

WEB-ATELIER #3

Parasismique : conception et dispositions constructives sur des bâtiments simples en maçonnerie

CYCLE DE WEB-ATELIERS : *CONCEVOIR ET CONSTRUIRE PARASISMIQUE*



Vincent Malaty

- BETEP -

Mardi 16 novembre

2021



5 grands thèmes :

- conception parasismique (rôle de l'architecte et de la MOE)
- les pièges de conception architecturale et structurelle à éviter
- règles applicables aux bâtiments simples en maçonnerie
- dispositions constructives, qualité de mise en œuvre
- Erreurs récurrentes rencontrées sur chantier

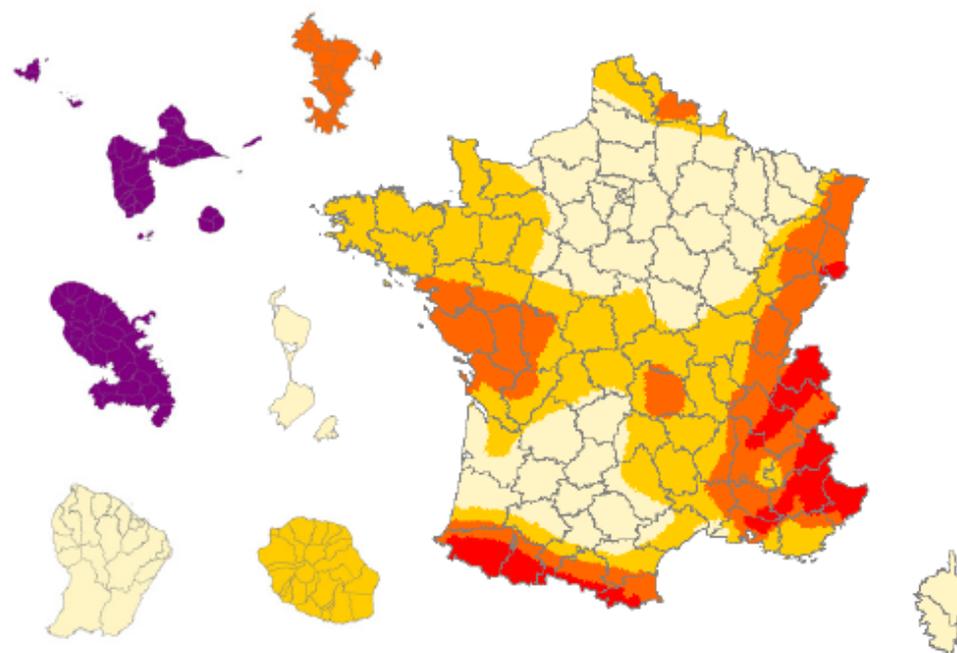
RAPPELS

■ Zonage réglementaire

Le paramètre retenu pour décrire l'aléa sismique au niveau national est une accélération a_{gr} , accélération du sol «au rocher» (le sol rocheux est pris comme référence).

Le zonage réglementaire définit **cinq zones de sismicité croissante** basées sur un découpage communal. La zone 5, regroupant les îles antillaises, correspond au niveau d'aléa le plus élevé du territoire national. La métropole et les autres DOM présentent quatre zones sismiques, de la zone 1 de très faible sismicité (bassin aquitain, bassin parisien...) à la zone 4 de sismicité moyenne (fossé rhénan, massifs alpin et pyrénéen).

Zone de sismicité	Niveau d'aléa	a_{gr} (m/s ²)
Zone 1	Très faible	0,4
Zone 2	Faible	0,7
Zone 3	Modéré	1,1
Zone 4	Moyen	1,6
Zone 5	Fort	3



■ Catégories de bâtiments

Les bâtiments à risque normal sont classés en **quatre catégories d'importance croissante**, de la catégorie I à faible enjeu à la catégorie IV qui regroupe les structures stratégiques et indispensables à la gestion de crise.

Catégorie d'importance	Description
I 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Bâtiments dans lesquels il n'y a aucune activité humaine nécessitant un séjour de longue durée.
II 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Habitations individuelles. ■ Établissements recevant du public (ERP) de catégories 4 et 5. ■ Habitations collectives de hauteur inférieure à 28 m. ■ Bureaux ou établissements commerciaux non ERP, h ≤ 28 m, max. 300 pers. ■ Bâtiments industriels pouvant accueillir au plus 300 personnes. ■ Parcs de stationnement ouverts au public.
III 	<ul style="list-style-type: none"> ■ ERP de catégories 1, 2 et 3. ■ Habitations collectives et bureaux, h > 28 m. ■ Bâtiments pouvant accueillir plus de 300 personnes. ■ Établissements sanitaires et sociaux. ■ Centres de production collective d'énergie. ■ Établissements scolaires.
IV 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Bâtiments indispensables à la sécurité civile, la défense nationale et le maintien de l'ordre public. ■ Bâtiments assurant le maintien des communications, la production et le stockage d'eau potable, la distribution publique de l'énergie. ■ Bâtiments assurant le contrôle de la sécurité aérienne. ■ Établissements de santé nécessaires à la gestion de crise. ■ Centres météorologiques.

Pour les **structures neuves** abritant des fonctions relevant de catégories d'importance différentes, la catégorie de bâtiment la plus contraignante est retenue.

Pour l'application de la réglementation sur les **bâtiments existants**, la catégorie de la structure à prendre en compte est celle résultant du classement après travaux ou changement de destination du bâtiment.

■ Exigences sur le bâti neuf

Les exigences sur le bâti neuf dépendent de la catégorie d'importance du bâtiment et de la zone de sismicité.

	I	II	III	IV
				
Zone 1	aucune exigence			
Zone 2				
Zone 3	PS-MI ¹	Eurocode 8 ³ $a_{gr}=1,1 \text{ m/s}^2$	Eurocode 8 ³ $a_{gr}=1,1 \text{ m/s}^2$	
Zone 4	PS-MI ¹	Eurocode 8 ³ $a_{gr}=1,6 \text{ m/s}^2$	Eurocode 8 ³ $a_{gr}=1,6 \text{ m/s}^2$	
Zone 5	CP-MI ²	Eurocode 8 ³ $a_{gr}=3 \text{ m/s}^2$	Eurocode 8 ³ $a_{gr}=3 \text{ m/s}^2$	

¹ Application **possible** (en dispense de l'Eurocode 8) des PS-MI sous réserve du respect des conditions de la norme PS-MI

² Application **possible** du guide CP-MI sous réserve du respect des conditions du guide

³ Application **obligatoire** des règles Eurocode 8

I/ CONCEPTION PARASISMIQUE

Une bonne conception parasismique permet :

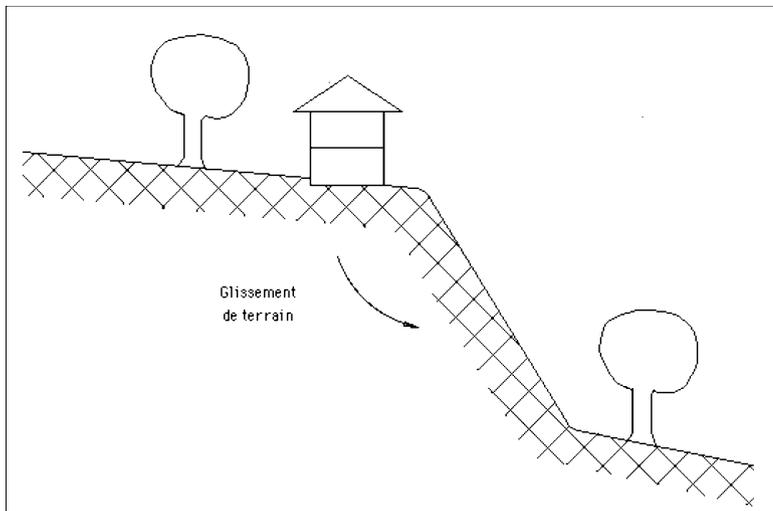
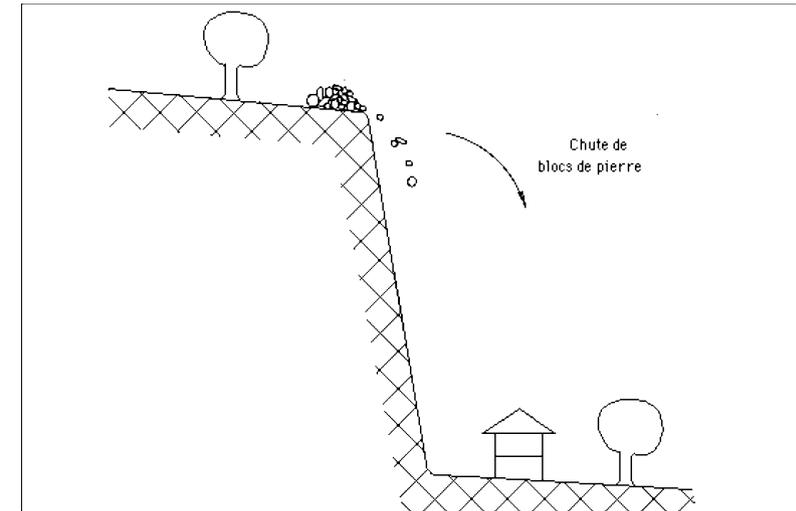
- d'absorber au mieux les sollicitations d'un séisme
- de faire baisser le coût de la construction
- de permettre aux bâtiments de résister aux séismes et ainsi sauver des vies humaines.

Pour bien concevoir un projet, plusieurs facteurs entrent en jeu :

- l'implantation et le type de sol
- forme géométrique du projet, conception architecturale et structurelle

Implantation sur le site :

- Effectuer une étude géotechnique pour connaître
 - la classe du sol (coefficient entrant en jeu dans les calculs)
 - Les différentes couches de sol
 - Les risques de liquéfaction
- Se protéger des risques d'éboulement ou de glissement:
 - Éviter le voisinage des crêtes de



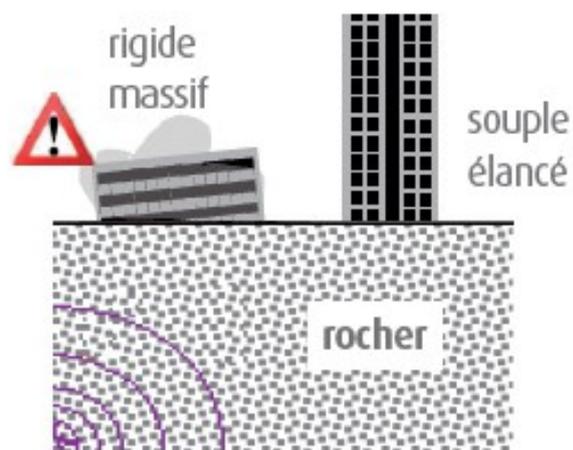
Il faut éviter les situations donnant lieu à une amplification des accélérations transmises par le substratum rocheux, c'est à dire éviter :

- les crêtes et sommets
- les bords de vallées encaissées
- les changements de pente
- zone de changement de type de sol
- formations peu rigides sur le substratum
- Vallées alluviales
- Proximité de failles actives

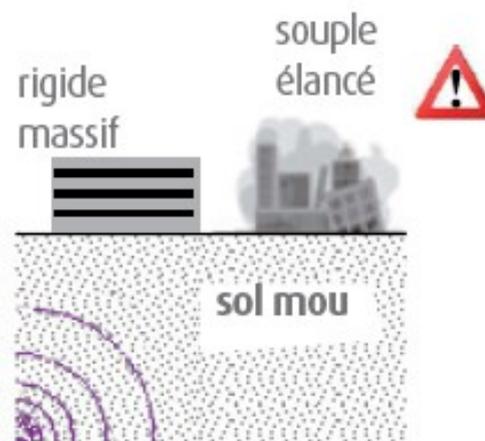
Tenir compte de la nature du sol en privilégiant des configurations de bâtiments adaptées à la nature du sol. Attention à l'effet de résonance avec le sol; pour cela il faut rechercher pour le bâtiment étudié une période propre aussi différente que possible de la période dominante du sol. Pour cela, il faut :

- sur les sols rocheux, privilégier des bâtiments souples
- Sur les sols mous, privilégier des bâtiments rigides massifs

• Tenir compte de la nature du sol



- Privilégier des configurations de bâtiments adaptées à la nature du sol.



