

MILAN ZACEK

**TRAITÉ DE
CONSTRUCTION
PARASISMIQUE**

**RÉGLEMENTATION,
AVANT-PROJET,
PROJET D'EXÉCUTION,
MÉTHODES DE CALCUL**

PARENTHÈSES

AVANT-PROPOS

Les tremblements de terre ont souvent été meurtriers. Les sources historiques et l'actualité en témoignent. Le nombre de victimes, quelquefois difficile à évaluer, se chiffre souvent par milliers.

Le préjudice inestimable de souffrances physiques et psychiques s'ajoute aux dommages matériels considérables subis par les particuliers, la société et la collectivité.

Les tremblements de terre ne sont pas un phénomène rare. Tous les ans, il se produit sur notre globe en moyenne vingt séismes violents. Heureusement, ils ne touchent pas tous des zones peuplées.

En France métropolitaine, le dernier séisme meurtrier, pratiquement effacé des mémoires, est survenu en 1909 à Lambesc, à 20 km d'Aix-en-Provence. Il a entraîné la mort de 46 personnes et d'importants dégâts matériels. La simulation des effets d'un séisme de même violence (magnitude 6,2), réalisée sur le même site en 1982, a montré qu'aujourd'hui les pertes seraient beaucoup plus importantes : un millier de morts, 1 850 à 5 650 blessés, 450 bâtiments entièrement détruits et 21 850 bâtiments endommagés. Selon une simulation plus récente réalisée par le BRGM en 2007, lors d'un séisme de magnitude 5,5 (donc approximativement 6 fois moins puissant que celui de 1909) environ 300 bâtiments d'habitation et une dizaine d'établissements scolaires subiraient un effondrement partiel ou total. Par ailleurs, la simulation réalisée dans le cadre du programme européen RISK-EU à Nice, une autre ville fortement exposée au risque sismique, précise qu'un séisme de magnitude 6,3 survenant la nuit en hiver pourrait causer plus de 500 morts et coûter 7 milliards d'euros (rapport final de septembre 2004).

Deux pays voisins ont récemment connu des séismes meurtriers de force comparable : l'Espagne avec le séisme de Lorca survenu le 11 mai 2011, magnitude 5,1 (9 morts) et l'Italie avec le séisme d'Amatrice, le 24 août 2016, magnitude 6,2 (298 morts). Nous ne sommes pas à l'abri de tremblements de terre de telles magnitudes en France métropolitaine. Dans les Antilles françaises, les séismes sont plus fréquents et en moyenne plus forts. En Guadeloupe : 8 février 1843 (magnitude 7,5, 3 000 morts), 21 novembre 2004 (magnitude 6,3), 14 février 2004 (magnitude 5,7), 19 décembre 2014 (magnitude 5,7), 19 mars 2016 (magnitude 6). En Martinique : 29 novembre 2007 (magnitude 7,4), 18 février 2014 (magnitude 6,5), 3 février 2017 (magnitude 5,8), 28 septembre 2019 (magnitude 6). Ces listes sont non exhaustives.

La sismicité du territoire français justifie une protection parasismique. La prédiction sûre et précise des tremblements de terre, si elle était possible, pourrait éviter les pertes de vies humaines, mais ne saurait sauvegarder le patrimoine bâti et les diverses activités. La seule protection efficace est la construction parasismique des bâtiments neufs et le renforcement préventif des constructions existantes. Techniquement, nous disposons des moyens de réaliser des constructions capables de résister à tous les tremblements de terre historiquement plausibles, pour peu qu'elles ne soient pas implantées sur une faille, sur un terrain instable ou menacées par un éboulement.

Lorsqu'elle est prévue dès les premières esquisses du projet, la protection parasismique réglementaire des bâtiments contre les effets des séismes n'entraîne pas de surcoûts importants. Selon le type et la complexité du bâtiment, le surcoût peut être compris entre 3 % et 6 % du montant des travaux tous corps d'état confondus. Appliquée a posteriori, elle peut représenter 20 % de ce montant et parfois plus.

Le présent ouvrage offre une vue d'ensemble des problèmes de la protection parasismique des bâtiments. Son objectif principal est d'apporter les éléments nécessaires à l'élaboration et à la réalisation des projets de bâtiments dont la conception favorise la résistance aux tremblements de terre. Les études de bâtiments partiellement ou totalement détruits par des séismes montrent que les dommages occasionnés sont en général imputables à

des erreurs, négligences ou choix inadéquats effectués au moment du projet, ainsi qu'au non-respect des dispositions constructives parasismiques.

Lorsque la conception d'ensemble est pénalisante, elle peut conduire à une amplification inutile des oscillations de la construction et à des concentrations d'efforts qui peuvent être à l'origine de sa destruction. Il faut être conscient du fait qu'aucun calcul ne peut rendre satisfaisant le comportement sous l'action sismique d'une construction dont la conception a pour conséquence d'amplifier excessivement les oscillations engendrées par les secousses du sol de fondation. Le concepteur doit être en mesure d'apprécier les conséquences des choix qu'il opère. Certes, dans cette démarche, il peut s'appuyer sur les règles parasismiques. Toutefois, quant à la conception d'ensemble, qui comprend le choix du parti architectural, ces règles se limitent à donner des indications sommaires et ne passent pas en revue les différentes situations que l'on peut rencontrer lors de l'élaboration d'un projet. Elles développent en détail le dimensionnement des constructions en situation sismique ainsi que la vérification de leur sécurité vis-à-vis de l'effondrement, et précisent les dispositions constructives à respecter. Étant donné l'étendue du sujet traité, ce livre est organisé de manière à permettre des « entrées multiples ». Tout chapitre peut être lu indépendamment des autres. La conception d'ensemble est abordée en fonction des partis architectural (configuration du bâtiment) et constructif (choix et organisation du système porteur), et non comme une suite de choix de projet à éviter. Ce sujet est précédé par un chapitre synthétique sur les structures qui présente qualitativement les notions essentielles à la compréhension des mesures parasismiques exposées dans les chapitres suivants. Les dispositions relatives au projet d'exécution sont traitées selon la technologie utilisée (maçonnerie, béton armé, bois, acier...) en ce qui concerne la structure et par type quant aux éléments non structuraux et aux équipements. La construction des maisons individuelles est concernée principalement par le **CHAPITRE VIII • 4** *Constructions en maçonnerie*. La réglementation parasismique est exposée et commentée en amont, au **CHAPITRE III**.

Une bibliographie renvoie à des ouvrages traitant d'une manière plus approfondie les différents chapitres.

Les sujets traités ont été abordés d'une manière volontairement simplifiée, accessible à tous les acteurs de la construction de bâtiments. Ce livre s'adresse par conséquent aux intervenants dans l'acte de bâtir de formations diverses (architectes, ingénieurs, artisans, constructeurs individuels, employés des services techniques des mairies, etc.), de même qu'aux personnes travaillant dans le domaine de la prévention du risque sismique.

INTRODUCTION

La construction parasismique requiert tout d'abord le respect des règles de conception, de calcul et d'exécution propres aux situations non sismiques. Les règles parasismiques (*Eurocode 8* et règles parasismiques simplifiées) ne remplacent pas les normes en vigueur en situation non sismique, mais contiennent des dispositions complémentaires, spécifiques au contexte sismique. À cet égard, elles s'ajoutent à celles des autres *Eurocodes*, qui doivent également être respectés.

Les critères parasismiques interviennent à tous les stades de la construction et même après son achèvement :

► **Choix du terrain d'implantation**

Sur un terrain instable, sur une faille ou sur un terrain pouvant être enseveli par un glissement de sol ou éboulement rocheux, même la meilleure construction parasismique ne survivra pas à un tremblement de terre de quelque importance.

► **Parti architectural**

L'importance ainsi que la nature des oscillations subies par les divers bâtiments situés à un même endroit sont en général très variables. Pour un séisme donné, ces différences dépendent entièrement de l'architecture de leur système porteur, qui découle du parti architectural. Une architecture judicieuse peut donc optimiser les oscillations d'une construction, de même qu'une architecture inadéquate peut les amplifier d'une manière significative et créer ainsi de mauvaises conditions de résistance.

► **Choix du système porteur (parti constructif)**

Vis-à-vis des tremblements de terre, l'efficacité des différents systèmes est inégale. Le choix d'une structure ayant une bonne capacité à dissiper l'énergie favorise la résistance à l'action sismique, car l'énergie des oscillations constitue le principal agent destructeur en cas de tremblement de terre.

► **Choix des matériaux**

Les propriétés des divers matériaux favorisent plus ou moins bien la résistance des structures aux séismes, ainsi que la dissipation de l'énergie cinétique qui leur est communiquée lors des mouvements sismiques.

► **Conception des assemblages**

Les assemblages entre divers éléments constructifs assurent l'intégrité de la construction. La dégradation progressive de leur résistance et de leur rigidité lors d'un séisme peut conduire rapidement à sa ruine. La conception des assemblages exige donc une attention particulière.

► **Dispositions constructives pour les éléments structuraux**

Pour prévenir l'effondrement d'une construction sur les usagers lors d'un séisme majeur, lorsque leur limite de résistance est atteinte, les éléments de la structure principale devraient pouvoir subir de grandes déformations plutôt que rompre. Ces déformations sont possibles en grande partie grâce à des dispositions constructives parasismiques.

► **Conception des éléments non structuraux**

Les éléments non structuraux devraient être conçus de manière à tolérer sans dommage les déformations de la structure à laquelle ils sont fixés. Leur destruction est une cause fréquente de blessures de personnes et entraîne en outre des frais de réparation ou de remplacement très importants.

► Protection contre le feu

Les incendies consécutifs aux tremblements de terre sont fréquents. Une construction qui a résisté aux secousses sismiques peut très bien périr par le feu. Lors du tremblement de terre du Kanto (Japon, 1923), 445 000 maisons sur les 565 000 détruites l'ont été par l'incendie qui a suivi le séisme.

► Calcul de structure

Le calcul constitue une autre phase cruciale de la conception parasismique des bâtiments. Une modélisation incorrecte de la structure peut conduire à une sous-estimation des charges sismiques et à leur distribution inexacte. Le choix de la méthode de calcul est également important. Dans certains cas, un calcul simplifié peut être utilisé. Dans d'autres, une analyse tridimensionnelle est nécessaire.

► Mise en œuvre

Les rapports de mission sur les sites affectés par un séisme indiquent qu'un nombre important d'effondrements de construction a été provoqué par une exécution médiocre, rendue possible par l'absence de contrôle sur le chantier. La qualité d'une construction conditionne sa résistance aux tremblements de terre.

► Entretien

L'inspection et l'entretien réguliers sont nécessaires pour conserver la résistance des bâtiments dans le temps. Une dégradation progressive de l'état du parc immobilier est également une cause fréquente d'effondrement des constructions exposées à des séismes.

► Modifications ultérieures

Des modifications de la structure, une transformation de cloisonnement ou une augmentation des charges d'exploitation consécutive à un changement de destination peuvent modifier défavorablement le comportement d'une construction sous l'action sismique. Par conséquent, celle-ci doit être prise en compte dans toute l'étude de modification.

Tous ces aspects montrent l'étendue des problèmes de la construction parasismique. Pour être menée à bien, celle-ci nécessite, de préférence dès les premières esquisses, une collaboration suivie entre les divers acteurs de l'acte de construire : l'architecte, l'ingénieur, le maître d'ouvrage et, dès qu'il est connu, l'entrepreneur.

CHAPITRE I

LES TREMBLEMENTS DE TERRE

1•1

La tectonique des plaques et la genèse des tremblements de terre

La terre est vivante. Les continents s'assemblent et se disloquent, les mers apparaissent et disparaissent, à l'échelle des temps géologiques bien sûr.

La Terre est née par accrétion de poussières interstellaires il y a 4,6 milliards d'années environ. Cinq cents millions d'années plus tard, sa croûte s'est solidifiée. Depuis, des remaniements de la croûte se poursuivent inlassablement, modifiant sans cesse la géographie du globe. Ces mouvements très lents sont révélés par des tremblements de terre et par des éruptions volcaniques.

Il y a quelque 200 à 250 millions d'années, l'océan Atlantique n'existait pas. La terre n'était qu'un continent unique, la Pangée, entouré d'un océan, appelé Panthalassa. Quelques dizaines de millions d'années plus tard, la Pangée s'est morcelée en plusieurs continents, qui ont dérivé lentement jusqu'à leur position actuelle [FIG. 1•1].

La dérive des continents est à l'origine de la théorie de la tectonique des plaques, qui permet d'expliquer la plupart des événements géologiques survenus sur notre planète, y compris la quasi-totalité des tremblements de terre. Selon cette théorie, la couche extérieure rigide du globe, appelée lithosphère, ne forme pas une coquille monolithique. Elle se

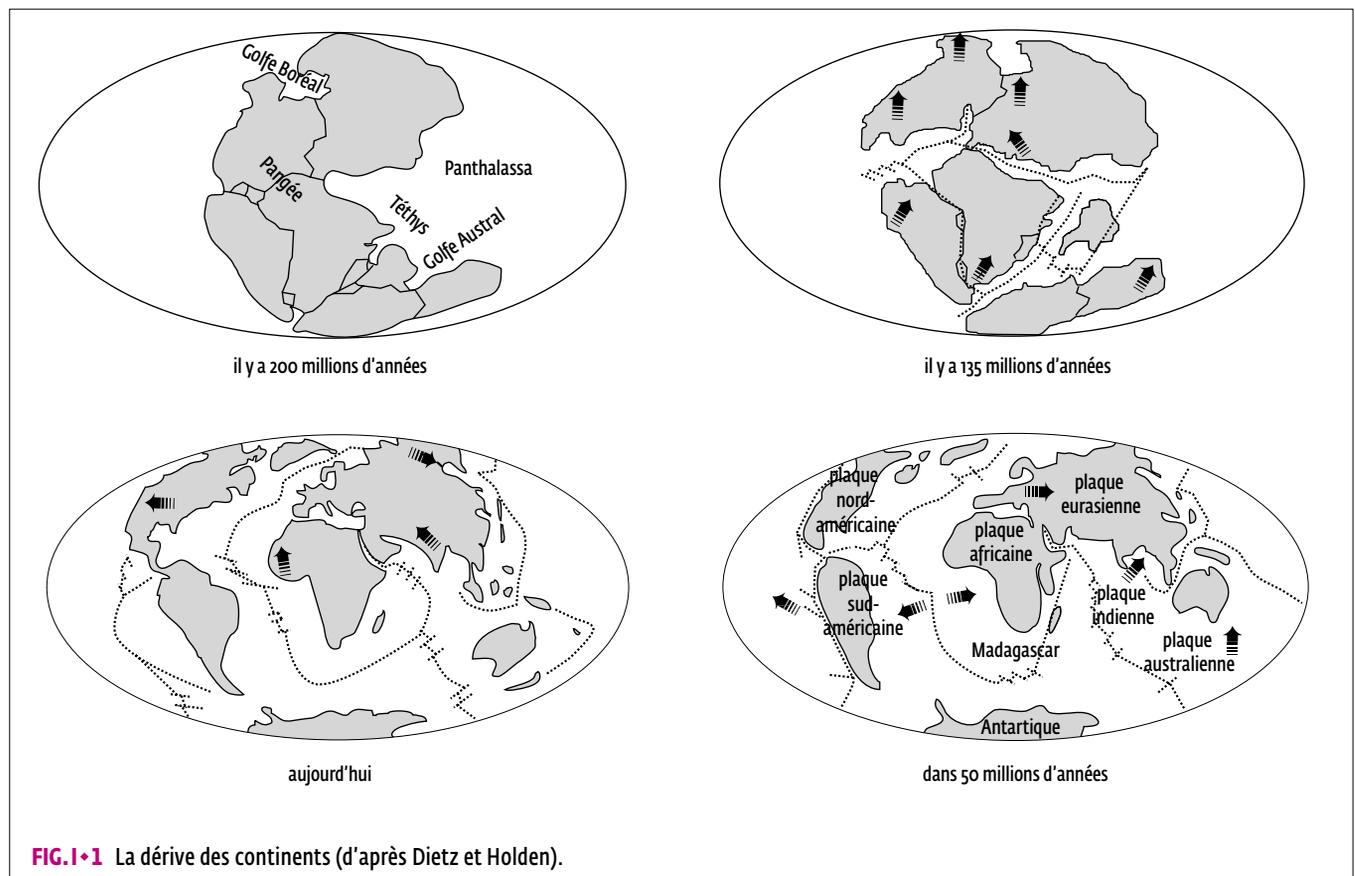


FIG. 1•1 La dérive des continents (d'après Dietz et Holden).

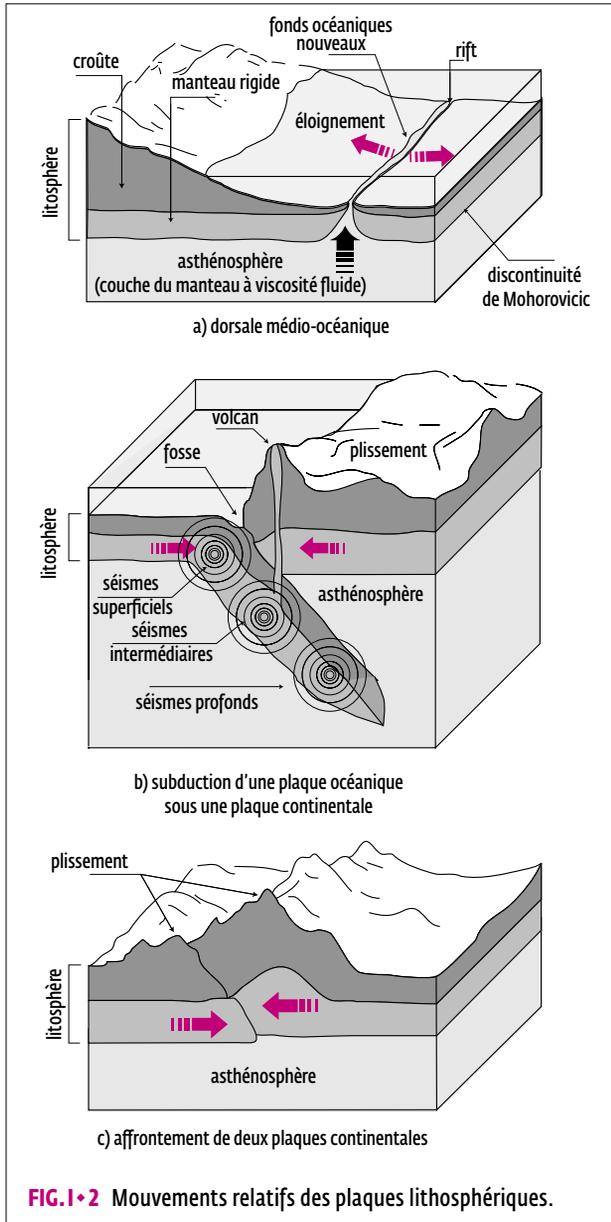


FIG. 1.2 Mouvements relatifs des plaques lithosphériques.

compose d'une mosaïque de plaques rigides, épaisses seulement de 70 à 150 km, donc très minces en comparaison avec le rayon de la Terre, qui est de 6 371 km en moyenne. Ces plaques rigides flottent sur un milieu magmatique appelé asthénosphère, qui fait partie du manteau terrestre [FIG. 1.2].

