

XI ISOLATION SISMIQUE A LA BASE

11	ISOLATION SISMIQUE A LA BASE	169
11.1	Domaine d'application	
11.2	Exigences fondamentales	
11.3	Critères de conformité	
11.4	Dispositions générales de dimensionnement	
11.5	Règles de calcul	
11.6	Vérification de la sécurité à l'état limite ultime	



11. ISOLATION SISMIQUE A LA BASE

11.1 Domaine d'application

Le présent chapitre donne les principes de base de conception et de vérification des structures neuves isolées à la base. On entend par structure isolée à la base, toute structure équipée d'un dispositif mécanique à même de réduire sa réponse sismique. Cette réduction peut être réalisée en augmentant, sa période fondamentale, avec ou sans amortissement ajouté.

1. Le présent document technique réglementaire traite du dimensionnement des structures sur appuis parasismiques (sismiquement isolées) dans lesquelles le système d'isolation, situé en dessous de la masse principale de la structure, est destiné à réduire la réponse sismique du système de contreventement.
2. La réduction de la réponse sismique du système de contreventement peut être obtenue en augmentant la période fondamentale de la structure sismiquement isolée, en modifiant la forme du mode fondamental et en augmentant l'amortissement, ou à l'aide d'une combinaison de ces effets. Le système d'isolation peut être constitué de ressorts et/ou d'amortisseurs linéaires ou non linéaires.
3. Des règles particulières concernant l'isolation de la base des bâtiments sont indiquées dans le présent DTR.
4. Le DTR ne couvre pas les systèmes de dissipation d'énergie passifs ou les dispositifs type bloqueurs qui sont disposés en superstructure.

11.2 Exigences fondamentales

1. L'action sismique de calcul est définie pour deux niveaux d'aléa sismique, cf. § 1.2.
2. Les niveaux d'aléa sismique peuvent être modifiés par le maître d'ouvrage en surclassant la structure pour une protection accrue, compte tenu de la nature et de la destination de l'ouvrage vis-à-vis des objectifs visés.
3. Une plus grande fiabilité est nécessaire pour les dispositifs d'isolation et leurs ancrages. Celle-ci doit être obtenue en appliquant un coefficient de majoration γ_x .

11.3 Critères de conformité

Pour se conformer aux exigences fondamentales, il conviendrait de définir de manière claire, les critères de performance souhaités pour la structure isolée correspondant aux deux niveaux d'aléa sismique, cf. § 1.2. Pour les ouvrages isolés à la base, les critères suivants doivent être adoptés :

- Etat limite ultime, il faut veiller à ce que :
 - L'infrastructure reste dans le domaine élastique.
 - Les réseaux vitaux doivent être dimensionnés pour résister à un déplacement relatif en prenant en compte un coefficient de majoration, γ_x , fixé à 1.3 pour les bâtiments.
 - Une plus grande fiabilité est nécessaire pour les dispositifs d'isolation et leurs ancrages. Celle-ci doit être obtenue en appliquant un coefficient de majoration γ_x égal à 1.3 sur les déplacements et les réactions transmises par chaque unité d'isolation.
- Etat de limitation des dommages, il faut veiller à ce que :
 - Les réseaux vitaux restent dans le domaine élastique.
 - Les dispositions réglementaires du chapitre 5 vis-à-vis des déplacements inter-étages soient applicables.

11.4 Dispositions générales de dimensionnement

11.4.1 Conception des bâtiments isolés à la base

Le dimensionnement des bâtiments isolés à leur base doit être fondé, essentiellement et autant que faire se peut, sur les principes suivants :

- la simplicité de la structure
- La régularité en plan et en élévation
- la résistance et la rigidité dans les deux directions
- la résistance et la rigidité vis-à-vis de la torsion
- l'action des diaphragmes au niveau des planchers

11.4.2 Dispositions générales concernant les dispositifs d'isolation

Dans la conception des dispositifs d'isolation, il convient de respecter les dispositions générales suivantes :

- Il doit être prévu un espace suffisant entre la superstructure et l'infrastructure, ainsi que toute autre disposition nécessaire, afin de pouvoir inspecter, entretenir et remplacer les dispositifs d'isolation pendant la durée de vie de la structure.
- Si nécessaire, il convient de protéger les dispositifs d'isolation contre des effets potentiellement dangereux, tels que l'incendie, les attaques chimiques ou biologiques.
- Il y a lieu que les matériaux utilisés pour le dimensionnement et la construction des dispositifs d'isolation soient conformes aux normes en vigueur.

