



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche scientifique
معهد العلوم
Institut des sciences



Département de génie civil

Polycopié Pédagogique

Génie parasismique

Cours destiné aux étudiants de :

2^{ème} année Master « LMD » en Génie Civil, spécialité Structures

Elaboré par:

Dr. Nadhir TOUBAL SEGHIR

Année Universitaire : 2024/2025

Table des matières

Introduction générale.....	1
I. Eléments de Sismologie	2
I.1 Introduction.....	2
I.2 Définition	3
I.3 Construction parasismique.....	3
I.4 Objectifs du génie parasismique	3
I.5 Séisme.....	4
I.5.1 Origines des séismes	4
I.6 Terminologie.....	5
I.6.1 Hypocentre et épicentre.....	5
I.6.2 Faille.....	5
I.7 Ondes sismiques	6
I.7.1 Ondes de volume	7
I.7.2 Ondes de surface	8
I.8 Systèmes de mesures des séismes.....	9
I.8.1 Échelle de Richter	9
I.8.2 Échelle de Mercalli.....	10
I.8.3 Relation entre la magnitude et l'intensité.....	12
I.8.4 Moyens de mesure des séismes	12
I.9 Aléas sismiques.....	13
I.9.1 Zonage réglementaire de l'aléa sismique en Algérie	14
I.9.2 Vulnérabilité.....	16
I.9.3 Risque sismique.....	16
I.9.4 Récapitulation.....	17
I.10 Effets des séismes	17
I.11 Conclusion	18
II. Objectifs de la protection parasismique et méthodes de dimensionnement.....	20
II.1 Introduction.....	20
II.2 Objectifs de comportement.....	20
II.3 Exigences de performance et critères de conformité	21

II.3.1	Exigences fondamentales	21
II.3.2	Critères de conformité	22
II.4	Méthodes de dimensionnement	22
II.4.1	Méthode de dimensionnement en capacité.....	22
II.5	Principes de vérification	24
II.6	Principes de conception	25
II.7	Conclusion	26
III.	Caractéristiques des bâtiments résistant aux séismes.....	27
III.1	Introduction.....	27
III.2	Principes de base de la conception	27
III.2.1	Simplicité de la structure.....	27
III.2.2	Uniformité, symétrie et hyperstaticité	28
III.2.3	Résistance et rigidité dans les deux directions	29
III.2.4	Résistance et rigidité à la torsion.....	30
III.2.5	Action des diaphragmes au niveau des étages.....	30
III.2.6	Fondations adéquates	30
III.3	Critères de régularité de la structure selon RPA 99 V 2003	31
III.3.1	Régularité en plan.....	31
III.3.2	Régularité en élévation.....	33
III.4	Conclusion	35
IV.	Critères de classification	36
IV.1	Introduction.....	36
IV.2	Critères de classification selon le « RPA 99 version 2003 » :.....	36
IV.3	Classification des ouvrages selon leur importance :.....	36
IV.3.1	Groupe 1A : Ouvrages d'importance vitale	37
IV.3.2	Groupe 1B : Ouvrages de grande importance	37
IV.3.3	Groupe 2 : Ouvrages courants ou d'importance moyenne	37
IV.3.4	Groupe 3 : Ouvrages de faible importance.....	38
IV.4	Classification des zones sismiques	38
IV.4.1	Coefficient d'accélération de zone	41
IV.5	Classification des sites d'implantation	41
IV.5.1	Choix du site.....	41
IV.5.2	Reconnaissance et étude de sol	41
IV.5.3	Implantation des ouvrages.....	42

IV.5.4	Infrastructure et fondations	43
IV.5.5	Catégories et critères de classification des sites	43
IV.5.6	Facteur d'amplification dynamique moyen	46
IV.6	Systèmes de contreventement	47
IV.6.1	Classification des systèmes de contreventement	47
IV.6.2	Coefficient de comportement global de la structure	53
IV.7	Conclusion	54
V.	Règles de calcul de la force sismique - Méthode statique équivalente	55
V.1	Introduction	55
V.2	Règles de calcul de la force sismique	55
V.3	Méthode statique équivalente	56
V.3.1	Définition	56
V.3.2	Principe	56
V.3.3	Conditions d'application	56
V.3.4	Modélisation	57
V.3.5	Calcul de la force sismique totale (effort tranchant à la base)	58
V.3.6	Estimation de la période fondamentale de la structure	62
V.4	Distribution verticale et horizontale des forces sismiques	63
V.4.1	Distribution verticale de la force sismique	63
V.4.2	Distribution horizontale de la force sismique	64
V.5	Effet de la torsion d'axe vertical	65
V.6	Distribution horizontale des forces sismiques aux éléments de contreventement	66
V.7	Justification de la sécurité et combinaisons d'actions	67
V.7.1	Justification de la sécurité	67
V.7.2	Combinaisons d'actions	70
V.8	Conclusion	70
VI.	Méthode dynamique modale spectral	71
VI.1	Introduction	71
VI.2	Définition	71
VI.3	Principe de la méthode	71
VI.4	Modélisation	72
VI.5	Spectre de réponse de calcul	72
VI.6	Nombre de modes à considérer	73
VI.7	Indépendance des modes	74

VI.8	Résultante des forces sismiques de calcul	75
VI.9	Effets de la torsion accidentelle	75
VI.10	Prescriptions communes aux méthodes « statique » et « dynamique »	75
VI.10.1	Stabilité au renversement	75
VI.10.2	Composante verticale de l'action sismique.....	76
VI.10.3	Calcul des déplacements	76
VI.11	Conclusion	76
VII.	Concept de ductilité et dispositions constructives.....	77
VII.1	Introduction.....	77
VII.2	Concept de ductilité et introduction au dimensionnement par la capacité	77
VII.2.1	Définition et importance de la ductilité.....	77
VII.2.2	Rôles clés de la ductilité en génie parasismique	77
VII.2.3	Introduction au dimensionnement par la capacité.....	78
VII.2.4	Application pratique du dimensionnement par la capacité	79
VII.3	Dispositions constructives	80
VII.3.1	Spécifications particulières aux éléments structuraux.....	80
VII.3.2	Prescriptions complémentaires aux éléments non structuraux.....	81
VII.4	Conclusion	82
	Conclusion générale	83
	Bibliographie	84

Liste des figures

Figure I-1. Épicentre, hypocentre et faille.....	5
Figure I-2. Faille normale.....	6
Figure I-3. Faille inverse.	6
Figure I-4. Faille en décrochement.....	6
Figure I-5. Ondes de pression P "longitudinales".	7
Figure I-6. Ondes de cisaillement S "transversales".	7
Figure I-7. Ondes de Rayleigh.	9
Figure I-8. Ondes de Love.....	9
Figure I-9. Schéma de principe : a) sismographe vertical, b) sismographe horizontal.	13
Figure I-10. Sismographe : a) sismographe Wiechert, b) sismographe vertical, c) sismographe horizontal.....	13
Figure I-11. Carte de zonage sismique de l'Algérie.	14
Figure I-12. Cartographie sismique d'Algérie 1980-2013.....	15
Figure I-13. Aléa sismique en Afrique.	15
Figure II-1. Force-Déplacement en relation avec le type de structure porteuse (fragile/ductile).	23
Figure III-1. Fractionnement des bâtiments par des joints sismiques ou partition en sous structures en élévation.....	28
Figure III-2. Formes complexes en plan et décomposition en blocs simples indépendants.	28
Figure III-3. Une grande distance entre les éléments parallèles favorise la résistance de la structure à la torsion grâce à un bras de levier important dans le plan horizontal.	29
Figure III-4. Limites des décrochements en plan d'après le RPA99V2003.....	31
Figure III-5. Critères de régularité en plan d'après l'Eurocode 8.	32
Figure III-6. Oscillations différentielles dommages dans les angles rentrants.....	32
Figure III-7. Oscillations différentielles dommages dans les angles rentrants dans le plan vertical.	33
Figure III-8. Oscillations différentielles dommages dans les angles rentrants.....	33
Figure III-9. Régularité en élévation.	33
Figure III-10. Limites des décrochements en élévation d'après le RPA99V2003.....	34
Figure III-11. Limites des décrochements en élévation d'après l'Eurocode 8.....	34
Figure IV-1. Carte de zonage sismique de l'Algérie.	38
Figure IV-2. Facteur d'amplification dynamique moyen D ($\xi = 5\%$).	46
Figure V-1. Principe de la méthode statique équivalente.....	56

Figure V-2. Modèle plan du bâtiment.	57
Figure V-3. Déformée du mode fondamental : a)structures à portiques, b)structures à voiles.	58
Figure V-4. Distribution des forces sismiques selon la hauteur.	64
Figure V-5. Distribution proportionnelle à la masse.	64
Figure V-6. Torsion d'axe verticale.	66
Figure V-7. Distribution proportionnelle à la rigidité.	66
Figure V-8. Largeur minimum du joint sismique.	68
Figure V-9. Effet P- Δ	69
Figure V-10. Condition de l'effet P- Δ	69
Figure VI-1. Mode de vibration.	71
Figure VI-2. Spectre de réponse de calcul à partir d'un enregistrement du mouvement sismique.	73
Figure VI-3. Nombre de modes de vibration à retenir d'une structure (Exemple).	74
Figure VI-4. Excentricité théorique et excentricité accidentelle.	75

Liste des tableaux

Tableau I-1. Causes des séismes.	5
Tableau I-2. Echelle de Richter.	10
Tableau I-3. Brève description des 12 degrés de l'échelle MERCALLI.	11
Tableau I-4. Brève description du pourcentage de vulnérabilité.	16
Tableau IV-1. Classification des zones sismiques par Wilaya et par Commune.	39
Tableau IV-2. Coefficient d'accélération de zone.	41
Tableau IV-3. Valeurs de T_1 et T_2	44
Tableau IV-4. Classification des sites.	44
Tableau IV-5. Limitation pour les bâtiments en portiques autostables en béton armé sans remplissage en maçonnerie rigide.	48
Tableau IV-6. Limitation pour les bâtiments en portiques autostables en béton armé avec remplissage en maçonnerie rigide.	48
Tableau IV-7. Limitation pour les bâtiments en maçonnerie porteuse chaînée.	52
Tableau IV-8. Valeurs du coefficient de comportement R pour la structure en béton armé.	53
Tableau IV-9. Valeurs du coefficient de comportement R pour les structures en acier.	53
Tableau IV-10. Valeurs du coefficient de comportement R pour les structures en maçonnerie et autres systèmes.	54
Tableau V-1. Conditions de hauteur pour les structures irrégulières.	57
Tableau V-2. Valeurs de T_1 et T_2	59
Tableau V-3. Valeurs de $\xi(\%)$	59
Tableau V-4. Valeurs des pénalités P_q	60
Tableau V-5. Valeurs du coefficient de pondération β	61
Tableau V-6. Valeurs du coefficient de pondération CT	62

Avant-propos

Le génie parasismique représente un domaine essentiel de l'ingénierie civile, visant à concevoir des structures capables de résister aux effets destructeurs des séismes. Les tremblements de terre, en raison de leur caractère imprévisible et de leur puissance potentiellement dévastatrice, constituent une menace majeure pour les infrastructures et la sécurité des occupants. Dans ce contexte, il est impératif de doter les futurs ingénieurs civils des compétences et des connaissances nécessaires pour analyser, concevoir et optimiser des bâtiments adaptés aux contraintes sismiques.

Ce document, intitulé « Génie parasismique », est un support de cours pédagogique destiné aux étudiants de la deuxième année Master « LMD » en Génie Civil, spécialité Structures. Il a pour objectif de leur fournir une compréhension approfondie des principes fondamentaux de la conception parasismique, en s'appuyant sur les avancées scientifiques et les réglementations en vigueur.

À travers sept chapitres structurés, cette formation explore divers aspects du génie parasismique, en commençant par les notions de base en sismologie, indispensables pour comprendre l'origine et la propagation des ondes sismiques. Par la suite, les méthodes de dimensionnement parasismique sont abordées, en mettant l'accent sur les principes de conception permettant de garantir la stabilité et la sécurité des ouvrages face aux sollicitations dynamiques. Les caractéristiques des bâtiments résistants aux séismes, les critères de classification ainsi que les règles de calcul des forces sismiques sont traités de manière détaillée afin d'offrir aux étudiants une approche rigoureuse et appliquée. De plus, l'importance de la ductilité des matériaux, des dispositions constructives et de la prise en compte des éléments non structuraux est mise en avant pour garantir une réponse globale efficace des structures soumises à des secousses sismiques.

Ce cours adopte une approche intégrée, combinant théorie et application pratique, pour préparer les étudiants à relever les défis de la conception et de l'évaluation des bâtiments en zones sismiques. La maîtrise des techniques modernes de conception parasismique est essentielle pour minimiser les pertes humaines et économiques en cas de séisme, tout en assurant la durabilité et la résilience des infrastructures. À travers cette formation, les étudiants seront en mesure d'appliquer les concepts étudiés dans des projets réels et de contribuer activement au développement de solutions innovantes et performantes dans le domaine du génie parasismique.

Dr. Toubal Seghir Nadhir

Introduction générale

Les événements sismes représentent un défi majeur pour les ingénieurs civils, en particulier dans les régions géologiquement actives. Ces événements naturels, souvent imprévisibles, exercent des forces considérables sur les structures, mettant en péril leur stabilité et leur capacité à protéger les occupants. Les structures soumises aux vibrations sismiques doivent donc être conçues pour résister à des charges dynamiques d'une grande intensité. Leur comportement devient particulièrement complexe lorsqu'on considère les phénomènes non linéaires qui interviennent lors d'un tremblement de terre. En conséquence, il est essentiel que les ingénieurs disposent des outils, des connaissances et des techniques nécessaires pour concevoir des structures capables d'absorber et de dissiper l'énergie générée par ces événements tout en minimisant les risques de défaillance catastrophique.

Le génie parasismique vise à garantir la sécurité des bâtiments en développant des solutions permettant de réduire les effets des secousses sur les structures. Cela implique une compréhension approfondie des principes de la dynamique des structures, des matériaux utilisés, ainsi que des méthodes de calcul des forces sismiques. Le but ultime est de créer des conceptions structurales qui non seulement résistent aux forces imposées par les séismes, mais qui le font d'une manière contrôlée, en optimisant la performance de la structure tout en protégeant la vie humaine et les biens matériels.

Ce cours est structuré en sept chapitres, abordant les fondements de la sismologie, les méthodes de dimensionnement parasismique, et les caractéristiques spécifiques des bâtiments résistants aux séismes. Il introduit également les critères de classification des bâtiments en fonction de leur capacité à résister aux secousses sismiques. Parmi les concepts abordés, on trouve la ductilité des matériaux, un aspect central pour la gestion des déformations sous contraintes sismiques, et les différentes méthodes de calcul des forces sismiques, comme la méthode statique équivalente et la méthode dynamique modale spectrale. Cette approche couvre une large gamme d'aspects, allant des principes théoriques aux applications pratiques.

L'objectif de ce programme est d'offrir aux étudiants une compréhension complète et intégrée du génie parasismique, en les préparant à relever les défis de la conception sismique dans des zones à risque. En fournissant un ensemble d'outils théoriques et pratiques, ce cours permet aux futurs ingénieurs de concevoir des structures qui allient sécurité, efficacité et conformité aux normes sismiques. Au terme de cette formation, les étudiants seront capables d'analyser les comportements des structures face aux séismes et de proposer des solutions de conception adaptées, optimisées pour garantir une résistance maximale tout en minimisant les coûts et les dommages en cas de catastrophe sismique.

I. Eléments de Sismologie

I.1 Introduction

Les séismes, phénomènes naturels imprévisibles, ont toujours suscité un grand intérêt en raison de leur capacité à causer des destructions massives et à affecter gravement les sociétés humaines. L'étude de ces événements et de leurs effets sur les constructions et l'environnement relève de la **sismologie**, une discipline scientifique fondamentale dans le domaine du génie civil et de l'ingénierie parasismique. Cette branche de la géophysique permet de mieux comprendre les causes, la propagation des ondes sismiques et les conséquences des tremblements de terre.

Ce chapitre a pour objectif de fournir une base solide de connaissances sur les concepts essentiels de la sismologie. Il débute par une définition générale de la discipline et de ses objectifs, avant de s'intéresser aux **origines des séismes**, à la **terminologie** associée, ainsi qu'aux différents types d'ondes sismiques. L'étude de ces ondes, qu'elles soient de volume ou de surface, constitue un élément central pour appréhender la dynamique des secousses sismiques.

Un point crucial dans la gestion des risques sismiques est la mesure des tremblements de terre, pour laquelle différentes échelles, telles que l'échelle de Richter et l'échelle de Mercalli, sont utilisées pour évaluer la magnitude et l'intensité des séismes. Ce chapitre aborde également les **aléas sismiques**, en expliquant le zonage réglementaire et la classification des sols, éléments essentiels pour la conception parasismique des structures.

Enfin, la notion de **vulnérabilité** et de **risque sismique** est discutée, en mettant l'accent sur la manière dont l'interaction entre l'aléa, les caractéristiques des sols et les propriétés des constructions détermine l'ampleur des dommages lors d'un séisme. Les effets des séismes sur l'environnement et les infrastructures, tels que la liquéfaction des sols ou les glissements de terrain, sont également examinés.

À travers cette analyse détaillée, ce chapitre vise à fournir les outils nécessaires pour une meilleure compréhension des phénomènes sismiques et des stratégies à adopter pour réduire les risques associés, en particulier dans le cadre de la construction de bâtiments résistants aux secousses sismiques.

I.2 Définition

La sismologie, ou séismologie, est une discipline scientifique qui étudie les séismes ainsi que la propagation des ondes sismiques à l'intérieur de la Terre. Elle constitue une branche de la géophysique et vise à :

- Comprendre les causes et les mécanismes des phénomènes sismiques ;
- Étudier la structure interne du globe terrestre.

La sismologie permet d'associer à chaque site un outil de travail appelé « **spectre de réponse** », qui sert à caractériser son comportement face aux secousses sismiques.

I.3 Construction parasismique

Une **construction parasismique**, ou antisismique, désigne un ouvrage conçu et réalisé conformément aux règles parasismiques en vigueur.

Cette conformité est généralement perçue comme une garantie de résistance aux séismes. Toutefois, bien qu'un niveau suffisant de résistance soit souvent atteint grâce à l'application des normes parasismiques, le risque d'effondrement total ou partiel d'un ouvrage lors d'un séisme violent ne peut être totalement exclu.

I.4 Objectifs du génie parasismique

Le génie parasismique concerne l'étude du comportement des structures soumises à un chargement dynamique de type sismique. Ses objectifs sont les suivants :

- Prévoir les conséquences éventuelles des séismes ;
- Comprendre l'interaction entre **les structures et le sol** (structures-sols) ainsi qu'entre **différentes structures** (structures-structures) ;
- Concevoir des structures résistantes aux séismes, en accord avec les normes de construction locales ;
- Concevoir des ouvrages stratégiques (centrales nucléaires, hôpitaux, casernes de pompiers, ouvrages d'art, etc.) capables de résister à des séismes majeurs ;
- Contrôler la dégradation des structures et éviter leur ruine totale lors d'un séisme ;
- Optimiser les coûts : concevoir des bâtiments entièrement résistants aux séismes majeurs étant trop onéreux, il est essentiel de contrôler la dégradation des matériaux pour éviter l'effondrement sur les occupants ;
- Déterminer la localisation probable des séismes, leur intensité et leur fréquence approximative ;
- Prédire le comportement du sol du site d'implantation sous l'effet des secousses sismiques ;

- Identifier les types de construction inadaptés à un site donné. Un même séisme peut engendrer des secousses très différentes selon la nature du sol (intensité, durée et caractéristiques variables). La conception des bâtiments doit donc être adaptée aux spécificités du site ;
- Anticiper les déformations d'une structure en fonction du sol sur lequel elle est construite ;
- Identifier les zones les plus vulnérables d'une structure face à de fortes secousses ;
- Déterminer les techniques de mise en œuvre adaptées aux différents types de sols, selon leur comportement dynamique ;
- Réduire la vulnérabilité sismique des bâtiments existants en définissant un niveau optimal de renforcement ;
- Élaborer des règles de construction efficaces basées sur ces connaissances.

Remarque :

- Ce ne sont pas les séismes qui tuent, mais principalement l'effondrement des bâtiments.
- Une **probabilité de ruine** est admise ; néanmoins, la probabilité de pertes humaines doit rester extrêmement faible.

I.5 Séisme

Un séisme est une vibration du sol provoquée par la libération brusque de l'énergie de déformation accumulée dans la croûte terrestre ou dans la couche sous-jacente. Cette libération se fait généralement par rupture le long d'une faille préexistante.

I.5.1 Origines des séismes

Un séisme peut être défini comme une secousse ou une série de secousses plus ou moins violentes du sol, ayant trois origines principales :

- **Rupture d'une faille ou d'un segment de faille** due aux mouvements des plaques tectoniques.
- **Intrusion et dégazage d'un magma** (séismes volcaniques).
- **Explosion ou effondrement d'une cavité** (séisme d'origine naturelle ou humaine).

Remarque :

- Les séismes tectoniques sont de loin les plus fréquents et sont bien expliqués par la théorie de la tectonique des plaques.
- Les séismes volcaniques accompagnent souvent les éruptions volcaniques et peuvent être utilisés pour la prévision des éruptions.
- À l'exception des tirs nucléaires, les séismes artificiels sont généralement de faible magnitude.

I.5.1.1 Classification des causes des séismes

La classification des causes des séismes en fonction du mécanisme est présentée dans le tableau ci-dessous.

Tableau I-1. Causes des séismes.

Mécanisme	Séismes naturels	Séismes artificiels « Séismes induits par l'activité humaine »
Rupture d'une faille	Séismes tectoniques : – La rupture brusque des roches	– Mise en eau d'un grand barrage – Exploitation de gaz, pétrole...etc.
Explosion	Séismes volcaniques : – Fracturation des roches due l'intrusion de magma, – Dégazage, oscillation propre du réservoir.	– Tirs d'exploration sismique, – Tirs de mines et carrières, – Essais nucléaires souterrains.
Implosion	Séismes d'effondrement : – Effondrement de cavités dans le gypse ou le calcaire – Effondrement lié à un grand glissement de terrain.	– Effondrements d'anciennes mines.

I.6 Terminologie

I.6.1 Hypocentre et épicentre

L'endroit où se produit le séisme est appelé **foyer** ou **hypocentre**, tandis que le point de la surface du sol directement au-dessus est appelé **épicentre**.

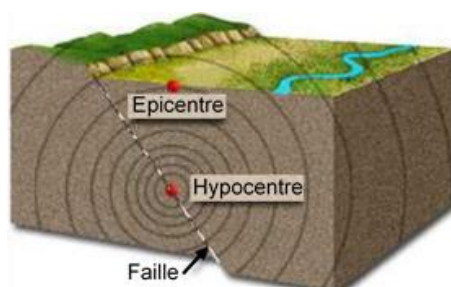


Figure I-1. Épicentre, hypocentre et faille.

I.6.2 Faille

Une faille est la rupture d'un ensemble rocheux sous l'effet des contraintes auxquelles il est soumis. On parle de **mécanisme au foyer** pour décrire le type de faille impliqué dans le tremblement de terre, ainsi que l'orientation de la faille et la direction du glissement des blocs le long de celle-ci.

Il existe trois types principaux de failles :

- **Les failles normales** : La déformation entraîne un étirement des roches, résultant de mouvements d'écartement (divergence).

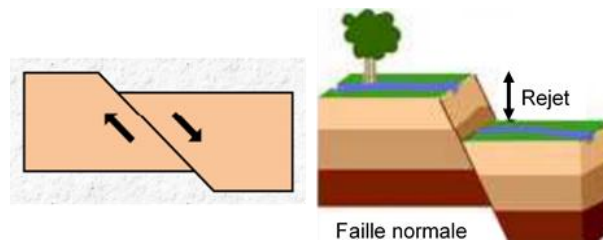


Figure I-2. Faille normale.

- **Les failles inverses** : La déformation entraîne un raccourcissement des terrains, résultant de mouvements de rapprochement (convergence).

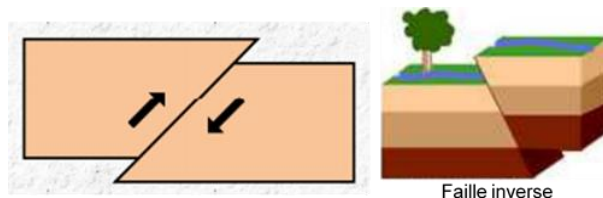


Figure I-3. Faille inverse.

- **Les failles en décrochement** : Ces failles provoquent un déplacement horizontal des blocs.

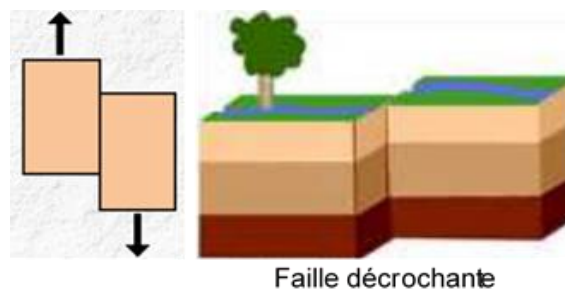


Figure I-4. Faille en décrochement.

I.7 Ondes sismiques

Les vibrations générées par un séisme se propagent dans toutes les directions. Ces ébranlements, qui se déplacent sous forme d'ondes, traversent le globe et fournissent des informations précieuses sur sa structure interne. Les ondes sismiques sont des ondes élastiques, ce qui signifie qu'elles peuvent traverser un milieu sans altérer durablement celui-ci. L'impulsion initiale "pousse" les particules du milieu, qui à leur tour déplacent d'autres particules avant de reprendre leur position d'origine. Ce processus se poursuit à travers le milieu.

Les ondes sismiques sont divisées en deux grandes catégories : les **ondes de volume**, qui traversent la Terre, et les **ondes de surface**, qui se propagent parallèlement à la surface de la Terre. Ces ondes se succèdent et se superposent dans les enregistrements des sismomètres. Leur vitesse de propagation et leur

amplitude varient en fonction des structures géologiques traversées, ce qui fait que les signaux enregistrés sont une combinaison des effets de la source, des milieux traversés et des instruments de mesure.

Les ondes sismiques sont classées en deux familles : les **ondes P** (primaires) et les **ondes S** (secondaires), appelées aussi ondes de volume, car elles se propagent à travers tout le volume de la Terre.

I.7.1 Ondes de volume

Les ondes de volume se propagent à l'intérieur du globe. Leur vitesse de propagation dépend du matériau traversé et, généralement, augmente avec la profondeur en raison de la rigidité croissante du matériau. On distingue deux types principaux :

- **Les ondes P** (ondes primaires, aussi appelées ondes de pression) : Ces ondes se propagent à une vitesse d'environ 7 à 8 km/s et arrivent en premier. Elles provoquent un mouvement vertical du sol, moins perceptible que celui des ondes S. Les matériaux (roches) sont alternativement comprimés et dilatés, à l'instar d'un ressort. Ces ondes traversent tous les types de milieux, y compris les liquides et les gaz.