Le nombre de plaques varie en fonction du modèle proposé. On parle de six à quinze plaques principales et de plusieurs plaques secondaires. Les plaques sont animées de lents mouvements relatifs : elles s'écartent, s'affrontent ou couissent horizontalement l'une par rapport à l'autre. Ces mouvements, de 1 à 15 centimètres par an, sont dus à des courants de convection à l'intérieur du globe, qui résultent d'une répartition non uniforme de la chaleur interne, chaleur provenant de la désintégration d'éléments radioactifs.

L'écartement de deux plaques est accompagné de montées de magma qui, en refroidissant progressivement, forment des crêtes appelées dorsales, au sommet desquelles subsiste généralement un fossé central qui porte le nom de rift [FIG. 1.2a]. Les dorsales se trouvent au milieu des océans, à quelques exceptions près, où elles sont émergées et accessibles (Islande, Djibouti) ou au contraire enfouies sous un continent (Afrique de l'Est).

Les continents jadis situés de part et d'autre des rifts se sont donc éloignés (et s'éloignent toujours) l'un de l'autre, laissant la place à de nouveaux fonds marins, constitués de laves remontées de l'asthénosphère.

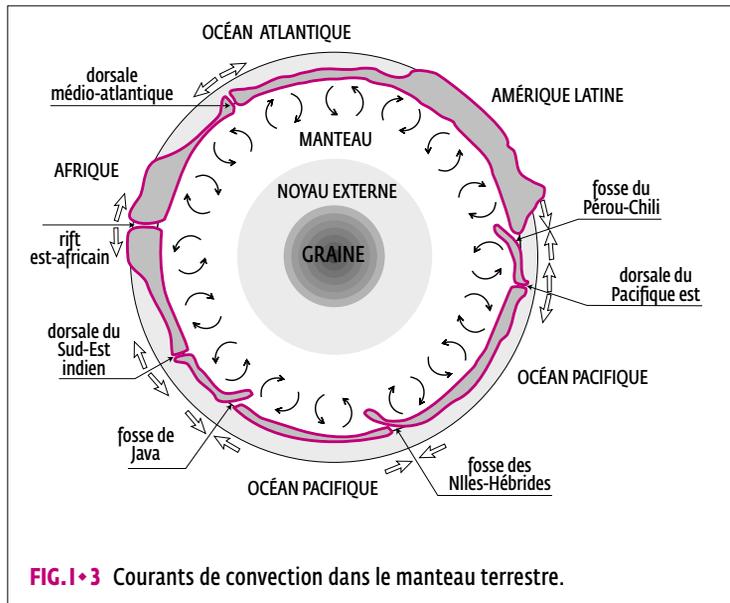
Les portions émergées des rifts forment un laboratoire naturel pour l'étude géologique du globe. L'une d'elles est située dans la dépression de l'Afar en Afrique orientale (République de Djibouti). La dorsale de la mer Rouge, qui est un futur océan, y rejoint celle de l'océan Indien. Le continent africain s'éloigne ici de la plaque d'Arabie à la vitesse d'une vingtaine de centimètres par siècle. Une autre portion accessible se trouve en Islande. Ce pays n'est en réalité qu'une partie émergée de la dorsale médio-atlantique [FIG. 1.4].

Il est intéressant de noter que les dorsales, qui constituent des chaînes de montagnes sous-marines atteignant une hauteur de 3 000 m au-dessus de larges plaines immergées, ne forment pas de lignes continues. Elles sont décalées à certains endroits. Les segments ainsi créés sont reliés par des failles perpendiculaires, appelées *failles transformantes*, qui doivent leur existence à la différence de vitesse d'éloignement des diverses parties des plaques ainsi qu'aux changements progressifs d'orientation [FIG. 1.4].

Lorsqu'une plaque océanique affronte une plaque continentale, elle s'enfonce lentement sous cette dernière, sous un angle variable, selon le cas, de 20° à 80° [FIG. 1.2b]. La croûte océanique, faite de basaltes, est en effet plus lourde que la croûte continentale, constituée de roches granitiques, plus légères. La superficie de la Terre étant à peu près constante, cette disparition d'une partie de la surface terrestre par subduction compense l'extension des fonds océaniques, qui se produit le long des dorsales. Le plancher océanique constitue donc une sorte de tapis roulant qui émerge des rifts et se déplace vers les fosses de subduction où il s'engloutit pour être recyclé dans l'asthénosphère [FIG. 1.3]. Son âge s'accroît ainsi avec son éloignement des dorsales. Les portions les plus anciennes, situées au droit des fosses de subduction, ont 200 millions d'années, alors que près des dorsales, le fond océanique est récent. L'âge des roches continentales qui, elles, ne se recyclent pas, se compte parfois en milliards d'années.

Les diverses plaques continentales ont une densité comparable et leurs collisions n'entraînent pas de subduction dans l'asthénosphère. Les continents sont en quelque sorte insubmersibles. Leur affrontement produit un chevauchement partiel d'un continent sur l'autre (obduction), accompagné de plissements, donc de formation de massifs montagneux [FIG. 1.2c]. C'est ainsi qu'est née la chaîne de l'Himalaya, dressée par la plaque indienne, qui s'enfonce comme un coin dans la plaque eurasiatique.

Les collisions et les distensions des plaques produisent des tensions très importantes dans les roches comprimées, étirées ou cisailées. La matière des roches tend à se libérer de ces tensions. Lorsqu'elle y arrive, au prix d'une rupture soudaine du massif rocheux, cette libération est brutale. La terre se met à trembler et ses vibrations se propagent à travers le globe.



L'endroit où l'ébranlement a été déclenché est toujours situé à une certaine profondeur. On l'appelle *foyer* ou *hypocentre* du tremblement de terre. Bien que le foyer soit habituellement localisé comme un point, la surface de rupture du massif s'étend en réalité sur une distance plus ou moins grande. Celle-ci peut atteindre 500 km ou plus pour les séismes les plus violents (1250 km dans le cas du séisme de Sumatra de magnitude 9,3, survenu le 26 décembre 2004).

Le point de la surface du globe qui se trouve à la verticale du foyer est appelé *épicerne* du séisme. C'est là en général (mais pas toujours) qu'on observe les dommages aux constructions les plus importants.

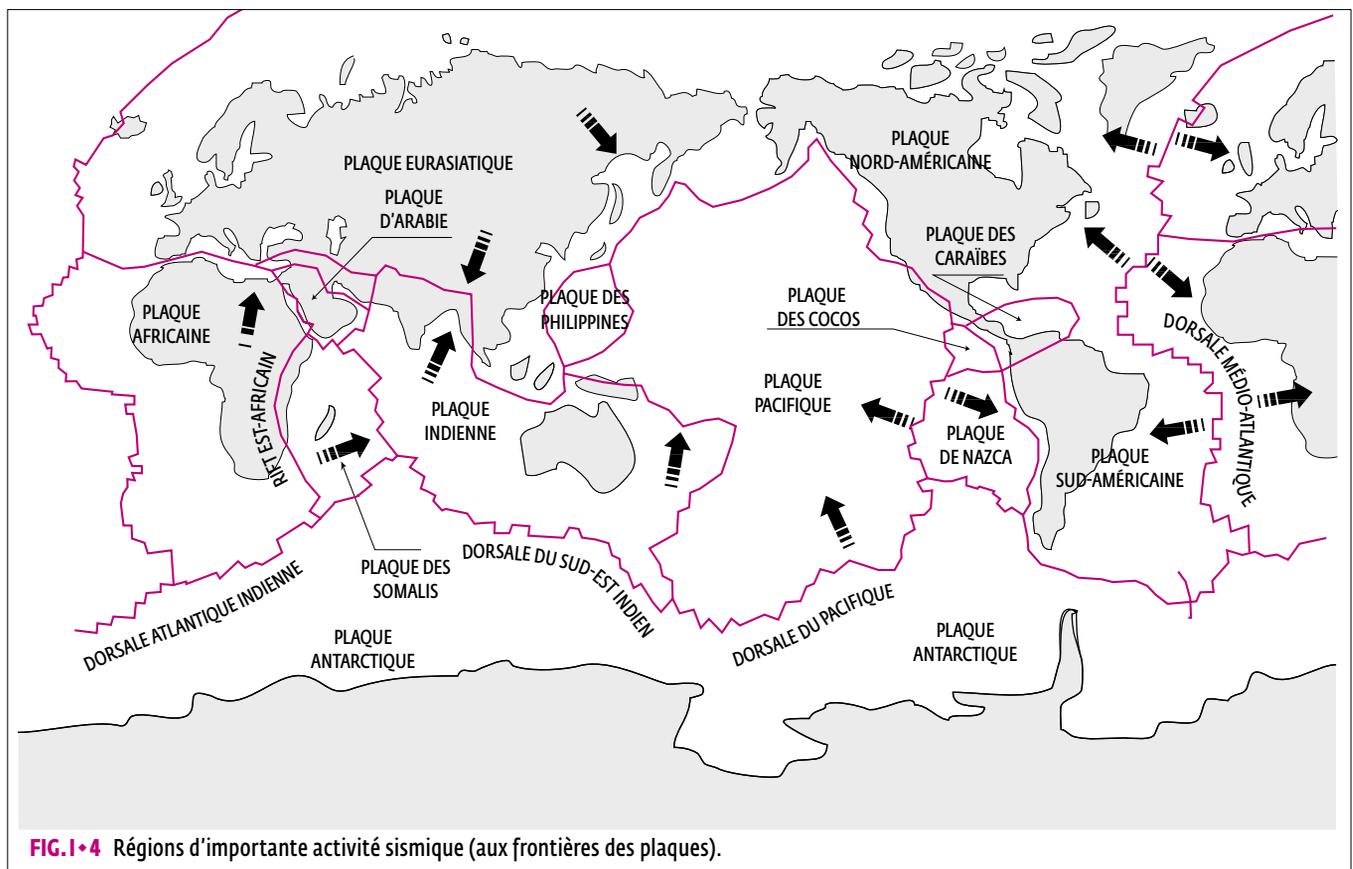
La cause des tremblements de terre n'est certes pas unique. Les séismes d'origine tectonique que nous venons de décrire sont cependant, et de loin, les plus fréquents et les plus puissants, donc les plus meurtriers.

I•2 Géographie des séismes

Les épicerces des tremblements de terre violents se trouvent dans leur grande majorité dans les zones de séparation des plaques lithosphériques (séismes interplaques), ce qui confirme le bien fondé de la théorie de la tectonique des plaques [FIG. I•4].

Toutefois, de nombreux tremblements de terre se produisent également en dehors des limites des plaques (séismes intraplaques). Certains d'entre eux sont dus à la répercussion des tensions entre les plaques jusqu'à l'intérieur des continents (ils peuvent être très violents), d'autres sont des séismes d'effondrement ou des séismes volcaniques.

La sismicité de la France métropolitaine est principalement due à la collision de la plaque Eurasiatique avec la plaque Africaine. L'axe des plus grandes tensions passant par l'Afrique du Nord, l'Italie, la Yougoslavie et la Grèce, la France est actuellement épargnée par les séismes majeurs.



- On distingue trois ceintures différentes, caractérisées par la densité géographique des tremblements de terre observés :
- **CEINTURE DU PACIFIQUE**, appelée également ceinture de feu, à cause des nombreux volcans qui s'y trouvent ; environ 80% de l'énergie sismique est libérée chaque année dans cette ceinture ;
 - **CEINTURE TRANSASIATIQUE**, qui libère 15% de l'énergie sismique annuelle ; raccordée à la ceinture du Pacifique en Indonésie, elle se prolonge jusqu'à la Méditerranée, donc jusqu'aux côtes françaises et ibériques ;
 - **DORSALES OCÉANIQUES**, qui libèrent la presque totalité des 5% d'énergie restants.

Par ailleurs, une activité sismique importante est observée en Chine centrale et orientale. Ces régions, qui ne se trouvent pas sur une frontière de plaques mais à l'intérieur même de la plaque eurasiatique, sont le siège de séismes des plus violents (par exemple : Kansu, Haicheng, Tangshan et Sichuan, magnitudes respectives de 7.6, 7.3, 7.8 et 7.9). Ces tremblements de terre intraplaques sont toujours déclenchés par le jeu d'une faille active, ce qui prouve l'existence de déformations intracontinentales.

1•3

Classement des séismes

Les tremblements de terre n'ont pas toujours la même cause. D'après leur origine, le classement suivant peut être proposé :

- ▶ **Séismes déclenchés par l'homme**
 - volontairement (séismes provoqués)
 - involontairement (séismes induits)
- ▶ **Séismes naturels**
 - séismes tectoniques
 - séismes volcaniques
 - séismes d'effondrement.

1•3•1

Séismes déclenchés par l'homme

Tous les tremblements de terre ne sont pas naturels. Des explosions nucléaires ou classiques, le poids de l'eau des réservoirs artificiels et le changement des conditions hydrauliques des sites qu'ils entraînent, ainsi que des effondrements de terre importants consécutifs à des activités humaines (terrassements, mines, rupture de digues...), peuvent déclencher des séismes artificiels de grande violence. Ces causes revêtent néanmoins un caractère exceptionnel. La quasi-totalité des pertes en vies humaines lors des tremblements de terre est due à la défaillance des constructions soumises à des secousses telluriques d'origine naturelle. Les ondes sismiques engendrées artificiellement sont cependant d'une grande importance pour l'exploration de l'intérieur de notre globe, inaccessible aux forages. L'étude des trajets et des variations de vitesse des ondes sismiques provoquées (de même que l'étude des ondes naturelles) a permis de déterminer la structure de notre planète. Celle-ci se compose, en première approximation, de quatre milieux différents : croûte, manteau, noyau externe et noyau interne, appelé aussi graine [FIG. 1•5].

Les transitions entre ces milieux correspondent à des discontinuités d'ordre physico-chimique. Selon de récentes hypothèses, le noyau intérieur contiendrait en son centre une « sous-graine » de fer solide de 650 km de diamètre.

Notons que la croûte terrestre est très mince. Son épaisseur moyenne est de 35 km environ. Elle peut atteindre 70 km sous les montagnes et diminuer jusqu'à 5 km sous les océans. La lithosphère comprend la croûte et la couche superficielle rigide du manteau. Elle est donc caractérisée par sa rigidité, par opposition à l'asthénosphère, qui est visqueuse. Elle est cependant chimiquement hétérogène, puisqu'elle contient une discontinuité (discontinuité de Mohorovičić). En revanche, il n'y a pas de discontinuité chimique entre le manteau rigide et l'asthénosphère. Il s'agit en effet des mêmes roches, dont la consistance devient pâteuse à une certaine profondeur sous l'effet de la température qui augmente vers l'intérieur du globe.

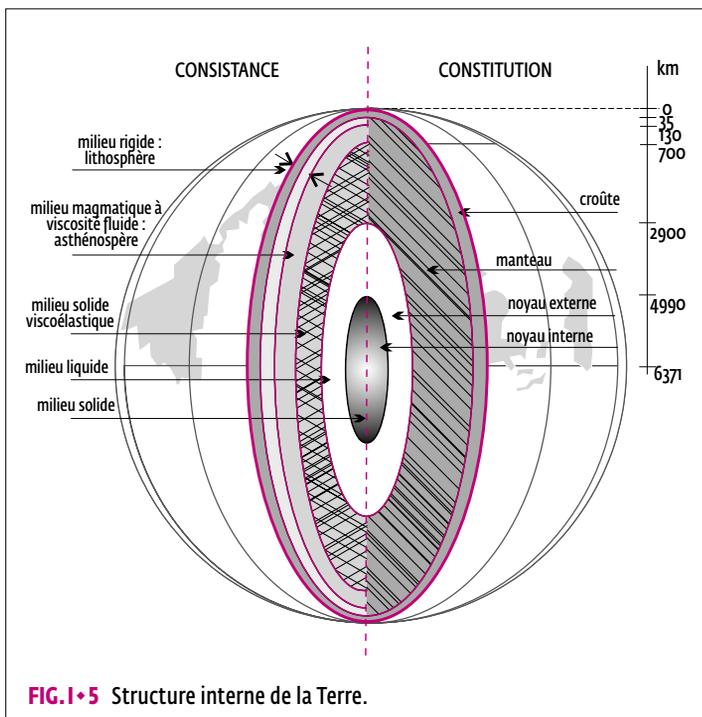


FIG. 1•5 Structure interne de la Terre.

1+3+2

Séismes naturels**► Séismes tectoniques**

Les séismes naturels d'origine tectonique sont les plus nombreux. Ils sont déclenchés dans la lithosphère à des endroits de faible résistance qui sont en général d'anciennes failles ou des séries de failles parallèles restées actives. Ces failles, pour la plupart souterraines, sont une conséquence de mouvements de plaques qui se sont produits dans le passé. Toutefois, des tremblements de terre peuvent être générés également en dehors des failles existantes, par exemple dans des roches ébréchées ou affaiblies par des cavités. De nouvelles failles sont alors ouvertes.

