Manuel d'exercices et d'examens corrigés

CONCEPTION ARCHITECTURALE PARASISMIQUE

Structures en béton armé

Atelier de structure 2

Pr. Mouhcine BEN AICHA
Ecole Nationale d'Architecture de Rabat

Finalité du manuel

Donner à l'étudiant architecte les réflexes de conception permettant d'anticiper le comportement sismique dès l'esquisse : choix du site, forme, régularité, répartition des masses et rigidités, contreventement, détails constructifs et choix des matériaux.

Avant-propos

Concevoir parasismique ne signifie pas transformer l'architecte en calculateur de structures. Il s'agit avant tout de comprendre comment la forme, la masse, la hauteur, les matériaux, la disposition des ouvertures, la configuration d'un rez-de-chaussée ouvert ou encore la présence d'ouvrages en toiture influencent le comportement dynamique d'un bâtiment soumis à un séisme. Le calcul intervient ensuite pour dimensionner et vérifier une conception qui doit être, dès les premières étapes du projet architectural, cohérente avec les principes fondamentaux de la conception parasismique.

Ce manuel est élaboré à partir des deux supports de cours consacrés à la conception parasismique des constructions en béton armé et à la conception parasismique des constructions en terre selon le RPCTerre 2011, complétés par trois séquences expérimentales illustrant l'influence de la masse, de la hauteur et des matériaux sur la réponse dynamique des structures. Il s'appuie également sur les six versions d'examen du module Structure 2, dont les situations et problématiques ont été intégrées sous forme d'exemples, d'études de cas et d'applications pédagogiques.

Principe directeur

Un bon projet parasismique commence par une bonne décision architecturale : régularité, continuité, symétrie, légèreté, ductilité et chemin clair des efforts.

Mode d'emploi

- Lire attentivement le cours afin d'assimiler les principes fondamentaux de la conception architecturale parasismique.
- Apprendre à repérer, dès l'esquisse architecturale, les configurations à risque et à proposer des solutions de conception parasismique adaptées.
- Traiter les études de cas avant de consulter les corrigés, afin de développer progressivement une démarche d'analyse et de réflexion.
- S'entraîner à partir des sujets d'examen corrigés et les utiliser comme outil d'auto-évaluation pour vérifier la maîtrise des connaissances acquises.

Sommaire

Partie I — Comprendre le séisme comme problème architectural

1. Du mouvement du sol au mouvement du bâtiment

2. Masse, hauteur, rigidité, matériau et résonance

Partie II — Concevoir une architecture favorable

3. Sol, implantation et fondations

4. Forme, régularité en plan et en élévation

5. Torsion, contreventement et distribution de la rigidité

6. Niveau souple et poteau court

7. Portiques, maçonneries de remplissage et ductilité

8. Couplage des bâtiments et ouvrages en toiture

Partie III — Construire parasismique en terre

9. Adobe et pisé : matériau, murs et ouvertures

10. Fondations, raidisseurs, chaînages, planchers et toitures

Partie IV — Méthode de diagnostic architectural

11. Lire un projet en 10 questions

12. Études de cas corrigées

Partie V — Examens corrigés

13. Corrigé transversal des questions communes

14. Corrigés des six versions d'examen

PARTIE I : Comprendre le séisme comme problème architectural

1. Du mouvement du sol au mouvement du bâtiment

Le séisme impose un mouvement à la base du bâtiment. Par inertie, les masses de la construction tendent à conserver leur état de mouvement: il apparaît alors des efforts dans les éléments porteurs. Les oscillations peuvent être horizontales, verticales et torsionnelles. La sécurité ne dépend donc pas uniquement de la résistance statique des sections.

Trois stratégies de protection

1) rechercher une résistance suffisante ; 2) rechercher une déformabilité/ductilité permettant de dissiper l'énergie sans perte de stabilité ; 3) isoler l'ouvrage du sol lorsque le système le justifie.

Le rôle de l'architecte

- Éviter les discontinuités brutales de masse, de rigidité et de géométrie.
- Organiser un système de contreventement lisible dans les deux directions principales.
- Réduire les concentrations de contraintes créées par les angles rentrants et retraits brusques.
- Prévoir les joints nécessaires entre blocs susceptibles d'osciller différemment.
- Limiter les masses inutiles, surtout en hauteur.

2. Masse, hauteur, rigidité, matériau et résonance

Les trois séquences expérimentales du cours montrent une idée essentielle: deux structures placées sur la même table vibrante ne répondent pas nécessairement de la même façon. Leur réponse dépend de leurs caractéristiques propres.

2.1 Influence de la masse

À géométrie comparable, une modification de la masse modifie la réponse dynamique. La séquence vidéo oppose notamment une structure plus lourde et une structure plus légère et met en évidence des conditions de résonance différentes selon la vitesse du mouvement imposé.

Réflexe de conception

Réduire les masses non indispensables et éviter leur concentration en partie haute. Une masse importante produit des forces d'inertie plus élevées et peut déplacer la période propre de la structure.

2.2 Influence de la hauteur

La séquence vidéo compare des modèles de hauteurs différentes. Le modèle élancé répond davantage aux excitations lentes, alors que le modèle plus bas répond davantage aux excitations rapides. La hauteur est donc un paramètre majeur de la période propre.

2.3 Influence des matériaux

À géométrie proche, des systèmes constitués de matériaux ou d'éléments de rigidités différentes ne présentent pas la même déformabilité. Le choix du matériau ne doit donc jamais être séparé du choix du système porteur et du détail des assemblages.

À retenir: La question pertinente n'est pas « quel matériau résiste le plus ? », mais « quel système masse–rigidité–ductilité–assemblages répond le mieux à l'action sismique ? »

PARTIE II : Concevoir une architecture favorable

3. Sol, implantation et fondations

Le cours insiste sur l'interaction entre période du sol et période de la structure. Une proximité de périodes peut amplifier la réponse par résonance. Le choix du site, l'étude géotechnique et l'adaptation du système structural au sol constituent donc des décisions de conception à part entière.

- Sur sol mou, une structure flexible et élancée peut être particulièrement défavorable.
- Sur terrain en pente, les différences de hauteur libre des poteaux peuvent créer des poteaux courts.
- Lorsque des tassements différentiels sont à craindre, le fractionnement peut concerner également les fondations.

Diagnostic rapide

Avant de dessiner la structure : nature du sol ? pente ? hétérogénéité ? risque de tassement ? niveau de fondation uniforme ?

4. Forme, régularité en plan et en élévation

Une construction favorable présente une forme simple, compacte et une rigidité aussi équilibrée que possible dans les directions horizontales. Les plans simples à deux axes de symétrie sont présentés dans le cours comme des formes favorables.

4.1 Régularité en plan

- Privilégier des formes simples et compactes.
- Limiter les retraits et angles rentrants.
- Éviter une répartition très asymétrique des éléments rigides.
- Pour une forme complexe, fractionner en blocs simples par joints parasismiques.

4.2 Régularité en élévation

- Éviter les retraits brusques et changements importants de largeur.
- Éviter les variations brutales de masse ou de rigidité entre niveaux successifs.
- Le support RPS du cours retient une variation de masse/rigidité entre étages successifs ne dépassant pas 30 %.

4.3 Formes en L, T, U et décrochements

Les angles rentrants concentrent les contraintes et favorisent des mouvements différentiels. Deux familles de réponses sont présentées: fractionner la forme complexe en blocs plus simples ou adoucir progressivement la variation de largeur.

Choix architectural

Un joint parasismique transforme une forme complexe en plusieurs structures simples; un retrait progressif conserve l'unité architecturale mais réduit la brutalité géométrique.

5. Torsion, contreventement et distribution de la rigidité

Une distribution asymétrique des murs, voiles, noyaux ou palées de stabilité par rapport à la masse du plancher peut entraîner une torsion d'ensemble. Le bâtiment ne se déplace plus seulement en translation: il tourne.

- Disposer les éléments de contreventement de manière équilibrée.
- Assurer le contreventement dans chacune des deux directions principales.
- Utiliser, selon le projet, voiles en béton armé, noyaux rigides, portiques ou triangulations.
- Compenser une zone flexible par des éléments rigides judicieusement placés.

Erreur classique

Placer tous les voiles d'un seul côté du plan peut augmenter fortement la torsion, même si la quantité totale de voiles paraît suffisante.

6. Niveau souple et poteau court

6.1 Niveau souple

Un niveau nettement moins rigide que les autres concentre les déformations. Le cours indique qu'une différence significative d'environ 30 % caractérise un niveau souple. Le rez-de-chaussée ouvert d'un commerce ou d'un parking constitue le cas typique.

- Ajouter au moins deux voiles ou palées de stabilité, disposés symétriquement.
- Faire varier progressivement la rigidité plutôt que brutalement.
- Conserver une rigidité comparable aux différents niveaux en utilisant des façades/cloisons légères.
- Dans certains projets, recourir à l'isolation parasismique.

6.2 Poteau court

Le poteau court apparaît lorsque des poteaux d'un même niveau n'ont pas la même hauteur libre ou lorsqu'un remplissage rigide bloque partiellement leur déformation. Le poteau le plus court devient beaucoup plus rigide et attire des efforts importants, avec un risque de rupture fragile.

- Éviter les murets rigides qui réduisent partiellement la hauteur libre des poteaux.
- Sur pente, utiliser des voiles aux angles ou un noyau central lorsque le parti structural le permet.
- Employer des allèges non rigides lorsque la façade doit conserver une bande basse.
- Renforcer/contreventer le niveau afin de ne pas laisser les poteaux courts concentrer l'action sismique.

7. Portiques, maçonneries de remplissage et ductilité

Le cours présente le système portique poteaux–poutres comme particulièrement sensible lorsque le confinement des zones critiques est insuffisant. Le bon comportement dépend de la ductilité et du détail des zones fortement sollicitées.

- Renforcer le confinement des zones critiques des poteaux et nœuds.
- Éviter les mécanismes fragiles et rechercher une capacité de déformation.
- Ne pas considérer le remplissage en maçonnerie comme neutre : il modifie la rigidité et peut subir des ruptures hors plan.
- Pour les parois reprenant des efforts horizontaux, utiliser des dispositions de maçonnerie armée adaptées.
- Éviter les systèmes mixtes incohérents poteaux–maçonnerie porteuse.

Architecte + ingénieur

L'architecte définit la logique du système et évite les configurations dangereuses ; l'ingénieur dimensionne, détaille le confinement et vérifie la résistance et les déformations.

8. Couplage des bâtiments et ouvrages en toiture

8.1 Couplage

Deux bâtiments voisins peuvent osciller avec des amplitudes, périodes et phases différentes. Une passerelle ou un escalier rigidement connecté aux deux structures peut être endommagé ou provoquer des interactions défavorables.

- Préférer une structure de liaison autostable et indépendante.
- Prévoir des joints parasismiques permettant les déplacements relatifs.
- Éviter de bloquer deux bâtiments de caractéristiques dynamiques différentes par une liaison rigide non étudiée.

8.2 Ouvrages en toiture

- Limiter leur élancement.
- Réduire leur masse.
- Prévoir un retrait progressif.
- Assurer leur ancrage et leur stabilité propre.

Pourquoi la toiture est critique ?

Une masse placée en hauteur amplifie les effets d'inertie et peut augmenter les déplacements. Réservoirs, équipements techniques et superstructures doivent être intégrés au projet parasismique.

PARTIE III : Construire parasismique en terre

9. Adobe et pisé: matériau, murs et ouvertures

9.1 Pisé et adobe

Le pisé est une terre crue compactée dans des banches successives. L'adobe est constitué de briques de terre crue moulées puis séchées. Le support de cours exige une caractérisation géotechnique préalable du matériau.

- Terres sableuses: stabilisation au ciment indiquée dans le cours, à raison de 4 à 8 %.
- Terres argileuses : stabilisation à la chaux aérienne éteinte indiquée dans le cours, à raison de 6 à 10 %.

9.2 Géométrie des murs

- Hauteur maximale : 4 m pour un niveau ; 6,5 m pour deux niveaux.
- Élancement maximal : 6 pour un niveau ; pour deux niveaux, 5 au premier niveau et 6 au second.
- Épaisseur minimale des murs porteurs en pisé ou en adobe: 40 cm.
- Épaisseur minimale des murs de séparation : 20 cm.

9.3 Ouvertures

- Disposition symétrique des ouvertures recommandée; Largeur d'une ouverture ≤ 1,20 m.
- Distance d'une ouverture à l'extrémité du mur ≥ 1,20 m; Distance entre deux ouvertures ≥ 1,20 m.
- Somme des largeurs d'ouvertures ≤ 40 % de la longueur du mur; Appui du linteau de chaque côté ≥ 50 cm.

10. Fondations, raidisseurs, chaînages, planchers et toitures

10.1 Fondations

Le support recommande fortement les semelles filantes en béton armé pour des raisons parasismiques.

Nombre de niveaux	Sol	Largeur de semelle
1	ferme (> 2 bars)	1,0 × épaisseur du mur
1	moyennement ferme (1,5–2 bars)	1,5 × épaisseur du mur
2	ferme	1,5 × épaisseur du mur
2	moyennement ferme	2,0 × épaisseur du mur

- Profondeur enterrée minimale indiquée: 60 cm sur sol ferme et 80 cm sur sol moyennement ferme.
- Surélévation du haut de fondation: 50 cm en zone d'inondations occasionnelles; 20 cm dans les autres régions.