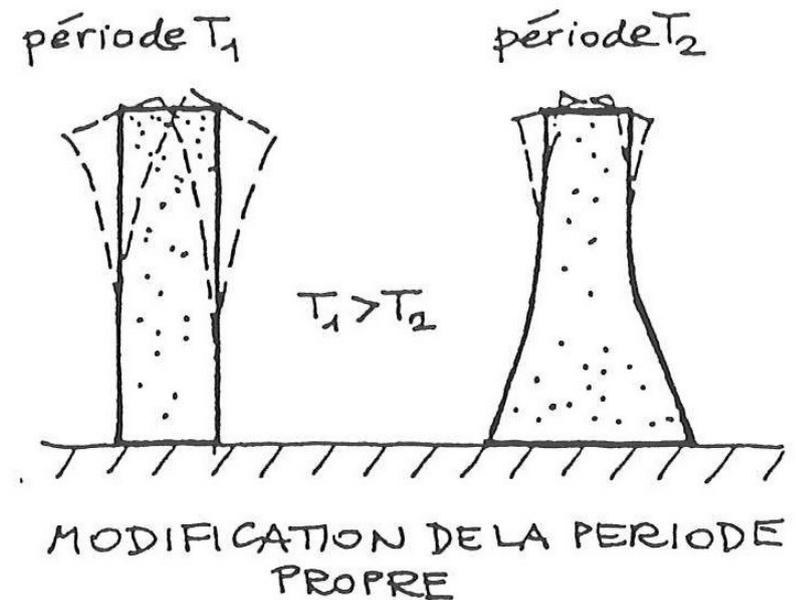
- Prendre en compte le risque de liquéfaction du sol (perte de capacité portante).

Quelques dispositions pour diminuer la période T :

- ✓ Baisser le centre de gravité de la construction
- ✓ Rigidifier la structure :
 - Ajouter des palées de stabilités
 - Augmenter la largeur des palées de stabilités
 - Opter pour des palées de stabilité plus rigides (voiles)
 - Réduire l'élançement de la construction
 - Réduire la hauteur de la construction

Quelques dispositions pour augmenter la période T :

- ✓ Opter pour un système flexible
- ✓ Augmenter la hauteur du bâtiment
- ✓ Augmenter l'élançement du bâtiment



Forme géométrique des bâtiments :

Rappel

Les plans symétriques selon 2 axes présentent un bon comportement sous sollicitations sismiques.

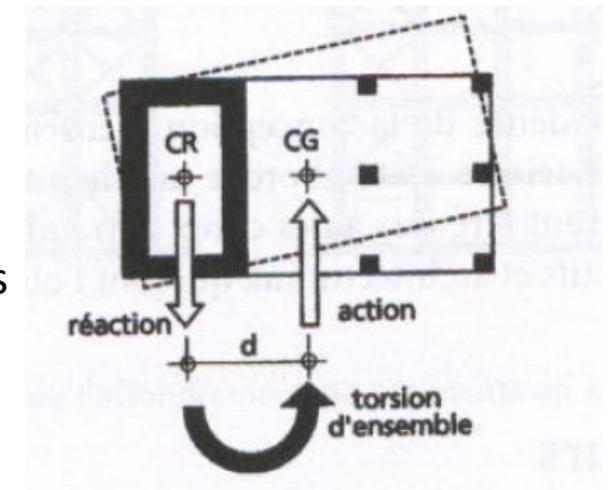
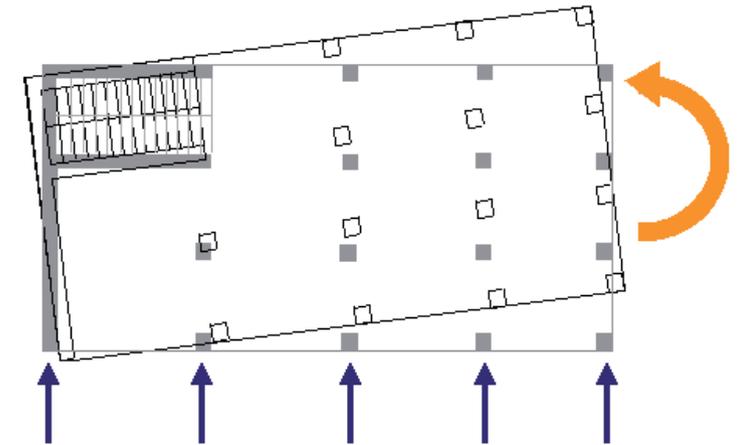
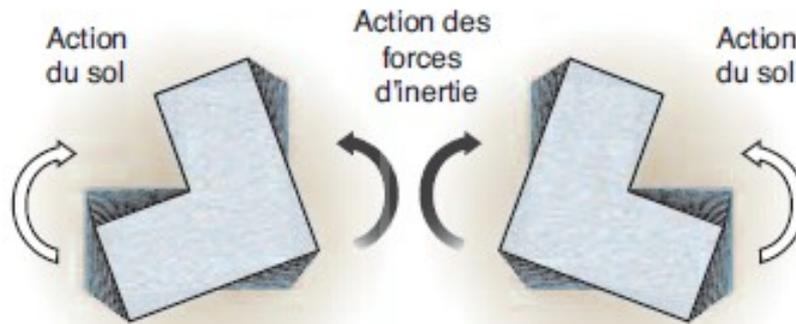
De ce fait, il faut privilégier des formes simples, carrées ou rectangulaires

Une dissymétrie en plan entraîne 2 phénomènes majeurs :

- torsion d'ensemble du bâtiment
- concentration de contraintes

La torsion:

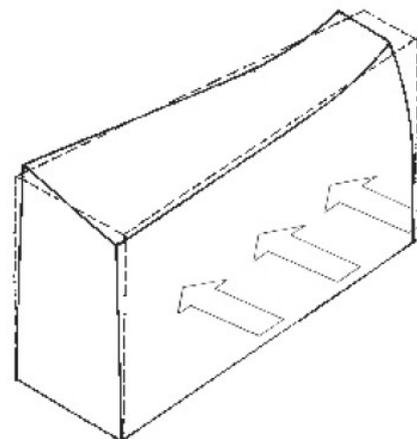
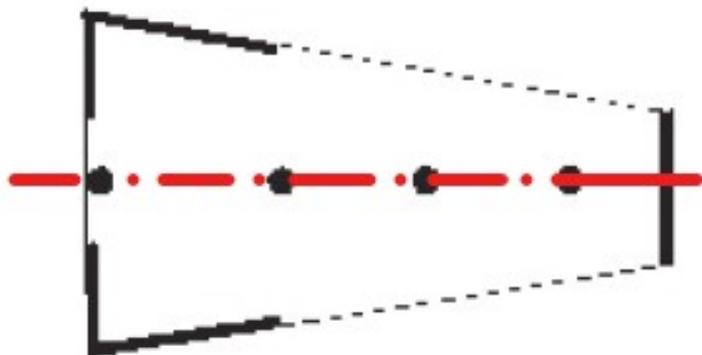
C'est un des effets les plus destructeurs lors d'un séisme. Lorsque le centre de gravité du bâtiment diffère du centre de rigidité, le phénomène de torsion se produit sous l'effet des forces horizontales.



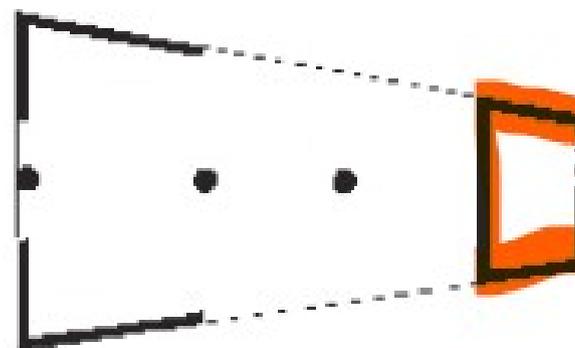
Une bonne conception permet de réduire considérablement les effets de la torsion sur une construction :

- ✓ Une symétrie des contreventements suivant les 2 axes
- ✓ Réduire l'excentricité en cherchant à faire coïncider le centre de torsion avec le centre de gravité
- ✓ Augmenter le bras de levier en positionnant les murs de contreventement sur la périphérie afin d'augmenter la résistance à la torsion

Exemple d'un bâtiment ne présentant qu'un seul axe de symétrie : sous les efforts horizontaux perpendiculaires à l'axe de symétrie, le bâtiment se met à vriller (effet de torsion)



Pour compenser le phénomène, il faut rapprocher le centre de torsion du centre de gravité par l'ajout d'un noyau rigide



Concentration des contraintes :

Les 2 ailes, suivant une direction sismique, présentent des rigidités différentes entraînant une oscillation différente et donc une concentration de contraintes importantes au niveau des saillis et des retraits

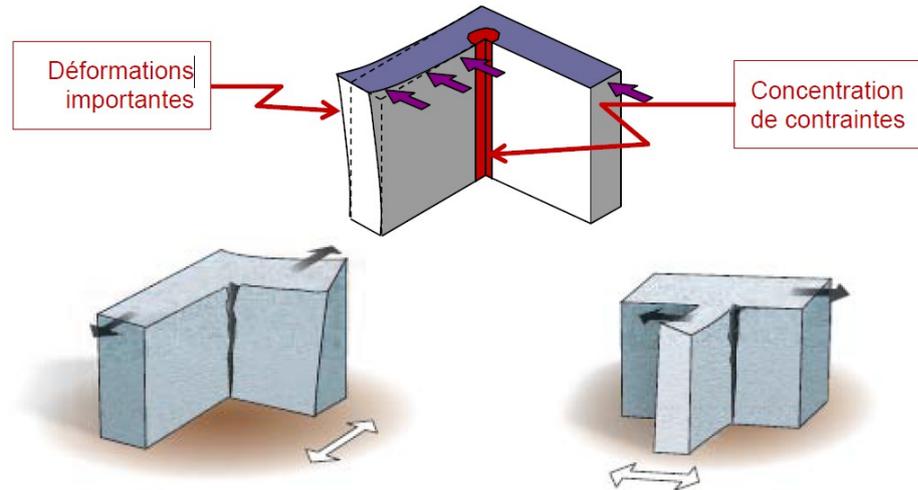
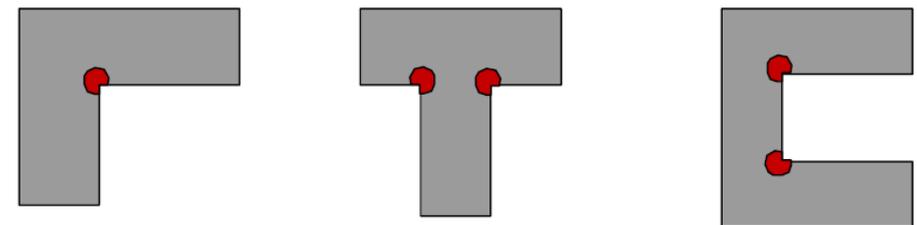


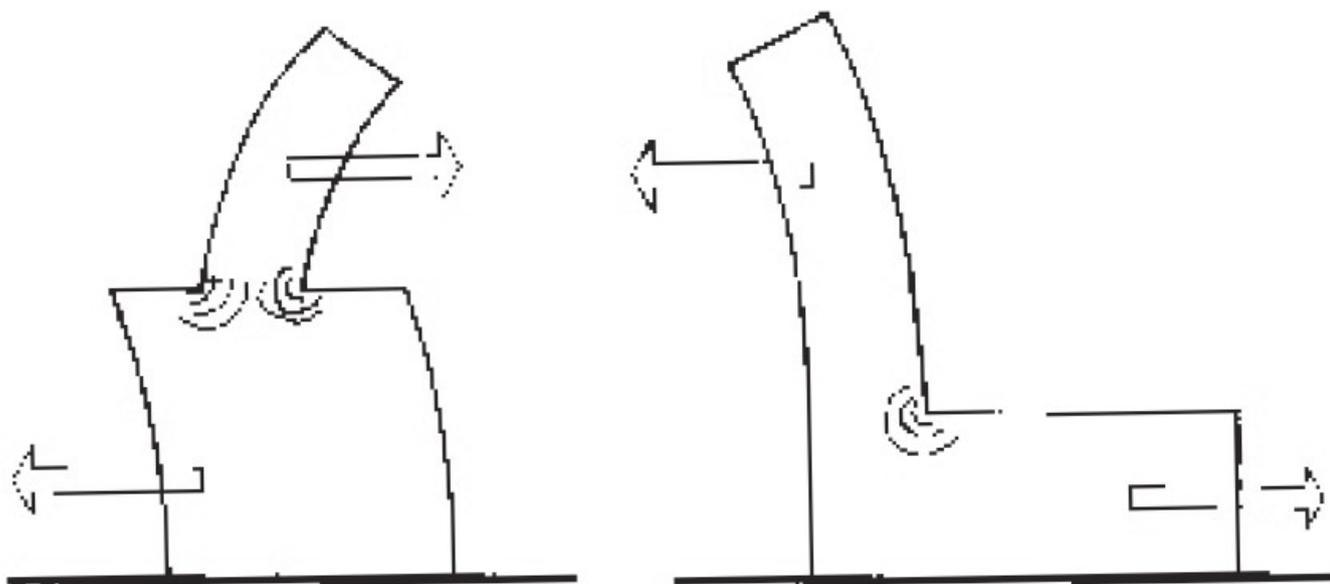
Figure II-4 : Effets de concentration de contraintes pour des bâtiments à forme complexe