Les tensions engendrées dans les roches par les mouvements de plaques lithosphériques se traduisent par une accumulation d'énergie potentielle (énergie de déformation). Le dépassement localisé de la capacité des roches à stocker l'énergie provoque une rupture qui progresse ensuite rapidement (à la vitesse approximative de 3 km/seconde), continûment ou par saccades, suivant le chemin de moindre résistance. L'équilibre statique du sous-sol est ainsi rompu et l'énergie de déformation emmagasinée dans les roches se libère brutalement sous forme de chaleur, par déformation permanente de la faille, par fracture des roches et pour une faible partie sous forme d'énergie cinétique qui se propage jusqu'à son épuisement à travers le globe en tant qu'ondes sismiques, faisant trembler la terre à leur passage.

Un séisme tectonique peut également être décrit comme une relaxation des contraintes accumulées lors des déformations des roches. Or une rupture de faille ne relaxe jamais la totalité de ces contraintes. Ainsi d'autres séismes, appelés *répliques*, sont enregistrés quelques heures, quelques jours, quelques semaines ou quelques mois plus tard. L'activité sismique dans la région ébranlée se calme lorsqu'un nouvel équilibre des sols y est atteint.

Parfois, des tremblements de terre de faible importance précèdent le séisme principal. On les appelle *séismes précurseurs*. Le séisme principal est souvent déclenché au début de la série.

Si un certain nombre de secousses peu importantes se produit en un même lieu, on les appelle *essaims*. Les essaims sont fréquemment observés le long des dorsales qui libèrent relativement peu d'énergie. Ceci s'explique facilement : les sols étirés par l'écartement des plaques ne peuvent accumuler avant leur rupture que de faibles quantités d'énergie de déformation, à la différence des sols comprimés par l'affrontement des plaques.

Il est intéressant de noter que la rupture du massif rocheux ne s'étend jamais sur toute la faille. Par ailleurs, elle peut être apparente en surface (déplacement relatif des deux lèvres de la faille, généralement fatal aux constructions), ou rester cachée sous des formations superficielles. Sauf exception, la rupture de surface ne se produit qu'en cas de séisme de magnitude supérieure à 6.

Le jeu des failles transformantes engendre fréquemment des séismes violents, car la rupture s'étend généralement sur de grandes longueurs (séismes de San Francisco de 1906 et 1989). Les séismes intraplaques peuvent également être violents ; leur fréquence d'occurrence étant faible, ils libèrent l'énergie accumulée depuis longtemps.

Étant donné la faible épaisseur de la lithosphère, les foyers des tremblements de terre ne sont généralement pas très profonds. Les séismes dits *normaux* ou *superficiels* sont déclenchés entre 0 et 70 km de profondeur. Ils représentent environ 90% des tremblements de terre détectés. Des séismes plus profonds ne sont observés que dans les zones de subduction de plaques océaniques. On les qualifie de *séismes intermédiaires* lorsque leurs foyers se situent de 71 à 300 km sous la surface et de *séismes profonds* quand ils dépassent 300 km de profondeur. Aucun tremblement de terre ne peut être déclenché en dessous de 700 km sous la surface, faute de roches capables de rupture fragile.

La subduction des plaques entraîne un frottement important. Hormis des contraintes élevées dans le sol, ce frottement produit une chaleur intense qui transforme les roches en magma, ce qui explique la fréquence des volcans dans les zones de subduction des plaques lithosphériques [FIG. 1+2]. Par ailleurs, les séismes tectoniques sont quelquefois accompagnés de phénomènes lumineux comme arcs de lumière, éclairs ou points lumineux.

► Séismes volcaniques

Les séismes volcaniques sont dus à des ruptures provoquées dans les roches par des poussées de magma, à l'effondrement du toit des cavernes restées vides après l'éjection de laves ou encore à des explosions volcaniques. Ils sont donc indépendants des mouvements des plaques lithosphériques. La quantité d'énergie libérée par les séismes volcaniques n'est pas très élevée et leurs effets sont limités.

► Séismes d'effondrement

Ces séismes sont plutôt exceptionnels. Provoqués par des effondrements de plafonds de cavités souterraines, leur puissance est très faible en comparaison avec les séismes tectoniques d'une certaine importance. Ils peuvent se produire évidemment en dehors des limites des plaques lithosphériques, en n'importe quel endroit de la terre.

Les séismes naturels se produisent également hors de notre Terre, sur d'autres planètes ou corps célestes comme la Lune.

1.4 Ondes sismiques

Les propriétés élastiques des roches et des sols permettent à l'énergie libérée par la rupture des roches déformées de se propager à partir du foyer dans toutes les directions sous forme d'ondes, dont le front forme idéalement une surface sphérique, et qui traversent le globe de part en part. Il s'agit d'ondes de volume. Comme lors de toute impulsion dans un milieu infini, deux trains d'ondes se propageant à des vitesses différentes sont formés : ondes de compression et ondes de distorsion. Les premières, appelées ondes longitudinales, compriment et dilatent successivement le milieu parcouru. Les secondes, ondes transversales, font osciller les particules du sol perpendiculairement à la direction de la propagation [FIG. 1.6]. En un point, celle-ci est normale au front d'ondes ; on l'appelle rai sismique.

La vitesse des ondes sismiques est variable selon la nature des milieux traversés. Les ondes longitudinales sont toujours les plus rapides (jusqu'à 7 à 8 km/s) et arrivent donc les premières aux différentes stations d'observation. Pour cette raison, elles portent également le nom d'ondes P (*primae undae*). Les secondes enregistrées sont des ondes transversales, appelées aussi ondes S (*secundae undae*) ou ondes de cisaillement, étant donné que leurs oscillations transversales cisailent les sols traversés sans faire varier leur volume, contrairement aux ondes longitudinales. Ces ondes ne se propagent donc pas dans les milieux liquides (lacs, océans) ou gazeux qui ne peuvent pas subir de déformations élastiques. La vitesse des ondes S atteint généralement 60 % de la vitesse des ondes P. La période des ondes de volume est de l'ordre d'une seconde.

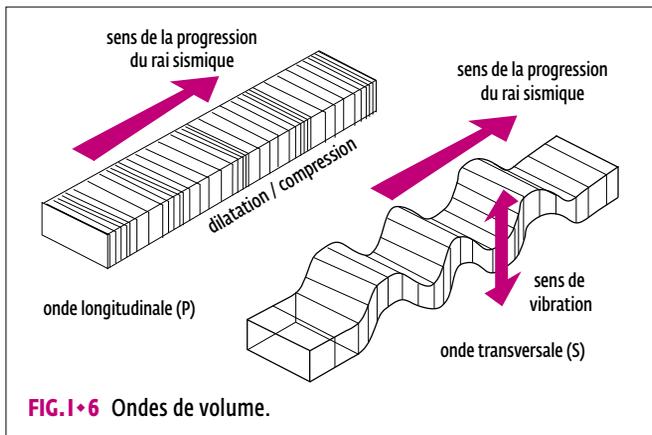


FIG. 1.6 Ondes de volume.

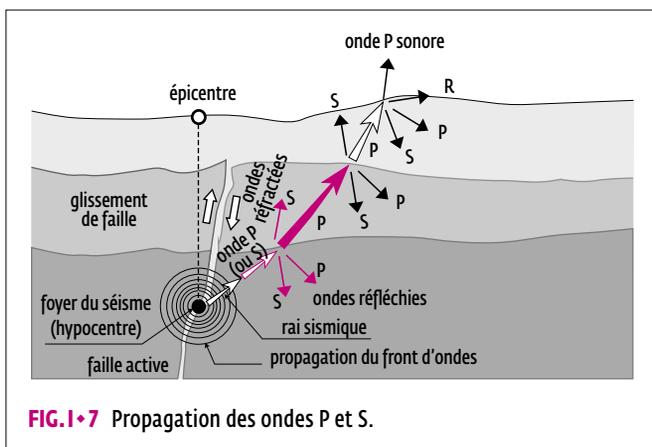


FIG. 1.7 Propagation des ondes P et S.

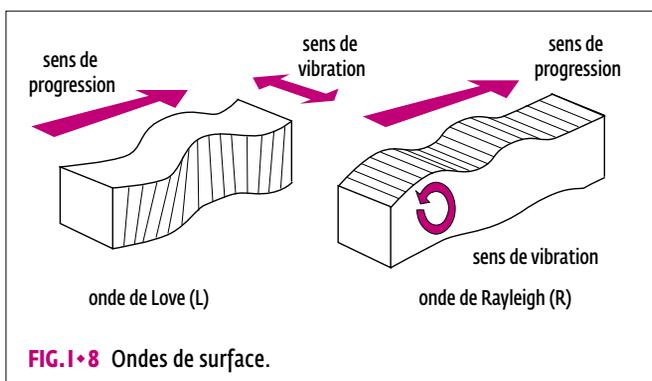


FIG. 1.8 Ondes de surface.

La propagation des ondes sismiques se fait suivant les mêmes lois que la propagation de la lumière. Quand elles rencontrent des milieux de densité et de nature différente, les ondes de volume sont en partie réfractées et en partie réfléchies. Dans les deux cas, le type d'onde peut changer. Par exemple, une onde P peut se transformer en deux ondes, P et S [FIG. 1.7].

Près de la surface du sol, les ondes réfléchies vers l'intérieur de la terre, combinées avec les ondes qui arrivent du foyer, amplifient souvent considérablement les secousses. L'énergie réfractée vers l'atmosphère (onde P) peut par ailleurs engendrer des ondes acoustiques dans les fréquences audibles, ce qui explique les bruits intenses qui accompagnent parfois les tremblements de terre.

À partir d'une certaine distance de l'épicentre, les vibrations produites par les ondes P et S ne constituent plus la phase principale des tremblements de terre. Celle-ci est due aux ondes de surface, générées par des ondes de volume. En effet, la surface terrestre représentant la limite du milieu solide (ou liquide), les conditions physiques et géométriques liées à cette limite font que les ondes P et S traversant le globe induisent à la surface des ondes à longue période (de l'ordre de 20 secondes) et à grande amplitude. Le phénomène est comparable à la création d'ondes de surface sur l'eau par des tirs de mine immergés. L'importance des ondes de surface diminue avec la profondeur du foyer.

Les ondes de surface se propagent parallèlement à la surface terrestre et font donc le tour du globe. Elles ne sont sensibles que sur une faible profondeur. On distingue deux types d'ondes de surface : ondes de Rayleigh et ondes de Love [FIG. 1.8].

Les ondes de Rayleigh (symbole R) font décrire aux particules du sol des mouvements en ellipse dans le sens rétrograde, qui fait penser à l'effet de la houle. L'amplitude de ces mouvements décroît exponentiellement avec la profondeur. Leur vitesse atteint en moyenne 92 % de celle des ondes S. L'accélération verticale des sols due aux ondes de Rayleigh peut atteindre des valeurs importantes.

Les ondes de Love (L), particulières aux milieux stratifiés et anisotropes, sont transversales et tout comme les ondes S, elles ne peuvent donc traverser les milieux liquides ou gazeux. Elles produisent des cisaillements du sol dans des plans parallèles à la surface et ébranlent par conséquent les constructions horizontalement. La vitesse des ondes de Love est sensiblement la même que celle des ondes S.

CHAPITRE II

EFFETS ENGENDRÉS PAR LES TREMBLEMENTS DE TERRE

II • 1 Effets sur l'environnement naturel

II • 1 • 1 Types d'effets sur l'environnement naturel

Les effets des séismes sur les sites s'échelonnent des déformations momentanées ou petites fissures dans le terrain jusqu'aux changements considérables dans la morphologie du paysage. Ces derniers sont heureusement rares. On peut citer le tremblement de terre de Kansu (Chine) de magnitude 7,6 survenu en 1920, qui a provoqué d'immenses coulées de terre sur plus d'un kilomètre, la formation de nouveaux lacs et collines ainsi que des effondrements de versants, accompagnés de destructions d'habitations très importantes.

En fonction de leur nature, on distingue les effets directs et les effets induits [FIG. II • 1]. On peut y ajouter l'apparition de la faille sismogène en surface, liée à la genèse du séisme.

► Effets directs

Les effets directs sont produits par les mouvements vibratoires du sol d'une amplitude de quelques millimètres à 1 mètre pour les séismes les plus violents : déformations élastiques (momentanées) ou irréversibles du terrain, fissures ou crevasses, tassements localisés, mise en oscillation des constructions, etc. Les vibrations du sol peuvent être localement amplifiées par le site dans des proportions importantes [cf. paragraphe II • 1 • 2 Effets de site].

► Effets induits

Les effets induits par les séismes sont de grands mouvements de sols ou de l'eau pouvant résulter d'une conjonction de plusieurs causes. Le séisme y joue le rôle de déclic (glissement, effondrement ou éboulement de terrains, avalanches, décrochage de glaciers, etc.) ou il est déterminant dans leur genèse : « liquéfaction » des sols, certains glissements de terrain dits atypiques, seiches (oscillation de l'ensemble de la masse d'eau dans les réservoirs naturels ou artificiels), tsunamis, etc. Les tsunamis ainsi que les seiches se produisent sur les étendues d'eau.

Pour les ouvrages, les conséquences des effets induits sont en général plus désastreuses que celles des vibrations du sol d'assise. Un glissement de terrain peut emporter et détruire toute construction, qu'elle soit conçue pour résister aux secousses sismiques ou non. Avant d'implanter un bâtiment, il est donc important de repérer les formations géologiques potentiellement dangereuses et d'évaluer leur zone d'influence.

II • 1 • 2 Effets de site

Selon la topographie superficielle et souterraine du site et selon la nature des sols, les vibrations transmises par le substratum rocheux peuvent être significativement amplifiées (cas général) ou parfois atténuées. On distingue deux types d'effets de site : effets topographiques et effets lithologiques.

II • 1 • 2 • 1 Effets topographiques

Les constructions implantées sur des crêtes ou des pitons peuvent subir des mouvements sismiques considérablement amplifiés. Ainsi, lors du tremblement de terre de Lambesc (Provence) en 1909, le village de Vernègues, bâti sur

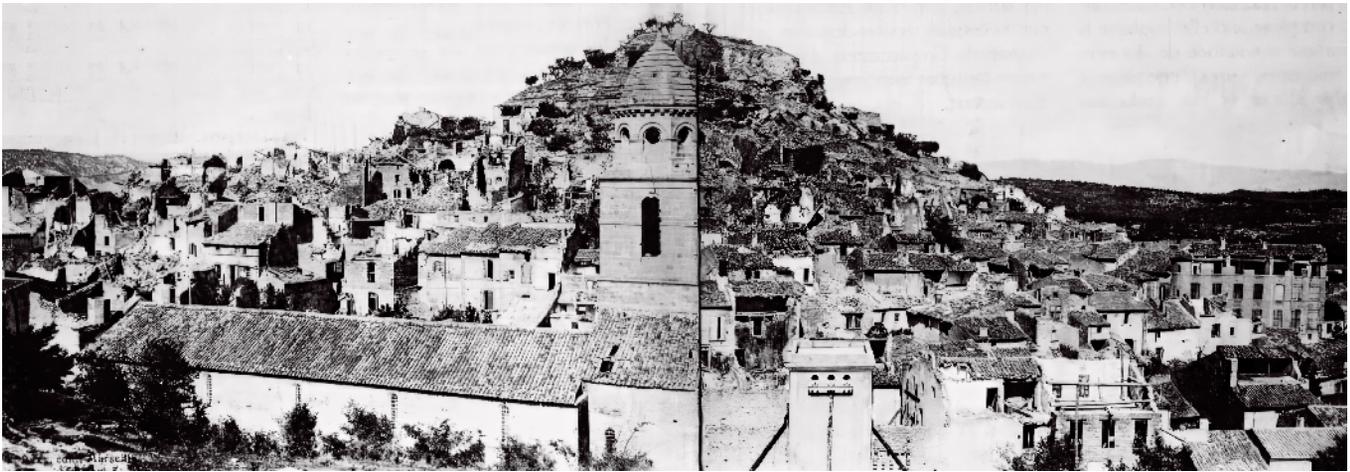


FIG. II • 2 Rognes après le séisme du 11 juin 1909 : les dommages les plus importants se sont produits au sommet de la colline.

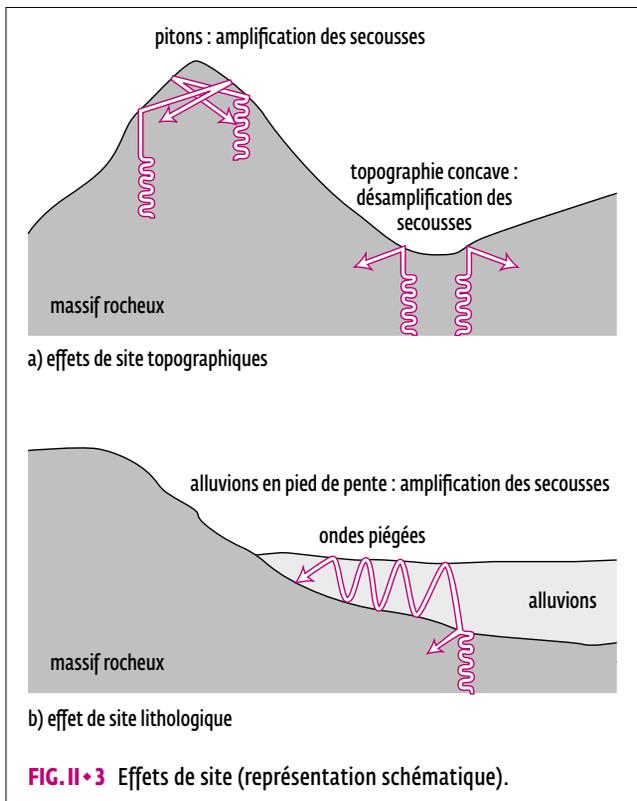


FIG. II • 3 Effets de site (représentation schématique).

un sommet, a été entièrement détruit alors que les hameaux voisins, composés de mêmes types de constructions, ont subi des dégâts beaucoup moins importants. De même à Rognes, les maisons situées en pied de colline ont moins souffert que celles qui étaient implantées au sommet ou sur les versants [FIG. II • 2].

En effet, les ondes sismiques réfléchies vers l'intérieur des reliefs (versants, crêtes, sommets) y restent provisoirement piégées ainsi que l'énergie qu'elles transportent. Les secousses aux sommets et sur les crêtes sont donc amplifiées par rapport à un terrain plat. La différence peut atteindre le facteur 5 ou plus (des amplifications de facteur 20 ont déjà été mesurées). L'amplification est maximale pour les longueurs d'onde comparables à la largeur du relief. Un phénomène similaire se produit dans les zones de changement brusque de pente.