11.4.3 Déplacements par rapport au sol et aux constructions environnantes

Il doit être prévu un espace suffisant entre la superstructure isolée et le sol ou les constructions avoisinantes, afin de permettre son déplacement dans toutes les directions.

11.4.4 Surveillance et inspection des structures isolées

- Pour les structures isolées il doit être prévu un programme d'inspection, de surveillance et de maintenance des dispositifs d'isolation.

- Un programme d'instrumentation pour le suivi du comportement de l'ouvrage isolé est recommandé dont la consistance dépend de l'importance de l'ouvrage.

11.5 Règles de calcul

11.5.1 Généralités

Quelle que soit la méthode de calcul adoptée, il est nécessaire d'entreprendre une analyse en utilisant la méthode statique équivalente. Celle-ci fixe, en effet, le niveau minimal de conception en termes de forces et de déplacements. De plus, elle est recommandée dans la conception préliminaire du système d'isolation et de la structure lorsque l'analyse dynamique est requise.

11.5.2 Action sismique

1. L'action sismique de calcul est représentée simultanément par les deux composantes horizontales et la composante verticale (A_v) dans le cas où celle-ci est supérieure à $0.25g$.
2. Chaque composante horizontale de l'action sismique peut être définie, à partir du § 3.3.1, par le spectre élastique en fonction de la zone sismique et des conditions locales du site.
3. Pour la composante verticale, il y a lieu de prendre celle spécifiée par le spectre élastique vertical défini au § 3.3.2.
4. Il convient de dériver des spectres spécifiques au site en prenant en compte les effets proches de la source, pour les bâtiments de groupe d'usage 1A ainsi que pour les bâtiments des autres groupes d'usage se trouvant à une distance inférieure à 15 km de la faille potentiellement active la plus proche, avec une magnitude ($M_s \geq 6.5$). Ces spectres ne doivent pas être inférieurs à ceux définis dans l'alinéa (2) et (3) du présent paragraphe.

Commentaire : Pour s'enquérir de la proximité du bâtiment par rapport à d'éventuelles failles potentiellement actives, il y a lieu de se rapprocher des institutions habilitées.

11.5.3 Coefficient de comportement

La valeur du coefficient de comportement à prendre en considération dans les analyses est $R = 1$.

11.5.4 Propriétés du système d'isolation

1. Les valeurs des propriétés physiques et mécaniques du système d'isolation, devant être utilisées dans l'analyse, doivent être les valeurs les plus défavorables atteintes pendant la durée de vie de la structure. Elles doivent refléter, le cas échéant, l'influence :
 - de la vitesse de chargement
 - de l'amplitude de la charge verticale simultanée
 - de l'amplitude de la charge horizontale dans la direction transversale
 - de la température
 - de l'évolution des propriétés au cours de la durée de service prévue
2. Il convient d'évaluer les accélérations et les forces d'inertie induites par le séisme, en prenant en compte la valeur maximale de la rigidité et la valeur minimale des coefficients d'amortissement et de frottement.
3. Il y a lieu d'évaluer les déplacements en prenant en compte la valeur minimale de la rigidité et des coefficients d'amortissement et de frottement.

Commentaire : Des analyses multiples doivent être conduites pour tenir compte des effets de la variation des propriétés de l'unité d'isolation sur les réponses de la structure. L'analyse du système

d'isolation et de la structure doit être effectuée séparément, en tenant en compte des valeurs limites supérieures et inférieures des propriétés des unités d'isolation.

11.5.5 Modélisation de la structure

1. La réponse dynamique du système structural doit être analysée en termes d'accélération, de forces d'inertie et de déplacements.
2. Dans les bâtiments, les effets de torsion, y compris les effets de l'excentricité accidentelle définie, au § 4.3.8, doivent être pris en compte.
3. La modélisation du bâtiment et de ses isolateurs doit être effectuée en trois dimensions. Outre les réponses de la superstructure en déplacements, en accélérations et en forces, les déformations des isolateurs dans les trois directions ainsi que leurs sollicitations ultimes induites doivent être analysés.