Plus l'angle est profond, plus l'intensité des contraintes augmentent. Les règles simples en maçonnerie limitent les retraits ou les saillis à 15% d'une forme rectangulaire la plus proche de la construction



Formes complexes générant des concentrations de contraintes

De même, en élévation, il faut garder une certaine symétrie. Un bâtiment dont les dimensions en plan ne varient pas avec la hauteur connaîtra moins de dommages qu'un bâtiment présentant des saillis ou des retraits dans les étages. Un niveau en retrait n'oscille pas à la même fréquence qu'un niveau courant. Suivant un mode donné, ils peuvent subir des déplacements opposés entraînant une concentration de contraintes à la base du retrait.



b) Bâtiment endommagé par le séisme de Kobé, Japon (17.1.1995). La partie supérieure du bâtiment n'oscille pas à la même fréquence que sa partie inférieure

Solution pour limiter et compenser les conséquences des bâtiments de formes asymétriques :

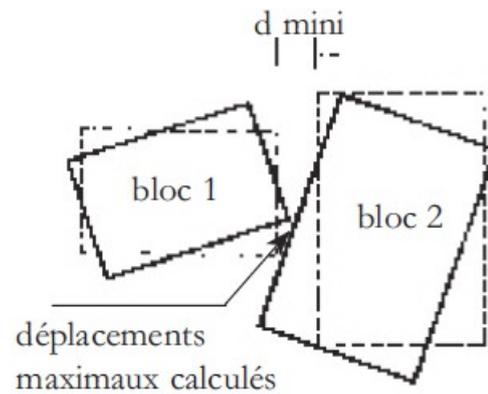
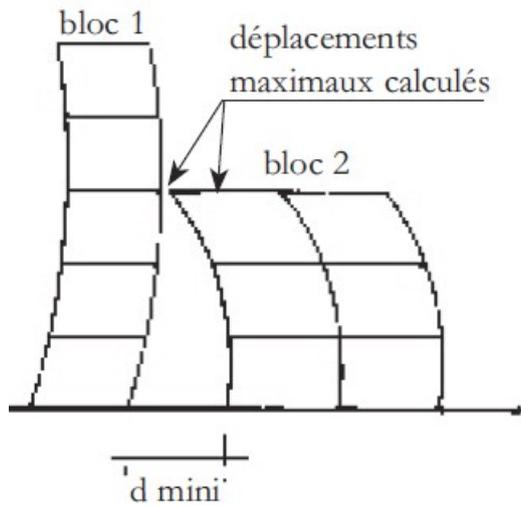
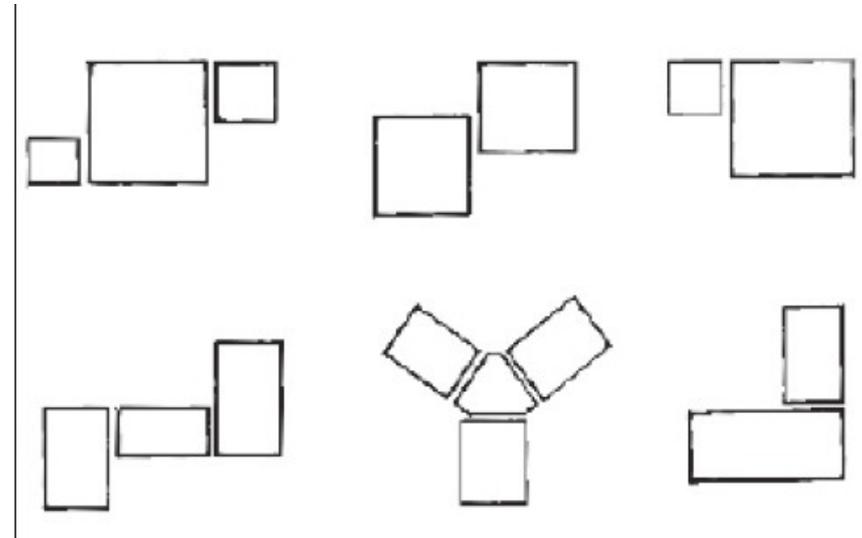
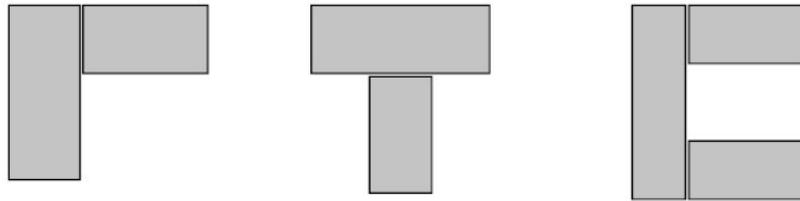
1/ utilisation de joint parasismique :

Les joints parasismiques permettent de retrouver des blocs de formes simples, symétriques et régulières, et ainsi d'éviter tous les effets néfastes lors d'un séisme. Les joints doivent avoir les caractéristiques suivantes :

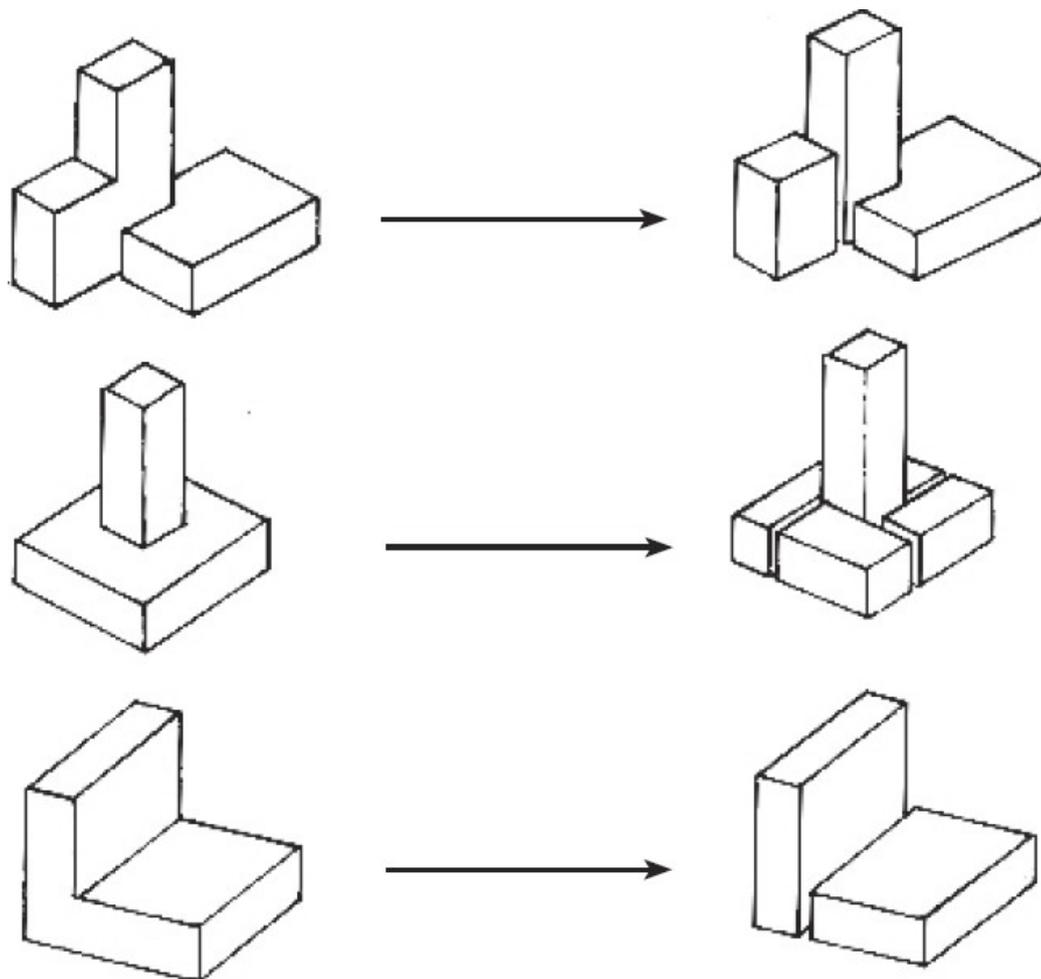
- ✓ Largeur suivant la zone sismique (4 à 6cm) en règle générale. Ceci dit, ils peuvent être supérieurs dans le cas de bâtiments de grandes hauteurs présentant un déplacement important au sommet
- ✓ Les joints doivent rester vides de tous matériaux : utilisation de couvre joint souple ou fixé que d'un seul côté afin d'éviter toute introduction de corps étrangers
- ✓ Les joints doivent être rectilignes : éviter les baïonnettes

Dans tous les cas, les joints entraînent un surcoût de la construction : double structure, couvre joint...Il est interdit en zone sismique d'utiliser les appuis glissants, corbeaux, goujons...

Exemple de joints parasismiques en plan sur des projets de forme en T, L, U, X...



Exemple de joints parasismiques en élévation sur des projets présentant des retraits ou des saillis d'un niveau à l'autre

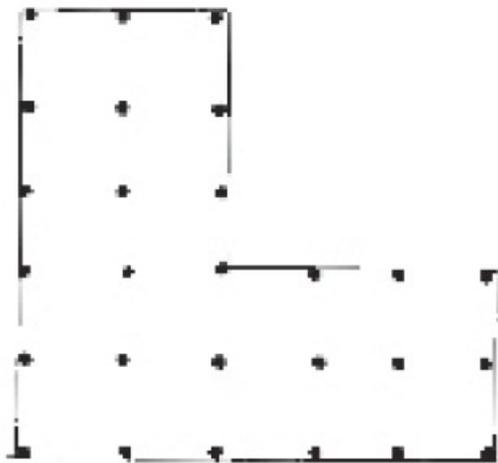


2/ Compensation par ajout de rigidité

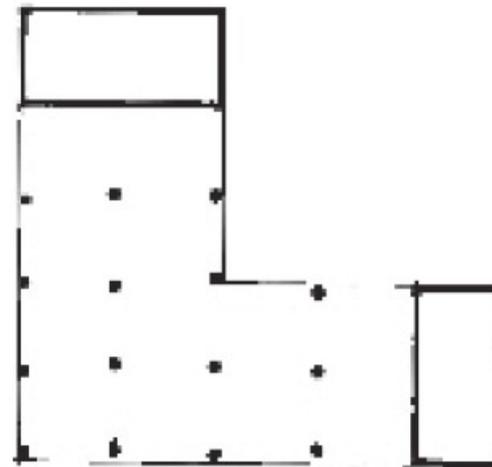
Dans le cas de forme complexe, le but est de rapprocher le centre de gravité du centre de rigidité par ajout de murs de contreventement, palées de stabilité.

Ceci permet de rigidifier les zones flexibles et ainsi minimiser les déformations.

Exemple de compensation :



avant compensation

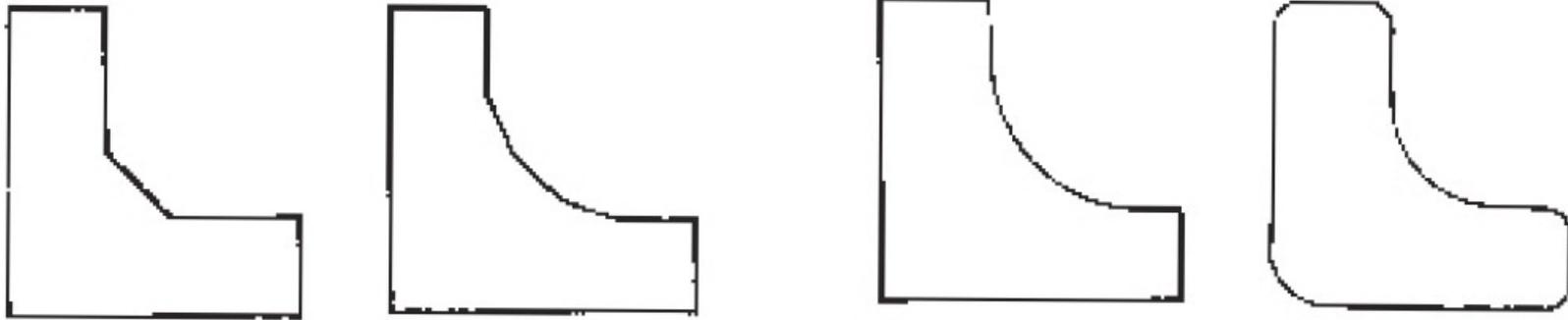


après compensation

Il faut cependant rester prudent sur ce type de compensation, cela ne remplacera pas l'efficacité d'un joint parasismique

3/ Variation progressive de la rigidité :

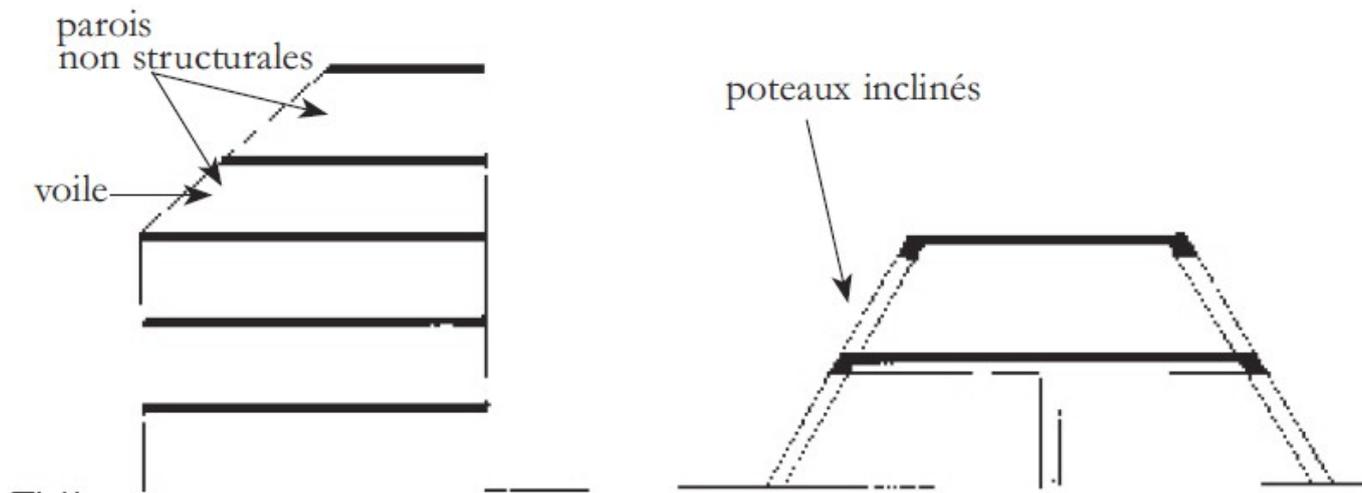
Il s'agit d'adoucir les angles rentrants par une forme courbe ou par facettes (voir schéma ci-dessous).