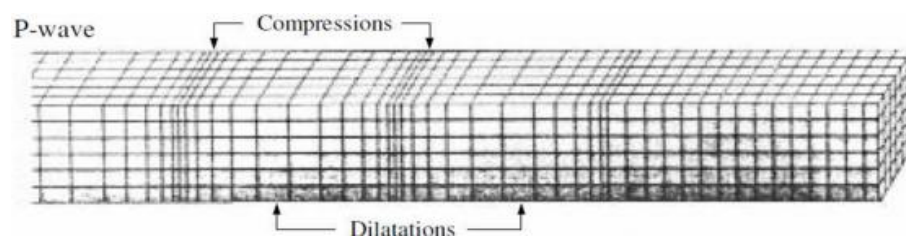


Figure I-5. Ondes de pression P "longitudinales".

- **Les ondes S** (ondes secondaires, aussi appelées ondes de cisaillement) : Ces ondes arrivent après les ondes P, avec une vitesse de propagation d'environ 4 à 5 km/s. Leur amplitude et leurs périodes sont plus grandes que celles des ondes P. Elles s'accompagnent d'un mouvement horizontal de cisaillement du sol, fortement ressenti. Les matériaux traversés par les ondes S subissent une distorsion, mais retrouvent leur forme initiale. Ces ondes ne se propagent que dans les milieux solides, car elles offrent une résistance à la distorsion (déformation).

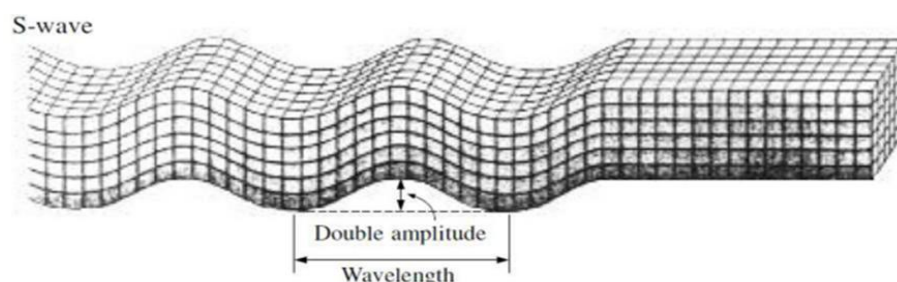


Figure I-6. Ondes de cisaillement S "transversales".

Remarque :

Les ondes sismiques se propagent dans toutes les directions à partir du foyer.

I.7.1.1 Vitesse des ondes de volume

La vitesse des ondes sismiques dans un milieu dépend de son élasticité, et peut être exprimée en termes de ses constantes élastiques. Dans les matériaux solides isotropes et homogènes, les ondes P se propagent en ligne droite longitudinale. La vitesse des ondes P dans ce type de milieu est donnée par :

$$V_p = \sqrt{\frac{k + (4/3)G}{\rho}} = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} = \sqrt{\frac{M}{\rho}} \quad (I.1)$$

$$\text{Avec : } \lambda = \frac{\nu E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \text{ et } G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Où :

- k : le module d'élasticité isostatique (incompressibilité du milieu),
- G : le module de cisailment,
- ρ : la densité du milieu,
- λ : le premier coefficient de Lamé,
- M : le module d'onde P,
- ν : le coefficient de Poisson,
- E : le module de Young.

Les ondes S sont des combinaisons linéaires d'ondes planes sinusoïdales de différentes longueurs d'onde et directions de propagation, mais toutes avec la même vitesse :

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (I.2)$$

Ce qui amène à:

ν	0	0.15	0.25
$\frac{V_p}{V_s}$	1.41	1.56	1.71

Remarque:

Les ondes P se propagent environ une fois et demie plus vite que les ondes S. C'est pourquoi les ondes P sont les premières enregistrées par les sismographes.

I.7.2 Ondes de surface

Lorsque les ondes de volume atteignent la surface de la Terre, elles produisent des ondes de surface qui ne pénètrent que superficiellement dans le sol. La vitesse des ondes de surface varie de 1,5 à 5 km/s dans les sols compacts (roches), et de 0,5 à 1,5 km/s dans les sols meubles.

I.7.2.1 Ondes de Rayleigh (ondes R)

Les ondes de Rayleigh provoquent un mouvement elliptique dans le plan vertical de la propagation, similaire au mouvement de la houle. Elles entraînent des compressions et des tractions, ainsi que des cisaillements dans le sol. Ces ondes sont responsables de déplacements horizontaux et verticaux du sol et sont généralement enregistrées par les trois composantes du sismomètre. Les vibrations qu'elles génèrent durent plusieurs minutes.

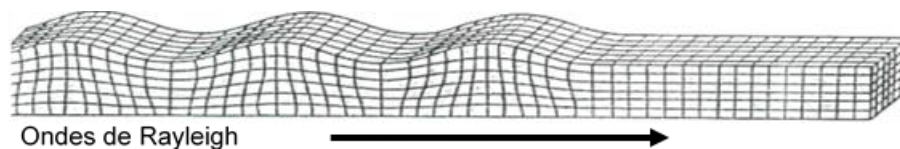


Figure I-7. Ondes de Rayleigh.

I.7.2.2 Ondes de Love (ondes Q)

Les ondes de Love se propagent dans un plan tangent à la surface de la Terre, perpendiculairement à la direction de propagation. Elles ne provoquent que des contraintes de cisaillement et génèrent un mouvement horizontal du sol. Ces ondes sont souvent responsables de dommages importants aux fondations des bâtiments. Elles se propagent à environ 4 km/s , et sont donc plus rapides que les ondes de Rayleigh.

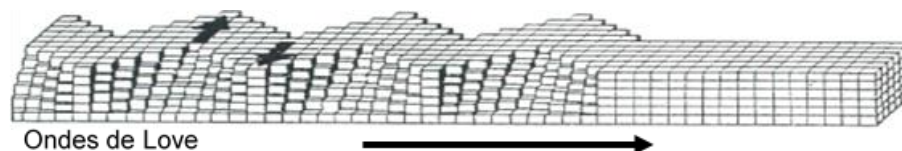


Figure I-8. Ondes de Love.

I.8 Systèmes de mesures des séismes

Les scientifiques évaluent l'ampleur des tremblements de terre à l'aide de deux instruments principaux : **l'échelle de Richter**, qui quantifie la magnitude d'un séisme, et **l'échelle de Mercalli**, qui mesure l'intensité du séisme (les dégâts).

I.8.1 Échelle de Richter

L'échelle de Richter, établie en 1935 par le géologue américain Charles Francis Richter, mesure la quantité d'énergie libérée au foyer d'un séisme, c'est-à-dire la magnitude du séisme. Cette mesure est réalisée à partir des enregistrements des sismographes.

La magnitude M est calculée selon la formule suivante :

$$M = \log \frac{A_{\mu m}}{T} + F(\Delta) \quad (\text{I.3})$$

Où :

- M : la magnitude des ondes de volume,

- $A_{\mu m}$: l'amplitude maximale en micro d'un sismographe étalon placé à 100 km de l'épicentre,
- T : la période en secondes,
- $F(\Delta)$: le terme empirique due à l'amortissement du signal sismique en fonction de la distance Δ et de la profondeur.

L'échelle de Richter est ouverte et ne possède ni limite inférieure (on peut compter en degrés négatifs), ni limite supérieure. Sa progression est logarithmique.

L'énergie libérée par le séisme sous forme d'énergie cinétique E_c est calculée en fonction de la magnitude estimée à partir de l'amplitude maximale mesurée par le sismographe, selon la formule :

$$\log E_c = 1.5M + 4.8 \quad (I.4)$$

Cependant, cette quantité n'est pas directement utilisable par l'ingénieur en construction, qui s'intéresse avant tout aux mouvements en surface dans une zone géographique donnée.

Tableau I-2. Echelle de Richter.

Magnitude	Niveau	Fréquence	Effets
< 2.0	Micro	8 000 par jour	Micro tremblement de terre, non ressenti.
2.0 à 2.9	Très mineur	1 000 par jour	Généralement non ressenti mais détecté/ enregistré.
3.0 à 3.9	Mineur	49 000 par an	Souvent ressenti mais causant rarement des dommages.
4.0 à 4.9	Léger	6 200 par an	Secousses notables d'objets à l'intérieur des maisons, bruits d'entrechoquement. Dommages importants peu communs.
5.0 à 5.9	Modéré	800 par an	Peut causer des dommages majeurs à des édifices mal conçus dans des zones restreintes. Cause de légers dommages aux édifices bien construits.
6.0 à 6.9	Fort	120 par an	Peut-être destructeur dans des zones allant jusqu'à 180 kilomètres à la ronde si elles sont peuplées.
7.0 à 7.9	Majeur	18 par an	Peut provoquer des secousses faibles dans des zones plus vastes.
8.0 à 8.9	Important	1 par an	Peut causer des dommages sérieux dans des zones à des centaines de kilomètres à la ronde.
≥ 9.0	Dévastateur (Exceptionnel)	1 tous les 6 ans	Dévaste des zones de plusieurs milliers de kilomètres à la ronde.

I.8.2 Échelle de Mercalli

L'échelle de Mercalli, ou échelle macrosismique internationale d'intensité, mesure l'intensité d'un séisme en un lieu donné, c'est-à-dire les dégâts et destructions qu'il cause sur l'environnement, les constructions et les êtres humains. Elle est graduée en chiffres romains de I à XII.

L'intensité en un point dépend non seulement de la taille du séisme (magnitude), mais aussi de la distance à l'épicentre, de la géologie locale et de la topographie.

Le tableau I-3 résume l'échelle Mercalli à travers une description abrégée des différents degrés d'intensité.

Tableau I-3. Brève description des 12 degrés de l'échelle MERCALLI.

Intensité	Définition	Description des effets typiques observés
I	Non ressenti	Secousses imperceptibles par l'homme , enregistrées uniquement par des sismographes.
II	Rarement ressenti	Secousses ressenties par un faible nombre d'observateurs (personnes) et en particulier si elles sont au repos et /ou dans des étages élevés de grands immeubles.
III	Faible	Secousses ressenties par bon nombre d'habitants . Les objets suspendus bougent. La direction et la durée de l'agitation peuvent également être parfois ressenties. En revanche, à l'extérieur, rien n'est ressenti.
IV	Largement observé	Secousses observées par certaines personnes à l'extérieur, et beaucoup à l'intérieur de leurs résidences. Les objets suspendus bougent, mais aussi les fenêtres, plats, assiettes, loquets de porte. Vibrations des navires, et craquements des sols.
V	Fort	Secousses ressenties par la plupart des gens . Les personnes sommeillant sont réveillées, secousses des meubles et des lits. Les portes claquent, la vaisselle se casse, les tableaux bougent, les petits objets se déplacent, les arbres oscillent, les liquides peuvent déborder de récipients ouverts.
VI	Dégâts légers	Tout le monde sent le tremblement de terre . Des gens effrayés sortent des maisons et ont la marche troublée, les ustensiles ménagers se cassent, les horloges se mettent en mouvement, les objets et tableaux tombent, les enduits de plâtre des murs se fissurent, les arbres et les buissons sont secoués. Des dommages légers peuvent se produire dans des bâtiments mal construits, mais aucun dommage structural.
VII	Dégâts	Les gens ont du mal à tenir debout . Les conducteurs sentent leur voiture secouée. Quelques meubles peuvent se briser. Des briques peuvent tomber des immeubles. Maisons légèrement endommagées, fissures sinueuses dans les murs. Les dommages sont modérés dans les bâtiments bien construits, mais peuvent être considérables dans les autres.
VIII	Dégâts importants	Dommages graves dans les bâtiments mal construits contrairement aux autres qui en subissent de légers dommages. Les maisons avec de faibles fondations bougent, fissures profondes dans les murs, renversement ou torsion de statues, fissures dans les pentes abruptes et les terres humides, chute de pierres dans les montagnes, les branches des arbres se cassent.
IX	Destructions	Tous les immeubles subissent de gros dommages . Un grand nombre s'effondrent plus ou moins complètement. Quelques conduits souterrains se brisent. La terre se fissure.
X	Destructions importantes	Destruction de la majorité des bâtiments avec leurs fondations, légère courbure des voies ferrées, dommages aux ponts , conduites fissurées ou poussées les unes sur les autres, fissures ou plis ondulés sur les routes, chutes de pierres, l'eau des lacs et des rivières est détournée de son lit. Des éboulements se produisent. De larges fissures apparaissent sur le sol.
XI	Catastrophe	La plupart des constructions s'effondrent. Des ponts sont détruits . Les conduits souterrains sont détruits. Grandes fissures dans le sol. Glissement des terrains à grande échelle.
XII	Catastrophe généralisée	Presque tout est détruit. Changements de topographie , formation de grosses failles, dislocations horizontales et cisaillement du sol, grands pans de roches peuvent se déplacer. Changement de cours des rivières.

Remarque :

Il ne faut pas confondre la magnitude et l'intensité :

- Contrairement à la magnitude, qui est une valeur calculée, l'intensité d'un séisme ne peut être qu'une estimation.
- La magnitude est une valeur associée uniquement au séisme. L'intensité, quant à elle, est associée au lieu d'observation.

I.8.3 Relation entre la magnitude et l'intensité

Il n'existe pas de relation directe entre la magnitude et l'intensité. Ainsi, deux séismes ayant la même magnitude peuvent produire des intensités différentes à la surface. Inversement, deux séismes ayant la même intensité en un même lieu peuvent avoir des magnitudes différentes.

Plusieurs auteurs ont proposé des relations permettant d'estimer la magnitude à partir de l'intensité et de la distance entre la source sismique et l'endroit où l'intensité a été mesurée.

Relation de Karnik (1969) :

$$M = 0.5I_0 + \log h + 0.35 \quad (I.5)$$

Où :

- I_0 : l'intensité à l'épicentre.
- h : la profondeur du foyer en km .

Relation de Mohammadioun (1982) :

$$M = 0.55I + 2.2\log D - 1.14 \quad (I.6)$$

Où :

- I : l'intensité à une distance D (en km) de l'épicentre.

Relation de Levert-Albaret (1998) :

$$M = 0.44I + 1.48\log D - 0.48 \quad (I.7)$$

Cette dernière relation est basée sur l'analyse de 73 séismes relativement récents en France, pour lesquels des données macrosismiques sont disponibles.

I.8.4 Moyens de mesure des séismes

Lors d'un séisme, les vibrations générées par la rupture de la croûte terrestre se propagent à partir du point de rupture. Pour enregistrer ces mouvements de l'onde sismique, des instruments spécifiques sont utilisés. À cet égard, le physicien français Jean de Haute-Feuille a inventé en 1703 le premier sismographe, un appareil permettant de mesurer et d'enregistrer les séismes. L'enregistrement visuel produit par le sismographe est appelé un sismogramme.

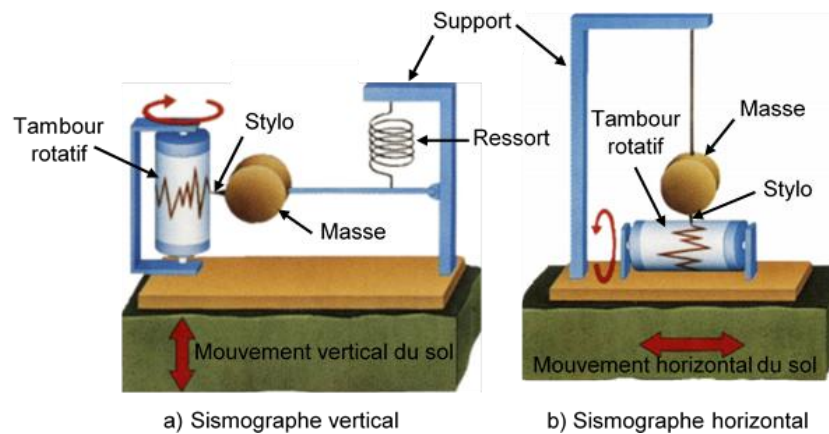


Figure I-9. Schéma de principe : a) sismographe vertical, b) sismographe horizontal.

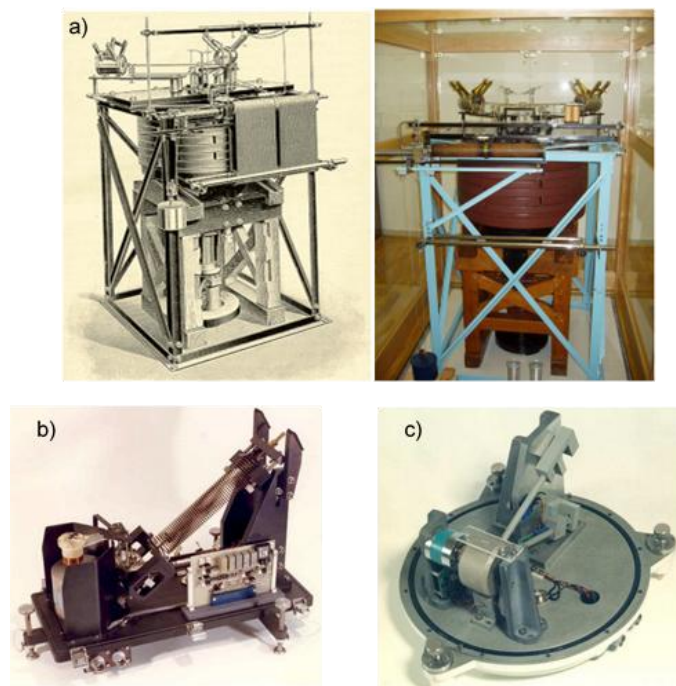


Figure I-10. Sismographe : a) sismographe Wiechert, b) sismographe vertical, c) sismographe horizontal.

I.9 Aléas sismiques

L'évaluation à long terme de l'activité sismique dans une région est essentielle pour estimer le risque encouru par un ouvrage ayant une durée de vie de plusieurs dizaines d'années. Cela fait partie de l'étude de l'aléa sismique, qui permet non seulement d'évaluer ce risque, mais aussi de concevoir des ouvrages résistants aux secousses sismiques. L'aléa sismique prend une importance particulière dans le choix des sites pour des ouvrages à risque, tels que les installations nucléaires ou les sites de stockage de déchets radioactifs, dont la durée de vie est particulièrement longue.

L'aléa sismique peut se définir comme la probabilité qu'un lieu donné soit soumis à une secousse sismique de caractéristiques précises.

Pour évaluer l'aléa sismique, il est nécessaire de connaître l'historique des tremblements de terre dans la région, leur force et leur fréquence. L'hypothèse de travail est souvent que le processus est stationnaire, ce qui signifie que les séismes futurs devraient survenir avec la même fréquence que dans le passé. Cette hypothèse permet d'utiliser un modèle probabiliste de Poisson.

La méthode probabiliste repose sur plusieurs éléments :

- La définition des sources sismiques actives dans la région,
- La fréquence des tremblements de terre pour chaque source,
- La variation des mouvements du sol en fonction des lieux, ou atténuation du signal.

Le niveau d'aléa sismique est généralement caractérisé par la valeur de l'accélération de pointe au sol a_{gR} (l'accélération maximale de référence sur un sol de type rocheux). Cette valeur est reportée sur les cartes de zonation de l'aléa sismique, établies par les autorités compétentes sur la base d'une période de retour de 475 ans, exprimée en pourcentage de gravité.

I.9.1 Zonage réglementaire de l'aléa sismique en Algérie

Le zonage réglementaire distingue quatre zones de sismicité croissante, basées sur un découpage par wilaya et par commune :

- Zone 0 : sismicité négligeable,
- Zone I : sismicité faible,
- Zone II : sismicité moyenne,
- Zone III : sismicité élevée.

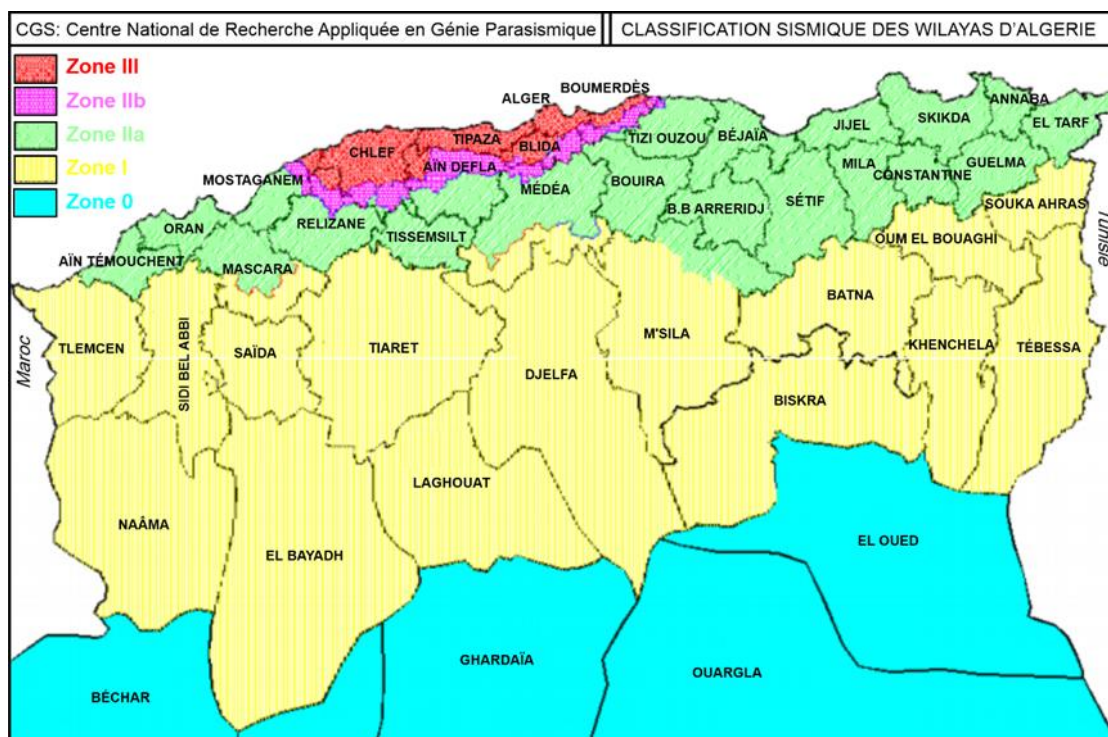


Figure I-11. Carte de zonage sismique de l'Algérie.

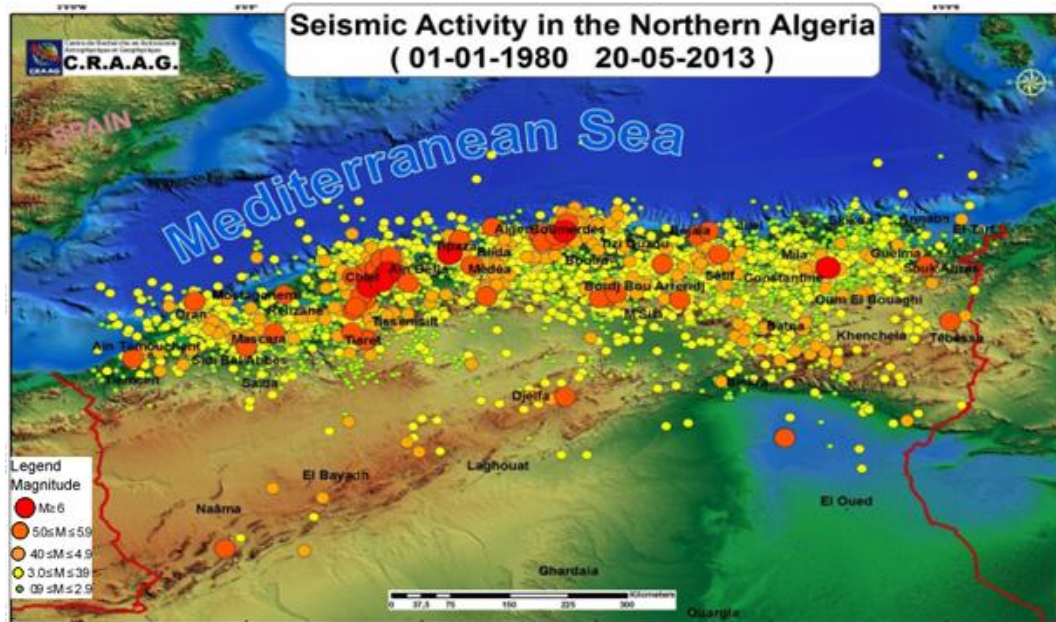


Figure I-12. Cartographie sismique d'Algérie 1980-2013.

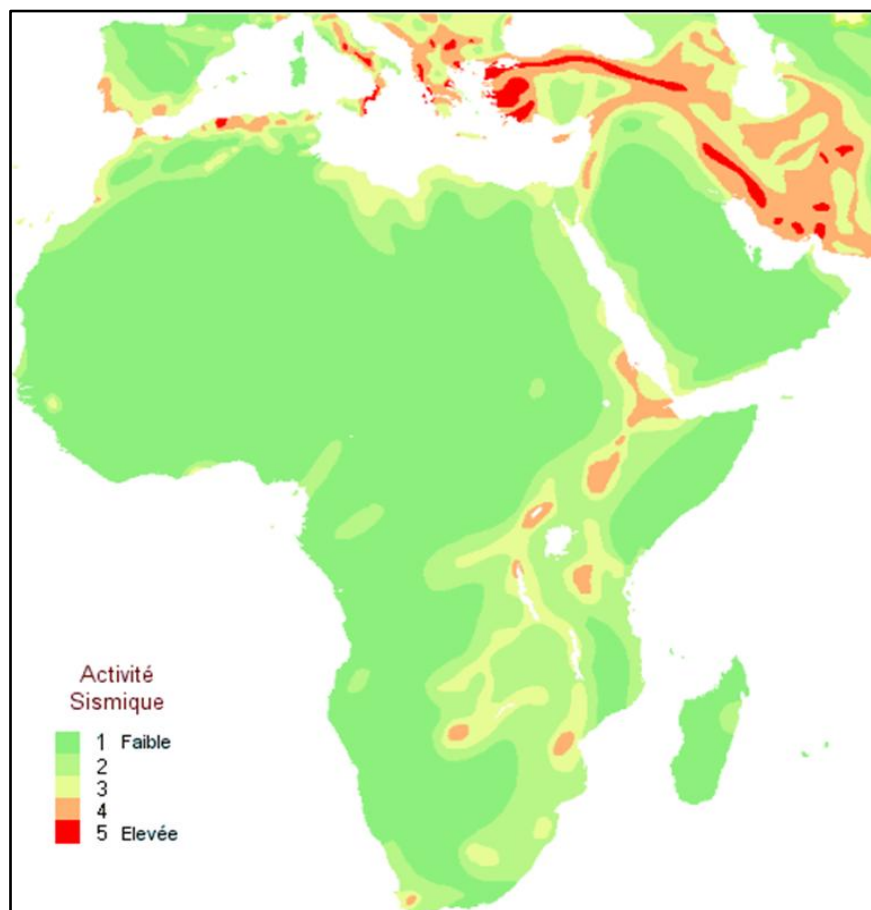


Figure I-13. Aléa sismique en Afrique.

I.9.1.1 Classification des sols

Les sols sont classés en quatre groupes, selon leur résistance :

- Groupe (a) : sols de bonne à très bonne résistance,

- Groupe (b) : sols de résistance moyenne,
- Groupe (c) : sols de faible résistance,
- Groupe (d) : sols de très faible résistance.