Le mécanisme inverse donne lieu à une désamplification des oscillations dans les zones à topographie concave (si le milieu est homogène) : pied de pente et fonds de vallées [FIG. II • 3a]. Ces endroits peuvent par contre être menacés par des effets induits (éboulements rocheux, glissements de terrain...).

Prise en compte des effets topographiques pour l'implantation des bâtiments

Dans la mesure du possible, les bâtiments ne devraient pas être implantés sur les crêtes ni près des changements importants d'inclinaison de pente. À une distance de 20 m du rebord de pente, la baisse des amplifications de vibrations est déjà sensible. Les zones sujettes à effets

topographiques figurent sur les cartes de microzonage, élaborées pour certaines communes françaises. La [FIG. II • 4a] montre la cartographie des effets topographiques figurant dans le microzonage de Fort-de-France (Martinique). Les *Guides de construction parasismique des maisons individuelles CPMI-EC8, zones 3-4 et zone 5* [23] [24] exigent que les maisons soient implantées à une distance d'au moins 10 m ou $1,5 H$ (avec H = hauteur de la pente) du pied d'un talus ou d'une falaise dont les pentes sont réputées stables, la plus petite valeur étant à retenir [FIG. V • 1].

Prise en compte des effets topographiques dans les calculs selon l'Eurocode 8-5

Pour les bâtiments de catégories III et IV [cf. les catégories au [paragraphe IV • 2](#) *Classification des ouvrages*], l'action sismique de calcul doit être majorée par un coefficient d'amplification topographique S_T , aussi bien pour l'analyse des structures que dans les vérifications de la stabilité des pentes. Dans son annexe A, informative, l'*Eurocode 8-5* propose des valeurs à adopter pour les coefficients d'amplification topographique :

- Près des rebords de plateau et des crêtes surplombant des versants d'une pente d'au moins 15 % et d'une hauteur supérieure à 30 m environ, il convient d'utiliser une valeur $S_T \geq 1,2$ pour les sites situés à proximité de la crête [FIG. II • 5a].
- Au sommet des buttes, il convient d'utiliser une valeur $S_T \geq 1,4$ lorsque l'angle d'inclinaison moyen est supérieur à 30 %, et $S_T \geq 1,2$ pour les angles inférieurs [FIG. II • 5b].
- Dans le cas d'une topographie locale fortement irrégulière, il est recommandé d'effectuer une étude spécifique.

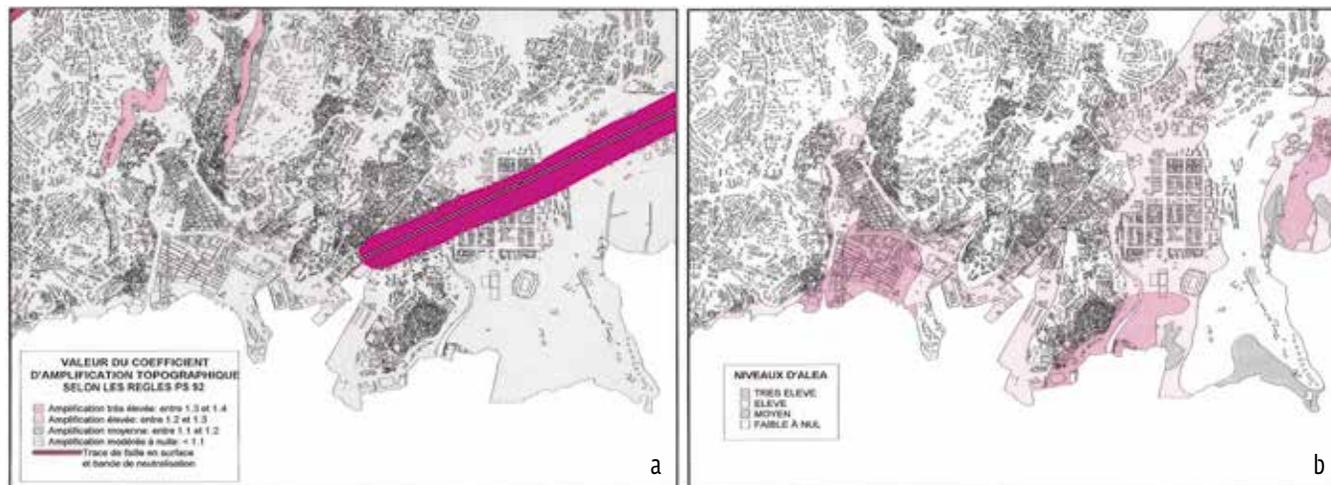


FIG. II-4 Cartes de microzonage de Fort-de-France (Martinique).
 a Carte des effets topographiques et tracé de la faille sismogène.
 b Carte des zones à sol liquéfiable.

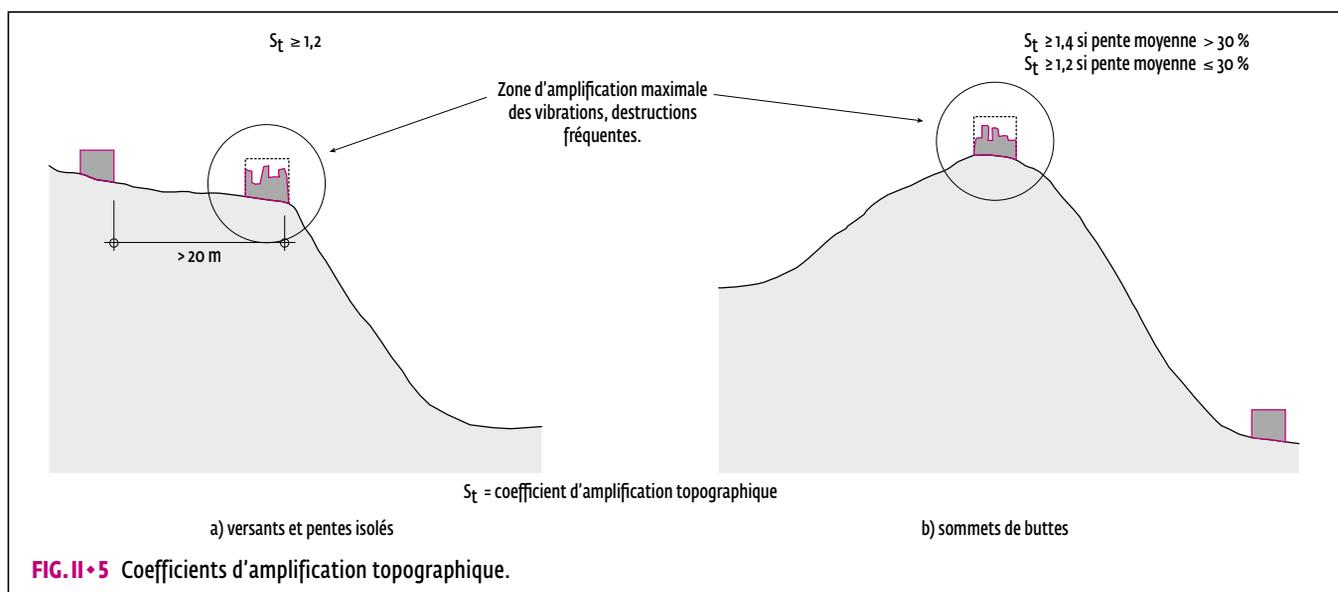


FIG. II-5 Coefficients d'amplification topographique.

- En présence d'une couche lâche en surface, dans toutes les configurations, la valeur de S_T devrait être augmentée d'au moins 20 %.
- On peut admettre que la valeur de S_T décroît linéairement de la crête vers le bas, jusqu'à valoir 1 à la base de la pente.
- Pour les inclinaisons moyennes de terrains en pente inférieures à 15 % environ, les effets topographiques peuvent être négligés.

II-1-2-2

Effets lithologiques

Il s'agit d'effets liés à la nature et à l'épaisseur du sol. Des amplifications importantes des secousses sismiques sont observées dans des couches de sol de faibles caractéristiques (sols « mous ») d'une épaisseur de plus de 10 m, que l'on trouve souvent dans les vallées alluviales ou qui remplissent d'anciens lacs. Ces amplifications sont principalement dues à la résonance du sol mou et au piégeage des ondes sismiques entre le substratum rocheux, très rigide, et ces sols [FIG. VII-3 b]. La FIG. VII-4 montre une amplification de facteur 5 des accélérations entre le sol rocheux et le sol meuble (correspondant au décalage de l'origine des courbes) sur le site de la ville de Mexico, enregistrée lors du séisme de 1985.

Les amplitudes d'oscillation des sols mous peuvent atteindre plus du triple de celles qui sont observées sur les sols fermes situés à proximité. Cela explique en partie les dommages élevés que subissent lors des tremblements de terre les constructions qui y sont fondées.

L'un des facteurs destructeurs les plus importants est la durée des secousses. Or celle-ci aussi est particulièrement grande dans les sols mous, notamment au centre des vallées alluviales. Leur durée d'oscillation peut être plus de deux fois plus longue que celle des sols rocheux.

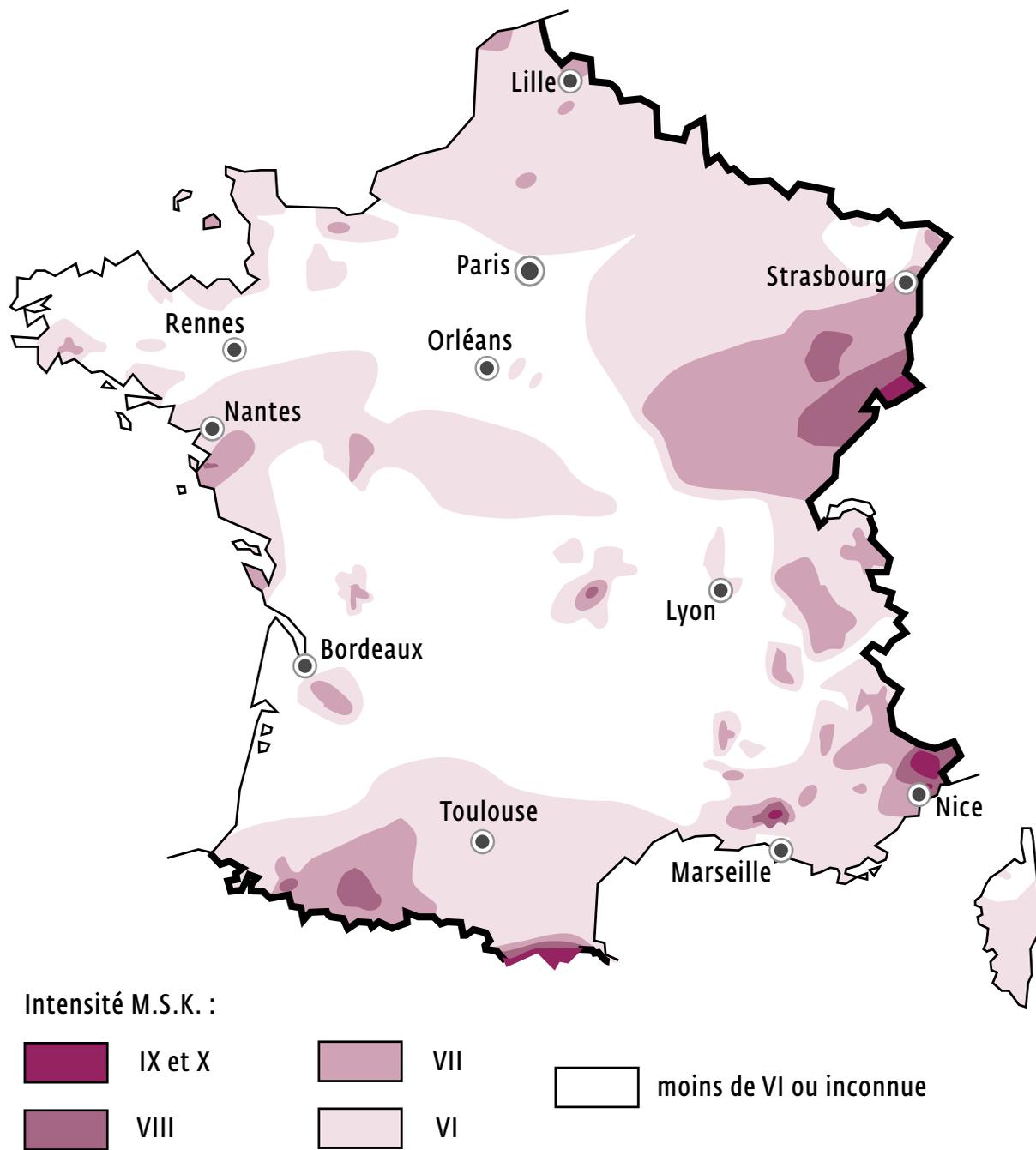


FIG. III • 1 Carte de la sismicité historique de la France métropolitaine (source BRGM).

CHAPITRE III

LE RISQUE SISMIQUE ET SA PRÉVENTION

III • 1

Notion de risque sismique

Les séismes sont inévitables. Il s'en est produit dans le passé, il s'en produira dans l'avenir de tout aussi violents. Faute de pouvoir les éviter, on doit s'efforcer de prévenir ou du moins de limiter les dommages qu'ils occasionnent, autrement dit de réduire le risque sismique.

Le *risque sismique*, qui peut être évalué pour une construction, pour une ville ou pour une région spécifique, est défini par la probabilité de pertes de biens, d'activités et de vies humaines au cours d'une période de référence. Il augmente constamment avec la densité de la population et avec le potentiel économique du pays. Paradoxalement, le développement des sociétés entraîne donc un accroissement de leur propre vulnérabilité face aux tremblements de terre. En contrepartie, les sociétés avancées disposent généralement de connaissances scientifiques poussées, ainsi que de moyens techniques de protection des constructions contre les effets des séismes. Il est donc souhaitable que ces connaissances et ces moyens soient effectivement utilisés pour réduire le risque sismique à un niveau acceptable pour la collectivité.

Le risque sismique dépend d'une part de la probabilité d'occurrence des séismes, donc de l'*aléa sismique* et, d'autre part, de la *vulnérabilité des enjeux*. Il associe donc la probabilité de survenance d'un événement menaçant à ses conséquences. En l'absence de constructions et de personnes, il est nul :

$$\text{Risque sismique} = \text{aléa sismique} \times \text{vulnérabilité des éléments exposés}$$

La connaissance du risque sismique permet aux personnes ou services concernés de mettre en place une stratégie de prévention et d'établir des priorités.

III • 2

Aléa sismique

III • 2 • 1

Définition

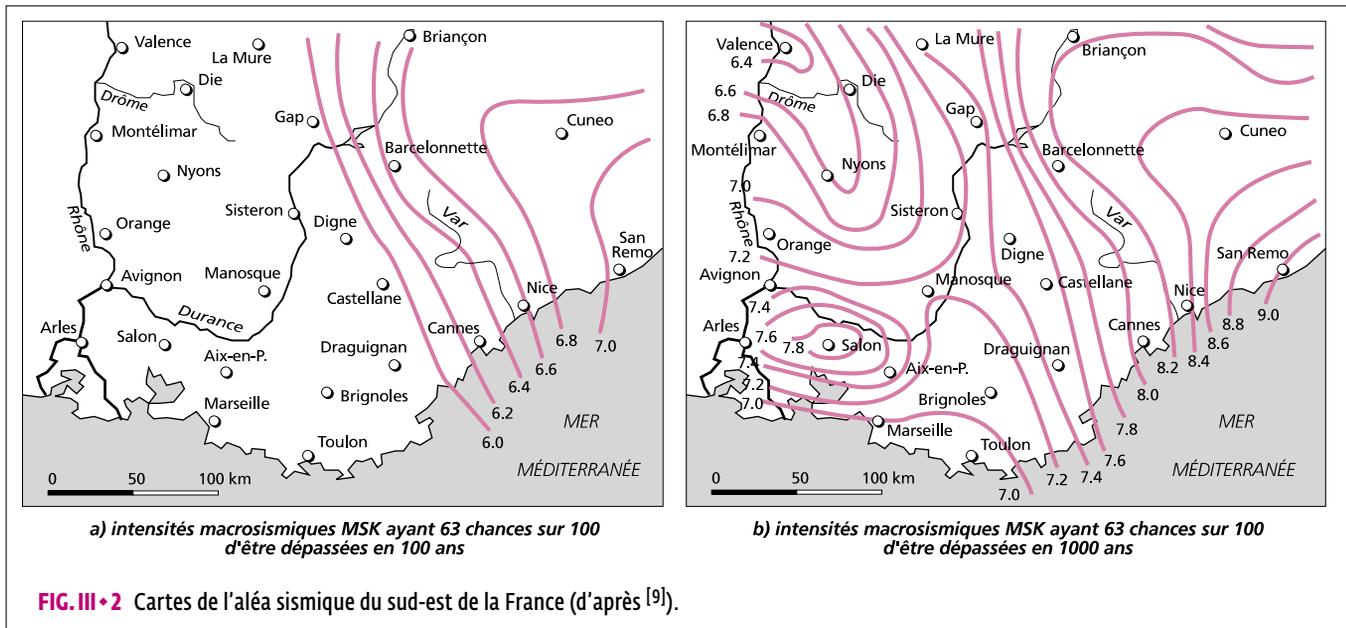
L'aléa sismique est la probabilité qu'au cours d'une période de temps considérée (un an, cent ans, mille ans...) une secousse sismique atteigne ou dépasse une certaine intensité (intensité macrosismique, accélération maximale du sol...). La probabilité d'occurrence de grands séismes étant inférieure à celle des séismes de faible intensité, les courbes montrant la variation de l'aléa sismique en fonction de l'intensité des séismes sont décroissantes [FIG. III • 5].

L'évaluation de l'aléa sismique s'appuie sur les données de la sismicité historique [FIG. III • 1] et instrumentale, ainsi que sur le contexte géologique. Il constitue une prévision sismique portant sur le lieu, la fréquence d'occurrence et l'intensité maximale des séismes futurs, sans en estimer la date. Il ne s'agit donc pas d'une prédiction. Compte tenu de l'usage qui en est fait, l'aléa sismique est établi à deux niveaux : à l'échelle régionale et à l'échelle locale.