4/ Retrait progressif en élévation :

On a vu qu'il fallait éviter les retraits dans les élévations ou alors utiliser des joints de dilatations pour y remédier.

Ceci dit, des retraits progressifs sont acceptés, facilement réalisables lorsque l'on a des refends en béton.



Il existe d'autres solutions plus rares pour compenser des conceptions complexes comme l'utilisation d'appuis isolants la construction des secousses du sol. Cette technique est peu utilisée en métropole.

Pour résumer, afin d'éviter de nombreux sinistres, l'important est de bien concevoir le projet en gardant à l'esprit de favoriser :

- ✓ Bâtiments symétriques dans ces 2 axes
- ✓ Bâtiments de formes simples
- ✓ Bâtiments réguliers
- ✓ Avoir un centre de rigidité confondu avec le centre de gravité
- ✓

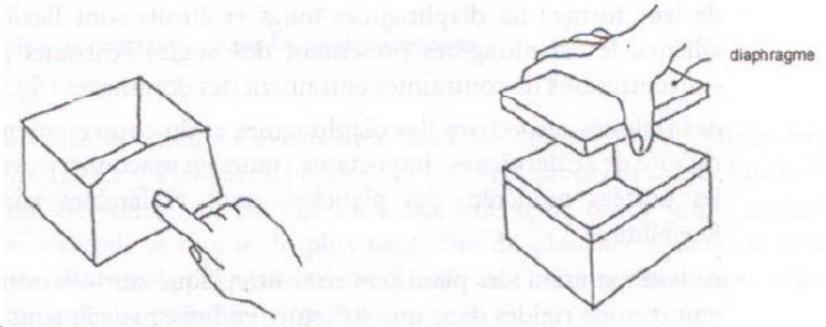
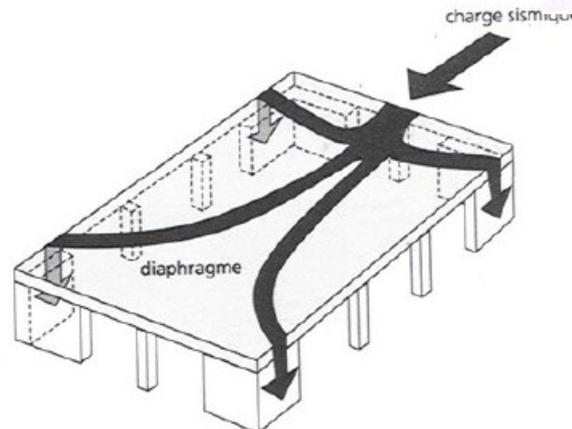
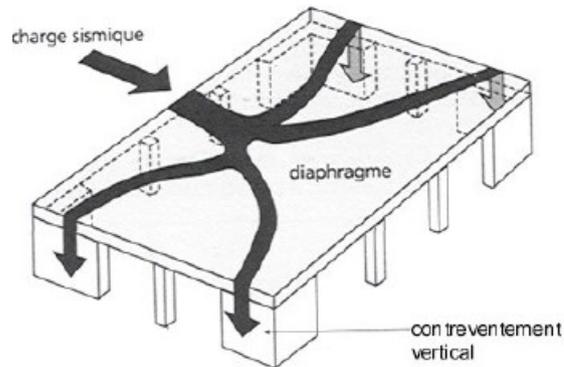
II/PIEGES A EVITER EN CONCEPTION

1/ Les diaphragmes :

Les efforts sismiques transitent dans les planchers pour être ramenés dans les murs de contreventement. Il joue le rôle de diaphragme rigide.

Sont considérés comme diaphragme :

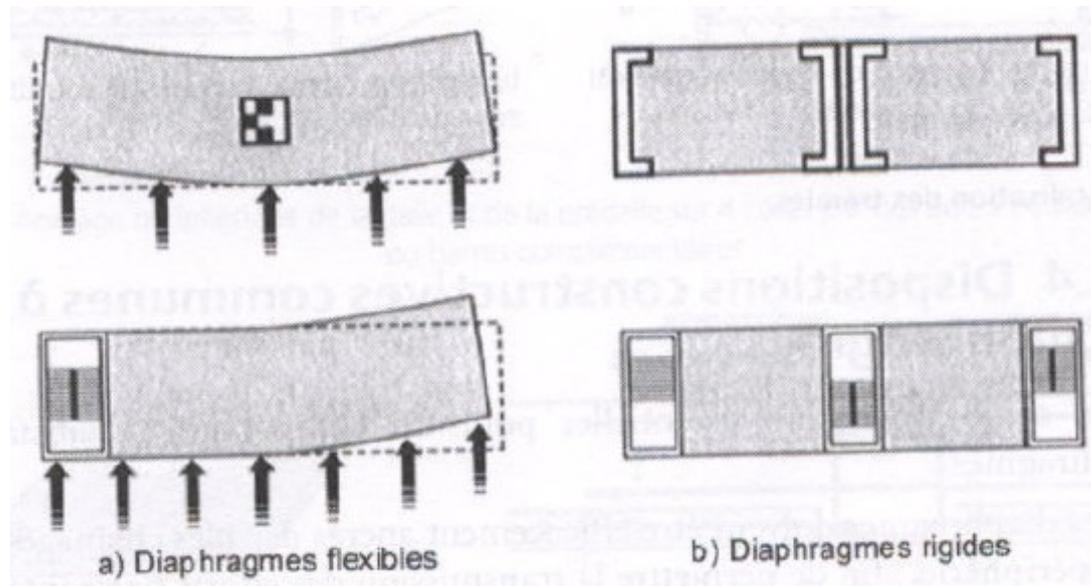
- Les planchers de tous les niveaux et toiture terrasse
- Les toitures inclinées (béton, bois ou métal)
- Les fondations, soit par le dallage si il est ferrailé pour reprendre les efforts sismiques, soit par les semelles filantes ou isolées à condition qu'elles soient butonnées dans les 2 directions.



Les erreurs à ne pas commettre pour conserver l'effet de diaphragme :

- Concevoir des diaphragmes le plus rigides possible:
 - Éviter les diaphragmes longs et étroits (trop flexibles)
 - Portée modérée des planchers
 - Matériaux utilisés : éviter un plancher bois flexible lorsque les murs sont en maçonnerie (plus rigide)
 - Eviter d'affaiblir les diaphragmes par des trémies
 - Mauvaise solidarisation des bords de plancher avec les chainages : dispositions constructives à respecter

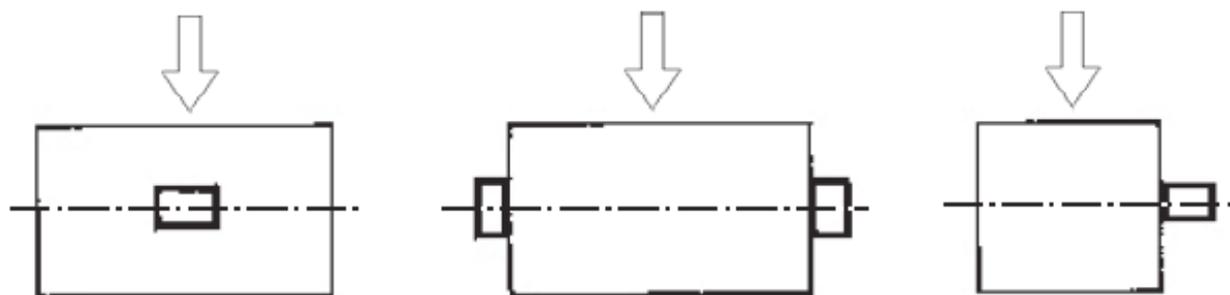
Exemple de diaphragme flexible et rigide



Exemple d'affaiblissement du diaphragme induit par les trémies d'escalier ou gaines techniques

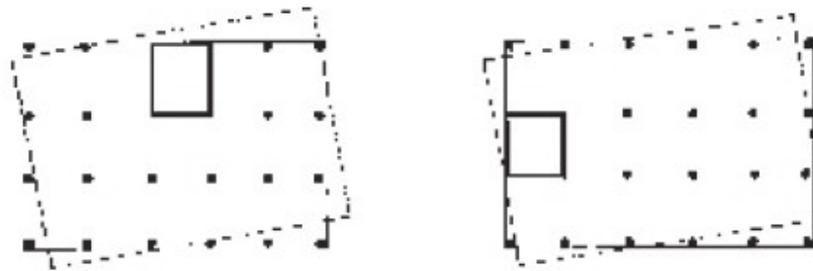


a) Solutions peu favorables. La périphérie des planchers est très sollicitée par les séismes et ne devrait pas être affaiblie



b) Solutions favorables. Les planchers constituent des poutres au vent, leur axe neutre passe par leur milieu. Les cages d'escaliers extérieures ne nécessitent pas de trémies dans les planchers

Une autre erreur à ne pas commettre avec les cages d'escalier est de se dire qu'elle va contreventer à elle seule un bâtiment car les murs qui forment la cage montent sur toute la hauteur du bâtiment. Au contraire elle joue le rôle de point dur et entraîne de la torsion néfaste à la construction. Pour y remédier, il faut prévoir des murs de contreventement pour assurer une certaine symétrie, bloquer la torsion.