10.2 Renforcement vertical

- Raidisseur en béton armé recommandé aux intersections de murs perpendiculaires.
- Pour un mur long, prévoir contrefort/contreventement en respectant les limites données dans le cours ; distance maximale 5 m.
- Les raidisseurs en maçonnerie sont déconseillés pour des raisons parasismiques.

10.3 Chaînage, plancher et toiture

- Dalle en béton armé recommandée entre deux niveaux.
- Chaînage au niveau du plancher nécessaire ; hauteur recommandée : 15 cm minimum.
- Chaînage horizontal au niveau de la toiture nécessaire, en béton armé ou en bois.
- En pisé, hauteur optimale de chaque banchée : 80 cm ; décoffrage aussitôt après compactage.
- La protection contre l'eau repose notamment sur pente, enduit adapté, étanchéité et débords de toiture.

PARTIE IV : Méthode de diagnostic architectural

11. Lire un projet en 10 questions

1. Le site et le sol sont-ils compatibles avec le système structural envisagé ?

2. Le plan est-il simple, compact et suffisamment symétrique ?

3. Existe-t-il des angles rentrants, ailes longues ou formes en L/T/U à fractionner ?

4. Les masses sont-elles réparties régulièrement, notamment en hauteur ?

5. La rigidité varie-t-elle brutalement d'un étage à l'autre ?

6. Le contreventement existe-t-il dans les deux directions principales et est-il équilibré ?

7. Des poteaux courts peuvent-ils être créés par la pente, des allèges ou des remplissages partiels ?

8. Les maçonneries et cloisons risquent-elles de modifier localement la rigidité ?

9. Les bâtiments voisins, passerelles et joints autorisent-ils les déplacements relatifs ?

10. Les équipements et ouvrages en toiture sont-ils légers, bas, stables et correctement ancrés ?

Méthode d'examen

Identifier le phénomène → expliquer le mécanisme → décrire le dommage attendu → proposer au moins trois solutions cohérentes → préciser laquelle relève du parti architectural et laquelle relève du dimensionnement.

12. Études de cas

Cas 1 — Immeuble sur pente: poteaux courts

Diagnostic : Des murets rigides réduisent la hauteur libre de certains poteaux. Ceux-ci deviennent plus rigides, attirent davantage d'efforts et peuvent rompre de manière fragile.

- Éviter les murets rigides partiels ou les désolidariser du portique.
- Introduire des voiles/noyau de contreventement adaptés et symétriques.
- Repenser l'implantation sur pente pour limiter les différences de hauteur libre.

Cas 2 — Centre commercial à RDC ouvert

Diagnostic : Le rez-de-chaussée est nettement moins rigide que les étages supérieurs : concentration de dérive et mécanisme de niveau souple.

- Ajouter voiles ou palées de stabilité au RDC.
- Répartir ces éléments symétriquement pour limiter la torsion.
- Rendre la transition de rigidité plus progressive ou alléger les cloisonnements supérieurs.

Cas 3 — Deux tours reliées par une passerelle

Diagnostic : Les tours n'oscillent pas en phase ; la passerelle subit les déplacements relatifs et peut transmettre des efforts non prévus.

- Rendre la passerelle structurellement indépendante/autostable.
- Prévoir des joints et appuis autorisant les déplacements relatifs.
- Éviter une liaison rigide bilatérale entre structures de comportements dynamiques différents.

Cas 4 — Réservoirs et panneaux en toiture

Diagnostic : La masse et l'élancement en toiture augmentent les effets d'inertie et les oscillations au sommet.

- Réduire masse et hauteur des équipements.
- Rechercher un retrait progressif et une implantation proche des zones rigides.
- Ancrer et contreventer spécifiquement la superstructure et les équipements.

Cas 5 — Immeuble sur sol mou

Diagnostic : Le sol mou peut amplifier les mouvements et créer une interaction défavorable avec une structure flexible ; les tassements différentiels aggravent les dommages.

- Réaliser une étude géotechnique et adapter le système de fondation.
- Éviter une configuration structurale dont la période est défavorable au site.
- Régulariser et rigidifier de manière cohérente le système de contreventement.

Cas 6 — Portique avec remplissage non armé

Diagnostic : Le portique seul est sensible aux déformations ; les remplissages non armés fissurent, peuvent tomber et créent des variations de rigidité.

- Ajouter un système de contreventement explicite: voiles/noyaux/palées.
- Traiter les remplissages par dispositions adaptées: raidisseurs, armatures ou désolidarisation selon le rôle choisi.
- Assurer la ductilité et le confinement des zones critiques du portique.

PARTIE V : Examens corrigés

13. Corrigé transversal des questions communes

13.1 Cinq effets destructeurs majeurs: modèle de réponse

Effet	Mécanisme	Réponse de conception
Nature du sol	Résonance/amplification et tassements possibles.	Étude géotechnique, adaptation structure–sol, fondations adaptées.
Comportement torsionnel	Asymétrie de rigidité et rotation du plancher.	Répartition symétrique des éléments rigides, noyaux/voiles équilibrés.
Niveau souple	Concentration des dérives dans un étage moins rigide.	Voiles/palées, rigidité progressive, homogénéisation des niveaux.
Poteau court	Élément raccourci plus rigide, efforts élevés et rupture fragile.	Éviter remplissage partiel, allèges souples, voiles/noyau adaptés.
Portique + maçonnerie	Interaction non maîtrisée, fissuration/effondrement des remplissages.	Contreventement explicite, confinement, maçonnerie armée/raidie ou désolidarisée.
Couplage de bâtiments	Oscillations non synchronisées et choc/rupture des liaisons.	Joints, liaison indépendante, appuis autorisant les déplacements.
Ouvrages en toiture	Masse en hauteur et oscillations amplifiées.	Allègement, faible élancement, retrait progressif, ancrage.
Irrégularité géométrique	Angles rentrants et concentrations de contraintes.	Fractionnement en blocs, joints sismiques, variation progressive de largeur.

13.2 Régularité en plan et en élévation

Réponse attendue : privilégier un plan simple, compact et symétrique ; répartir la rigidité de façon équilibrée ; limiter les décrochements et angles rentrants ; fractionner les formes complexes si nécessaire ; maintenir une continuité des masses, rigidités et éléments verticaux en élévation ; éviter les étages souples et les retraits brusques. Le support RPS du cours rappelle notamment que les variations de masse et de rigidité entre deux étages successifs ne doivent pas dépasser 30 %.

13.3 Lecture des trois vidéos

- Masses différentes: la masse modifie la réponse et la fréquence propre ; éviter les concentrations de masse, surtout en toiture.
- Hauteurs différentes: une structure plus haute/élancée a une période plus longue ; une structure basse est plus sensible aux excitations rapides.
- Matériaux différents: la rigidité et la déformabilité du système changent avec le matériau et les assemblages ; le comportement ne dépend pas de la seule résistance.

14. Corrigés des six versions d'examen

Version 1

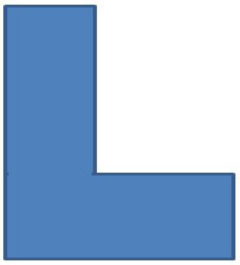
1/ À part l'effet de poteau court, citez et analysez cinq autres effets destructeurs majeurs des séismes. Pour chacun, expliquez son principe ou sa définition, puis proposez des solutions techniques permettant d'améliorer la stabilité du bâtiment.

2/ étude de cas : Un immeuble de bureaux de 5 étages a été construit sur un terrain en pente. Pour compenser la différence de niveau, des murets en béton armé ont été placés au rez-de-chaussée entre les poteaux, réduisant ainsi leur hauteur effective. Lors d'un séisme, plusieurs poteaux courts ont subi des ruptures soudaines.

a) Identifiez les problèmes liés à cette conception.
b) Proposez trois solutions architecturales ou structurelles permettant de réduire ce risque.

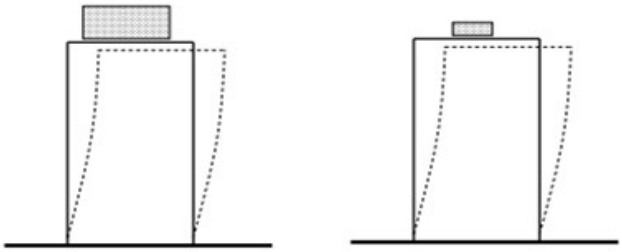
3/Quelles sont les recommandations parasismiques concernant la régularité en plan et en élévation d'un bâtiment ?

4/ Quelles sont les solutions parasismiques pour que le bâtiment suivant résiste aux secousses sismiques?



Vue en élévation

5/ Analysez le schéma suivant (voir la Vidéo): **Masses différentes**



6/ Lors de la conception de fondations pour un mur porteur en adobe dans une zone sismique, quel critère détermine la largeur minimale des semelles filantes ?

a) Le rapport entre la hauteur et l'épaisseur du mur porteur.
b) La contrainte admissible du sol et le nombre de niveaux de la construction.
c) Le pourcentage d'argile dans la composition de l'adobe.
d) La largeur des ouvertures dans les murs porteurs.

7/ Quelle est l'épaisseur minimale des murs de séparation en adobe pour des constructions parasismiques ?

a) 15 cm b) 20 cm c) 30 cm d) 40 cm

8/ Les murs en pisé sont généralement construits en une seule couche.

A : vrai B : faux

Correction version 1

1. Effets destructeurs majeurs des séismes

À part **l'effet de poteau court**, plusieurs configurations peuvent conduire à un comportement défavorable du bâtiment pendant un séisme. Parmi elles, on peut citer les cinq effets suivants.

1.1. Nature du sol et phénomène de résonance

Le comportement sismique d'un bâtiment dépend non seulement de sa structure, mais également des caractéristiques du sol sur lequel il est implanté. Le cours souligne qu'il faut éviter que la période propre du bâtiment soit proche de celle du sol, car cette proximité peut provoquer un phénomène de **résonance** et amplifier fortement les oscillations.

Les structures souples peuvent notamment présenter un comportement défavorable sur des sols mous lorsque leurs périodes de vibration deviennent proches.

Solutions :

- réaliser une étude géotechnique avant la conception ;
- adapter le système structural à la nature du sol ;
- privilégier, lorsque cela est possible, un terrain présentant de bonnes caractéristiques mécaniques ;
- adapter le type et la profondeur des fondations ;
- éviter une configuration bâtiment-sol susceptible de favoriser la résonance.

1.2. Torsion du bâtiment

La torsion apparaît notamment lorsque les éléments rigides participant au contreventement sont disposés de manière **asymétrique** par rapport au centre de gravité du bâtiment.

Lors du séisme, le bâtiment ne se déplace alors pas uniquement par translation : il tend également à tourner autour d'un axe vertical. Certaines façades ou certains poteaux peuvent ainsi subir des déplacements et des efforts beaucoup plus importants que d'autres.

Solutions :

- adopter une forme aussi simple et symétrique que possible ;
- répartir les éléments de contreventement de manière équilibrée ;
- disposer des voiles, noyaux ou palées de stabilité dans les zones trop flexibles ;
- assurer une rigidité suffisante dans les deux directions principales du bâtiment ;
- rapprocher autant que possible la distribution des rigidités de celle des masses.

1.3. Niveau souple

Un **niveau souple** est un étage dont la rigidité latérale est nettement plus faible que celle des étages voisins. Cette situation apparaît fréquemment lorsqu'un rez-de-chaussée est largement ouvert pour

accueillir des parkings, des commerces, des halls ou de grandes baies vitrées, alors que les étages supérieurs comportent davantage de murs ou de cloisons rigides.

Pendant le séisme, les déplacements se concentrent alors au niveau le moins rigide. Les poteaux de cet étage peuvent subir de fortes déformations et atteindre rapidement leur capacité ultime.

Solutions :

- éviter les variations brutales de rigidité entre étages ;
- introduire des voiles, noyaux ou palées de contreventement au niveau ouvert ;
- répartir ces éléments de manière régulière et symétrique ;
- assurer la continuité verticale du système de contreventement ;
- rechercher une transition progressive de rigidité entre les différents niveaux.

1.4. Interaction entre portique et remplissage en maçonnerie

Les panneaux de remplissage en maçonnerie ne sont pas toujours neutres vis-à-vis du comportement sismique. Même lorsqu'ils ne sont pas considérés comme porteurs dans le calcul, ils peuvent augmenter localement la rigidité du portique et modifier la manière dont les efforts sont distribués.

Une disposition irrégulière des remplissages peut entraîner des concentrations de contraintes, des fissurations, voire des ruptures hors plan des panneaux.

Solutions :

- tenir compte de l'influence réelle des remplissages dès la conception ;
- éviter leur répartition irrégulière ;
- prévoir un système de contreventement clairement identifié ;
- utiliser, lorsque nécessaire, des maçonneries armées ou raidies ;
- assurer un bon confinement des poteaux et des nœuds ;
- éventuellement désolidariser les remplissages de l'ossature lorsque le principe structural retenu l'exige.

