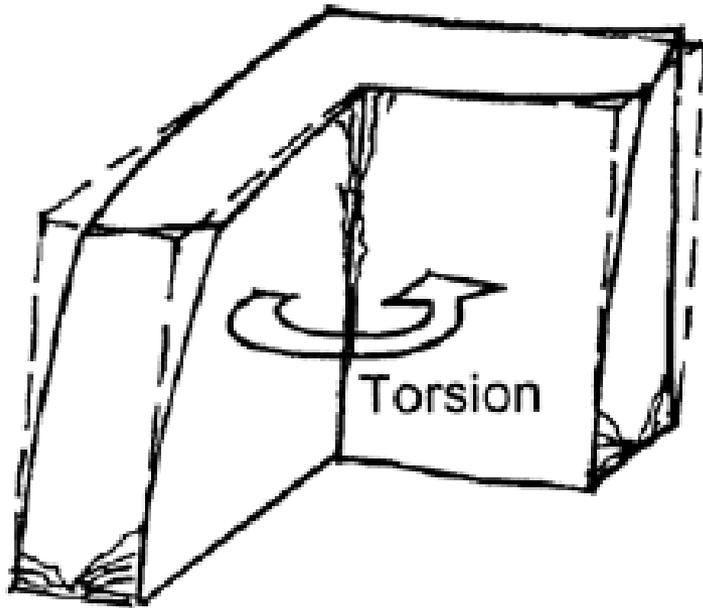
# Comportement des bâtiments réguliers et des bâtiments irréguliers en plan:

Bâtiment symétrique:



Translation selon l'axe X et translation selon l'axe Y

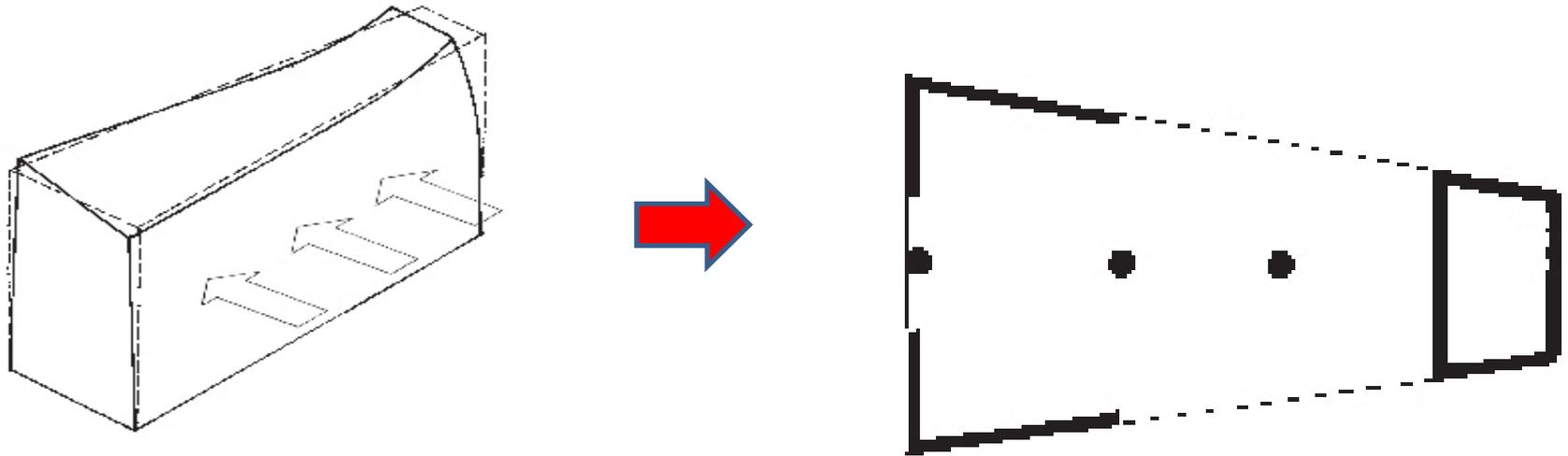
M: centre de masse S: centre de cisaillement = centre de Rigidité



**La non symétrie des bâtiments peut être à l'origine d'une torsion d'axe vertical lors des séismes**

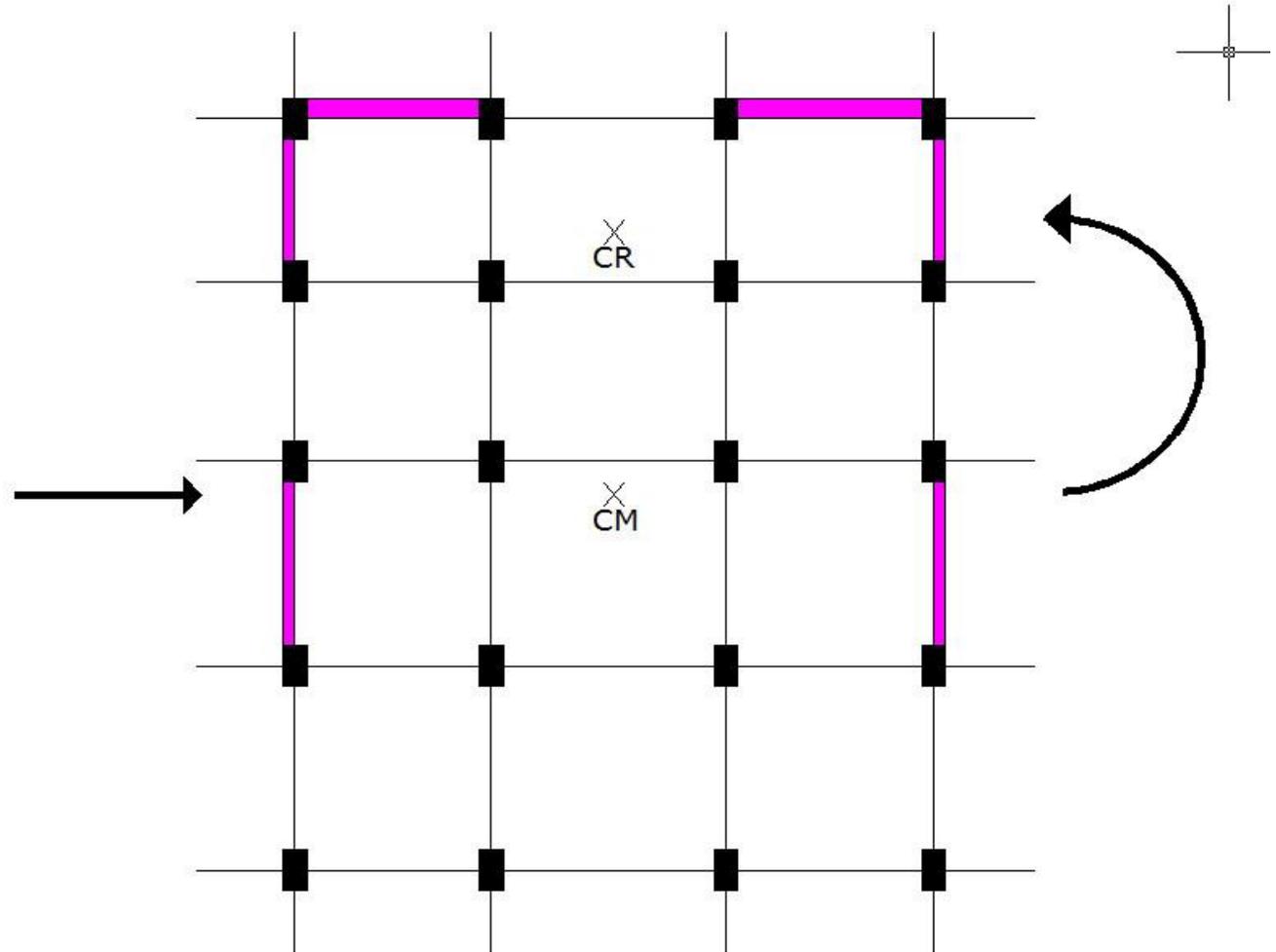
## Solutions:

### Compensation de la rigidité par ajout de voiles



Rapprocher le centre de masse au centre de rigidité

# Disposition symétrique des éléments de contreventement



Les charges sismiques créent des forces d'inertie. La résultante des charges sismiques passe donc par le centre de masse (CM).

La résultante des forces de résistance aux charges horizontales passe nécessairement par le centre de rigidité. (CR)

Si les éléments de contreventement ne sont pas symétriques il y aura un décalage  
Entre le centre de masse et le centre de rigidité ( $e = CM - CR$ )

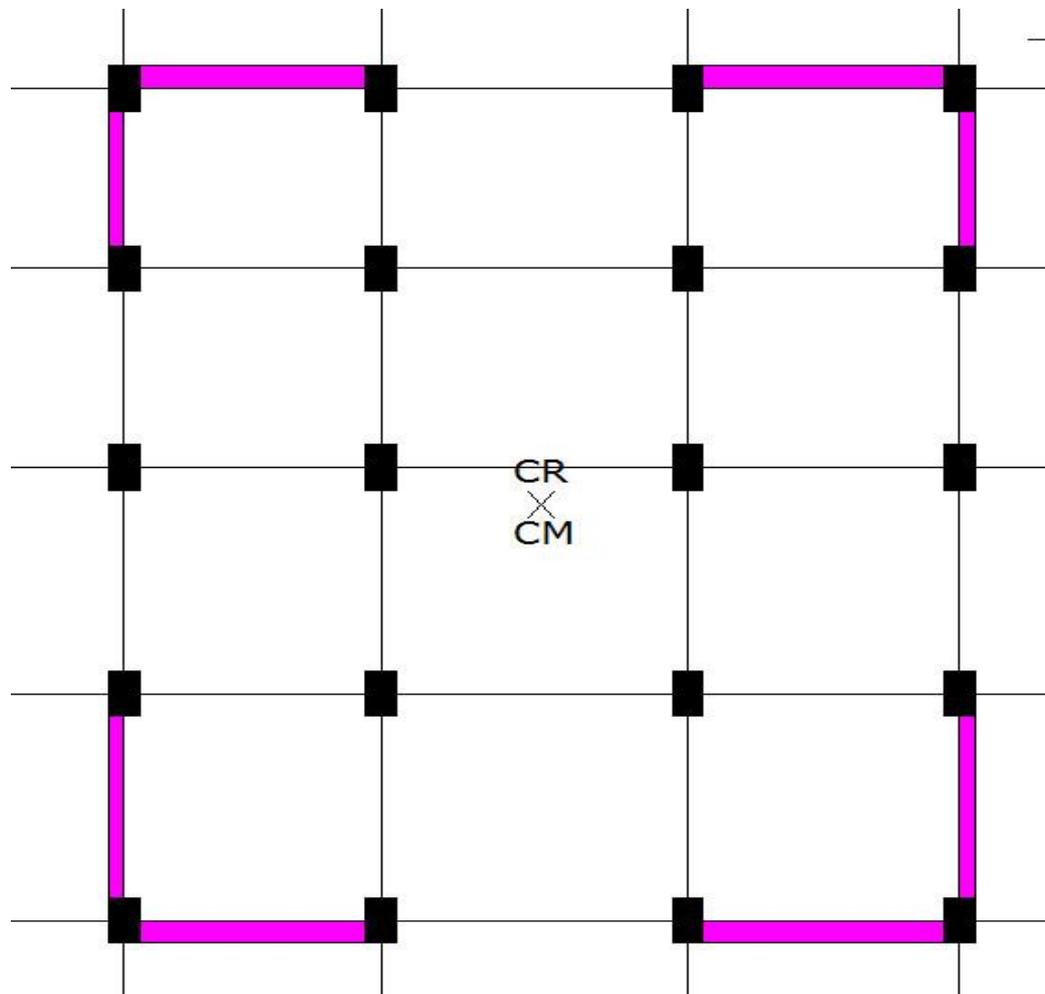
Le construction sera soumise à une torsion d'axe vertical (rotation autour du centre  
De rigidité qui devient un centre de torsion)