III • 2 • 2

Aléa sismique régional

Les conditions géologiques locales et la topographie des sites étant variables à courte distance, l'aléa sismique régional est évalué pour un contexte géologique supposé homogène et pour une topographie de référence uniforme : rocher horizontal affleurant. Chaque région se voit attribuer une intensité macrosismique ou une accélération maximale du sol caractéristique, qui peut ensuite être modulée au niveau local pour tenir compte des facteurs d'aggravation de risque inhérents à chaque site.



L'aléa sismique régional peut être cartographié de différentes manières, par exemple en traçant des courbes reliant les sites sur lesquels une même intensité de secousses (intensité macrosismique, accélération du sol...) peut être atteinte ou dépassée pour une probabilité fixée à l'avance ou pour une période de temps donnée [FIG. III-2], ou sous forme de zones d'égal aléa différenciées par leur couleur. Dans les études récentes, l'aléa régional est caractérisé par l'accélération maximale du sol [FIG. III-3].

Les cartes de l'aléa sismique régional servent de base à l'élaboration du zonage sismique réglementaire [FIG. IV-1], dont les zones respectent le découpage administratif du pays en communes, et ne suivent donc pas exactement les mêmes limites que l'aléa régional physique.

Une accélération de référence au niveau du sol, considéré comme un rocher affleurant, est associée par les pouvoirs publics à chaque zone réglementaire (a_{gr} dans l'Eurocode 8). C'est en effet l'État qui fixe par arrêté le niveau d'agression sismique contre lequel les constructions soumises aux règles parasismiques doivent être protégées. Ce niveau nominal, c'est-à-dire fixé a priori sans qu'il corresponde au séisme maximal possible, est le résultat d'un arbitrage entre les données physiques (aléa et risque sismiques), politiques (l'importance accordée à la protection contre les séismes) et les impératifs économiques, car le coût de la protection sismique s'accroît plus vite que la réduction du risque sismique obtenue. Au-delà d'un certain seuil, ce coût devient prohibitif, ce qui explique pourquoi les constructions à risque normal [cf. CHAPITRE IV] ne font pas l'objet d'une protection contre les séismes maximaux pouvant se produire. Toutefois, les constructeurs sont libres d'opter pour un mouvement sismique de référence plus fort que celui qui figure dans l'arrêté en vigueur.

III-2-3

Aléa sismique local

L'évaluation de l'aléa sismique local tient compte des phénomènes aggravants spécifiques à un site : effets de site, effets induits et jeu de failles, décrits au paragraphe II-1. L'aléa sismique local figure sur des cartes à grande échelle (1:5 000 à 1:15 000), appelées cartes de microzonage, qui couvrent en général un territoire de la taille d'une commune et montrent donc la réaction d'un site à l'action sismique [FIG. II-4].

L'élaboration des cartes de microzonage est malheureusement très coûteuse. À l'heure actuelle, elle est encore limitée. En France, le microzonage sismique fait partie des Plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPR) élaborés pour un certain nombre de communes [cf. paragraphe III-4-1]. Ces plans, annexés aux documents d'urbanisme, valent servitudes d'utilité publique et peuvent aggraver les valeurs nominales de l'action sismique figurant dans la réglementation parasismique nationale.

III-3

Vulnérabilité des constructions aux séismes

La vulnérabilité d'une construction aux séismes correspond au degré d'endommagement qui serait occasionné par un tremblement de terres d'une certaine intensité. Elle peut également être exprimée comme le rapport du coût des dommages attendus pour un séisme d'une intensité donnée au coût de la construction, exprimé en pourcentage. Elle

CHAPITRE V

CHOIX DU TERRAIN À CONSTRUIRE, IMPLANTATION DES BÂTIMENTS

Il n'est pas toujours possible de choisir le terrain pour une future construction, car il est souvent déjà acquis. Dans ce cas, il convient d'implanter les bâtiments de préférence de manière à limiter les éventuels effets de site topographiques en s'éloignant au maximum des variations brusques de pente, notamment des crêtes, sommets et à-pics. Selon les guides *CPMI-EC8* ^[23]^[24], sauf justification de la stabilité de la pente par un bureau d'étude spécialisé, l'implantation des constructions doit être faite à une distance minimale d'un rebord de crête, du pied d'un talus ou d'une falaise dont les pentes sont « réputées » stables : 10 m ou 1,5 H (avec H = hauteur de la pente), la plus petite valeur étant à retenir [FIG. V•1].

Par ailleurs, il est nécessaire d'appliquer, s'il y a lieu, les dispositions préventives concernant les effets de site lithologiques et les effets induits (liquéfaction du sol, glissement de terrain, éboulement, etc.) exigées dans l'*Eurocode 8-5* [cf. paragraphe II•1].

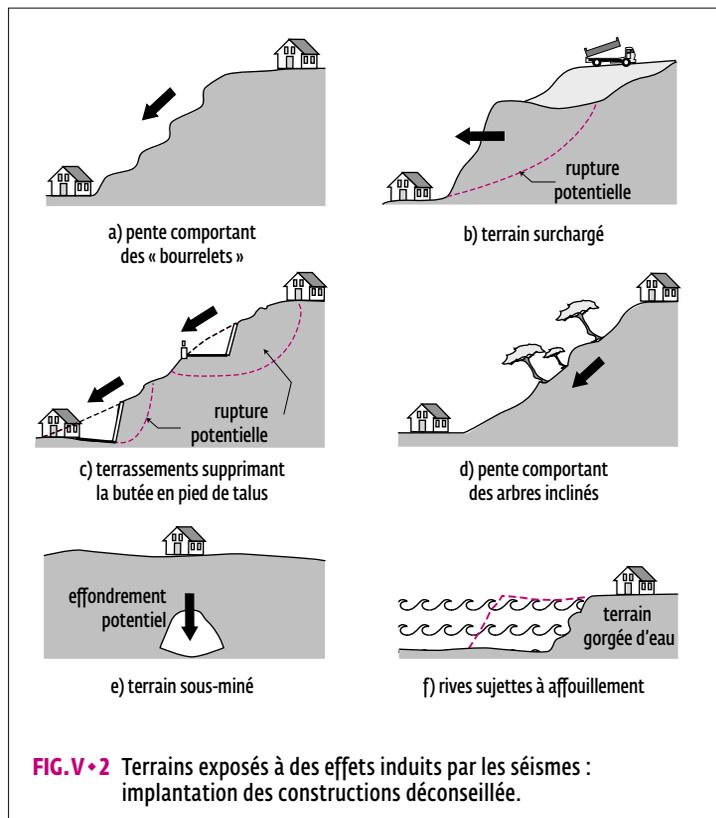
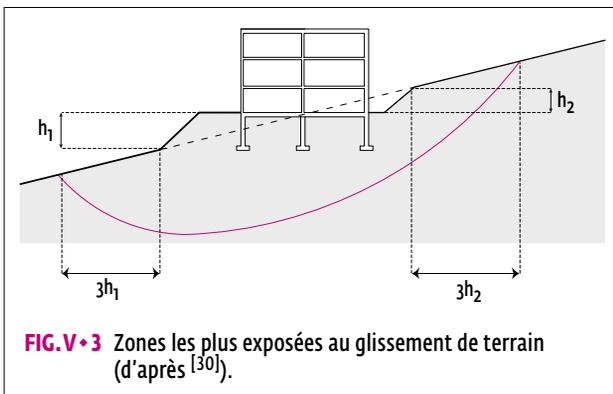
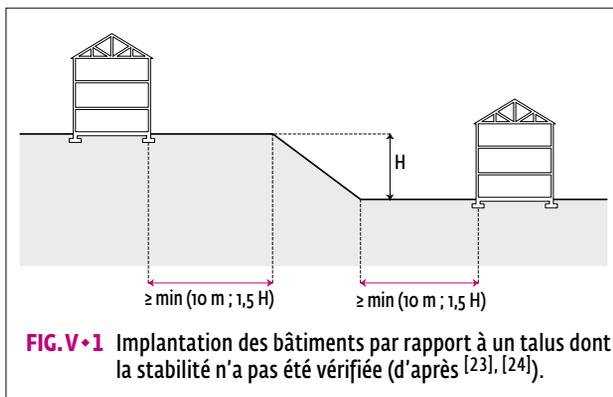
Lorsqu'un terrain à construire est recherché, il est évidemment préférable d'éviter les zones exposées à des effets de site et effets induits, ainsi que la proximité de failles actives. Dans le cas des communes disposant d'un *Plan de prévention des risques sismiques (PPRS)*, ces zones sont repérées sur les plans de microzonage, qui en font partie [FIG. II•4]. En l'absence d'un *PPR sismique*, il est prudent d'éviter :

- les terrains gorgés d'eau, les terrains mal drainés et les terrains inondables ;
- les couloirs des eaux de ruissellement ;
- les abords des falaises verticales en surplomb ou présentant des fissures, des clivages schisteux ou un pendage de bancs rocheux orienté vers l'aval ;
- les bords des vallées encaissées ;
- les pentes et les abords des pentes comportant :
 - zones glissées,
 - bosselage, moutonnage ou bourrelets révélant des coulées lentes des sols et des glissements anciens [FIG. V•2a],
 - crevasses et ruptures franches généralisées,
 - désordres localisés,
 - coulées boueuses,
 - éboulements récents,
 - surcharges importantes : remblais, décharges, digues, etc. [FIG. V•2b],
 - terrassements sans soutènement ou terrassements faiblement confortés, particulièrement en pied de pente [FIG. V•2c],
 - murs de soutènement sans barbacanes ou avec barbacanes colmatées,
 - réseaux de drainage abandonnés,
 - retenues d'eau,
 - puisards,

- déboisement récent,
 - arbres ou poteaux électriques inclinés [FIG.V•2d]
 - exploitations de carrières,
 - voies de grand trafic.
- sites sous-minés ou contenant de grandes cavités naturelles : grottes, rivières souterraines, etc. [FIG.V•2e] ;
- berges et rives menacées par affouillement [FIG.V•2f] ;
- proximité d'arbres si le sol est argileux (danger de tassement non uniforme dû au soutirage de l'eau par les arbres) ;
- la proximité des murs de soutènement non conçus selon les règles parasismiques.

Lorsqu'on plante un programme important de construction sur un terrain en pente, il est préférable d'opter pour plusieurs blocs de bâtiments sur plates-formes horizontales plutôt que pour un grand immeuble. La pente des talus ne devrait pas dépasser 2 : 3. La stabilité des pentes doit être vérifiée [cf. paragraphe II•1•3•2]. Les zones les plus exposées au glissement sont situées en pied et au sommet des talus sur une longueur égale à trois fois la hauteur de ces derniers [FIG.V•3].

Il convient de choisir des matériaux de bonne qualité pour les remblais et de les compacter fortement pour limiter leurs variations de volume et leurs déformations lors des secousses sismiques.



CHAPITRE VI

DE LA STRUCTURE

Ce chapitre a pour objet de faire le point sur des connaissances qualitatives de base en matière de structures de bâtiment. La conception d'ensemble d'un bâtiment consistant à choisir non seulement un parti architectural, mais aussi un parti constructif (choix et organisation du système porteur), il est indispensable d'avoir à l'esprit les phénomènes et les principes qui régissent le comportement des structures, aussi bien en situation non sismique que lorsqu'elles sont soumises aux tremblements de terre.

VI•1 Caractéristiques générales des structures

VI•1•1 Actions mécaniques sur les structures. Charges

Au cours de leur existence, les constructions subissent des effets mécaniques dus à divers phénomènes comme la gravité, le vent, les séismes, les poussées des terres, etc. Pour l'étude des structures, ces effets sont représentés par des forces externes appelées *actions* ou *charges*, classées de la manière suivante en fonction de leur variation dans le temps :

- *actions permanentes*, qui sont continues ou pratiquement continues, leur intensité est constante ou très peu variable dans le temps : poids propre des structures et des équipements fixes, actions indirectes provoquées par un retrait et des tassements différentiels, etc. ;
- *actions variables*, dont l'intensité varie fréquemment et de façon importante dans le temps : charges d'exploitation, actions du vent, poids de la neige, etc. ;
- *actions accidentelles*, provenant de phénomènes qui se produisent très rarement : séismes, explosions, chocs de véhicules, etc.

Remarque : dans les pays où les séismes sont très fréquents, leurs effets peuvent être classés dans les actions variables. L'*Eurocode 0* (EN 1990) précise les combinaisons d'action à adopter pour le calcul des structures dans diverses situations, y compris en situation sismique.

Les actions induisent dans les structures des forces et des moments (effets rotatifs des forces) internes appelés *sollicitations* : efforts normaux, efforts tranchants, moments fléchissants et moments de torsion. Les sollicitations provoquent des *déformations*, accompagnées d'un « état de tension » interne, appelé *contrainte*. La rupture d'un élément de structure survient quand une de ses sections transversales ne parvient plus à supporter la contrainte ou la déformation qui lui est imposée.



VI • 1 • 2

Solidité

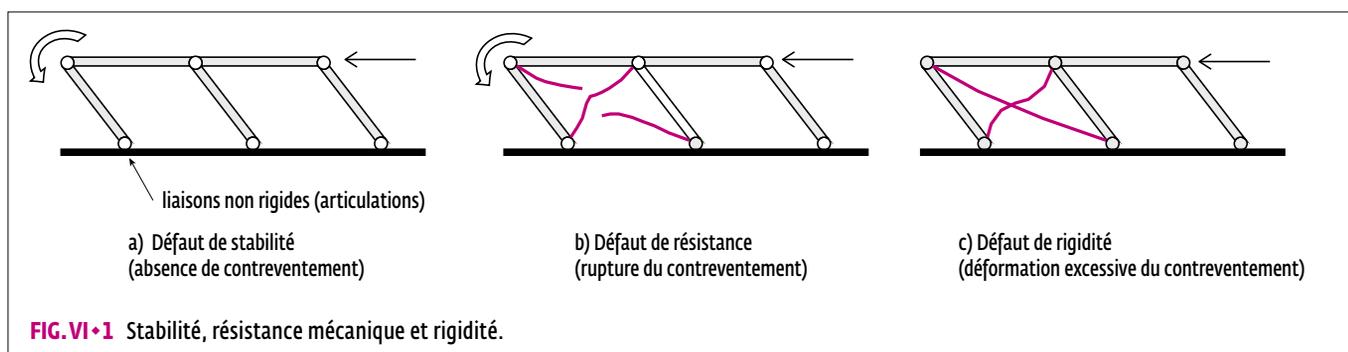
La structure assure la solidité des bâtiments sous l'action des charges. Elle est constituée d'un certain nombre d'*éléments structuraux* (murs, poteaux, poutres, planchers, charpentes, fondations...) liés ensemble par des *liaisons*, réalisées par des assemblages. Son rôle est de transmettre les charges jusqu'au sol de fondation. On parle de *descente de charges*.

Pour toute structure, on doit assurer [FIG. VI • 1] :

- la stabilité d'ensemble ;
- la résistance mécanique de ses éléments aux charges ;
- une certaine rigidité, c'est-à-dire la capacité à supporter les charges sans déformations excessives.

Ces aspects de la solidité ne sont pas indépendants les uns des autres. Ainsi par exemple, la stabilité d'ensemble d'une structure peut in fine être compromise par :

- la rupture d'éléments constructifs ou de liaisons (défaut de résistance) ;
- le flambage de murs ou de poteaux (défaut de rigidité).



VI • 1 • 3

Stabilité d'ensemble

VI • 1 • 3 • 1

Définition

Assurer la stabilité d'ensemble d'une structure consiste à maintenir, sous l'action des charges, sa configuration (invariabilité géométrique aux petites déformations élastiques près) et sa position (non-glissement, non-renversement...). On peut ainsi parler de stabilité interne dans le premier cas et de stabilité externe dans le second. Une construction intrinsèquement stable (dont la stabilité interne est assurée) peut glisser ou se renverser si son accrochage au sol est incorrect ou si elle est assise sur un sol instable. Les dégâts subis peuvent dans ce cas être très importants, nécessitant sa démolition. L'ancrage des constructions au sol, donc leur stabilité externe, est réalisé par l'intermédiaire des fondations.

Il convient de ne pas confondre les notions d'*équilibre* et de *stabilité*. En effet, une structure qui est en équilibre n'est pas nécessairement stable, à l'image d'une table en équilibre sur le plancher, qui peut être déplacée par une force horizontale ou ascendante [FIG. VI • 2]. La stabilité requiert l'équilibre sous toutes les charges qui peuvent s'exercer. Elle est assurée au moyen des liaisons entre les éléments constructifs, complétées souvent par un contreventement, alors que l'équilibre se produit lorsque les effets mécaniques (translations et rotations) des forces extérieures agissant sur une structure ou sur une de ses parties s'annulent. La structure est alors en état d'immobilité dans un cas de charges données. Ceci n'implique pas qu'elle restera en équilibre dans un autre cas de charges.

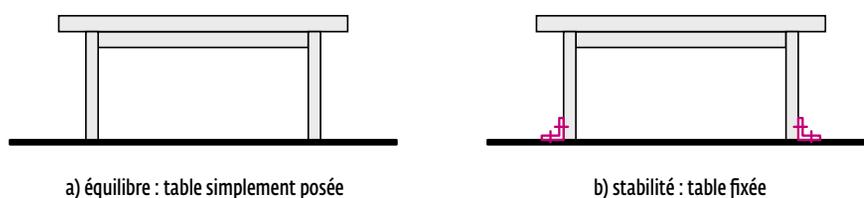


FIG. VI • 2 Équilibre et stabilité.

Par ailleurs, la stabilité d'ensemble d'un ouvrage ne doit pas être confondue avec la *stabilité de forme* d'un élément constructif. Cette dernière est étroitement liée à sa rigidité. On parle d'instabilité de forme lorsqu'un élément subit, faute de rigidité transversale suffisante, une déformation importante sous l'effet d'une sollicitation en compression, soit sur toute sa longueur (flambement), soit localement (déversement, voilement, cloquage...) [cf. [paragraphe VI•1•5](#)].