1.5. Couplage ou interaction entre bâtiments

Deux bâtiments voisins n'ont pas nécessairement la même période, la même amplitude ni la même phase d'oscillation. Lorsqu'ils sont trop proches ou lorsqu'ils sont reliés rigidement, ils peuvent subir des **déplacements relatifs importants**.

Cela peut provoquer :

- des chocs entre bâtiments ;
- l'endommagement d'une passerelle ou d'un élément de liaison ;
- une transmission d'efforts non prévue d'un bâtiment à l'autre.

Solutions :

- prévoir un joint parasismique suffisant entre les bâtiments ;

- permettre les déplacements relatifs ;
- éviter les liaisons rigides entre deux structures présentant des comportements dynamiques différents ;
- concevoir éventuellement la passerelle ou l'élément de liaison comme une structure indépendante.

Remarque : on aurait également pu citer les **ouvrages en toiture**, les irrégularités géométriques ou les concentrations de masse comme autres effets défavorables.

2. Étude de cas : effet de poteau court

a) Identification des problèmes

Le principal problème est la création de **poteaux courts au rez-de-chaussée**.

Les murets en béton armé bloquent une partie de la hauteur des poteaux. La longueur libre de déformation du poteau est donc réduite. Un poteau plus court devient plus rigide qu'un poteau de même section ayant toute sa hauteur libre.

Sous l'action du séisme, il attire alors des efforts importants. Sa faible longueur libre limite sa capacité de déformation et peut conduire à une rupture brutale, notamment par cisaillement.

La situation est aggravée par plusieurs facteurs :

- terrain en pente ;
- variation de hauteur libre entre les poteaux ;
- présence de murets rigides ;
- différence de rigidité entre les travées du rez-de-chaussée ;
- concentration locale des efforts sismiques.

Le problème ne réside donc pas dans le poteau seul, mais dans la **configuration architecturale qui crée artificiellement un élément court et très rigide**.

b) Trois solutions possibles

Solution 1 — Supprimer ou désolidariser les murets partiels

Lorsque cela est compatible avec le projet architectural, on peut supprimer les murets qui réduisent la hauteur libre des poteaux ou les désolidariser de l'ossature afin qu'ils n'interviennent pas dans la rigidité du poteau.

Solution 2 — Repenser l'adaptation du bâtiment à la pente

Il est préférable d'adapter la conception au terrain par des niveaux décalés, des soubassements correctement conçus ou un découpage structural cohérent plutôt que de créer localement des poteaux de hauteurs très différentes.

Solution 3 — Introduire un système de contreventement adapté

Des voiles, noyaux ou autres éléments de contreventement peuvent reprendre une part importante des efforts horizontaux. Ils doivent être correctement répartis et continus afin d'éviter que les poteaux courts deviennent les éléments principalement sollicités.

On peut donc résumer la démarche par : **éviter la création du poteau court → homogénéiser les rigidités → assurer un contreventement cohérent**.

3. Régularité en plan et en élévation

La régularité constitue un principe essentiel de la conception parasismique. Le bâtiment doit présenter un comportement aussi prévisible et homogène que possible. Votre cours distingue explicitement la **régularité en plan** et la **régularité en élévation**.

Régularité en plan

Il est recommandé de :

- privilégier des formes simples, compactes et aussi symétriques que possible ;
- éviter les formes très découpées comportant des angles rentrants importants ;
- assurer une répartition équilibrée des masses et des rigidités ;
- disposer les éléments de contreventement de manière symétrique dans les deux directions principales ;
- limiter les excentricités susceptibles de provoquer de la torsion ;
- fractionner, lorsque nécessaire, une forme complexe en blocs plus simples au moyen de joints sismiques.

Les formes en **L, T, U ou autres configurations très irrégulières** peuvent engendrer des oscillations différentielles et des concentrations de contraintes, notamment au niveau des angles rentrants.

Régularité en élévation

Il est recommandé de :

- conserver autant que possible une continuité des éléments verticaux ;
- éviter les changements brusques de largeur ou de forme ;
- éviter les retraits importants et soudains ;
- assurer la continuité des voiles et autres éléments de contreventement jusqu'aux fondations ;
- éviter les niveaux souples ;
- limiter les variations brutales de masse et de rigidité entre deux niveaux successifs.

Le support de cours précise que **les variations de rigidité et de masse entre deux étages successifs ne doivent pas dépasser 30 %**.

Idée essentielle à retenir : une bonne conception parasismique privilégie la **simplicité, la symétrie, la régularité et la continuité**.

4. Analyse de la forme en L en élévation

Le bâtiment représenté présente une **irrégularité importante en élévation**, caractérisée par un changement brutal de hauteur et de géométrie.

Cette forme peut provoquer une différence de comportement entre la partie haute et la partie basse du bâtiment. Pendant le séisme, les deux zones ne se déforment pas nécessairement de la même manière. Des concentrations de contraintes peuvent alors apparaître au niveau du décrochement.

Solutions possibles

1. Fractionner le bâtiment

Une solution consiste à séparer les deux volumes au moyen d'un **joint parasismique** afin qu'ils puissent osciller indépendamment.

Le cours présente précisément le fractionnement des formes complexes en blocs plus réguliers comme une solution permettant de limiter les effets des oscillations différentielles.

2. Rendre la variation géométrique plus progressive

Au lieu d'un changement brutal de hauteur, il est préférable de concevoir un retrait progressif ou une transition plus douce entre les différents volumes.

Votre support présente cette démarche comme une **variation progressive de la largeur du bâtiment**, permettant notamment de réduire les concentrations de contraintes au droit des angles rentrants.

3. Assurer la continuité du contreventement

Les voiles, noyaux ou autres éléments résistants aux efforts horizontaux doivent rester continus et correctement répartis sur toute la hauteur du bâtiment.

Réponse synthétique attendue : fractionnement par joint parasismique + transition géométrique progressive + continuité et bonne répartition du contreventement.

5. Analyse du schéma : masses différentes

Les deux structures représentées possèdent une configuration comparable mais des **masses différentes**.

L'expérience montre que la masse influence le comportement dynamique de la structure. Une modification de la masse entraîne une modification de ses caractéristiques vibratoires et notamment de sa fréquence propre.

Ainsi, les deux structures n'entrent pas en résonance pour la même fréquence d'excitation.

Lorsque la fréquence de l'excitation s'approche de la fréquence propre d'une structure, les oscillations peuvent devenir beaucoup plus importantes : c'est le **phénomène de résonance**.

Conséquence pour la conception architecturale

La répartition des masses doit donc être prise en considération dès la conception. Il faut notamment :

- éviter les concentrations importantes de masse ;
- éviter les changements brusques de masse d'un niveau à l'autre ;
- limiter les masses importantes placées en hauteur ;
- rechercher une distribution régulière des masses sur toute la hauteur du bâtiment.

À retenir : La masse ne détermine pas seulement l'importance des forces d'inertie ; elle influence également le comportement dynamique et les conditions de résonance de la structure.

6. Fondations d'un mur porteur en adobe

Réponse correcte : b) La contrainte admissible du sol et le nombre de niveaux de la construction.

La largeur de la semelle n'est donc pas une valeur unique. Elle dépend à la fois de la qualité mécanique du sol et du nombre de niveaux.

7. Épaisseur minimale des murs de séparation en adobe

Réponse correcte : b) 20 cm.

Pour une construction parasismique en terre, l'épaisseur minimale prescrite dans le support pour les **murs de séparation** est de **20 cm**.

Il faut bien distinguer cette valeur de celle des **murs porteurs**, pour lesquels le cours indique une épaisseur minimale de **40 cm** aussi bien en adobe qu'en pisé.

8. « Les murs en pisé sont généralement construits en une seule couche. »

Réponse : B — Faux.

Le pisé est réalisé progressivement dans des **banches successives**. La terre est mise en place puis compactée dans le coffrage avant de poursuivre la construction de la partie suivante du mur.

La bonne formulation pédagogique est donc :

Un mur en pisé n'est pas réalisé en une seule couche ; il est construit progressivement par banchées successives de terre compactée.

Version 2

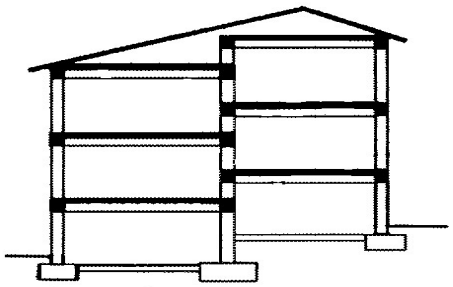
1/ À part l'effet de niveau flexible, citez et analysez cinq autres effets destructeurs majeurs des séismes. Pour chacun, expliquez son principe ou sa définition, puis proposez des solutions techniques permettant d'améliorer la stabilité du bâtiment.

2/ étude de cas : Un centre commercial comprend un rez-de-chaussée largement ouvert pour maximiser l'espace de vente, tandis que les étages supérieurs ont des cloisons rigides. Lors d'un séisme, le rez-de-chaussée a subi une déformation excessive, provoquant l'effondrement partiel du bâtiment.

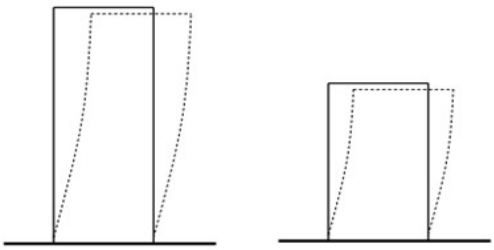
a) Identifiez les problèmes liés à cette conception.
b) Proposez trois solutions architecturales ou structurelles permettant de réduire ce risque.

3/Quelles sont les recommandations parasismiques concernant la régularité en plan et en élévation d'un bâtiment ?

4/ Quelles sont les solutions parasismiques pour que le bâtiment suivant résiste aux secousses sismiques?



5/ Analyser le schéma suivant (voir la Vidéo):
Hauteurs différentes



6/ Quelle méthode est utilisée pour stabiliser la terre dans les constructions en adobe ou pisé ?

a) Ajout de granulats grossiers.
b) Incorporation de ciment ou de chaux.
c) Compactage mécanique intensif.
d) Utilisation de fibres végétales.

7/ Dans une construction en terre, quelle est la hauteur maximale recommandée pour les murs porteurs en adobe dans un bâtiment de deux niveaux ?

a) 4 m b) 5 m c) 6,5 m d) 7 m

8/ Les briques d'adobe sont généralement fabriquées à partir de terre mélangée à de l'eau et à des fibres naturelles :

A : vrai B : faux

Correction version 2

1. Cinq effets destructeurs majeurs autres que le niveau souple

Puisque l'effet de **niveau souple** est exclu de la question, l'étudiant peut citer et analyser cinq effets parmi ceux étudiés dans le cours.

1.1. Effet de poteau court

Un poteau court apparaît lorsqu'une partie de sa hauteur est empêchée de se déformer, par exemple par un muret, une allège rigide ou un remplissage partiel. Sa hauteur libre étant réduite, il devient plus rigide que les autres poteaux.

Lors d'un séisme, il attire alors des efforts plus importants, notamment des efforts tranchants. Sa capacité de déformation étant limitée, il peut subir une rupture brutale et fragile.

Solutions possibles :

- éviter les remplissages partiels rigides entre poteaux ;
- désolidariser les allèges de l'ossature lorsque cela est possible ;
- homogénéiser les hauteurs libres des poteaux ;
- prévoir un système de contreventement adapté afin de ne pas concentrer les efforts sur ces éléments.

1.2. Effet de torsion

La torsion apparaît lorsque la masse et la rigidité ne sont pas réparties de manière équilibrée dans le plan du bâtiment. Lors du séisme, le bâtiment ne se déplace alors pas uniquement par translation : il tend également à tourner autour d'un axe vertical.

Les éléments situés en périphérie peuvent ainsi subir des déplacements et des efforts beaucoup plus importants.

Solutions possibles :

- adopter des plans simples et aussi symétriques que possible ;
- répartir les voiles et autres éléments de contreventement dans les deux directions principales ;
- éviter de concentrer les éléments très rigides sur un seul côté du bâtiment ;
- rechercher une distribution équilibrée des masses et des rigidités.

1.3. Nature du sol et résonance sol–structure

La réponse sismique dépend également de la nature du sol. Certaines structures peuvent présenter une période de vibration proche de celle du terrain. Lorsque les périodes deviennent voisines, le phénomène de **résonance** peut amplifier fortement les oscillations.

Solutions possibles :

- réaliser une étude géotechnique avant la conception ;
- adapter le système structural aux caractéristiques du sol ;
- choisir un système de fondation approprié ;
- éviter, lorsque cela est possible, une association sol–structure favorisant la résonance.

1.4. Couplage ou proximité entre bâtiments

Deux bâtiments voisins peuvent posséder des hauteurs, masses, rigidités et périodes différentes. Ils ne se déplacent donc pas nécessairement de la même manière pendant le séisme.

S'ils sont trop proches, ils peuvent entrer en collision : c'est le phénomène de **martèlement**. Une liaison rigide entre deux bâtiments présentant des comportements dynamiques différents peut également être endommagée.

