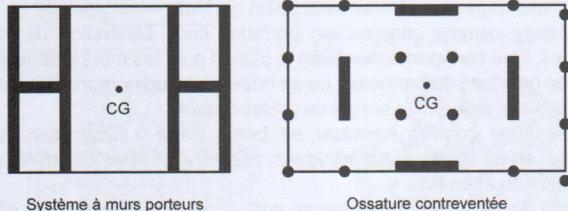
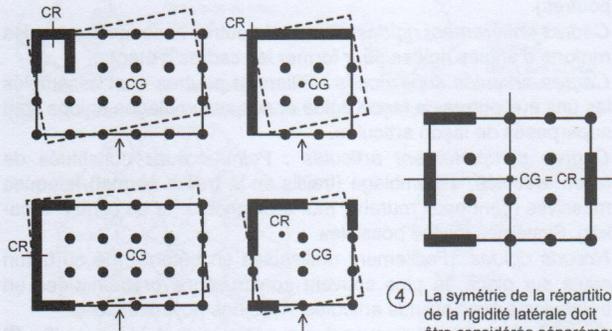


- ① Choix du parti architectural et du système porteur en fonction du type de sol : sur sols mous, on devrait opter pour des constructions rigides (basses, fortement contreventées, etc.) et sur sols rigides pour des bâtiments plus déformables (hauts, élancés, à structure en portiques, sans remplissage en maçonnerie).

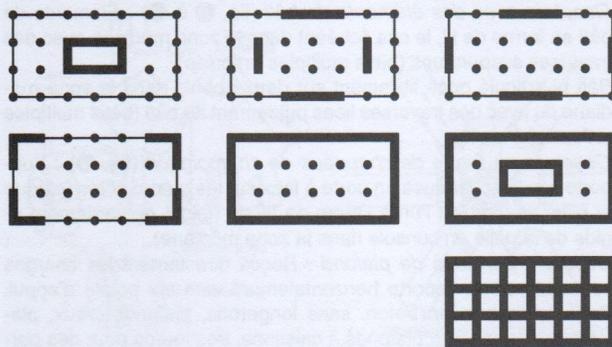


- ② Structures contreventées : la répartition des éléments de contreventement (murs ou palées de stabilité) devrait être, dans chaque direction principale, symétrique par rapport à l'axe passant par le centre de gravité des planches CG.

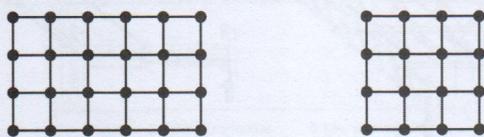


- ③ Dans le cas d'une répartition asymétrique des éléments rigides qui assurent le contreventement lors d'un séisme, les zones plus déformables vrillent autour des éléments rigides (plus précisément autour du centre de rigidité des niveaux CR).

- ④ La symétrie de la répartition de la rigidité latérale doit être considérée séparément pour chaque direction. La position des éléments de contreventement de cette figure est donc correcte.



- ⑤ Distribution des éléments de contreventement (murs ou palées de stabilité triangulées représentés ici par les traits épais) par ordre croissant d'efficacité. La résistance du bâtiment à la torsion augmente avec la distance horizontale entre les éléments de contreventement parallèles ; sa rigidité latérale croît avec leur largeur cumulée.



- ⑥ Les structures en portiques bidirectionnels à trame régulière conviennent pour les plans de forme rectangulaire ou carrée, car dans chaque direction principale, la rigidité de la structure est répartie symétriquement.

ARCHITECTURE PARASISMIQUE PROJET PARASISMIQUE

La manière dont les bâtiments et autres ouvrages oscillent lors d'un tremblement de terre dépend de leur architecture.