$e \gg \gg \gg$  torsion plus importante

Les dommages aux éléments verticaux augmentent avec leur distance au centre de  
rigidité tel que les poteaux d'angle:



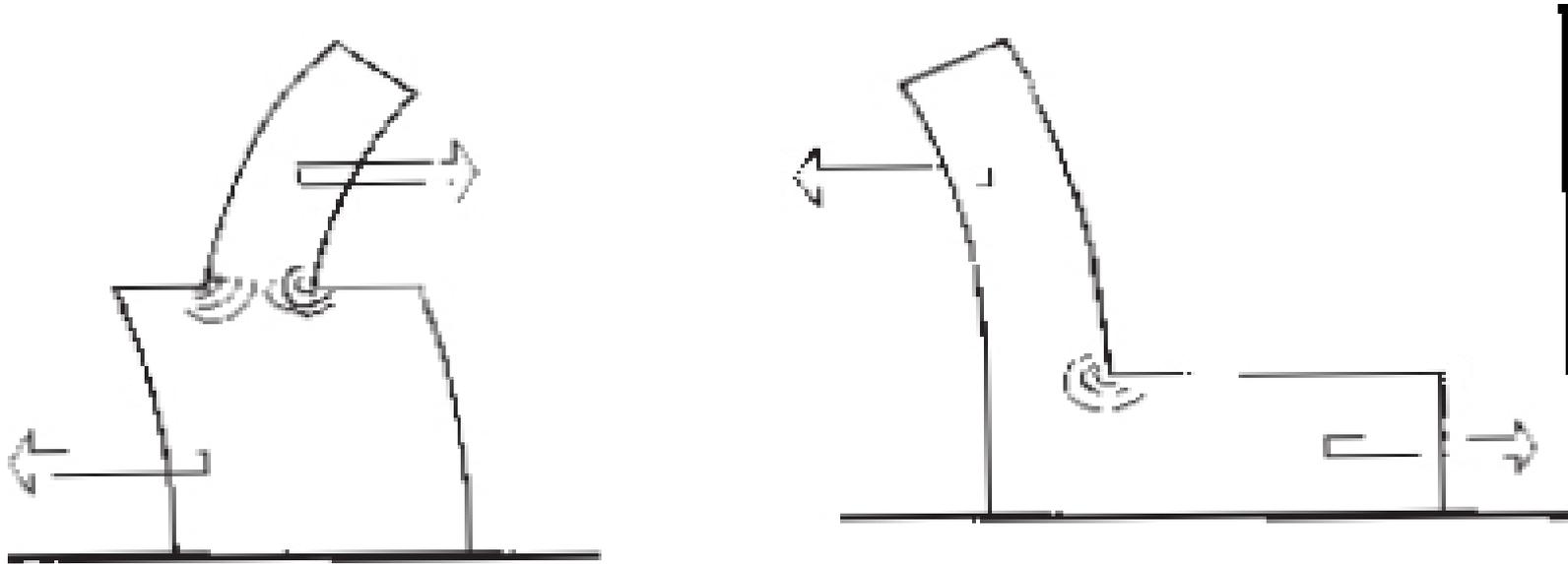
La répartition symétrique ou quasi symétrique des éléments de contreventement, permettant que les centres de rigidité de la gravité de la construction soient confondus ou rapprochés, et par conséquent une caractéristique essentielle d'une bonne construction parasismique.



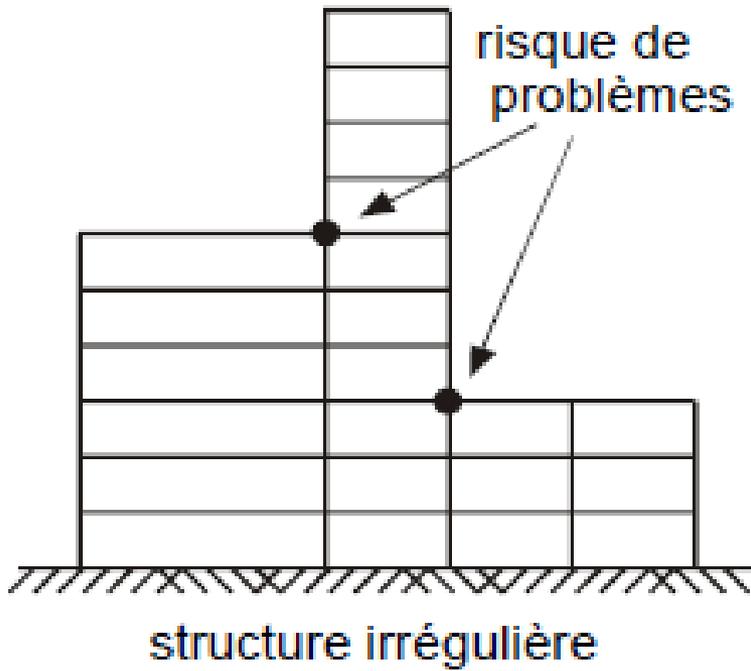
### 3. Irrégularité en élévation

La Figure illustre l'Effet d'un choc entre deux parties de hauteurs différentes d'un bâtiment. Les deux parties de fréquences propres différentes ne vibrent pas en même phase; sans séparation des deux parties, le choc est presque inévitable.





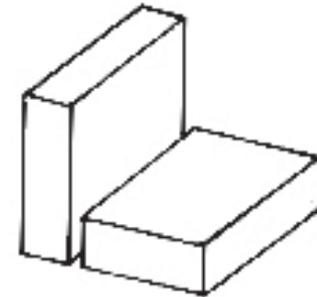
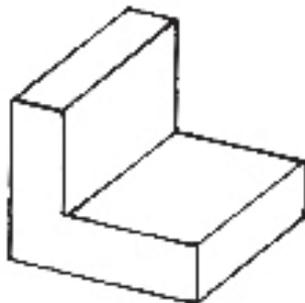
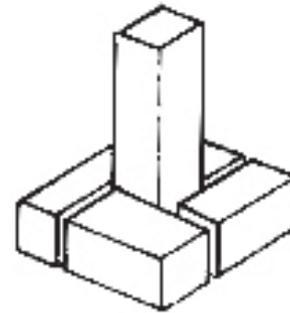
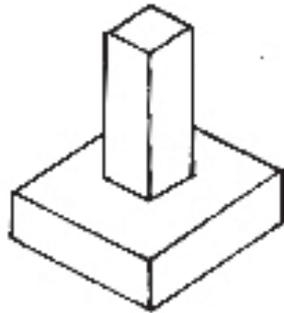
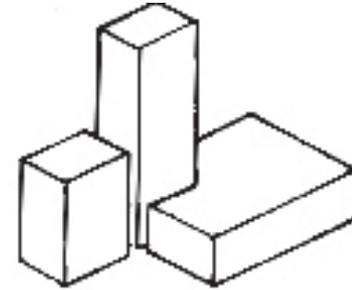
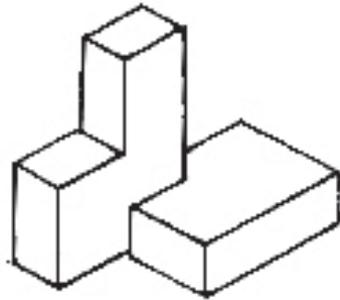
Les formes irrégulières en élévation donnent lieu à des oscillations différentielles. Les parties de bâtiment de volume ou de hauteur distincts vont osciller selon des fréquences différentes et les éléments qui les associent pourront être soumis à des efforts de sens contraire, qui sont souvent à l'origine de dommages graves. Les oscillations différentielles entraînent des concentrations de contraintes en pieds des retraits



Mosquée totalement détruite  
(séisme de Boumerdes)

## Solutions:

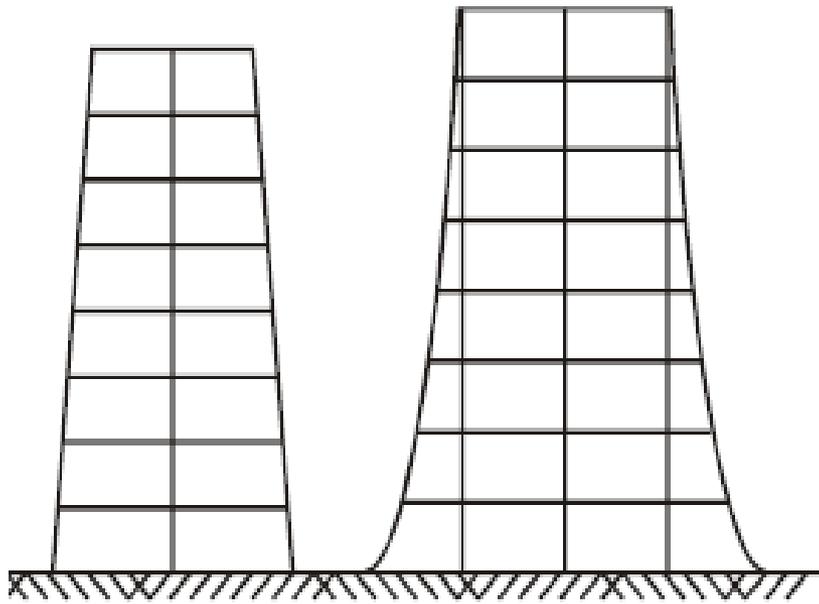
### 1. Fractionnement par des joints parasismiques





Mosquée possédant deux minarets indépendants de la structure  
sont restés intacts après le séisme de Boumerdes