Solutions possibles :

- prévoir un joint parasismique suffisant entre les bâtiments ;
- permettre leurs déplacements indépendants ;
- éviter les liaisons rigides non étudiées entre deux structures différentes ;
- concevoir les passerelles ou éléments de liaison de manière indépendante lorsque cela est nécessaire.

1.5. Ouvrages en toiture

Les réservoirs, locaux techniques, superstructures ou autres ouvrages placés en toiture sont particulièrement sensibles parce que leur masse est située à une grande hauteur.

Les mouvements peuvent y être amplifiés, et une masse importante placée en hauteur augmente les effets d'inertie.

Solutions possibles :

- réduire la masse des ouvrages en toiture ;
- privilégier des structures légères ;
- limiter leur hauteur et leur élancement ;
- adopter un retrait progressif ;
- assurer correctement leur ancrage et leur stabilité.

2. Étude de cas — Centre commercial avec rez-de-chaussée ouvert

a) Identification des problèmes

La configuration décrite correspond à un **niveau souple au rez-de-chaussée**.

Le rez-de-chaussée est largement ouvert et présente donc relativement peu d'éléments rigides, alors que les étages supérieurs comportent des cloisons qui augmentent leur rigidité. Il existe donc une **variation brutale de rigidité entre le rez-de-chaussée et les niveaux supérieurs**.

Lors du séisme, les étages supérieurs se déplacent davantage comme un ensemble relativement rigide tandis que les déformations horizontales se concentrent au rez-de-chaussée.

Cette concentration des déplacements peut provoquer :

- de fortes dérives d'étage ;
- des sollicitations importantes dans les poteaux ;
- des dommages aux nœuds poteaux–poutres ;
- une perte de stabilité du rez-de-chaussée ;
- dans les cas les plus graves, un mécanisme d'étage et un effondrement partiel ou total.

Le problème principal est donc moins l'ouverture du rez-de-chaussée elle-même que la **discontinuité brutale de rigidité entre les niveaux**.

b) Trois solutions possibles

Solution 1 — Introduire des voiles ou palées de stabilité

Le rez-de-chaussée peut être renforcé par au moins deux voiles en béton armé ou des palées de stabilité en acier.

Ces éléments doivent être disposés de façon équilibrée et, si possible, symétrique afin de ne pas générer de torsion.

Ils peuvent être placés :

- en façade ;
- autour des circulations verticales ;
- autour des cages d'escalier ou d'ascenseur ;
- sous forme de noyaux rigides.

Solution 2 — Assurer une variation progressive de rigidité

Il faut éviter de passer brutalement d'un niveau très ouvert à des étages beaucoup plus rigides.

Une solution consiste donc à faire varier progressivement la rigidité des éléments porteurs verticaux entre les niveaux. Le cours précise que cette solution ne supprime pas nécessairement totalement l'effet de niveau souple, mais qu'elle le réduit notablement.

Solution 3 — Homogénéiser le système de contreventement

Le système de contreventement doit être continu depuis les étages supérieurs jusqu'aux fondations.

Il convient donc :

- d'éviter l'interruption des voiles au rez-de-chaussée ;
- de poursuivre les noyaux et éléments rigides jusqu'aux fondations ;
- de mieux équilibrer les rigidités entre les différents niveaux.

Réponse synthétique attendue : contreventer le rez-de-chaussée + éviter la rupture brutale de rigidité + assurer la continuité verticale du système résistant.

3. Régularité en plan et en élévation

La conception parasismique recherche un bâtiment présentant un comportement aussi simple et prévisible que possible.

Régularité en plan

Il est recommandé de :

- adopter une forme simple et compacte ;
- privilégier autant que possible la symétrie ;
- éviter les formes très découpées ;
- limiter les angles rentrants importants ;
- répartir les masses de manière régulière ;
- répartir les rigidités et les éléments de contreventement dans les deux directions principales ;
- éviter une forte excentricité entre les zones rigides et les zones de masse ;
- fractionner les formes complexes en plusieurs blocs plus réguliers au moyen de joints parasismiques lorsque cela est nécessaire.

L'objectif principal est de réduire les phénomènes de torsion et les concentrations locales de contraintes.

Régularité en élévation

Il est recommandé de :

- conserver une géométrie aussi régulière que possible sur la hauteur ;
- éviter les retraits brusques ;
- préférer les variations progressives de largeur ;
- maintenir la continuité verticale des voiles, poteaux et éléments de contreventement ;
- éviter les niveaux souples ;
- éviter les variations brutales de masse et de rigidité d'un étage à l'autre.

À retenir : une conception favorable repose sur quatre principes principaux : **simplicité, symétrie, régularité et continuité**.

4. Analyse de la configuration représentée

Dans la Version 2, l'illustration correspond à **deux bâtiments adjacents présentant des hauteurs ou des configurations différentes**.

Le risque principal est que ces deux bâtiments n'aient pas le même comportement dynamique.

Une structure haute est généralement plus souple et présente une période plus longue qu'une structure basse. Pendant le séisme, les deux bâtiments peuvent donc :

- osciller avec des amplitudes différentes ;
- osciller avec des périodes différentes ;
- se déplacer dans des directions opposées à certains instants.

S'ils sont trop proches, ils peuvent se heurter. Ce phénomène est appelé **martèlement entre bâtiments**.

Solutions parasismiques

La solution principale consiste à rendre les deux blocs **structurellement indépendants** et à prévoir entre eux un **joint parasismique suffisamment large** pour autoriser leurs déplacements relatifs sans collision.

Il faut également :

- éviter les liaisons rigides entre les deux bâtiments ;
- dimensionner le joint en fonction des déplacements attendus ;
- prolonger le joint sur toute la hauteur du bâtiment ;
- assurer, lorsque cela est nécessaire, l'indépendance des fondations.

À retenir : Deux bâtiments susceptibles d'osciller différemment doivent pouvoir se déplacer indépendamment.

5. Analyse de la vidéo — Hauteurs différentes

La séquence expérimentale compare deux modèles possédant des **hauteurs différentes**.

L'expérience montre que la hauteur influence directement le comportement dynamique d'une structure.

Une structure haute et élancée est généralement plus flexible. Elle présente donc une **période propre plus longue**, c'est-à-dire qu'elle oscille plus lentement.

Une structure basse est généralement plus rigide. Elle présente une **période propre plus courte** et oscille plus rapidement.

Dans la vidéo :

- lors d'un **mouvement lent**, la structure de grande hauteur présente la réponse la plus importante ;
- lors d'un **mouvement rapide**, c'est la structure de petite hauteur qui répond davantage.

Cette observation illustre le phénomène de **résonance** : lorsqu'une excitation possède une fréquence proche de la fréquence propre de la structure, les oscillations peuvent être fortement amplifiées.

Conséquence pour l'architecte

La hauteur du bâtiment ne constitue donc pas uniquement une donnée géométrique. Elle influence son comportement dynamique.

L'architecte doit donc considérer conjointement :

- la hauteur ; la rigidité ; la masse ; le système porteur ; la nature du sol.

6. Stabilisation de la terre

Réponse correcte : b) Incorporation de ciment ou de chaux.

La stabilisation vise à améliorer les propriétés de la terre utilisée pour la construction.

Le cours distingue la nature du sol :

- pour les **terres sableuses**, une stabilisation au ciment est indiquée, avec un dosage de l'ordre de **4 à 8 %** ;
- pour les **terres argileuses**, une stabilisation à la chaux aérienne éteinte est indiquée, avec un dosage de l'ordre de **6 à 10 %**.

Le choix du stabilisant dépend donc de la composition de la terre.

7. Hauteur maximale des murs porteurs en adobe

Réponse correcte : c) 6,5 m.

Le support RPCTerre utilisé dans le cours fixe :

- **4 m maximum** pour les murs porteurs d'une construction à un niveau ;
- **6,5 m maximum** pour une construction à deux niveaux.

Ces limites doivent être considérées avec les autres prescriptions relatives à :

- l'épaisseur des murs ; leur élancement ; les raidisseurs ; les chaînages ; et les ouvertures.

8. Composition des briques d'adobe

Dans votre **Version 2**, la réponse prévue est :

A — Vrai.

L'adobe est fabriqué à partir de terre crue mélangée avec de l'eau afin de permettre son moulage. Des fibres végétales, notamment de la paille, peuvent être ajoutées dans certaines techniques traditionnelles afin d'améliorer certaines propriétés du matériau. Toutefois, leur présence n'est pas indispensable à la définition générale de l'adobe.

Version 3

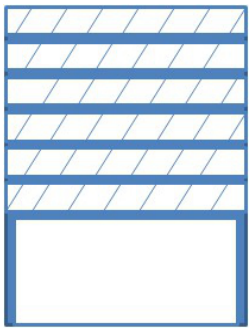
1/ À part l'effet de couplage des bâtiments, identifiez et analysez cinq autres effets destructeurs majeurs des séismes. Pour chacun, expliquez son principe ou sa définition, puis proposez des solutions techniques permettant d'améliorer la stabilité du bâtiment.

2/ étude de cas : Deux tours résidentielles de 15 étages sont reliées par une passerelle métallique au 10e étage. Lors d'un séisme, les oscillations des deux bâtiments n'étaient pas synchronisées, provoquant l'effondrement de la passerelle et des dommages aux structures adjacentes.

a) Identifiez les problèmes liés à cette conception.
b) Proposez trois solutions architecturales ou structurelles permettant de réduire ce risque.

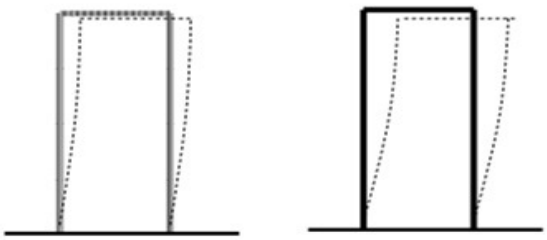
3/Quelles sont les recommandations parasismiques concernant la régularité en plan et en élévation d'un bâtiment ?

4/ Quelles sont les solutions parasismiques pour que le bâtiment suivant résiste aux secousses sismiques?



Vue en élévation

5/ Analyser le schéma suivant (voir la Vidéo):
Matériaux différents



6/ Quelle est la méthode traditionnelle la plus efficace pour améliorer la durabilité des murs en adobe face aux intempéries ?

a) Compactage intensif des briques avant leur séchage.
b) Application d'enduits à base de terre et fibres végétales.
c) Installation de débords de toiture pour limiter l'exposition directe à la pluie.
d) Mélange des briques avec des granulats grossiers.

7/ Quelle est l'épaisseur minimale des murs de séparation en adobe pour des constructions parasismiques ?

a) 15 cm b) 20 cm c) 30 cm d) 40 cm

8/ Lors de la construction d' un mur en pisé, le décoffrage peut être effectué immédiatement après le compactage. Un arrachement superficiel des parois après décoffrage peut révéler une teneur en eau inadéquate ou un compactage insuffisant.

A : vrai B : faux

Correction version 3

1. Cinq effets destructeurs majeurs autres que le couplage des bâtiments

À l'exception de l'effet de **couplage des bâtiments**, plusieurs configurations architecturales ou structurelles peuvent amplifier les effets d'un séisme et provoquer des dommages importants.

1.1. Effet de poteau court

L'effet de poteau court apparaît lorsque la hauteur libre d'un poteau est réduite par un élément rigide, tel qu'un muret, une allège ou un remplissage partiel en maçonnerie. Le poteau ainsi raccourci devient plus rigide que les poteaux voisins et attire une part plus importante des efforts sismiques.

Cette concentration des efforts, notamment de cisaillement, peut entraîner une rupture brutale et fragile du poteau.

Solutions :

- éviter les remplissages partiels qui réduisent la hauteur libre des poteaux ;
- désolidariser les murets ou les allèges de l'ossature lorsque le principe constructif le permet ;
- homogénéiser autant que possible les hauteurs libres des poteaux ;
- assurer un système de contreventement efficace et régulièrement réparti.

1.2. Effet de niveau souple

Un niveau souple correspond à un étage dont la rigidité latérale est nettement plus faible que celle des étages voisins. Cette situation est fréquente au rez-de-chaussée lorsque celui-ci est largement ouvert pour accueillir des commerces, des parkings ou de grandes surfaces vitrées, tandis que les étages supérieurs comportent des murs ou des cloisons plus rigides.

Lors d'un séisme, les déplacements horizontaux se concentrent dans ce niveau, provoquant de fortes déformations des poteaux et pouvant conduire à un mécanisme d'étage puis à un effondrement.

Solutions :

- éviter les variations brutales de rigidité entre étages ;
- introduire des voiles, noyaux ou palées de stabilité au niveau concerné ;
- assurer la continuité verticale des éléments de contreventement ;
- rechercher une variation progressive de la rigidité sur la hauteur.

1.3. Effet de torsion

La torsion apparaît principalement lorsque les masses et les rigidités sont réparties de manière dissymétrique dans le plan du bâtiment.

Sous l'action sismique, le bâtiment ne subit alors pas uniquement un déplacement horizontal : il tend également à tourner autour d'un axe vertical. Les éléments périphériques peuvent subir des déplacements et des efforts particulièrement importants.