Les règles parasismiques (normes parasismiques) sont le plus souvent appliquées sur un projet de bâtiment déjà défini et n'ont pas pour objet de modifier son comportement sous séisme, fût-il très défavorable. Elles visent à conférer au bâtiment, grâce au dimensionnement et à des dispositions constructives spécifiques, une résistance adéquate compte tenu de l'architecture déterminée par le projet. Lorsque les règles parasismiques, basées sur une démarche simplifiée et forfaitaire, sont appliquées sur un projet de bâtiment ne respectant pas les principes élémentaires d'une conception architecturale parasismique, elles peuvent s'avérer insuffisantes pour éviter l'effondrement de l'édifice sous l'effet d'un séisme. Par conséquent, il est important que l'architecte confère à l'ouvrage, grâce à un projet judicieux, un comportement dynamique favorable, minimisant ses oscillations lors des tremblements de terre.

Les principaux effets destructeurs des séismes sur les bâtiments sont dus aux « mauvais » choix opérés lors de l'élaboration du projet d'architecture ; ils peuvent donc être facilement évités. Par ailleurs, un projet judicieux permet d'optimiser le coût de la protection parasismique réglementaire.

CONCEPTION ARCHITECTURALE PARASISMIQUE

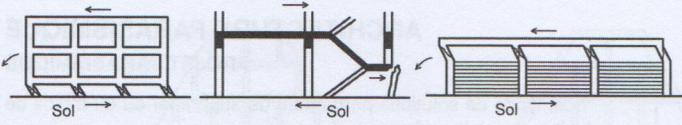
Choix du parti architectural et du système porteur en fonction du type de sol
Ce choix devrait être dicté par le souci d'éviter la résonance du bâtiment avec le sol, car celle-ci est le principal facteur destructeur lors d'un tremblement de terre. Elle se produit lorsque les oscillations libres d'une construction ont une fréquence proche de celles du sol. Les amplitudes d'oscillation s'accroissent alors d'une manière considérable, à l'instar d'une balançoire mise en mouvement par des impulsions d'une fréquence précise. Pour éviter la résonance, la fréquence propre du bâtiment doit être très différente de la fréquence propre du sol. En simplifiant, on peut dire que sur sols mous, on devrait opter pour des constructions rigides (bâtiments bas, structures contreventées par des voiles en béton armé...) et sur sols fermes ou rocheux pour des ouvrages plus flexibles (bâtiments hauts, structures en portiques sans murs de remplissage, etc.) (fig. ①). Toutefois, au stade du projet d'exécution, les fréquences propres du bâtiment et du sol devraient être calculées ; celle du sol dépend également de son épaisseur et non seulement de ses caractéristiques.

FORME EN PLAN DES BÂTIMENTS

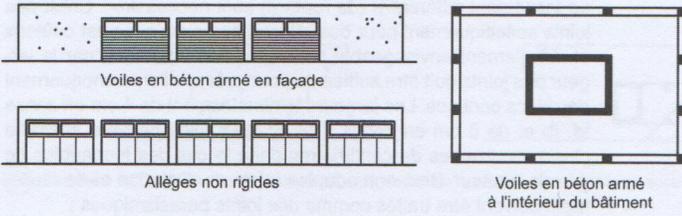
Forme carrée ou rectangulaire

Ces formes constituent un très bon choix à condition d'opter pour un système porteur qui possède un comportement favorable à la résistance aux séismes :