I.9.1.2 Catégories et critères de classification des sites

Les sites sont classés en quatre catégories, en fonction des propriétés mécaniques des sols qui les constituent :

- **Site 1 (S1) : site rocheux (groupe a) :** roche ou autre formation géologique caractérisée par une vitesse moyenne d'onde de cisaillement $V_s \geq 800m/s$;
- **Site 2 (S2) : site ferme (groupe a ou b) :** dépôts de sable et de gravier très denses et/ou d'argile sur-consolidée, avec $V_s \geq 400m/s$ à partir de 10 m de profondeur,
- **Site 3 (S3) : site meuble (groupe b ou c) :** dépôts épais de sable et de gravier moyennement denses ou d'argile moyennement raide, avec $V_s \geq 200m/s$ à partir de 10 m de profondeur ;
- **Site 4 (S4) : site très meuble (groupe c ou d) :**
 - Dépôts de sable lâche avec ou sans présence de couches d'argile molle, avec $V_s < 200m/s$ dans les 20 premiers mètres ;
 - Dépôts d'argile molle à moyennement raide avec $V_s < 200 m/s$ dans les 20 premiers mètres.

I.9.2 Vulnérabilité

La vulnérabilité est évaluée en fonction du type de construction et de sa résistance aux séismes. Elle est exprimée en pourcentage selon la formule suivante :

$$\text{Vulnérabilité (\%)} = \frac{\text{côté des dommages attendus pour un séisme d'une intensité donnée}}{\text{côté de la construction}}$$

Tableau I-4. Brève description du pourcentage de vulnérabilité.

Vulnérabilité (%)	Intensité du séisme (M.S.K)	Description
0	< VI	Pas de dommages aux bâtiments
100	XI et XII	Constructions non parasismiques

I.9.3 Risque sismique

La connaissance du risque sismique permet aux pouvoirs publics de rechercher un compromis satisfaisant entre le degré de risque et l'effort économique nécessaire à sa réduction. Ce compromis

doit être acceptable pour la collectivité et dépend, dans une large mesure, de l'état de développement économique du pays concerné.

Le risque sismique se définit comme le produit de l'aléa sismique par la vulnérabilité :

$$\text{Risque sismique} = \text{Aléa sismique} \times \text{Vulnérabilité}$$

Il dépend de l'action (aléa), des constructions, des sols et des enjeux. Ainsi, une région déserte, ayant le même aléa sismique qu'une région urbaine, aura un risque sismique bien plus faible.

I.9.4 Récapitulation

- L'aléa sismique d'une région est défini par la probabilité qu'un séisme d'un niveau donné se produise.
- Pour déterminer l'aléa sismique, il est nécessaire de savoir où se sont produits les tremblements de terre passés, quelles ont été leur force et leur fréquence.
- Le risque sismique est associé aux effets que le séisme produirait sur les « enjeux » : structures, sols (glissements de terrain, etc.), humains, activités économiques.
- Le risque sismique associé à un bâtiment s'exprime en pourcentage de dégradation ou en rapport du coût de réparation au coût de reconstruction.
- Un niveau de risque acceptable étant fixé, et considérant que le niveau de protection peut être assuré par de bonnes dispositions constructives, la connaissance de l'aléa sismique devient indispensable.
- La connaissance de la probabilité annuelle d'excéder un niveau de mouvement du sol sur un site donné passe par la détermination du mouvement sismique du sol pris en compte pour le calcul de la construction parasismique.

I.10 Effets des séismes

Les séismes peuvent entraîner des modifications de la morphologie du terrain où sont situés les bâtiments. Les conséquences de ces modifications peuvent être fatales pour les ouvrages. Les effets peuvent être classés en trois catégories :

- **Effets directs** : Actions du sol sur les ouvrages, comprenant non seulement la secousse elle-même, mais aussi le jeu de la faille jusqu'à la surface.
- **Effets de site** : Modifications sensibles du signal sismique, amplifiant les accélérations du sol pour certaines fréquences.
- **Effets induits** : Grands déplacements de sol ou d'eau pouvant impacter les ouvrages.

Ces effets peuvent, dans certains cas, être destructeurs d'un lieu à l'autre, même pour une même construction. Certains problèmes de sol d'implantation ne peuvent être identifiés que par des études

géotechniques. D'autres peuvent être détectés par une simple observation sur site et/ou la lecture des cartes géologiques régionales.

Exemples des effets des séismes (dégâts sur l'environnement) :

- Liquéfaction des sols
- Éboulement rocheux
- Ébranlements
- Glissement de terrain
- Raz-de-marée (tsunamis)
- Détournement de cours d'eau

Exemples des dégâts sur les constructions :

- Basculement des bâtiments ou des ouvrages
- Entrechoquement entre les bâtiments
- Effondrement total ou partiel des bâtiments
- Fragilisation et rupture des liaisons poteaux-poutres
- Dommages aux éléments de façade
- Éclatement des murs de maçonnerie
- Rupture fragile des éléments structuraux (poutres, poteaux, etc.)

I.11 Conclusion

Le chapitre sur les éléments de sismologie a permis de couvrir les concepts fondamentaux et les enjeux liés aux phénomènes sismiques, en mettant particulièrement l'accent sur leur impact sur la construction et l'ingénierie parasismique. Après avoir défini la sismologie et précisé les objectifs du génie parasismique, nous avons exploré les diverses origines des séismes, leurs mécanismes de propagation, et les différentes typologies d'ondes sismiques. L'étude des ondes de volume et de surface, ainsi que des vitesses de propagation, constitue une première étape essentielle pour comprendre les effets des séismes sur les structures et leur comportement au sol.

L'évaluation de l'aléa sismique, avec une attention particulière portée sur le zonage réglementaire en Algérie et la classification des sols, est cruciale pour la planification et la gestion des risques. Le chapitre a également permis de distinguer la magnitude (échelle de Richter) de l'intensité (échelle de Mercalli), deux éléments primordiaux dans l'évaluation des effets d'un séisme sur une zone donnée.

La notion de vulnérabilité a été abordée sous l'angle des structures et des bâtiments, en tenant compte de leur résistance aux séismes, tout en mettant en lumière la nécessité d'un compromis entre

l'effort économique et le degré de protection à mettre en place pour assurer la sécurité des infrastructures et des populations. Le risque sismique, défini comme le produit de l'aléa sismique et de la vulnérabilité, a été analysé afin de mieux comprendre comment les constructions et les sols influencent l'impact d'un séisme.

Les effets des séismes, aussi bien sur l'environnement (liquéfaction des sols, glissements de terrain, etc.) que sur les constructions (effondrements, basculements, rupture des structures), ont été détaillés pour mieux appréhender les dommages potentiels et les mesures à prendre dans le cadre de la conception parasismique.

Ainsi, ce chapitre met en évidence l'importance d'une approche intégrée et multidisciplinaire dans l'étude des séismes. La compréhension des phénomènes sismiques, associée à l'évaluation rigoureuse des aléas et des vulnérabilités, constitue la clé pour concevoir des structures résilientes et adaptées aux risques sismiques. La prise en compte de ces éléments dans la planification et la construction d'ouvrages est indispensable pour réduire les conséquences des tremblements de terre et assurer la sécurité à long terme.

II. Objectifs de la protection parasismique et méthodes de dimensionnement

II.1 Introduction

La conception parasismique des structures représente un défi majeur dans les zones sujettes aux séismes. En effet, le séisme étant un phénomène dynamique et imprévisible, il est crucial de définir des stratégies de dimensionnement et de conception permettant d'assurer la sécurité des occupants tout en minimisant les dommages matériels. Ce chapitre explore les objectifs de la protection parasismique, qui incluent la sécurité des vies humaines, la réduction des dommages aux bâtiments et la préservation du bon fonctionnement des infrastructures essentielles. Il aborde également les principes fondamentaux du dimensionnement parasismique, en particulier la méthode du dimensionnement en capacité, et les exigences de performance définies par les normes européennes, telles que l'Eurocode 8. Ces exigences visent à garantir la résistance des structures tout en permettant un comportement ductile, capable de dissiper l'énergie sismique sans entraîner de ruptures fragiles.

II.2 Objectifs de comportement

Il convient tout d'abord de noter que la construction en zone sismique nécessite généralement un effort supplémentaire en termes de conception et de qualité de construction, par rapport à une zone non sismique, en raison du caractère dynamique et souvent violent de l'action sismique, ainsi que de l'incertitude quant à la connaissance de cette action susceptible de se produire lors d'un événement futur. Les normes parasismiques viennent compléter les autres normes de conception, en imposant des prescriptions spécifiques. En effet, les constructions doivent, en premier lieu, respecter les objectifs de résistance, de fonctionnalité et de durabilité assignés aux constructions dans une zone non sismique, tels que définis par ces autres normes.

Le but de l'Eurocode 8, en cas de survenance d'un séisme, est résumé en trois points :

1. La protection des vies humaines,
2. La limitation des dommages aux structures,
3. Le maintien opérationnel des structures importantes pour la protection civile.

Les exigences de performance selon l'EN 1998 sont les suivantes :

1. Exigence de non-effondrement (action sismique de référence),
2. Exigence de limitation des dommages (action sismique minorée $\rightarrow v$).

Remarque :

- Dans le cas de bâtiments neufs ou de bâtiments existants faisant l'objet de travaux structuraux, les objectifs de comportement visés sont la sécurité des personnes et la limitation des dommages en cas de séisme de moindre intensité.
- Le respect de la limitation des dommages sur les éléments non structuraux repose sur la vérification du déplacement inter-étages de la structure du bâtiment. Il n'est pas nécessaire de vérifier l'élément non structurel en tant que tel, mais plutôt la structure à laquelle cet élément est fixé.
- La limitation des dommages sur l'ouvrage ne signifie pas l'absence totale de dommages et ne garantit pas la continuité du fonctionnement (opérationnel) du bâtiment.

II.3 Exigences de performance et critères de conformité

II.3.1 Exigences fondamentales

En zone sismique, les structures doivent être conçues et construites de manière à respecter les exigences suivantes, chacune devant être satisfaite avec un degré de fiabilité adéquat.

Exigence de non-effondrement :

La structure doit être conçue et construite de manière à résister aux actions sismiques sans effondrement local ou général, en conservant son intégrité structurale et une capacité portante résiduelle après l'événement sismique (notamment vis-à-vis des charges permanentes).

L'action sismique de calcul est définie à partir de l'action sismique de référence associée à une probabilité de référence de dépassement sur 50 ans, P_{NCR} en principe 10%, ou à une période de retour de référence T_{NCR} de 475 ans.

Exigence de limitation des dommages :

La structure doit être conçue et construite pour résister à des actions sismiques ayant une probabilité de survenue plus élevée que l'action sismique de calcul, sans que des dommages importants ou des limitations d'exploitation apparaissent. Ces dommages ne doivent pas entraîner un coût disproportionné par rapport à celui de la structure. L'action sismique à prendre en compte pour l'exigence de "limitation des dommages" présente une probabilité de dépassement P_{DLR} sur 10 ans, et une période de retour T_{DLR} de 95 ans.

II.3.2 Critères de conformité

Pour satisfaire aux exigences fondamentales, l'Eurocode 8 impose les vérifications suivantes aux états limites :

- **Les états limites ultimes (ELU) :** Ils sont associés à l'effondrement ou à d'autres formes de rupture de la structure pouvant mettre en danger les vies humaines.
- **Les états limites de limitation de dommages ou états limites de service (ELS) :** Ils sont associés à l'apparition de dommages, au-delà desquels certaines fonctions de la structure ne sont plus remplies.

II.4 Méthodes de dimensionnement

Le but du dimensionnement est de déterminer les formes, dimensions et matériaux nécessaires pour que la structure réponde aux fonctions demandées dans toutes les conditions de son cycle de vie.

Les méthodes de dimensionnement reposent sur le concept des états limites (états limites de service et états limites ultimes). La méthode de calcul "aux états limites" se fonde sur une approche semi-probabiliste de la sécurité. Ce type de calcul permet de dimensionner une structure de manière à offrir une probabilité acceptable de ne pas atteindre un "état limite", qui la rendrait impropre à sa destination.

II.4.1 Méthode de dimensionnement en capacité

La méthode de dimensionnement en capacité repose sur la sélection, la conception et l'étude détaillée de certains éléments du système structural de manière appropriée, afin de garantir la dissipation de l'énergie sous l'effet de déformations importantes, tandis que les autres éléments structuraux sont suffisamment résistants pour assurer cette dissipation d'énergie.

Pour garantir un comportement global dissipatif et ductile, il est essentiel d'éviter les ruptures fragiles ou la formation prématurée de mécanismes instables. À cet effet, la méthode de dimensionnement en capacité est utilisée pour hiérarchiser les résistances des différents composants structuraux et les modes de défaillance. Cette hiérarchisation est nécessaire pour assurer un mécanisme plastique adéquat et éviter les modes de rupture fragile.

Dans les bâtiments à plusieurs étages, la formation d'un mécanisme plastique sur un seul niveau doit être évitée, car un tel mécanisme pourrait induire des demandes de ductilité locale excessives dans les poteaux du niveau concerné. Afin de respecter cette exigence, il est nécessaire que la condition suivante soit satisfaite à tous les nœuds de poutres sismiques avec des poteaux sismiques :

$$\sum M_{Rc} \geq \gamma_{Rd} \sum M_{Rb} \quad (\text{II. 1})$$

Avec :

- $\sum M_{Rc}$: somme des valeurs de calcul des résistances à la flexion des poteaux connectés au nœud. Il convient d'utiliser la valeur minimale des résistances à la flexion des poteaux dans l'intervalle de variation des efforts normaux des poteaux dans la situation sismique de calcul (somme des moments résistants de dimensionnement des poteaux).
- $\sum M_{Rb}$: somme des valeurs de calcul des résistances à la flexion des poutres connectées au nœud. Lorsque des assemblages à résistance partielle sont utilisés, les résistances à la flexion de ces assemblages sont prises en compte dans le calcul de $\sum M_{Rb}$ (somme des moments résistants de dimensionnement des poutres).
- γ_{Rd} : coefficient de surcapacité, égal à 1,30.

▪ **Dimensionner en capacité pour obtenir une structure porteuse ductile !**

Les structures porteuses ductiles, qui sont très déformables dans les zones sollicitées plastiquement, présentent généralement des avantages majeurs par rapport à des structures analogues de comportement fragile.

Pour assurer la ductilité globale requise dans la structure, les zones où peuvent se former des rotules plastiques (définies ultérieurement pour chaque type d'élément du bâtiment) doivent posséder une capacité de rotation plastique importante. La résistance ultime requise peut être réduite, ce qui permet de réaliser des économies substantielles tout en augmentant notablement la résistance à l'effondrement. Ainsi, la structure porteuse de tout bâtiment doit être conçue pour être ductile chaque fois que cela est possible (voir Figure II.1).

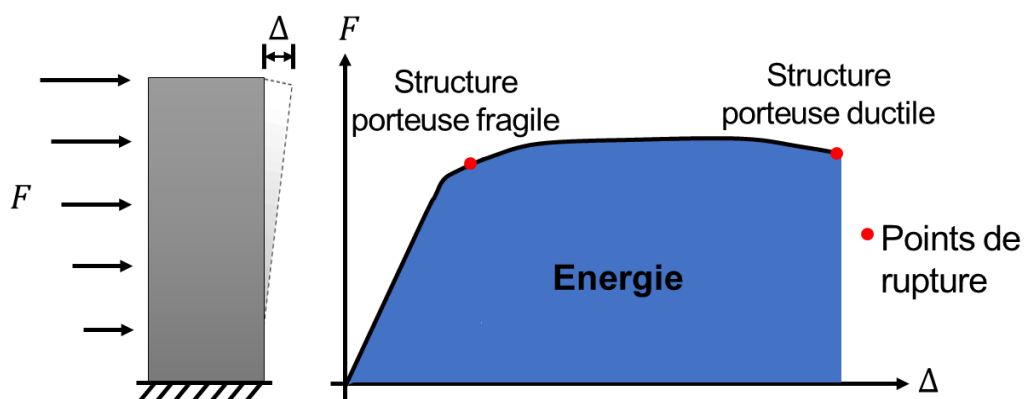


Figure II-1. Force-Déplacement en relation avec le type de structure porteuse (fragile/ductile).

Cette approche devient particulièrement judicieuse dans les cas extrêmes où la résistance de la structure est, pour d'autres raisons, tellement grande que le séisme de dimensionnement peut être résisté élastiquement. En effet, les tremblements de terre réels « n'ont pas lu les normes » (T. Paulay) et peuvent bien souvent être beaucoup plus puissants que le séisme de dimensionnement.

La méthode de dimensionnement en capacité offre un procédé simple et efficace pour concevoir une structure porteuse ductile : elle « impose » précisément où la structure peut et doit se plastifier, et où cela lui est interdit. Cela conduit à un mécanisme plastique favorable. Un dimensionnement en capacité réalisé dans les règles de l'art permet d'atteindre un niveau de sécurité élevé et connu contre l'effondrement.

II.5 Principes de vérification

La vérification des ouvrages est effectuée en se basant sur des critères de justification permettant de démontrer le respect des exigences de comportement qui leur sont attribuées.

La démarche de vérification d'une structure nécessite la définition de critères permettant de prouver le respect des exigences de comportement. Ces critères peuvent s'exprimer en termes de :

- Limitation des contraintes ou efforts,
- Limitation des déformations réversibles ou irréversibles,
- Limitation des déplacements.

Ces critères sont, selon les cas, vérifiés aux états limites ultimes (ELU) ou aux états limites de service (ELS). Le choix de l'état limite dépend du type de comportement exigé pour la structure.

À l'état limite ultime, il doit être vérifié que la structure possède une résistance et une ductilité suffisantes, en tenant compte des effets du second ordre. Cette vérification peut être réalisée en acceptant des incursions dans le domaine post-élastique, en appliquant aux actions sismiques calculées dans l'hypothèse d'élasticité linéaire un coefficient diviseur, appelé « coefficient de comportement ». Ce coefficient dépend des caractéristiques globales de comportement de la structure et du matériau constitutif. Plus la structure est ductile et mieux son comportement est maîtrisé, plus le coefficient de comportement peut être élevé, ce qui permet de dimensionner la structure pour des valeurs résistantes plus faibles qu'en élasticité linéaire.

Sous les actions sismiques réduites par ce coefficient de comportement, il doit être démontré que la structure reste stable dans son ensemble, que la résistance du sol (sans déformation permanente substantielle) est suffisante, et que les fondations sont adaptées.

Il doit également être vérifié que les ouvertures de joints entre deux bâtiments contigus ou entre deux blocs d'un même bâtiment sont suffisantes pour éviter les entrechoquements. Les déplacements calculés pour ces vérifications ne sont pas divisés par le coefficient de comportement.

En outre, les éléments non-structuraux ne doivent pas présenter de danger pour les personnes ni affecter de manière notable le comportement dynamique de la structure.

À l'état limite de service, la limitation des dommages est assurée en limitant les déformations (notamment les déplacements relatifs entre étages) afin d'éviter l'endommagement des cloisons et façades, en fonction de leur fragilité.

II.6 Principes de conception

L'Eurocode 8 encourage le concepteur à adopter des dispositions de conception générales favorables à un bon comportement de la structure. Parmi les recommandations figurent :

1. La **simplicité** de la structure (par exemple, en adoptant des systèmes porteurs et un contreventement continu jusqu'au sol) ;
2. L'**uniformité**, la **symétrie** et l'**hyperstaticité** ;
3. La **résistance** et la **rigidité** dans les deux directions **horizontales** ;
4. La **résistance** et la **rigidité** vis-à-vis de la **torsion** d'axe **vertical** ;
5. L'existence de **diaphragmes horizontaux** à différents niveaux pour répartir les forces sismiques sur les éléments de contreventement ;
6. Des **fondations** appropriées.

La **régularité** du comportement de la structure doit être recherchée. La meilleure régularité est obtenue en mettant en œuvre des formes simples et compactes, tant en plan qu'en élévation. Pour y parvenir, la structure peut être divisée en blocs dynamiquement indépendants bénéficiant de telles propriétés. Les structures régulières présentent des avantages pour le calcul des actions et les valeurs du coefficient de comportement.

Les **éléments structuraux de fondation** doivent être suffisamment **rigides** pour transmettre uniformément au terrain les actions sismiques de la structure. Il est donc recommandé de n'utiliser qu'un seul type de fondation sous une même structure. Si cela n'est pas possible, la structure doit être divisée en blocs dynamiquement indépendants. De plus, les structures des classes I à III ne doivent pas être construites à proximité de failles reconnues comme sismiquement actives dans des documents officiels.

Lors de la **conception générale** de la structure, il est possible de distinguer les **éléments structuraux principaux** (qui forment le contreventement) des **éléments secondaires** (qui ont simplement un rôle porteur). Les éléments secondaires ne doivent pas être pris en compte comme résistants dans le calcul de la structure vis-à-vis de l'action sismique, et leur rigidité peut être négligée dans l'analyse du comportement dynamique de la structure. Ils doivent être calculés pour résister aux déplacements imposés par la structure principale, en tenant compte des effets du second ordre.

À moins que la **structure** ne soit spécifiquement conçue comme **non dissipative**, la **ductilité doit également être recherchée** par le concepteur. Les ruptures fragiles ou la formation prématurée de mécanismes instables doivent être évitées afin d'assurer la ductilité globale de la structure. Cela peut être obtenu, notamment, par l'application du dimensionnement en capacité. Il est aussi nécessaire d'assurer la ductilité locale (par exemple, la rotation plastique des sections et la résistance des liaisons entre les zones critiques et non critiques), en mettant en place des dispositions constructives conformément aux différents chapitres de l'Eurocode 8 relatifs aux matériaux structuraux.

II.7 Conclusion

Le chapitre a mis en lumière l'importance d'une approche intégrée de la conception parasismique, qui repose sur la recherche d'un équilibre entre la résistance, la ductilité et la sécurité. La méthode de dimensionnement en capacité constitue un outil central, permettant d'assurer une dissipation d'énergie efficace tout en évitant les défaillances fragiles. L'Eurocode 8 offre des lignes directrices claires en matière de performance, de vérification et de conception, en insistant sur l'importance de la régularité structurelle, de la simplification des systèmes porteurs et de l'adaptation des fondations. En somme, une conception parasismique rigoureuse permet non seulement de garantir la stabilité des bâtiments face aux séismes, mais aussi de limiter les impacts économiques et humains d'un événement sismique, contribuant ainsi à une gestion plus sûre et durable des risques sismiques.

III. Caractéristiques des bâtiments résistant aux séismes

III.1 Introduction

Le comportement des bâtiments face aux tremblements de terre dépend largement de leur conception, de la manière dont les forces sismiques sont réparties et de la capacité de la structure à dissiper l'énergie générée lors d'un séisme. Dans les zones sismiques, il est crucial d'intégrer des principes de conception et des critères spécifiques pour garantir la stabilité et la sécurité des ouvrages face aux actions sismiques. Ce chapitre présente les caractéristiques essentielles que doivent posséder les bâtiments pour résister efficacement aux séismes. Il aborde les principes fondamentaux de la conception, ainsi que les critères de régularité en plan et en élévation, selon les normes RPA 99 V 2003, afin d'assurer un comportement optimal lors d'un événement sismique.

III.2 Principes de base de la conception

Dans les zones sismiques, il est essentiel de prendre en compte l'aléa sismique dès les premiers stades de la conception d'un bâtiment. Cela permet de mettre en place un système structurel qui, tout en restant dans un cadre économique raisonnable, respecte les exigences fondamentales de conception des bâtiments résistants aux séismes.

Les principes directeurs de la conception face à l'aléa sismique sont les suivants :

1. La simplicité de la structure ;
2. L'uniformité, la symétrie et l'hyperstaticité ;
3. La résistance et la rigidité dans les deux directions principales ;
4. La résistance et la rigidité vis-à-vis de la torsion ;
5. L'action des diaphragmes au niveau des planchers ;
6. Des fondations adéquates.

III.2.1 Simplicité de la structure

La simplicité de la structure, caractérisée par des **cheminements clairs et directs des forces sismiques**, est un objectif clé. En effet, les structures simples, qu'il s'agisse de leur modélisation, de leur calcul, de leur dimensionnement ou de leur mise en œuvre, comportent **beaucoup moins d'incertitudes**. Cela permet une meilleure prévision de leur comportement sismique et garantit une plus grande fiabilité en cas d'événement sismique.

III.2.2 Uniformité, symétrie et hyperstaticité

- **Uniformité en plan** : Elle se caractérise par une **répartition régulière des éléments structuraux**, ce qui facilite une **transmission courte** et directe des **forces d'inertie** issues des masses du bâtiment. Si nécessaire, l'uniformité peut être **obtenue en subdivisant l'ensemble du bâtiment** en unités dynamiquement indépendantes **à l'aide de joints sismiques** (Figures III.1 et III.2), à condition que ces joints soient conçus de manière à éviter tout entrechoquement des unités.

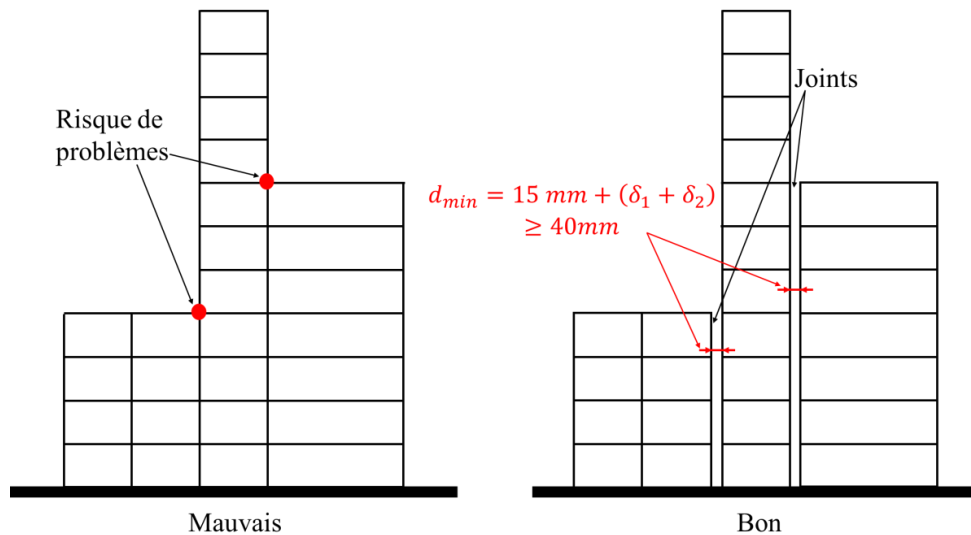


Figure III-1. Fractionnement des bâtiments par des joints sismiques ou partition en sous-structures en élévation.