Solutions :

- privilégier des plans simples et aussi symétriques que possible ;
- répartir les masses de manière équilibrée ;
- disposer les éléments de contreventement de façon régulière et symétrique ;
- éviter de concentrer les voiles ou autres éléments très rigides sur un seul côté du bâtiment.

1.4. Nature du sol et résonance sol–structure

La nature du sol influence fortement les mouvements transmis à la construction. Les sols meubles peuvent notamment amplifier certaines composantes du mouvement sismique.

Lorsque la période dominante du sol devient proche de la période propre du bâtiment, un phénomène de **résonance** peut apparaître et amplifier les oscillations.

Solutions :

- réaliser une étude géotechnique du site ;
- adapter le système structural aux caractéristiques du sol ;
- choisir un système de fondation approprié ;
- éviter, dans la mesure du possible, une configuration sol–structure susceptible de favoriser la résonance.

1.5. Effet des ouvrages en toiture

Les réservoirs, locaux techniques, équipements lourds ou autres ouvrages implantés en toiture augmentent les masses situées en partie haute du bâtiment. Pendant un séisme, cette position peut amplifier les déplacements et les forces d'inertie.

Une superstructure haute, lourde ou très élancée peut donc devenir particulièrement vulnérable.

Solutions :

- réduire autant que possible les masses en toiture ;
- privilégier des matériaux et systèmes constructifs légers ;
- limiter l'élancement des ouvrages en toiture ;
- assurer leur ancrage et leur contreventement ;
- privilégier une diminution progressive des masses et des dimensions vers le sommet.

D'autres effets étudiés peuvent également être acceptés, notamment l'interaction entre portiques et remplissages en maçonnerie ou les irrégularités en plan et en élévation.

2. Étude de cas — Deux tours reliées par une passerelle

a) Identification et analyse des problèmes

Le problème principal résulte du **couplage de deux bâtiments présentant des comportements dynamiques indépendants**.

Même si les deux tours possèdent le même nombre d'étages, elles ne présentent pas nécessairement exactement les mêmes masses, rigidités, périodes propres ou amortissements. Pendant le séisme, leurs oscillations peuvent donc être **désynchronisées**.

À un instant donné, une tour peut se déplacer dans une direction tandis que l'autre se déplace dans la direction opposée. La passerelle reliant les deux structures doit alors absorber un **déplacement relatif important**.

Si elle est reliée rigidement aux deux tours sans dispositif permettant ces déplacements, des efforts importants apparaissent au niveau :

- de la passerelle ; de ses appuis ; de ses assemblages ; et des zones de connexion avec les bâtiments.

Ces efforts peuvent entraîner la rupture de la passerelle et endommager localement les structures principales.

Le problème fondamental est donc d'avoir **relié rigidement deux structures susceptibles d'osciller indépendamment**.

b) Trois solutions

Solution 1 — Permettre les déplacements relatifs

La passerelle peut être fixée à une tour et disposer, du côté de l'autre tour, d'un **appui mobile ou glissant** permettant le déplacement relatif entre les deux bâtiments.

La passerelle ne contraint alors plus les deux tours à se déplacer ensemble.

Solution 2 — Prévoir des joints appropriés

Des joints doivent être prévus au niveau des raccordements afin d'absorber les déplacements relatifs attendus sans provoquer de collision ou de transmission excessive des efforts.

Leur dimensionnement doit tenir compte des déplacements sismiques des deux structures.

Solution 3 — Concevoir la liaison comme un élément indépendant et déformable

La passerelle peut être conçue comme une structure suffisamment flexible ou indépendante, avec des dispositifs de liaison adaptés aux mouvements différentiels.

À retenir : Deux bâtiments ayant des réponses dynamiques différentes ne doivent pas être rigidement couplés sans dispositif permettant leurs déplacements relatifs.

3. Régularité en plan et en élévation

La régularité permet d'obtenir une réponse sismique plus homogène et plus prévisible du bâtiment.

Régularité en plan

Il est recommandé de :

- privilégier des formes simples, compactes et aussi symétriques que possible ;
- éviter les formes très découpées et les angles rentrants importants ;
- répartir régulièrement les masses ;
- répartir les rigidités et les éléments de contreventement de manière équilibrée dans les deux directions principales ;
- limiter l'excentricité entre les centres de masse et de rigidité afin de réduire la torsion ;
- fractionner, si nécessaire, les bâtiments de forme complexe en blocs plus simples à l'aide de joints parasismiques.

Régularité en élévation

Il est recommandé de :

- conserver une géométrie aussi régulière que possible sur la hauteur ;
- éviter les changements brusques de section ou de largeur ;
- privilégier les retraits progressifs ;
- assurer la continuité verticale des poteaux, voiles et autres éléments de contreventement ;
- éviter les niveaux souples ;
- éviter les changements brusques de masse et de rigidité entre étages successifs.

Le support de cours retient notamment une limitation de **30 % des variations de rigidité et de masse entre deux étages successifs**.

Principe général : simplicité + symétrie + régularité + continuité = comportement sismique plus favorable.

4. Analyse de la configuration en élévation

Le bâtiment présenté possède un **rez-de-chaussée largement vitré et ouvert**, tandis que les étages supérieurs sont plus rigides. Cette différence crée une **discontinuité importante de rigidité en élévation**, caractéristique d'un **niveau souple**.

Lors d'un séisme, les déplacements horizontaux tendent à se concentrer au niveau le moins rigide, ici le rez-de-chaussée. Les poteaux du RDC subissent alors des **déformations et des sollicitations importantes**, pouvant entraîner leur endommagement et, dans les cas les plus défavorables, provoquer un **mécanisme d'étage et l'effondrement partiel ou total du bâtiment**.

Solutions parasismiques

1. Renforcer le contreventement du rez-de-chaussée

Introduire des **voiles en béton armé** ou des **palées de stabilité** au RDC afin d'augmenter sa rigidité latérale, tout en conservant autant que possible les grandes surfaces vitrées nécessaires au projet architectural.

2. Répartir les éléments de contreventement de manière équilibrée

Les voiles ou palées doivent être disposés dans les **deux directions principales** et de manière aussi symétrique que possible afin de limiter les effets de torsion.

3. Assurer la continuité verticale du contreventement

Les éléments résistants aux actions horizontales doivent être continus jusqu'aux fondations. Il faut éviter toute interruption brutale des voiles ou des éléments rigides au niveau du rez-de-chaussée.

4. Éviter une variation brutale de rigidité entre les niveaux

La transition entre le rez-de-chaussée ouvert et les étages supérieurs doit être aussi progressive que possible afin de réduire la concentration des déformations au RDC.

5. Analyse de la séquence expérimentale — Matériaux différents

La séquence expérimentale montre que **deux structures réalisées avec des matériaux ou systèmes constructifs différents ne réagissent pas de la même manière à une excitation sismique**.

Le matériau intervient notamment à travers la **rigidité**, la masse et la capacité de déformation du système structural.

Une structure plus rigide présente généralement une période propre plus courte et tend à osciller plus rapidement. À l'inverse, une structure plus flexible présente une période plus longue et oscille plus lentement.

La réponse dépend donc de la relation entre :

- les propriétés du matériau ; la rigidité globale du système ; la masse ; la fréquence propre de la structure ; et la fréquence du mouvement imposé.

Lorsque la fréquence de l'excitation se rapproche de la fréquence propre de la structure, l'amplitude des oscillations augmente fortement : il s'agit du phénomène de **résonance**.

Conséquence pour la conception

Le choix du matériau ne doit donc pas être effectué uniquement en fonction de sa résistance mécanique.

Il faut également considérer :

- sa rigidité ; sa capacité de déformation ; son poids propre ; la ductilité du système constructif; et la qualité et le comportement des assemblages.

À retenir : Le comportement parasismique d'une structure dépend non seulement de la résistance du matériau, mais également de sa rigidité, de sa masse, de sa capacité de déformation et du système constructif auquel il appartient.

6. Protection des murs en adobe contre les intempéries

Réponse correcte : c) Installation de débords de toiture pour limiter l'exposition directe à la pluie.

La terre crue est particulièrement sensible à l'action prolongée de l'eau. La protection constructive du mur constitue donc un principe essentiel pour assurer sa durabilité.

Un **débord de toiture suffisamment important** limite le ruissellement de l'eau de pluie sur les façades et protège la partie supérieure des murs.

Cette stratégie repose sur un principe simple : **empêcher autant que possible l'eau d'atteindre directement le mur plutôt que de compter uniquement sur la résistance du matériau à l'humidité**.

Les enduits adaptés peuvent constituer une protection complémentaire, mais, parmi les réponses proposées, le débord de toiture constitue la réponse attendue.

7. Épaisseur minimale des murs de séparation en adobe

Réponse correcte : b) 20 cm.

Dans une construction parasismique en terre, l'épaisseur minimale des **murs de séparation** est fixée à : **$e \geq 20$ cm**

8. Décoffrage d'un mur en pisé

Réponse : A — Vrai

Dans la construction en pisé, la terre est mise en place dans des banches puis compactée par couches successives. **Le décoffrage peut être effectué immédiatement après le compactage**, à condition que celui-ci ait été correctement réalisé.

Après décoffrage, l'état de la surface du mur constitue un indicateur de la qualité de mise en œuvre. **Un arrachement superficiel des parois peut révéler une teneur en eau inadéquate ou un compactage insuffisant.** Dans ce cas, la partie défectueuse doit être reprise conformément aux prescriptions de mise en œuvre.

Version 4

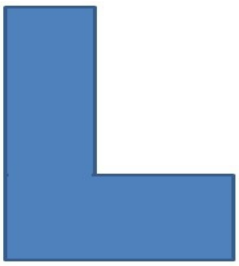
1/ À part l'effet des ouvrages en toiture, identifiez et analysez cinq autres effets destructeurs majeurs des séismes. Pour chacun, expliquez son principe ou sa définition, puis proposez des solutions techniques permettant d'améliorer la stabilité du bâtiment.

2/ étude de cas : Un hôpital de 6 étages comprend une structure métallique sur le toit destinée à accueillir des réservoirs d'eau et des panneaux solaires. Lors d'un séisme, la structure a subi de fortes oscillations, provoquant des dégâts aux niveaux inférieurs.

a) Identifiez les problèmes liés à cette conception.
b) Proposez trois solutions architecturales ou structurelles permettant de réduire ce risque.

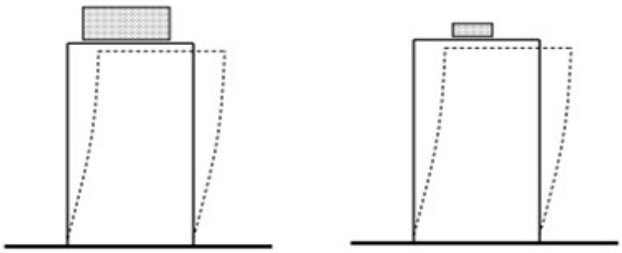
3/Quelles sont les recommandations parasismiques concernant la régularité en plan et en élévation d'un bâtiment ?

4/ Quelles sont les solutions parasismiques pour que le bâtiment suivant résiste aux secousses sismiques?



Vue en élévation

5/ Analysez le schéma suivant (voir la Vidéo):
Masses différentes



6/ Quelle est la principale limitation du pisé par rapport à l'adobe dans les constructions modernes ?

a) Sa faible résistance mécanique.
b) La difficulté de mise en œuvre nécessitant des banches et un compactage précis.
c) Une durabilité moindre en milieu sec.
d) Une granulométrie trop contraignante pour sa mise en œuvre.

7/ Dans une construction en terre, quelle est la hauteur maximale recommandée pour les murs porteurs en adobe dans un bâtiment de deux niveaux ?

a) 4 m b) 5 m c) 6,5 m d) 7 m

8/ Les murs en pisé sont généralement construits en une seule couche.

A : vrai B : faux

Correction version 4

1. Cinq effets destructeurs majeurs autres que les ouvrages en toiture

À l'exception de **l'effet des ouvrages en toiture**, plusieurs configurations architecturales ou structurelles peuvent entraîner un comportement défavorable du bâtiment lors d'un séisme. Cinq effets majeurs peuvent être retenus.

1.1. Effet de poteau court

L'effet de poteau court apparaît lorsque la **hauteur libre d'un poteau est réduite** par un élément rigide, tel qu'un muret, une allège ou un remplissage partiel en maçonnerie. Le poteau ainsi raccourci devient plus rigide que les poteaux voisins et attire une part plus importante des efforts sismiques.

Cette concentration des efforts, notamment de cisaillement, peut provoquer une **rupture brutale et fragile**.

Solutions :

- éviter les remplissages partiels réduisant la hauteur libre des poteaux ;
- désolidariser les murets ou allèges de l'ossature lorsque cela est possible ;
- homogénéiser les hauteurs libres des poteaux ;
- prévoir un système de contreventement adapté afin de mieux répartir les efforts horizontaux.

1.2. Effet de niveau souple

Un niveau souple est un étage dont la **rigidité latérale est nettement plus faible** que celle des niveaux voisins. Cette situation apparaît fréquemment lorsqu'un rez-de-chaussée est largement ouvert ou vitré, tandis que les étages supérieurs comportent des murs ou des cloisons plus rigides.