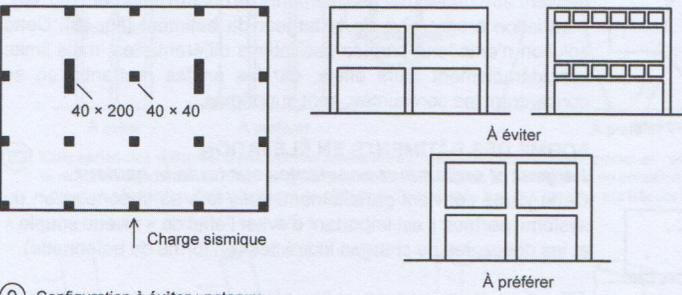
- une structure contreventée par des murs ou des palées de stabilité (fig. ②). Dans ce cas, il est impératif de disposer ces éléments rigides de manière à assurer, dans chaque direction principale, une répartition symétrique de la rigidité par rapport à l'axe passant par le centre de gravité des planchers. Lorsque la rigidité latérale est distribuée d'une manière asymétrique, les séismes soumettent le bâtiment à une torsion d'axe vertical, qui produit des effets très destructeurs (fig. ③). Il est très important de noter que la symétrie doit être considérée séparément dans chaque direction, car généralement, un élément qui contrevente dans une direction ne contrevente pas dans une autre. Ainsi, les éléments rigides de la figure ④ sont correctement répartis (symétriquement par rapport à l'axe passant par le centre de gravité du plancher CG dans chacune des deux directions principales). La résistance du bâtiment à la torsion augmente avec la distance horizontale entre les éléments de contreventement parallèles et sa rigidité avec leur largeur cumulée. La figure ⑤ présente différentes configurations par ordre croissant d'efficacité. Plus la construction est élevée, plus son contreventement doit être efficace ;
- une structure en portiques bidirectionnels à trame régulière (fig. ⑥). Ce système ne convient pas pour les bâtiments de grande hauteur, en raison de la déformabilité élevée des portiques sous charges horizontales. Vis-à-vis des séismes, les structures en portiques autostables s'avèrent globalement moins fiables que les structures contreventées par des murs ou des palées de stabilité. Une attention particulière doit donc être apportée à leur conception. On devrait éviter l'effet de poteau court et s'abstenir de créer des « points durs » ou d'utiliser des toitures lourdes sur rez-de-chaussée, notamment des toitures végétalisées. Par ailleurs, le principe « poteau fort-poutre faible » devrait être respecté.



7 Dans une structure en portiques, les charges sismiques sont concentrées sur les poteaux plus rigides que les autres, notamment sur les poteaux courts, comme ceux du vide sanitaire, ou sur ceux dont la déformabilité est réduite par la présence d'allèges en maçonnerie ou en béton, de paliers d'escalier ou d'autres éléments. Il en résulte fréquemment une rupture de ces poteaux, ce qui peut entraîner l'effondrement de l'ouvrage.

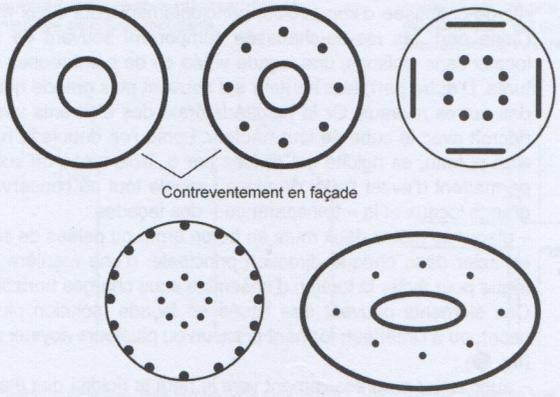


8 Solutions pour prévenir l'effet de poteau court dans une ossature en portiques possédant des allèges rigides : opter pour un contreventement ou pour des allèges industrialisées légères.

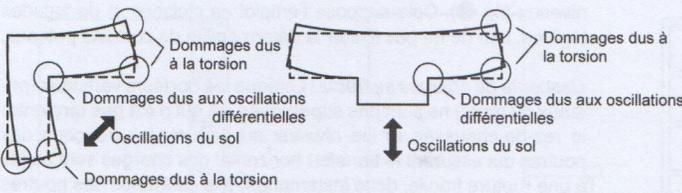


9 Configuration à éviter : poteaux nettement plus larges que les autres. Ils constituent des « points durs » qui attirent les charges sismiques. Sur cette figure, deux poteaux sont 5 fois plus larges que les autres poteaux et subissent donc des charges 125 fois plus grandes. Leur destruction (et l'effondrement du niveau) lors d'un séisme fort est très probable.

10 Principe poteau fort - poutre faible. Les rotules plastiques, dont la formation est prévue par les règles parasismiques, doivent se former dans les poutres et non pas dans les poteaux ou les nœuds de portique, qui assurent la stabilité de l'ouvrage. L'emploi des poutres-allèges ou des poutres Vierendeel est donc à éviter.