## 2. Variation progressive des dimensions



structures régulières



## **Important :**

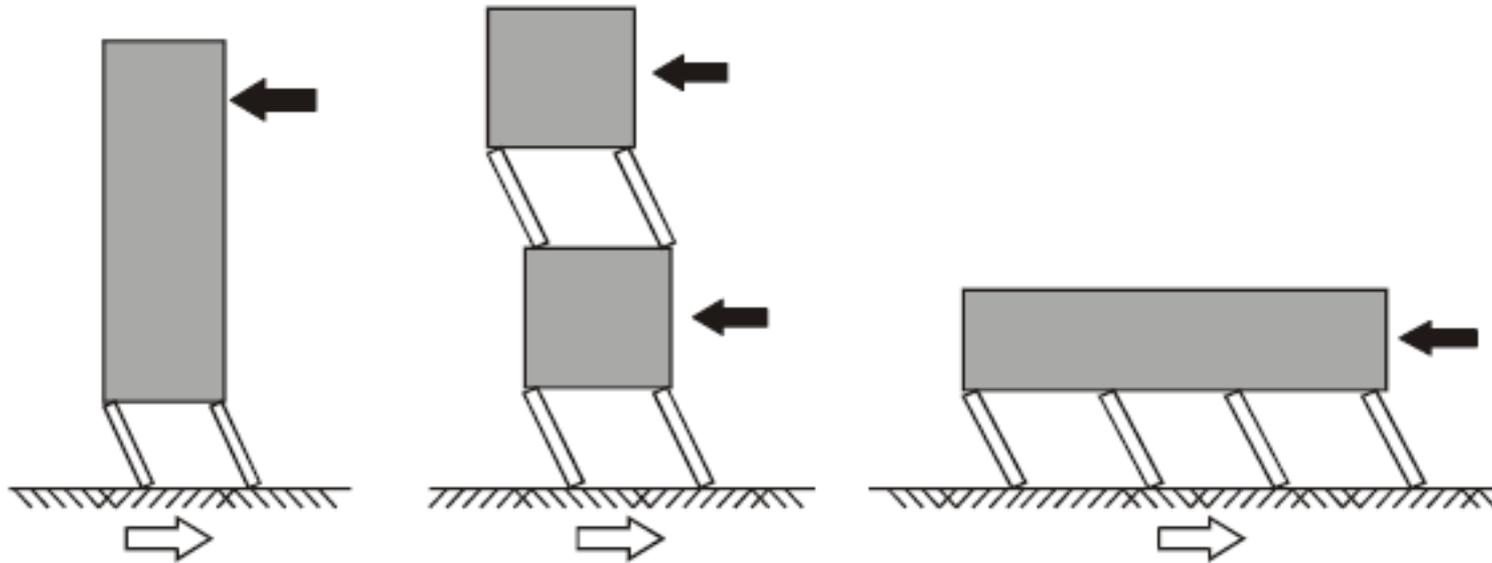
La présence de porte-à-faux (balcons, corniches, surplombs,...) engendre des angles rentrants dans lesquels des concentrations de contraintes se produisent plus particulièrement sous l'effet d'oscillations verticales. Si la portée des portes à faux est importante ou si un élément lourd (jardinière, garde corps en béton,...) est placé à leur extrémité, cet élément peut se rompre et s'effondrer au pied du bâtiment.

Effondrement d'une coursive  
En porte à faux (Séisme de  
Kobé. Japan 1995)



## Etages flexibles

De nombreux bâtiments comportent un ou plusieurs niveaux dont la rigidité horizontale est sensiblement inférieure à celle des autres étages. Ce problème se présente fréquemment dans les immeubles qui comportent des commerces ou des parkings en rez de chaussée et qui nécessitent de larges ouvertures pour leurs besoins d'exploitation ou de fonctionnement.



Les niveaux transparents sont déconseillés dans les zones sismiques car ils peuvent constituer des niveaux flexibles, dans lesquels se concentrent toutes les déformations de la structure.



**Rez de chaussée flexible  
(Boumerdes,2003)**

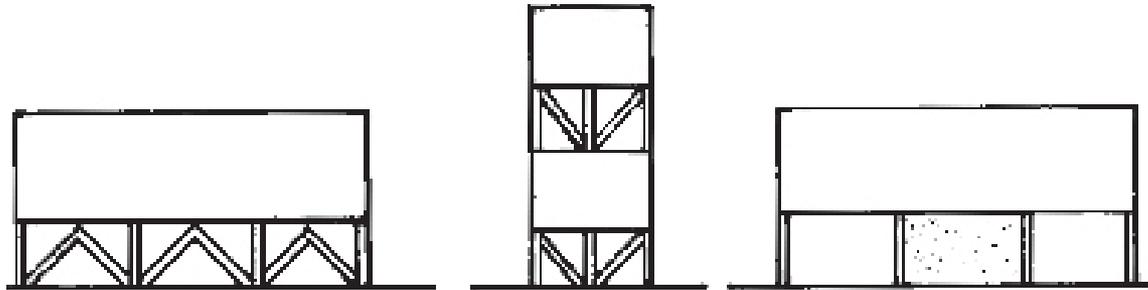




**Etage flexible  
(Kobé Japan,1995)**

## **Solutions:**

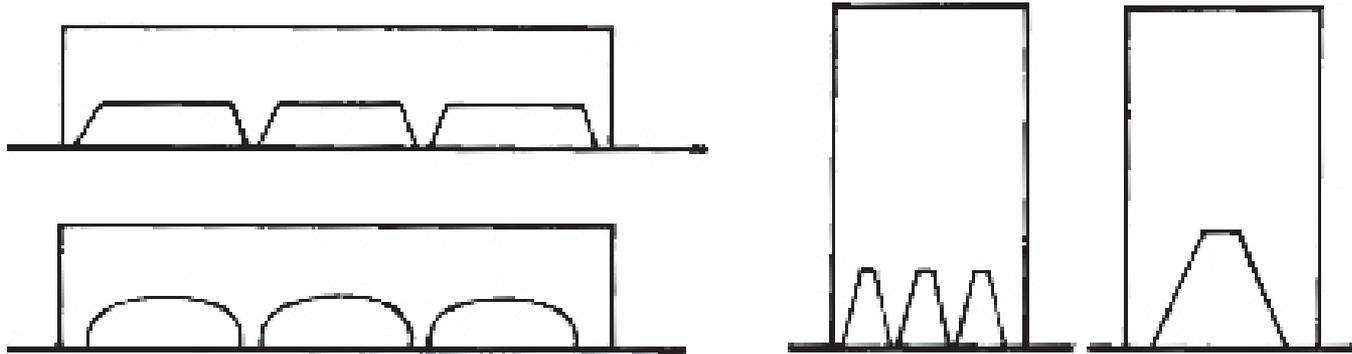
### **1. Contreventement par voiles ou par triangulation**



**Niveau transparent  
contreventé par  
palées de stabilité  
(Tokyo, Japan)**

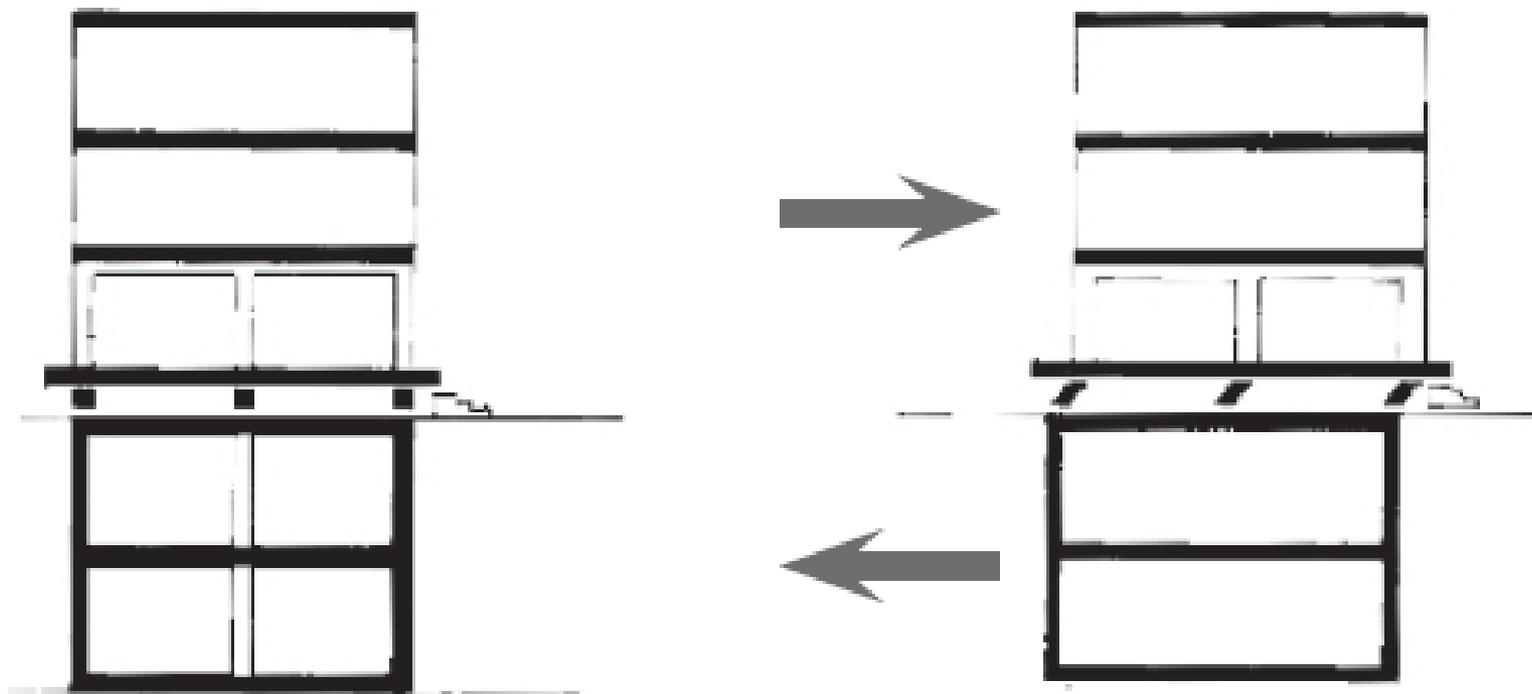


## 2. variation progressive de la rigidité du niveau transparent



3. En réduisant la rigidité des autres niveaux, ce qui implique par également de recourir à des éléments non structuraux non rigides (cloisons, façades,...)