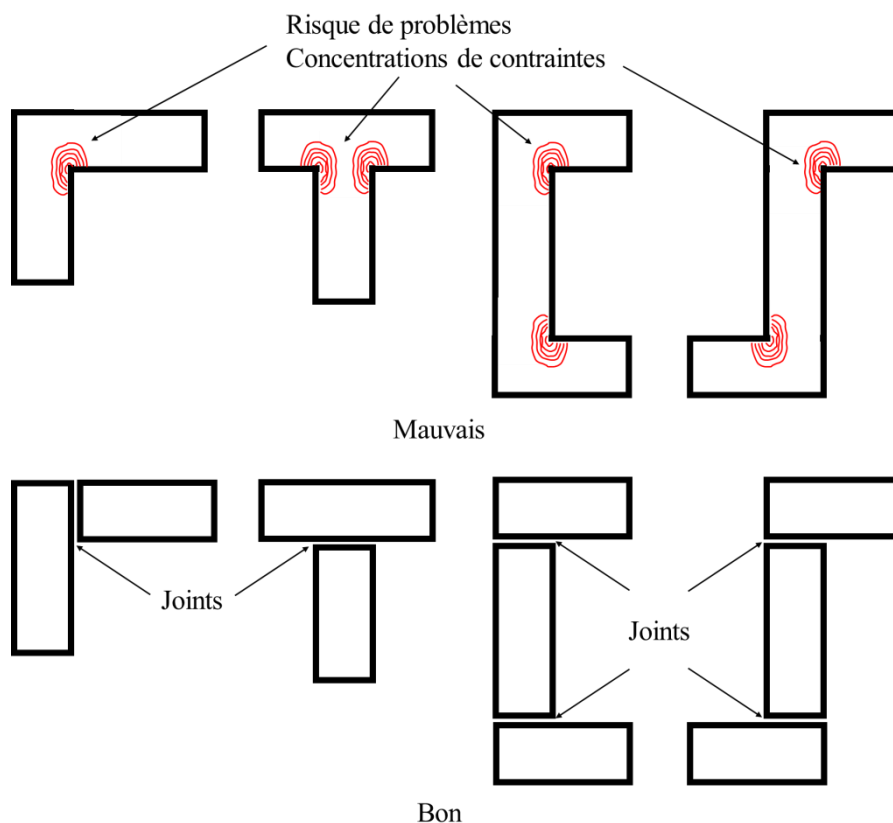


Figure III-2. Formes complexes en plan et décomposition en blocs simples indépendants.

- **Uniformité en élévation** : L'uniformité est également souhaitée en élévation pour **éviter l'apparition de zones sensibles** où des **concentrations de contraintes** ou des demandes importantes de ductilité pourraient **entraîner une rupture prématurée**.
- **Distribution des masses et rigidité** : Une corrélation étroite entre la distribution des masses et la distribution de la résistance et de la rigidité est essentielle pour **éliminer les excentricités importantes** entre masse et rigidité.
- **Symétrie de la structure** : Dans une configuration de bâtiment symétrique ou quasi-symétrique, une méthode efficace pour **assurer l'uniformité** consiste à **disposer les structures de manière symétrique** et à les **répartir régulièrement en plan**.
- **Hyperstaticité** : L'utilisation d'**éléments structuraux régulièrement répartis** contribue à l'hyperstaticité, ce qui permet une **répartition plus favorable des effets de l'action sismique** et une **dissipation plus efficace de l'énergie** sur l'ensemble de la structure.

III.2.3 Résistance et rigidité dans les deux directions

Le **mouvement sismique horizontal** étant **bidirectionnel**, la **structure** du bâtiment doit être **capable de résister** à des actions horizontales dans **toutes les directions**. Pour cela, il est essentiel que les **éléments structuraux** soient disposés en réseau **orthogonal dans le plan**, garantissant ainsi des caractéristiques de **résistance** et de **rigidité similaires** dans les **deux directions principales** (Figure III.3).

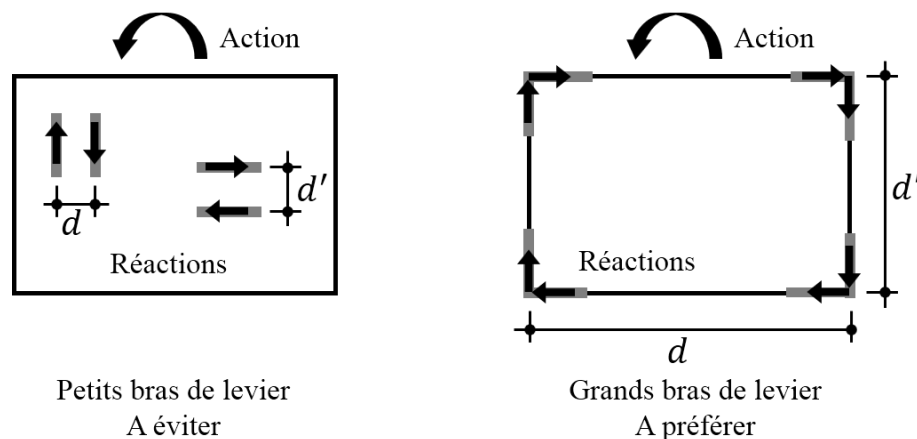


Figure III-3. Une grande distance entre les éléments parallèles favorise la résistance de la structure à la torsion grâce à un bras de levier important dans le plan horizontal.

Le choix des **caractéristiques de rigidité** de la structure doit être réalisé en tenant compte des spécificités du site et doit également permettre d'**éviter des déplacements excessifs**, qui pourraient **entraîner des instabilités dues aux effets du second ordre** ou des **dommages importants**.

III.2.4 Résistance et rigidité à la torsion

Les **structures des bâtiments**, en plus de leur résistance et rigidité face aux actions latérales, **doivent posséder une résistance et une rigidité appropriées à la torsion**. Cela permet de limiter les mouvements dus à la torsion qui sollicitent de manière non uniforme les différents éléments de la structure. Pour cela, il est recommandé de **répartir les éléments principaux de contreventement à proximité de la périphérie du bâtiment** (Figure III.3).

III.2.5 Action des diaphragmes au niveau des étages

Les **planchers**, y compris les toits, jouent un rôle crucial dans le comportement sismique global d'une structure. Ils **agissent comme des diaphragmes horizontaux qui collectent les forces d'inertie et les transmettent aux éléments structuraux verticaux**, unissant ainsi ces éléments **pour résister à l'action sismique horizontale**. L'efficacité des diaphragmes est particulièrement importante dans les structures avec des dispositions complexes ou non uniformes des systèmes structuraux verticaux, ou lorsque des systèmes ayant des caractéristiques de déformabilité horizontale différentes interagissent (par exemple, des systèmes à contreventement mixte).

Les **systèmes de planchers** et de toits **doivent avoir une résistance et une rigidité en plan adéquates**, et les **liaisons entre ces diaphragmes et les systèmes structuraux verticaux doivent être efficaces**. Une attention particulière doit être portée aux formes non compactes ou très allongées en plan, ainsi qu'aux grandes ouvertures dans les planchers, qui, si elles sont situées près des éléments verticaux principaux, peuvent empêcher une liaison efficace entre les éléments verticaux et horizontaux de la structure.

Les **diaphragmes doivent avoir une rigidité en plan suffisante pour la distribution des forces d'inertie horizontales aux systèmes structuraux verticaux**, notamment lorsqu'il y a des **changements significatifs de rigidité ou des décalages des éléments verticaux** au-dessus et en dessous du diaphragme.

III.2.6 Fondations adéquates

- **Dimensionnement des fondations** : Le dimensionnement et la construction des fondations, ainsi que leur liaison avec la superstructure, **doivent garantir une excitation sismique uniforme** de l'ensemble du bâtiment.
- **Fondations pour structures simples** : Pour les **structures avec un nombre limité de murs structuraux, d'épaisseurs et de rigidités variées**, il est recommandé d'**opter pour une fondation rigide** de type **caisson ou alvéolé**, avec un **radier** et une dalle supérieure.

- **Fondations isolées** : Pour les bâtiments avec des fondations isolées (semelles ou pieux), l'**utilisation de dalles ou de longrines reliant ces éléments suivant les deux directions principales** est conseillée, en respectant les critères et règles du RPA99V2003.

III.3 Critères de régularité de la structure selon RPA 99 V 2003

Pour garantir une meilleure résistance aux séismes, il est recommandé que les ouvrages présentent des formes simples et une distribution aussi régulière que possible des masses et des rigidités, tant en plan qu'en élévation. Cela permet d'assurer une répartition optimale des sollicitations à travers la structure, permettant ainsi à tous les éléments de participer à l'absorption et à la dissipation de l'énergie générée par l'action sismique.

III.3.1 Régularité en plan

1. Le bâtiment doit avoir une configuration sensiblement **symétrique** par rapport **aux deux directions orthogonales**, aussi bien pour la distribution des rigidités que pour celle des masses.
2. À chaque niveau et pour chaque direction de calcul, **la distance entre le centre de gravité des masses et le centre des rigidités ne doit pas dépasser 15 % de la dimension du bâtiment** mesurée perpendiculairement à la direction de l'action sismique considérée.
3. La forme du bâtiment doit être compacte, avec un **rapport longueur/largeur** du plancher **inférieur ou égal à 4** (Figures III.4 et III.5). La somme des **dimensions des parties rentrantes** ou saillantes du bâtiment dans une direction donnée **ne doit pas excéder 25 % de la dimension totale du bâtiment** dans cette direction (Figure III.4).

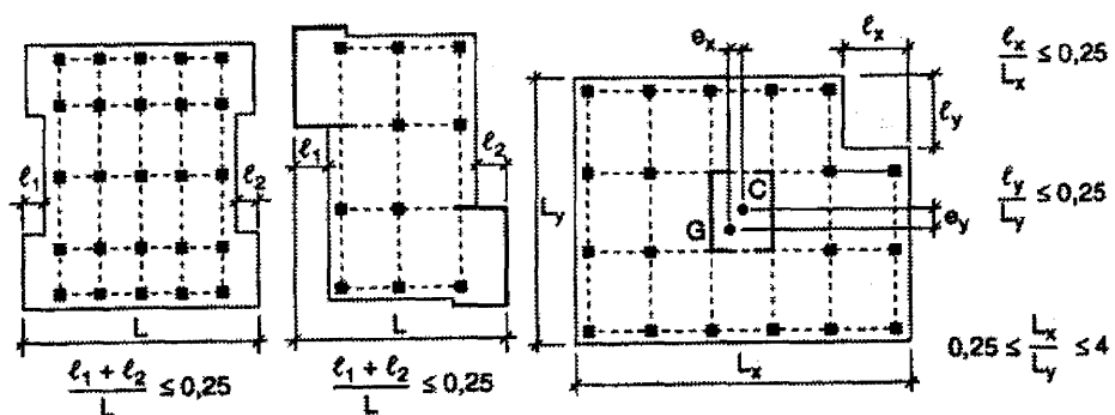


Figure III-4. Limites des décrochements en plan d'après le RPA99V2003.

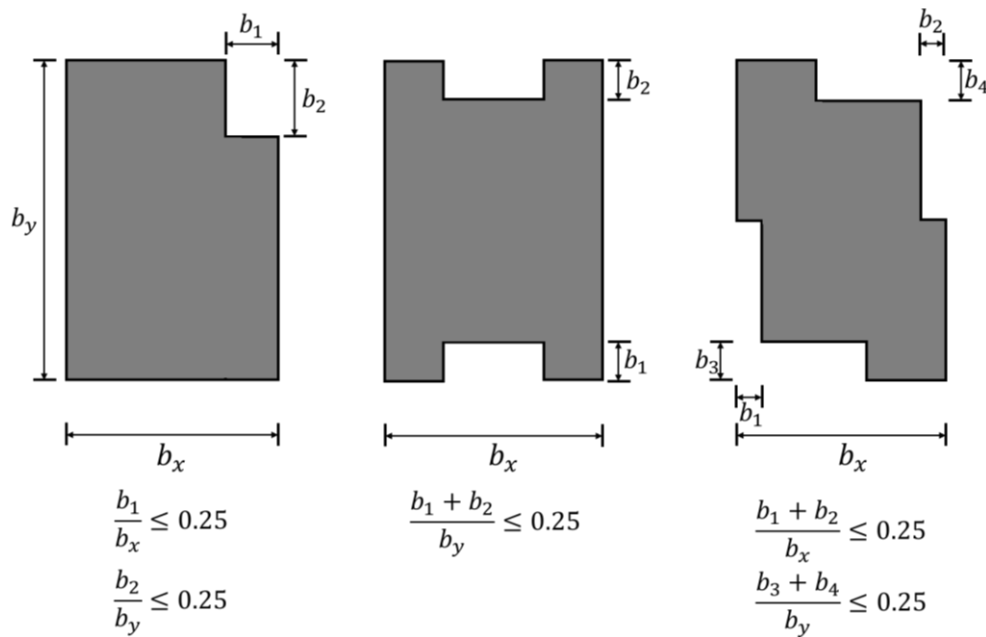


Figure III-5. Critères de régularité en plan d'après l'Eurocode 8.

4. Les **planchers** doivent présenter une **rigidité suffisante** par rapport à celle des contreventements verticaux pour être considérés comme **indéformables** dans leur plan. À cet égard, la surface totale des **ouvertures dans les planchers ne doit pas dépasser 15 % de la surface totale du plancher.**

Les problèmes associés aux irrégularités en plan incluent notamment les oscillations différentielles au niveau des angles rentrants (Figures III.6 et III.7). La structure doit présenter une distribution uniforme et continue de la masse, de la rigidité, de la résistance et de la ductilité.

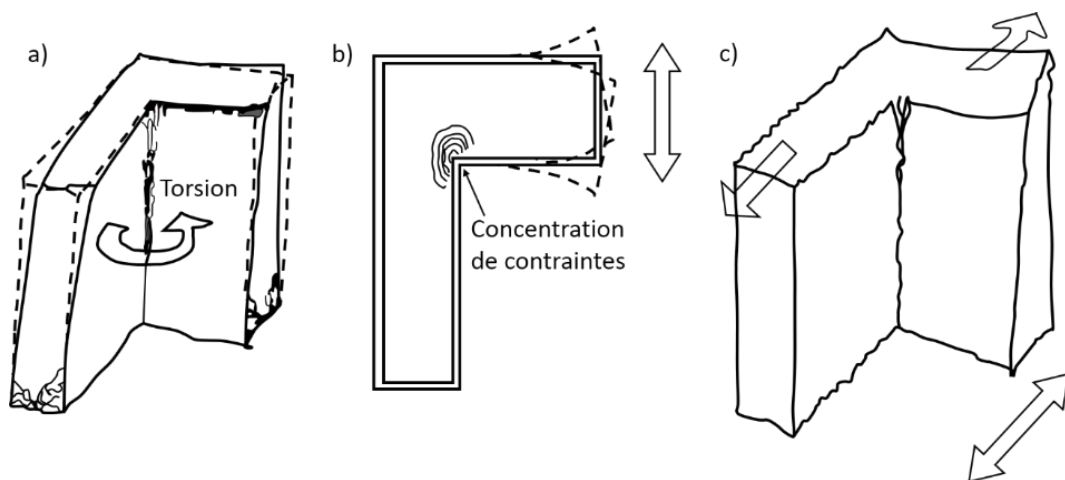


Figure III-6. Oscillations différentielles dommages dans les angles rentrants.

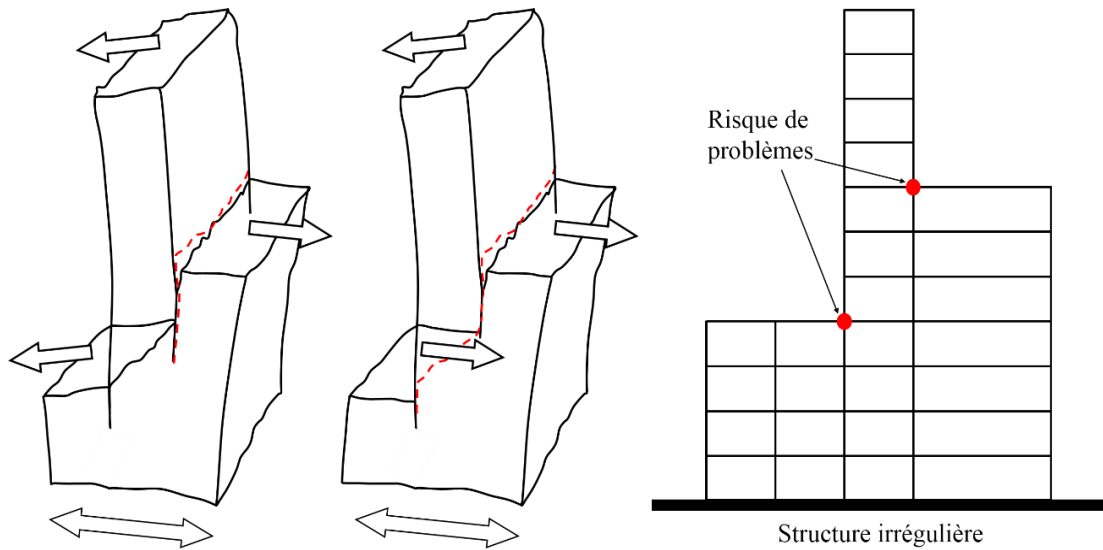


Figure III-7. Oscillations différentielles dommages dans les angles rentrants dans le plan vertical.

III.3.2 Régularité en élévation

1. Le **système de contreventement ne doit pas** comporter d'éléments porteurs verticaux **discontinus**, dont la charge ne se transmet pas directement à la fondation (Figure III.8).

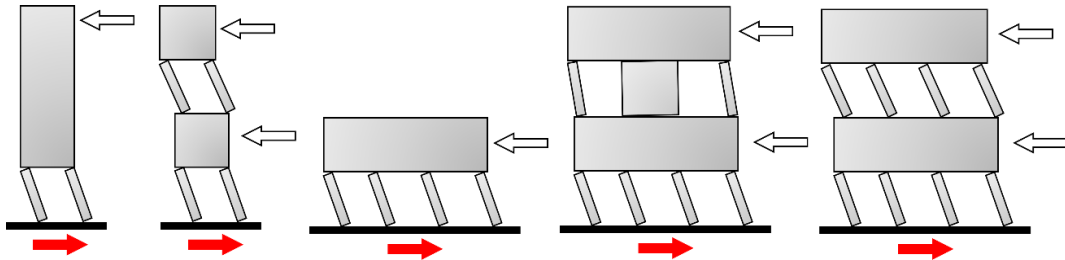


Figure III-8. Oscillations différentielles dommages dans les angles rentrants.

2. La **raideur** et la **masse** des différents niveaux doivent **rester constantes ou diminuer progressivement** sans variation brusque de la base au sommet du bâtiment.

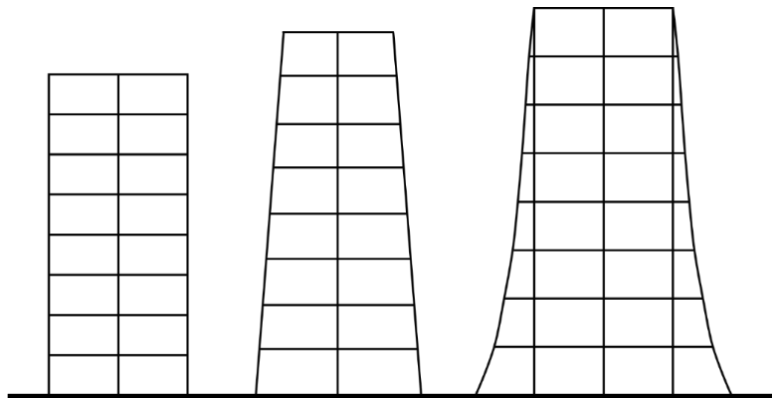


Figure III-9. Régularité en élévation.

3. Le **rapport masse/rigidité** entre deux niveaux successifs **ne doit pas varier de plus de 25 %** dans chaque direction de calcul.
4. En cas de décrochements en élévation, la **variation des dimensions en plan** du bâtiment **entre deux niveaux successifs ne doit pas dépasser 20 %** dans les deux directions de calcul, et cette variation doit se faire uniquement dans le sens d'une diminution avec la hauteur. La plus **grande dimension latérale** du bâtiment **ne doit pas excéder 1,5 fois sa plus petite dimension**.

Cependant, au dernier niveau, des éléments comme des buanderies, des salles de machines d'ascenseurs, etc., peuvent ne pas respecter les deux dernières règles (3 et 4), et peuvent être calculés conformément aux prescriptions relatives aux éléments secondaires. À cet égard, se référer aux schémas illustratifs ci-après (Figure III.10).

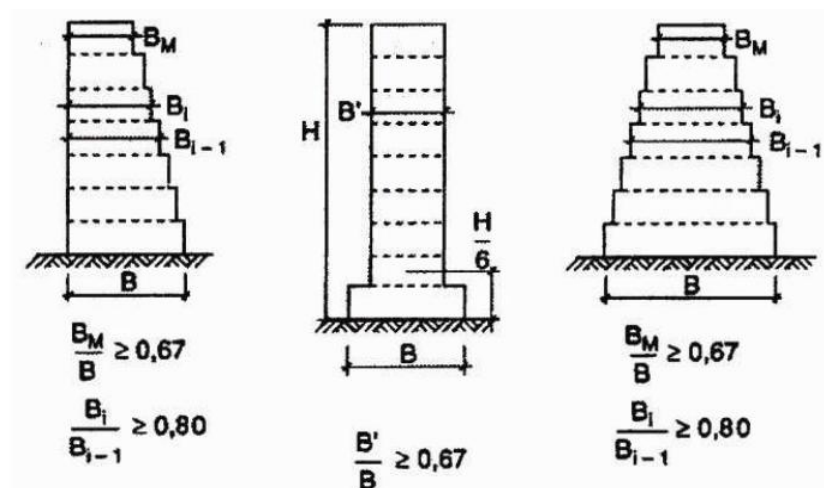


Figure III-10. Limites des décrochements en élévation d'après le RPA99V2003.

D'après l'Eurocode 8, les critères de régularité en élévation sont illustrés à la Figure III.11.

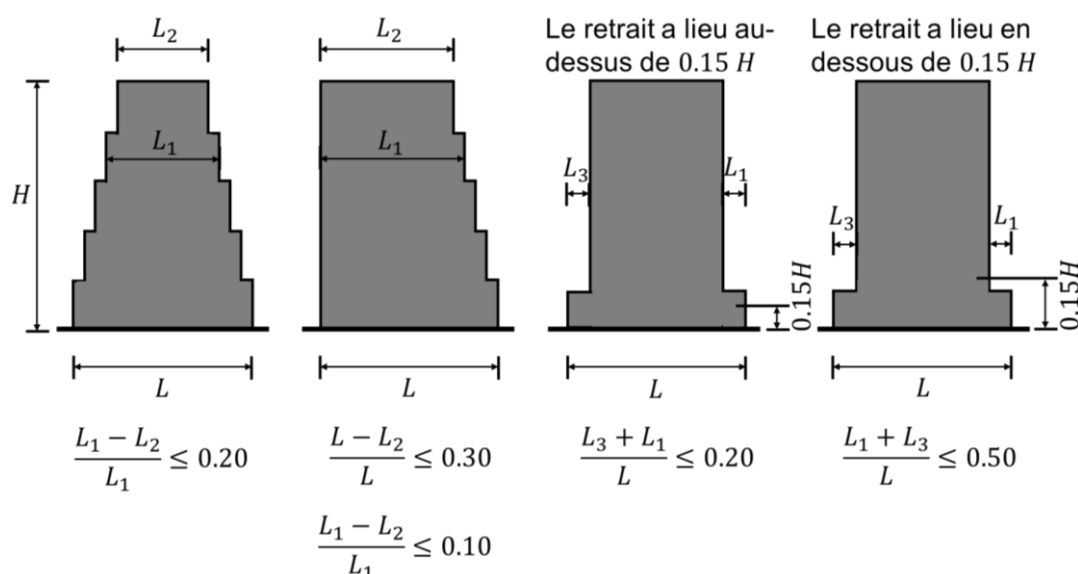


Figure III-11. Limites des décrochements en élévation d'après l'Eurocode 8.

Les **problèmes rencontrés dans les irrégularités en élévation** concernent notamment la **distribution de la masse, de la rigidité et de la résistance**, ainsi que les **oscillations différentielles** (Figure III.7). Comme pour la **régularité en plan**, la structure doit également **garantir une distribution uniforme et continue de la masse, de la rigidité, de la résistance et de la ductilité**.

Remarque :

- Un **bâtiment** est considéré comme **régulier en plan** si **tous les critères de régularité en plan sont respectés**. **À l'inverse**, il est considéré comme **irrégulier en plan** si l'un de ces critères n'est pas satisfait.
- Un **bâtiment** est considéré comme **régulier en élévation** si **tous les critères de régularité en élévation sont respectés**. **En revanche**, il est considéré comme **irrégulier en élévation** si l'un de ces critères n'est pas satisfait.
- Un **bâtiment** est considéré comme **régulier** s'il est à la fois **régulier en plan et en élévation**.

III.4 Conclusion

La résistance aux séismes d'un bâtiment repose sur une conception soignée et équilibrée, prenant en compte la distribution des masses, des rigidités et de la résistance dans l'ensemble de la structure. La régularité en plan et en élévation, deux critères essentiels, permet d'éviter les concentrations de contraintes et de garantir une réponse homogène lors d'un séisme. En suivant les principes définis dans les normes, tels que l'uniformité, la symétrie, et la distribution adéquate des masses et des rigidités, on peut créer des structures résilientes et capables de minimiser les risques de défaillance. Le respect de ces critères, couplé à une conception appropriée des éléments porteurs et des fondations, permet non seulement de prévenir les défaillances graves, mais aussi de réduire les coûts liés aux dommages matériels et à la mise en œuvre de réparations post-sismiques.

IV. Critères de classification

IV.1 Introduction

Le chapitre IV de ce manuel est consacré à l'analyse des systèmes de contreventement des structures, qui jouent un rôle crucial dans la résistance au séisme des bâtiments. Le contreventement permet de garantir la stabilité et la sécurité des ouvrages en limitant les déplacements latéraux causés par les forces horizontales, telles que celles générées par un séisme. Ce chapitre présente une classification détaillée des différents systèmes de contreventement, qu'ils soient constitués de voiles en béton armé, d'ossatures métalliques, ou de structures mixtes, ainsi que des conditions spécifiques de leur mise en œuvre en fonction des caractéristiques du bâtiment (hauteur, usage, etc.). De plus, les critères de choix des systèmes en fonction des zones sismiques et des coefficients de comportement global de la structure sont expliqués en détail, permettant ainsi aux ingénieurs et concepteurs de déterminer le système le plus adapté aux besoins spécifiques du projet.

IV.2 Critères de classification selon le « RPA 99 version 2003 » :

La classification des ouvrages et des sites dans le cadre de la réglementation parasismique « RPA 99 version 2003 » repose sur plusieurs critères essentiels permettant d'adapter les règles de conception et de construction aux risques sismiques. Ces critères incluent :

- La classification des zones sismiques,
- L'importance des ouvrages,
- Les caractéristiques des sites,
- Les systèmes de contreventement et la régularité des ouvrages.

IV.3 Classification des ouvrages selon leur importance :

Le niveau de protection sismique d'un ouvrage dépend directement de sa destination et de son importance dans le contexte des objectifs de sécurité fixés par la collectivité. Le « RPA 99 version 2003 » distingue quatre groupes d'ouvrages, selon leur importance :

- Groupe 1A : Ouvrages d'importance vitale,
- Groupe 1B : Ouvrages de grande importance,
- Groupe 2 : Ouvrages courants ou d'importance Moyenne,
- Groupe 3 : Ouvrages de faible importance.