11 Les formes circulaires et elliptiques requièrent une structure symétrique selon au moins deux axes. Toutefois, les murs en maçonnerie courbes ne conviennent pas pour la construction parasismique.



12 Localisation des dommages dus aux oscillations différentielles de diverses parties du bâtiment et à la torsion d'ensemble.

ARCHITECTURE PARASISMIQUE PROJET PARASISMIQUE

Effet de « poteau court » : Les efforts horizontaux dus aux séismes se distribuent sur les éléments de structure verticaux en proportion de leur rigidité latérale. Si, dans une structure en portiques, certains poteaux sont plus courts (comme ceux du vide sanitaire) ou si leur déformabilité est réduite par la présence d'allèges en maçonnerie, de paliers d'escalier intermédiaires, de mezzanines, de rampes ou d'autres éléments, ils sont beaucoup plus rigides que les autres poteaux. Ils sont donc beaucoup plus sollicités et peuvent être détruits par cisaillement (fig. 7). On parle de l'effet de « poteau court ». Pour l'éviter, on peut opter pour un système contreventé, p. ex. en plaçant des voiles en béton armé en façade ou à l'intérieur du bâtiment ou, dans le cas des allèges, utiliser des éléments industrialisés légers, possédant une faible rigidité (fig. 8).

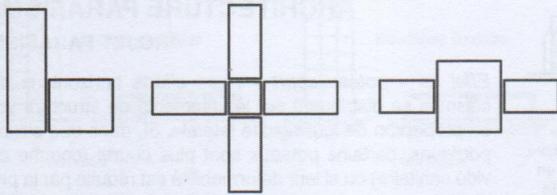
Points durs : Lorsque certains poteaux ont une largeur nettement plus grande que les autres poteaux, ils constituent des points durs (fig. 9), car leur rigidité latérale augmente avec le cube de leur largeur, donc très rapidement avec l'accroissement des dimensions de la section. Les charges sismiques étant concentrées sur les éléments verticaux les plus rigides, une rupture prématurée de ces poteaux peut se produire.

Toitures lourdes : Les constructions possédant une toiture lourde, donc une masse importante placée en hauteur, se comportent comme un pendule inversé (cf. § « Forme en pyramide inversée ») et leur effondrement n'est pas rare. Les toitures végétalisées en haut d'un rez-de-chaussée portées par des poteaux sont des cas typiques. Le phénomène s'estompe avec l'augmentation du nombre de niveaux, car la proportion de la masse représentée par la toiture diminue. Afin de prévenir l'effondrement sous séisme des bâtiments comportant une toiture lourde, la structure porteuse devrait comporter des voiles en béton armé ou des palées de stabilité triangulées, orientés dans les deux directions principales.

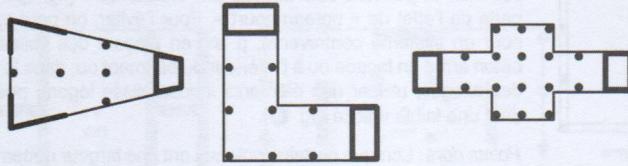
Principe « poteau fort-poutre faible » : Les déformations permanentes (rotules plastiques) censées se produire lors des séismes majeurs au lieu d'une rupture instantanée, devraient apparaître dans les poutres et non pas dans les poteaux ou les nœuds, qui assurent la stabilité de l'ouvrage vis-à-vis des charges horizontales. Ce fonctionnement dépend en partie du projet. Il convient donc d'éviter l'emploi des poutres surhaussées, des poutres-allèges, des poutres-cloisons et des poutres Vierendeel, qui possèdent une résistance plus grande que les poteaux. À contrario, il est souhaitable de dimensionner généreusement les poteaux (fig. 10).