## 4. Isolation parasismique



# Couplage des bâtiments



a) Destruction de passerelles due d'une part à des oscillations différentielles et, d'autre part aux dommages subis par le bâtiment de droite (séisme de Kobé, Japon, 17.1.1995)

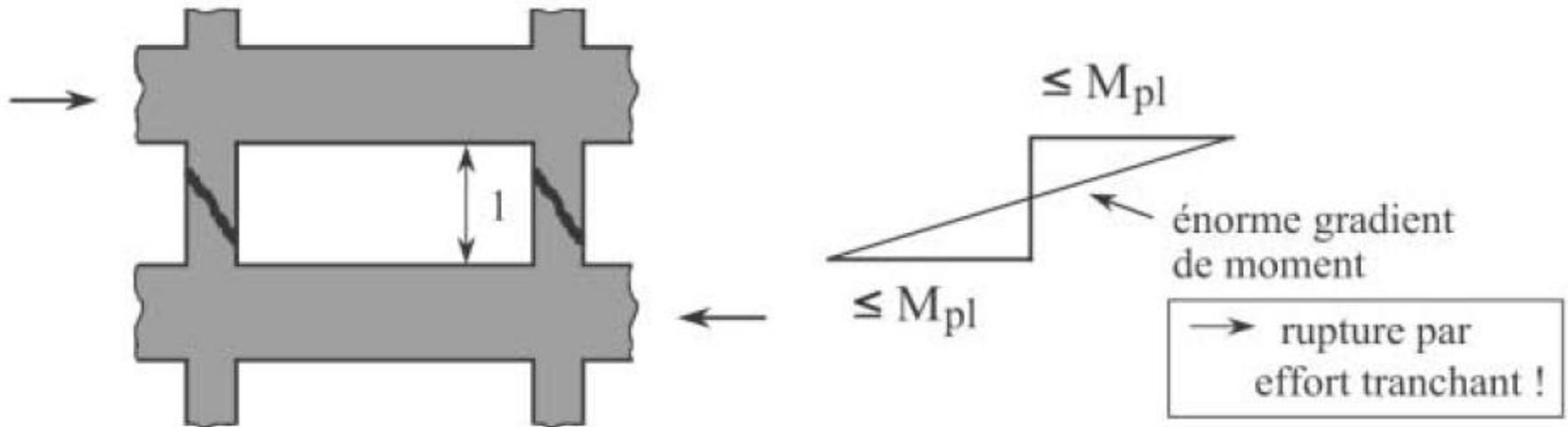


b) Escalier extérieur de 2 immeubles. Une structure autostable indépendante serait préférable

# Les colonnes courtes

Une pièce est considérée comme courte si  $L < 4 h$

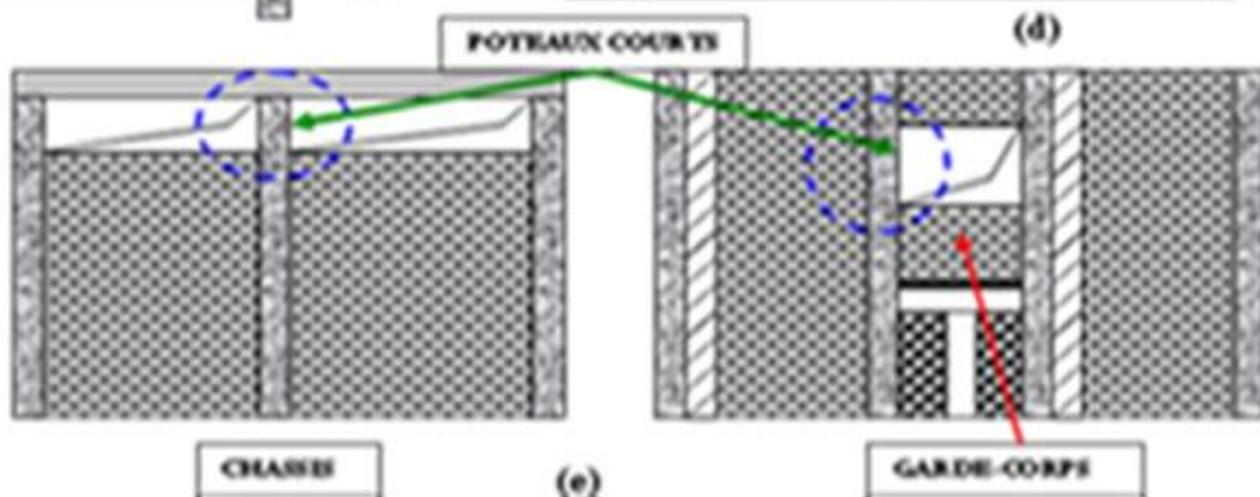
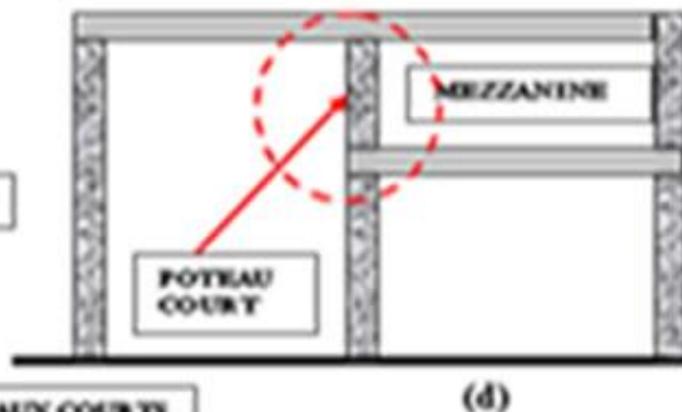
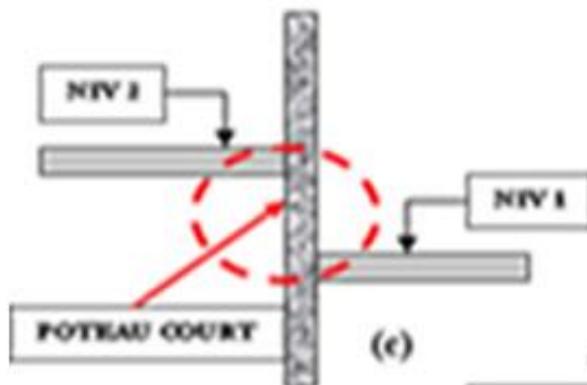
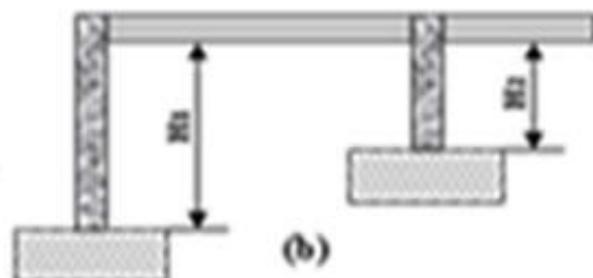
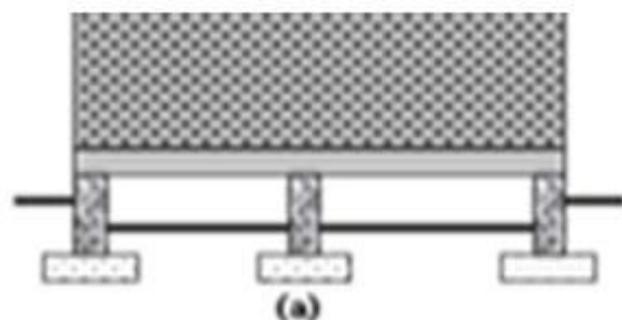
Avec:  $L$  la longueur de l'élément et  $h$ : la hauteur de la section droite



Les colonnes courtes résistent mal à l'effort tranchant ➡ rupture fragile par cisaillement

Les poteaux supportant des paliers au niveau des cages d'escalier, ou de rampes







Remplissage partiel des cadres

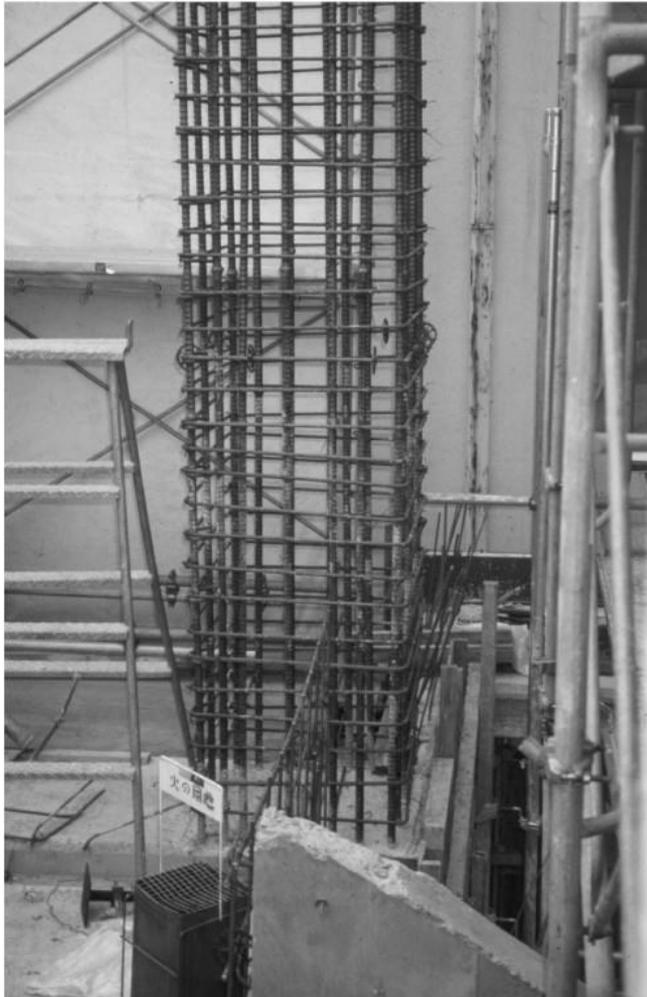


Poteaux de sections importantes



Poutres courtes

Les pièces courtes doivent être considérées comme zones critiques sur toute leur longueur , Leurs armatures doivent ainsi être conçues selon les règles des zones critiques sur toute leur hauteur.



Confinement du béton

## ✓ Pathologies des éléments structuraux endommagés par le séisme

### 1- Les poteaux:

Les dommages des poteaux provoqués par un séisme sont principalement de **deux types** :

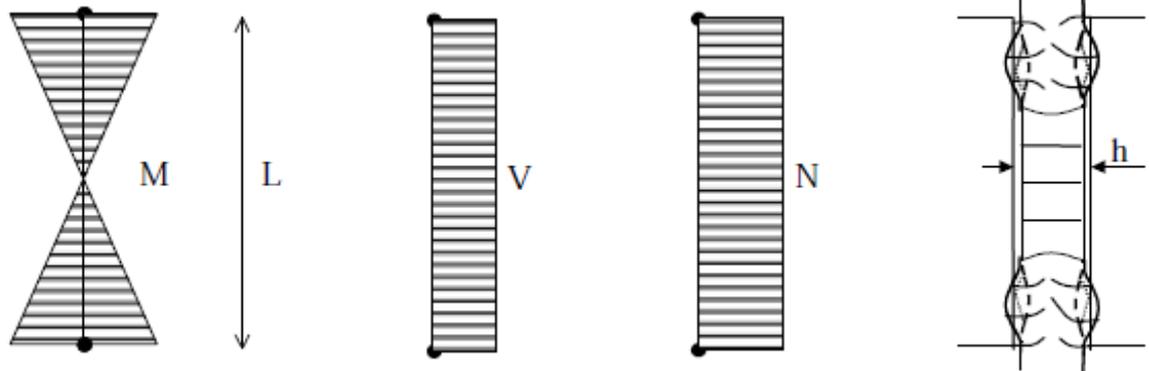
- Dommages dû a la **flexion** cyclique (alternance du moment fléchissant) avec un **faible effort de cisaillement** sous un effort **axial de compression très élevé** ; conduisant aux **poteaux fragiles** ;

-Dommages en raison d'un **effort de cisaillement** cyclique avec un **faible moment fléchissant** sous un effort axial de compression très élevé conduit au phénomène des **poteaux courts**.

