

POURQUOI ETUDIER LA FACON DONT LES MATERIAUX SE DEGRADENT?

Les scientifiques nous expliquent comment un matériau se déforme, puis se dégrade, et enfin se rompt sous l'effet des secousses alternées. Les architectes et ingénieurs se forment pour en tenir compte dans leurs projets en zone sismique. Sur le chantier, nous avons l'ultime responsabilité, celle de réaliser correctement les travaux.

Mais d'abord, essayons de comprendre la variété des phénomènes propres aux matériaux et à leurs assemblages qui peuvent amener leur rupture « fragile ». Tous les dommages qui surviennent pendant un séisme ne sont pas signe de danger... au contraire, mais il faut les contrôler !

Dans l'état actuel des choses, il n'est pas question d'empêcher tout dommage sous séisme majeur (ce qui coûterait trop cher pour les chantiers ordinaires), mais de contrôler le mode de dégradation des matériaux afin d'empêcher que celle-ci se traduise par l'effondrement du bâtiment sur ses occupants... quitte à réparer ou reconstruire après la catastrophe.

Ce 4^o volume du cours de construction parasismique porte sur les principes de mise en œuvre des structures de béton armé et de maçonnerie qui sont les matériaux les plus utilisés pour les constructions courantes... et potentiellement les plus dangereux si leur mise en œuvre n'est pas appropriée pour résister à des secousses violentes.

La compréhension des dispositions constructives parasismiques nécessite des connaissances de base en sismologie appliquée à la construction et en conception des structures. Ainsi il est recommandé de prendre connaissance des brochures 1 et 2 du présent programme d'information sur la construction parasismique avant d'aborder celle-ci.

Les règles de construction parasismique se substituent ou complètent les règles générales qui ne seront pas rappelées ici.

PREVOIR EN S'APPUYANT SUR LES CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES

C'est possible aujourd'hui. Ca ne l'était pas il y a cinquante ans :

- Connaître « à l'avance » le comportement d'une construction neuve sous l'effet des secousses d'origine sismique.
- Etablir des règles de construction efficaces à partir de ces connaissances.

Ce Fascicule nous donne, sous la forme de 23 « questions – réponses », des explications sur les phénomènes et nous permettra de comprendre que la réglementation s'appuie sur des connaissances objectives.

LES REGLES SONT LA POUR NOUS PROTEGER.

ELLES EVOLUENT AVEC L'AVANCEMENT DES CONNAISSANCES.

COMPRENONS-LES. RESPECTONS-LES.

1. Qu'attend-on du matériau béton armé en prévision d'un éventuel séisme ?

Une parfaite cohésion entre un béton et des armatures de qualité

Tant qu'il ne reçoit que les charges verticales permanentes (poids de la construction, des équipements, des occupants...), le béton armé peut présenter certains défauts qui restent cachés (ou non). Dès qu'il est secoué par un séisme, tous les défauts sont causes de dégradations accélérées faute de cohésion parfaite des deux matériaux qui le composent, le béton et les armatures, et la désagrégation se propage parfois jusqu'à la ruine.

Exemples de matériaux qui ne sont pas du « béton armé »



Corrosion d'aciers dont l'enrobage ne respecte pas les dispositions réglementaires du BAEL en atmosphère corrosive. (Document P. Balandier)

Le béton a éclaté. Les armatures non enrobées et corrodées ne donneront pas la résistance nécessaire au béton en cas de séisme. Attention, le colmatage des éclats, comme il est fréquemment réalisé pour la remise en état des bâtiments ne rend pas leur résistance aux aciers déjà corrodés.



Béton non vibré : manque de matière et enrobage des aciers non réalisé. (Document P. Balandier)

Ici le béton n'enrobe pas les armatures. Or il faut absolument que le béton et les armatures travaillent parfaitement ensemble pour résister à tous les efforts que la construction subira : traction, compression, flexion, torsion. Dans le cas présenté cette zone affaiblie par le manque de béton se trouve dans une zone de jonction de poutres, plus particulièrement sollicitée par l'action d'un séisme. Attention, le colmatage a posteriori des « manques » n'a absolument pas la résistance d'un béton qui a « tiré » sur les armatures.



Reprise de bétonnage en tête de poteau. (Document P. Balandier)

De même, la reprise de bétonnage entre un poteau et une poutre est un lieu privilégié de rupture en raison de la non continuité physique du matériau béton dont la prise ne s'est pas faite en même temps dans l'ensemble de la « zone critique ». La jonction du béton coulé après coup sur le béton déjà « tiré » est un point faible, même si on a continuité des aciers. Il convient d'éviter les reprises de bétonnage en haut des poteaux, et en général sur les zones critiques. Il faut coffrer et couler les poteaux et les poutres d'un seul coup et vibrer le béton pour une bonne mise en place.



La solution :

Respecter scrupuleusement les règles. Veiller à la mise en œuvre et aux enrobages des aciers pour avoir un béton armé de qualité.

2. Comment obtenir une bonne cohésion béton-armatures et faire qu'elle ne se dégrade pas brutalement pendant les secousses ?

La cohésion doit être parfaite avant les secousses et sa dégradation éventuelle sous l'effet des secousses progressives

Lors d'un séisme violent, l'adhérence béton-armatures, même bien réalisée, va sans doute commencer à se dégrader à certains endroits, mais ça doit pouvoir se faire progressivement à chaque secousse. Si le projet est « parasismique » et si le chantier a été réalisé en respectant les prescriptions techniques, les premiers dommages se produiront « aux bons endroits » (ceux qui ont été prévus par l'architecte et l'ingénieur), et au lieu de provoquer la ruine, ils « freineront » les mouvements du bâtiment sans risque d'effondrement pour les éléments qui portent les planchers (poteaux et murs).

Le problème

Désagrégation complète de bétons de mauvaise qualité (Séisme de Bhuj, 2001) (Document X).

La tricherie sur les matériaux et leur mise en œuvre en zone sismique peut être assimilée à un crime différé...

Le respect des normes et règles de construction permet au bâtiment bien conçu d'affronter un séisme violent sans craindre la dislocation et l'effondrement sur les occupants.



Les solutions :

D'abord une bonne qualité des matériaux :

On respecte les normes, les quantités, les prescriptions. On ne triche pas. Le béton ne doit pas être trop peu résistant (plus que 22 MPa) ni trop résistant si on ne veut pas devoir justifier d'armatures particulières (moins de 45 MPa).

Pour une bonne adhérence béton – armatures en prévision d'un séisme violent :

- Le béton doit être visqueux au moment de sa mise en œuvre, et non liquide... et encore moins « rallongé » d'eau.
- Vibrer impérativement le béton pour qu'il se mette en place correctement.
- Respecter les règles d'enrobage du BAEL!
- N'utiliser que des barres à haute adhérence. Pas de barres lisses.
- Pour un poids total d'acier équivalent, plutôt plus de barres de moindre diamètre que moins de barres de gros diamètre (le plan de ferrailage du BET en tient compte).
- Du béton, des armatures... et rien d'autre dans le coffrage (ni fourreaux, ni déchets divers!)

Les armatures doivent être noyées parfaitement dans le béton qui ne doit pas être affaibli par des manques.

3. Peut-on utiliser indifféremment tous les blocs à maçonner en zone sismique ?

Non, ils n'ont pas tous la même résistance. On prendra plus de précautions avec certains types de blocs et d'autres sont carrément interdits pour les murs principaux.

Les règles de construction parasismique distinguent :

Les blocs à maçonner pleins (et assimilés):

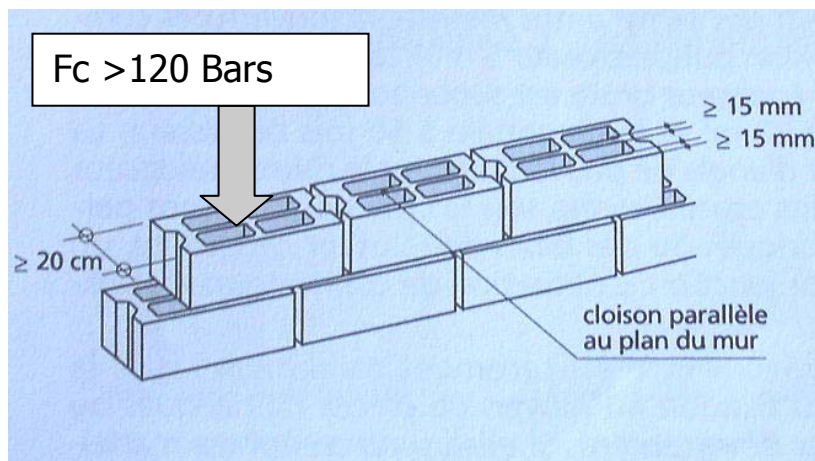
La pierre

Les briques pleines de terre cuite

Les blocs pleins de béton

Les blocs de béton cellulaire

Les **briques et blocs perforés** de terre cuite et de béton mis en œuvre avec leurs perforations perpendiculaires au plan de pose sont assimilés à des blocs pleins.



- Les blocs perforés, pour être assimilés à des blocs pleins doivent avoir une résistance en compression au moins égale à celle du mortier (120 bars)

- En zone sismique, pour les murs de contreventement, les blocs doivent obligatoirement avoir une 3^e paroi au moins (comme ici la paroi centrale). Les blocs à deux parois sont interdits.

(D'après un document de Milan Zacek, « Construire parasismique »)

Les blocs à maçonner creux sont:

Les **briques creuses** de terre cuite et les **blocs creux** de béton. Sont assimilés à des blocs creux (résistance en compression inférieure à celle du mortier de pose) les blocs qui ont leurs perforations parallèles au plan de pose.

Les deux types de blocs (pleins et creux) sont autorisés, mais le choix de l'un ou de l'autre conditionnera les dimensions autorisées entre deux chaînages. On devra rapprocher les chaînages pour les blocs creux qui sont moins résistants.

Attention :

Les dimensions des panneaux de murs du projet parasismique dépendent du type de blocs choisis. Ces dimensions ont été déterminées par le BET en fonction de la nature et de l'épaisseur des blocs. Pour que ça tienne en cas de séisme, il ne faut rien changer au choix des blocs du descriptif sur le chantier. Nous verrons ce qui distingue les règles pour deux types de blocs.