Forme circulaire ou elliptique
De même que les formes carrées et rectangulaires, les formes circulaires et elliptiques requièrent une structure symétrique au moins selon deux axes, judicieusement conçue : murs porteurs ou ossature en poteaux et poutres, autostable ou contreventée (fig. 11). Cependant, les murs en maçonnerie courbes ne conviennent pas, car ils éclatent sous l'effet des forces horizontales. Par contre, les murs en béton armé courbes constituent des coques possédant une excellente résistance de forme.

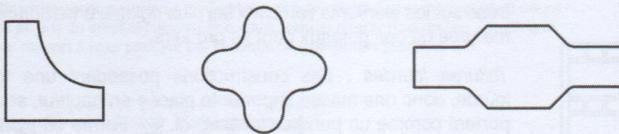
Forme polygonale asymétrique ou comportant des ailes, volumes en retrait ou volumes en saillie
Dans ce type de configuration, il est important de limiter deux types de phénomènes : les oscillations différentielles des diverses parties du bâtiment et la torsion d'axe vertical. Les deux phénomènes ont une même cause, évoquée plus haut : répartition asymétrique de la rigidité latérale dans au moins une direction. Par exemple, si le plan du bâtiment est en forme de L, T ou X, la rigidité latérale des ailes dans une direction donnée est très différente et les diverses parties de l'ouvrage oscillent d'une manière non synchronisée, allant parfois dans les sens contraires les unes par rapport aux autres. Dans les angles rentrants à la jonction des ailes ou de toutes parties ayant une rigidité différente (au droit des volumes en retrait ou en saillie), les dommages sismiques sont souvent importants, les constructions s'effondrent parfois. Quant à la torsion, elle est à l'origine de dommages situés à l'extrémité des ailes, où les déformations sont les plus grandes (fig. 12).



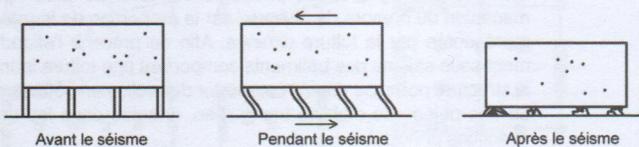
- 13 Fractionnement des bâtiments en blocs de plan rectangulaire. Cette solution est coûteuse et nécessite des joints vides d'une largeur suffisante pour prévenir l'entrechoquement pendant les tremblements de terre.



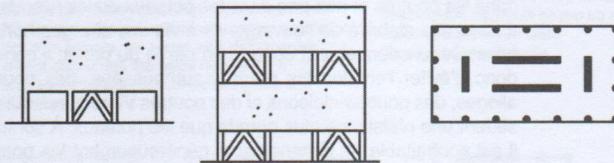
- 14 Compensation de l'asymétrie de la forme du plan par une répartition symétrique de la rigidité de la structure. Cette solution limite les oscillations différentielles des diverses parties du bâtiment, et par là les dommages dans les angles rentrants.



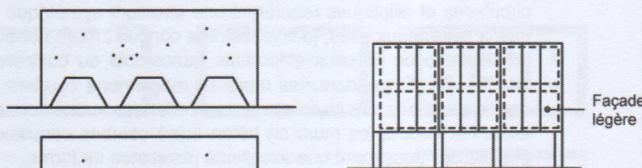
- 15 Variation progressive des dimensions du plan de l'immeuble. Cette solution n'empêche pas les oscillations différentielles, mais limite leurs effets.



- 16 Effet de « niveau souple ». Les déformations provoquées par les séismes sont concentrées dans les niveaux « souples », ce qui peut entraîner leur écrasement (cas relativement fréquent).

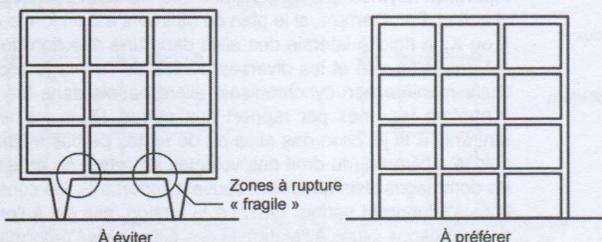


- 17 Solution 1 pour prévenir l'effet de « niveau souple » : murs en béton armé ou palées de stabilité en acier placés en façade ou à l'intérieur du bâtiment



- 18 Solution 2 pour prévenir l'effet de « niveau souple » : variation progressive de la rigidité des éléments porteurs verticaux

- 19 Solution 3 pour prévenir l'effet de « niveau souple » : structure « souple » à tous les niveaux, l'effet d'opacité ou de transparence étant obtenu par des façades légères



- 20 Descente de charges indirecte due à la non-superposition des poteaux : elle devrait être évitée. Les zones entourées sont sujettes à une rupture fragile, donc instantanée.