### Poteaux fragiles

Ce type de dommages se manifeste par l'échec dans la base et le sommet du poteau . Il se produit dans les poteaux ayant un coefficient d'élançement moyen à élevé:

$$\lambda = \frac{M}{Vh} = \frac{L}{2h} > 3.5$$



En premier lieu, des **fissures horizontales** se manifestent dans les zones nodales dues à l'alternance du moment fléchissant.

Le **moment fléchissant élevé** combiné avec **la force axiale**, mène à l'écrasement de la zone de **compression du béton**, qui sera manifesté d'abord par **l'éclatement du béton de l'enrobage** des armatures. Plus tard le noyau du béton diminue et s'écrase. Ce phénomène est habituellement accompagné par **le flambement dans les des barres d'aciers** comprimées et de la rupture des cadres.



**Destruction de l'extrémité du poteau**



Ce type de dommages est **très sérieux** parce que le poteau ne **perd** seulement son **rigidité**, mais également, il **perd sa capacité de supporter les charges verticales**. En conséquence, il y a une **redistribution des contraintes dans la structure**.



### **Causes:**

- Mauvaise qualité du béton.
- Le nombre de cadres inadéquat dans les zones critiques
  - la présence des grand poutres qui mènent l'échec aux poteaux d'abord (poteaux faibles par rapport aux poutres).
- l'excitation forte de séisme induisant beaucoup chargement cyclique dans le palier non élastique.



**Comportement d'un poteau en absence de confinement**

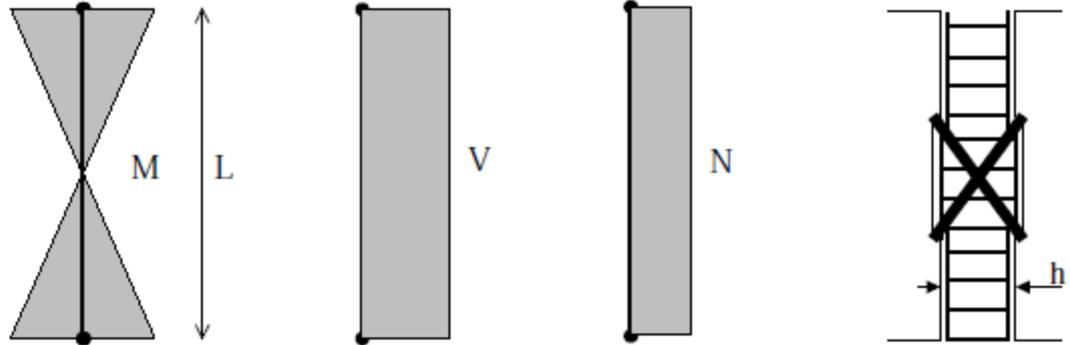


**Comportement ductile d'un béton confiné**

## Poteaux courts

Le second type de dommages est le type de **cisaillement** qui est manifesté par des **fissures** formées dans la zone la plus faible du poteau en forme de **X**. Il se produit dans les poteaux avec un élancement modéré à faible rapport, où celui de :

$$\lambda = \frac{M}{Vh} = \frac{L}{2h} < 3.5$$



La forme finale ultime de ce type de dommages est l'**échec explosif** où l'**éclatement** de la surface extérieure du béton sans dommages des armatures ; puis l'**écrasement du béton, rupture des cadres et flambement des armatures**. Les poteaux courts mènent habituellement à l'effondrement spectaculaire du bâtiment



## Causes:

la raison principale de ce type de dommages est que le coefficient d'élançement modéré avec la capacité flexion du poteau plus élevé que la capacité de cisaillement.

- Elle se produit habituellement dans les poteaux du rez-de-chaussée, où, en raison des grandes dimensions de la section transversale des poteaux, où le coefficient de l'élançement est bas.
- Il se produit également dans les poteaux qui ont été conçues en tant que poteaux courtes, où il a été réduit au poteau court en raison de la construction adjacente de maçonnerie qui n'a pas été expliquée dans la conception

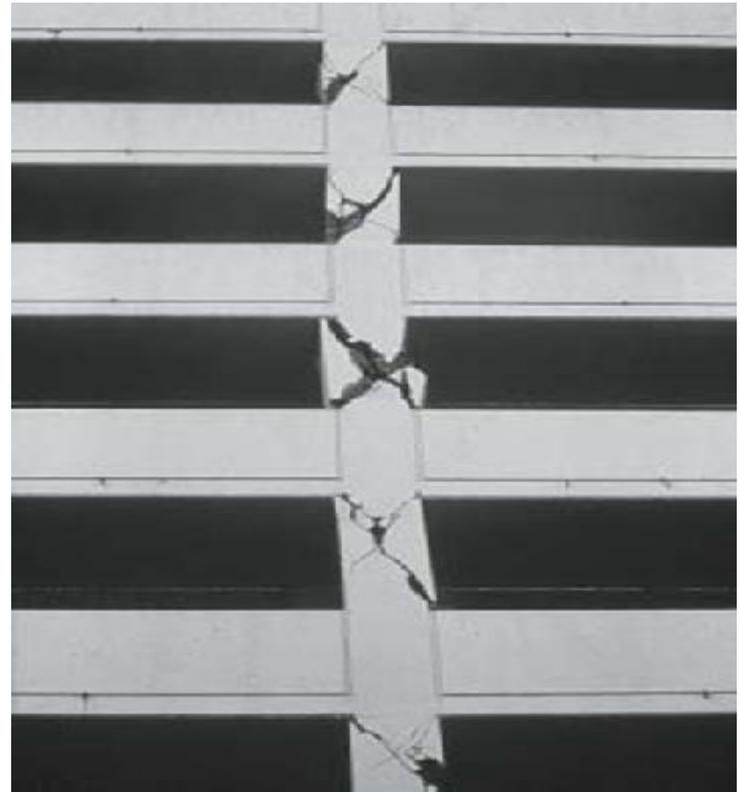




Fig. 6.1 Destruction des poteaux à cause du fonctionnement en « poteaux courts »



Fig. 6.2 Détail de destruction des poteaux à cause du fonctionnement en « poteaux courts »



Fig. 6.3 Détail de destruction des poteaux à cause du fonctionnement en « poteaux courts »

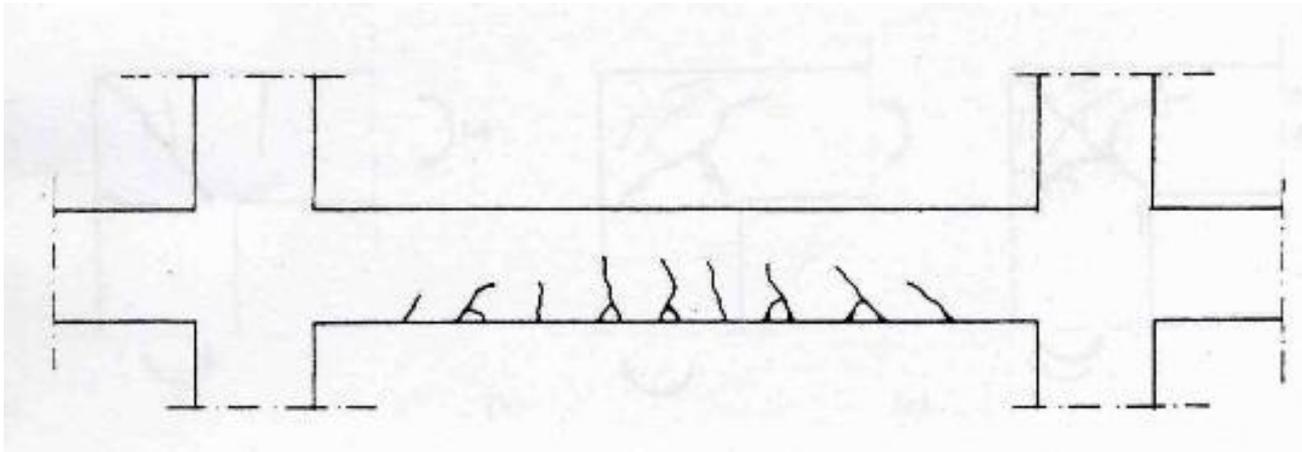


Fig. 6.4 Détail de destruction d'un poteau à cause du fonctionnement en « poteau court »

## 2- Les poutres:

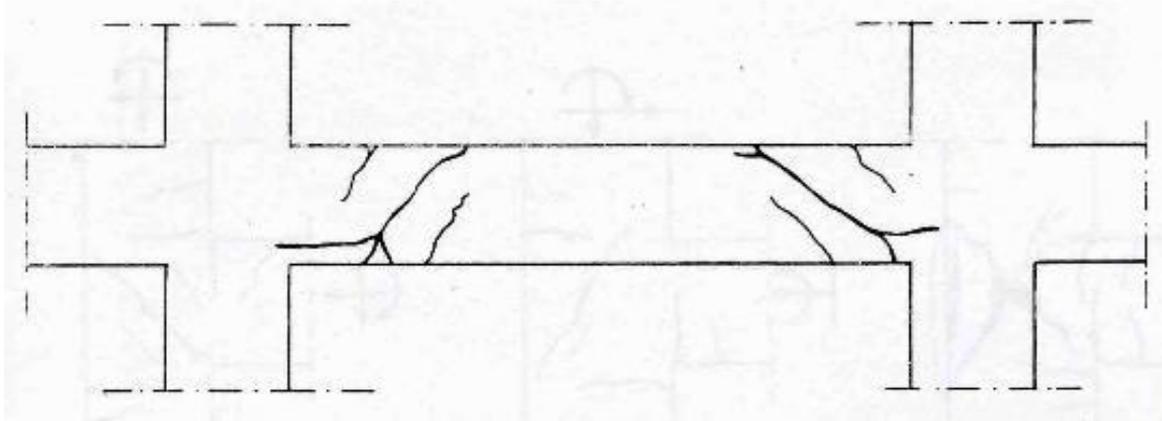
Les dommages qui se produisent dans les poutres en béton armé dus au tremblement de terre sont les suivants :

- les fissures dans **la zone de tendue** le long des travées constituent le type de dommage le plus répandu dans les structures. Ce type de dommages est dû simplement au caractère **cyclique de l'action sismique** où le fléchissement de la zone tendue augmente les micros fissures.