4. Qu'est-ce qui favorise la ruine sous séisme des bâtiments en béton armé ?

L'inaptitude à se déformer en s'endommageant plutôt que de « casser brutalement »

Sous l'effet des secousses, le béton perd (plus ou moins brutalement) sa cohésion autour et à l'intérieur des armatures, ce qui affaiblit le bâtiment. Au delà des déformations possibles sans dommage il y a d'abord dégradation puis rupture. Il est souhaitable d'obtenir des dégradations, même importantes plutôt que des ruptures pour éviter l'effondrement. Les règles PS-92 nous indiquent comment.



Effondrement de structures de béton armé manquant de « ductilité ».

Au delà des déformations supportables par les poteaux, le mode de ruine a été « fragile » et a provoqué l'effondrement total (Séisme d'Izmit)

Ductilité = aptitude des matériaux ou des structures à se déformer de façon irréversible sans arriver à la dislocation.

A gauche et au centre, exemples de ruptures « fragiles » de poteaux et poutres de béton armé. A droite, exemple de rupture dite « ductile » d'une pile de viaduc.



Dans les premiers cas les armatures n'étaient pas appropriées en zone sismique. Dans le troisième la disposition des aciers longitudinaux et transversaux très rapprochés et de section modérée permet une bonne « plasticité » ou « ductilité » du béton armé. C'est à dire que, s'il est trop contraint sous l'effet des secousses, l'élément de béton armé se dégrade de façon irréversible, mais ne « casse pas », ce qui évite l'effondrement (sauf erreur grave de conception parasismique).

Les solutions :

Les plans de ferrailage en zone sismique sont sensiblement différents de ceux des autres régions. Globalement, les barres ont des sections limitées, mais éventuellement un nombre plus important, et les cadres sont plus rapprochés sur certains endroits de la construction qu'on appelle des « zones critiques ». Ceci pour éviter la rupture « fragile » des éléments et la ruine totale en cas de secousses particulièrement violentes.

5. Qu'est-ce qui favorise la ruine sous séisme des bâtiments en maçonnerie ?

La dislocation entre les blocs sous les déformations trop importantes de la construction.

Lorsqu'un mur de maçonnerie est soumis aux poussées horizontales violentes d'un séisme, les lits de mortier n'arrivent pas à assurer une cohésion satisfaisante entre les blocs à maçonner qui se disloquent, même pour des déformations modérées du mur. Le mortier est ainsi le lieu de ruptures « fragiles ». Par ailleurs, les blocs eux-même n'acceptent pratiquement pas de déformation sans rompre (ce qui n'est pas le cas du béton armé, grâce à ses armatures). Ainsi la dislocation partielle ou totale de la construction peut survenir pour des intensités locales du séisme assez faibles si on ne prend pas la précaution de confiner (encadrer) par des chaînages appropriés chacun des panneaux de maçonnerie et chacune des ouvertures pour limiter les déformations.

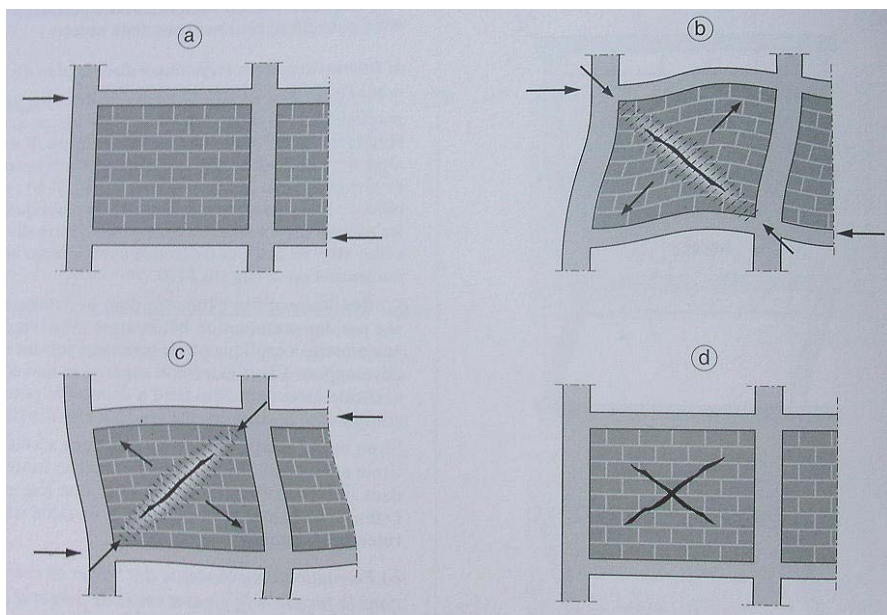


← **MAQUETTE DE MACONNERIE SUR TABLE VIBRANTE (Document X)** Cet essai a été réalisé pour mettre en évidence le mode de ruine des constructions de maçonnerie traditionnelles, c'est à dire n'étant pas conçues et réalisées en respectant les règles de construction parasismique en maçonnerie avec panneaux de contreventement confinés (contenus) par des chaînages de béton armé dans les trois directions.

Exemple de dislocation d'un angle de maçonnerie sans chaînage sous l'effet des déformations alternées des deux façades (Document X ⇒)



La solution : le chaînage de tous les panneaux de maçonnerie :



Le système de chaînage limite les déformations des panneaux et empêche la maçonnerie de se disloquer, même si elle commence à fissurer, en la « confinant ». Les armatures des chaînages doivent constituer un réseau continu et résistant depuis les fondations jusqu'à la toiture.

Document V. Davidovici

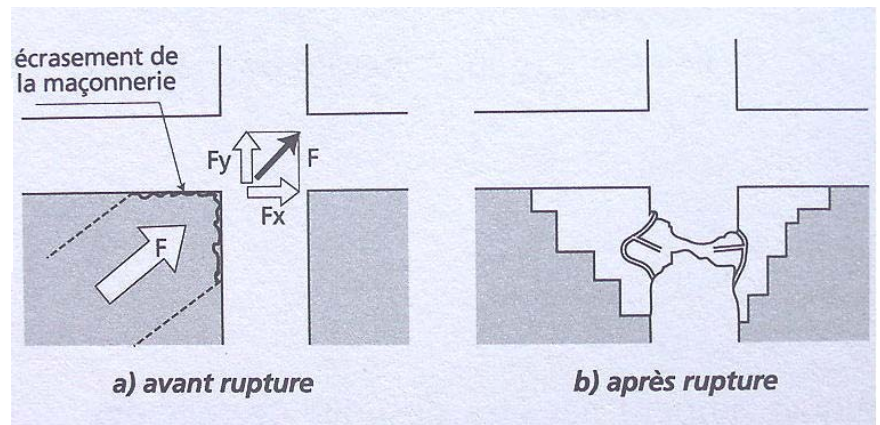
6. Qu'est ce qui provoque la ruine des ossatures de béton armé remplies de panneaux de maçonnerie ?

Le bétonnage des poteaux et poutres décoffrés avant la mise en place de la maçonnerie ne permet pas la cohésion des deux matériaux. L'ossature en béton armé se déforme à la faveur du jeu qui existe et fait éclater la maçonnerie qui avant de rompre exerce une poussée sur la jonction poteau – poutre ce qui amorce la rupture de la tête de poteau et prépare l'effondrement de l'ossature.



Eclatement des remplissages de maçonnerie d'une structure de béton armé (Séisme d'El Asnam, document X). Le séisme s'est arrêté à temps et le bâtiment ne s'est pas effondré ce qui permet d'observer la nature des dommages qui auraient mené à la ruine si les secousses avaient duré quelques secondes de plus. C'est le système constructif qui est le plus meurtrier sous séisme.

Mécanisme de ruine des ossatures par jeu avec leur remplissage de maçonnerie (Figure extraite de « Construire parasismique, Ed. Parenthèses, Milan Zacek »)



Lorsque la maçonnerie est mise en place après le décoffrage de la structure poteaux-poutres en béton armé, il y a forcément du « jeu » entre le béton et la maçonnerie. Même un très faible jeu suffit à ce que les deux matériaux s'entrechoquent au lieu de résister ensemble sous l'effet des secousses.

Alors les dislocations se produisent comme ci-dessus. C'est pourquoi on demande de couler les chaînages après la mise en œuvre des blocs : le béton se met parfaitement en place en suivant tous les contours des blocs et l'ensemble résistera de façon cohérente aux secousses.

Les solutions :

Il faut éviter ce type de structure hybride entre l'ossature de béton armé à remplissages légers ou vraiment découplés et la maçonnerie avec chaînages et choisir soit l'un, soit l'autre. Nous allons bien distinguer les deux dans ce document pour éviter les confusions.

7. Attention, pour le séisme, il faut bien distinguer : les murs porteurs en maçonnerie chaînée et la maçonnerie de remplissage des ossatures

Les murs porteurs en maçonnerie chaînée (systèmes à murs porteurs)

La maçonnerie est mise en œuvre avant le béton armé des chaînages :

- **Sur le chantier**, les dimensions et les armatures des chaînages respectent des règles de mise en œuvre de chaînages (voir plus loin), la maçonnerie est mise en place, et ensuite seulement le béton est coulé dans les chaînages qui sont coffrés à l'extérieur, ainsi le béton, vibré, adhère parfaitement aux blocs qu'il est recommandé de monter « à l'italienne » pour réduire encore le risque de désolidarisation entre les chaînages et la maçonnerie.
- **Avant le séisme**, les descentes de « charges statiques » (poids des planchers, équipements, occupants...) sont réparties sur l'ensemble des murs
- **Pendant le séisme**, les « charges dynamiques » horizontales alternées (forces d'inertie auxquelles la structure doit résister) sont réparties sur les panneaux de maçonnerie les plus rigides (selon les deux directions de la construction). Ce sont des « trumeaux » ou panneaux de contreventement. Ils ne comportent pas d'ouvertures. Leur localisation et leurs dimensions entre les chaînages doivent répondre à des règles précises.