Trois types de solutions permettent de supprimer ou du moins de limiter ces phénomènes :

- fractionnement du bâtiment en blocs de forme rectangulaire, dont la conception a été abordée plus haut. Ce fractionnement s'effectue au moyen de joints de séparation vides de tout matériau, appelés joints parasismiques (fig. 13). La solution convient surtout dans les cas où des joints de dilatation thermique ou des joints de tassement différentiel (de rupture) sont nécessaires. Créer des joints spécifiquement pour des raisons parasismiques est coûteux et difficilement envisageable pour les bâtiments-tours, car la largeur des joints doit être suffisante pour prévenir l'entrechoquement des blocs contigus. Les largeurs minimales sont de 4 cm en zones Ia, Ib et de 6 cm en zones II et III, mais elles peuvent atteindre plusieurs dizaines de centimètres dans le cas des immeubles de grande hauteur. Bien entendu, les joints de dilatation et de tassement doivent être traités comme des joints parasismiques ;
- compensation de l'asymétrie de la forme du plan par une répartition symétrique de la rigidité de la structure car, in fine, c'est celle-ci qui assure la résistance du bâtiment aux séismes. Les zones potentiellement flexibles (de plus faible largeur ou profondeur), peuvent être raidies par des éléments de contreventement (fig. 14) ;
- variation progressive de la largeur du bâtiment (fig. 15). Cette solution n'empêche pas les oscillations différentielles, mais limite considérablement leurs effets, car les angles rentrants, où se concentrent les contraintes, sont supprimés.

FORME DES BÂTIMENTS EN ÉLÉVATION

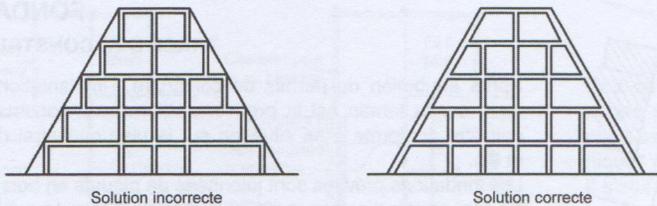
Largeur et profondeur constantes sur toute la hauteur

Cette forme convient parfaitement. Mais lors de la conception du système porteur, il est important d'éviter l'effet de « niveau souple » et les descentes de charges indirectes (en forme de baïonnette).

Effet de « niveau souple » : Les séismes imposent aux constructions des déformations (et non pas des charges externes comme le vent). Lorsqu'un niveau est significativement moins rigide que les autres (40 % de différence suffisent), il est appelé « niveau souple ». Les déformations des bâtiments provoquées par les séismes sont concentrées sur ces niveaux. Si elles deviennent importantes, ce qui se produit lors de séismes forts ou moyens, la structure ne peut les tolérer. Une conséquence fréquente est l'écrasement du niveau (fig. 16). L'effet de niveau souple se produit généralement en rez-de-chaussée d'immeubles, principalement pour deux raisons. D'une part, les rez-de-chaussée comportent souvent de vastes locaux sans cloisons, une façade vitrée ou de nombreuses ouvertures. D'autre part, leur hauteur est souvent plus grande que celle des autres niveaux. Or la rigidité latérale des éléments verticaux décroît avec le cube de leur hauteur. Lorsqu'on double la hauteur d'un poteau, sa rigidité est divisée par 8. Trois types de solutions permettent d'éviter l'effet de niveau souple tout en conservant de grands locaux et la « transparence » des façades :