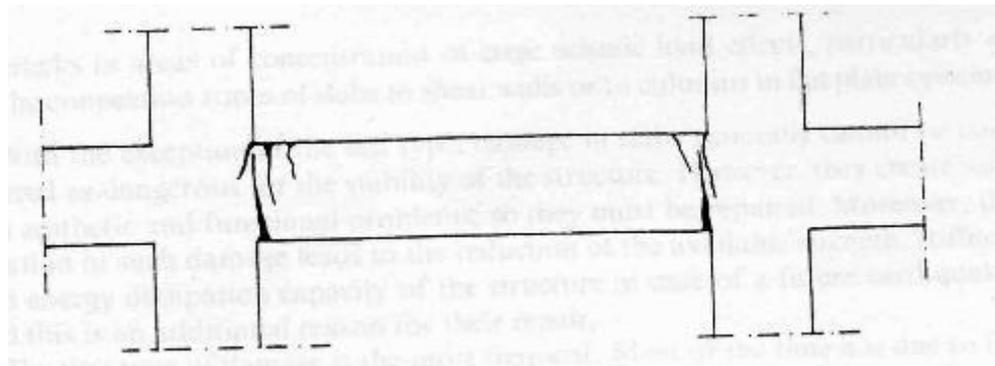
**fissures orthogonales sur l'axe de la poutre le long de la travée dans la zone de tendue**

L'échec flexion - cisaillement près des appuis est le deuxième type de dommages le plus fréquent dans les poutres. Il constitue le type de dommages plus sérieux que le précédent, en vue de leur caractère fragile. Cependant, seulement dans très peu de cas il compromet la stabilité globale de la structure.

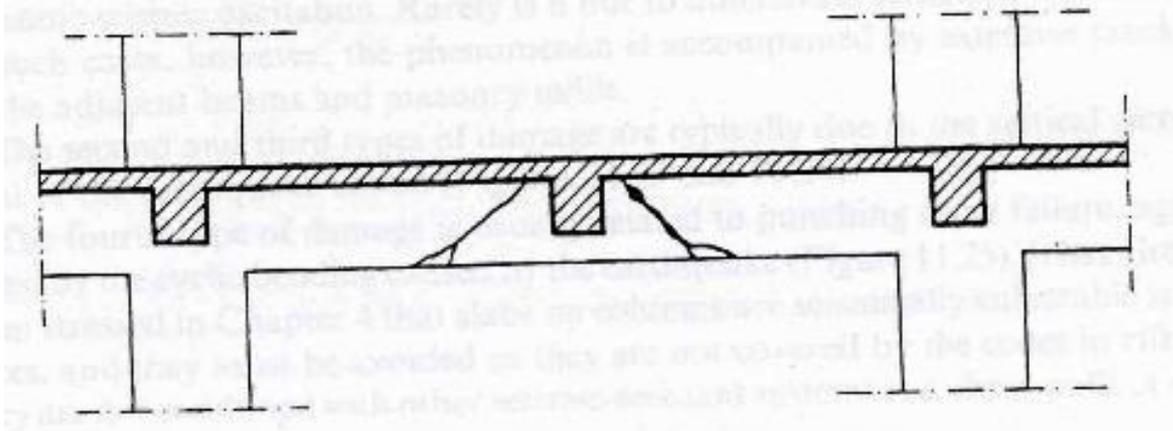


### **L'échec des poutres par flexion - cisaillement**

Les fissures de flexion sur les faces supérieures et inférieures aux appuis de la poutre peuvent être expliquées par un mauvais ancrage dans les armatures (glissement des armatures)

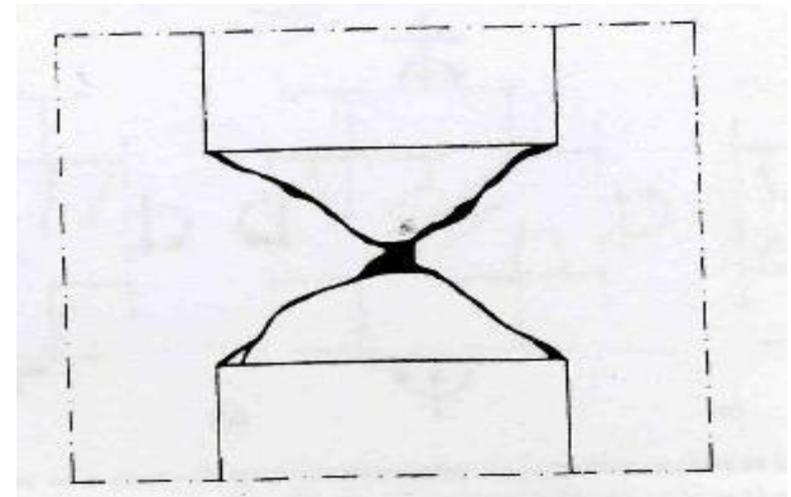


L'échec de cisaillement ou de flexion aux points d'appui des poutres secondaires apparaît fréquemment durant un séisme. Il est dû à la composante verticale de la force sismique qui amplifie la charge concentrée.



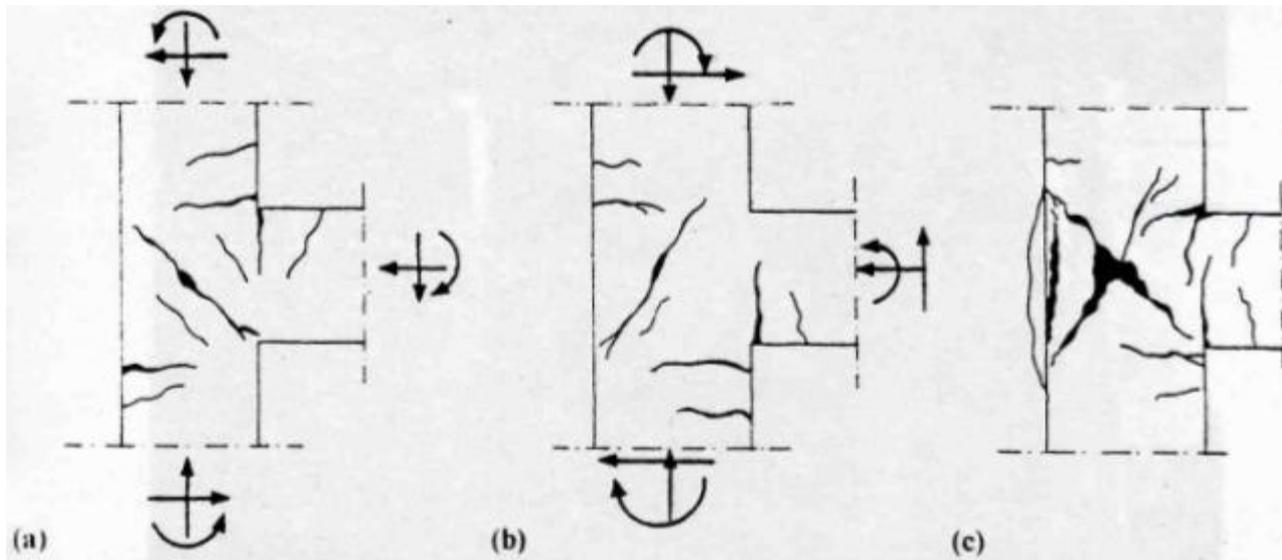
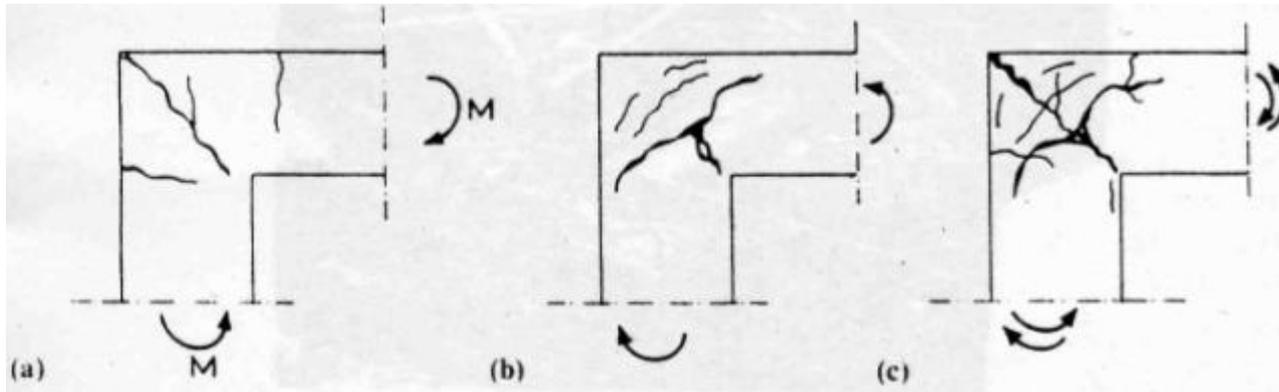
**échec de cisaillement ou de flexion dans les points où les poutres principales sont les supports des poutres secondaires**

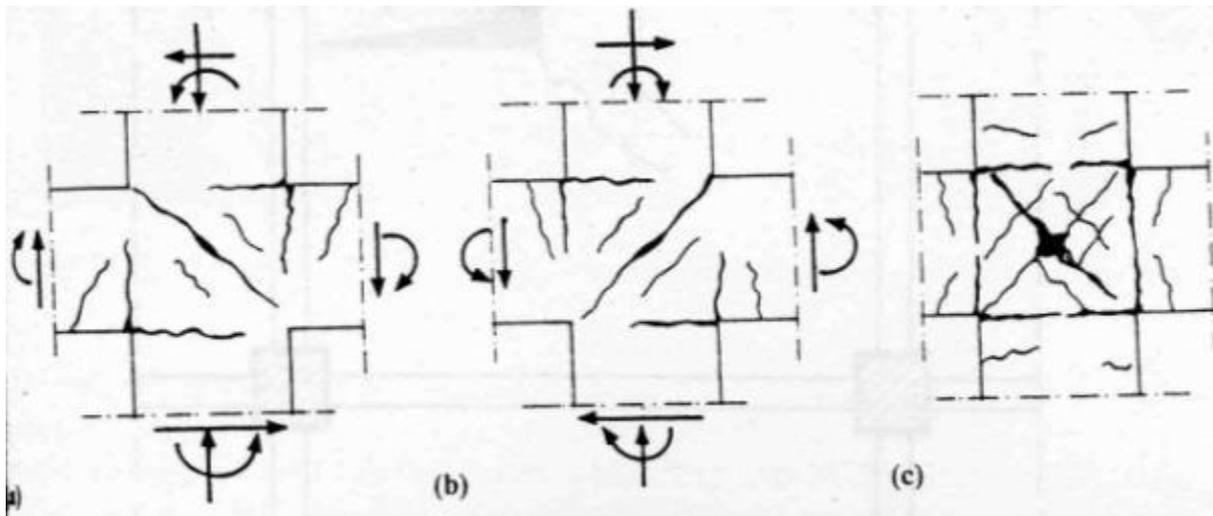
Les fissures de cisaillement en forme de X dans les poutres courtes (linteaux) couplant les murs de cisaillement (Voiles) apparaissent souvent. C'est un échec de cisaillement semblable à ceux se produisant dans les poteaux courts, mais n'est pas dangereux pour la stabilité du bâtiment.