La maçonnerie de remplissage des ossatures (systèmes poteaux-poutres)

Le béton armé est coulé dans les coffrages et ensuite certaines travées sont remplies de maçonnerie :

- **Sur le chantier**, les dimensions et les armatures des poteaux et des poutres respectent des règles de mise en œuvre des poteaux et des poutres qui sont beaucoup plus exigeantes que celles des chaînages (voir plus loin), le béton est coulé dans les coffrages. Après décoffrage on met en place les blocs à maçonner. Il est extrêmement difficile de donner la nécessaire cohésion entre la maçonnerie et l'ossature en raison des difficultés de mise en place correcte du mortier sur les côtés et en haut du panneau, et de sa prise après que le béton de l'ossature ait tiré.
- **Avant le séisme**, les descentes de « charges statiques » sont acheminées par l'ossature porteuse,
- **Pendant le séisme**, les panneaux de remplissage complets ou partiels empêchent l'ossature de se déformer librement, ce qui pourrait lui permettre de résister si elle est conçue et mise en œuvre correctement vi-à-vis de l'action sismique (prescriptions du BET). Les panneaux pleins et les panneaux partiels (pour d'autres raisons) bloquent l'ossature en la percutant et peuvent la détruire ! Les règles PS-92 autorisent ce type de construction, avec des règles de mise en œuvre précises, mais le déconseillent en raison de la difficulté de respecter effectivement ces règles sur le chantier.

Conclusion :

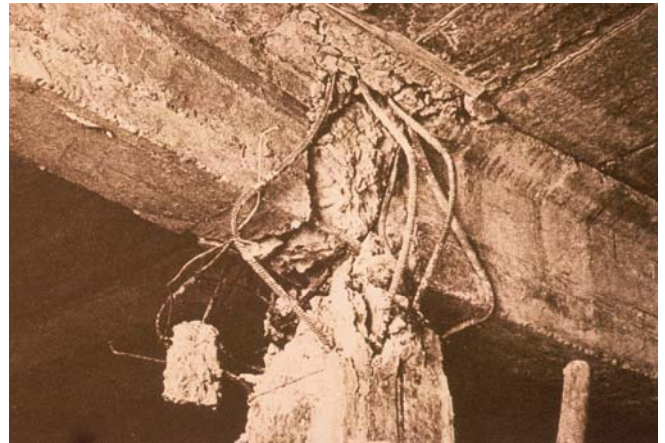
En zone de sismicité élevée, où les secousses sont potentiellement violentes, éviter la maçonnerie de remplissage dans les ossatures. Préférer la maçonnerie chaînée.

8. Qu'appelle-t-on « zones critiques » des structures de béton armé ?

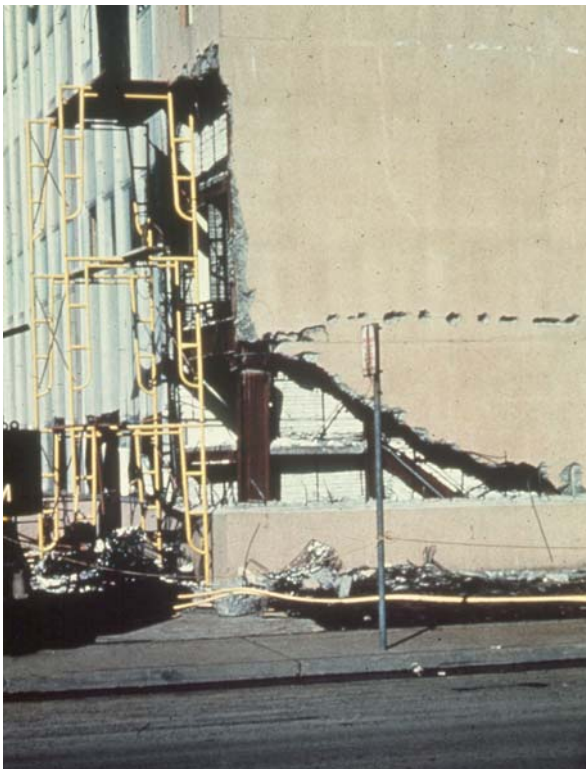
Une « zone critique » est un endroit de la structure qui subit des contraintes plus élevées. C'est donc potentiellement là que la dégradation du béton ou sa rupture fragile commenceront. Les règles PS-92 précisent où elles se trouvent.

Pour les ossatures (structures poteaux-poutres) : à proximité des nœuds

Les nœuds des portiques et les pieds de poteaux subissent des efforts alternés élevés qui peuvent détruire rapidement l'adhérence du béton sur l'acier. Les règles de construction en béton armé nous indiquent comment armer ces zones pour éviter la rupture « fragile » (Voir point n° 9)



Exemples de ruptures fragiles de zones critiques non traitées par des armatures appropriées (A gauche Séisme d'Anchorage, 1964, Document Karl – V. Steinbrugge, A droite, document X)



Pour les voiles (murs porteurs de béton armé) : la base des voiles

Les bases des voiles (Rez-de-chaussée) subissent les contraintes les plus élevées de la structure. Elles sont donc considérées comme « critiques ».

Les régions situées à la base des voiles, (habituellement sur une hauteur d'étage dont la hauteur n'excède pas la largeur des voiles), ainsi que celles situées à chaque niveau de changement notable de la section de coffrage, font l'objet de dispositions spéciales des règles de construction parasismique qui nous demandent de renforcer les chaînages à ces endroits. (Voir point n° 10)

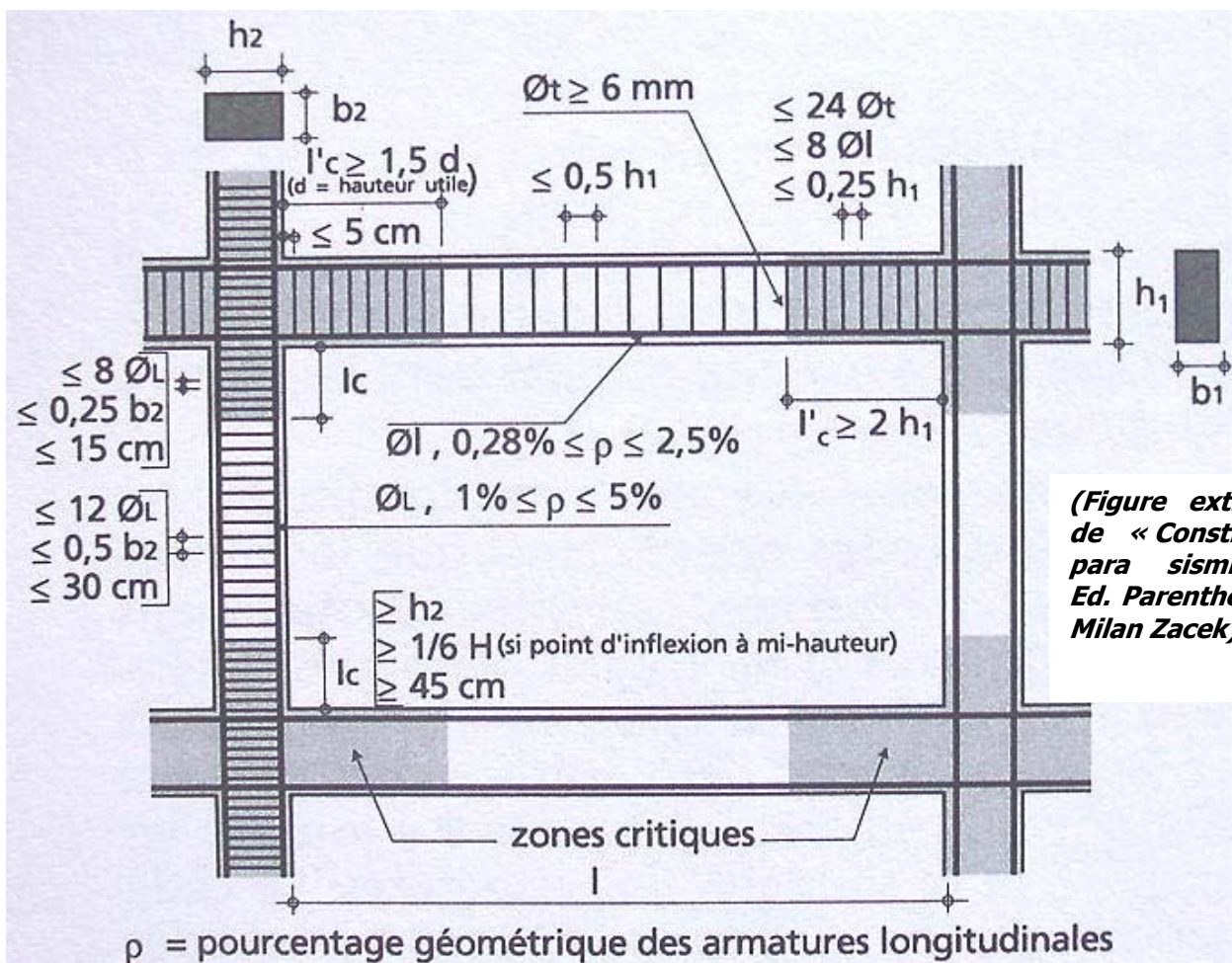
(Séisme d'Anchorage, 1964, Document X)

9. La solution pour éviter la rupture fragile des ossatures : le « confinement » des zones critiques

Les règles de construction : Synthèse des § 11.34 et 11.35 des règles PS-92: Armature des ossatures et leurs zones critiques

La figure suivante résume les règles de conception des armatures des ossatures. On voit (représentation complète sur le nœud en haut et à gauche) que les cadres sont plus rapprochés dans les zones critiques et que « la priorité » est donnée à la résistance du poteau sur celle de la poutre. Car on a besoin de la tenue des poteaux pour empêcher l'effondrement du bâtiment. Pour le dimensionnement et le rapprochement des cadres plusieurs critères doivent être remplis. Pour le plan de ferrailage, le BET retient le plus exigeant après évaluation.

Le principe est que, par rapprochement des cadres dans les zones critiques (de l'ordre de 5 à 8 cm entre axes), lorsque la cohésion armatures – béton se dégrade, ce dernier et les barres longitudinales sont confinés à l'intérieur des cadres (frettes) et on évite le flambement des barres et la rupture fragile de la poutre ou du poteau.