- placer au moins deux murs en béton armé ou palées de stabilité en acier dans chaque direction principale, d'une manière symétrique pour éviter la torsion d'ensemble sous charges horizontales. Ces éléments peuvent être situés en façade (solution plus efficace), ou à l'intérieur, formant p. ex. un ou plusieurs noyaux rigides (fig. 17) ;
- augmenter progressivement vers le haut la rigidité des éléments porteurs verticaux (fig. 18). Cette solution peut prévenir l'écrasement du niveau souple, sans toutefois empêcher certains dommages en cas de séisme fort ;
- prévoir une structure en portiques de même rigidité à tous les niveaux (fig. 19). Cela suppose l'emploi de cloisons et de façades légères, afin de ne pas limiter la déformabilité de certains poteaux.

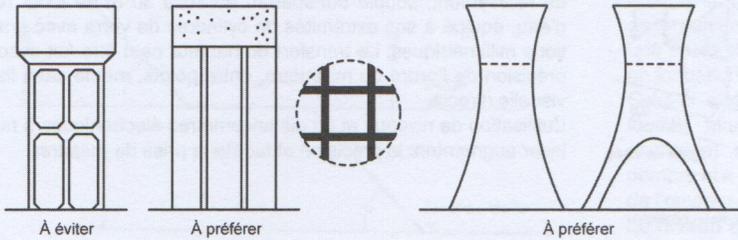
Descente de charges indirecte : Lorsque les porteurs verticaux (poteaux ou murs) ne sont pas superposés, ce qui n'est pas rare entre le rez-de-chaussée et les niveaux supérieurs, les tronçons des poutres qui assurent le transfert horizontal des charges sont sujets à une rupture fragile, donc instantanée, à la différence des poutres habituelles qui ont un comportement plus ductile et acceptent donc de grandes déformations avant de se rompre. Par conséquent, la descente de charges devrait toujours être directe (fig. 20).



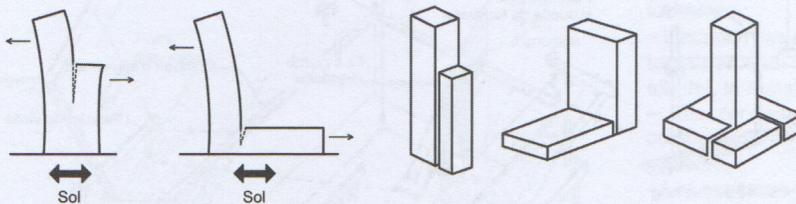
21 Forme pyramidale : utiliser des poteaux inclinés. Les poteaux portés par des poutres ne conviennent pas.



22 Bâtiments en forme de pyramide inversée : cette forme ne devrait pas être utilisée en zone sismique.

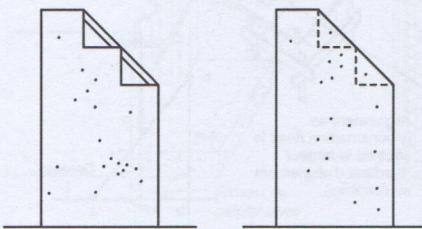


23 Conception des châteaux d'eau. Afin de limiter les inconvénients du « comportement en pendule inversé », la structure supportant le réservoir devrait comporter des voiles en béton armé ou constituer une coque. Lors d'un séisme fort, l'effondrement de châteaux d'eau portés par des poteaux est fréquent.

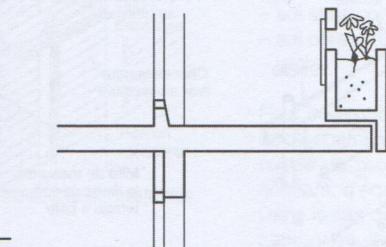


24 Les étages en retrait n'oscillent pas à la même fréquence que les niveaux inférieurs, d'où des dommages sismiques importants.