### 3- Les noeds poteaux-poutres:

Les dommages aux joints poteaux – poutres, même aux premières fissures, sont considérés comme **extrêmement dangereux** pour la structure et devrait être traité en conséquence. Ces dommages **réduire la rigidité de l'élément** structural et mènent à la redistribution incontrôlable des charges..



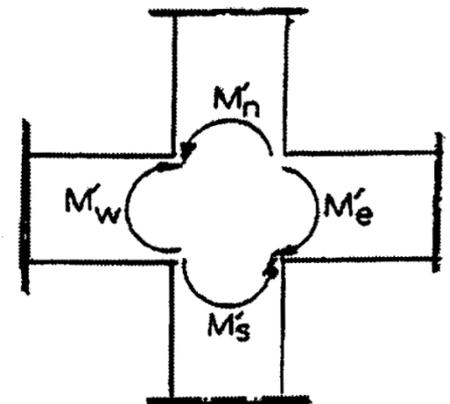
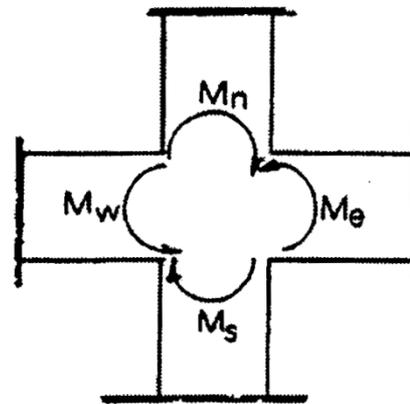


## Les dommages aux joints poteaux – poutres

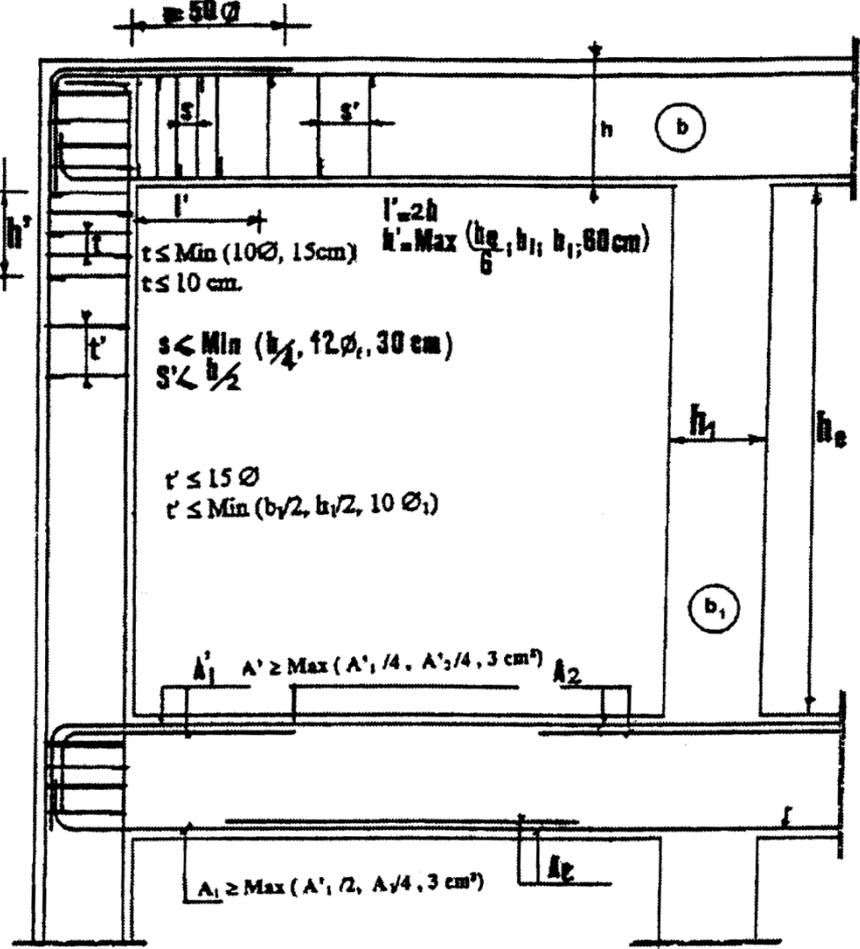
Il faut dimensionner les nœuds de tel sorte que les rotules plastiques se forment dans les poutres plutôt que dans les poteaux



**Poteau fort – poutre faible**



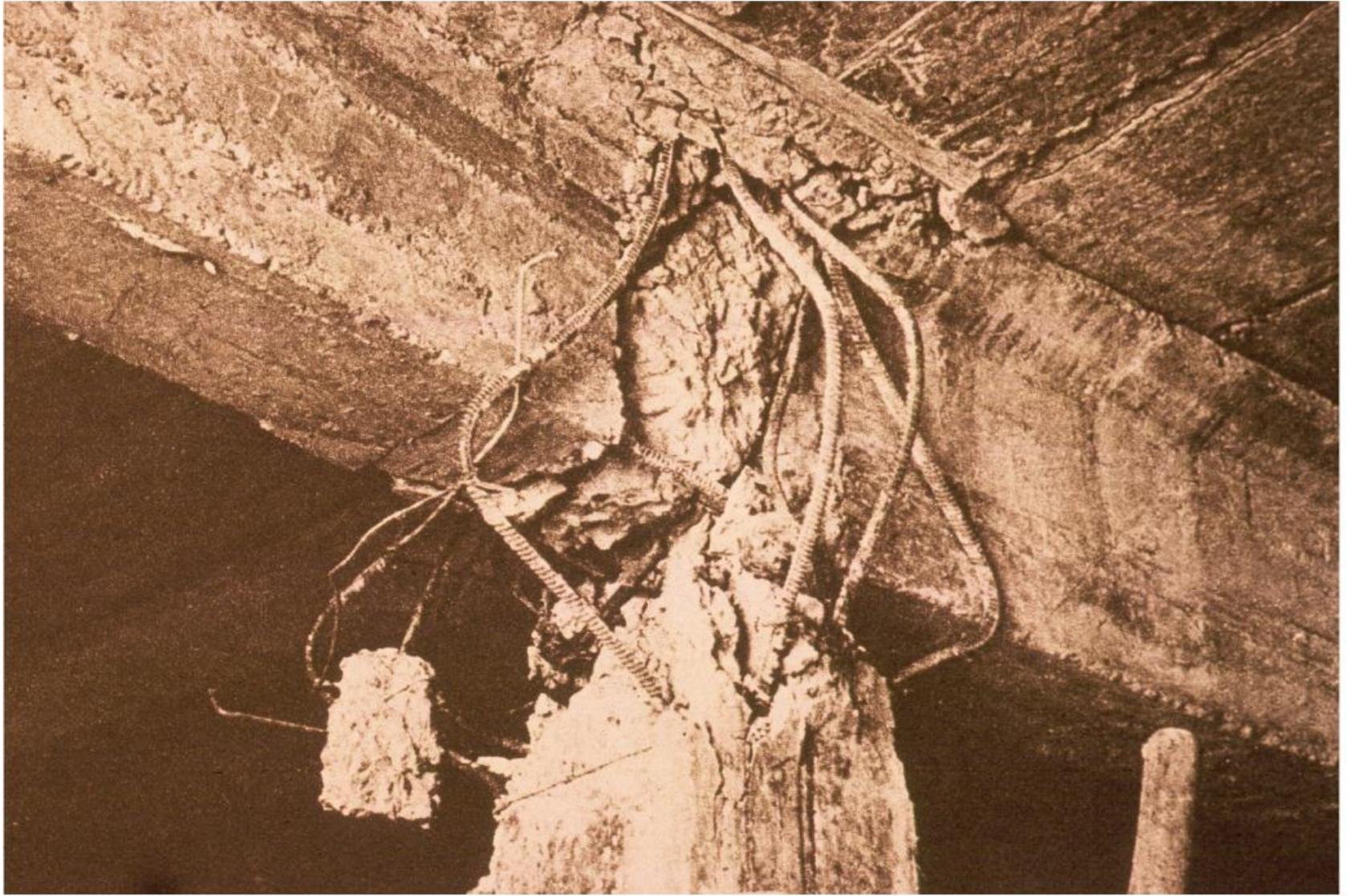
Il faut aussi respecter les dispositions constructives des armatures tel que recommandées dans l'RPA



Détail d'un cours d'armatures transversales de la zone nodale



2U superposés (avec alternance dans l'orientation)





**Arrêt du coulage du poteau à environ 5 cm sous la sous face de la poutre. Absence d'armatures transversales dans le noeud.**