IV.3.1 Groupe 1A : Ouvrages d'importance vitale

Ces ouvrages doivent rester **fonctionnels après un séisme majeur** pour assurer la survie de la région et la sécurité publique. Ils comprennent :

- Bâtiments abritant des centres de décisions stratégiques ;
- Établissements de santé (**hôpitaux**, centres de secours) ;
- Bâtiments liés à la **défense nationale** et à la gestion des urgences (casernes de pompiers, de police ou militaires, parcs d'engins et de véhicules d'intervention) ;
- Centres de production et de **stockage d'eau potable** d'importance vitale ;
- Infrastructures de communication publique (**télécommunications, radio, télévision, contrôle des aéroports**, etc.) ;
- **Ouvrages** publics à caractère culturel ou historique **d'importance nationale** ;
- **Centres** de production ou de distribution **d'énergie**, d'importance nationale ;
- **Bâtiments** administratifs ou autre devant **rester fonctionnels en cas de séisme**.

IV.3.2 Groupe 1B : Ouvrages de grande importance

Ce groupe comprend les ouvrages accueillant un grand nombre de personnes ou présentant une importance socio-économique :

- **Bâtiments publics** accueillant **plus de 300 personnes** (grandes mosquées, bâtiments à usage de bureaux, bâtiments industriels et commerciaux, scolaires, universitaires, constructions sportives et culturelles, pénitenciers, grands hôtels, **établissements sanitaires autres que ceux du groupe 1A**) ;
- **Bâtiments d'habitation** collective ou à usage de **bureaux de plus de 48 m de hauteur** ;
- Infrastructures d'intérêt régional ou national (**bibliothèques, archives, musée**, centres de **production** ou de **distribution d'énergie autres que ceux du groupe 1A**) ;
- Châteaux d'eau et réservoirs de grande à moyenne importance.

IV.3.3 Groupe 2 : Ouvrages courants ou d'importance moyenne

Ces ouvrages comprennent des bâtiments destinés à un usage courant, comme :

- **Bâtiments d'habitation** ou à usage de **bureaux de hauteur inférieure ou égale à 48 m** ;
- **Bâtiments recevant moins de 300 personnes**, tels que des bureaux, des bâtiments industriels, etc ;
- **Parkings** de stationnement publics, etc.

Ce groupe concerne des ouvrages où les risques sont limités, notamment :

- Bâtiments industriels ou agricoles abritant des biens de faible valeur ;
- **Bâtiments à risque limité** pour les personnes ;
- Constructions provisoires.

Le territoire national est divisé en cinq zones sismiques, classées en fonction de l'intensité des risques sismiques :

- **Zone 0 : Sismicité négligeable**
- **Zone I : Sismicité faible**
- **Zone IIa et IIb : Sismicité moyenne**
- **Zone III : Sismicité élevée**

La **Figure IV.1** ci-dessous présente la carte des zones sismiques de l'Algérie.

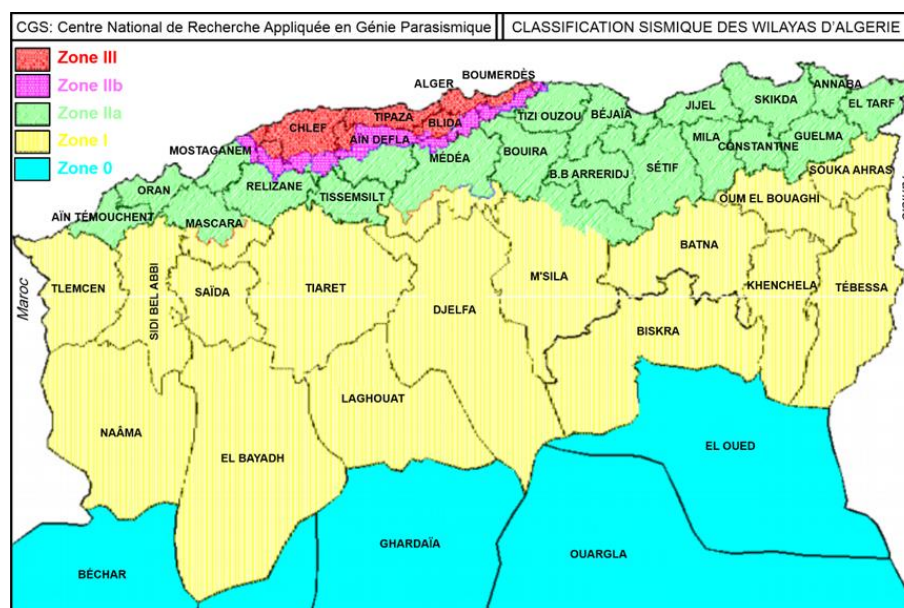


Figure IV-1. Carte de zonage sismique de l'Algérie.

Remarque :

- L'application des règles parasismiques est obligatoire pour toutes les constructions abritant des personnes dans toutes les zones, à l'exception de la zone 0.
- Dix Wilayas d'Algérie sont partagées entre plusieurs zones sismiques, telles que :
 - **CHLEF** : zones III, IIa, IIb ;
 - **BLIDA** : zones III, IIb ;

- **TIZI-OUZOU** : zones IIa, IIb ;
- **MEDEA** : zones I, IIa, IIb ;
- **MOSTAGANEM** : zones III, IIa, IIb ;
- **M'SILA** : zone I, IIa ;
- **MASCARA** : zone I, IIa ;
- **BOUMERDES** : zone III, IIa, IIb ;
- **AIN DEFLA** : zone III, IIa, IIb ;
- **RELIZANE** : zone III, IIa, IIb.

Le **Tableau IV-1** précise la classification par Wilaya et par Commune.

Tableau IV-1. Classification des zones sismiques par Wilaya et par Commune.

Wilayas	Communes / Groupes	Zone sismique
ADRAR	Tous les communes	0
CHLEF	Groupe A : Toutes les communes autres que celles figurant aux groupes B et C	III
	Groupe B : El karimia, Harchoun, Sendjias, oued Sly, Boukadir	IIb
	Groupe C : Oued ben abd el kader el hadjadj	IIa
LAGHOUAT	Tous les communes	I
OUM EL BOUAGHI	Tous les communes	I
BATNA	Tous les communes	I
BEJAIA	Tous les communes	IIa
BISKRA	Tous les communes	I
BECHAR	Tous les communes	0
BLIDA	Groupe A : Toutes les communes autres que celles figurant au groupe B	III
	Groupe B : Mefteh, Djebabra, Souhane, Larbaa, Oueld Slama, Bougara, Hammam Melouane, Ain Romana	IIb
BOUIRA	Tous les communes	IIa
TAMENRASSET	Tous les communes	0
TEBESSA	Tous les communes	I
TELEMEN	Tous les communes	I
TIARET	Tous les communes	I
TIZI-OUZOU	Groupe A : Mizrana	IIb
	Groupe B : Toutes les communes autres que celles figurant au groupe A	IIa
ALGER	Tous les communes	III
DJELFA	Tous les communes	I
JIJEL	Tous les communes	IIa
SETIF	Tous les communes	IIa
SAIDA	Tous les communes	I
SKIKDA	Tous les communes	IIa
SIDI BEL-ABBES	Tous les communes	I

ANNABA	Tous les communes	Ila
GUELMA	Tous les communes	Ila
COSTANTINE	Tous les communes	Ila
MEDEA	Groupe A :El hamadania, Médéa, Tamesguida	Ilb
	Groupe B :Toutes les communes autres que celles figurant aux groupes A et C	Ila
	Groupe C :Bou Aiche, Chahbounia, Boughzoul, Saneg, Meftaha, Ouled Maaref, El Aounet, Ain Boucif, Sidi Damed, Ain Ouksir, Cheniguel	I
MOSTAGANEM	Groupe A :Ouled Boughalem, Achaacha, Khadra, Nekmaria	III
	Groupe B :Sidi Lakhdar, Tasghait, Ouled Maalla	Ilb
	Groupe C :Toutes les communes autres que celles figurant aux groupes A et B	Ila
M'SILA	Groupe A :Beni Ilmane, Ounougha, Hammam Dalaa, Tarmount, Ouled Mansour, M'Sila, M'Tarfa, Maadid, OuledDerradj, OuledAddi, Dahahna, Berhoum, Ain Kadra, Magra, Belaiba.	Ila
	Groupe B :Toutes les communes autres que celles figurant au groupe A	I
MASCARA	Groupe A :Toutes les communes autres que celles figurant au groupe B	Ila
	Groupe B : Ain Fares, Ain Fekran, Bouhanifia, Guerdjou, Oued Taria, Ghris, Benian, Mokhda, Aouf, Gharous, Nesmot, M'Hamid, Hachem, Oued El Abtai, Ain Ferrah	I
OUARGLA	Tous les communes	0
ORAN	Tous les communes	Ila
EL BYADH	Tous les communes	I
ILLIZI	Tous les communes	0
BORDJ BOU	Tous les communes	Ila
BOUMERDES	Groupe A :Toutes les communes autres que celles figurant aux groupes B et C	III
	Groupe B :Afir, Benchoud, Taouerga, Baghlia, Oued Aissa, Naciria, Bordj Menail,	Ilb
	Groupe C :Timezrit, Ammal, Chaabet El Aneur	Ila
EL TAREF	Tous les communes	Ila
TINDOUF	Tous les communes	0
TISSEMSILT	Tous les communes	Ila
EL OUED	Tous les communes	0
KHENCHELA	Tous les communes	I
SOUK AHRAS	Tous les communes	I
TIPAZA	Tous les communes	III
MILA	Tous les communes	Ila
AIN DEFLA	Groupe A :Tacheta Zegara, El Abadia, Ain Bouyahia, El Attaf	III
	Groupe B :Al Amra, Mekhatria, Arib, Rouina, Ain Defla, Bourashed, Zeddine, Tiberkanine, Meliana, Ain Torki,	Ilb
	Groupe C :Toutes les communes autres que celles figurant aux groupes A et B	Ila
NAAMA	Tous les communes	I
AIN TEMOUCHENT	Tous les communes	Ila
GHARDAIA	Tous les communes	0
RELIZANE	Groupe A :Mediouna, Sidi M'hamed Ben Ali, Mazouna, El Guettar	III
	Groupe B :Merdja Sidi Abed, Oued Rhiou, Ouarizane, Djidiouia, Hamri, Beni Zenthis	Ilb
	Groupe C :Toutes les communes autres que celles figurant aux groupes A et B	Ila

IV.4.1 Coefficient d'accélération de zone

Le coefficient d'accélération de zone est déterminé en fonction de la zone sismique et de l'importance de l'ouvrage, comme indiqué dans le tableau associé. Ce coefficient permet d'adapter les exigences parasismiques aux risques spécifiques de chaque région.

Tableau IV-2. Coefficient d'accélération de zone.

Groupe	Coefficients d'accéléérations de zone (%)				Classification des ouvrages selon leur importance
	Zone I	Zone IIa	Zone IIb	Zone III	
1A	0.15	0.25	0.30	0.40	Ouvrages d'importance vitale : ex. Sécurité et Hopitaux
1B	0.12	0.20	0.25	0.30	Ouvrages de grande importance : ex. Scolaire et Culte
2	0.10	0.15	0.20	0.25	Ouvrages courants : ex. Habitations et Bureaux
3	0.07	0.10	0.14	0.18	Ouvrages de faible importance : ex. Hangars

IV.5 Classification des sites d'implantation

IV.5.1 Choix du site

La sélection du site d'implantation d'un ouvrage doit tenir compte des **conditions géologiques et géotechniques défavorables**. Ces conditions peuvent inclure :

- Présence de failles actives reconnues ;
- Zones susceptibles de liquéfaction ;
- Terrains instables :
 - Pentes instables, abords de falaises, rives et berges sujettes à affouillement ;
 - Terrains tassants, gorgés d'eau, mal drainés ou inondables ;
 - Terrains susceptibles de s'effondrer sous l'effet des secousses ;
 - Présence de cavités souterraines ;
 - Présence de remblais non compactés.
- Topographie accidentée (crêtes, pitons rocheux, bords de vallées encaissées, Abords de changements de pente importants).
- Présence d'alluvions d'épaisseur variable en pied de pente ou d'épaisseur importante en milieu de vallées (susceptible d'amplification).
- Présence de formations géologiques différentes.

IV.5.2 Reconnaissance et étude de sol

Les reconnaissances et études de sol sont essentielles, notamment pour les ouvrages d'importance moyenne ou plus, et doivent permettre de classer le site et détecter les zones liquéfiables ou instables. À l'exception des constructions R+2 au maximum ou 11 m de hauteur

moyenne et dont la surface totale des planchers n'excède pas 400 m². Ces études doivent également prendre en compte les propriétés dynamiques des sols, particulièrement dans les zones de sismicité moyenne à élevée.

IV.5.3 Implantation des ouvrages

Lors de l'implantation des ouvrages, il faudrait :

Lors de l'implantation des ouvrages, plusieurs précautions doivent être prises afin de garantir leur stabilité et leur sécurité face aux risques géologiques :

1. Proximité des failles :

- Il est impératif d'**éviter** toute implantation à proximité immédiate des **failles actives**, en particulier pour les **ouvrages importants** et ceux d'**importance vitale**, et d'**assurer une distance minimale de 100 m de part et d'autre de la faille** pour les **ouvrages d'importance moyenne**.
- Pour les **ouvrages d'importance faible**, la **largeur** de la bande à neutraliser peut être réduite à **50 m de part et d'autre de la faille**.

2. Terrains instables et topographie accidentée :

- Il convient d'**éviter** autant que possible les **terrains instables** ainsi que ceux présentant une **topographie accidentée**, qui peuvent **compromettre la stabilité de l'ouvrage**.
- De même, les **sols liquéfiables**, les **sols fortement fracturés**, les **sols faiblement cimentés** et les **zones de remblais** doivent être **évités** en raison de leur faible capacité portante.

3. Préférences pour certains types de sols :

- Il est recommandé de **privilégier** les **sols rocheux** ou les **sols fermes aux sols meubles**, qui présentent une faible portance et peuvent entraîner des **tassements excessifs et irréguliers**.
- Il est également essentiel que la **couche d'appui des fondations** soit **suffisamment épaisse et stable**, et qu'elle ne repose pas sur une couche instable.

4. Implantation des bâtiments :

- Les **bâtiments élevés** doivent, dans la mesure du possible, être **implantés sur des sites rocheux ou des sols fermes** de faible épaisseur. Les **bâtiments bas**, quant à eux, doivent être **implantés sur des sites de sols fermes ou meubles relativement épais**, **afin d'éviter les phénomènes de résonance** qui pourraient affecter la structure.

- Lors de l'**implantation** d'un programme important de constructions **sur un terrain en pente**, il est **préférable d'opter** pour plusieurs blocs de bâtiments **sur des plates-formes horizontales**. De plus, **la pente des talus dont la stabilité** doit être vérifiée **ne doit pas excéder 2/3**.

5. Discontinuités géologiques :

- Lorsqu'un **ouvrage se trouve de part et d'autre d'une discontinuité géologique**, telle qu'une **fracture**, un **contact entre différentes formations géologiques**, ou un **changement brusque de pente**, **il est conseillé d'implanter l'ouvrage d'un même côté de cette discontinuité**. **Si cela n'est pas possible**, l'ouvrage doit être **scindé en blocs distincts**, chacun étant implanté de part et d'autre de la discontinuité et **séparé par des joints**.

IV.5.4 Infrastructure et fondations

L'**infrastructure** et les **fondations** doivent être **rigides et résistantes**, en particulier dans les zones sismiques. Les fondations doivent prendre appui sur des formations **en place compactes et homogènes, hors d'eau**, et être capables de transmettre les charges horizontales liées aux séismes en plus des charges verticales. Les fondations sur remblais ne sont pas admises, sauf justification spécifique.

IV.5.5 Catégories et critères de classification des sites

Les sites sont classés en quatre catégories, en fonction des caractéristiques géotechniques des sols :

- **Site 1 (S1) : site rocheux**: Roche ou autre formation géologique caractérisée par une vitesse moyenne d'onde de cisaillement ($V_s \geq 800 \text{ m/s}$).
- **Site 2 (S2) : site ferme**: Dépôts de sables et de graviers très denses et/ou d'argile sur-consolidée sur 10 à 20 m d'épaisseur avec $V_s \geq 400 \text{ m/s}$ à partir de 10 m de profondeur.
- **Site 3 (S3) : site meuble**: Dépôts épais de sables et graviers moyennement denses ou d'argile moyennement raide avec $V_s \geq 200 \text{ m/s}$ à partir de 10 m de profondeur.
- **Site 4 (S4) : site très meuble**:
 - Dépôts de sables lâches avec ou sans présence de couches d'argile molle avec $V_s < 200 \text{ m/s}$ dans les 20 premiers mètres.
 - Dépôts d'argile molle à moyennement raide avec $V_s < 200 \text{ m/s}$ dans les 20 premiers mètres.

Les périodes caractéristiques associées à chaque catégorie de site sont indiquées dans le **tableau IV.3.**

Tableau IV-3. Valeurs de T_1 et T_2 .

Site	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
T_1 (sec)	0.15	0.15	0.15	0.15
T_2 (sec)	0.30	0.40	0.50	0.70

IV.5.5.1 Classement du site selon la disponibilité des essais :

- Le **classement d'un site** peut être réalisé **en fonction de la vitesse des ondes de cisaillement $V_{s,30}$ dans les 30 premiers mètres du sol, si cette information est disponible.**
- La valeur de la vitesse de l'onde de cisaillement du rocher doit être mesurée sur site ou estimée dans le cas d'un rocher peu altéré. Les **roches tendres ou très altérées** peuvent être **classées en catégorie S2 si V_s n'est pas mesuré.**
- Un **site ne peut être classé dans la catégorie S1 si la couche de sol entre la surface du rocher et le niveau bas des fondations superficielles dépasse 3 mètres.**
- L'**argile molle** est définie par les critères suivants :
 - Indice de plasticité $I_P > 20$,
 - Teneur en eau naturelle $W_n \geq 40\%$,
 - Résistance non drainée $C_u < 25 \text{ kPa}$,
 - Vitesse de l'onde de cisaillement $V_s < 150 \text{ m/s}$.

En outre, outre les valeurs des vitesses des ondes de cisaillement, les valeurs moyennes harmoniques d'autres résultats d'essais (**pénétromètre statique, SPT, pressiomètre**, etc.) peuvent être utilisées pour classer un site, selon le tableau ci-dessous.

Tableau IV-4. Classification des sites.

Site	Type de sol	q_c (MPa) (1)	N (2)	P_l (MPa) (3)	E_p (MPa) (3)	q_u (MPa) (4)	$V_s \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$ (5)
S1	Rocheux			> 5	> 100	> 10	≥ 800
S2	Ferme	> 15	> 50	> 2	> 20	> 0.4	$\geq 400 - < 800$
S3	Meuble	1.5 – 15	10 – 15	1 – 2	5 – 20	0.1 – 0.4	$\geq 200 - < 400$
S4	Très Meuble ou Présence de 3m au moins d'argile molle	< 1.5	< 10	< 1	< 5	< 0.1	$\geq 100 - < 200$

Les paramètres sont définis comme suit pour les sols stratifiés :

1. Pénétromètre statique:

$$\bar{q}_c = \frac{\sum_i^n h_i}{\sum_i^n \left(\frac{h_i}{q_{ci}} \right)} \quad (\text{IV. 1})$$

Où :

- h_i : Epaisseur de la couche i ,
- q_{ci} : Résistance de pointe moyenne à travers la couche i .

2. Essai SPT :

$$\bar{N} = \frac{h_s}{\sum_i^n \left(\frac{h_i}{N_i} \right)} \quad (\text{IV. 2})$$

Où :

- $N_i < 100$: Nombre de coups moyens non corrigé, enregistré à travers la couche (i) d'épaisseur h_i ,
- h_s : Epaisseur totale des couches de sols granulaires (sables et/ou graviers).

3. Pressiomètre:

$$\bar{P}_l = \frac{\sum_i^n h_i}{\sum_i^n \left(\frac{h_i}{P_{li}} \right)}, \quad \bar{E}_p = \frac{\sum_i^n h_i}{\sum_i^n \left(\frac{h_i}{E_{pi}} \right)} \quad (\text{IV. 3})$$

Où :

- P_{li} : Pression limite moyenne à travers la couche (i) d'épaisseur h_i ,
- E_{pi} : Module pressiométrique moyen à travers la couche $n(i)$ d'épaisseur h_i .

4. Résistance en compression simple:

$$\bar{q}_u = \frac{h_c}{\sum_i^n \left(\frac{h_i}{q_{ui}} \right)} \quad (\text{IV. 4})$$

Où :

- h_c : Epaisseur totale des couches de sols cohérents, argile et/ou marne,
- q_{ui} : Résistance en compression simple à travers la couche (i) d'épaisseur h_i .

5. Vitesse des ondes de cisaillement:

$$V_s = \frac{\sum_i^n h_i}{\sum_i^n \left(\frac{h_i}{V_{si}} \right)} \quad (\text{IV. 5})$$

Où :

- V_{si} : Vitesse d'onde de cisaillement à travers la couche (i) d'épaisseur h_i .

Remarque :

- Le site sera classé dans la catégorie la plus appropriée en fonction de la disponibilité et de la fiabilité des résultats des différents types d'essais. En cas de doute, il convient de classer le site dans la catégorie immédiatement la plus défavorable.
- En l'absence d'essais ou d'étude de site appropriée, il est permis de classer le site en catégorie S3 « Meuble ».
- Dans certains cas, des investigations plus approfondies peuvent être nécessaires, notamment dans les situations suivantes :
 - Présence de sols instables sous les actions sismiques, tels que des sols liquéfiables, faiblement cimentés, ou d'anciens remblais.
 - Présence de sols vaseux ou d'argile avec une très forte teneur en matière organique sur une épaisseur supérieure à 3 m.
 - Présence d'argile très plastique (indice de plasticité $I_p > 75$) sur une épaisseur de plus de 6 m.
 - Présence d'une couche d'argile molle à moyennement raide (avec $q_c = 1.5$ à 5 MPa , $P_l = 0.5$ à 2 MPa , $E_p = 5$ à 25 MPa , $q_u = 0.1$ à 0.4 MPa) sur une épaisseur de plus de 30 m.

IV.5.6 Facteur d'amplification dynamique moyen

Le facteur d'amplification dynamique D dépend du site, du facteur de correction d'amortissement et de la période fondamentale (T) de la structure. Il est ajusté sur un palier horizontal pour les faibles périodes.

Le facteur D est donné sous forme graphique à la Figure IV-2 pour un amortissement $\xi = 5\%$.

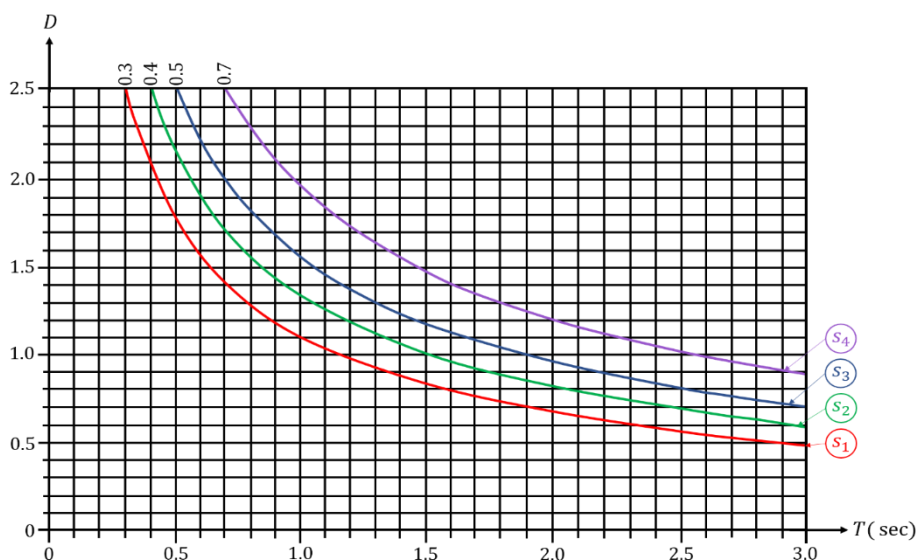


Figure IV-2. Facteur d'amplification dynamique moyen D ($\xi = 5\%$).

IV.6 Systèmes de contreventement

Le **système de contreventement** est un ensemble d'éléments de construction **assurant** la **rigidité** et la **stabilité** d'un ouvrage **face aux forces horizontales** engendrées par diverses actions (**vent, séisme, choc, explosion**, etc.).

Les constructions parasismiques doivent généralement comporter des **contreventements dans au moins les deux directions horizontales**. Ces contreventements doivent être disposés de manière à :

- Reprendre une charge verticale suffisante pour assurer leur stabilité,
- Assurer une transmission directe des forces aux fondations,
- Minimiser les effets de torsion.

Les **éléments de contreventement** doivent présenter une **configuration régulière** et **former un système continu, cohérent**, et aussi **monolithique** que possible. De plus, ce système doit être suffisamment redondant pour garantir une marge importante entre la limite d'élasticité et le seuil de rupture de la structure. Une attention particulière doit être portée à l'étude et à la réalisation de tous les assemblages, en tenant compte des conséquences qu'une défaillance au niveau des assemblages pourrait avoir sur le comportement de la structure.

IV.6.1 Classification des systèmes de contreventement

La **classification des systèmes structuraux** se traduit, dans les règles et méthodes de calcul, **par l'attribution**, pour chaque catégorie, d'une valeur numérique **du coefficient de comportement R** .

Cette classification est basée sur la **fiabilité et la capacité de dissipation de l'énergie des systèmes vis-à-vis de l'action sismique**. Le coefficient de comportement est déterminé en fonction de la nature des matériaux constitutifs, du type de construction, des possibilités de redistribution des efforts dans la structure, et des capacités de déformation des éléments dans le domaine post-élastique.

Les systèmes de contreventement sont classés dans les catégories suivantes :

A) Structures en béton armé :

1.a. Portiques autostables en béton armé sans remplissage en maçonnerie rigide :

Ces structures sont composées uniquement de **portiques** capables de **reprendre la totalité des sollicitations dues aux charges verticales et horizontales**. Les éléments de remplissage ne doivent pas interférer avec les déformations des portiques (cloisons désolidarisées ou cloisons légères qui ne gênent pas le déplacement des portiques).

Limitation du nombre de niveaux et de hauteurs pour les bâtiments concernés est indiquée dans le tableau IV.5.

Tableau IV-5. Limitation pour les bâtiments en portiques autostables en béton armé sans remplissage en maçonnerie rigide.

Zone	I	IIa	IIb et III
Nombre de niveaux	5 (R+4)	4 (R+3)	3 (R+2)
Hauteur (m)	17	14	11

1.b. Portiques autostables en béton armé avec remplissage en maçonnerie rigide :

Dans cette catégorie, **les éléments de remplissage** de la structure sont **constitués de murs en maçonnerie de petits éléments insérés dans un cadre poteaux-poutres**. L'épaisseur de ces murs (hors crépissage) ne doit pas dépasser 10 cm, à l'exception des remplissages périphériques ou des séparations entre deux logements ou deux locaux situés au même niveau. Dans ces cas, une seconde paroi d'une épaisseur de 5 cm, du côté intérieur, est tolérée. Cette paroi peut éventuellement atteindre 10 cm d'épaisseur, à condition qu'elle ne soit pas insérée dans les cadres poteaux-poutres, afin de ne pas aggraver les phénomènes d'interaction entre la maçonnerie et la structure.