Commentaire :

Les dispositions des règles parasismiques pour la conception des armatures des structures « poteaux-poutres » peuvent sembler complexes sur ce schéma pour qui n'a pas l'habitude de concevoir un plan de ferrailage. Le plan remis par le BET pour le chantier en zone sismique les respecte. **Respectons le plan de ferrailage du BET sur le chantier.**

10. La solution pour renforcer les voiles de béton armé : le chaînage renforcé de leurs zones critiques

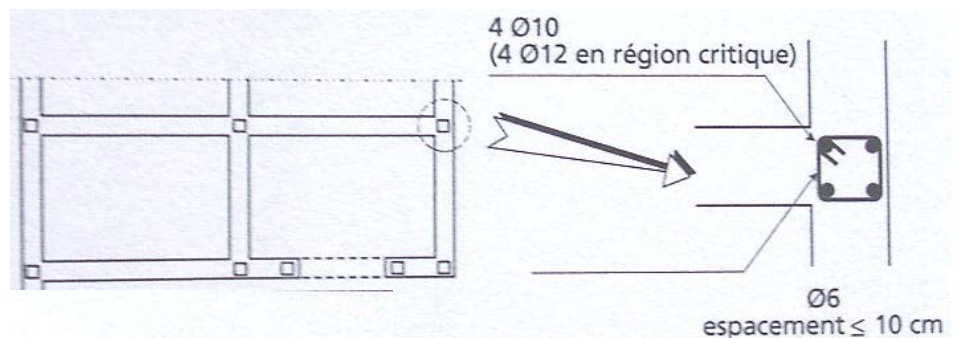
Les règles :

La nature du chaînage des voiles en zone sismique est défini par les règles PS-92. En ce qui concerne les autres armatures du voile, les règles communes à toutes les zones (sismiques ou non) du BAEL s'appliquent.

Synthèse du §11.43 des PS-92 : Chaînage des voiles :

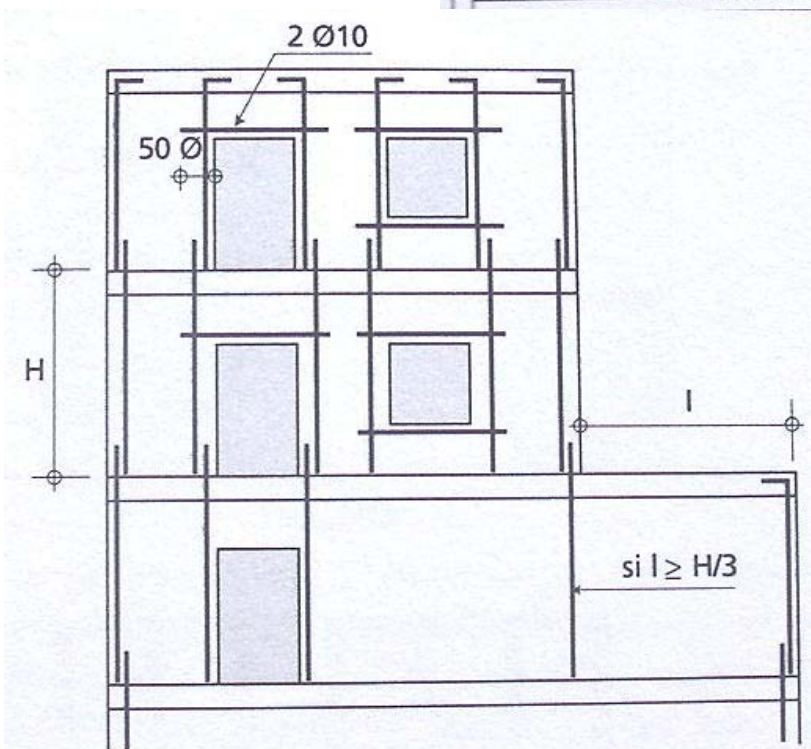
- **Armatures longitudinales** en Fe E 500
- **Vertical** : on doit disposer un chaînage vertical à chaque extrémité, chaque ouverture, chaque intersection, de plancher à plancher avec recouvrements d'étage à étage.
- **Horizontal** : ils doivent être continus à la périphérie de tous les planchers.
- **Linteaux** : leurs barres doivent être ancrées d'une longueur de 50 diamètres de part et d'autre de l'ouverture.
- **Zone courante** : 4 HA 10, cadres de 6 espacés de 10 cm maximum.
- **Zone critique** : 4 HA 12, cadres de 6 espacés de 10 cm maximum.

Ci-contre schéma d'implantation des chaînages des voiles d'après les règles PS-92.



Disposition en élévation, (chaînages horizontaux non montrés)

Le plan de ferrailage du BET respecte les règles communes du BAEL et les complète des règles PS-92. Respectons ce plan sur le chantier.



11. Pourquoi faut-il connaître « à l'avance » les modes de déformation des éléments de béton armé ?

Déterminer à l'avance si une pièce sera « fléchie » ou « comprimée » sous les contraintes dues à l'action d'un séisme est fondamental pour choisir un type d'armatures efficace... et réglementaire.



← **A gauche, poteau de forme peu élancée.** Ne pouvant fléchir dans le sens de sa grande dimension, **il a subi un « cisaillement global ».** (Séisme de Ceyhan – Misis, 1998) (Document P. Balandier) La contrainte élevée et les dommages concernent toute sa hauteur (rupture en diagonale). Cet élément armé comme un poteau a une section (rapport largeur/ épaisseur) à la limite du voile (mur) selon les règles PS-92. Son faible élancement (rapport hauteur/largeur) en fait une « pièce courte ». Il aurait dû être considéré comme « zone critique » sur toute sa hauteur, et recevoir des armatures appropriées sur toute sa hauteur (voir plus loin). Ou être armé comme un voile avec renforcement des extrémités.



A droite ⇒

Les poteaux de géométrie élancée ont subi une flexion globale. (Séisme de Loma Prieta) (Document X pour EERI) Lorsqu'il y a flexion, les niveaux de contraintes et de déformation maximums se situent dans les « zones critiques », qui dans ce cas sont localisées en haut et en bas du poteau comme le montrent les dommages. Ces zones auraient dû recevoir des armatures appropriées.

Il faut savoir à l'avance si un élément va subir un cisaillement ou une flexion pour déterminer le type d'armatures approprié pour qu'il résiste sans rupture « fragile ».

Les solutions :

Les règles PS-92 indiquent précisément comment déterminer le type de contrainte d'une pièce sous séisme. Le BET pourra ainsi faire un plan de ferrailage adapté qui devra être respecté sur le chantier.

12. Quelles sont les limites des déformations des murs de maçonnerie avant la ruine ?

Très rigides, les blocs à maçonner n'acceptent pratiquement pas de déformation sans rupture, soit des blocs, soit plus fréquemment du mortier de liaison. Au delà d'un certain niveau de dislocation, le processus de ruine du bâtiment commence.

Un mode de rupture par dislocation et chute des blocs.



Séisme Ombrie-Marches 97. Le déversement des façades est le premier niveau de dommages graves des maçonneries non confinées (Document X pour EERI). La dislocation peut commencer autour des ouvertures comme ici ou à partir des angles (voir point n°5)



Dislocation de la maçonnerie au départ d'un point faible : une ouverture non confinée (déformations non limitées). Séisme de Loma Prieta (Document X)

La nécessité de confiner les murs de maçonnerie dans des chaînages de béton armé pour éviter leur dislocation et leur projection hors plan exclut les dispositions de type « mur courbes » de maçonnerie. Pour les murs courbes, il faut utiliser des voiles de béton armé.

Les solutions :

Pour limiter les déformations et empêcher la dislocation de la maçonnerie, chaque panneau, chaque ouverture, doivent être « confinés » par un « cadre » de béton armé résistant : des chaînages pour les panneaux et des encadrements pour les ouvertures.

Les dimensions des panneaux et ceux des ouvertures doivent être modérés pour que la résistance soit effective.

Les règles PS-92 définissent précisément toutes les conditions de mise en œuvre des chaînages et encadrements de baies et les conditions de dimensions des panneaux et baies (voir plus loin).

13. Qu'attend-on des armatures longitudinales des poteaux et des poutres pour la résistance aux séismes ?

Elles doivent pouvoir résister sans rompre aux sollicitations en traction qui peuvent survenir lors des différentes déformations possibles de la structure, et ne pas altérer la résistance du béton lors des sollicitations en compression (pas de crochets) et ne pas « flamber ».

N-B : Une pièce déformée en flexion subit pour la partie « extérieure de sa courbure » une traction et pour la partie « intérieure » une compression.

La résistance mécanique des armatures longitudinales doit être effective des fondations jusqu'à la toiture. Elles doivent constituer un réseau continu (attention aux conditions de continuité mécanique par recouvrement suffisant entre toutes les barres). Elles doivent en outre pouvoir se déformer avec le poteau ou la poutre sans que la perte d'adhérence béton-aciers soit trop rapide.



San Fernando, 1979 : Conception d'armatures longitudinales d'ossatures tout à fait inappropriées en zone sismique, (Documents NISEE – USA)

- **Pas de continuité** des barres longitudinales des poteaux entre les étages (recouvrement non assuré)
- **Diamètres trop importants** pour se déformer avec le poteau sans « arracher le béton »
- **Nombre insuffisant** pour une répartition correcte des efforts.
- **Pas de frettage** : En outre, elles ne sont pas contenues par le frettage qui devrait se trouver à l'extérieur des barres !



Les solutions :

Respecter les règles PS-92 - § 11.31 : Armatures longitudinales

§ 11.311 :

• La continuité des armatures longitudinales peut être assurée par recouvrement ou tout autre procédé dont il est établi qu'il n'entraîne pas la fragilisation de l'armature.

§ 11.312

• L'emploi de coudes et crochets dans les pièces comprimées ou les parties comprimées des pièces fléchies est interdit.

• Toutefois, en cas de nécessité (liaison avec une semelle de fondation, voisinage d'une surface libre, etc.) les ancrages d'extrémité peuvent être assurés au moyen de coudes à 90°.

§11.313 :

• Toutes les longueurs de recouvrement ou d'ancrage sont à majorer de 30% pour la part située hors zones critiques et de 50% pour la part située dans la zone critique. Chaque fois que c'est possible, on évite de recouvrir en zone critique)

• Dans les zones de recouvrement, les armatures transversales doivent respecter la règle des coutures résultant de la transmission des efforts entre les barres longitudinales.

14. Comment faire pour que les armatures transversales des poteaux et des poutres résistent à la rupture ?

Chaque cadre (armature transversale) doit pouvoir résister à l'éclatement lors du gonflement du béton en compression. Pour ce faire, il doit être constitué d'une seule barre dont les extrémités doivent se croiser autour d'une barre longitudinale d'angle et être correctement ancrées dans le volume de béton. Le rapprochement des cadres dans les zones critiques réduit les efforts sur chaque cadre.