11.5.6 Méthodes d'analyses

Les méthodes d'analyses suivantes sont applicables :

1. La méthode statique linéaire équivalente
2. La méthode statique équivalente dite simplifiée
3. La méthode modale simplifiée
4. La méthode dynamique temporelle par accélérogrammes

Méthode statique linéaire équivalente

1. Sous réserve des conditions de l'alinéa (5) du présent paragraphe, le système d'isolation peut être modélisé par un comportement viscoélastique linéaire équivalent s'il se compose de dispositifs tels que des appuis en élastomère fretté, ou par un comportement hystérétique bilinéaire s'il se compose de dispositifs de type élasto-plastique.
2. Si un modèle linéaire équivalent est utilisé, il convient d'utiliser la rigidité effective de chaque unité d'isolation (c'est-à-dire la valeur sécante de la rigidité au déplacement de calcul total d_{db}), en respectant les dispositions de l'alinéa (1) du § 11.5.4. La rigidité effective, K_{eff} , du système d'isolation est la somme des rigidités effectives des unités d'isolation.
3. Si un modèle linéaire équivalent est utilisé, il convient d'exprimer la dissipation d'énergie du système d'isolation par un amortissement visqueux équivalent, «l'amortissement effectif» (ξ_{eff}). Il y a lieu d'exprimer la dissipation de l'énergie dans les appuis à partir de l'énergie mesurée, dissipée cycliquement à une fréquence comprise dans le domaine des fréquences naturelles des modes considérés. Pour des modes plus élevés, situés en dehors de ce domaine, il convient que le rapport d'amortissement modal de l'ensemble de la structure soit celui d'une superstructure à base fixe.
4. Lorsque la rigidité effective ou l'amortissement effectif de certaines unités d'isolation dépend du déplacement de calcul, d_{dc} , il convient d'appliquer une procédure itérative, jusqu'à ce que la différence entre la valeur supposée et la valeur calculée, d_{dc} , ne dépasse pas 5 % de la valeur supposée.
5. Le comportement du système d'isolation peut être considéré comme linéaire équivalent si toutes les conditions suivantes sont respectées :
 - la rigidité effective du système d'isolation, telle que définie dans l'alinéa (2) du présent paragraphe, est au moins égale à 50 % de la rigidité effective à un déplacement de $0.2d_{dc}$;
 - le pourcentage d'amortissement effectif, tel que défini dans l'alinéa (3) du présent paragraphe, ne dépasse pas 30 % ;

- les caractéristiques force/déplacement du système d'isolation ne varient pas de plus de 10 % en fonction de la vitesse de chargement ou des charges verticales.
6. Le système d'isolation doit être conçu selon ses limites de propriétés supérieures et inférieures ($K_{eff,max}$ et $K_{eff,min}$) de sorte qu'il induise une force de rappel «force de recentrage» correspondant au déplacement, d_{dc} . Cette force doit être supérieure ou égale à 2.5% de la charge gravitaire additionnée à une force de rappel correspondant à 50% du déplacement maximum, au moyen de l'expression suivante :

$$F_R(d = d_{dc}) \geq 0.025W_g + F_R(d = 0.5d_{dc}) \quad (11.1)$$

7. Si le comportement du système d'isolation est considéré comme linéaire équivalent et que l'action sismique est définie au moyen du spectre élastique comme indiqué dans l'alinéa (3) du § 11.5.2, il convient d'effectuer une correction d'amortissement conformément à § 3.3.1, cf. Eqn.(3.9).