Il est également essentiel que les remplissages soient disposés en plan de manière aussi symétrique que possible par rapport au centre de masse de chaque étage. Cette disposition vise à éviter d'aggraver toute dissymétrie éventuelle du système de contreventement en béton armé de l'étage, notamment pour les portiques autostables.

Pour les bâtiments relevant de cette catégorie, la limitation du nombre de niveaux et de la hauteur est précisée dans le Tableau IV.6.

Tableau IV-6. Limitation pour les bâtiments en portiques autostables en béton armé avec remplissage en maçonnerie rigide.

Zone	I	IIa	IIb	III
Nombre de niveaux	5 (R+4)	4 (R+3)	3 (R+2)	2 (R+1)
Hauteur (m)	17	14	11	8

Remarque :

- Dans le cas où le rez-de-chaussée est, dès la phase de programmation ou de conception initiale, destiné à un usage commercial ou à d'autres services, avec des densités de cloisonnement moindres et/ou des hauteurs plus élevées par rapport aux niveaux supérieurs, créant ainsi des étages souples, il est requis que le contreventement du bâtiment soit assuré par un autre système. Ce dernier devra comporter des voiles

disposés dans deux directions orthogonales ou équivalentes, ou bien des systèmes mixtes portiques-voiles ou des noyaux en béton armé, par exemple.

- Il convient de rappeler que l'étage souple est défini comme celui dont la rigidité latérale est inférieure à 70 % de celle de l'étage situé immédiatement au-dessus, ou inférieure à 80 % de la rigidité latérale moyenne des trois étages situés immédiatement au-dessus.

2. Système de contreventement constitué par des voiles porteurs en béton armé :

Le **système** est constitué exclusivement de voiles, ou bien de **voiles** associés à des **portiques**. Dans ce dernier cas, les **voiles** doivent reprendre **plus de 20 % des sollicitations dues aux charges verticales**. La **sollicitation horizontale** est considérée comme étant **reprise uniquement par les voiles**.

3. Structure à ossature en béton armé contreventée entièrement par noyau en béton armé :

Dans ce cas, le bâtiment est contreventé entièrement par un **noyau rigide** en béton armé, qui reprend **la totalité de l'effort horizontal**.

4.a. Système de contreventement mixte assuré par des voiles et des portiques, avec justification de l'interaction portiques-voiles :

Les **voiles** de contreventement doivent reprendre **au maximum 20 % des sollicitations dues aux charges verticales**.

Les **voiles** et les **portiques** reprennent conjointement **les charges horizontales**, proportionnellement à leurs rigidités relatives, ainsi que les sollicitations résultant de leurs interactions à tous les niveaux.

Les **portiques** doivent reprendre, en plus des charges verticales, **au moins 25 % de l'effort tranchant d'étage**.

4.b. Système de contreventement de structures en portiques par des voiles en béton armé :

Dans ce système, les **voiles** reprennent **au maximum 20 % des sollicitations dues aux charges verticales** et **la totalité des sollicitations dues aux charges horizontales**.

On considère que les **portiques ne reprennent que les charges verticales**. Toutefois, en zone sismique **I Ib et III**, il est nécessaire de vérifier les **portiques** sous un effort horizontal représentant **25 % de l'effort horizontal global**.

Avec ce système de contreventement, les bâtiments sont limités à une hauteur de 10 niveaux **(R+9) ou 33 m au maximum**.

5. Système fonctionnant en console verticale à masses réparties prédominantes :

Ce **système** est typiquement **utilisé pour** des structures telles que des réservoirs cylindriques, des silos, des cheminées de **forme cylindrique**, etc.

6. Système à pendule inverse :

Il s'agit d'un système où **50 % ou plus de la masse** est **concentrée dans le tiers supérieur de la structure**.

Exemples typiques : un château d'eau sur pilotis ou un réservoir d'eau cylindrique ou torique, proéminent sur une jupe cylindrique ou conique plus resserrée.

B) Structures en acier :

7. Ossature contreventée par portiques autostables ductiles :

L'**ossature complète** (incluant les cadres) **reprend la totalité des charges verticales**. Les **portiques autostables ductiles** assurent, à eux seuls, **la totalité des charges horizontales**. Ces portiques ou cadres doivent être conçus, calculés et exécutés selon les dispositions fixées dans le paragraphe §8.2–RPA99V2003.

8. Ossature contreventée par portiques autostables ordinaires :

L'**ossature complète** reprend **la totalité des charges verticales**. Les **portiques ou cadres** doivent répondre aux exigences données dans le paragraphe §8.3–RPA99V2003, et **assurent, à eux seuls, la totalité des charges horizontales**.

La **hauteur du bâtiment** utilisant ce système de contreventement **ne doit pas excéder 5 niveaux (R+4) ou 17 m**.

9. Ossature contreventée par palées triangulées concentriques :

L'**ossature complète** reprend **la totalité des charges verticales**, tandis que les **palées assurent la reprise de toutes les charges horizontales**.

Les palées triangulées concentriques doivent respecter les prescriptions du paragraphe §8.4–RPA99V2003.

La **hauteur des bâtiments** utilisant ce système de contreventement **doit être limitée à 10 niveaux (R+9) ou 33 m**.

Dans cette catégorie, on distingue deux sous-catégories, à savoir les palées en X et en V (les palées en K ne sont pas autorisées).

9.a. Système d'ossature contreventée par palées triangulées en X :

Dans ce système, pour chaque nœud d'une palée, les axes de la diagonale, de la poutre et du poteau convergent en un seul point situé au centre du nœud.

Seules les diagonales tendues interviennent dans la résistance et le comportement dissipatif de la palée vis-à-vis de l'action sismique.

9.b. Système d'ossature contreventée par palées triangulées en V :

Dans ce système, les poutres de chaque palée sont continues, et le point d'intersection des axes des diagonales de la palée se situe sur l'axe de la poutre.

La résistance et la capacité de dissipation de la palée vis-à-vis de l'action sismique sont assurées par la participation conjointe des diagonales tendues et comprimées.

10. Ossature avec contreventements mixtes :

Un contreventement mixte combine deux types de contreventement choisis parmi ceux définis précédemment. Il peut inclure des **portiques ou des cadres autostables ductiles couplés avec des palées triangulées en X, en V, ou en forme de double béquille.**

L'ossature complète assure la reprise de toutes les charges verticales, tandis que les contreventements mixtes (cadres + palées) reprennent toutes les charges horizontales globales. Les cadres et les palées doivent être calculés pour résister à l'effort horizontal, lequel sera partagé proportionnellement à leurs rigidités, en tenant compte de leur interaction mutuelle à tous les niveaux. Les **cadres autostables ductiles doivent être capables de reprendre, à eux seuls, au moins 25 % des charges horizontales globales.**

10.a. Système d'ossature contreventée par cadres ductiles et palées en X :

Ce système est une combinaison de cadres autostables ductiles et de palées triangulées concentriques en X.

10.b. Système d'ossature contreventée par cadres ductiles et palées en V :

Dans ce système, le contreventement mixte est une combinaison de cadres autostables ductiles et de palées triangulées concentriques en V.

11. Portiques fonctionnant en console verticale :

Ce système concerne principalement des portiques classiques à un seul niveau avec une traverse rigide, ainsi que des structures élancées de type "tube", où les éléments résistants sont

essentiellement des poteaux situés en périphérie de la structure. Ces structures présentent un comportement dissipatif localisé uniquement aux extrémités des poteaux.

C) Structures en maçonnerie :

Les constructions en maçonnerie porteuse ordinaire sont interdites en zone sismique. Seule la maçonnerie porteuse chaînée est permise.

12. Structures en maçonnerie porteuse chaînée :

Ce système est composé de structures porteuses réalisées en maçonnerie de moellons ou de petits éléments manufacturés, et comportant des chaînages en béton armé mis en œuvre après la construction de la maçonnerie. Ces structures résistent simultanément aux charges verticales et horizontales.

Les limitations de hauteur et de nombre de niveaux pour ce type de système sont données dans le Tableau IV.7.

Tableau IV-7. Limitation pour les bâtiments en maçonnerie porteuse chaînée.

Zone	I	IIa	IIb et III
Nombre de niveaux	5 (R+4)	4 (R+3)	3 (R+2)
Hauteur (m)	17	14	11

D) Autres structures :

13. Structures à ossature métallique avec contreventement par diaphragme :

Ces structures résistent à l'action sismique grâce à l'effet de diaphragme des parois verticales (murs) et horizontales (planchers). Le niveau de comportement dissipatif de ces structures dépend de la capacité de résistance ductile au cisaillement des parois, qui peuvent être réalisées avec des matériaux très divers (tôle nervurée formée à froid, mur en maçonnerie armée, parois en béton ou béton armé, etc.).

Les parois doivent être fixées au cadre de l'ossature métallique de manière à garantir une liaison rigide.

14. Structure à ossature métallique avec contreventement par noyau en béton armé :

Identique à l'ossature en béton armé contreventée entièrement par noyau en béton armé (Système 3).

15. Structure à ossature métallique avec contreventement par voiles en béton armé :

Identique à la structure en portiques avec des voiles en béton armé (Système 4.b.).

16. Structure à ossature métallique avec contreventement mixte composé d'un noyau en béton armé et de palées et/ou portiques métalliques en périphérie.

17. Système comportant des transparences (étages souples) :

Les exemples les plus courants de tels systèmes sont les niveaux de "réception" ou lobbies des grands hôtels, où les cloisons sont rares ou la hauteur de niveau plus importante que celle des étages courants, ou des étages non cloisonnés pour des raisons fonctionnelles (salles informatiques, équipements spéciaux, etc.).

Ces systèmes sont généralement à éviter.

IV.6.2 Coefficient de comportement global de la structure

Le RPA99V2003 définit un coefficient de comportement global R pour chaque système de contreventement. La valeur du coefficient R est donnée en fonction du système de contreventement (Tableaux IV.8, IV.9 et IV.10). La plus petite valeur de R est retenue lorsque des systèmes de contreventement différents sont utilisés dans les deux directions.

Tableau IV-8. Valeurs du coefficient de comportement R pour la structure en béton armé.

Catégorie	Type de contreventement	R
1.a	Portiques autostables sans remplissage en maçonnerie rigide	5
1.b	Portiques autostables avec remplissage en maçonnerie rigide	3.5
2	Voiles porteurs	3.5
3	Noyau	3.5
4.a	Mixte portiques/voiles avec interaction	5
4.b	Portiques contreventés par voiles	4
5	Console verticale à masses réparties	2
6	Pendule inverse	2

Tableau IV-9. Valeurs du coefficient de comportement R pour les structures en acier.

Catégorie	Type de contreventement	R
7	Portiques autostables ductiles	6
8	Portiques autostables ordinaires	4
9.a	Ossature contreventée par palées triangulées en X	4
9.b	Ossature contreventée par palées triangulées en V	3
10.a	Mixte portiques/palées triangulées en X	5
10.b	Mixte portiques/palées triangulées en V	4
11	Portiques en console verticale	2

Tableau IV-10. Valeurs du coefficient de comportement R pour les structures en maçonnerie et autres systèmes.

Catégorie	Type de contreventement	R
12	Maçonnerie chaînée	2.5
13	Ossature métallique contreventée par diaphragme	2
14	Ossature métallique contreventée par noyau en béton armé	3
15	Ossature métallique contreventée par voiles en béton armé	3.5
16	Ossature métallique avec contreventement mixte comportant un noyau en béton armé et palées ou portiques métal en façade	4
17	Systèmes comportant des transparences (étages souples)	2

IV.7 Conclusion

En conclusion, le choix du système de contreventement est essentiel pour assurer la stabilité et la sécurité d'un bâtiment face aux actions sismiques. Chaque type de système, qu'il soit basé sur des voiles porteurs en béton armé, des portiques métalliques, ou des combinaisons mixtes, doit être sélectionné en fonction des caractéristiques du bâtiment et des exigences sismiques de la zone concernée. Une bonne compréhension des différents systèmes de contreventement, ainsi que des méthodes de calcul associées, est indispensable pour garantir une protection optimale contre les risques sismiques. Ce chapitre fournit ainsi des bases solides pour la conception de structures résilientes, capables de répondre aux défis posés par les mouvements sismiques tout en respectant les normes en vigueur.

V. Règles de calcul de la force sismique - Méthode statique équivalente

V.1 Introduction

Les structures soumises aux actions sismiques doivent être conçues et dimensionnées selon des règles spécifiques afin de garantir leur sécurité et leur performance. La méthode statique équivalente constitue l'une des approches les plus couramment utilisées pour estimer les forces sismiques appliquées aux bâtiments. Cette méthode repose sur une simplification du comportement dynamique de la structure en le modélisant par une force horizontale unique équivalente aux effets globaux du séisme. Le présent chapitre expose les principes fondamentaux de cette méthode, en détaillant la répartition verticale et horizontale des forces sismiques, l'effet de la torsion d'axe vertical, ainsi que la distribution des efforts aux éléments de contreventement. Enfin, les critères de justification de la sécurité et les combinaisons d'actions sont abordés afin d'assurer une conception fiable des structures face aux séismes.

V.2 Règles de calcul de la force sismique

Le RPA99, version 2003, recommande trois méthodes de calcul des forces sismiques :

- **La méthode statique équivalente** : Il s'agit d'une **analyse statique** d'une structure soumise à un système de **forces statiques équivalentes aux forces dynamiques** générées par l'action sismique.
- **La méthode d'analyse modale spectrale** : Cette approche repose sur une **analyse dynamique** de la structure en réponse à un séisme représenté par un spectre de réponse. Elle peut être utilisée dans **tous les cas** et est particulièrement recommandée lorsque la **méthode statique équivalente n'est pas applicable**.
- **La méthode d'analyse dynamique par accélérogrammes** : Son utilisation est soumise à des études spécifiques réalisées par un **personnel qualifié**. Celui-ci doit justifier au préalable le **choix des séismes de calcul**, des **lois de comportement adoptées**, ainsi que la **méthode d'interprétation** des résultats et les **critères de sécurité** à respecter.

V.3 Méthode statique équivalente

V.3.1 Définition

La méthode statique équivalente consiste à analyser statiquement une structure en remplaçant les forces dynamiques induites par le séisme par un système de forces statiques équivalentes.

V.3.2 Principe

Les **forces dynamiques réelles** générées par le mouvement sismique du sol **sont remplacées** par un système de **forces statiques fictives** appliquées dans la direction du séisme. Ces forces sont choisies de manière à produire des effets équivalents à ceux de l'action sismique (Figure V.1).

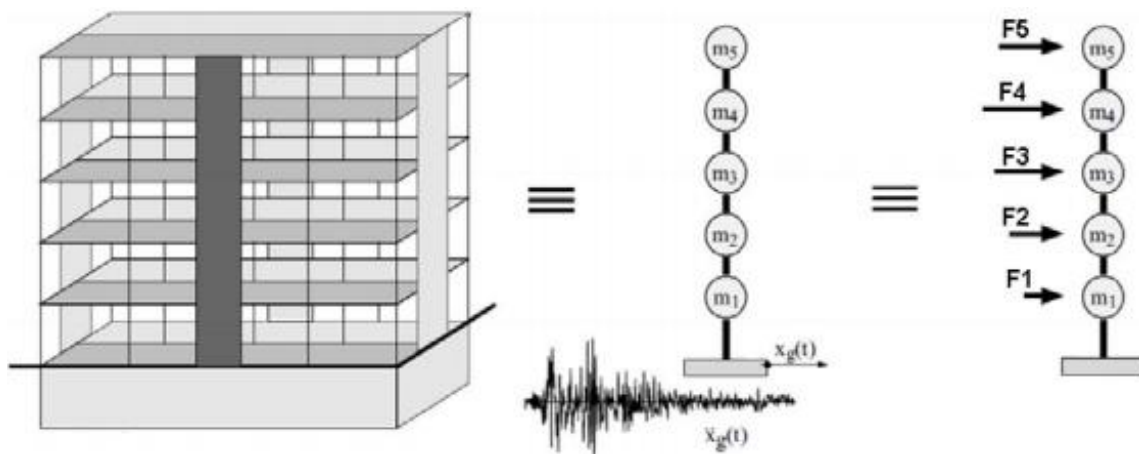


Figure V-1. Principe de la méthode statique équivalente.

L'application de cette méthode doit impérativement être accompagnée d'une mise en œuvre rigoureuse des dispositions constructives garantissant à la structure :

- une ductilité suffisante ;
- une capacité de dissipation efficace de l'énergie vibratoire transmise à la structure.

V.3.3 Conditions d'application

- La méthode statique équivalente est applicable uniquement aux structures dont le comportement sismique est dominé par le **mode fondamental**, c'est-à-dire aux **structures régulières**.
- Elle est applicable aux structures régulières ayant une **période fondamentale inférieure à 2 s**.
- Selon le règlement RPA99, version 2003, cette méthode peut être utilisée sous les conditions suivantes :

a) **Structures régulières satisfaisant aux critères de régularité en plan et en élévation**, avec une hauteur totale H_T respectant les limites suivantes :

- $H_T \leq 65 \text{ m}$ en zones I et II ;

- $H_T \leq 30 \text{ m}$ en zones III.

b) **Structures présentant une configuration irrégulière**, à condition de respecter, en plus des critères de hauteur mentionnés ci-dessus, des conditions complémentaires détaillées dans le Tableau V.1.

Tableau V-1. Conditions de hauteur pour les structures irrégulières.

Zones	Groupes d'usage			
	Groupe 1A	Groupe 1B	Groupe 2	Groupe 3
Zone I	$H_T \leq 65 \text{ m}$	$H_T \leq 65 \text{ m}$	$H_T \leq 65 \text{ m}$	$H_T \leq 65 \text{ m}$
Zone II	Niveaux ≤ 3 $H_T \leq 10 \text{ m}$	Niveaux ≤ 5 $H_T \leq 17 \text{ m}$	Niveaux ≤ 7 $H_T \leq 23 \text{ m}$	$H_T \leq 65 \text{ m}$
Zone III	Niveaux ≤ 2 $H_T \leq 8 \text{ m}$	Niveaux ≤ 3 $H_T \leq 10 \text{ m}$	Niveaux ≤ 5 $H_T \leq 17 \text{ m}$	Niveaux ≤ 5 $H_T \leq 17 \text{ m}$

V.3.4 Modélisation

V.3.4.1 Direction de l'action sismique

Les forces sismiques horizontales équivalentes sont appliquées successivement selon deux axes principaux orthogonaux.

V.3.4.2 Hypothèses de modélisation

Les hypothèses à considérer dans la modélisation sont les suivantes :

- Le **modèle du bâtiment**, utilisé dans chacune des deux directions de calcul, est un **modèle plan** (Figure V.2), avec :
 - des masses concentrées au centre de gravité des planchers ;
 - un seul degré de liberté en translation horizontale par niveau ;
 - des systèmes de contreventement pouvant être considérés comme découplés dans les deux directions principales.

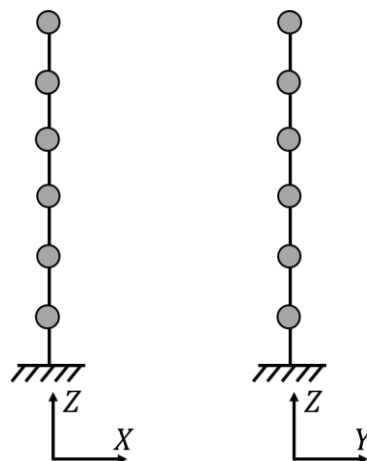


Figure V-2. Modèle plan du bâtiment.

- La **rigidité latérale** des éléments porteurs du système de contreventement est calculée à partir des **sections non fissurées** pour les structures en béton armé ou en maçonnerie.
- Seul le **mode fondamental** de vibration de la structure est pris en compte dans le calcul de la **force sismique totale**.
- La **déformée** du mode fondamental (Figure V-3) est assimilée :
 - à une **droite** pour les structures à **portiques** ;
 - à une **parabole** pour les structures à **voiles**.

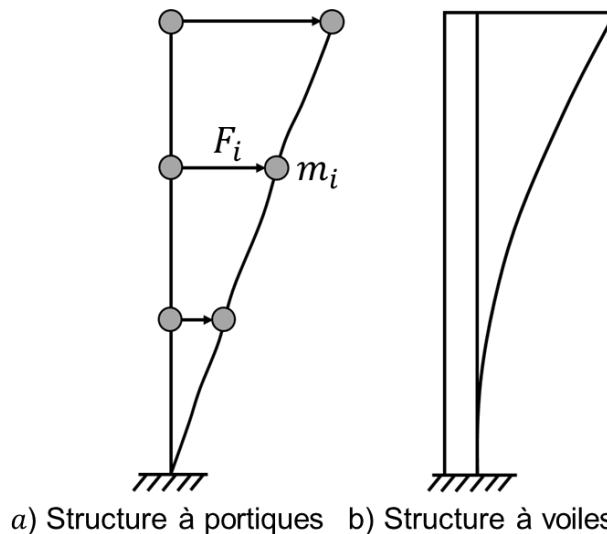


Figure V-3. Déformée du mode fondamental : a)structures à portiques, b)structures à voiles.

V.3.5 Calcul de la force sismique totale (effort tranchant à la base)

La **force sismique totale** V , appliquée à la **base de la structure**, doit être calculée successivement dans **deux directions horizontales orthogonales**, selon la formule suivante :

$$V_x = \frac{A \cdot D_x \cdot Q_x}{R} W \quad V_y = \frac{A \cdot D_y \cdot Q_y}{R} W \quad (V.1)$$

Où :

- V : Force sismique totale (ou Effort tranchant sismique à la base),
- A : Coefficient d'accélération de zone (Tableau IV-2),
- D : Facteur d'amplification dynamique moyen (Figure IV-2),
- Q : Facteur de qualité,
- R : Coefficient de comportement de la structure (cf. §IV.6.2),
- W : Poids total de la structure.

V.3.5.1 Détermination des éléments de la formule

a) Facteur d'amplification dynamique moyen :

Le facteur d'amplification dynamique dépend du site, du facteur de correction d'amortissement et de la période fondamentale (T) de la structure. Il est calibré à un palier horizontal pour les faibles périodes. Le facteur peut être déterminé par la formule suivante :

$$D = \begin{cases} 2.5\eta & 0 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\eta \left(\frac{T_2}{T}\right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3.0s \\ 2.5\eta \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} & T > 3.0s \end{cases} \quad (V.2)$$

Où :

- T_2 : Période caractéristique, associée à la catégorie du site et donnée par le Tableau V-1.

Tableau V-2. Valeurs de T_1 et T_2 .

Site	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
$T_1(\text{sec})$	0.15	0.15	0.15	0.15
$T_2(\text{sec})$	0.30	0.40	0.50	0.70

- η : Facteur de correction d'amortissement, déterminé par la formule :

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{2 + \xi}} \geq 0.7 \quad (V.3)$$

Où $\xi \neq 5\%$ est le pourcentage d'amortissement critique fonction du matériau constitutif, du type de structure et de l'importance des remplissages. Pour $\xi = 5\%$ on a $\eta = 1$

Les valeurs du pourcentage d'amortissement critique sont données au Tableau V-3.

Tableau V-3. Valeurs de $\xi(\%)$.

Remplissage	Portiques		Voiles ou murs
	Béton armé	Acier	Béton armé/maçonnerie
Léger	6	4	10
Dense	7	5	

Remarque :

Pour un amortissement $\xi = 5\%$, le facteur D est donné sous forme graphique à la Figure IV-2.

b) Facteur de qualité Q :

Le facteur de qualité de la structure dépend de :

- La redondance et de la géométrie des éléments qui la constituent,
- La régularité en plan et en élévation,
- La qualité du contrôle de la construction.

La valeur de Q est déterminée par la formule :

$$Q = 1 + \sum_{1}^6 P_q \quad (V.4)$$

Où P_q est la pénalité à retenir selon que le critère de qualité q "est satisfait ou non". Sa valeur est donnée au Tableau V-3.

Tableau V-4. Valeurs des pénalités P_q .

Critère "q"	P_q	
	Observé	N/Observé
1. Conditions minimales sur les files de contreventement	0	0.05
2. Redondance en plan	0	0.05
3. Régularité en plan	0	0.05
4. Régularité en élévation	0	0.05
5. Contrôle de la qualité des matériaux	0	0.05
6. Contrôle de la qualité de l'exécution	0	0.10

Les critères de qualité "q" à vérifier sont :

1. Conditions minimales sur les files de contreventement :

- **Système de portiques :** **Chaque file de portique** doit comporter, à tous les niveaux, **au moins trois (03) travées** dont le **rapport des portées n'excède pas 1,5**. Les travées de portique peuvent être constituées de voiles de contreventement.
- **Système de voiles :** **Chaque file de voiles** doit comporter, à tous les niveaux, **au moins un (01) trumeau** ayant un **rapport "hauteur d'étage sur largeur" inférieur ou égal à 0,67**, **ou bien deux (02) trumeaux** ayant un **rapport "hauteur d'étage sur largeur" inférieur ou égal à 1,0**. Ces trumeaux doivent s'élever sur toute la hauteur de l'étage et ne doivent comporter aucune ouverture ou perforation susceptible de réduire de manière significative leur résistance ou leur rigidité.

2. **Redondance en plan** : **Chaque étage** devra comporter, en plan, **au moins quatre (04) files de portiques et/ou de voiles** dans la direction des forces latérales appliquées. Ces files de contreventement doivent être disposées symétriquement autant que possible, avec un **rapport entre les valeurs maximale et minimale d'espacement ne dépassant pas 1,5**.
3. **Régularité en plan** : La structure est classée régulière en plan (définie au § III.3.1).
4. **Régularité en élévation** : La structure est classée régulière en élévation (définie au § III.3.2).
5. **Contrôle de la qualité des matériaux** : Des essais systématiques sur les matériaux utilisés doivent être réalisés par l'entreprise.
6. **Contrôle de la qualité de l'exécution** : Il est prévu contractuellement une mission de suivi des travaux sur chantier. Cette mission doit comprendre notamment une supervision des essais effectués sur les matériaux.

c) Poids total de la structure :

Le poids total de la structure (W) est égal à la somme des poids W_i , calculés à chaque niveau (i) :

$$W = \sum_{i=1}^n W_i \text{ avec } W_i = W_{Gi} + \beta W_{Qi} \quad (\text{V.5})$$

Où :

- W_{Gi} : Poids dû aux charges permanentes et aux équipements fixes éventuels, solidaires de la structure,
- W_{Qi} : Charges d'exploitation,
- β : Coefficient de pondération, fonction de la nature et de la durée de la charge d'exploitation et donné par le Tableau V-5.

Tableau V-5. Valeurs du coefficient de pondération β .