VI•1•3•2

Stabilité d'ensemble interne

Les systèmes porteurs sont intrinsèquement conçus pour rester stables sous charges verticales. Selon la manière d'assurer la stabilité vis-à-vis des actions (charges) horizontales, comme le vent ou la composante horizontale des secousses sismiques, on distingue deux types de structures :

- *structures autostables* ou *autocontreventées* qui résistent aux charges horizontales uniquement grâce aux liaisons entre les éléments structuraux. C'est par exemple le cas des cheminées encastrées à leur base, des portiques disposés dans les deux directions principales, ou celui des structures dites spatiales ou tridimensionnelles (coques, treillis 3D, structures gonflées, etc.) fixées directement aux fondations [[FIG. VI•3](#)]
- *structures contreventées* dont la stabilité est assurée, en plus des liaisons, par un ensemble d'éléments de construction appelé contreventement, présenté au paragraphe suivant.

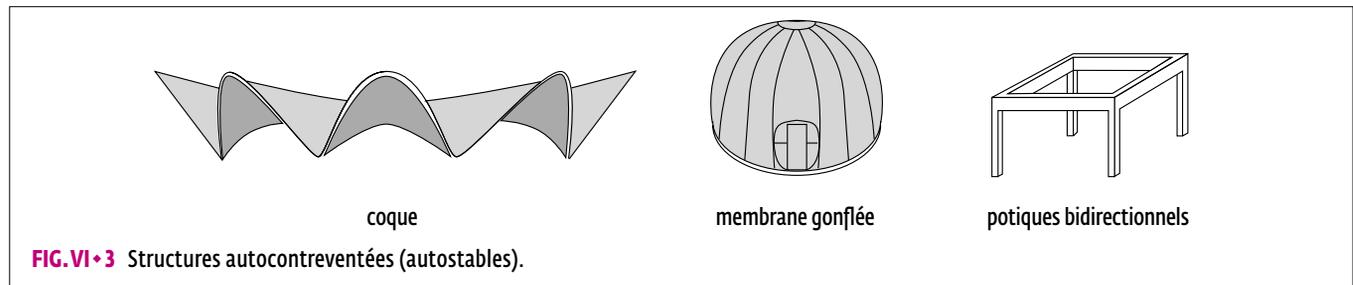


FIG. VI•3 Structures autocontreventées (autostables).

VI•1•3•3

Contreventement

► Principe du contreventement

Le but du contreventement est d'assurer la stabilité des poteaux, murs, portiques et arcs sous l'action des charges horizontales afin de prévenir l'effondrement des planchers ou des toitures, supportés par ces éléments. Il est constitué d'un système d'éléments verticaux (murs, palées de stabilité ou portiques) avec ou sans participation des planchers à la transmission des charges. Ce dernier cas, interdit en construction parasismique, est typique des immeubles anciens, nombreux dans les centres-villes, dont le système porteur est en murs de maçonnerie supportant des planchers à solives de bois simplement posées sur des cales placées dans des évidements ménagés dans les murs. Ces murs s'entrecroisent et assurent ainsi mutuellement leur stabilité [[FIG. VI•4](#)]. Les planchers à solives simplement posées ne sont pas en mesure de participer efficacement à la transmission des charges horizontales car ils possèdent une faible rigidité dans leur plan.

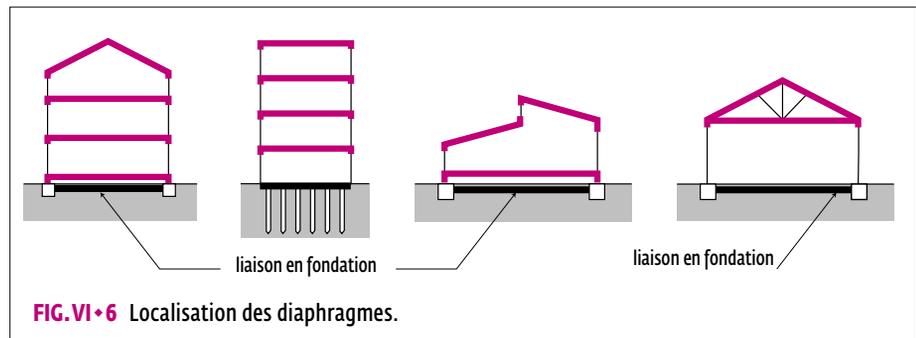
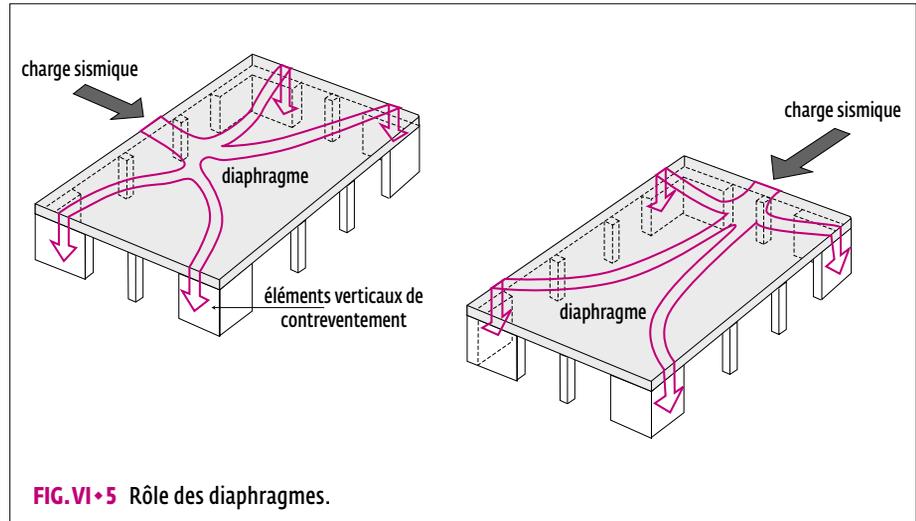
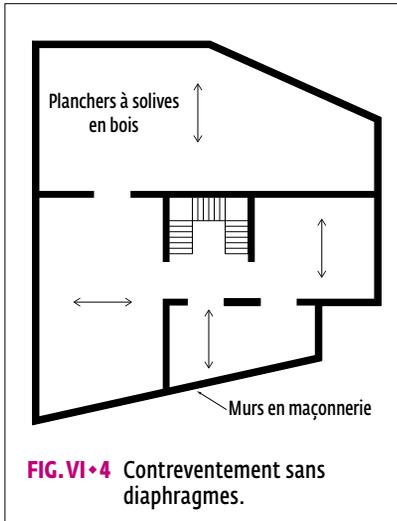
Dans les constructions modernes, les planchers (et les versants de toiture) doivent constituer des diaphragmes, c'est-à-dire des plans rigides capables de transmettre les charges horizontales sur les éléments verticaux de contreventement, qui les communiquent ensuite aux fondations [[FIG. VI•5](#)]. C'est le cas des planchers actuels en béton armé, planchers mixtes en acier et béton armé et planchers en bois, ainsi que celui des charpentes de toiture raidies par des poutres au vent, panneaux de toiture ou diagonales de contreventement. Leur conception parasismique est exposée au [paragraphe VIII•3](#).

Le contreventement doit être prévu à tous les niveaux y compris les combles, car chaque niveau doit rester stable sous charges horizontales [[FIG. VI•6](#)]. Lorsqu'une palée de stabilité court sur plusieurs niveaux d'un bâtiment à étages [[FIG. VI•7](#)], tous les planchers doivent y être connectés. À défaut, il est nécessaire de contreventer les niveaux indépendamment. La disposition des diagonales n'est pas nécessairement régulière [[FIG. VI•8](#)].

► Éléments verticaux de contreventement

Tous les éléments verticaux ou travées qui résistent aux charges horizontales agissant dans leur plan peuvent constituer des éléments de contreventement. On les classe habituellement en trois catégories [[FIG. VI•9](#)] :

- panneaux rigides ;
- arcs et portiques (à âme pleine ou en treillis) ;
- palées de stabilité triangulées.



CHAPITRE VII

PARTI ARCHITECTURAL : ESQUISSE ET AVANT-PROJET

VII • 1

Incidence de l'architecture sur le comportement d'un bâtiment exposé aux séismes

Lors d'un tremblement de terre, à un même endroit, les oscillations de certains bâtiments sont simples et de faible amplitude alors que celles d'autres constructions sont complexes et de grande amplitude, donc beaucoup plus dangereuses. En effet, certaines configurations de la structure des bâtiments affaiblissent notablement sa capacité à résister aux secousses sismiques et sont souvent à l'origine de dommages graves. D'autres ont pour conséquence une amplification des effets des séismes.

Les oscillations sont régies par trois paramètres : la masse (importance et répartition), la rigidité (degré et distribution) et l'amortissement des mouvements procuré par la construction. Les valeurs de ces paramètres découlent de l'architecture du système porteur : forme générale, disposition des éléments lourds et rigides comme les murs et les autres éléments participant au contreventement, choix du matériau de structure (maçonnerie, béton, acier, bois), etc. Le fait de placer un mur, un poteau, un escalier ou une ouverture à un endroit plutôt qu'à un autre peut modifier sensiblement le comportement d'une construction soumise à un tremblement de terre.

Tous ces éléments relèvent de la conception et dépendent donc des partis architectural et constructif, dont le choix est opéré dès l'esquisse. L'application des règles parasismiques permet ensuite de conférer aux ouvrages un certain niveau de résistance vis-à-vis des actions sismiques en fonction de l'architecture déterminée par le projet, mais elle ne peut pas modifier le comportement d'ensemble, qui détermine l'importance des charges sismiques. Qu'il le sache ou non, l'architecte joue donc un rôle important dans la protection parasismique des bâtiments. Il peut optimiser ou au contraire aggraver les oscillations que le bâtiment projeté subira en cas de séisme. Les oscillations amplifiées par une architecture pénalisante peuvent épuiser la résistance du bâtiment, car la fiabilité du dimensionnement aux séismes n'est pas totale [cf. [paragraphe iv•7](#)]. Différentes configurations pénalisantes, ainsi que des exemples de solutions optimales sont présentés dans ce chapitre.

La recherche d'un parti favorable à la résistance aux séismes est souvent considérée comme un frein à la création architecturale, étant donné que les constructions simples et symétriques se comportent le mieux. Cependant, cette crainte n'est pas justifiée car pour toute configuration de bâtiment, il existe plusieurs solutions simples permettant d'assurer un comportement dynamique satisfaisant. De nombreux exemples figurent dans ce chapitre.

De la pertinence du parti architectural dépend également le coût de la protection réglementaire. Une conception de projet optimale permet de le minimiser. Les constructions ayant un comportement non ductile (appelé fragile) sont pénalisées et doivent être dimensionnées pour des charges jusqu'à six fois plus élevées que celles qui ont un comportement plus favorable. La différence de coût est évidemment notable. Or nous avons vu qu'au stade de l'avant-projet, la non-fragilité des bâtiments vis-à-vis des secousses sismiques dépend principalement du parti architectural (configuration), du parti constructif (choix et organisation du système porteur) et du matériau de structure utilisé [cf. [paragraphe vi•2](#)].

VII • 2

Résonance du bâtiment avec le sol

La résonance est un des phénomènes les plus destructeurs. Elle peut considérablement amplifier les oscillations des constructions, qui peuvent alors subir des dommages graves [FIG. VII • 1]. Dans le cas des bâtiments élevés, les dommages dus à la résonance affectent surtout les étages supérieurs. Les effondrements dus à la résonance avec le sol ne sont pas rares.

La résonance se produit lorsqu'au moins une des périodes propres du bâtiment (transversale, longitudinale ou les deux, cf. ENCADRÉ 2) est la même que celle du sol. Dans ce cas, les amplitudes d'oscillation augmentent rapidement, à l'instar de celles d'une balançoire mise en mouvement par des impulsions d'une fréquence précise.

ENCADRÉ 2

► Période propre d'un bâtiment. Modes d'oscillation

La période propre T est le temps en secondes d'une oscillation libre [FIG. E2 • 1], par exemple celle des oscillations d'un bâtiment après l'arrêt des secousses jusqu'à l'amortissement complet du mouvement. Elle reste à peu près constante lorsque l'amplitude des mouvements diminue [FIG. VI • 23]. On peut parler également en termes de fréquence propre (mesurée en hertz), car la fréquence est la valeur inverse de la période : $f = 1/T$. Les périodes propres transversale et longitudinale diffèrent si la rigidité de la construction n'est pas la même dans les deux directions.

La période représentée sur la figure [FIG. E2 • 1] est celle du mode d'oscillation fondamental. En réalité, les déformations des constructions exposées à un séisme sont complexes, les planchers des différents étages ou les diverses parties de la structure n'oscillent pas nécessairement en phase. Ce mouvement peut être décomposé en modes de vibration [FIG. E2 • 2]. On distingue le mode fondamental (1^{er} mode) et les modes supérieurs, dont chacun possède sa période propre. Pour les bâtiments de conception simple, on peut dire, en schématisant, qu'il existe dans une direction donnée autant de modes d'oscillation qu'ils comportent de niveaux au-dessus du sol, chaque niveau pouvant théoriquement se déplacer dans le sens opposé à celui du niveau immédiatement inférieur. Les différents modes peuvent être excités dans les deux directions horizontales, verticalement et en rotation autour des axes x , y , z .

Les constructions de faible hauteur possédant un amortissement normal vibrent principalement en mode fondamental. L'incidence des autres modes est négligeable. En revanche, dans le cas des bâtiments flexibles ayant une période propre fondamentale supérieure à 0,7 s environ et un amortissement faible (tours en acier par exemple), l'influence des modes supérieurs est importante et les plus significatifs doivent être pris en considération dans le calcul de la charge sismique [cf. « Analyse modale spectrale », au paragraphe IX • 3].

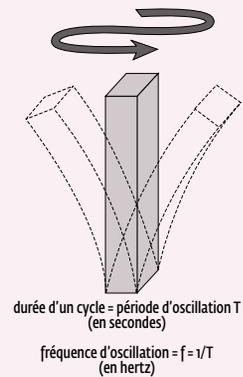


FIG. E2 • 1 Un cycle d'oscillation.

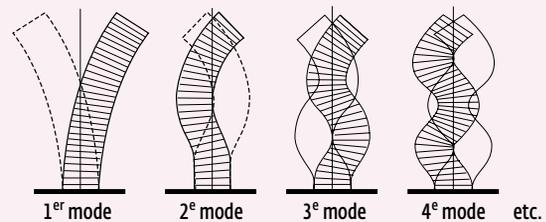


FIG. E2 • 2 Modes d'oscillation horizontale des bâtiments à étages.

Les constructions dont la période propre est proche de la période de résonance subissent également des déformations très amplifiées [FIG. VII • 2, 3, 4]. Les graphiques de ces figures, appelés *spectres de réponse* car les oscillations des constructions sont une réponse à l'excitation sismique de leur base, montrent qu'un même bâtiment, caractérisé par sa période propre T , ne subit pas la même accélération maximale selon que celle-ci est proche ou éloignée de la période de résonance, qui correspond aux pics des courbes [FIG. VII • 2a, 2b]. Sur les sols rigides, ce sont en général les bâtiments bas, à courte période propre, qui sont proches de la résonance. Sur les sols mous, c'est le cas des bâtiments élevés, dont la période propre est plus longue. En effet, la période propre augmente en général avec la hauteur du bâtiment. On constate donc que les séismes n'affectent pas toutes les constructions avec la même force. Les bâtiments peu sollicités peuvent donc survivre à un séisme fort même lorsqu'ils ne sont pas parasismiques.

La réponse est une amplification (cas le plus fréquent) ou une atténuation par la construction des mouvements subis au niveau du sol. Elle peut donc être exprimée en fonction d'un des trois paramètres du mouvement : accélération, vitesse ou déplacement. Étant donné qu'une seule valeur peut figurer sur l'ordonnée pour chaque période propre des bâtiments, les spectres de réponse réglementaires ne donnent que la valeur maximale de ces paramètres.

Pour le calcul des structures aux séismes, on utilise les spectres de réponse en accélération car elle est le paramètre le plus utile, la charge sismique globale d'une construction étant définie comme le produit de sa masse par son accélération. Les spectres de réponse tiennent également compte de l'amortissement procuré par la construction. Ceux qui figurent dans l'*Eurocode 8* ont été calculés pour un amortissement relatif [cf. GLOSSAIRE] de 5%. Pour le calcul des bâtiments ayant un amortissement différent, une correction est appliquée. En effet, plus l'amortissement d'une construction est élevé, plus faible est sa réponse, donc également les charges sismiques. La FIG. VII • 3 montre des spectres de réponse correspondant à des amortissements relatifs différents. Pour un amortissement de 20% et plus, la réponse en accélération n'est pratiquement plus amplifiée [FIG. VII • 3a].



FIG. VII • 1 Dommages sismiques aux bâtiments dus à la résonance avec le sol.
 a Séisme de Kobé, Japon 1995, magnitude 7,2.
 b Séisme du Mexique, 1985, magnitude 8,2.