Le rôle des cadres est fondamental dans la détermination de la « ductilité » plus ou moins élevée de l'ossature. Le rapprochement des cadres permet de contenir plus efficacement les barres longitudinales et éviter leur flambement. L'ancrage correct des extrémités de la barre qui constitue chaque cadre réduit le risque d'arrachement (longueur d'ancrage : 10 fois le diamètre de la barre).

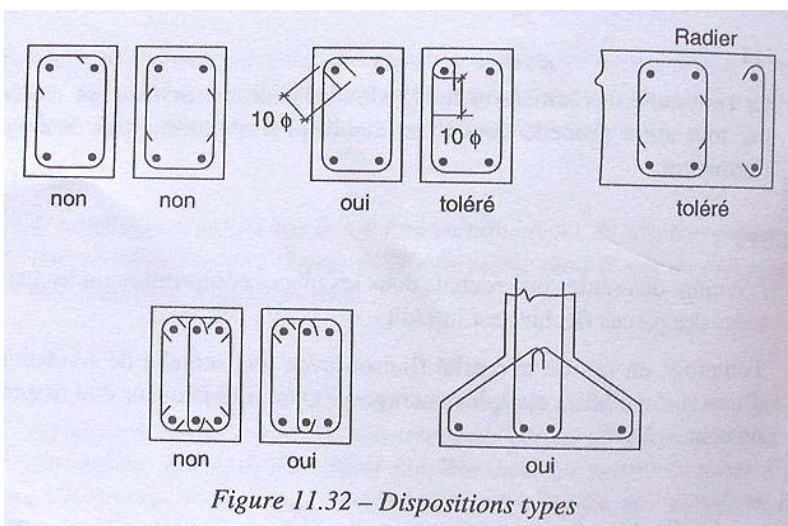
Les bonnes ou mauvaises conception et mise en œuvre des cadres (armatures transversales) vont conditionner le type de rupture de l'élément s'il est déformé au point d'avoir des dommages.

Eclatement des armatures transversales sur la zone critique de poteaux, ayant entraîné le flambement des barres longitudinales et la dislocation du béton qui n'était plus confiné. (Séisme de Bhuj, 2001) (Document X pour EERI)

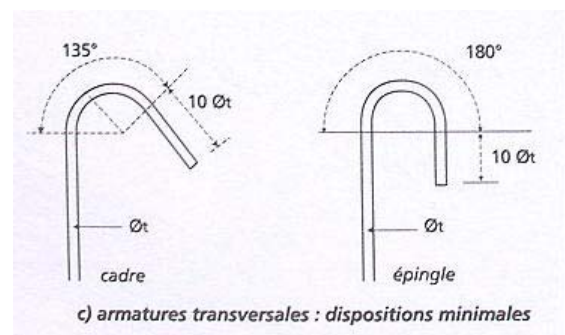


Les solutions :

Le respect des règles de conception des armatures transversales permet d'éviter leur éclatement en assurant leur bon encastrement dans le volume de béton. Une seule barre par cadre.



Dispositions types des PS-92 et Figure extraite de « Construire parasismique (Ed. Parenthèses, Milan Zacek)



15. Comment faire pour que toutes les armatures des poteaux et des poutres constituent un ensemble résistant ?

Outre les conditions de liaisons résistantes de poteau à poteau et de poutre à poutre par recouvrement suffisant des barres longitudinales, les poteaux et les poutres doivent pouvoir fléchir librement sur toute leur longueur. Les dommages éventuels peuvent être des déformations irréversibles sans arriver à la rupture « fragile ».

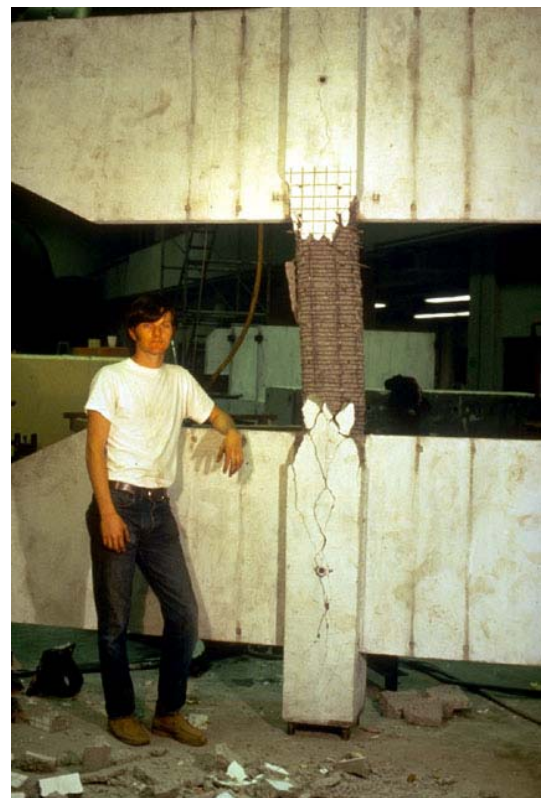
Si le poteau ou la poutre ont une section importante, il faut plus de quatre barres longitudinales. Alors, des cadres ou des épingles doivent être ajoutés aux cadres périphériques pour que les armatures transversales puissent contenir efficacement toutes les barres longitudinales.

Les poteaux dit « courts » (ou bridés) en éléments principaux sont à éviter car leur longueur réduite les rend trop « rigides » et ils ne peuvent plus fléchir mais en général ne sont pas pour autant conçus pour résister à un cisaillement global. Si on ne peut les éviter, il faut les traiter sur toute leur hauteur comme des « zones critiques ».



← *A gauche rupture d'un poteau court (bridé par une allège). Trop rigide, le poteau n'a pu fléchir et les efforts sur ses extrémités ont augmenté au point de le rompre.*

A droite → Essai de frettage de zone critique (armatures transversales rapprochées) sur toute la longueur d'un poteau court en laboratoire. (Documents NISEE – USA)

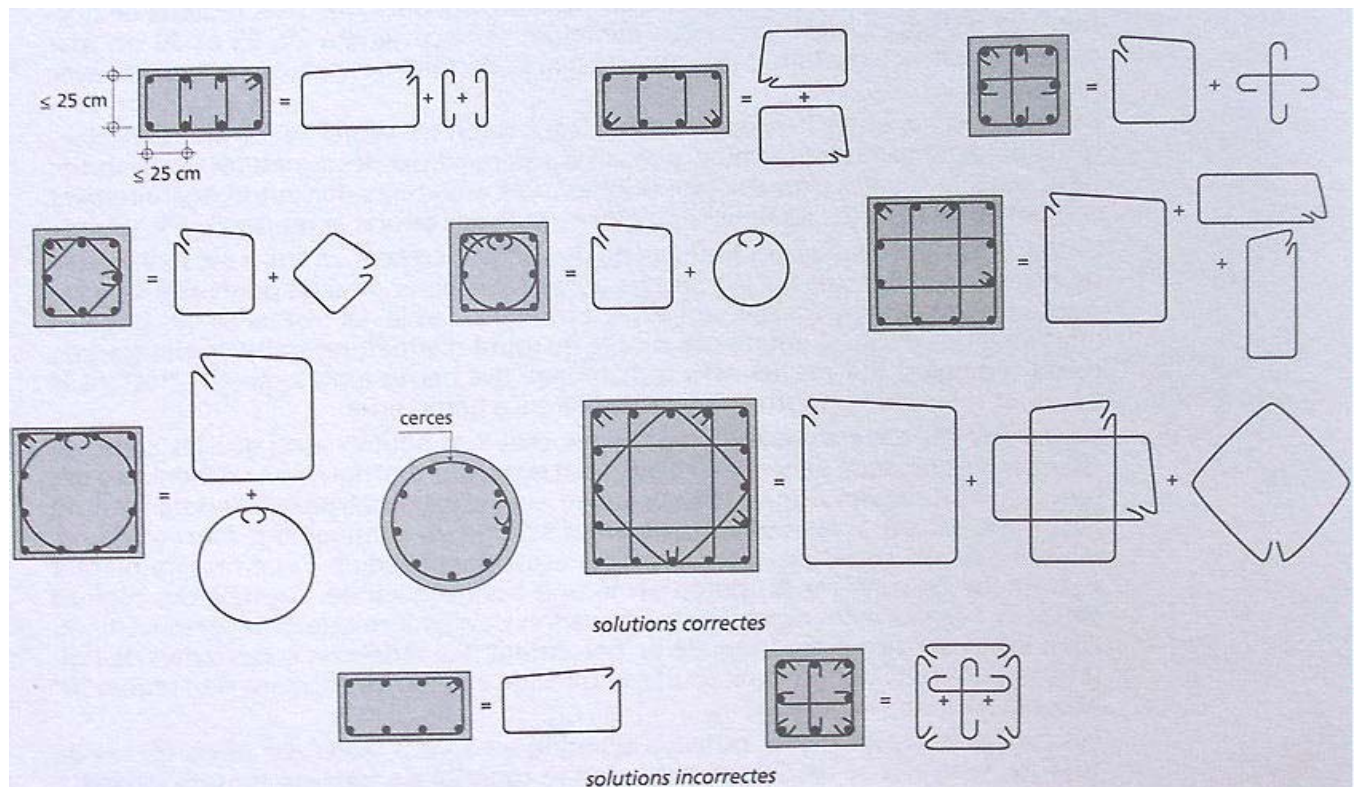


Cette solution est demandée par la réglementation pour les poteaux courts, mais il est préférable d'éviter carrément que des poteaux courts soient sollicités par le séisme, soit en les évitant totalement, soit en ayant par ailleurs des voiles qui « prennent » la charge sismique.