Lors d'un séisme, les déplacements horizontaux se concentrent au niveau le moins rigide. Les poteaux y subissent alors de fortes déformations, pouvant conduire à un **mécanisme d'étage** et, dans les cas les plus graves, à l'effondrement.

Solutions :

- introduire des voiles, noyaux ou palées de stabilité ;
- éviter les variations brutales de rigidité entre étages ;
- assurer la continuité verticale du contreventement ;
- rechercher une variation progressive de la rigidité sur la hauteur.

1.3. Effet de torsion

La torsion apparaît lorsque les **masses et les rigidités sont réparties de manière dissymétrique** dans le plan du bâtiment.

Sous l'action sismique, le bâtiment ne se déplace alors pas uniquement horizontalement : il subit également une **rotation autour d'un axe vertical**. Certains poteaux, voiles ou façades peuvent ainsi être beaucoup plus sollicités que d'autres.

Solutions :

- privilégier des plans simples et aussi symétriques que possible ;
- répartir régulièrement les masses ;
- disposer les éléments de contreventement de manière équilibrée dans les deux directions principales ;
- éviter la concentration des éléments très rigides sur un seul côté du bâtiment.

1.4. Nature du sol et résonance sol–structure

Le comportement sismique dépend également des caractéristiques du sol. Un sol meuble peut modifier ou amplifier certaines composantes du mouvement sismique.

Lorsque la période dominante du mouvement du sol devient proche de la **période propre du bâtiment**, un phénomène de **résonance** peut apparaître et amplifier fortement les oscillations.

Solutions :

- réaliser une étude géotechnique du site ;
- adapter le système structural aux caractéristiques du sol ;
- choisir un système de fondation approprié ;
- éviter, lorsque cela est possible, une configuration sol–structure favorisant la résonance.

1.5. Couplage ou proximité entre bâtiments

Deux bâtiments voisins peuvent avoir des masses, des rigidités, des hauteurs ou des périodes propres différentes. Ils peuvent donc **osciller différemment** pendant un séisme.

Lorsqu'ils sont trop proches, ils peuvent entrer en collision. Une liaison rigide entre deux structures présentant des réponses dynamiques différentes peut également subir des efforts importants et être endommagée.

Solutions :

- prévoir des joints parasismiques suffisamment larges ;
- permettre les déplacements indépendants des bâtiments ;
- éviter les liaisons rigides non étudiées ;
- utiliser des dispositifs de liaison capables d'accepter les déplacements relatifs.

L'interaction entre **portiques et remplissages en maçonnerie** constitue également une réponse acceptable parmi les effets étudiés.

2. Étude de cas — Ouvrages en toiture d'un hôpital

a) Identification des problèmes

L'installation d'une structure métallique supportant des **réservoirs d'eau et des panneaux solaires en toiture** modifie le comportement dynamique du bâtiment.

Le premier problème est la présence d'une **masse importante située en hauteur**. Les réservoirs d'eau peuvent représenter une charge considérable. Pendant le séisme, cette masse génère des forces d'inertie importantes et peut augmenter les sollicitations transmises aux niveaux inférieurs.

Le deuxième problème concerne **l'élancement de la structure métallique**. Une superstructure haute et relativement flexible peut subir des oscillations importantes.

Le troisième problème concerne la **stabilité propre et l'ancrage** des équipements et de leur structure porteuse. Une liaison insuffisante avec la structure principale peut provoquer des déplacements excessifs, des ruptures d'assemblages ou la chute d'équipements.

Enfin, la présence d'une masse concentrée au sommet crée une **irrégularité de masse en élévation**, défavorable au comportement global.

Le principe général est donc : **masse importante + position élevée + élancement = amplification des effets dynamiques.**

b) Trois solutions

Solution 1 — Réduire et mieux répartir les masses en toiture

Il faut limiter autant que possible les masses concentrées au sommet du bâtiment.

Cela peut conduire à :

- réduire la capacité ou le nombre des réservoirs installés en toiture lorsque le programme le permet ;
- répartir les équipements lourds plutôt que les concentrer en un point ;
- utiliser des matériaux légers pour les structures supportant les panneaux solaires.

Solution 2 — Limiter l'élancement et privilégier un retrait progressif

La structure située en toiture doit présenter un **faible élancement**. Une géométrie compacte et une réduction progressive des dimensions vers le sommet permettent d'obtenir un comportement plus favorable qu'une superstructure haute et élancée.

Solution 3 — Assurer l'ancrage et le contreventement de la structure en toiture

La structure métallique et les équipements doivent être correctement **ancrés et contreventés** afin de transmettre les efforts à la structure principale.

Les réservoirs, panneaux et autres équipements doivent également disposer de systèmes de fixation adaptés aux sollicitations sismiques.

Réponse synthétique attendue

La présence d'ouvrages lourds et élancés en toiture augmente les effets d'inertie et peut amplifier les oscillations du bâtiment. Il convient donc de **réduire les masses en toiture, limiter l'élancement des superstructures, privilégier un retrait progressif et assurer un ancrage et un contreventement efficaces**.

3. Régularité en plan et en élévation

La régularité permet d'obtenir un comportement sismique plus homogène et plus prévisible.

Régularité en plan

Il est recommandé de :

- privilégier des formes simples, compactes et aussi symétriques que possible ;
- éviter les formes fortement découpées et les angles rentrants importants ;
- répartir les masses de manière régulière ;
- répartir les éléments de contreventement de manière équilibrée dans les deux directions principales ;
- limiter les excentricités entre les centres de masse et de rigidité afin de réduire les effets de torsion ;
- fractionner, si nécessaire, les bâtiments complexes en blocs plus réguliers au moyen de joints parasismiques.

Régularité en élévation

Il est recommandé de :

- maintenir une géométrie aussi régulière que possible sur la hauteur ;
- éviter les changements brusques de largeur ou de section ;
- privilégier les retraits progressifs ;
- assurer la continuité verticale des poteaux, voiles et autres éléments de contreventement ;
- éviter les niveaux souples ;
- éviter les changements brusques de masse et de rigidité entre étages successifs.

Le cours retient notamment que les variations de masse et de rigidité entre deux étages successifs doivent être limitées à **30 %**.

À retenir : simplicité – symétrie – régularité – continuité.

4. Analyse de la configuration représentée

Pour la **Version 4**, le corrigé préparatoire identifie la figure comme une **forme irrégulière en L en élévation**.

Cette configuration présente un **changement brutal de hauteur** entre deux parties du bâtiment. Sous l'action sismique, les deux volumes peuvent présenter des déplacements et des comportements dynamiques différents. La zone de décrochement devient alors une zone sensible où peuvent se concentrer les contraintes et les déformations.

Solutions parasismiques

1. Fractionner le bâtiment en blocs réguliers

La solution la plus claire consiste à séparer les deux volumes par un **joint parasismique**, de manière à permettre à chaque bloc d'osciller indépendamment.

2. Adopter une variation progressive de la hauteur

Lorsque le projet architectural le permet, il est préférable de remplacer le changement brutal de hauteur par une **transition géométrique progressive**.

3. Assurer la continuité du contreventement

Les voiles, noyaux ou autres éléments résistants aux actions horizontales doivent rester continus jusqu'aux fondations et être correctement répartis.

5. Analyse de la séquence expérimentale — Masses différentes

La séquence expérimentale montre que **la masse influence la réponse dynamique d'une structure**.

Pour deux structures présentant une configuration comparable mais des masses différentes, les fréquences propres ne sont pas identiques. Elles ne réagissent donc pas de la même manière à une excitation donnée.

L'expérience met en évidence que :

- lors d'un **mouvement lent**, la structure la plus lourde entre en résonance ;
- lors d'un **mouvement rapide**, la structure la plus légère entre en résonance.

Lorsque la fréquence de l'excitation se rapproche de la fréquence propre de la structure, l'amplitude des oscillations augmente fortement : il s'agit du **phénomène de résonance**.

La masse intervient également dans les forces d'inertie développées pendant le séisme : **plus la masse est importante, plus les forces d'inertie susceptibles d'être générées sont importantes**.

Conséquences pour la conception

Il est recommandé de :

- limiter les masses inutiles ;
- éviter les concentrations importantes de masse ;
- rechercher une distribution régulière des masses sur la hauteur ;

- éviter les variations brutales de masse entre deux niveaux ;
- porter une attention particulière aux masses importantes situées en toiture.

À retenir : La masse influence à la fois les forces d'inertie et les caractéristiques dynamiques du bâtiment. Deux structures de masses différentes ne répondent donc pas de la même manière à une même excitation sismique.

6. Principale limitation du pisé par rapport à l'adobe

Réponse correcte : b) La difficulté de mise en œuvre nécessitant des banches et un compactage précis.

Le pisé est une technique de construction en terre crue dans laquelle la terre est **compactée à l'intérieur de coffrages appelés banches**. La réalisation du mur nécessite donc une mise en œuvre progressive, un contrôle de la teneur en eau et un compactage approprié.

Cette technique exige ainsi :

- la mise en place et le déplacement des banches ;
- une teneur en eau adaptée ;
- un compactage suffisamment homogène ;
- une bonne maîtrise de l'exécution des banchées successives.

L'adobe, à l'inverse, repose sur la fabrication préalable de briques de terre crue moulées et séchées, ensuite assemblées pour constituer les murs.

7. Hauteur maximale des murs porteurs en adobe

Réponse correcte : c) 6,5 m.

Pour une construction en terre à **deux niveaux**, la hauteur maximale recommandée des murs porteurs est de : **Hmax = 6,5 m**

Pour une construction à un seul niveau, cette hauteur maximale est de **4 m**.

Ces valeurs doivent être respectées conjointement avec les prescriptions concernant l'épaisseur et l'élancement des murs.

8. « Les murs en pisé sont généralement construits en une seule couche. »

Réponse : B — Faux.

Un mur en pisé n'est pas réalisé en une seule couche. La terre crue est mise en place dans des **banches**, puis compactée progressivement. Les banches se déplacent et se superposent pour constituer progressivement la hauteur du mur.

Version 5

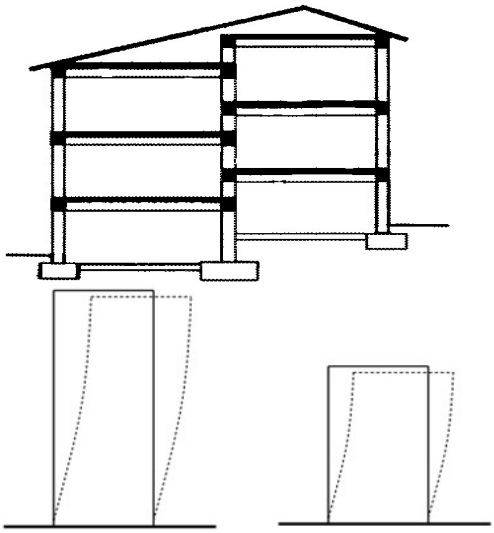
1/ À part l'effet de la nature du sol, identifiez et analysez cinq autres effets destructeurs majeurs des séismes. Pour chacun, expliquez son principe ou sa définition, puis proposez des solutions techniques permettant d'améliorer la stabilité du bâtiment.

2/ étude de cas : Un immeuble de 10 étages a été construit sur un sol mou, composé principalement d'argile. Lors d'un séisme, le bâtiment a oscillé de manière excessive, provoquant des fissures dans les murs et un tassement différentiel.

a) Identifiez les problèmes liés à cette conception.
b) Proposez trois solutions architecturales ou structurelles permettant de réduire ce risque.

3/Quelles sont les recommandations parasismiques concernant la régularité en plan et en élévation d'un bâtiment ?

4/ Quelles sont les solutions parasismiques pour que le bâtiment suivant résiste aux secousses sismiques?



5/ Analyser le schéma suivant (voir la Vidéo):
Hauteurs différentes

6/ Pour une construction en adobe à deux niveaux sur un sol moyennement ferme, quelle doit être la largeur minimale des semelles filantes ?

a) Égale à l'épaisseur des murs b) 1,5 fois l'épaisseur des murs
c) 2 fois l'épaisseur des murs d) 3 fois l'épaisseur des murs

7/ Quelle est l'épaisseur minimale des murs de séparation en adobe pour des constructions parasismiques ?

a) 15 cm b) 20 cm c) 30 cm d) 40 cm

8/ Les briques d'adobe sont généralement fabriquées à partir de terre mélangée à de l'eau et à des fibres naturelles :

A : vrai B : faux

Correction version 5

1. Cinq effets destructeurs majeurs autres que la nature du sol

À l'exception de **l'effet lié à la nature du sol**, plusieurs configurations architecturales ou structurelles peuvent entraîner une réponse défavorable du bâtiment sous l'action sismique.

1.1. Effet de poteau court

L'effet de poteau court apparaît lorsque la **hauteur libre d'un poteau est partiellement réduite** par un élément rigide, par exemple un muret, une allège ou un remplissage en maçonnerie.

Le poteau ainsi raccourci devient plus rigide que les poteaux voisins et attire une part plus importante des efforts sismiques. Cette concentration des efforts, notamment de cisaillement, peut provoquer une **rupture brutale et fragile**.