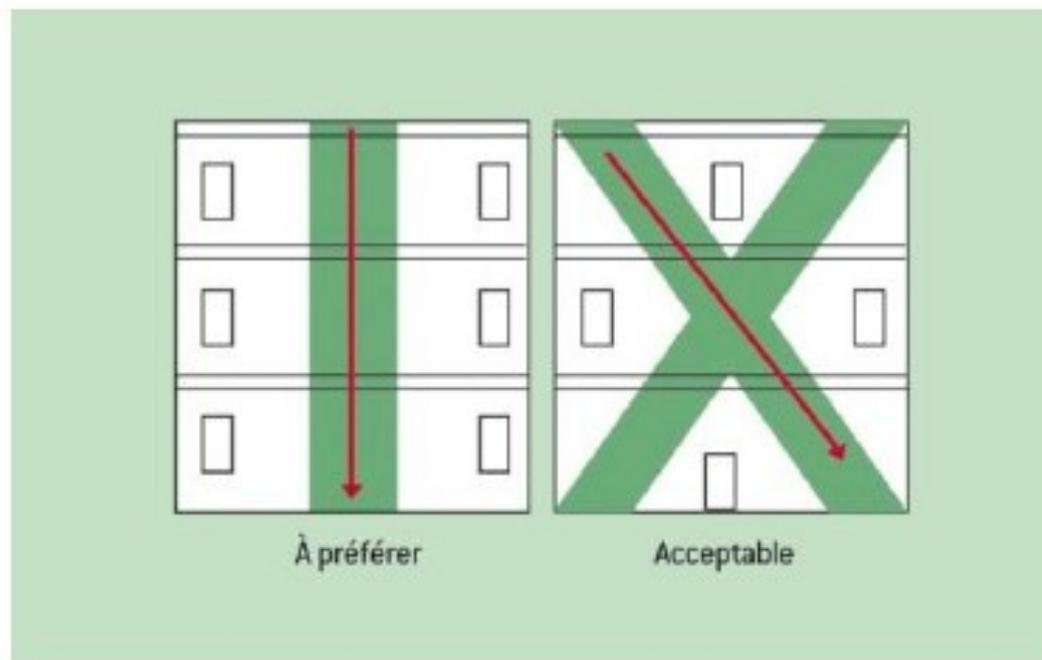
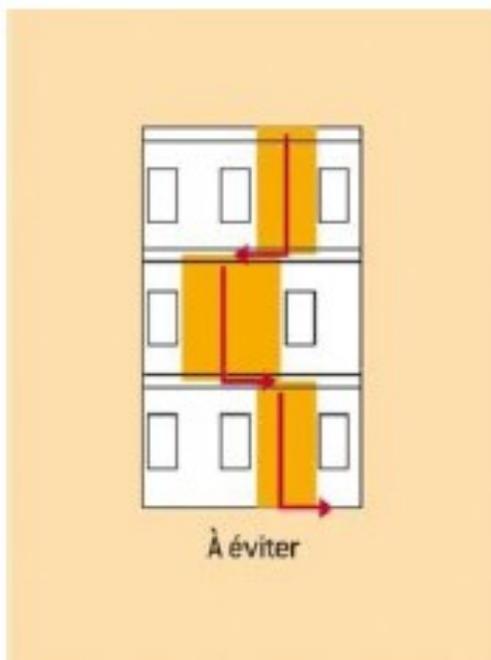
a) Torsion d'axe vertical due à l'excentrement de cages d'escalier rigides



b) Compensation de l'excentrement des cages d'escalier rigides

2/ transition des efforts :

La transition des efforts sismiques doit être pensée dès le début du projet. Les contreventements horizontaux servent aussi aux contreventements verticaux. La réalisation des ouvertures en façade ou dans les refends intérieurs doit tenir compte de la descente de charges sismiques. Il faut éviter les descentes de charges en « baionnettes »



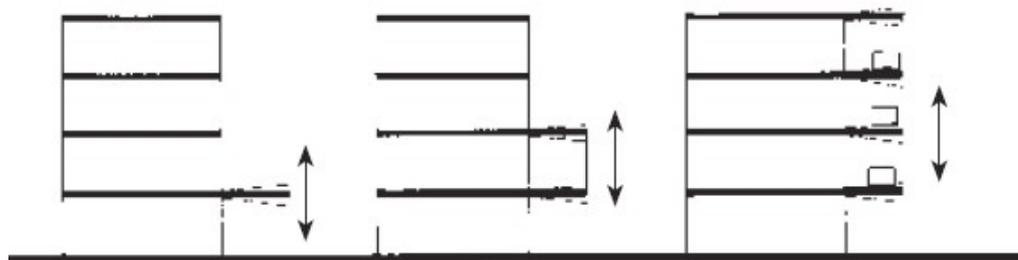


3/ Attention aux portes à faux :

Les portes à faux engendrent des angles rentrants et par conséquent des concentrations de contraintes.

Il faut :

- Éviter d'avoir des éléments lourds en bout de porte à faux : garde corps béton, jardinières...
- Limiter le porte à faux à une portée maxi de 2m

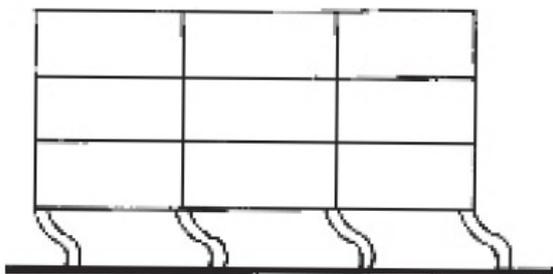


Effondrement d'une coursive en porte à faux

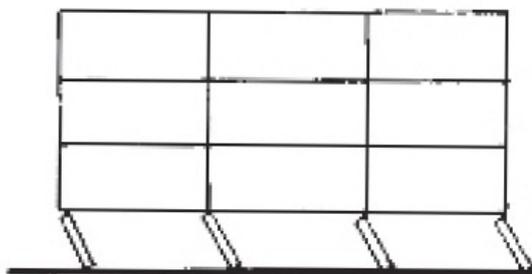
4/ Attention aux niveaux souples :

Les niveaux souples sont des niveaux dont la rigidité est très inférieure aux autres niveaux.

On les retrouve généralement dans des commerces, parkings, zones d'activités... Cela engendre généralement une structure poteaux/poutres. Lors d'un séisme, les oscillations des étages supérieurs entraînent une déformation « en S » à laquelle les poteaux seuls ne peuvent résister. Ces niveaux sont fréquemment écrasés lors d'un séisme.



a) " Mise en S " des poteaux



b) Rupture consécutive des poteaux à leurs extrémités



Effondrement d'un bâtiment avec un rez de chaussée destiné au parking



Quelques solutions pour renforcer ces niveaux souples :

- Confinement dense aux niveaux des extrémités des poteaux : sur ferrailage, chapiteaux béton. Cela améliore le comportement mais sans toutefois assurer une capacité de résistance à un fort séisme
- Prévoir une structure aux étages aussi souple afin d'avoir une rigidité similaire d'un niveau à l'autre; cela impose des façades légères, cloisons légères...Cela permet une concentration des efforts répartis sur tous les niveaux et pas sur un seul.
- Prévoir des voiles de contreventement ou une triangulation en façade dans les 2 directions et de façon symétrique. Les efforts horizontaux passent dans les planchers par effet de diaphragme et sont distribués dans les panneaux de contreventement en proportion de leurs rigidités. Les poteaux sont du coup très peu sollicités.



5/ Attention aux angles de bâtiment:

Ces zones sont très sollicitées vis-à-vis des séismes à cause des phénomènes suivants qui se produisent au cours d'un séisme :

- Concentration de contraintes dans le cas de torsion
- Comportement en console entraînant de fortes sollicitations dans les angles (traction/compression successives)
- Délestage des poteaux dans les angles.



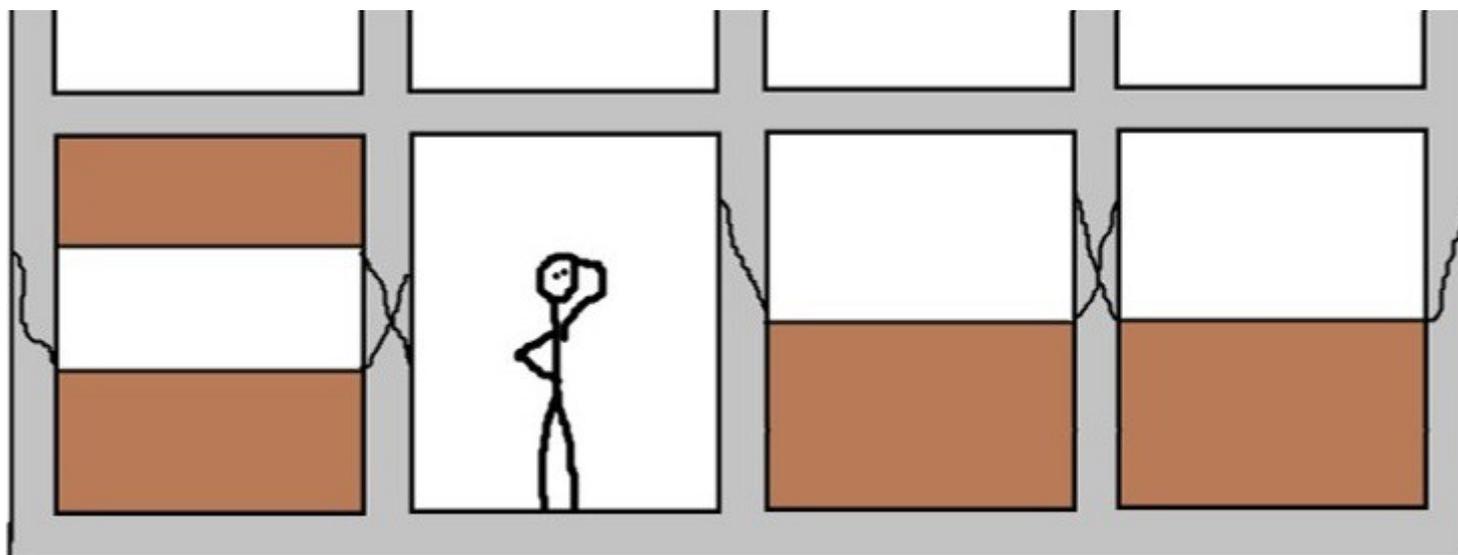
Pour remédier à ce phénomène :

- Bien raidir les angles avec des murs de contreventement (côté architectural), éviter ainsi les ouvertures trop proches des angles
- Ancrage efficace des planchers dans les chaînages (phase chantier)
- Continuité et liaisons des chaînages par des équerres ou des U (phase chantier)

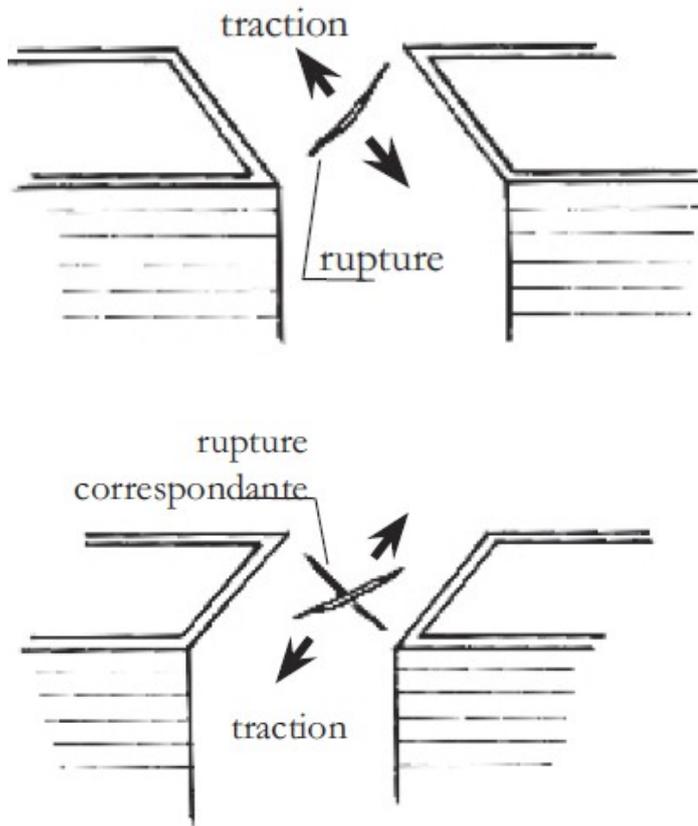
6/ Principe de poteaux courts :

- ✓ Poteaux en soubassement
- ✓ Poteaux bloqués par des allèges...

Si la façade comprenant des poteaux courts ne possède pas de panneaux de contreventement, les sollicitations qui passeront dans les poteaux seront trop importantes pour assurer la résistance.



L'utilisation des allèges maçonnées est à l'origine du phénomène de poteau court. Elles brident la hauteur libre des poteaux, la flexibilité nécessaire pour accepter les déformations sismiques est donc réduite. Lorsque ces éléments participent au contreventement du bâtiment, le cisaillement trop important entraîne la rupture de ces poteaux.



La rupture par cisaillement s'effectue en diagonale, perpendiculaire aux efforts de traction, pour chaque sens d'oscillations



Poteau bridé des 2 côtés



Poteau bridé d'un seul côté : une seule fissure en diagonale correspondant à la déformation du poteau vers l'allège



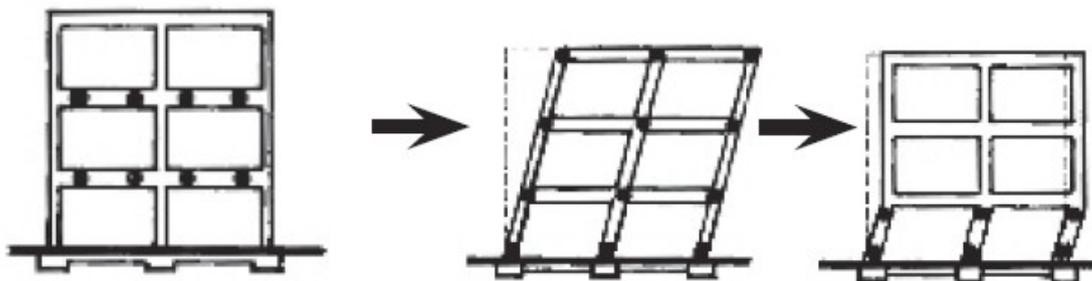
Pour éviter l'effet de poteaux courts en présence d'allèges :

- ✓ Contreventer la façade ou le bâtiment par un ou plusieurs voiles en béton pour absorber les sollicitations horizontales
- ✓ Opter pour des allèges en structure légère, ayant une rigidité nettement inférieure à celle des poteaux.