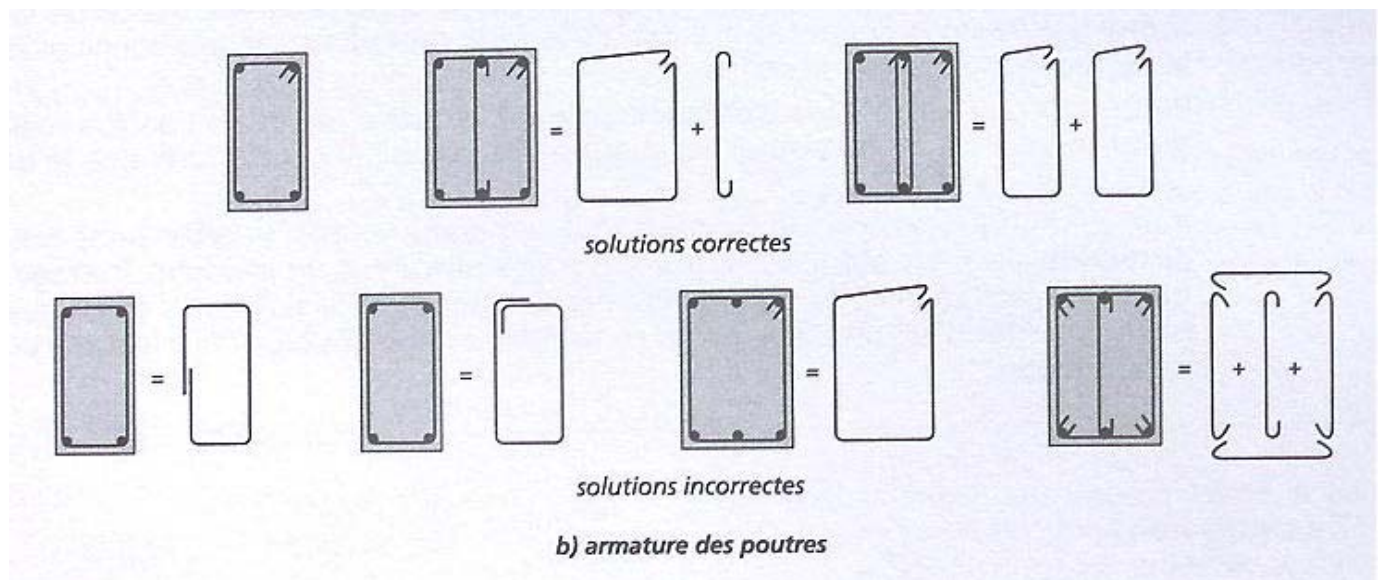
Les solutions :

Les règles PS-92 spécifient les règles de confinement des barres par les frettes. (Figures extraites de « Construire parasismique, Ed. Parenthèses, Milan Zacek)

Les poteaux



Les poutres.



16. Y a-t-il des dimensions minimales pour les coffrages des poteaux et poutres en zone sismique ?

Oui. La résistance mécanique dépend évidemment aussi de la quantité de matière. Aussi les règles imposent-elles des sections minimales pour les pièces des ossatures propres aux zones sismiques. Le problème : trop de constructeurs semblent l'ignorer !

Les mauvaises habitudes issues de « l'époque » où on négligeait l'action des séismes pour construire font que ce problème grave est négligé, d'autant plus que le cubage de béton, donc le coût du chantier, va croître de fait pour les constructeurs qui doivent abandonner leurs habitudes illicites.



A gauche et à droite, des logements sociaux (Zone III) construits alors que les règles PS-92 étaient déjà en vigueur. Outre le problème de mauvaise conception architecturale vis-à-vis du séisme, les poteaux n'ont pas la section minimale obligatoire de 25 cm de côté (Clichés P. Balandier)



Les solutions :

Respecter les règles. **Synthèse du §11.331 des PS-92: Dimensions minimales des sections**

- b et $h > 25$ cm
- $S > 625$ cm²
- Âme des poutres > 15 cm

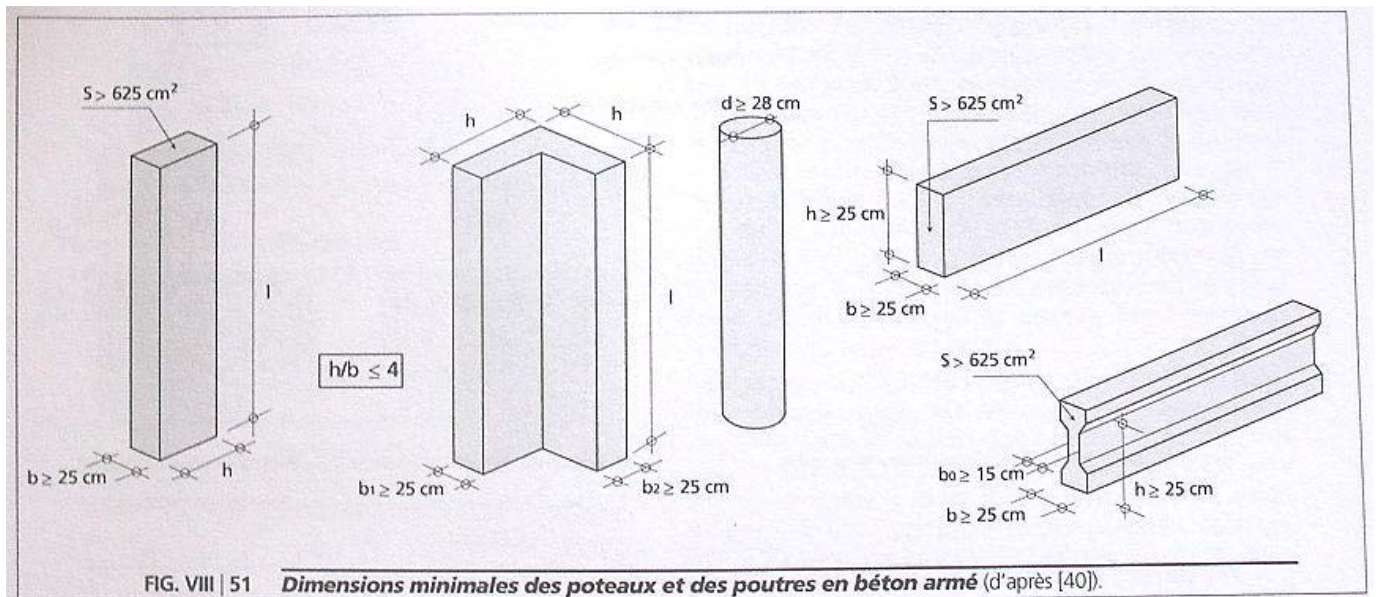


Figure extraite de « Construire parasismique, Ed Parenthèses, Milan Zacek) »

17. Qu'est-ce qui différencie un large poteau rectangulaire d'un mur en béton armé (ou voile) ?

Les règles PS-92 nous disent que lorsque la largeur d'un poteau est égale ou supérieure à 4 fois son épaisseur, ce n'est plus un poteau, mais un voile. Il devient alors assez rigide dans le sens de sa largeur pour ne plus être assimilé à un poteau.

Les constructions contreventées par des voiles de béton armé (en nombre suffisant et bien disposés) sont un type de « structure rigide » qui limite les déplacements relatifs des planchers beaucoup plus que les ossatures ne le font. Les éventuels dommages dans les zones critiques créent moins d'effondrements que pour les ossatures.

En effet, même en cas de cisaillement d'un voile, il est en général partiel et les reports de charges se font sur les parties non rompues, alors que les contraintes chutent. Aussi la réglementation parasismique est « moins complexe » pour les armatures des voiles dont la spécificité est le renforcement des chaînages. En outre, un voile peut n'avoir qu'une épaisseur de 15 cm (25 cm pour les poteaux).

Cependant, les extrémités des voiles (bouts des murs) sont très « sollicitées par le séisme » et c'est là que la rupture sous l'effet du cisaillement s'amorce. Il faut donc renforcer ces extrémités, soit par des chaînages (règles PS-92) soit par le renforcement vertical des treillis en doubles faces (Eurocode 8).



***Amorce de cisaillement de l'extrémité d'un voile (Séisme d'Anchorage, 1964)
(Document Karl – V. Steinbrugge)***

Les solutions

PS-92 - §11.41 : Dimensions minimales

- Les murs en voiles doivent présenter une épaisseur minimale de 15 cm et une largeur au moins égale à 4 fois l'épaisseur.
- les éléments ne satisfaisant pas à cette condition doivent être considérés comme des éléments linéaires*. (* donc comme des poteaux et être armés comme tel)

Chaînages des voiles

(Voir plus loin)

18. Quelles règles pour déterminer les différents panneaux en maçonnerie et leurs chaînages ?

Une construction en maçonnerie comprend un certain nombre de murs. Pour empêcher son effondrement sous l'action d'un séisme, elle doit comporter un nombre suffisant de panneaux de murs « résistants » aux poussées horizontales et bien disposés dans les deux directions de la construction.

Tous les murs de maçonnerie (résistants ou non) doivent être compris entre des chaînages verticaux et des chaînages horizontaux qui les confinent pour empêcher leur dislocation sous l'effet des poussées horizontales.

Pour les panneaux de maçonnerie « résistants » appelés « trumeaux »

La résistance de ces panneaux doit être effective, car c'est eux qui vont empêcher l'effondrement, et pour cela ils ne doivent être ni trop « étroits » (déséquilibre possible sous les poussées horizontales), ni trop larges (inefficacité des chaînages pour assurer leur rigidité au regard des déformations perpendiculaires au plan).

Ils doivent être pleins (toute ouverture constitue un point faible) et bien répartis sur l'ensemble de la construction dans les deux directions, à chacun de ses étages et de préférence superposés. L'idéal serait de les disposer au moins sur tous les angles de la construction (1,5m de large au moins en zone III), car ce sont les zones de la construction qui ont besoin du plus de résistance.

Pour les autres panneaux de maçonnerie (ceux qui n'assurent pas la résistance)

Ils comportent les ouvertures du bâtiment, mais on ne compte pas sur eux pour « contreventer » la bâtiment, c'est-à-dire éviter son effondrement. Néanmoins, ils ne doivent pas se disloquer et créer un danger. Ils doivent donc obéir aux mêmes conditions de chaînage, de dimensions maximum et leurs ouvertures doivent être solidement encadrées.

Les solutions :

Les préconisations des règles PS-92, répondent à une logique de confinement de chaque panneau (inclus les planchers) en limitant les dimensions.