Cas N°	Type d'ouvrage	Valeur de β
1	Bâtiments d'habitation, bureaux ou assimilés	0.20
2	Bâtiments recevant du public temporairement : – Salles d'exposition, de sport, lieux de culte, salles de réunions avec places debout.	0.30
	– Salles de classes, restaurants, dortoirs, salles de réunions avec places assises	0.40
3	Entrepôts, hangars	0.50
4	Archives, bibliothèques, réservoirs et ouvrages assimilés	1.00
5	Autres locaux non visés ci-dessus	0.60

V.3.6 Estimation de la période fondamentale de la structure

La période fondamentale de vibration (T) de la structure peut être évaluée par un calcul dynamique précis ou par des méthodes numériques.

Les formules empiriques à utiliser selon les cas sont les suivantes :

Formule empirique 1 :

$$T = C_T h_N^{3/4} \quad (\text{V. 6})$$

Où :

- h_N : Hauteur mesurée en mètres, à partir de la base de la structure jusqu'au dernier niveau (N),
- C_T : Coefficient fonction du système de contreventement et du type de remplissage, donné par le Tableau V-6.

Tableau V-6. Valeurs du coefficient de pondération C_T .

Cas N°	Système de contreventement	Valeur de C_T
1	Portiques autostables en béton armé sans remplissage en maçonnerie	0.075
2	Portiques autostables en acier sans remplissage en maçonnerie	0.085
3	Portiques autostables en béton armé ou en acier avec remplissage en maçonnerie	0.050
4	Contreventement assuré partiellement ou totalement par des voiles en béton armé, des palées triangulées et des murs en maçonnerie	0.050

Formule empirique 2 :

Dans les cas 3 et 4, on peut également utiliser aussi la formule :

$$T = 0.09 h_N / \sqrt{D} \quad (\text{V. 7})$$

Où D est la dimension du bâtiment mesurée à sa base dans la direction de calcul considérée.

Remarque :

On retient, dans chaque direction considérée, la plus petite des deux valeurs données.

La valeur de T peut être calculée avec la **formule de Rayleigh** :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{(\sum_i^n W_i \delta_i^2)}{g(\sum_i^n f_i \delta_i)}} \quad (\text{V. 8})$$

Où :

- δ_i : Flèches horizontales dues aux forces f_i calculées à partir d'un modèle élastique linéaire de la structure qui prend en compte tous les éléments participant à sa rigidité,
- f_i : Système de forces horizontales, distribuées selon les formules de répartition de V suivant la verticale.

La valeur de T peut aussi être calculée par une version simplifiée de cette formule :

$$T = 2\sqrt{\delta_N} \quad (\text{V. 9})$$

Où δ_N est la flèche horizontale au sommet du bâtiment, mesurée en mètres, due aux forces gravitaires appliquées horizontalement.

Remarque :

Les valeurs de **la période T , calculées à partir des formules de Rayleigh ou de méthodes numériques, ne doivent pas dépasser celles estimées à partir des formules empiriques de plus de 30%**. La valeur à utiliser dans la méthode statique équivalente est alors de $T_{\max} = 1.3T$ avec $T = C_T h_n^{3/4}$.

V.4 Distribution verticale et horizontale des forces sismiques

V.4.1 Distribution verticale de la force sismique

La force sismique latérale totale V doit être répartie sur la hauteur de la structure, comme indiqué à la Figure V-4, de la manière suivante :

$$V = F_t + \sum F_i \quad (\text{V. 10})$$

Où :

- F_t est une partie de l'effort tranchant V , appliquée au sommet du bâtiment, et qui est calculée selon les conditions suivantes :

$$\begin{cases} F_t = 0 & \text{si } T \leq 0.7 \text{ sec} \\ F_t = 0.07 TV & \text{si } T > 0.7 \text{ sec} \end{cases} \quad (\text{V. 10a})$$

- $\sum F_i$ est la partie restante de V soit $(V - F_t)$, qui est répartie à chaque niveau, y compris le dernier (Figure V-5), selon la formule suivante :

$$F_i = \frac{(V - F_t) W_i h_i}{\sum_{j=1}^n W_j h_j} \quad (\text{V. 10b})$$

Où :

- F_i : Force horizontal appliquée au niveau i ,
- h_i : Hauteur du niveau i où s'exerce la force F_i ,

- h_j : Hauteur du niveau j ,
- W_i, W_j : Poids revenant aux niveaux i et j .

Remarque :

La valeur de F_t ne doit en aucun cas dépasser $0,25 V$.

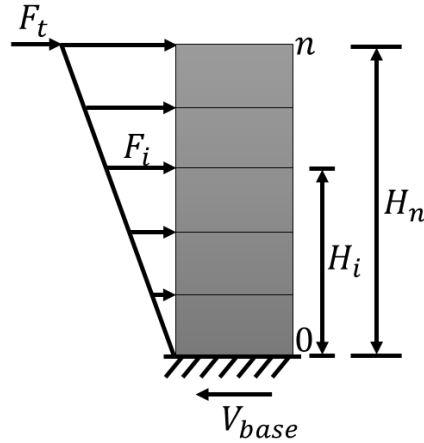


Figure V-4. Distribution des forces sismiques selon la hauteur.

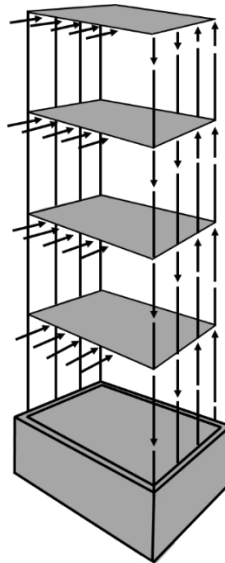


Figure V-5. Distribution proportionnelle à la masse.

V.4.2 Distribution horizontale de la force sismique

L'effort tranchant au niveau de l'étage i est estimé par :

$$V_i = F_t + \sum_{j=i}^n F_j \quad (V.11)$$

Où :

- n : Le nombre total d'étages,
- j : Numéro des étages compris entre le niveau i et le dernier niveau.

V.5 Effet de la torsion d'axe vertical

L'augmentation de l'effort tranchant, provoquée par la torsion d'axe vertical due à l'excentricité entre le centre de gravité (ou centre de masse) et le centre de rigidité (ou centre de torsion), doit être prise en compte. Les efforts tranchants négatifs dus à la torsion doivent être négligés.

Centre de gravité :

Chaque niveau possède un centre de gravité x_i et y_i , à en général différent de ceux des autres niveaux. Le centre de gravité global peut être déterminé par les formules suivantes :

$$X_G = \frac{\sum_i^n W_i \times x_i}{\sum_i^n W_i} \text{ et } Y_G = \frac{\sum_i^n W_i \times y_i}{\sum_i^n W_i} \quad (\text{V. 12})$$

Où :

- W_i : Poids total de la masse concentrée de l'élément i du niveau considéré,
- x_i et y_i : Coordonnées du centre de gravité de l'élément i par rapport au repère global,
- X_G et Y_G : Coordonnées du centre de masse du niveau par rapport au repère global.

Centre de torsion :

La détermination de la position exacte du centre de rigidité est complexe. Cependant, il peut être assimilé au centre de torsion du "profil" constitué par les éléments structuraux verticaux. On peut utiliser la formule dite des "rigidités relatives" :

$$X_T = \frac{\sum_i^n x_i \times I_{ix}}{\sum_i^n I_{ix}} \text{ et } Y_T = \frac{\sum_i^n y_i \times I_{iy}}{\sum_i^n I_{iy}} \quad (\text{V. 13})$$

Où :

- X_T, Y_T : Coordonnées du centre de torsion du niveau par rapport au repère global,
- I_{ix} et I_{iy} : Inerties de flexion de chaque élément i de contreventement (poteau, voile) dans les directions x et y ,
- x_i, y_i : Coordonnées du centre de torsion des éléments de contreventement par rapport au repère global.

Pour les structures comportant des planchers ou diaphragmes horizontaux rigides dans leur plan, on suppose que, à chaque niveau et dans chaque direction, la résultante des forces horizontales a une excentricité par rapport au centre de torsion égale à la plus grande des deux valeurs :

- 5% de la plus grande dimension du bâtiment à ce niveau (cette excentricité doit être prise en considération de part et d'autre du centre de torsion) :

$$E = 0.05 L_{max} \quad (\text{V. 14})$$

- Excentricité théorique résultant des plans :

$$E_X = |X_T - X_G| E_Y = |Y_T - Y_G| \quad (\text{V. 15})$$

Les oscillations de torsion d'axe vertical peuvent avoir trois origines principales :

1. **Oscillations structurelles** : dues à l'excentrement du centre de gravité (G) des masses par rapport au centre de torsion (T) de la structure aux niveaux considérés ;
2. **Oscillations accidentelles** : dues à la variabilité spatiale des charges permanentes, à une distribution défavorable des charges d'exploitation, ou encore à la rupture aléatoire des éléments non structuraux ;
3. **Oscillations dues aux mouvements différentiels du sol.**

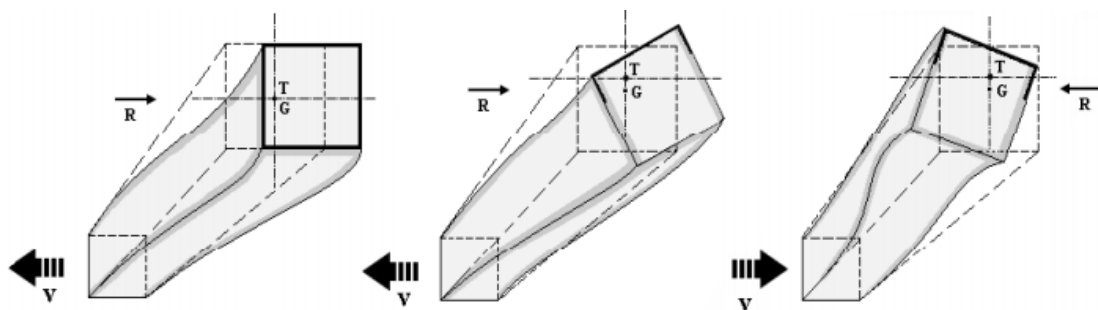


Figure V-6. Torsion d'axe verticale.

V.6 Distribution horizontale des forces sismiques aux éléments de contreventement

Pour permettre une distribution proportionnelle de la rigidité des éléments de contreventement à chaque étage (comme illustré à la Figure V-7), on suppose que le plancher est rigide (effet de diaphragme).

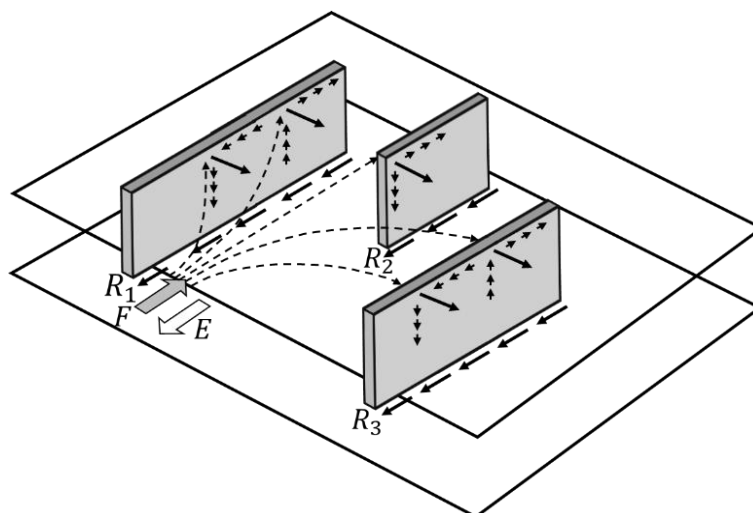


Figure V-7. Distribution proportionnelle à la rigidité.

La force latérale distribuée au portique "i" de l'étage "k" est proportionnelle à la rigidité latérale du portique considéré :

$$F_k^i = \frac{R_k^i}{\sum R_k^i} F_k \quad (V.16)$$

Où :

- F_k^i : Force latérale revenant au portique "i",
- R_k^i : Rigidité latérale du portique "i" au niveau "k",
- $\sum R_k^i$: Somme de rigidité du niveau "k",
- F_k : Force latérale revenant à l'étage "k".

V.7 Justification de la sécurité et combinaisons d'actions

V.7.1 Justification de la sécurité

Les objectifs de sécurité de la structure soumise aux effets de l'action sismique sont réputés atteints si les critères relatifs à la résistance, la ductilité, l'équilibre d'ensemble, la stabilité des fondations, les joints sismiques, les déformations et la stabilité de forme (effet $P - \Delta$) sont simultanément satisfaits.

V.7.1.1 Justification vis-à-vis de la résistance

La condition de résistance suivante doit être satisfaite pour tous les éléments structuraux, leurs assemblages, ainsi que les éléments non structuraux critiques :

$$S_d \leq R_d \quad (V.17)$$

Où :

- S_d : Sollicitation agissante de calcul résultant des combinaisons définies ci-après, incluant éventuellement les effets du 2^o ordre ;
- R_d : Sollicitation résistante de calcul de l'élément, calculée en fonction des propriétés du matériau constitutif.

V.7.1.2 Justification vis-à-vis la ductilité

Les exigences de ductilité minimale sont réputées satisfaites si toutes les dispositions constructives relatives au matériau et aux éléments structuraux sont appliquées conformément aux prescriptions définies dans les chapitres précédents.

V.7.1.3 Justification vis-à-vis l'équilibre d'ensemble

Cette condition d'équilibre se réfère à la stabilité d'ensemble du bâtiment ou de l'ouvrage, soumis à des effets de renversement et/ou de glissement dus aux sollicitations résultant des combinaisons d'actions. Quel que soit le type de fondations (superficielles ou profondes), il est

nécessaire de vérifier que l'excentrement de la résultante des forces verticales gravitaires et des forces sismiques résistant au renversement satisfait la condition suivante :

$$e = \frac{M}{N} \leq \frac{B}{4} \quad (\text{V.18})$$

Où :

- M : Moment de renversement du aux sollicitations sismiques,
- N : Forces verticales gravitaires,
- B : Dimension à la base du bâtiment dans la direction de l'action sismique.

V.7.1.4 Justification vis-à-vis de la résistance des planchers

La capacité des planchers doit être suffisante pour transmettre aux éléments verticaux de contreventement les effets des forces sismiques de calcul.

V.7.1.5 Justification vis-à-vis de la stabilité des fondations

Pour les justifications de la stabilité des fondations, il convient de se référer aux prescriptions et /ou exigences relatives à la réalisation des fondations et des ouvrages de soutènement.

V.7.1.6 Justification vis-à-vis de la largeur des joints sismiques

Deux blocs voisins doivent être séparés par des joints sismiques (comme illustré à la Figure V-8), dont la largeur minimale d_{min} satisfait la condition suivante :

$$d_{min} = 15 \text{ mm} + (\delta_1 + \delta_2) \text{ mm} \geq 40 \text{ mm} \quad (\text{V.19})$$

Où :

- δ_1 et δ_2 : Déplacements maximaux des deux blocs, calculés selon la formule ci-dessous au niveau du sommet du bloc le moins élevé, en incluant les composantes dues à la torsion et, éventuellement, celles dues à la rotation des fondations.

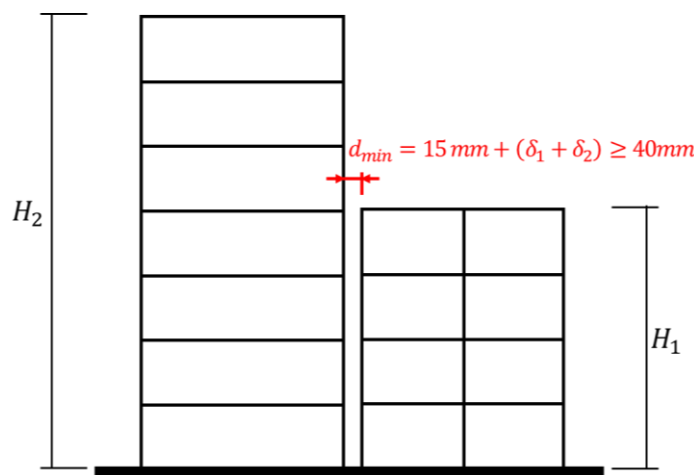


Figure V-8. Largeur minimum du joint sismique.

V.7.1.7 Justification vis-à-vis de l'effet P – Δ

Les effets du 2^o ordre (ou effet P-Δ) peuvent être négligés dans le cas des bâtiments si la condition suivante est satisfaite à tous les niveaux :

$$\theta_k = \frac{P_k \cdot \Delta_k}{V_k \cdot h_k} \leq 0.10 \quad (\text{V.20})$$

Où :

- $P_k = \sum_{i=k}^n (W_{Gi} + \beta W_{Qi})$: Poids total de la structure et des charges d'exploitation associées au-dessus du niveau "k",
- Δ_k : Déplacement relatif au niveau "k" par rapport au niveau "k – 1",
- V_k : Effort tranchant d'étage au niveau "k",
- h_k : Hauteur de l'étage "k".

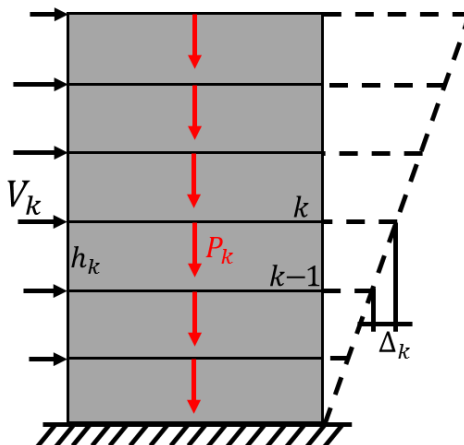


Figure V-9. Effet P-Δ.

Les effets P-Δ peuvent être pris en compte de manière approximative (cf. Figure V-10) en amplifiant les effets de l'action sismique calculés au moyen d'une analyse élastique du 1^o ordre par le facteur $1/(1 - \theta_k)$.

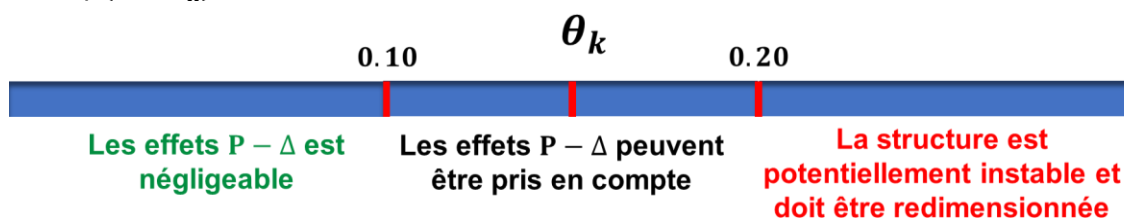


Figure V-10. Condition de l'effet P-Δ.

V.7.1.8 Justification vis-à-vis des déformations

Les déplacements relatifs latéraux Δ_k d'un étage par rapport aux étages adjacents ne doivent pas dépasser 1.0% de la hauteur de l'étage h_k :

$$\Delta_k < 1.0\% h_k \quad (\text{V.21})$$

V.7.2 Combinaisons d'actions

L'action sismique est considérée comme une action accidentelle dans le cadre de la philosophie de calcul aux Etats Limites. Les combinaisons d'actions à considérer pour la détermination des sollicitations et des déformations de calcul sont les suivantes :

- $G + Q \pm E$: Cette combinaison comprend la totalité de la charge d'exploitation ainsi que la charge sismique. En raison de l'improbabilité de cette charge d'exploitation, une grande partie de celle-ci (environ 40 à 60%) peut effectivement représenter l'effet des verticales des séismes.
- $0.8G \pm E$: Cette combinaison tient compte de la réduction de la charge verticale qui se produira en raison des effets de l'accélération verticale ascendante.

Il est essentiel de prendre en compte la réversibilité des charges sismiques dans ces combinaisons. Pour les poteaux dans les ossatures autostables, la première combinaison est remplacée par :

$$G + Q \pm 1.2E \quad (V.22)$$

Où :

- G : Charges permanentes,
- Q : Charges d'exploitation non pondérées,
- E : Action du séisme représentée par ses composantes horizontales.

Cette combinaison vise à fournir une meilleure résistance aux effets des moments de renversement dus aux mouvements sismiques majeurs.

V.8 Conclusion

L'application rigoureuse de la méthode statique équivalente permet d'assurer une évaluation simplifiée mais efficace des forces sismiques agissant sur une structure. En intégrant les principes de distribution des forces, les effets de la torsion et les exigences de justification de la sécurité, cette approche offre un cadre de dimensionnement fiable pour la conception parasismique. Toutefois, elle reste limitée aux structures régulières de hauteur modérée, pour lesquelles les hypothèses de la méthode demeurent valables. Pour des configurations plus complexes ou des bâtiments de grande hauteur, des analyses dynamiques plus avancées doivent être envisagées afin de mieux capturer les effets réels du séisme.

VI. Méthode dynamique modale spectral

VI.1 Introduction

La méthode dynamique modale spectrale constitue l'une des approches les plus avancées pour l'analyse de la réponse sismique des structures. Cette méthode repose sur la décomposition du comportement d'une structure en modes de vibration, où chacun est analysé indépendamment avant de combiner les résultats pour obtenir la réponse globale sous l'effet d'un séisme. Elle permet de prendre en compte de manière détaillée les propriétés dynamiques de la structure, telles que la rigidité et l'amortissement, et s'avère particulièrement utile dans les cas où la méthode statique équivalente est insuffisante ou inapplicable. Ce chapitre présente les principes de cette méthode, les aspects liés à la modélisation des structures, ainsi que les étapes nécessaires pour effectuer une analyse dynamique modale spectrale, en se basant sur les spectres de réponse et en considérant les effets de torsion, de déformabilité du sol et autres facteurs significatifs.

VI.2 Définition

La **méthode dynamique modale spectrale** est une **analyse dynamique** permettant d'**évaluer la réponse d'une structure** sous l'effet d'un séisme représenté **par un spectre de réponse**. Cette approche est applicable dans **tous les cas** de figure, et particulièrement lorsque la **méthode statique équivalente ne peut être utilisée**.

VI.3 Principe de la méthode

Dans cette méthode, **pour chaque mode de vibration, on recherche le maximum des effets** générés dans la structure par les forces sismiques, lesquelles sont représentées par un **spectre de réponse** de calcul. Ces **effets sont ensuite combinés** afin d'obtenir la **réponse de la structure** (cf. Figure VI-1).

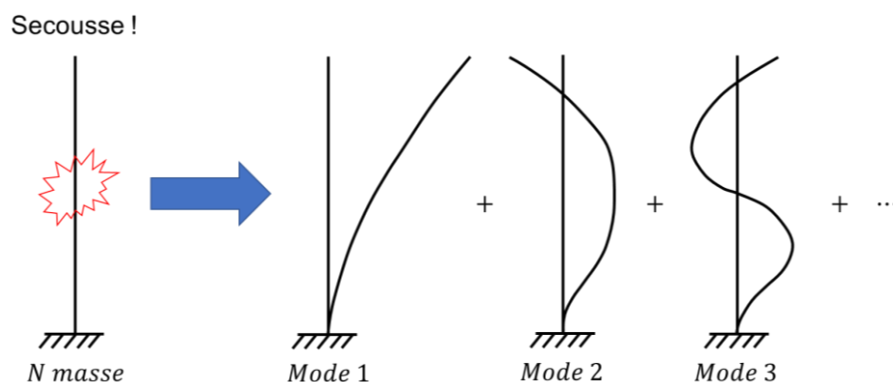


Figure VI-1. Mode de vibration.

VI.4 Modélisation

La modélisation des structures varie selon leur régularité et la nature des planchers :

1. Pour les **structures régulières en plan** avec des **planchers rigides**, l'analyse est réalisée séparément dans les deux directions principales du bâtiment. Ce dernier est représenté par un **modèle plan**, encastré à la base et où les masses sont concentrées au niveau des centres de gravité des planchers, avec un **seul degré de liberté (DDL) en translation horizontale**.
2. Pour les **structures irrégulières en plan**, soumises à la **torsion** et comportant des **planchers rigides**, un **modèle tridimensionnel** est utilisé. Ce modèle est encastré à la base, avec les masses concentrées aux centres de gravité des planchers et **trois DDL (deux translations horizontales et une rotation d'axe vertical)**.
3. Pour les **structures** (régulières ou irrégulières) avec des **planchers flexibles**, elles sont représentées par des **modèles tridimensionnels** encastrés à la base, avec **plusieurs DDL par plancher**.
4. La **déformabilité du sol et des fondations** doit être **prise en compte** dans le modèle chaque fois que la réponse de la structure en dépend de manière significative.
5. Le **modèle de bâtiment** doit **refléter correctement la distribution des rigidités et des masses** pour **prendre en compte tous les modes de déformation** pertinents dans le calcul des forces d'inertie sismiques (par exemple, la contribution des zones nodales et des éléments non structuraux à la rigidité du bâtiment).
6. Pour les **bâtiments en béton armé ou en maçonnerie**, la **rigidité des éléments porteurs** doit être calculée en tenant compte des **sections non fissurées**. Toutefois, si les déplacements sont critiques, notamment dans le cas de structures avec un **coefficient de comportement élevé (R)**, une estimation plus précise de la rigidité doit être faite en prenant en compte les sections fissurées.

VI.5 Spectre de réponse de calcul

Le **mouvement sismique** au niveau d'un point donné de la surface du sol est **représenté par** un spectre de réponse, dénommé, **spectre de réponse élastique**. Le **comportement ductile ou non linéaire** de la structure est **pris en compte** en réalisant une analyse élastique, basée sur un spectre de réponse réduit par rapport au spectre de réponse élastique par l'introduction d'un **coefficient de comportement R** . Le spectre utilisé dans ce cas est dénommé **spectre de calcul ou de dimensionnement**.

Le spectre de réponse de calcul est défini comme l'enveloppe positif d'un enregistrement du mouvement sismique.

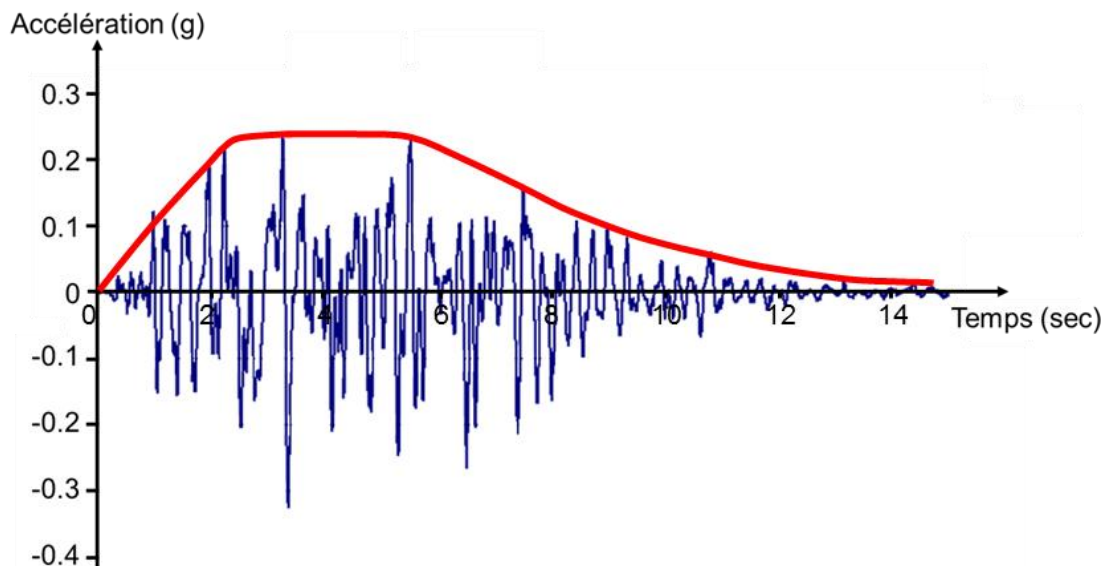


Figure VI-2. Spectre de réponse de calcul à partir d'un enregistrement du mouvement sismique.