Méthode statique équivalente dite simplifiée

1. La méthode d'analyse linéaire simplifiée considère deux translations dynamiques horizontales et superpose les effets statiques de la torsion. Elle suppose que la superstructure est un solide rigide en translation au-dessus du système d'isolation, sous réserve des conditions des alinéas (2) et (3) du présent paragraphe. La période de translation effective est alors :

$$T_{eff}) = 2.\pi.\sqrt{\frac{M}{K_{eff}}} \quad (11.2)$$

avec:

- M : masse de la superstructure ;
 - K_{eff} : rigidité horizontale effective du système d'isolation
2. Le mouvement de torsion autour de l'axe vertical peut être négligé dans l'évaluation de la rigidité horizontale effective et dans l'analyse linéaire simplifiée si, dans chacune des deux directions principales, l'excentricité totale (y compris l'excentricité accidentelle) entre le centre de rigidité du système d'isolation et la projection verticale du centre de gravité de la superstructure, ne dépasse pas 7.5 % de la longueur de la superstructure transversalement à la direction horizontale considérée. Ceci est une condition requise pour l'application de la méthode d'analyse linéaire simplifiée.
3. La méthode simplifiée peut être appliquée à des systèmes d'isolation ayant un comportement linéaire équivalent amorti, s'ils respectent également toutes les conditions suivantes :
- a) la distance entre le site à la faille potentiellement active, la plus proche avec une magnitude $M_w \geq 6.5$, est supérieure à 15 km ;
 - b) la plus grande dimension de la superstructure en plan n'est pas supérieure à 50 m ;
 - c) l'infrastructure est suffisamment rigide pour réduire au minimum les effets des déplacements différentiels du sol ;
 - d) tous les dispositifs sont situés au-dessus des éléments de l'infrastructure qui supportent les charges verticales ;
 - e) la période effective T_{eff} respecte la condition suivante :

$$3.T_f \leq T_{eff} \leq 3s \quad (11.3)$$

où: T_f est la période fondamentale de la superstructure supposée fixée à sa base (estimée au moyen d'une expression simplifiée).

4. Dans les bâtiments, outre l'alinéa (3) du présent paragraphe, il convient de respecter toutes les conditions suivantes pour pouvoir utiliser la méthode simplifiée applicable aux systèmes d'isolation ayant un comportement linéaire équivalent amorti :
- il convient que le système de contreventement de la superstructure soit régulièrement et symétriquement disposé le long des deux axes de la structure en plan ;
 - il convient que la rotation de balancement à la base de l'infrastructure soit négligeable ;
 - il convient que le rapport entre la rigidité verticale et la rigidité horizontale du système d'isolation respecte la condition suivante :

$$\frac{K_v}{K_{eff}} \geq 150 \quad (11.4)$$

- il convient que la période fondamentale dans la direction verticale, T_v , ne soit pas supérieure à 0.1 s, avec :

$$T_v = 2.\pi.\sqrt{\frac{M}{K_v}} \quad (11.5)$$

5. Il convient de calculer le déplacement du centre de rigidité dû à l'action sismique dans chaque direction horizontale au moyen de l'expression suivante :

$$d_{dc} = \frac{M.S_e(T_{eff}, \xi_{eff})}{K_{eff,min}} \quad (11.6)$$

où: $S_e(T_{eff}, \xi_{eff})$ est l'accélération spectrale définie au § 3.3.1, en tenant compte de la valeur appropriée de l'amortissement effectif ξ_{eff} calculé au moyen de l'expression suivante :

$$\xi_{eff} = \frac{1}{4.\pi} \frac{Aire_{hysteresis}}{Aire_{lastique}} \quad (11.7)$$

6. Il convient de calculer les forces horizontales appliquées à chaque niveau de la superstructure dans chaque direction horizontale, au moyen de l'expression suivante :

$$f_j = m_j.S_e(T_{eff}, \xi_{eff}) \quad (11.8)$$

où: m_j est la masse au niveau j .

7. Le système de forces considéré dans l'alinéa (6) induit des effets de torsion dus à la combinaison des excentricités naturelles et accidentelles.
8. Si la condition énoncée dans l'alinéa (2) du présent paragraphe, concernant la non prise en compte du mouvement de torsion autour de l'axe vertical, est respectée, les effets de torsion, dans les unités d'isolation individuelles, peuvent être pris en compte en amplifiant, dans chaque direction, les effets de l'action définis dans les alinéas (5) et (6) du présent paragraphe par un coefficient δ_i donné (pour l'action dans la direction x) par :

$$\delta_{xi} = 1 + \frac{e_{tot,y}}{r_y^2}.y_i \quad (11.9)$$

où:

- y est la direction horizontale transversalement à la direction x considérée ;
- (x_i, y_i) sont les coordonnées de l'unité d'isolation i par rapport au centre de rigidité effectif ;
- $e_{tot,y}$ est l'excentricité totale dans la direction y ;
- r_y est le rayon de torsion du système d'isolation dans la direction y , donné par l'expression suivante :

$$r_y^2 = \frac{\sum (x_i^2 \cdot k_{yi} + y_i^2 \cdot k_{xi})}{\sum K_{xi}} \quad (11.10)$$

où: K_{xi} et K_{yi} sont, respectivement, les rigidités effectives d'une unité i donnée dans les directions x et y .

Méthode modale simplifiée

1. Si le comportement des dispositifs d'isolation peut être considéré comme linéaire équivalent mais que toutes les conditions de § 11.5.6 "*Méthode statique équivalente dite simplifiée*" (2), (3) et, le cas échéant, (4) ne sont pas remplies, une analyse modale peut être effectuée conformément à § 4.3.
2. Si les conditions de § 11.5.6 "*Méthode statique équivalente dite simplifiée*" (3) et, le cas échéant, (4) sont remplies, une analyse modale simplifiée peut être effectuée en prenant en compte les déplacements horizontaux et le mouvement de torsion autour de l'axe vertical et en supposant que les infrastructures et les superstructures ont un comportement rigide. Dans ce cas, il convient de prendre en compte l'excentricité totale (y compris l'excentricité accidentelle selon § 4.3.8) de la masse de la superstructure dans l'analyse. Les déplacements à chaque point de la structure sont ensuite calculés en combinant les déplacements de translation et de rotation. Ceci s'applique, notamment, pour l'évaluation de la rigidité effective de chaque unité d'isolation. Il convient de prendre en compte les forces d'inertie et les moments pour la vérification des unités d'isolation et des infrastructures et superstructures.

Commentaire : Le coefficient d'amplification δ_i des effets de l'action sismique définit dans § 11.5.6 "*Méthode statique équivalente dite simplifiée*" (8) ne sera pas pris en compte.

Méthode dynamique temporelle par accélérogrammes

- La méthode dynamique temporelle par accélérogrammes est par ailleurs la seule appliquée pour les structures isolées avec des dissipateurs visqueux. Cette analyse dynamique pas-à-pas est réalisée en utilisant des accélérogrammes, reflétant les conditions de site d'implantation de l'ouvrage et calés à l'accélération maximale probable pouvant survenir au cours de sa durée de vie.
- Si un modèle linéaire équivalent ne peut pas être utilisé pour les isolateurs, une analyse temporelle non linéaire est nécessaire. Seules les unités d'isolation seront modélisées comme non linéaires.

Commentaire :

- Il est fortement recommandé d'employer une analyse temporelle quand le taux d'amortissement relatif à la dissipation est supérieur à 15%.
- Les modèles de comportement linéaires et non linéaires sont spécifiés dans l'annexe G.

11.6 Vérification de la sécurité à l'état limite ultime

1. L'infrastructure doit être vérifiée sous l'effet des forces d'inertie, auxquelles elle est directement soumise, ainsi qu'aux forces et aux moments qui lui sont transmis par le système

d'isolation.

2. L'état limite ultime de l'infrastructure et de la superstructure doit être vérifié en utilisant les valeurs des coefficients partiels de sécurité définies dans les articles correspondants du présent document technique réglementaire.
3. Dans les bâtiments, les vérifications de sécurité concernant l'équilibre et la résistance dans l'infrastructure et la superstructure doivent être effectuées conformément au Chapitre V.
4. En fonction du type de dispositif considéré, il convient d'évaluer la résistance des unités d'isolation, à l'état limite ultime, en termes de :
 - (a) forces, en prenant en compte les forces verticales et horizontales maximales possibles dans la situation sismique de calcul, y compris les effets de renversement ;
 - (b) déplacement relatif horizontal total entre les faces inférieure et supérieure de l'unité. Il convient que le déplacement horizontal total inclue la distorsion due à l'action sismique de calcul et les effets de retrait, de fluage et de température.