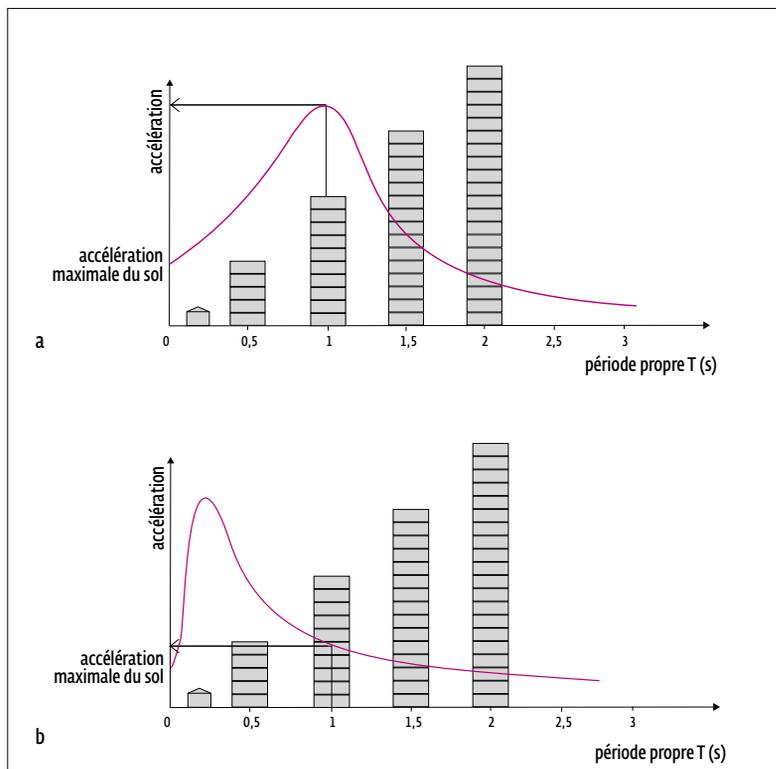
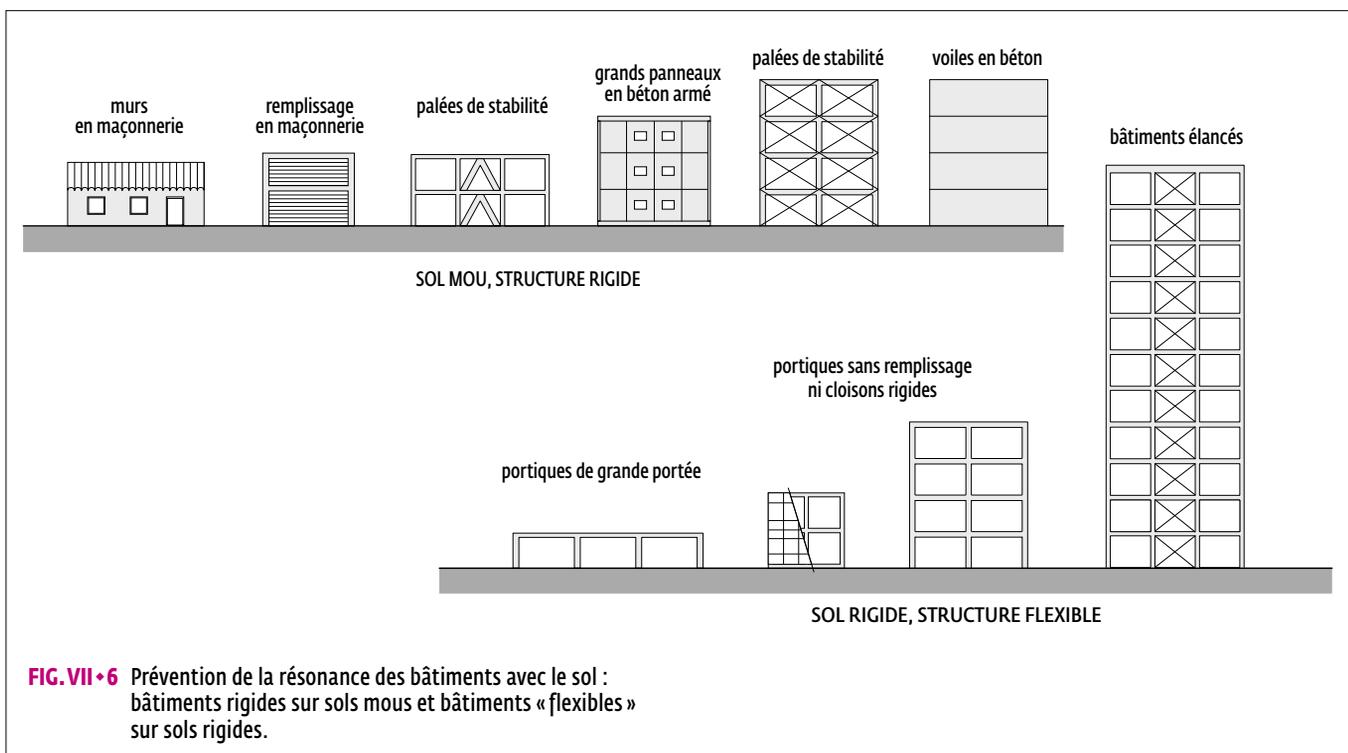
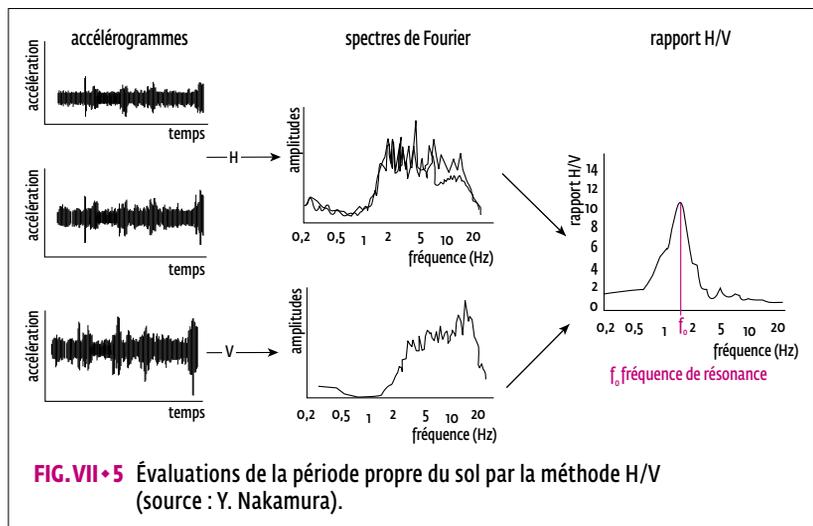
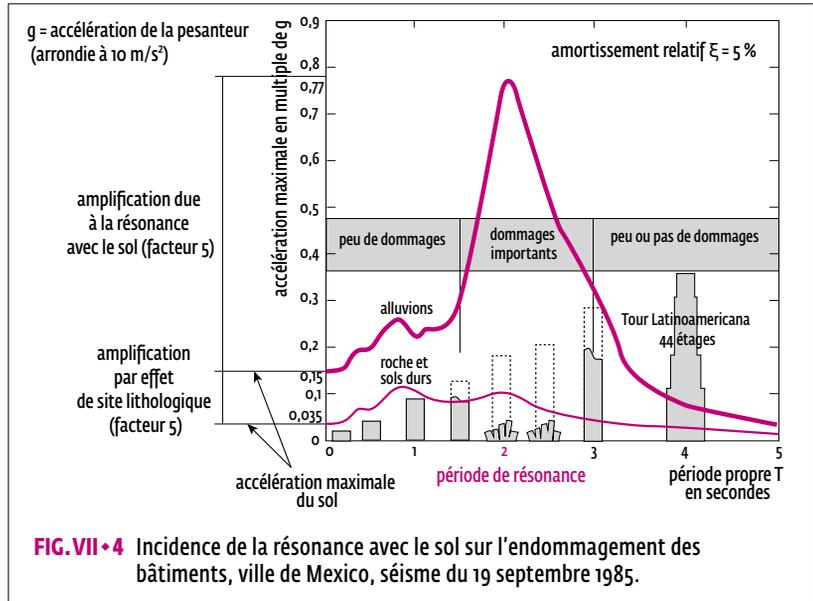
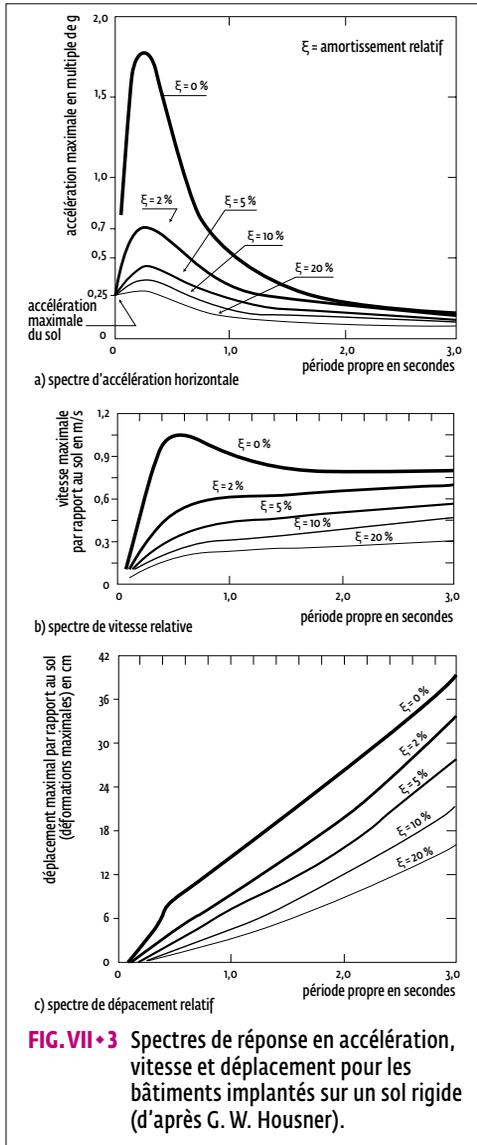


FIG. VII • 2 Spectres de réponse.
 a Sols peu rigides.
 b Sols rigides.
 c Tour Latinoamericana de 44 étages (183 m) à Mexico. Cette tour a subi sans dommages les séismes de 1957 (magnitude 7,8) et de 1985 (magnitude 8,2), sa période propre d'oscillation étant très éloignée de celle du sol.





CHAPITRE VIII

PROJET D'EXÉCUTION ET RÉALISATION

VIII • 1

Dispositions constructives parasismiques

Le projet d'exécution accompagné d'un devis descriptif précise les dispositions constructives à réaliser sur le chantier. Les dispositions en vigueur pour la construction parasismique, qui s'ajoutent à celles requises dans les situations non sismiques, sont décrites dans l'*Eurocode 8* et autres normes et documents [cf. [paragraphe IV•4•2 Règles parasismiques autorisées](#)]. Elles sont présentées dans cet ouvrage. Les dispositions des *Règles PS-MI 89/92*, en vigueur du 1^{er} août 1994 au 1^{er} avril 2022, sont également traitées afin de permettre la vérification du caractère parasismique des constructions simples édifiées durant cette période, constructions pour lesquelles l'intervention d'un bureau d'étude n'était pas fréquente.

Dans l'*Eurocode 8*, les dispositions à respecter sont très peu illustrées, ce qui ne facilite pas l'élaboration des projets. Cependant, lorsqu'elles ne sont pas en contradiction avec l'*Eurocode 8*, ce qui est généralement le cas, on peut s'inspirer des illustrations figurant dans les règles parasismiques et autres prescriptions techniques antérieures. De nombreuses illustrations de ce chapitre en sont tirées.

De même que dans les situations non sismiques, les dispositions constructives parasismiques doivent assurer l'intégrité et la résistance à l'arrachement des éléments structuraux sous l'effet des charges de calcul. Mais elles doivent également permettre à la structure d'accepter, grâce à la ductilité, de grandes déformations « plastiques » sans perte significative de résistance au lieu de rompre et s'effondrer.

Bien que les déformations plastiques ne soient pas réversibles, elles apportent des avantages importants :

- Sécurité vis-à-vis de l'effondrement, mentionnée ci-dessus.
- Dissipation importante de l'énergie des oscillations, ce qui réduit les amplitudes d'oscillation de la structure.
- Allongement de la durée de résistance.
- Plafonnement des efforts sollicitant les constructions, qui peuvent donc être dimensionnées pour des charges sismiques plus faibles, divisées par 2,5 dans le cas des constructions en maçonnerie, par 5 au plus dans celui des ouvrages en béton armé et par 6,5 au plus lorsque la structure est en acier. Ces valeurs correspondent au « coefficient de comportement q », diviseur des charges sismiques, donné dans l'*Eurocode 8-1* pour les différents types de construction [[FIG. VI•27](#)].
- Diminution du coût de la protection parasismique du bâtiment découlant de la réduction des charges de calcul.

Le plafonnement des charges apparaît sur la [FIG. VIII•1](#), qui montre une comparaison, à déformation ultime égale, entre la résistance requise pour les structures respectivement sans et avec les dispositions constructives parasismiques. La résistance requise est moins élevée dans le cas des constructions qui comportent des dispositions constructives permettant d'obtenir de grandes déformations.

Lorsque les dispositions constructives conférant une bonne ductilité à la structure principale ne sont pas respectées, sa capacité à se déformer au-delà de sa limite de résistance est réduite, ce qui se manifeste, sur le diagramme résistance/déformation, par un plateau plus court et une charge plus grande [[FIG. VIII•2](#)]. Une construction calculée pour des charges sismiques divisées par un coefficient de comportement réglementaire sera alors sous-dimensionnée, car elle pourra être exposée à une charge plus élevée. Il serait donc erroné de croire que le respect du calcul réglementaire suffit pour pallier l'inobservation, même partielle, des dispositions constructives parasismiques. *A contrario*, grâce à une ductilité supérieure au minimum exigé, les charges sismiques réelles pourraient être inférieures à celles résultant du calcul réglementaire. La construction posséderait dans ce cas une réserve de résistance supplémentaire. Enfin, il est important de réaliser que la complexité des détails constructifs nuit à la qualité d'exécution.

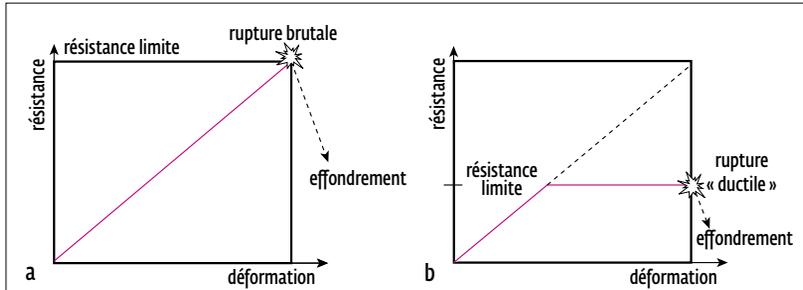


FIG. VIII • 1 Diagrammes résistance/déformation montrant une comparaison entre la résistance requise pour les structures qui admettent ou non de grandes déformations avant rupture.

- Structures sans dispositions constructives parasismiques (comportement dit « fragile »).
- Structures avec dispositions constructives parasismiques (comportement dit « ductile »).

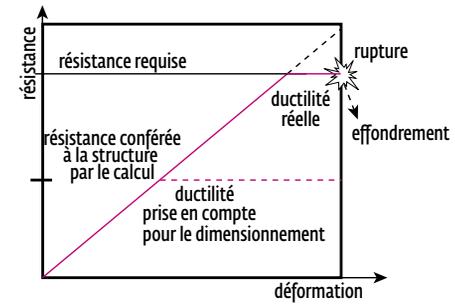


FIG. VIII • 2 Diagramme résistance/déformation montrant le sous-dimensionnement d'une construction qui ne respecte pas les dispositions constructives parasismiques concernant la ductilité.

VIII • 2 Sols et fondations

VIII • 2 • 1 Conditions de sol

L'expérience montre que les conditions de sol ont une incidence majeure sur le comportement des constructions lors d'un séisme. Le sol de fondation idéal est horizontal, sain, sec, ferme et homogène sur une épaisseur relativement importante, stable sous l'action de l'eau ou de vibrations. De tels terrains sont évidemment rares. Ceux que l'on rencontre posent souvent des problèmes particuliers pour la fondation des constructions. Contrairement à ce qu'on pourrait penser, les sols rocheux, qui transmettent facilement des vibrations grâce à leur rigidité, s'avèrent plus favorables que les sols mous, qui donnent lieu à des mouvements globaux et différentiels de grande amplitude et des accélérations importantes dans les basses fréquences. Ainsi, dans une même ville touchée par un tremblement de terre, des bâtiments de conception similaire peuvent être très endommagés ou au contraire ne subir que des dégâts mineurs selon qu'ils sont fondés sur un sol ferme ou un sol de faibles caractéristiques. La vulnérabilité aux séismes des constructions fondées sur les sols peu rigides est d'autant plus grande que leur fondation est moins profonde.

L'intensité des secousses augmente souvent avec l'épaisseur des dépôts sédimentaires au-dessus du substratum rocheux. Dans le cas des alluvions atteignant des épaisseurs de plus de 10 m, on observe l'effet de site lithologique, décrit au [paragraphe II • 1 • 2 • 2](#).

La nature et l'épaisseur des différentes couches de sol influent donc directement sur la réponse des constructions qui y sont fondées, et par là sur la valeur des charges sismiques de calcul. Par conséquent, une reconnaissance des sols est nécessaire. Elle doit permettre de déterminer leurs type et caractéristiques et à quelle classe réglementaire ils appartiennent. En outre, la stabilité des pentes, le risque de tassements importants, d'effondrements et de liquéfaction du sol doivent être vérifiés [cf. [paragraphe II • 1 • 3 Principaux effets induits](#)].

L'*Eurocode 8-1* définit 7 classes de sol, cf. [TABLEAU 19](#). Pour le calcul de l'action sismique, un spectre de réponse est associé respectivement aux sols A, B, C, D, et E [cf. [paragraphe IX • 3](#)]. En cas d'incertitude entre deux classes de sol, il est prudent d'utiliser le spectre enveloppe des deux classes. Dans le cas des sols de classe S_1 , qui peuvent donner lieu à une amplification des secousses par effets de site lithologique, l'action sismique doit être déterminée à partir d'une étude de site [cf. [paragraphe II • 1 • 2 • 2](#)]. La classe S_2 concerne les sols liquéfiables, pour lesquels des dispositions doivent être prises [cf. [paragraphe II • 1 • 3 • 1](#)].

Dans l'*Eurocode 8-1*, tableau 3.1., le paramètre principal de classification des sols retenu est la valeur moyenne de la vitesse des ondes de cisaillement, calculée sur les premiers 30 m de profondeur. Si elle n'est pas disponible, les valeurs obtenues par des essais de pénétration standard (SPT) devraient être utilisées. Il s'agit du nombre de coups nécessaires pour enfoncer un carottier 30 cm dans le sol. Le troisième critère figurant au Tableau 3.1. de l'*Eurocode 8-1* est la résistance au cisaillement du sol non drainé. Elle est déterminée in situ par scissomètre ou, pour des sols très rigides, par essai triaxial en laboratoire. Par ailleurs, l'*Eurocode 8-5* indique qu'il convient d'inclure dans la reconnaissance de sol des essais de pénétration au cône, éventuellement avec des mesures de pression interstitielle, car ils fournissent un enregistrement continu des caractéristiques mécaniques du sol en fonction de la profondeur. Afin de pouvoir tenir compte des essais de sol fréquemment utilisés en France, le [TABLEAU 19](#) ci-dessous inclut, pour les classes de sol définies dans l'*Eurocode 8-1*, également les ordres de grandeur des valeurs correspondantes obtenues par un pénétromètre statique (résistance de pointe q_c) et un pressiomètre de Ménard (module pressiométrique E_M et pression limite P_l).