Solutions :

- éviter les remplissages partiels réduisant la hauteur libre des poteaux ;
- désolidariser les murets ou les allèges de l'ossature lorsque cela est possible ;
- homogénéiser les hauteurs libres des poteaux ;
- prévoir un système de contreventement permettant une meilleure répartition des efforts horizontaux.

1.2. Effet de niveau souple

Un niveau souple est un étage dont la **rigidité latérale est nettement inférieure à celle des étages voisins**. Cette situation est fréquente lorsqu'un rez-de-chaussée est largement ouvert ou vitré, tandis que les étages supérieurs comportent des murs ou des cloisons rigides.

Pendant un séisme, les déplacements horizontaux se concentrent au niveau le moins rigide. Les poteaux de cet étage peuvent alors subir des déformations importantes et conduire à un **mécanisme d'étage**, voire à l'effondrement du bâtiment.

Solutions :

- introduire des voiles, noyaux ou palées de stabilité ;
- éviter les variations brutales de rigidité entre les étages ;
- assurer la continuité verticale des éléments de contreventement ;
- répartir les éléments résistants de manière équilibrée.

1.3. Effet de torsion

La torsion apparaît notamment lorsque les **masses et les rigidités sont réparties de manière dissymétrique** dans le plan du bâtiment.

Sous l'action sismique, le bâtiment ne subit pas uniquement une translation horizontale : il tend également à tourner autour d'un axe vertical. Certains éléments périphériques peuvent alors subir des déplacements et des efforts particulièrement importants.

Solutions :

- privilégier des plans simples et aussi symétriques que possible ;
- répartir régulièrement les masses ;
- répartir les éléments de contreventement dans les deux directions principales ;
- éviter de concentrer les éléments très rigides sur un seul côté du bâtiment.

1.4. Couplage ou proximité entre bâtiments

Deux bâtiments voisins peuvent avoir des hauteurs, masses, rigidités ou périodes propres différentes. Pendant le séisme, ils peuvent donc **osciller différemment**.

S'ils sont trop proches, leurs déplacements relatifs peuvent provoquer des chocs ou un **martèlement**. Une passerelle ou une liaison rigide entre les deux structures peut également subir des sollicitations importantes.

Solutions :

- prévoir un joint parasismique suffisant entre les bâtiments ;
- permettre les déplacements indépendants des structures ;
- éviter les liaisons rigides non adaptées ;
- concevoir les passerelles ou autres éléments de liaison de manière à accepter les déplacements relatifs.

1.5. Effet des ouvrages en toiture

Les réservoirs, locaux techniques ou autres équipements lourds placés en toiture créent une **concentration de masse en partie haute du bâtiment**.

Pendant un séisme, cette masse génère des forces d'inertie importantes et peut accentuer les oscillations. Le risque augmente lorsque l'ouvrage en toiture est également haut ou élancé.

Solutions :

- réduire les masses en toiture ;
- privilégier des structures légères ;
- limiter l'élancement ;
- assurer un ancrage et un contreventement efficaces ;
- privilégier une diminution progressive des dimensions vers le sommet.

L'interaction entre **portiques et remplissages en maçonnerie** constitue également une réponse acceptable parmi les effets étudiés.

2. Étude de cas — Immeuble de 10 étages construit sur un sol mou

a) Identification des problèmes

Le bâtiment est implanté sur un **sol mou principalement argileux**. Cette situation peut être défavorable au comportement sismique d'un bâtiment de grande hauteur.

Amplification des mouvements

Les sols mous peuvent modifier et amplifier certaines composantes du mouvement sismique. Le mouvement transmis à la structure peut ainsi être plus important que celui observé sur un sol plus rigide.

Risque de résonance

Un bâtiment de 10 étages constitue une structure relativement flexible, avec une période propre plus longue que celle d'un bâtiment bas.

Lorsque la période propre du bâtiment se rapproche de la période dominante du sol, un phénomène de **résonance sol–structure** peut apparaître. Les oscillations du bâtiment sont alors amplifiées, ce qui explique les déplacements excessifs observés.

Tassements différentiels

La faible capacité portante et la déformabilité du sol peuvent également provoquer des **tassements différentiels** sous les fondations.

Ces tassements créent des déplacements différents d'une partie du bâtiment à l'autre et peuvent entraîner :

- fissuration des murs ;
- déformation de la structure ;
- inclinaison locale ;
- sollicitations supplémentaires dans les éléments porteurs et les fondations.

Le problème résulte donc de l'association :

sol mou + structure relativement flexible + fondations inadaptées = risque d'amplification des oscillations et de tassements différentiels.

b) Trois solutions

Solution 1 — Adapter les fondations aux caractéristiques du sol

Une étude géotechnique doit permettre d'identifier les couches résistantes et de choisir un système de fondation adapté.

Lorsque les couches superficielles sont insuffisamment résistantes, des **fondations profondes**, notamment des pieux, peuvent permettre de transmettre les charges vers des couches plus compétentes.

Solution 2 — Améliorer ou renforcer le sol

Lorsque cela est techniquement possible, le sol peut faire l'objet d'un traitement afin d'améliorer ses caractéristiques mécaniques et de réduire sa déformabilité.

Le principe consiste à obtenir une assise plus homogène afin de limiter les tassements différentiels.

Solution 3 — Adapter la conception du bâtiment au comportement du sol

La rigidité, la hauteur, la masse et le système de contreventement doivent être étudiés en relation avec les caractéristiques dynamiques du terrain.

Il convient notamment de rechercher :

- une structure régulière ;
- une répartition homogène des masses et des rigidités ;
- un contreventement continu ;
- un système de fondation cohérent avec la structure.

3. Régularité en plan et en élévation

La régularité permet d'obtenir un comportement sismique plus homogène et plus prévisible.

Régularité en plan

Il est recommandé de :

- privilégier des formes simples, compactes et aussi symétriques que possible ;
- éviter les formes très découpées et les angles rentrants importants ;
- répartir régulièrement les masses ;
- répartir les rigidités et les éléments de contreventement de manière équilibrée dans les deux directions principales ;
- limiter les excentricités susceptibles de provoquer de la torsion ;
- fractionner, si nécessaire, les formes complexes en blocs plus réguliers au moyen de joints parasismiques.

Régularité en élévation

Il est recommandé de :

- conserver une géométrie aussi régulière que possible sur la hauteur ;
- éviter les changements brusques de largeur ;
- privilégier les retraits progressifs ;
- assurer la continuité verticale des poteaux, voiles et autres éléments de contreventement ;

- éviter les niveaux souples ;
- limiter les variations brutales de masse et de rigidité entre deux niveaux successifs.

Le cours retient notamment une limitation de **30 % des variations de masse et de rigidité entre deux étages successifs**.

À retenir : simplicité – symétrie – régularité – continuité.

4. Analyse de la configuration représentée

Le bâtiment présente **deux parties adjacentes dont les planchers ne sont pas situés aux mêmes niveaux**. Cette configuration est défavorable en zone sismique, car les deux volumes peuvent présenter des comportements dynamiques et des déplacements horizontaux différents.

Lors d'un séisme, le plancher d'une partie du bâtiment peut venir solliciter les poteaux de la partie voisine **à mi-hauteur**. Cette interaction réduit localement la hauteur libre de certains poteaux et peut créer un **effet de poteau court**.

Les poteaux concernés deviennent alors plus rigides et attirent des efforts de cisaillement importants. Ils sont donc susceptibles de subir des **ruptures fragiles**, pouvant compromettre la stabilité locale ou globale du bâtiment.

Solutions parasismiques

1. Aligner les niveaux de planchers

La solution la plus favorable consiste à faire coïncider les niveaux des planchers des deux parties du bâtiment. Cette disposition évite que les planchers viennent solliciter les poteaux voisins à mi-hauteur.

2. Séparer les deux volumes par un joint parasismique

Lorsque l'alignement des planchers n'est pas compatible avec le projet architectural, les deux parties peuvent être rendues **structurellement indépendantes** grâce à un joint parasismique suffisamment dimensionné. Chaque bloc peut alors osciller indépendamment sans transmettre directement ses efforts à l'autre.

3. Concevoir indépendamment les deux systèmes structuraux

Les éléments porteurs et le contreventement de chaque volume doivent être continus jusqu'aux fondations, sans créer de liaison rigide susceptible de générer des poteaux courts ou des concentrations locales d'efforts.

5. Analyse de la séquence expérimentale — Hauteurs différentes

La séquence expérimentale compare deux structures présentant des **hauteurs différentes**. Elle met en évidence l'influence de la hauteur sur le comportement dynamique d'une structure.

Une structure de grande hauteur est généralement **plus flexible** et présente une **période propre plus longue**. Elle oscille donc plus lentement.

À l'inverse, une structure de faible hauteur est généralement **plus rigide** et présente une **période propre plus courte**. Elle oscille plus rapidement.

La séquence expérimentale montre ainsi que :

- pour un **mouvement lent**, la structure de grande hauteur entre en résonance ;
- pour un **mouvement rapide**, la structure de petite hauteur entre en résonance.

Lorsque la fréquence de l'excitation se rapproche de la fréquence propre de la structure, l'amplitude des oscillations augmente fortement : c'est le phénomène de **résonance**.

Conséquences pour la conception

La hauteur ne constitue donc pas uniquement une caractéristique géométrique du bâtiment. Elle influence directement ses propriétés dynamiques.

Il faut considérer conjointement :

- la hauteur ;
- la masse ;
- la rigidité ;
- le système structural ;
- les caractéristiques du sol.

À retenir : Structure haute → période plus longue → sensibilité aux mouvements lents. Structure basse → période plus courte → sensibilité aux mouvements rapides.

6. Largeur des semelles filantes pour une construction en adobe

Réponse correcte : c) 2 fois l'épaisseur des murs.

Pour une construction en adobe comportant **deux niveaux** et reposant sur un **sol moyennement ferme**, la largeur minimale de la semelle filante doit être égale à : $\mathbf{B \geq 2 \times e}$

où :

- **B** représente la largeur de la semelle ;
- **e** représente l'épaisseur du mur porteur.

7. Épaisseur minimale des murs de séparation en adobe

Réponse correcte : b) 20 cm.

L'épaisseur minimale des **murs de séparation** en adobe est de : **e ≥ 20 cm**

Il convient de distinguer cette valeur de celle applicable aux **murs porteurs en adobe**, dont l'épaisseur minimale est de **40 cm**.

8. Fabrication des briques d'adobe

Réponse attendue : A — Vrai.

L'adobe est une technique de construction en **terre crue**. La terre est mélangée à de l'eau afin d'obtenir une consistance permettant son moulage sous forme de briques, qui sont ensuite séchées avant leur mise en œuvre. Des fibres végétales peuvent être incorporées dans certaines techniques traditionnelles.

Toutefois, une précision est nécessaire : **l'ajout de fibres naturelles n'est pas systématiquement requis pour définir l'adobe**. Le support de cours caractérise principalement la terre destinée à l'adobe par sa composition granulométrique et par le procédé de moulage et de séchage.

Version 6

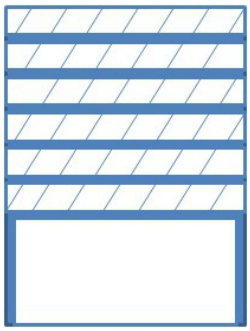
1/ À part l'effet du système portique et du remplissage en maçonnerie, identifiez et analysez cinq autres effets destructeurs majeurs des séismes. Pour chacun, expliquez son principe ou sa définition, puis proposez des solutions techniques permettant d'améliorer la stabilité du bâtiment.

2/ étude de cas : Un immeuble de 8 étages a été construit avec un système portique poteaux-poutres sans murs de contreventement. Les façades sont en remplissage de maçonnerie non armée. Lors d'un séisme, les murs se sont fissurés et certains se sont effondrés, compromettant la stabilité globale du bâtiment.

a) Identifiez les problèmes liés à cette conception.
b) Proposez trois solutions architecturales ou structurelles permettant de réduire ce risque.

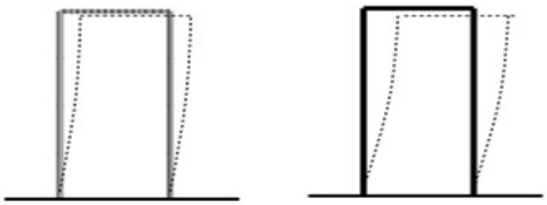
3/Quelles sont les recommandations parasismiques concernant la régularité en plan et en élévation d'un bâtiment ?

4/ Quelles sont les solutions parasismiques pour que le bâtiment suivant résiste aux secousses sismiques?



Vue en élévation

5/ Analyser le schéma suivant (voir la Vidéo):
Matériaux différents



6/ Dans un mur en pisé, pourquoi la hauteur de chaque banchée est-elle limitée à 80 cm ?

a) Pour éviter une surcharge des coffrages.
b) Pour réduire les coûts de construction.
c) Pour faciliter le processus de décoffrage et de compactage.
d) Pour assurer une meilleure adhésion entre les couches.

7/ Dans une construction en terre, quelle est la hauteur maximale recommandée pour les murs porteurs en adobe dans un bâtiment de deux niveaux ?

a) 4 m b) 5 m c) 6,5 m d) 7 m

8/ Lors de la construction d' un mur en pisé, le décoffrage peut être effectué immédiatement après le compactage. Un arrachement superficiel des parois après décoffrage peut révéler une teneur en eau inadéquate ou un compactage insuffisant.