**Endommagement à cause de l'absence d'armatures transversales dans le noeud**

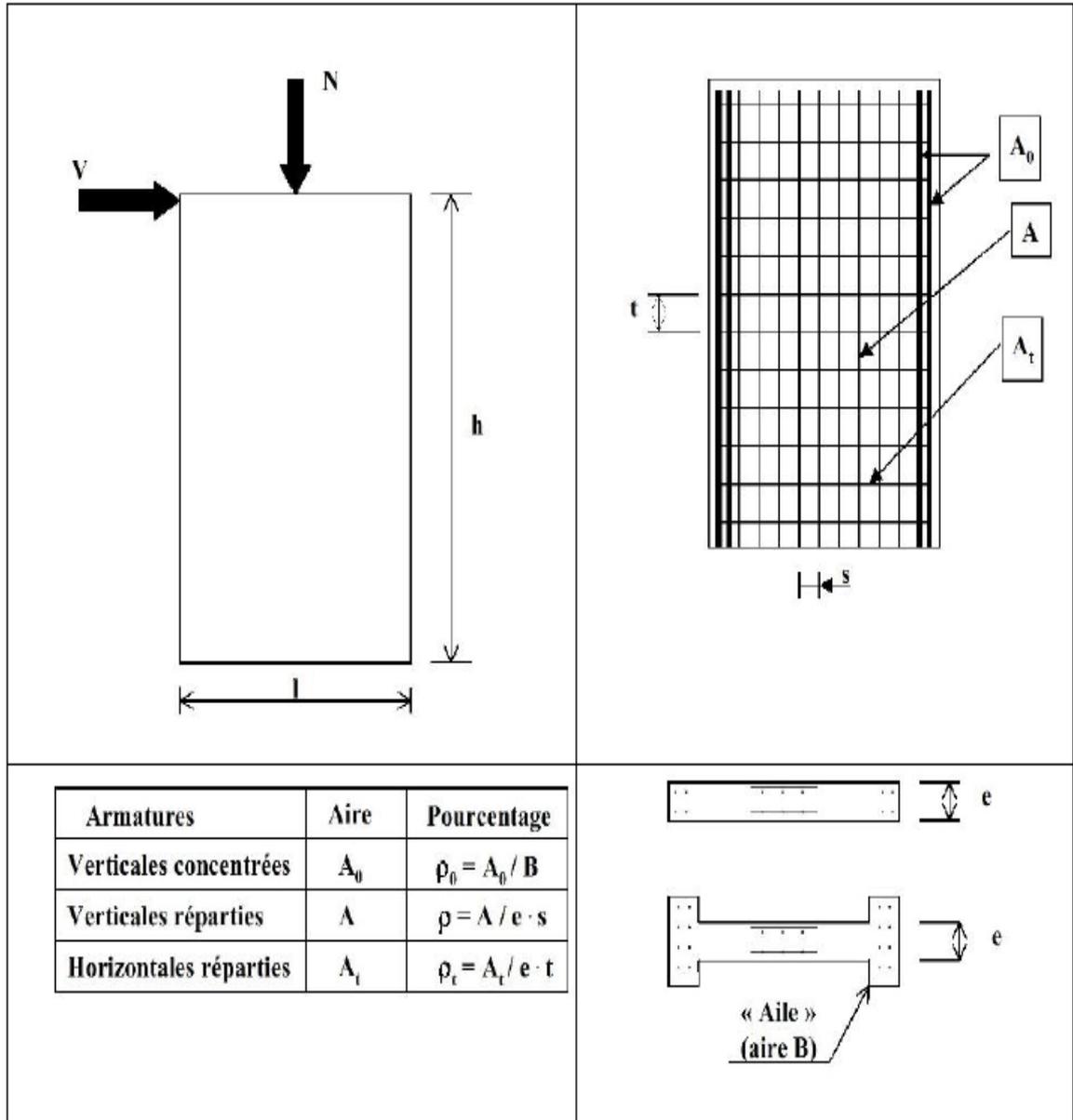


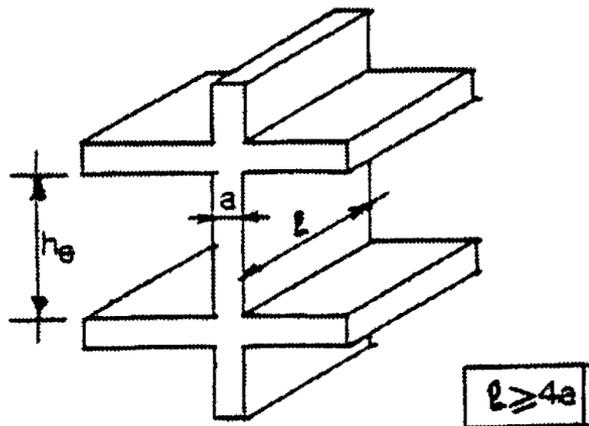
**Insuffisance d'armatures transversales, béton de mauvaise qualité, rupture au droit de la surface de reprise**

## 4- Les murs en béton armé (voiles):

Le terme de voile regroupe des éléments de structures au comportement mécanique très divers. Cependant, on peut considérer que les principaux paramètres ayant une influence prépondérante sur le comportement d'un voile sont les suivants:

- l'élanement, défini comme le rapport de la hauteur par la largeur du voile,  $h / l$ ,
- la disposition et le pourcentage des armatures,
- l'intensité de l'effort normal.





Dimensionnement des voiles seront l'RPA

Fig. i

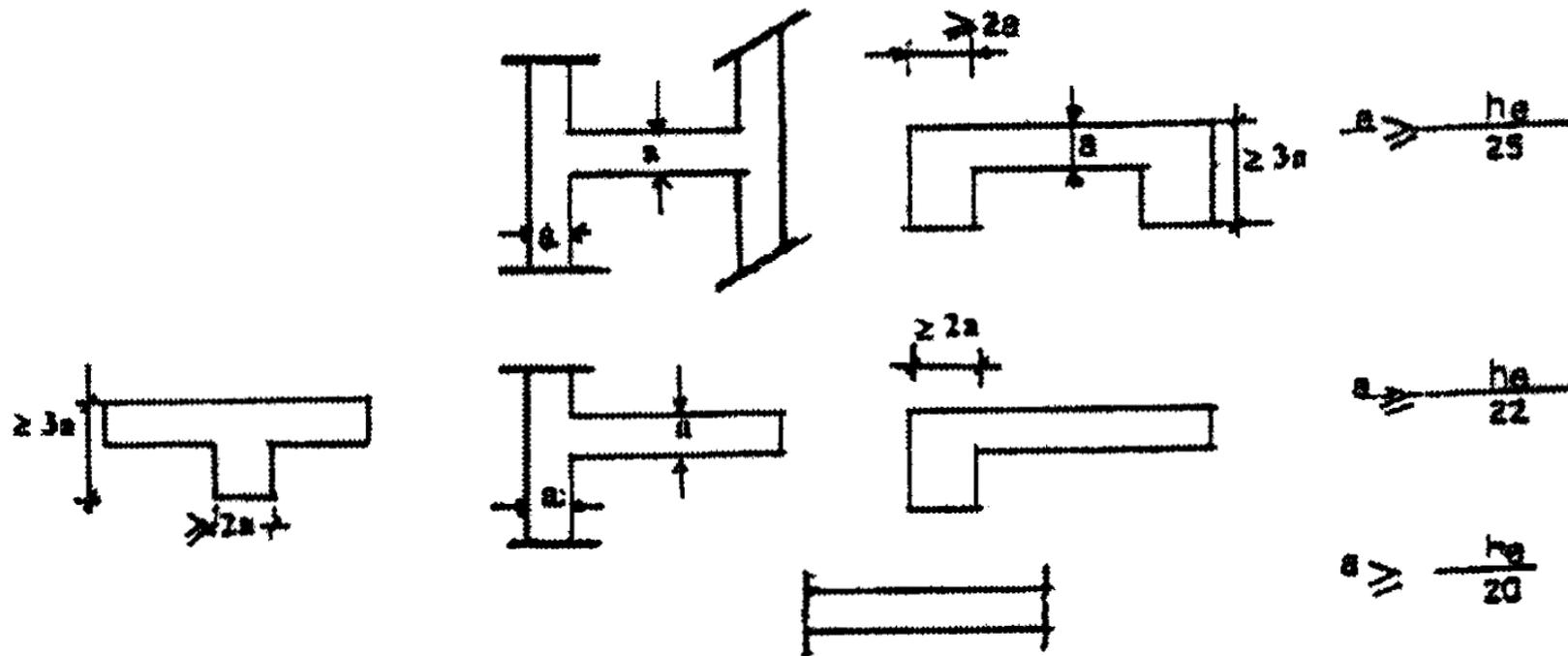
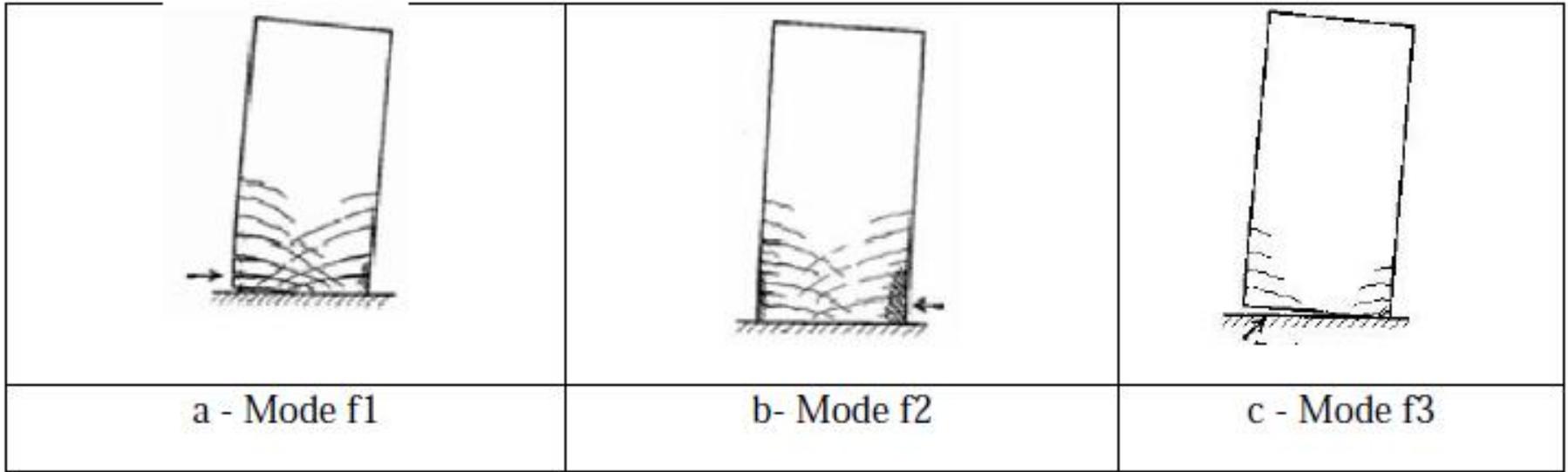


Fig. 7.8. : Coupes de voiles en plan

## Modes de rupture des voiles

### Rupture en flexion

- **Mode f1:** rupture par plastification des armatures verticales tendues et écrasement du béton comprimé.
- **Mode f2:** rupture par écrasement du béton.
- **Mode f3 :** rupture fragile par ruptures des armatures verticales tendues.



**Ruptures en flexion des voiles élancés**

## Rupture en flexion – effort tranchant

**Mode f/t :** rupture par plastifications des armatures verticales de flexion et des armatures transversales. C'est ce qui se produit dans les voiles moyennement élancés où la flexion n'est plus prépondérante et où les armatures horizontales sont insuffisantes.

## Ruptures par effort tranchant

**Mode t:** rupture des bielles de compression développées dans l'âme du voile.

On l'observe dans les voiles munis de raidisseurs, fortement armés longitudinalement et transversalement et soumis à des cisaillements élevés.

**Mode g :** rupture par glissement au niveau des reprises de bétonnage. Ce mode de rupture qui est plutôt caractéristique aux voiles courts a été aussi observé dans les cas des voiles moyennement élancés. Ce type de rupture peut apparaître lorsque les armatures