Selon le RPA99 version 2003, l'action sismique est définie par le spectre de réponse de calcul suivant :

$$\frac{s_A}{g} = \begin{cases} 1.25A \left(1 + \frac{T}{T_1} \left(2.5\eta \frac{Q}{R} - 1 \right) \right) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R} \right) & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R} \right) \left(\frac{T_2}{T} \right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3.0s \\ 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3} \right)^{2/3} \left(\frac{3}{T} \right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R} \right) & T > 3.0s \end{cases} \quad (\text{VI. 1})$$

Où :

- A : Coefficient d'accélération de zone (cf. Tableau IV-2),
- η : Facteur de correction d'amortissement (cf. § V.3.5.1),
- R : Coefficient de comportement de la structure (cf. §IV.6.2),
- T_1 et T_2 : Périodes caractéristiques associées à la catégorie de site (cf. Tableau IV-3),
- Q : Facteur de qualité (cf. Tableau V-4).

VI.6 Nombre de modes à considérer

a) Pour les structures représentées par des modèles plans dans deux directions orthogonales, le **nombre de modes de vibration à retenir** dans chaque direction d'excitation doit être tel que:

- La **somme des masses modales effectives** (Énergie de déformation dissipé) **pour les modes retenus soit égale au moins 90 %** de la **masse totale** de la structure.
- Alternativement, **tous les modes** ayant une **masse modale effective supérieure à 5% de la masse totale** doivent être retenus pour la détermination de la réponse totale.

- Le nombre **minimal** de modes à prendre en compte est **de trois (03) dans chaque direction considérée**.

b) Dans le cas où **les conditions décrites ci-dessus ne peuvent pas être satisfaites** en raison de l'influence significative des **modes de torsion**, le **nombre minimal de modes (K) à retenir doit être tel que :**

$$K \geq 3\sqrt{N} \text{ et } T_K \leq 0.20 \text{ sec} \quad (\text{VI. 2})$$

Où :

- N : Nombre de niveaux au-dessus du sol,
- T_K : Période du mode K .

Exemple :

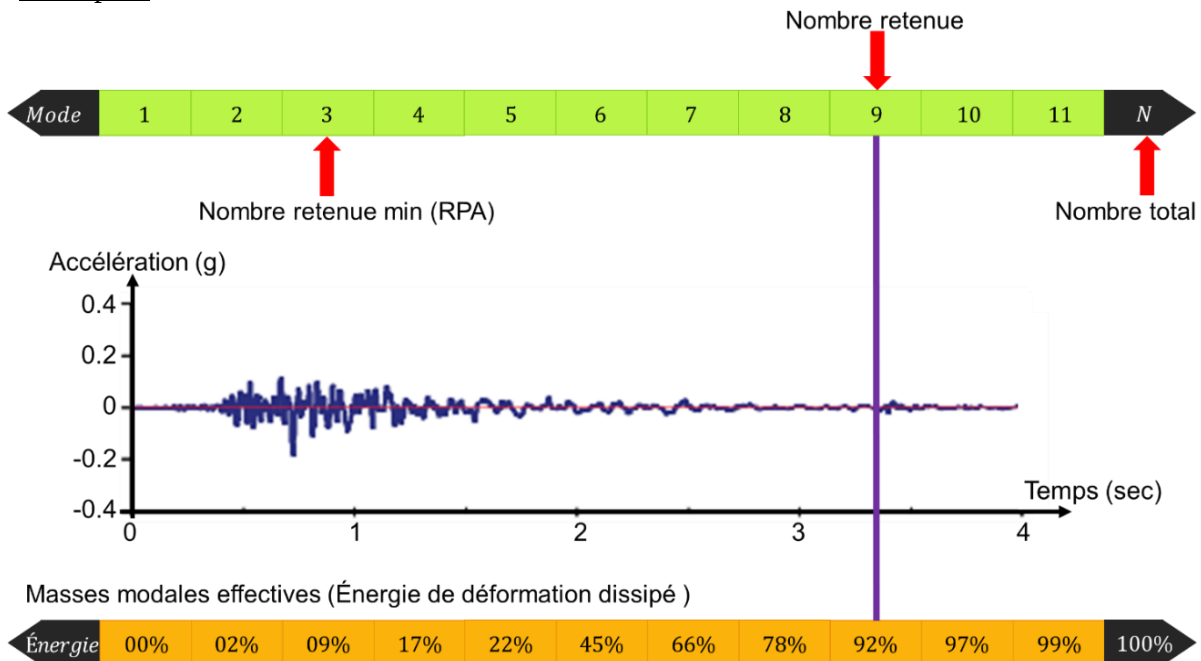


Figure VI-3. Nombre de modes de vibration à retenir d'une structure (Exemple).

VI.7 Indépendance des modes

- a) Les **réponses de deux modes de vibration** i et j de périodes T_i , T_j et d'amortissement ξ_i , ξ_j , sont considérées comme **indépendantes** si le rapport $r = T_i / T_j$ ($T_i \leq T_j$) respecte la condition suivante :

$$r \leq \frac{10}{10 + \sqrt{\xi_i \xi_j}} \quad (\text{VI. 3})$$

Dans ce cas, la réponse totale de la structure est donnée par :

$$E = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^k E_i^2} \quad (\text{VI. 4})$$

Où E_i est la valeur modale de E selon le mode " i ".

- b) Si **deux réponses modales ne sont pas indépendantes**, par exemple E_1 et E_2 , la réponse totale est donnée par :

$$E = \pm \sqrt{(|E_1| + |E_2|) + \sum_{i=3}^k E_i^2} \quad (\text{VI. 5})$$

VI.8 Résultante des forces sismiques de calcul

La résultante des **forces sismiques à la base V_t** , obtenue par **combinaison des valeurs modales**, **ne doit pas être inférieure à 80 % de la résultante des forces sismiques** déterminée par la méthode **statique équivalente V** pour une valeur de la période fondamentale donnée par la formule empirique appropriée.

Si $V_t < 0.80 V$, il est nécessaire d'**augmenter tous les paramètres de la réponse** (forces, déplacements, moments, etc.) dans le rapport **$0.80 V/V_t$** .

VI.9 Effets de la torsion accidentelle

Lors d'une analyse par modèles plans dans les deux directions orthogonales, les effets de la torsion accidentelle d'axe vertical sont pris en compte comme décrit au paragraphe V.5.

Dans une **analyse tridimensionnelle**, en plus de l'**excentricité théorique** calculée, une **excentricité accidentelle (additionnelle)** égale à **$\pm 0.05 L$** , où L étant la dimension du plancher perpendiculaire à la direction de l'action sismique, doit être appliquée au niveau du plancher considéré et dans chaque direction.

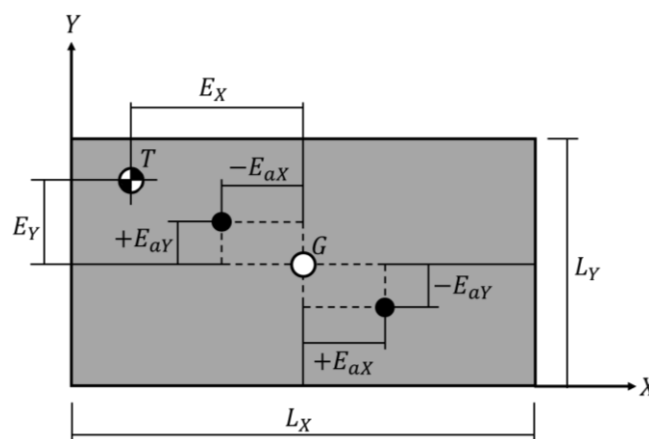


Figure VI-4. Excentricité théorique et excentricité accidentelle.

VI.10 Prescriptions communes aux méthodes « statique » et « dynamique »

VI.10.1 Stabilité au renversement

Le moment de renversement causé par l'action sismique doit être calculé par rapport au niveau de contact sol-fondation.

Le moment stabilisant est calculé en tenant compte du poids total de la structure, des fondations et, le cas échéant, du remblai.

VI.10.2 Composante verticale de l'action sismique

Les effets de la composante verticale de l'action sismique doivent être pris en compte dans le calcul des porte-à-faux de plus de 1,50 m de long, en zone sismique IIb et III. À cet effet, en plus la force descendante adéquate, une force sismique minimum ascendante nette doit être prise en considération :

$$F_V = 0.5AW_p \quad (\text{VI. 6})$$

Où :

- A : Coefficient d'accélération de zone (cf. Tableau IV-2),
- W_p : Poids propre de l'élément en porte-à-faux.

VI.10.3 Calcul des déplacements

Le déplacement horizontal à chaque niveau " k " de la structure est calculé par :

$$\delta_k = R\delta_{ek} \quad (\text{VI. 7})$$

Où :

- δ_{ek} : Déplacement dû aux forces sismiques F_i (y compris l'effet de torsion),
- R : Coefficient de comportement de la structure (cf. §IV.6.2).

Le déplacement relatif au niveau " k " par rapport au niveau " $k - 1$ " est donné par :

$$\Delta_k = \delta_k - \delta_{k-1} \quad (\text{VI. 8})$$

VI.11 Conclusion

La méthode dynamique modale spectrale représente une avancée significative dans l'analyse sismique des structures, offrant un cadre détaillé et précis pour évaluer la réponse dynamique face aux tremblements de terre. En permettant de prendre en compte l'ensemble des modes de vibration, cette approche assure une modélisation réaliste des effets sismiques, en particulier pour les structures irrégulières ou complexes. Cependant, sa mise en œuvre exige une modélisation soignée et une attention particulière aux paramètres tels que la torsion accidentelle et les interactions avec le sol. Lorsqu'elle est appliquée correctement, cette méthode permet d'obtenir des résultats fiables et de dimensionner des structures capables de résister efficacement aux forces sismiques, ce qui en fait un outil essentiel dans la conception de bâtiments résilients face aux séismes.

VII. Concept de ductilité et dispositions constructives

VII.1 Introduction

La ductilité est un concept fondamental en génie parasismique, permettant aux structures de dissiper l'énergie sismique et d'éviter des ruptures fragiles sous l'effet des sollicitations dynamiques. Contrairement aux matériaux rigides qui peuvent se fissurer brutalement, une structure ductile subit des déformations plastiques contrôlées, retardant ainsi l'effondrement et améliorant la sécurité des occupants. Ce chapitre explore le rôle essentiel de la ductilité dans la conception parasismique, en mettant en évidence les principes de dimensionnement qui favorisent un comportement ductile des structures. Il aborde également les dispositions constructives nécessaires, notamment le confinement du béton, le renforcement des connexions et l'application de la hiérarchie des résistances, afin d'assurer une meilleure performance des bâtiments face aux séismes.

VII.2 Concept de ductilité et introduction au dimensionnement par la capacité

VII.2.1 Définition et importance de la ductilité

La ductilité est une propriété mécanique fondamentale en génie parasismique. Elle désigne la capacité d'un matériau ou d'une structure à subir des déformations plastiques importantes avant de se rompre. Contrairement aux matériaux fragiles qui se cassent brutalement (comme le béton non armé), les matériaux ductiles (comme l'acier ou le béton armé) permettent une dissipation efficace de l'énergie, essentielle pour résister aux charges dynamiques imposées par un séisme.

VII.2.2 Rôles clés de la ductilité en génie parasismique

La ductilité joue un rôle fondamental dans la performance des structures soumises aux séismes, en leur permettant de dissiper efficacement l'énergie et d'éviter des ruptures brutales. Ses principaux avantages peuvent être résumés comme suit:

- **Absorption d'énergie :** Les structures ductiles absorbent et dissipent l'énergie sismique à travers des déformations plastiques contrôlées.
- **Redistribution des efforts :** Lorsque certains éléments atteignent leurs limites de résistance, les efforts peuvent être redirigés vers d'autres éléments.
- **Prévention des effondrements soudains :** La ductilité assure un comportement graduel, permettant d'éviter des défaillances catastrophiques.

VII.2.3 Introduction au dimensionnement par la capacité

Le dimensionnement par la capacité est une approche de conception visant à hiérarchiser les résistances des éléments structurels pour garantir un comportement contrôlé et ductile en cas de séisme.

VII.2.3.1 Principes fondamentaux

Le dimensionnement par la capacité repose sur des principes essentiels visant à garantir que la structure se déforme de manière contrôlée sous l'effet des forces sismiques. Ces principes assurent une hiérarchisation des résistances pour éviter des défaillances imprévues et maximiser la sécurité des occupants.

1. Concentration des déformations dans des zones ductiles :

Afin d'optimiser la dissipation de l'énergie sismique, les **déformations** doivent être **concentrées** dans des zones spécifiquement conçues pour supporter ces sollicitations sans compromettre la stabilité de l'ensemble de la structure. Ces zones, appelées "**rotules plastiques**", se forment généralement **aux extrémités des poutres ou dans certains murs porteurs renforcés**.

2. Protection des éléments critiques :

Pour garantir un comportement sismique sûr, il est essentiel de préserver l'intégrité des éléments structurels dont la défaillance pourrait entraîner l'effondrement total de la structure. Cette approche repose sur deux principes fondamentaux :

- **Maintien des éléments non ductiles dans leur domaine élastique** : Les colonnes et les fondations, qui jouent un rôle fondamental dans la stabilité de la structure, doivent être dimensionnées de manière à ne pas atteindre leur limite plastique (doivent rester dans leur domaine élastique).
- **Prévention des défaillances globales** : Une rupture prématurée de ces éléments pourrait compromettre l'ensemble de la construction (entraîner l'effondrement total de la structure), d'où la nécessité de leur assurer une résistance suffisante.

3. Hiérarchie des résistances :

Le **dimensionnement par la capacité** repose sur une organisation rigoureuse des résistances des différents éléments structurels afin de **garantir un mécanisme de rupture contrôlé et progressif**. Cette approche vise à prévenir les effondrements soudains en s'assurant que **les déformations se produisent d'abord dans les éléments les moins critiques**. Les principes fondamentaux de cette hiérarchisation sont les suivants :

Le dimensionnement par la capacité suit une logique hiérarchique pour garantir un comportement favorable :

- **Poutres avant colonnes** : Les poutres doivent atteindre leur limite plastique avant les colonnes.
- **Colonnes avant fondations** : Les colonnes doivent céder avant que les fondations ne subissent des déformations permanentes. Elles doivent être plus résistantes que les fondations.

VII.2.4 Application pratique du dimensionnement par la capacité

La mise en œuvre du dimensionnement par la capacité repose sur une conception minutieuse visant à assurer un comportement contrôlé et ductile des structures sous sollicitations sismiques. Cette approche implique l'identification des zones où les déformations plastiques doivent se concentrer et la protection des éléments critiques pour éviter toute rupture fragile. Pour atteindre ces objectifs, plusieurs mesures doivent être adoptées :

- **Identifient les zones plastiques potentielles** : Le dimensionnement par la capacité vise à **concentrer les déformations plastiques** dans des zones spécifiques, appelées "rotules plastiques", généralement **aux extrémités des poutres ou des murs**. Cela permet d'absorber l'énergie sismique de manière contrôlée tout en préservant la stabilité de la structure.
- **Surdimensionnement des éléments critiques** : **Les colonnes et les fondations** doivent être dimensionnées de manière à **rester dans leur domaine élastique** sous l'effet des charges sismiques. Pour cela, des **facteurs de sécurité plus élevés sont appliqués** afin de garantir leur intégrité structurelle et leur capacité à supporter les charges transmises par les autres éléments.
- **Renforcement des connexions** : **Les connexions entre les éléments structuraux doivent être conçues pour assurer un transfert efficace des efforts tout en évitant les défaillances prématurées**. Cela passe par une **continuité adéquate des armatures** et une **disposition soignée des ancrages**. Le **renforcement des zones de liaison** permet de garantir une bonne transmission des efforts et une meilleure robustesse de l'ensemble de la structure.

Exemples de dispositions constructives :

- Ajout d'armatures supplémentaires dans les zones où des déformations plastiques sont attendues (poutres).
- Utilisation de cadres rigides pour contrôler les déplacements latéraux.

- Intégration de systèmes dissipateurs d'énergie (amortisseurs ou isolateurs sismiques).

VII.3 Dispositions constructives

Pour garantir une bonne résistance sismique et un comportement optimal des structures, il est essentiel d'intégrer des dispositions constructives adaptées. Les **dispositions constructives** sont des prescriptions spécifiques visant à **garantir** la **sécurité**, la **stabilité** et la **ductilité des structures**. Ces dispositions concernent non seulement les éléments structuraux (poutres, colonnes, murs), mais également les éléments non structuraux (cloisons, équipements techniques, revêtements), souvent négligés, mais tout aussi cruciaux pour limiter les dommages et assurer la sécurité des occupants.

VII.3.1 Spécifications particulières aux éléments structuraux

Les éléments structuraux d'un bâtiment (poutres, colonnes, murs porteurs, dalles, etc.) jouent un rôle primordial dans la résistance sismique. Ces éléments doivent être conçus de manière à répondre aux exigences de sécurité sismique, notamment en termes de ductilité, de résistance et de stabilité globale. Les spécifications de conception pour chaque type d'élément sont détaillées ci-dessous.

a) Poutres :

Les poutres sont des éléments horizontaux essentiels pour la transmission des charges verticales et latérales. Elles doivent être conçues pour être ductiles et absorber les déformations induites par un séisme tout en préservant la stabilité de la structure.

- **Armatures longitudinales** : Les armatures doivent être **continues sur toute la longueur de la poutre** pour **éviter des ruptures fragiles**. Une **armature suffisante** doit être **placée en haut et en bas des sections** pour résister aux moments de flexion alternés.
- **Étriers** : Les étriers doivent être rapprochés dans les zones critiques (extrémités) pour éviter le flambement des armatures longitudinales et pour améliorer la résistance au cisaillement.

b) Colonnes :

Les colonnes sont des éléments verticaux soumis à des efforts de compression. Leur rôle est crucial dans la stabilité globale de la structure, et elles doivent être dimensionnées pour éviter toute défaillance catastrophique lors d'un séisme.

- **Hiérarchie de résistance** : Les colonnes doivent être dimensionnées pour être plus résistantes que les poutres, afin d'éviter l'effondrement en "mécanisme de plancher mou".

- **Confinement :**

- **L'ajout d'armatures transversales rapprochées (étriers)** dans les zones critiques des colonnes, notamment à proximité des joints, **augmente la ductilité et la capacité d'absorption d'énergie**, tout en **prévenant l'éclatement du béton**.
- **Les armatures transversales** doivent être **suffisamment rigides** pour éviter la dégradation prématurée du béton.

c) Murs porteurs :

Les murs porteurs jouent un rôle essentiel dans la résistance aux forces latérales et doivent être conçus pour éviter les défaillances dues aux mouvements horizontaux générés par un séisme.

- **Zones critiques :** **Les murs porteurs** doivent être **renforcés par des armatures verticales et horizontales**, particulièrement **autour des ouvertures** (portes, fenêtres), pour **éviter les concentrations de contraintes**.
- **Hauteur/longueur :** Les murs doivent avoir un rapport hauteur/longueur approprié pour éviter les défaillances dues au flambement.

d) Fondations :

Les fondations assurent la transmission des charges de la structure au sol et doivent être conçues pour supporter les forces sismiques sans entraîner des déplacements excessifs.

- **Ancrage :** Les colonnes et les **murs doivent être fermement ancrés dans les fondations** pour assurer une connexion solide et **éviter tout mouvement excessif**.
- **Uniformité :** Des fondations continues et uniformes sont préférables pour **éviter les déplacements différentiels** et **garantir une répartition homogène des charges**.

VII.3.2 Prescriptions complémentaires aux éléments non structuraux

Les éléments non structuraux (cloisons, faux plafonds, équipements techniques, revêtements, etc.) sont souvent responsables d'une grande partie des dégâts et des blessures lors d'un séisme. Bien qu'ils ne participent pas directement à la stabilité de la structure, leur bonne conception est cruciale pour réduire les risques.

a) Cloisons et murs non porteurs :

Les cloisons et murs non porteurs, bien qu'ils n'assurent pas la stabilité globale de la structure, peuvent constituer un danger en cas de mouvement sismique. Il est donc essentiel de les concevoir de manière à minimiser les risques d'effondrement ou de dommage.

- **Connexion à la structure** : Les cloisons doivent être fixées de manière flexible pour permettre des déplacements relatifs entre les étages sans provoquer de fissures ou d'effondrement.
- **Matériaux** : Utilisation de matériaux légers pour minimiser le risque de chute en cas de défaillance.

b) Faux plafonds et systèmes de suspension :

Les faux plafonds et les systèmes de suspension, bien qu'ils ne fassent pas partie de la structure principale, peuvent présenter des risques en cas de séisme, notamment des chutes susceptibles de provoquer des blessures ou des dommages supplémentaires. Il est donc essentiel de **concevoir** ces éléments en tenant compte des mouvements sismiques **afin de garantir leur stabilité et la sécurité des occupants**.

- **Fixation et robustesse** : Les faux plafonds doivent être solidement fixés à la structure porteuse à l'aide de systèmes de suspension renforcés. Cela garantit qu'ils résistent aux déplacements horizontaux et verticaux sans se détacher de la structure en cas de forte secousse.
- **Flexibilité** : Bien que la fixation doive être robuste, une certaine souplesse est nécessaire pour permettre un mouvement relatif entre le plafond et la structure, afin d'éviter des ruptures ou des fissures dues aux déformations sismiques.
- **Sécurisation des éléments suspendus** : Tous les éléments suspendus, tels que les luminaires et les équipements techniques, doivent être dotés de systèmes de sécurité (par exemple, câbles de sécurité) pour éviter leur chute en cas de défaillance du système principal de suspension.

VII.4 Conclusion

Le concept de ductilité et le dimensionnement par la capacité sont au cœur de la conception parasismique moderne. En hiérarchisant la résistance des différents éléments structurels, on garantit que les déformations sont contrôlées et concentrées dans des zones prévues à cet effet, minimisant ainsi les risques d'effondrement global. Ce type de conception non seulement protège les vies humaines, mais réduit également les coûts liés aux réparations post-séisme.

Conclusion générale

La conception parasismique est un domaine fondamental du génie civil, visant à assurer la sécurité des structures et de leurs occupants face aux séismes. Dans ce cours, les concepts essentiels ont été abordés, depuis les principes de la sismologie jusqu'aux techniques avancées de conception et de dimensionnement des bâtiments soumis aux actions sismiques. L'étude des différentes méthodes de calcul, qu'il s'agisse de la méthode statique équivalente ou de l'analyse modale spectrale, a permis de comprendre comment les forces sismiques sont prises en compte dans le dimensionnement des structures. De plus, l'importance de la ductilité et des dispositions constructives a été mise en évidence afin d'améliorer la capacité d'absorption d'énergie et de dissipation des contraintes dans les bâtiments.

L'approche adoptée dans ce cours ne se limite pas à l'application de règles empiriques, mais insiste sur une compréhension approfondie des phénomènes dynamiques affectant les structures. L'accent a été mis sur la classification des bâtiments, le comportement des matériaux sous sollicitations sismiques et l'importance d'un dimensionnement hiérarchisé. En outre, la prise en compte des éléments non structuraux et des effets de site a permis d'élargir la réflexion au-delà du cadre strict des structures porteuses, en soulignant les enjeux globaux de la sécurité parasismique dans l'environnement bâti.

Dans un contexte où les risques sismiques sont une préoccupation majeure pour de nombreux pays, il est impératif que les futurs ingénieurs civils maîtrisent les outils et les normes nécessaires pour concevoir des infrastructures adaptées. La réglementation parasismique évolue constamment pour intégrer de nouvelles connaissances scientifiques et des avancées technologiques. Ainsi, ce cours constitue une base solide, mais il est essentiel de poursuivre l'apprentissage à travers la veille technologique, l'analyse de cas réels et l'application des logiciels de simulation sismique. La formation continue et l'adaptation aux innovations structurelles sont des éléments clés pour garantir une ingénierie résiliente face aux défis posés par les séismes.

En définitive, la compréhension des principes du génie parasismique et leur mise en pratique sont essentielles pour réduire les pertes humaines et matérielles lors d'événements sismiques. Ce cours a permis d'acquérir des connaissances fondamentales, mais la conception parasismique exige une approche pluridisciplinaire et une intégration des nouvelles tendances en ingénierie des structures. La mission des ingénieurs est d'anticiper les risques et d'innover en matière de conception pour bâtir des infrastructures plus sûres et plus durables. En combinant théorie, calculs avancés et application des normes, les futurs professionnels du génie civil seront en mesure de relever les défis liés aux séismes et de contribuer efficacement à la protection des populations et des biens.

Bibliographie

1. RPA-99, 2003. Règles parasismiques Algériennes 1999. Document technique réglementaire.
2. NF EN1998-1. Eurocode 8: Calcul des structures pour leur résistance aux séismes-Partie 1 : règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments, 2005.
3. DTR-BC 248 - Centre National de Recherche Appliquée en Génie sismique (CGS), Alger, 90p.
4. Davidovici, V. (1999). La construction en zone sismique : approche réglementaire, modèles d'analyse des structures, diagnostic des bâtiments existants, exemple de calculs. Le moniteur.
5. Chopra, A. K. (2017). Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering. Pearson.
6. Clough, R. W., & Penzien, J. (2003). Dynamics of Structures. McGraw-Hill.
7. Bachmann, Hugo, Suisse. Office fédéral des eaux et de la géologie, and Christian Marro. Conception parasismique des bâtiments: principes de base à l'attention des ingénieurs, architectes, maîtres d'ouvrages et autorités. office fédéral des eaux et de la géologie, 2002.
8. Paulay, T., & Priestley, M. J. N. (1992). Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings. Wiley.
9. Bozorgnia, Y., & Bertero, V. V. (2004). Earthquake Engineering: From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering. CRC Press.
10. Philippe BISCH, Constructions parasismiques, Eurocode 8, Techniques de l'Ingénieur, traité Construction (C 3 292).
11. Union des Industries Chimiques (UIC), Association Française de Génie Parasismique (AFPS), Mise en application de la section II [Dispositions relatives aux règles parasismiques applicables à certaines installations] de l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié, Guide Structures-Support, DT 111, 2014.
12. Dazio, A. (2013). Fundamentals of Structural Dynamics. An-Najah National University.
13. Pecker, A. (2011). Dynamique des structures et des ouvrages. Ecole des Ponts-ParisTech.
14. Naeim, F. (2001). The Seismic Design Handbook. Springer.
15. Priestley, M. J. N., Calvi, G. M., & Kowalsky, M. J. (2007). Displacement-Based Seismic Design of Structures. IUSS Press.