PS-92 - § 12. 2221: Principes

• Dans le présent document on appelle « maçonneries chaînées » les structures porteuses réalisées en maçonnerie de petits éléments (voir 12.113) et comportant des chaînages en béton armé mis en œuvre après exécution de la maçonnerie :

- chaînages horizontaux :

au niveau des fondations (éventuellement),
au niveau de chaque plancher,
au niveau haut ;

- chaînages verticaux, au moins :

à tous les angles saillants et rentrants de la construction,
aux jonctions de murs,
encadrant les ouvertures de hauteur supérieure ou égale à 1,80m ;

• **Aucun élément de mur ne doit présenter de bord libre en maçonnerie.**

(Voir dimensions des panneaux et dispositions complémentaires des ouvertures plus loin)

19. Qu'est-ce qui différencie les « trumeaux » de maçonnerie, des autres murs ?

Ils ont des caractéristiques obligatoires plus sévères pour être effectivement résistants sous l'action du séisme.

Afin de conférer à l'ensemble maçonnerie – chaînages une bonne résistance aux déformations, il convient de **limiter la surface des panneaux** qui constituent les murs pour maîtriser l'angle des diagonales sur lesquelles les poussées vont s'exercer pendant le séisme (ni trop vertical, ni trop horizontal) et leur stabilité en fonction de leur épaisseur.

On observe l'instabilité de ces panneaux s'ils trop grands pour la résistance des blocs utilisés (blocs pleins ou blocs creux et épaisseur des blocs).



Séisme du Salvador (2001). (Documents P. Balandier et S. Gunot).



L'utilisation, pour des raisons économiques, de petits blocs à maçonner (faible épaisseur) a conduit à réduire les dimensions des trumeaux (un chaînage intermédiaire supplémentaire par étage). Mais le manque d'inertie transversale conduit néanmoins à la ruine les ouvrages trop sollicités. En France les blocs doivent avoir une épaisseur minimale, et selon leur résistance on aura le droit à des dimensions de panneaux plus ou moins importantes.

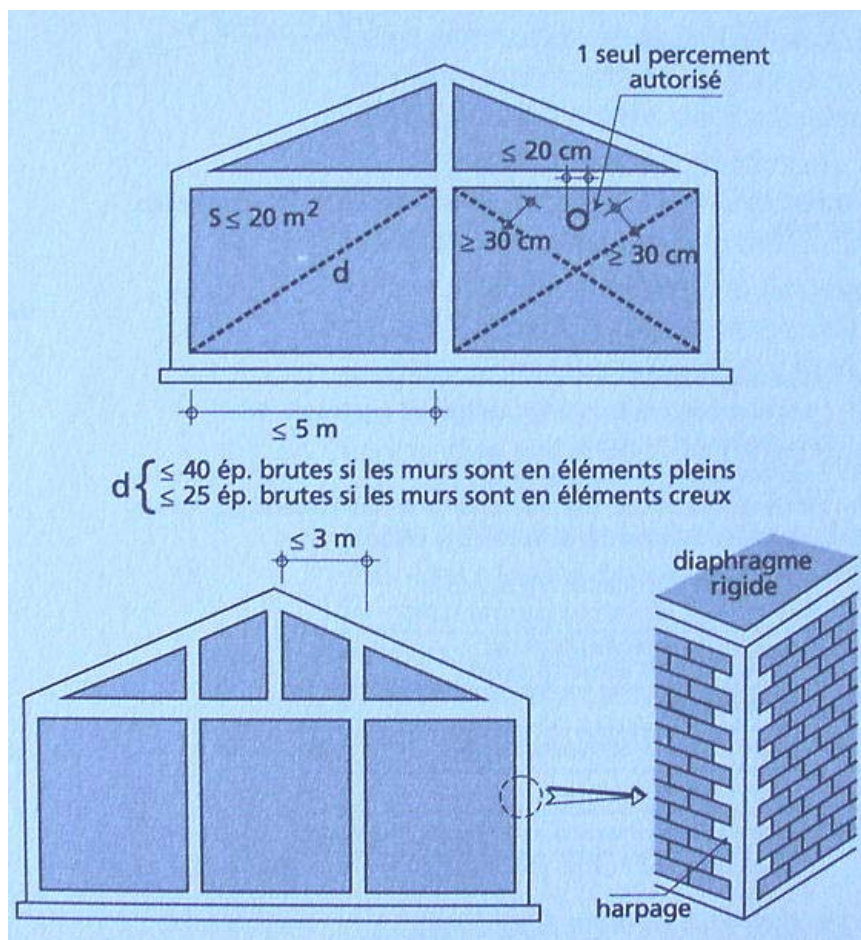
Les solutions :

respecter les règles PS-92

Pour les épaisseurs de blocs, le standard de 15 cm est déjà prohibé par de nombreuses règles (dont les règles PS-MI applicables en zone II), ne serait-ce que parce qu'il ne permet pas l'enrobage correct des aciers dans les chaînages. Les PS-92 l'autorisent encore pour les blocs pleins et assimilés, mais l'utilisation de blocs à maçonner de 20 cm minimum est recommandée, même dans les cas où ce n'est pas obligatoire, notamment en zone III par le guide de construction parasismique des maisons individuelles.

Caractéristiques réglementaires des trumeaux :

- Epaisseur des blocs égale ou supérieure à 15 cm (20 cm pour les éléments creux)
- Largeur et hauteur du panneau inférieures ou égales à 5 m
- Surface du panneau inférieure ou égale à 20 m²
- Dimensions de la diagonale du panneau pour les **blocs creux** inférieure ou égale à 25 épaisseurs des blocs utilisés
- Dimensions de la diagonale du panneau pour les **blocs pleins** inférieure ou égale à 40 épaisseurs de blocs utilisés
- Un seul percement de 20 cm maximum hors des diagonales autorisé par panneau.



(Document extrait de « Construire parasismique », Milan Zacek, Editions Parenthèses)

En haut, les conditions à réunir pour déterminer les dimensions du panneau.

En bas à gauche les dispositions propres au rapprochement des chaînages sur les pignons.

En bas à droite, harpage ou « montage à l'italienne » des blocs pour obtenir une cohésion accrue entre la maçonnerie et le chaînage coulé ensuite.

ATTENTION



A gauche, la construction comprend un grand nombre de chaînages sans pour autant posséder un seul panneau de contreventement. Une conception correcte de la structure pour qu'elle possède des trumeaux (panneaux pleins compris entre deux chaînages) en nombre suffisant n'aurait pas demandé davantage de matériaux ni de mise en œuvre (Document P. Balandier)

A droite, pour une même densité de chaînages la maison comporte des vrais trumeaux. Reste une question à résoudre : on voit des fourreaux électriques sortant du béton des chaînages verticaux (à droite du cliché). Ils empêcheront la bonne adhérence du béton sur les armatures et réduiront la résistance du chaînage. Il faut passer les fourreaux et autres conduites dans des gaines techniques et pas dans la structure porteuse. (Cliché Milan Zacek)

20. Comment réaliser un panneau de maçonnerie qui comprend des ouvertures ?

Les autres murs, qui comprennent les ouvertures du bâtiment, ne contribuent pas à la résistance de la construction sous séisme. Néanmoins, pour des raisons de sécurité, ces ouvertures doivent être réalisées en respectant des règles d'encadrement précises, règles qui visent à éviter l'éclatement de la maçonnerie située autour.

Les règles PS-92 (§ 12.2227) distinguent trois types de baies en fonction de leurs dimensions et prescrivent les conditions d'encadrement visant à éviter la dislocation des panneaux dans lesquelles elles sont implantées:

- **Petites baies** (catégorie P) aucune dimension supérieure à 1,5 m
- **Moyennes baies** (catégorie M) une dimension au moins supérieure à 1,5 m, mais aucune supérieure à 2,5 m
- **Grandes baies** (catégorie G) une dimension au moins supérieure à 2,5 m

La solution : respecter les règles d'encadrement des baies selon leurs dimensions et « l'accélération nominale réglementaire ».

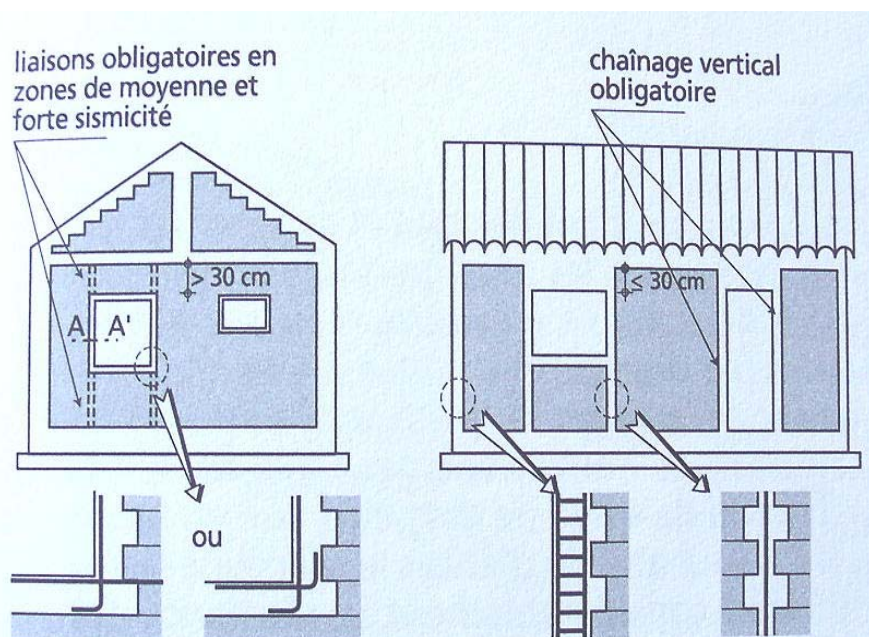
En rouge, les mesures applicables à la zone III ($a_{N>3,5}$) : Guadeloupe et Martinique.

a_N	Petites	Moyennes	Grandes
$< 0,25g$	-	-	Encadrement et liaison aux chaînages
$< 0,35g$	Encadrement sauf si dimensions du panneau $< 3.20m$	Encadrement et liaison aux chaînages sauf si dimensions du panneau $< 3.20m$	Encadrement et liaison aux chaînages
$>ou = 0,35g$	Encadrement simple	Encadrement et liaison aux	Encadrement et liaison aux

En résumé :

Pour les portes et portes-fenêtres, chaînage obligatoire. la porte est considérée comme une limite de panneau, alors que la fenêtre est considérée comme zone faible à renforcer. Les armatures d'un chaînage comportent 4 barres et celles d'un cadre 2 barres (voir plus loin).