7/ Favoriser le principe de poteaux forts/ poutres faibles :

le maintien de la stabilité de l'ouvrage nécessite que les éléments horizontaux se déforment plastiquement avant les éléments verticaux, il est donc impératif d'opter pour des poteaux plus résistants que les poutres

D'un point de vue résistance des matériaux, il faut que les rotules plastiques se forment sur les éléments horizontaux et non pas sur les éléments verticaux entraînant l'effondrement



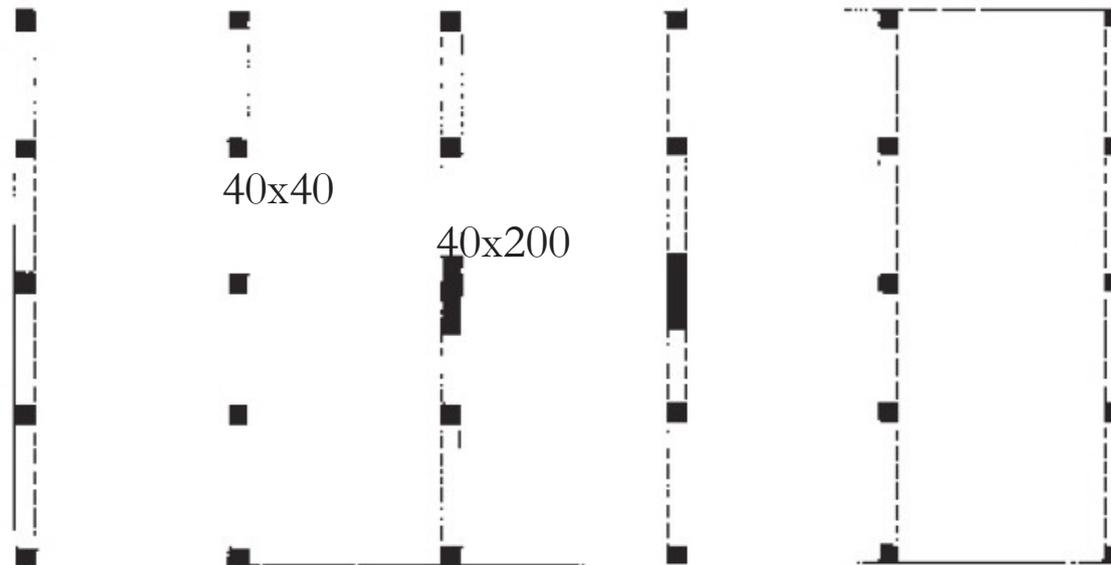
Si le contreventement n'est pas assuré par les portiques mais par des voiles en béton armé, le principe de poteaux forts poutres faibles n'est pas impératif car les rotules plastiques se formeront dans les voiles bien plus rigides

8/ Homogénéiser la section des poteaux :

- Nécessaire lors d'un système d'ossature poteaux/poutres afin d'éviter d'avoir des poteaux plus sollicités que d'autres de part leur inertie

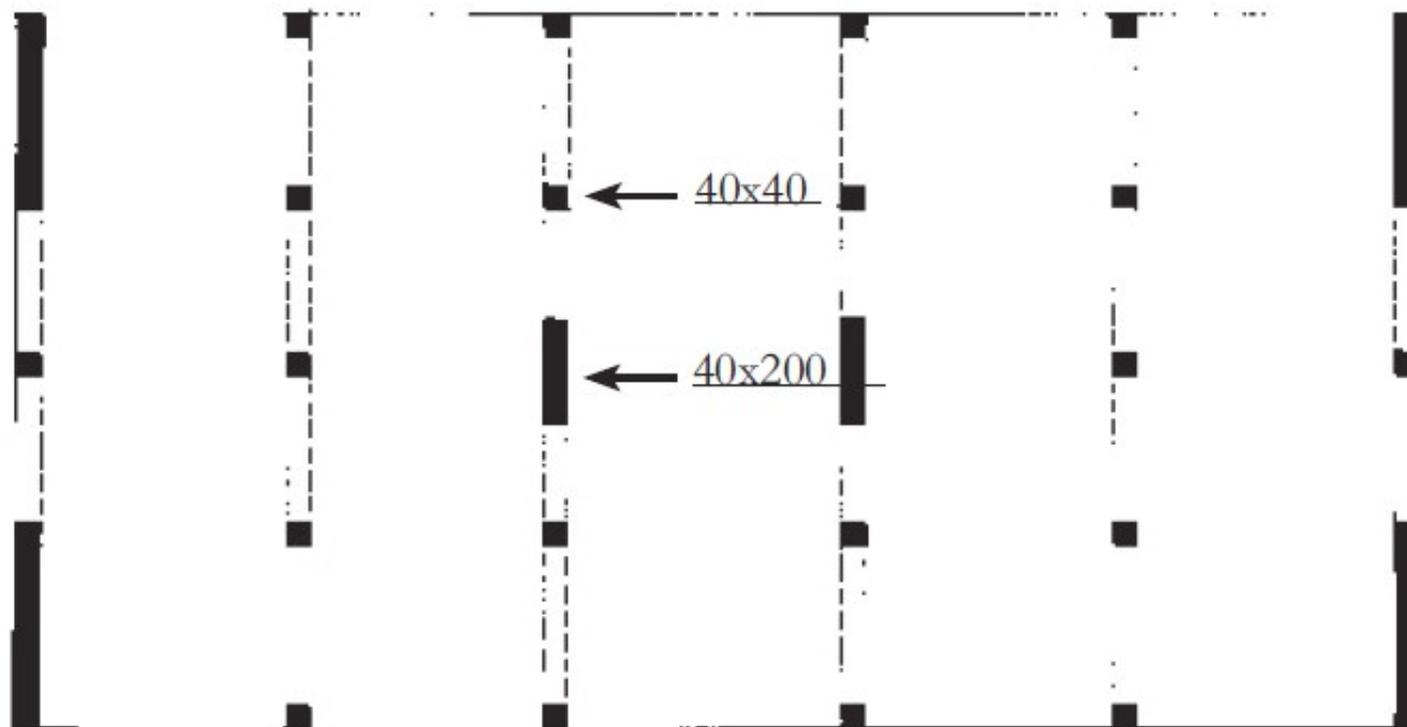
Les charges sismiques sont distribuées sur les éléments porteurs verticaux en proportion de leur rigidité (cas des planchers-diaphragmes rigides).

Or leur rigidité à la flexion croît proportionnellement au cube de la dimension de la section dans la direction concernée, alors que leur résistance (à la flexion) augmente seulement avec le carré de cette dimension. Les poteaux larges subissent donc, lors des séismes, une charge sismique 125 fois plus grande que les autres poteaux, alors que leur résistance n'est que 25 fois supérieure. S'ils participent au contreventement de manière significative. Leur destruction lors d'un séisme de forte magnitude est probable.



Les poteaux isolés de grande rigidité constituent donc des " points durs " préjudiciables au bon comportement de la structure.

Pour y remédier, il faut ajouter des voiles béton pour assurer le contreventement, placés symétriquement par rapport au centre de gravité du niveau



9/ D'autres pièges structurels à éviter :

Les sinistres observés lors de séismes proviennent souvent d'erreurs de conception architecturales et/ou structurales.

Répartition aléatoire des ouvertures en façade :

- ✓ Descente de charges en baïonnette
- ✓ Proximité des ouvertures avec les angles du bâtiment
- ✓ Surface ouverte < 30% de la façade

Ossature poteaux/poutres avec remplissage :
comportement médiocre lors d'un séisme. Favoriser les façades légères ou en béton

Comportement des structures suivant le système constructif choisi :

- Murs porteurs en maçonnerie non chaînée et/ou non armée : à proscrire
- Murs en maçonnerie armée ou chaînée : maçonnerie en brique ou bloc béton sont acceptables en zones sismiques. Il faut éviter de dépasser 2 niveaux dans les zones à forte sismicité et 3 niveaux dans les autres zones
- Portiques en béton armés avec mur de remplissage en maçonnerie: comportement médiocre sous action sismique violente, convient dans les zones sismiques d'aléa moyen
- Portiques auto stables en béton armé sans remplissage rigide : convient sur sol ferme en toute zone, ceci dit la mise en place d'armatures requises pour obtenir la ductilité du béton est très difficile à mettre en place
- Ossature en béton armé contreventée par des voiles : convient en toute zone, peut être utilisé sur des murs de grandes hauteurs
- Systèmes poteaux/dalle : à éviter
- Voiles en béton non armés convenablement chaînés : même commentaire que pour les maçonneries, le comportement des voiles en béton est cependant meilleur
- Voiles en béton armé coulé en place : convient toute zone, efficace sur sol meuble
- Système noyau/dalle : à éviter
- Système avec éléments suspendus : à éviter

Récapitulatif/ conséquence des erreurs

Effondrement :

- ✓ Résonnance avec le sol
- ✓ Niveau souple sans murs de contreventement
- ✓ Absence de contreventement dans 1 ou plusieurs directions
- ✓ Torsion d'axe vertical
- ✓ Absence de continuité d'armatures entre panneaux de contreventement et absence d'ancrage avec les planchers
- ✓ Poteaux courts, faibles

Désordres graves :

- ✓ *Entrechoquement entre blocs : absence de joint ou pas assez large*
- ✓ *Bâtiments à ailes solidaires, dissymétriques, irréguliers*
- ✓ *Percements dans les panneaux de contreventement*
- ✓ *Contreventement de faible largeur*
- ✓ *Système de portiques en poutres fortes/poteaux faibles*
- ✓ *Ossature avec panneaux de remplissage*
- ✓ *Descentes de charges en baïonnette*
- ✓ *Plancher diaphragme percé par des trémies importantes*
- ✓ *Niveaux de retrait important*
- ✓ *Porte à faux important*

Cisaillement trop important dans les poteaux entraînant l'effondrement



Tremblement de terre à Gölcük
© Yann Arthus-Bertrand

Niveau souple



Glissement de terrain



Photo rapport de mission AFPS

- Mauvaise liaisons des murs de façade aux diaphragmes
- Présence rapprochée de fenêtre
- Absence de chaînage



Photo rapport de mission AFPS

Chainages insuffisants aux angles (photo rapport mission AFPS)



III/BATIMENTS «SIMPLES EN MACONNERIE»

L'article 9.7 des Eurocodes 8 traite le sujet des bâtiments simples en maçonnerie.

Il permet de réaliser des bâtiments en maçonnerie sans vérifications particulières mais dans le respect des dispositions constructives.

Il est toutefois possible d'utiliser encore les règles PSMI 89 révisées 92.

C'est article porte uniquement sur les bâtiments de catégorie I ou II.

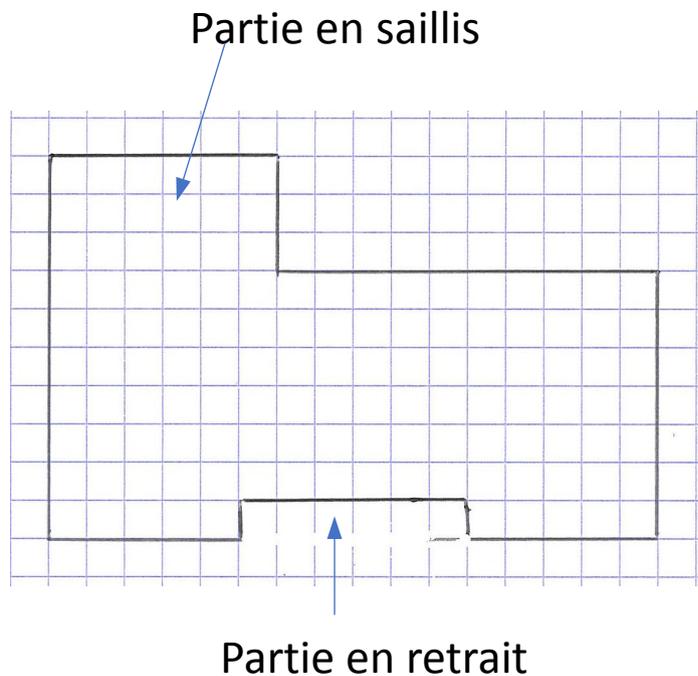
En voici les grandes lignes :

(1) limiter le nombre d'étages en fonction du site et du type de construction avec pour conséquence de respecter une certaine section de contreventement dans les 2 directions

(2) la configuration en plan doit respecter les conditions suivantes :

- Forme en plan approximativement régulière
- Rapport entre le petit côté et le grand côté doit être $> 0,25$
- Les parties en saillis ou retraits ne doivent pas excéder à 15% de la surface rectangulaire la plus proche de la construction

Exemple simple pour une maison d'habitation :