A : vrai B : faux

Correction version 6

1. Cinq effets destructeurs majeurs autres que l'interaction portique–remplissage en maçonnerie

À l'exception de **l'effet lié à l'interaction entre le système portique et le remplissage en maçonnerie**, plusieurs configurations peuvent entraîner un comportement défavorable du bâtiment lors d'un séisme.

1.1. Effet de poteau court

L'effet de poteau court apparaît lorsque la **hauteur libre d'un poteau est réduite** par un élément rigide, tel qu'un muret, une allège ou un remplissage partiel.

Le poteau raccourci devient plus rigide que les poteaux voisins et attire une part plus importante des efforts sismiques. Cette concentration des efforts, notamment de cisaillement, peut provoquer une **rupture brutale et fragile**.

Solutions :

- éviter les remplissages partiels réduisant la hauteur libre des poteaux ;
- désolidariser les murets ou les allèges de l'ossature lorsque cela est possible ;
- homogénéiser les hauteurs libres des poteaux ;
- prévoir un système de contreventement permettant une meilleure répartition des efforts horizontaux.

1.2. Effet de niveau souple

Un niveau souple est un étage dont la **rigidité latérale est nettement inférieure à celle des étages voisins**. Cette situation est fréquente au rez-de-chaussée lorsque celui-ci est largement ouvert ou vitré.

Lors d'un séisme, les déplacements horizontaux se concentrent dans ce niveau. Les poteaux peuvent alors subir de fortes déformations et conduire à un **mécanisme d'étage**, voire à l'effondrement.

Solutions :

- introduire des voiles ou des palées de stabilité ;
- éviter les variations brutales de rigidité entre étages ;
- assurer la continuité verticale du contreventement ;
- répartir les éléments résistants de manière équilibrée.

1.3. Effet de torsion

La torsion apparaît principalement lorsque les **masses et les rigidités sont réparties de manière dissymétrique** dans le plan.

Sous l'action sismique, le bâtiment subit alors simultanément une translation et une rotation autour d'un axe vertical. Certains éléments périphériques sont ainsi soumis à des déplacements et à des sollicitations plus importants.

Solutions :

- privilégier des plans simples et aussi symétriques que possible ;
- répartir régulièrement les masses ;
- disposer les éléments de contreventement de manière équilibrée dans les deux directions principales ;
- éviter de concentrer les éléments très rigides sur un seul côté du bâtiment.

1.4. Nature du sol et résonance sol–structure

La nature du terrain influence directement la réponse sismique du bâtiment. Les sols mous peuvent modifier et amplifier certaines composantes du mouvement.

Lorsque la période dominante du sol se rapproche de la période propre du bâtiment, un phénomène de **résonance** peut amplifier fortement les oscillations.

Solutions :

- réaliser une étude géotechnique ;
- adapter le système structural aux caractéristiques du sol ;
- choisir des fondations appropriées ;
- tenir compte de l'interaction entre le sol et la structure dès la conception.

1.5. Couplage ou proximité entre bâtiments

Deux bâtiments voisins peuvent avoir des périodes et des amplitudes d'oscillation différentes. Lors d'un séisme, leurs déplacements ne sont donc pas nécessairement synchronisés.

S'ils sont trop proches, ils peuvent entrer en collision. Une liaison rigide entre les deux bâtiments peut également subir des sollicitations importantes.

Solutions :

- prévoir des joints parasismiques suffisamment larges ;
- permettre les déplacements indépendants des bâtiments ;
- éviter les liaisons rigides non adaptées ;
- concevoir les passerelles ou autres éléments de liaison de manière à accepter les déplacements relatifs.

L'effet des ouvrages en toiture constitue également une réponse acceptable parmi les effets étudiés.

2. Étude de cas — Portique poteaux-poutres et remplissage en maçonnerie

a) Identification des problèmes

Le bâtiment comporte un **système portique poteaux-poutres sans murs de contreventement**, associé à des façades constituées de **remplissages en maçonnerie non armée**.

Le premier problème réside dans la **faible rigidité latérale du système portique seul**, particulièrement pour un bâtiment de huit étages. En l'absence de voiles ou d'autres éléments de contreventement, les déplacements horizontaux peuvent devenir importants.

Le deuxième problème concerne l'interaction entre **l'ossature et les remplissages en maçonnerie**. Bien que ces remplissages puissent être considérés comme non porteurs, ils participent à la rigidité du bâtiment lorsqu'ils sont en contact avec le portique. Ils modifient donc localement la répartition des efforts.

Pendant le séisme, le portique se déforme tandis que les panneaux de maçonnerie, plus fragiles et moins déformables, subissent des contraintes importantes. Ils peuvent alors :

- se fissurer en diagonale ;
- se désolidariser de l'ossature ;
- subir des ruptures locales ;
- s'effondrer hors de leur plan.

Une répartition irrégulière des remplissages peut également provoquer des **variations locales de rigidité** et favoriser la torsion ou la création de poteaux courts.

Enfin, l'effondrement des panneaux constitue un **risque important pour les occupants**, même lorsque la structure principale ne s'effondre pas.

b) Trois solutions

Solution 1 — Introduire un système de contreventement clairement identifié

Des **voiles en béton armé**, noyaux ou palées de stabilité peuvent être introduits afin d'assurer la reprise des actions horizontales.

Ces éléments doivent être correctement répartis dans les deux directions principales et rester continus jusqu'aux fondations.

Solution 2 — Maîtriser l'interaction entre le portique et les remplissages

Les remplissages doivent être intégrés de manière cohérente à la conception. Il faut éviter les dispositions partielles ou irrégulières susceptibles de créer des concentrations de rigidité ou des poteaux courts.

Lorsque les remplissages ne doivent pas participer au comportement structural, une **désolidarisation appropriée** vis-à-vis de l'ossature peut être envisagée.

Solution 3 — Renforcer et sécuriser les panneaux de maçonnerie

Les panneaux peuvent être **armés, raidis ou correctement ancrés** à la structure afin d'améliorer leur stabilité, notamment hors plan, et de limiter leur risque d'effondrement.

Réponse synthétique attendue

L'association d'un **portique flexible sans contreventement** et de **remplissages en maçonnerie non armée** peut provoquer des déplacements importants de l'ossature et une interaction défavorable avec les panneaux de remplissage. Les principales solutions consistent à **introduire un système de contreventement adapté, maîtriser l'interaction entre le portique et les remplissages et assurer la stabilité des panneaux de maçonnerie**.

3. Régularité en plan et en élévation

La régularité permet d'obtenir un comportement sismique plus homogène et plus prévisible.

Régularité en plan

Il est recommandé de :

- privilégier des formes simples, compactes et aussi symétriques que possible ;
- éviter les formes très découpées et les angles rentrants importants ;
- répartir régulièrement les masses ;
- répartir les rigidités et les éléments de contreventement de manière équilibrée dans les deux directions principales ;
- limiter les excentricités susceptibles de provoquer de la torsion ;
- fractionner, lorsque cela est nécessaire, les formes complexes en blocs plus réguliers au moyen de joints parasismiques.

Régularité en élévation

Il est recommandé de :

- conserver une géométrie aussi régulière que possible sur la hauteur ;
- éviter les changements brusques de largeur ou de section ;
- privilégier les retraits progressifs ;
- assurer la continuité verticale des éléments porteurs et du système de contreventement ;
- éviter les niveaux souples ;
- limiter les variations importantes de masse et de rigidité entre étages successifs.

Le support retient notamment une limitation de **30 % des variations de masse et de rigidité entre deux étages successifs**.

À retenir : simplicité – symétrie – régularité – continuité.

4. Analyse de la configuration représentée

Le bâtiment présenté comporte un **rez-de-chaussée largement ouvert**, tandis que les étages supérieurs sont plus rigides. Cette configuration crée une **forte discontinuité de rigidité en élévation** : le rez-de-chaussée constitue alors un **niveau souple**.

Lors d'un séisme, les déplacements horizontaux se concentrent principalement au niveau le moins rigide. Les poteaux du rez-de-chaussée subissent donc des **déformations importantes** et des efforts élevés. Cette concentration des sollicitations peut conduire à un **mécanisme d'étage** et, dans les cas les plus graves, à l'effondrement partiel ou total du bâtiment.

Solutions parasismiques

1. Augmenter la rigidité du rez-de-chaussée

Introduire des **voiles en béton armé**, des **palées de stabilité** ou des diagonales métalliques afin de reprendre une part importante des efforts horizontaux.

2. Assurer la continuité verticale du contreventement

Les voiles, noyaux ou autres éléments résistants doivent se poursuivre de manière continue jusqu'aux fondations, sans interruption brutale au niveau du rez-de-chaussée.

3. Répartir les éléments résistants de manière équilibrée

Les voiles ou palées doivent être disposés dans les deux directions principales et de manière aussi symétrique que possible afin de limiter les effets de torsion.

4. Éviter les variations brutales de rigidité entre les niveaux

La transition entre le rez-de-chaussée ouvert et les étages supérieurs doit être rendue aussi progressive que possible.

5. Analyse de la séquence expérimentale — Matériaux différents

La séquence expérimentale met en évidence que des structures réalisées avec des **matériaux ou des systèmes constructifs différents** ne présentent pas nécessairement la même réponse dynamique sous une excitation sismique.

Les matériaux influencent notamment :

- la masse de la structure ;
- sa rigidité ;
- sa capacité de déformation ;
- son comportement dynamique.

Une structure plus rigide présente généralement une **période propre plus courte** et tend à osciller plus rapidement. Une structure plus flexible présente une **période propre plus longue** et oscille plus lentement.

Lorsque la fréquence de l'excitation se rapproche de la fréquence propre d'une structure, l'amplitude de ses oscillations peut fortement augmenter : c'est le phénomène de **résonance**.

Conséquences pour la conception

Le choix d'un matériau ne doit donc pas reposer uniquement sur sa résistance mécanique. Il faut également considérer :

- son poids propre ;
- sa rigidité ;
- sa capacité de déformation ;
- la ductilité du système constructif ;
- le comportement des assemblages.

À retenir : Le comportement parasismique dépend non seulement de la résistance des matériaux, mais également de leur masse, de leur rigidité, de leur capacité de déformation et du système constructif dans lequel ils sont employés.

6. Hauteur d'une banchée de pisé

Réponse correcte : c) Pour faciliter le processus de décoffrage et de compactage.

Dans la construction en pisé, la terre est mise en place puis compactée à l'intérieur de **banches**. La construction progresse ainsi par banchées successives.

La hauteur optimale d'une banchée est fixée à **80 cm**. Cette dimension permet de conserver une hauteur facilement maîtrisable pendant la mise en œuvre et facilite notamment les opérations de **mise en place, de compactage et de décoffrage**.

Une hauteur raisonnable permet également à l'opérateur de travailler correctement sur toute l'épaisseur et toute la hauteur de la banchée.

7. Hauteur maximale des murs porteurs en adobe

Réponse correcte : c) 6,5 m.

Pour une construction à **deux niveaux**, la hauteur maximale recommandée des murs porteurs en adobe est de : **Hmax = 6,5 m**

Pour une construction à un seul niveau, la hauteur maximale est de **4 m**.

Ces prescriptions doivent être respectées conjointement avec les exigences relatives à l'épaisseur, à l'élancement, aux raidisseurs, aux chaînages et aux ouvertures.

8. Décoffrage d’un mur en pisé

Réponse : A — Vrai.

Dans la construction en pisé, la terre est compactée à l’intérieur des banches. **Le décoffrage peut être effectué immédiatement après le compactage**, lorsque celui-ci a été correctement réalisé.

Après décoffrage, l’état de la surface constitue un indicateur de la qualité de mise en œuvre. Un **arrachement superficiel** peut révéler une teneur en eau inadéquate ou un compactage insuffisant. La partie défectueuse doit alors être reprise conformément aux prescriptions de mise en œuvre.

Fiche de synthèse — Les 12 réflexes de l'architecte

1. Connaître le sol avant de figer le système.
2. Préférer un plan simple, compact et symétrique.
3. Fractionner les formes très complexes.
4. Éviter les angles rentrants et retraits brutaux.
5. Répartir les rigidités dans les deux directions.
6. Éviter les niveaux souples.
7. Éviter les poteaux courts.
8. Maîtriser le rôle des remplissages en maçonnerie.
9. Rechercher la ductilité plutôt que la rupture fragile.
10. Autoriser les déplacements relatifs entre bâtiments.
11. Alléger et stabiliser les ouvrages en toiture.
12. En terre, assurer continuité, chaînages, raidisseurs et contrôle des ouvertures.

Phrase à retenir

Le séisme révèle les discontinuités. La conception parasismique consiste d'abord à les éviter, les réduire ou les maîtriser.

Références pédagogiques utilisées

• BEN AICHA, M. — Conception parasismique, support de cours Art de bâtir.

• BEN AICHA, M. — Conception parasismique : Construction en terre (RPCTerre 2011), support de cours.

• Séquences vidéo du cours : influence de la masse ; influence de la hauteur ; influence des matériaux.