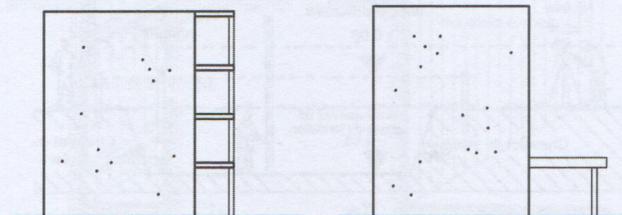
25 Fractionnement des bâtiments dont les niveaux inférieurs ont une plus grande largeur. Les joints parasismiques, qui doivent être vides de tout matériau, assurent ici également la fonction de joints de rupture.



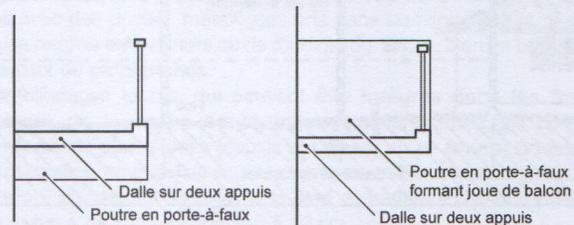
26 Variation progressive de la rigidité de la structure au droit des retraits d'étage. Cette solution n'empêche pas les oscillations différentielles, mais elle en limite considérablement les effets.



27 À éviter : charges lourdes en bout des porte-à-faux.



28 Éléments et niveaux en saillie importante : la meilleure solution consiste à utiliser des appuis extérieurs, donc à supprimer le porte-à-faux.



29 Porte-à-faux : il est préférable d'utiliser des poutres en console plutôt que des dalles en console.

Forme pyramidale: Une forme pyramidale est un excellent choix à condition d'assurer une descente de charges directe en utilisant des poteaux inclinés (fig. 21). Les poteaux verticaux portés par des poutres ne conviennent pas pour des raisons précisées au paragraphe précédent. Par ailleurs, le rez-de-chaussée ne devrait pas constituer un niveau souple.

Forme en pyramide inversée : En zone sismique, ce type de forme devrait être évité autant que possible (fig. 22). Les mouvements sismiques soumettent la base de tels ouvrages à des contraintes très élevées. On parle du « comportement en pendule inversé ». Toutes les configurations qui placent plus de la moitié de la masse du bâtiment dans le tiers supérieur de leur hauteur entrent dans ce cas de figure, y compris les châteaux d'eau. Afin d'optimiser la résistance aux séismes des châteaux d'eau, leur structure devrait comporter des voiles en béton armé ou constituer une coque, de préférence à base élargie (fig. 23).

Bâtiments comportant un ou plusieurs niveaux en retrait : Les étages en retrait étant moins rigides que les niveaux inférieurs, ils n'oscillent pas à la même fréquence ; ils se déforment donc à certains moments dans les sens contraires (fig. 24). Les oscillations différentielles peuvent être à l'origine de dommages graves. Elles peuvent être supprimées ou limitées de deux manières :
- fractionnement du bâtiment en blocs de largeur constante. Cette solution convient pour les bâtiments-tours associés à des niveaux inférieurs de plus grandes dimensions (fig. 25). Les joints parasismiques jouent ici également le rôle de joints de rupture ;
- variation progressive de la rigidité de la structure (fig. 26). Dans ce cas, la structure est apparente au droit des retraits et participe donc du parti architectural.

Bâtiments comportant des balcons, auvents ou des niveaux en saillie : Les éléments constructifs ou niveaux en porte-à-faux de faible portée ne posent pas de problème, si toutefois ils ne portent pas de charges importantes à leur extrémité (fig. 27) ; il est raisonnable de limiter leur portée à 2 m. Par contre, les grands porte-à-faux subissent fréquemment des dommages sismiques graves (rupture suivie d'effondrement de l'élément en porte-à-faux). La meilleure solution pour les éléments et niveaux en saillie importante consiste à utiliser des appuis extérieurs, donc à supprimer le porte-à-faux (fig. 28). Si l'effet de porte-à-faux est recherché, il est préférable d'utiliser des poutres en console plutôt que des dalles en console (fig. 29).