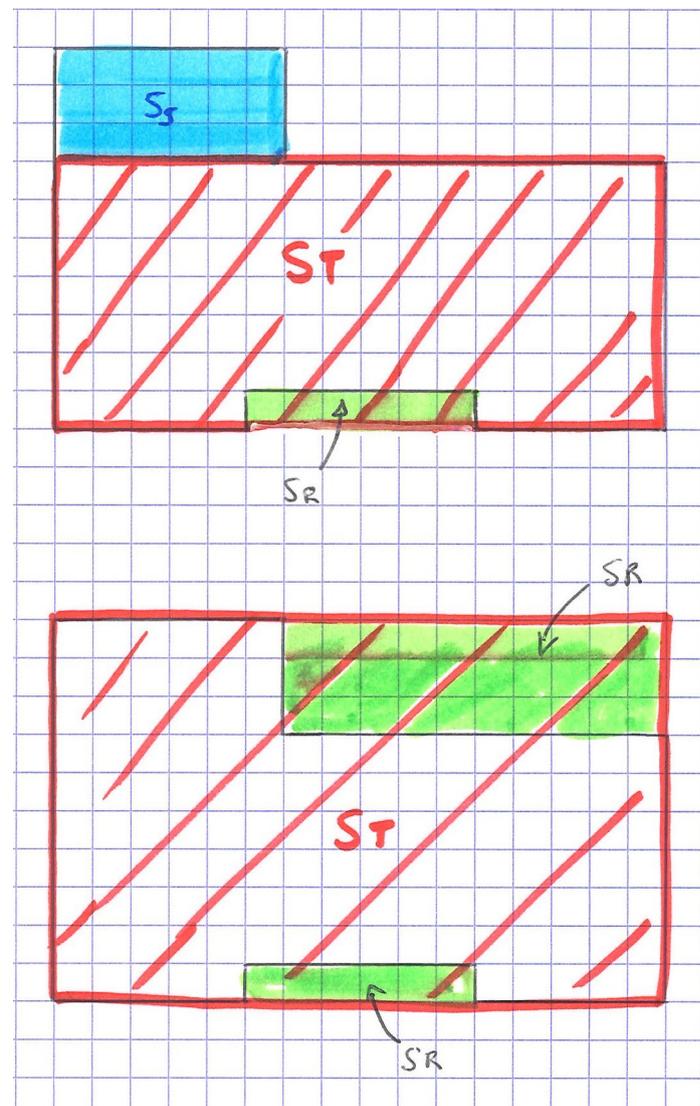
ST : surface d'un rectangle proche de la forme du projet

Ss : surface des parties en saillis

Sr : surface des parties en retrait

Il faut que :

- Somme des Ss < 15% de ST
- Somme des Sr < 15% de ST



(3) Les murs de contreventement doivent respecter les conditions suivantes :

- (a) Bâtiment raidi pas des murs de contreventements disposés dans les 2 directions orthogonales de manière presque symétrique
- (b) 2 murs parallèles doivent être placés suivant chacune des 2 directions orthogonales, la longueur de chaque mur doit être $>$ à 30% de la longueur dans la direction considérée. Sur l'annexe nationale, il est dit qu'un mur de contreventement comportant des ouvertures est à considérer comme une juxtaposition de trumeaux et que ce sont les longueurs des trumeaux qui sont à prendre en compte. Il faut également que la longueur moyenne des murs de contreventements soit d'au moins 1,50m, sauf condition plus sévère allant jusqu'à 2,50m suivant le nombre d'étages.
- (c) Dans une direction donnée, la distance entre les murs doit être $>$ à 75% de la longueur du bâtiment dans l'autre direction
- (d) Il faut qu'au moins 75% des charges verticales soient portées par les murs de contreventement

(4) Dans chaque direction (a) les murs de contreventement doivent être continus des fondations horizontales des murs de contreventement jusqu'à la toiture
 (b) les déformations Δm et ΔA entre 2 étages successifs soient limitées à des valeurs maximales : $\Delta m, \max = 20\%$ et $\Delta A, \max = 33\%$...en résumé, il faut des étages très ressemblants.

Comme on a pu le voir sur les diapositives précédentes, les règles sur les bâtiments simples en maçonnerie sont très contraignantes et difficiles à appliquer.

La conception d'un projet, que l'on a évoqué en 1ere partie est donc essentielle pour pouvoir les utiliser.

Les bureaux d'études ont de plus en plus souvent à étudier des bâtiments de forme complexe. Même certaines maisons individuelles ne remplissent pas les différentes conditions pour pouvoir utiliser ces règles simples sans l'ajout de joint de dilatation, sans le déplacement d'ouvertures trop proches des angles...ce qui a forcément un impact financier sur le projet.

Lorsque l'on ne peut pas utiliser ces règles, il faut alors faire une vérification de la maçonnerie et de la stabilité par le calcul :

- soit par une analyse modale,
- soit par la vérification des forces latérales ou le non effondrement des maçonneries.
-

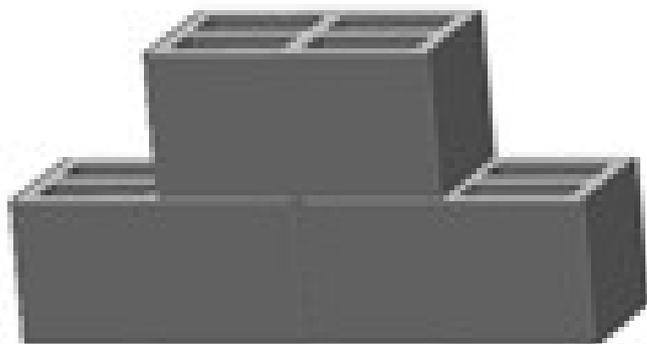
Pour mener à bien ces calculs, il est indispensable d'avoir une étude de sol afin de connaître les hypothèses de calculs...Une modélisation doit être réalisée afin de connaître les efforts sismiques dans les panneaux de contreventement qu'il faut ensuite vérifier un par un.

Ce calcul est bien plus compliqué qu'une simple étude parasismique se basant sur des dispositions constructives, réalisée lorsque l'on respecte les différents critères des règles simples en maçonnerie.

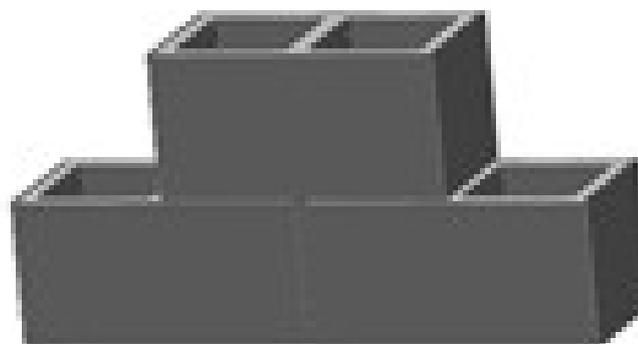
IV/DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

Toutes les maçonneries ne peuvent pas être utilisées en zone sismique

Acceptable



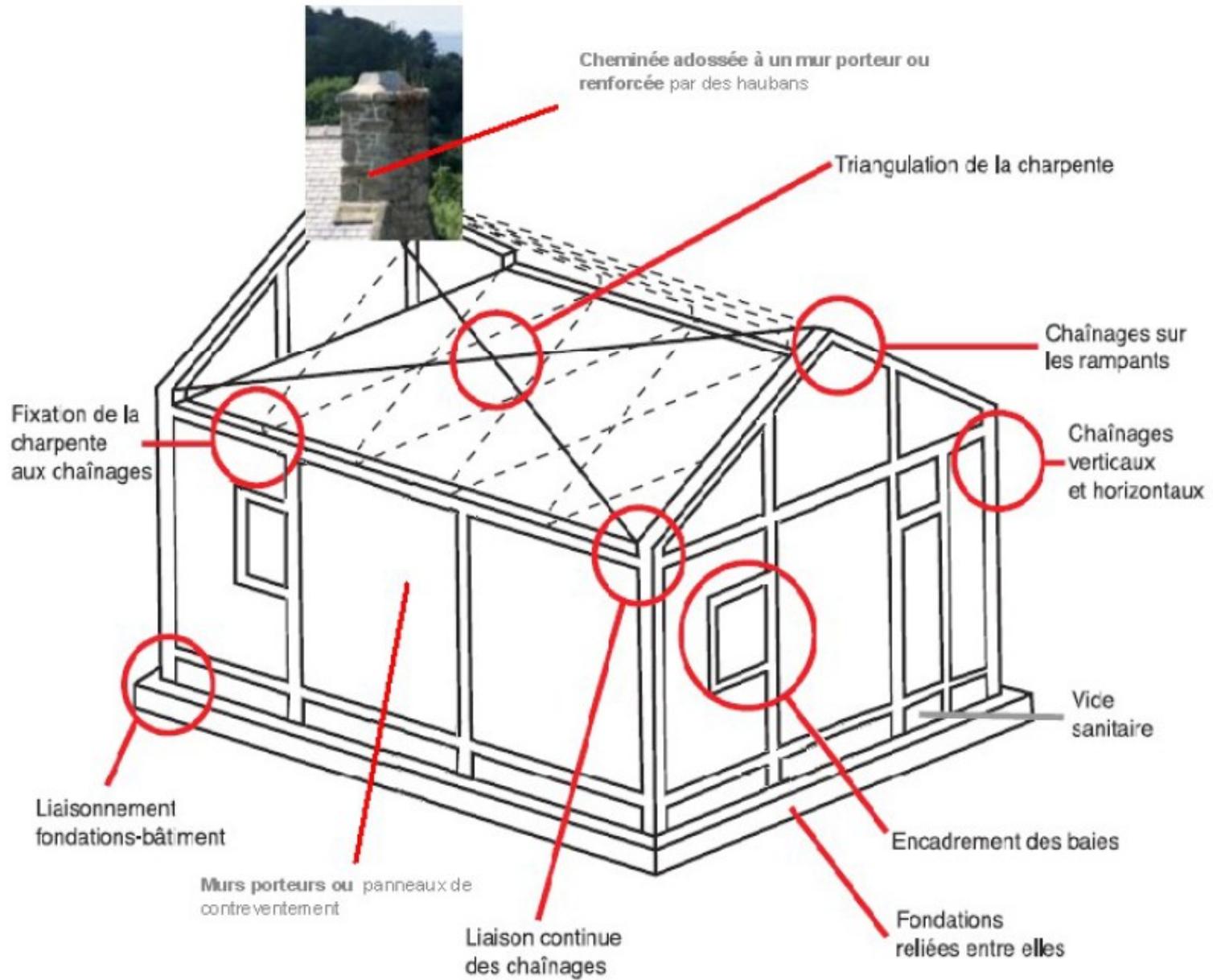
Inacceptable



- Maçonnerie de type 1 (pleine ou assimilée) : épaisseur mini : 15cm
- Maçonnerie de type 2 et 3 : épaisseur mini : 20cm. Elles doivent également comporter une lame interne porteuse
- Les blocs doivent avoir une résistance à la compression perpendiculaire à la face de pose de 4 Mpa et de 1,5Mpa parallèlement à la face de pose dans le plan du mur
- Mortier utilisable en zone sismique : mortier d'usage courant, mortier colle. La résistance mini requise est de 5Mpa

Règles générales sur les bâtiments en maçonnerie (EC8)

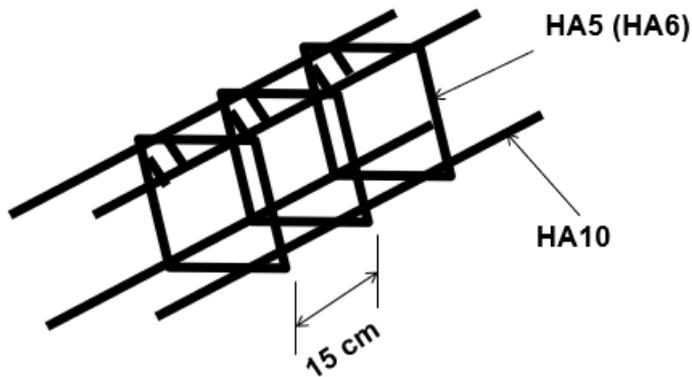
- Chainages horizontaux et verticaux liés entre eux et ancrés aux éléments principaux de la structure
- Béton des chainages coulé après exécution de la maçonnerie
- La section transversale des chainages ne doit pas être inférieure à 15cm
- Position des chainages verticaux:
 - Au bord libre de chaque mur
 - De chaque côté des ouvertures dont la section est $> 1,50\text{m}^2$
 - Espacement maxi tous les 5m
 - À chaque intersection entre les murs
- Position des chainages horizontaux dans le plan du mur:
 - Au niveau de chaque plancher
 - Espacement vertical maxi 4m
- Section transversale des armatures longitudinales des chainages ne doit pas être inférieure à 300mm^2 ni représenter moins de 1% de la section transversale du chaînage. Attention dans le cas de maçonnerie relevant des bâtiments simples en maçonnerie, cette valeur est portée à 450mm^2 lorsque $ag.s > 2,00$ et que le bâtiment comporte plus d'un étage.
- Étrier de 5mm de diamètre mini espacés tous les 15cm maximum
- Aciers de béton armé de classe B ou C
- Recouvrement des barres de $60 * \text{le diamètre}$