(Figure extraite de « Construire parasismique » Milan Zacek, Editions Parenthèses)



21. Quelles sont les caractéristiques réglementaires du système de chaînage de la maçonnerie ?

L'ensemble du système de chaînage doit assurer la liaison continue de tous les éléments de la construction des fondations à la toiture, la résistance des panneaux aux déformations et l'ancrage des planchers dans les murs.

Les dimensions obligatoires des chaînages et leurs règles d'armatures doivent être impérativement respectées pour garantir leur résistance dans les trois directions.

Les solutions :

Respecter les règles PS-92 - § 12. 2221: Principes

• Dans le présent document on appelle « maçonneries chaînées » les structures porteuses réalisées en maçonnerie de petits éléments (voir 12.113) et comportant des chaînages en béton armé mis en œuvre après exécution de la maçonnerie :

- chaînages horizontaux :

au niveau des fondations (éventuellement),
au niveau de chaque plancher,
au niveau haut ;

- chaînages verticaux, au moins :

à tous les angles saillants et rentrants de la construction,
aux jonctions de murs,
encadrant les ouvertures de hauteur supérieure ou égale à 1,80m ; avec les dispositions complémentaires énoncées ci-après.

• **Aucun élément de mur** ne doit présenter de bord libre en maçonnerie.

Caractéristiques des chaînages horizontaux : les règles PS-92 (Article 12.222) demandent :

Dimensions :

- Epaisseur: Sur toute l'épaisseur du mur (totale si double paroi) ou tolérance en réduction aux 2/3 minimum pour éviter les ponts thermiques notamment.

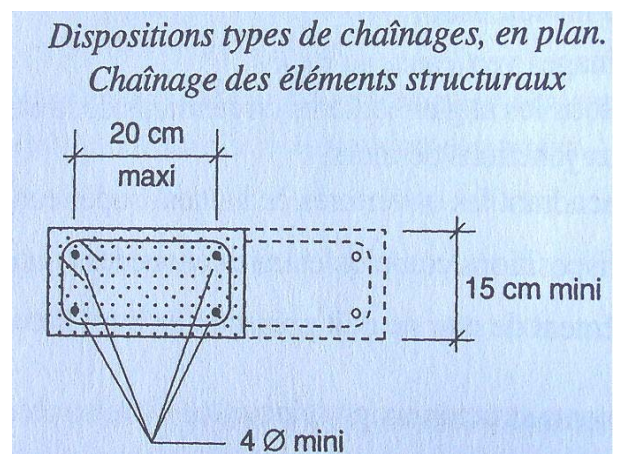
- Hauteur: 15 cm minimum

Armatures longitudinales :

4 barres, une dans chaque angle, espacées de 20 cm maximum (si mur épais, ajouter une troisième barre), résistance en traction minimum 80 kN

Armatures transversales :

Espacement inférieur ou égal à la hauteur, 25 cm maximum.



(Figure extraite de « Construire parasismique » Milan Zacek, Editions Parenthèses)

Caractéristiques des Chaînages verticaux, les règles PS-92 (Article 12.222) demandent :

Dimensions :

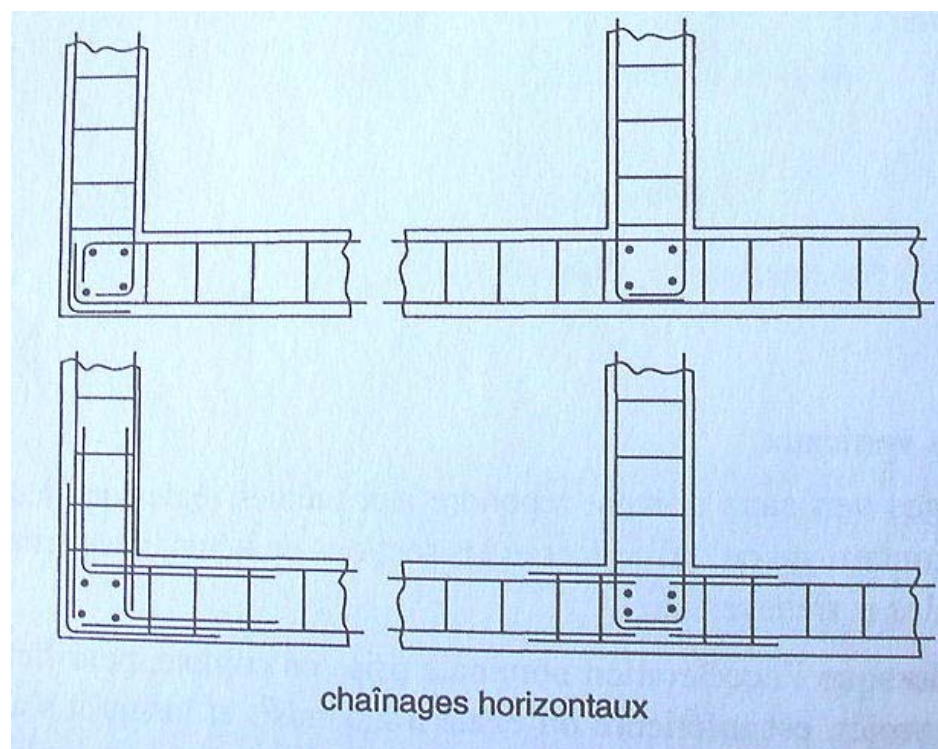
Comme pour les chaînages horizontaux avec sections maximum aux angles.

Armatures longitudinales :

Comme pour les chaînages horizontaux avec possibilités de minorer les dimensions dans certains cas dans les régions de faible sismicité.

Caractéristiques des nœuds des chaînages, les règles PS-92 (Article 12.222) demandent :

La continuité et le recouvrement des armatures des divers chaînages concourants doivent être assurés dans les trois directions.



Ci-contre, exemple de positionnement correct des barres assurant la continuité des barres de chaînages dans les angles et aux intersections des chaînages horizontaux.

Types et caractéristiques des cadres admis pour les baies des structures en maçonnerie

Les cadres peuvent être en béton armé de résistance en traction définie ou en métal pour une résistance équivalente prouvée.

Pour le béton armé (par deux barres longitudinales):

- dimension minimale de 7 cm et implantation sur toute l'épaisseur du mur (sauf règles des 2/3 applicables aux chaînages)
- espacement des deux barres 20 cm maximum (si mur épais rajouter une troisième barre)
- Liaisons par des épingles.

22. Qu'attend-on des planchers de béton armé ?

Les planchers, pour assurer le contreventement horizontal, doivent être « rigides » (c'est-à-dire « indéformables ») et solidement liés aux éléments porteurs (poutres entre les porteurs ou chaînages des murs), de façon à impliquer une déformation homogène à tous les éléments de contreventement vertical (ce qui implique que ceux-ci soient bien implantés et de raideurs homogènes)

Les différents types de planchers et toitures « plaques » ne constituent un « diaphragme rigide » que dans le respect de certaines dispositions constructives qui assurent une résistance satisfaisante :

- Rigidité effective dans leur plan.
- **Solidarisation impérative avec les chaînages périphériques** et poutres qui assurent la liaison avec les palées de stabilité (ancrages satisfaisants pour éviter l'arrachement).
- **Renforcement des bords des trémies** par des cadres armés, les dimensions des trémies doivent être limitées (sinon, dispositions compensatrices).
- Si la « plaque » est constituée de plusieurs couches (pré-dalle et dalle ou poutrelles et entrevous et dalle), **liaisons entre les couches** par des coutures assurant un comportement dynamique homogène sans dislocation.



Ces pré-dalles comportent des coutures comme le recommande la réglementation afin d'assurer la liaison avec la dalle coulée en place. Les irrégularités de surface doivent permettre une meilleure adhérence du béton coulé en place sur celui qui a tiré en usine.

Néanmoins, des coutures couchées, voire arrachées ne peuvent assurer leur fonction de liaison entre les deux couches.

(Clichés P. Balandier)

Couler la dalle du béton en même temps que les chaînages, poutres, chapiteaux...

Cas des planchers à poutrelles et entrevous :

Il est capital que les liaisons entre les nervures et la dalle soient effectives pour un comportement dynamique cohérent. La dalle de compression elle-même doit être calculée avec un minimum de 4 cm (5 cm pour les entrevous de polystyrène, néanmoins préférables aux réhausses isolantes sur entrevous).

Ces « planchers nervurés » ont l'avantage d'avoir une masse réduite (Réduction F_i) pour une bonne résistance mécanique (au regard des dalles coulées en place).

Les liaisons entre les poutrelles et la dalle de compression et celle du plancher avec les chaînages horizontaux doivent être soignées. De plus en plus de fabricants proposent des produits adaptés aux zones sismiques (poutrelles, aciers).

23. Y a-t-il des règles de sécurité pour les cloisons de maçonnerie non porteuses?

Pour des raisons de sécurité des personnes elles doivent respecter des règles d'encadrement pour éviter leur dislocation sous l'effet des secousses

On distingue les cloisons « légères » d'épaisseurs inférieures à 10 cm, des cloisons lourdes (épaisseurs supérieures à 10 cm), avec des exigences plus élevées.

La réglementation

Les cloisons de distribution d'épaisseur jusqu'à 10 cm

Elles doivent respecter les dispositions suivantes :

- Pas de bord libre
- Jonction impérative à d'autres murs, cloisons ou potelets (béton armé, métal ou bois) de pleine hauteur
- Si cloison de pleine hauteur, elles doivent être solidaires des planchers pour éviter leur déversement
- Si hauteur partielle, encadrements liés au gros-œuvre
- Harpage des cloisons perpendiculaires
- $S < 14 \text{ m}^2$, H et $L < 5\text{m}$, $d < 100 \text{ e}$
- Encadrement des baies (BA, métal, bois)

Les cloisons de distribution d'épaisseur supérieure à 10 cm

Elles doivent respecter les dispositions suivantes :

Idem cloisons précédentes et :

- Chaînages en béton armé en métal ou en bois des panneaux
- $S < 20 \text{ m}^2$, H et $L < 5\text{m}$, $d < 50 \text{ e}$
- Encadrement des baies de type G (BA, métal, bois) relié à la structure.
- Vérification de leur participation au comportement dynamique de la structure (raideurs)