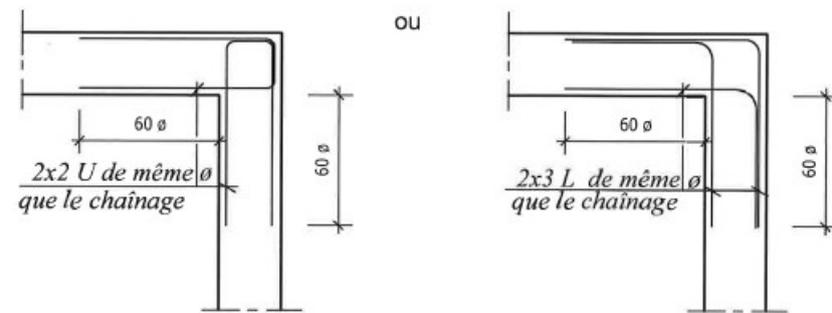
Quelques détails types conformes à mettre en oeuvre

Liaisons d'angles des chaînages horizontaux, y compris pour la continuité des fondations

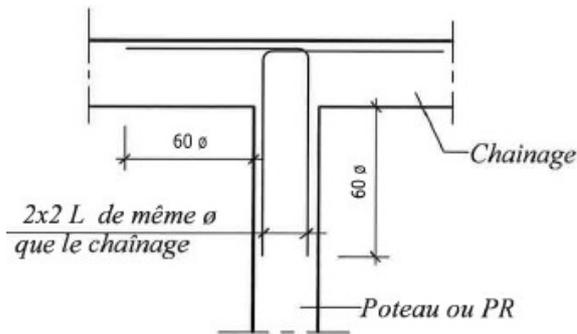
Chainage horizontal



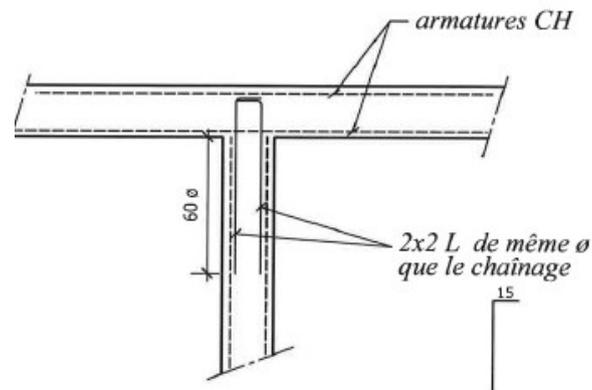
Angles



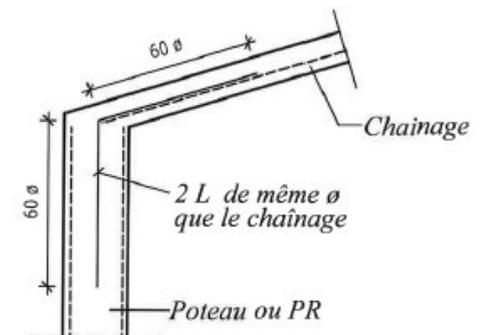
LIAISONS VERTICALES



Intersections



LIAISONS RAMPANT



V/ERREURS RECURRENTES SUR CHANTIER

Outre les problèmes de conception, nous rencontrons quelques erreurs récurrentes sur les chantiers:

- Absence de liaisons et de continuité aux angles des semelles filantes
- Oublie des attentes de raidisseurs ou attentes trop courtes ou mal implantées. Pour mémoire le recouvrement doit être de $60 \times$ le diamètre... quelques solutions tolérées en réparation:
 - ✓ Soudures pour rallonger les barres lorsqu'elles sont trop courtes
 - ✓ Brochages au scellement chimique lorsqu'elles sont absentes ou mal implantées

Ce ne sont que des solutions de reprise mais en aucun cas, elles ne remplacent l'efficacité d'une bonne réalisation dès le départ. Elles ne doivent pas être généralisées sur l'ensemble des projets (photos prises sur un CR du CETE).



Mauvaise implantation



Attentes trop courtes

- L'erreur la plus fréquemment rencontrée est le manque de continuité des armatures dans les angles au niveau des chainages
 - ✓ Absence de U ou équerres de liaisons
 - ✓ Équerres coupées
 - ✓ Équerres à l'intérieur de l'angle rentrant: poussée au vide

Certes, cela fait beaucoup d'aciers dans ces zones mais l'expérience montre qu'il est important d'assurer les liaisons au niveau des angles.

Page suivante quelques photos de ce phénomène (photos de nos chantiers, certaines sont prises sur un CR du CETE).

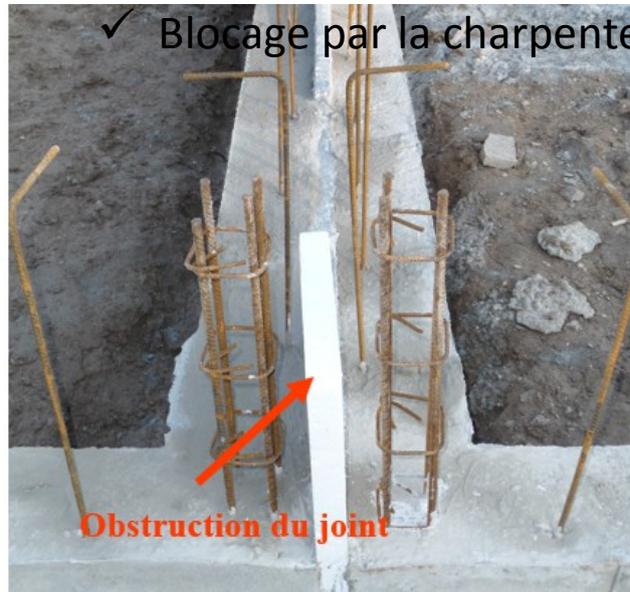
Nombre insuffisant d'équerres + poussée au vide



Absence de liaisons du chaînage



- Erreur sur les joints de dilatation :
 - ✓ Absence : mauvaise conception
 - ✓ Pas assez large : risque d'entrechoquement
 - ✓ Remplissage des joints : interdit aux séismes
 - ✓ Blocage par la charpente



Photos du CETE

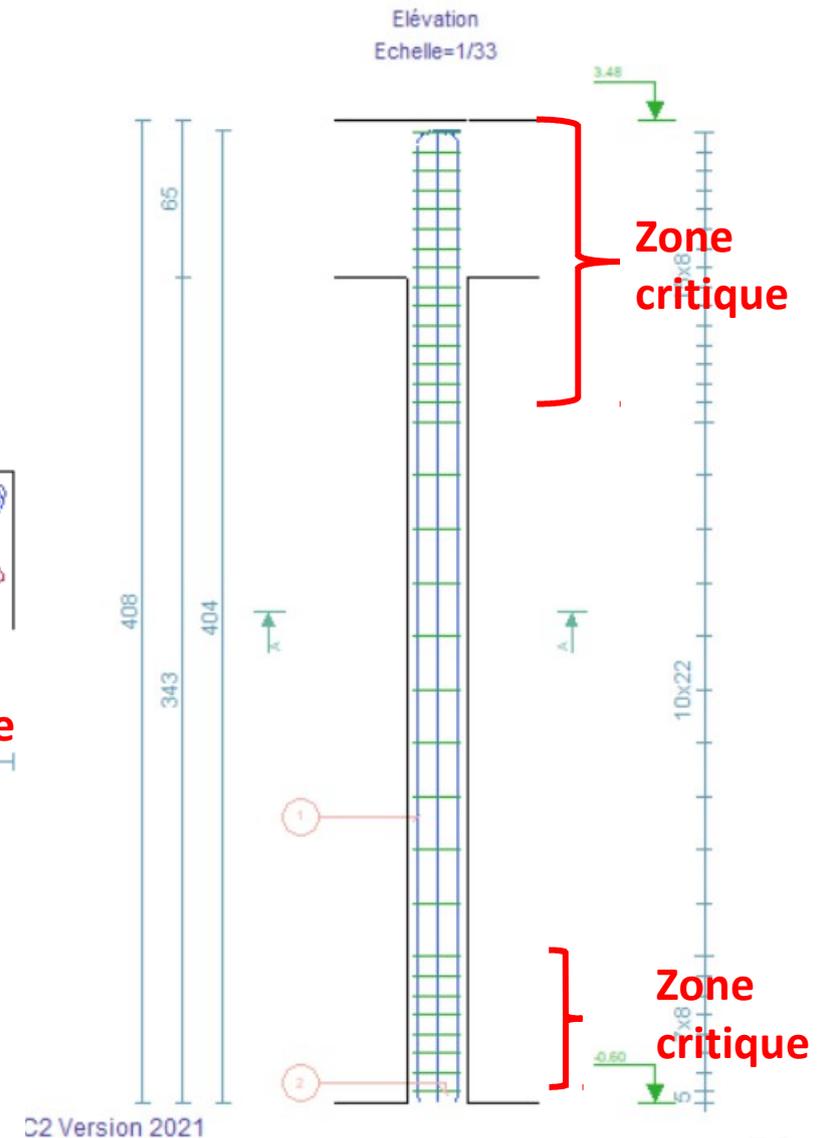
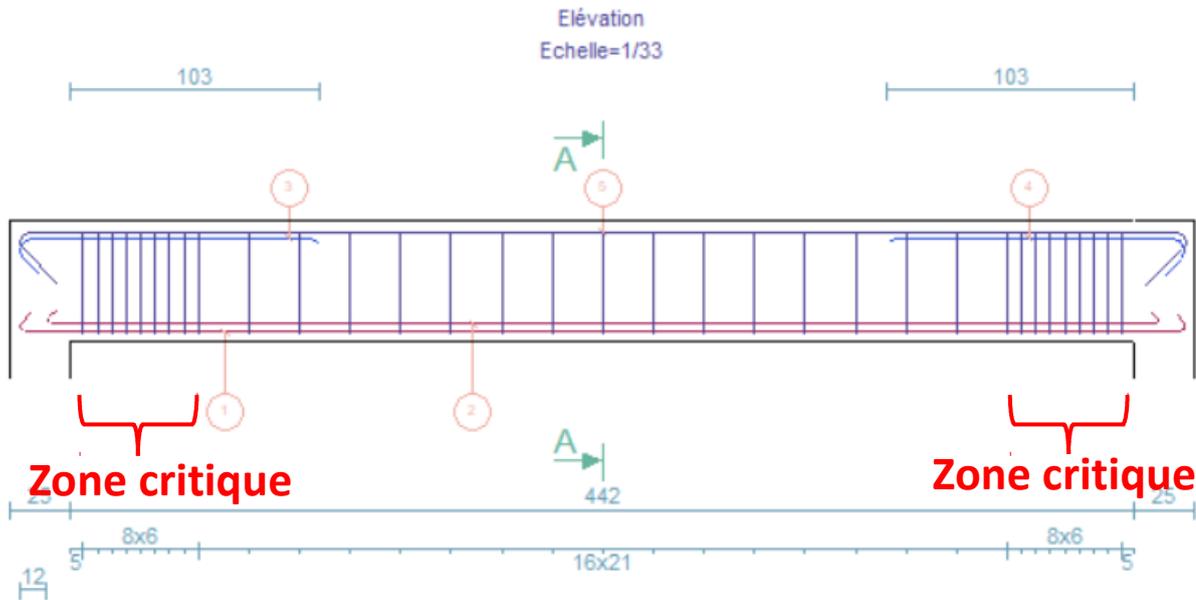


D'autres erreurs :

- Oubli des barres de liaisons entre voile (glissement)
- Oubli des barres de liaisons entre le gros béton et les fondations quand on a besoin de lester les semelles
- Mauvais frettage des nœuds

Erreur de ferrailage :

- respecter les dispositions constructives avec un resserrement des cadres dans les zones critiques, proche des nœuds de connexion avec les autres éléments



CONCLUSIONS

A ce jour, même si les scientifiques y travaillent, il est impossible de prédire où et quand va se produire un séisme de grande ampleur.

Ceci dit l'expérience et l'histoire montre que les Pyrénées n'ont pas été épargnés.

C'est pour ces raisons, que nous tous, acteurs de la construction avons un rôle important à jouer pour limiter au maximum les dommages lors d'un séisme et surtout de sauver des vies!!!

Nous avons les outils pour réaliser des bâtiments pérennes et prêts à amortir les oscillations sismiques sous réserve de bien appliquer toutes les dispositions constructives et mettre l'accent sur des conceptions adaptées sur chaque projet.

Une conception judicieuse vaut bien plus que des calculs hasardeux...Gardons à l'esprit de concevoir avec **du bon sens!!**

Sources ayant servi à élaborer ce webinaire :

- mes cours parasismiques de l'ISBA (professeur : Milan Zacek)
- conception parasismique (Milan Zacek)
- document qualiconsult (Mr Balgiu)
- rapport de mission AFPS
- rapport du CETE
- photos prises sur internet...