	DESCRIPTION DU PROFIL STRATIGRAPHIQUE	PARAMÈTRES			ORDRE DE GRANDEUR		
		$V_{s,30}$ (m/s)	NSPT	C_u (kPa)	q_c (MPa)	EM (MPa)	P_l (MPa)
A	Rocher ou autre formation géologique de ce type comportant une couche superficielle d'au plus 5 m de matériau moins résistant.	> 800	—	—		> 100	> 5
B	Dépôts raides de sables, de graviers ou d'argiles surconsolidées, d'au moins plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, caractérisés par une augmentation progressive des propriétés mécaniques avec la profondeur.	360 - 800	> 50	> 250	> 3,5 (argile) > 20 (sable)	25 - 100	> 1,2 (argile) 2,0 à 5,0 (sable)
C	Dépôts profonds de sables de densité moyenne, de graviers ou d'argiles moyennement raides ayant des épaisseurs de quelques dizaines à quelques centaines de mètres.	180 - 360	15 - 50	70 - 250	de 1 à 3,5 (argile) de 6 à 20 (sable)	5 - 25	0,5 à 1,2 (argile) 0,8 à 2 (sable)
D	Dépôts de sol sans cohésion de densité faible à moyenne (avec ou sans couches cohérentes molles) ou comprenant une majorité de sols cohérents mous à fermes.	< 180	< 15	< 70	< 1 (argile) < 6 (sable)	< 5	< 0,5 (argile) < 0,8 (sable)
E	Profil de sol comprenant une couche superficielle d'alluvions avec des valeurs de V_s de classe C ou D et une épaisseur comprise entre 5 m environ et 20 m, reposant sur un matériau plus raide avec $V_s > 500$ m/s.						
S1	Dépôts composés, ou contenant une couche d'au moins 10 m d'épaisseur d'argiles molles/vases avec un indice de plasticité élevé ($P_l > 40$) et une teneur en eau importante.	< 100		10 - 20	< 0,6		< 0,2
S2	Dépôts de sols liquéfiables d'argiles sensibles ou tout autre profil de sol non compris dans les classes A à E ou S1.						

TABLEAU 19 Tableau des classes de sol de l'Eurocode 8-1 complété par des ordres de grandeur des valeurs correspondantes obtenues par un pénétromètre statique et un pressiomètre de Ménard (d'après AFPS/CFMS).

En ce qui concerne les bâtiments simples en maçonnerie, l'annexe nationale à l'Eurocode 8-1 précise que le fait de ne pas faire de vérification par le calcul de la sécurité vis-à-vis de l'effondrement ne dispense pas d'examiner les conditions de sol. Il convient donc de prévoir des essais de sol également dans ce cas, car une simple évaluation visuelle peut s'avérer erronée.

Les guides CPMI-EC8 distinguent, en tant qu'alternative à la classification de l'Eurocode 8, des catégories (et non classes) de sol simplifiées.

En zones 3 et 4 :

- catégorie de sol 1 : rocher
- catégorie de sol 2 : sols non rocheux tels que sables denses ou sables lâches hors nappe phréatique, argiles raides ou argiles molles hors nappe phréatique.

En zone 5 (Antilles) :

- catégorie de sol 1 : rocher
- catégorie de sol 2 a : sables denses et argiles raides
- catégorie de sol 2 b : sables lâches hors nappe et alluvions molles hors nappe.

En présence de vases, argiles, alluvions molles et sables lâches sous la nappe phréatique, les guides CPMI-EC8 ne s'appliquent pas.

Un tableau fournit des éléments de classement des sols en fonction de paramètres mesurés au moyen d'un pénétromètre statique ou d'un pressiomètre de Ménard.

Si la pente du site de construction est stable et ne dépasse pas 10 %, il n'y a pas de restriction à l'utilisation des guides CPMI-EC8. Si elle est comprise entre 10 et 35 %, il est nécessaire de justifier sa stabilité par un bureau d'étude spécialisé. Dans le cas d'une pente supérieure à 35 %, les guides CPMI-EC8 ne s'appliquent pas.

VIII • 2 • 2

Choix du niveau de fondation en fonction du sol d'assise

À moins qu'il ne s'agisse d'un affleurement rocheux, il est préférable de ne pas fonder les constructions sur la couche superficielle du sol, même si sa capacité portante est suffisante. Les couches plus profondes sont souvent plus rigides et l'amplitude des secousses y est plus faible. Les couches superficielles subissent des variations saisonnières de volume dues à leurs humidification et assèchement successifs. Par ailleurs, il faut également veiller à ne pas fonder les constructions au-dessus de la profondeur limite de gel qui varie en France selon les régions de 30 cm à 150 cm. Dans les sols gélifs (sols cohérents), des lentilles de glace peuvent provoquer des altérations des sols qui entraînent, au moment du dégel, une baisse de leur capacité portante. Dans tous les cas, il est recommandé que la profondeur d'encaissement dans le sol ne soit pas inférieure à 1/10 de la hauteur de la construction avec un minimum de 60 cm.

Il est important de noter que lorsqu'on trouve un bon sol, il faut s'assurer que son épaisseur est suffisante et qu'il ne repose pas sur un milieu peu résistant ou instable. Les terrains dont la qualité diminue avec la profondeur sont impropres à l'implantation des ouvrages parasismiques.

Les sols rocheux non fissurés constituent une excellente assise pour les constructions parasismiques. Viennent ensuite par ordre décroissant de qualité les sols cohérents durs et secs, les sables et graviers très denses, rocher altéré, les sols argilo-graveleux, les sols granulaires moyennement compacts, sols cohérents moyennement consistants et craies tendres. Dans tous les cas, il convient d'opter pour une couche de sol homogène, étant donné que sous l'action sismique les tassements différentiels du sol jouent un rôle plus important que sa capacité portante.

Les règles parasismiques simplifiées *PS-MI 89/92* et les guides *CPMI-EC8* excluent de leur domaine d'application les constructions fondées sur des sols mal consolidés et/ou de portance ultime inférieure à 250 kN/m² (2,5 bars). À défaut de connaissance de la résistance à la compression du sol, ne sont pas admises les constructions fondées sur des sols tels que vases, tourbe, éboulis, alluvions récentes, alluvions épaisses molles, remblais non compactés, qui ont une faible portance et donnent lieu à des tassements excessifs et irréguliers.

De même, les constructions ne devraient pas être fondées sur des sols fortement fracturés, sur des sols pulvérulents (dont la structure s'effondre au dessèchement) et sur des argiles molles, qui subissent de fortes variations de volume en fonction des fluctuations de leur teneur en eau. D'une manière générale, il convient d'éviter tous les sols argileux dont la teneur en eau pourrait varier. Bien que leur comportement immédiat sous l'action sismique soit quelquefois plus favorable que celui des sols granulaires, les sols argileux sont souvent à l'origine des dégradations lentes et progressives des constructions qui y sont fondées. Pendant les périodes de sécheresse ou en présence de jeunes arbres à proximité des maisons, des tassements non uniformes peuvent être observés, entraînant des fissurations des maçonneries qui diminuent leur résistance aux séismes. Une augmentation de teneur en eau provoque le gonflement des argiles. Celui-ci entraîne une baisse de leur résistance. Or il est difficile de se prémunir contre toutes les arrivées d'eau dont la provenance peut être diverse : pluies abondantes, inondations, couverture neigeuse, dégel, rabattement de nappes aquifères, fuites de réseaux, puisards, etc. La présence d'argiles est particulièrement dangereuse sur les versants.

Lorsque le sol en surface est de mauvaise qualité, afin d'éviter le recours aux fondations profondes, un traitement ou une substitution du sol d'assise peut être envisagé.

Le traitement des sols améliore in situ leurs propriétés mécaniques et les conditions hydrauliques. De nombreuses techniques sont utilisées et font l'objet d'une bibliographie. Le sol peut également être remplacé sur une certaine profondeur par des remblais sableux ou sablo-graveleux de bonne qualité, fortement compactés par couches de 20 à 30 cm d'épaisseur. Ce procédé est particulièrement avantageux pour supprimer l'influence d'hétérogénéités locales. Les remblais doivent être confinés par encagement dans une masse suffisante de terrain naturel, par des murs de soutènement ou par la mobilisation mécanique d'une certaine surlargeur sur leur contour^[30].

VIII • 2 • 3

Interaction sol-structure

Lors de cette interaction, de l'énergie est dissipée par deux mécanismes distincts : atténuation par radiation, appelée également amortissement géométrique ou pseudo-amortissement, et amortissement interne du sol, produit par ses déformations inélastiques sous chargement cyclique [cf. [paragraphe VI•2•7•1](#)].

Selon l'*Eurocode 8-5*, les deux types d'amortissement doivent être considérés séparément et l'interaction sol-structure prise obligatoirement en compte dans le calcul dans les cas suivants, car ses effets peuvent y être préjudiciables :

- structures pour lesquelles les effets P-delta sont significatifs ;
- structures avec fondations massives ou profondes, comme les piles de ponts, les caissons offshore et les silos ;
- structures hautes et élancées, comme les tours industrielles et les cheminées, traitées dans l'*Eurocode 8-6* ;

- structures supportées par des sols très mous, tels que des sols de classe S_1 , avec une vitesse moyenne de propagation des ondes de cisaillement inférieure à 100 m/s ;
- toutes les structures fondées sur pieux.

Les Règles PS 92 demandaient que l'interaction sol-structure soit prise en compte dans le calcul des fondations profondes en cas de leur résonance avec le sol, en considérant qu'elle ne se produit pas lorsque le rapport

$$\left(\frac{T_s}{T_i}\right)^2$$

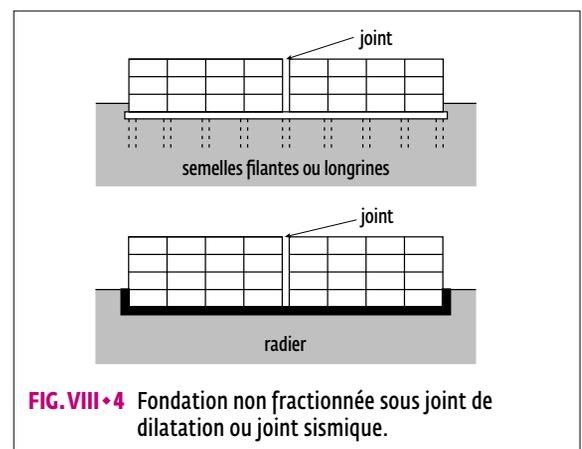
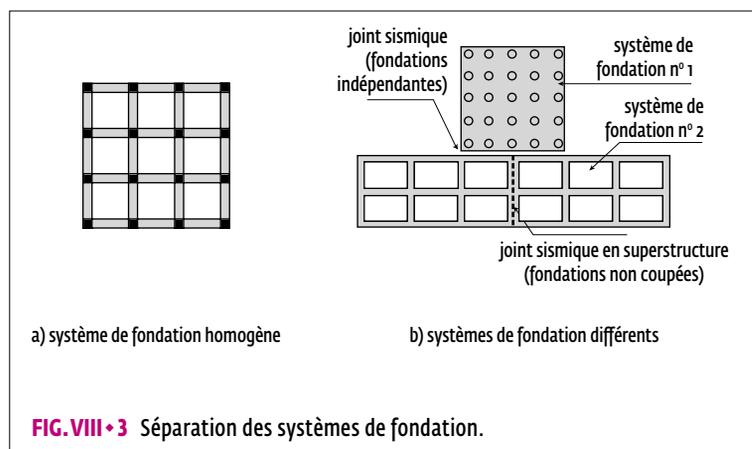
est inférieur à 0,64 ou supérieur à 1,56, T_s étant la période fondamentale de la couche du sol et T_i la période propre en translation du système de fondation, calculée en supposant le sol immobile.

VIII • 2 • 4 Fondations

VIII • 2 • 4 • 1 Dispositions générales

En situation sismique, le choix des fondations s'effectue selon les mêmes critères qu'en situation non sismique et leur conception doit respecter les clauses correspondantes des Eurocodes 2 et 7. Toutefois, si plusieurs solutions correspondant à des niveaux d'assise différents peuvent être envisagées, les fondations les plus profondes sont à préférer. Par ailleurs, dans ses parties 1 et 5, l'Eurocode 8 énonce un certain nombre de dispositions communes, spécifiques aux conditions sismiques :

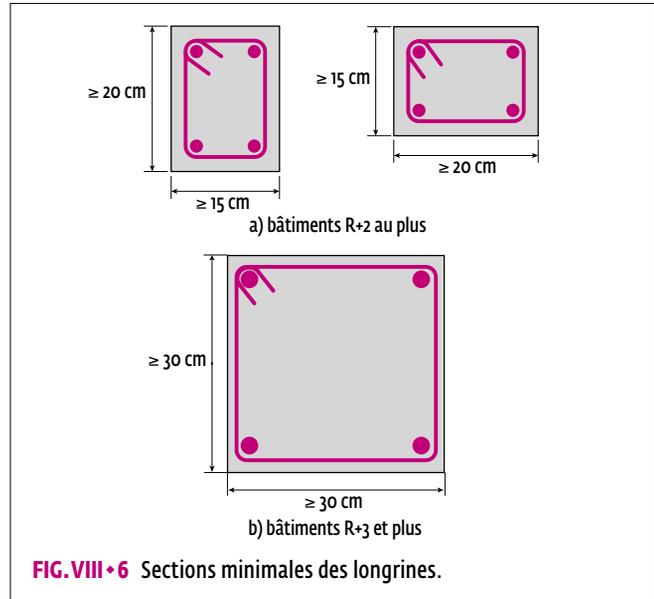
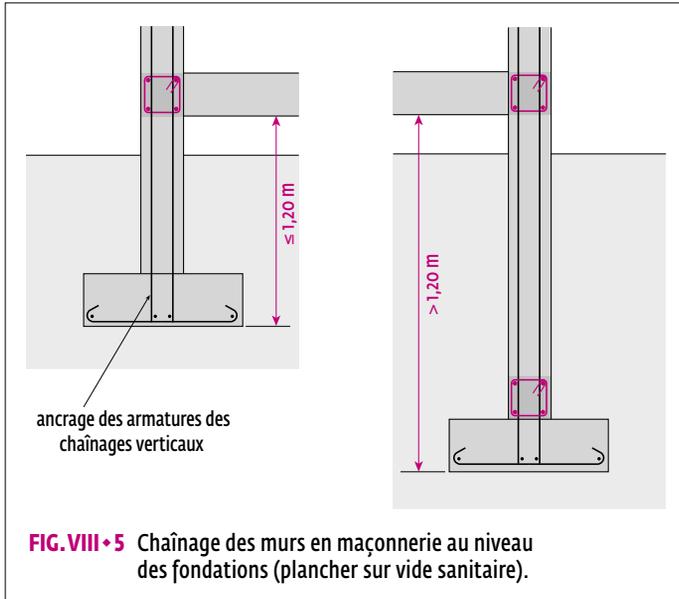
- Le système de fondation doit être homogène sous tout le bâtiment ou dans chacune de ses parties délimitées par des joints de fractionnement [FIG. VIII • 3]. D'une manière générale, pour éviter un chargement dissymétrique, il convient d'arrêter au-dessus des fondations les joints de fractionnement de la superstructure chaque fois que la nature du sol et le mode de fondation le permettent [FIG. VIII • 4]. Mais lorsque deux systèmes de fondation différents sont utilisés, ils doivent être séparés par un joint de fractionnement. L'excentrement de la résultante des charges verticales devrait toujours rester inférieur ou égal au quart de la largeur de la fondation. Le recours à des longrines de redressement est souvent nécessaire.



- La fondation doit être suffisamment rigide pour transmettre au sol de la manière la plus uniforme possible les actions localisées reçues de la superstructure. Ainsi, pour les structures composées d'un nombre limité de murs porteurs d'épaisseurs et de rigidités différentes, une fondation sur radier double ou sur un sous-sol formant caisson est recommandée. Les structures comportant des éléments de contreventement de raideurs sensiblement différentes nécessitent également une fondation rigide.

- Les déplacements relatifs horizontaux des fondations doivent être évalués et des dispositions appropriées prises pour les minimiser. Dans le cas des bâtiments, cette exigence est considérée satisfaite si les fondations sont disposées dans un même plan horizontal et si elles sont solidarisées par des longrines ou un dallage armé placés entre les semelles ou, s'il y a lieu, en tête des fondations profondes. Ces mesures ne sont pas nécessaires dans le cas des sols de classe A et, en zone de sismicité 2, pour les sols de classe B. Dans ces conditions, les fondations doivent être coulées à pleine fouille, sans coffrage, pour assurer une transmission correcte des efforts horizontaux au sol.

Les éléments de liaison « travaillent » alternativement comme buton et tirant et doivent donc être dimensionnés pour résister à la compression et à la traction. L'Eurocode 8-5 et les guides CPMI-EC8 admettent que les chaînages ou les



poutres du plancher sur vide sanitaire, ainsi qu'un dallage armé, jouent le rôle de longrines s'ils sont situés à moins d'un mètre de la face inférieure de la semelle ou de la tête de pieux. Par ailleurs, l'annexe nationale à l'*Eurocode 8-1* et les règles parasismiques *PS-MI 89/92* considèrent que ces planchers et dallage assurent également la fonction de chaînage des murs en maçonnerie au niveau des fondations s'ils sont situés à 1,20 m au plus [FIG. VIII • 5].

Lorsque la distance entre les éléments porteurs verticaux dépasse 10 à 15 m, la réalisation des liaisons horizontales entre fondations isolées peut être délicate. Dans ce cas, il peut être plus adapté de s'en abstenir et de tenir compte des oscillations différentielles dans le dimensionnement de la structure^[26]. Un modèle 3D de l'action sismique doit être utilisé.

Les fondations isolées à assise plus profonde peuvent être liaisonnées par l'un des ouvrages suivants :

- Longrines disposées dans les deux directions principales

L'annexe nationale à l'*Eurocode 8-1* précise les sections minimales des longrines : $15 \times 20 \text{ cm}$ ou $20 \times 15 \text{ cm}$ pour les bâtiments comportant jusqu'à 3 niveaux et $30 \times 30 \text{ cm}$ pour les bâtiments plus hauts [FIG. VIII • 6]. Le pourcentage d'armatures longitudinales est de 0,2 % par face, avec un minimum d'armatures de 3 cm^2 . Les barres doivent être complètement ancrées dans la largeur de la semelle ou dans les longrines suivantes. Le nœud entre une longrine et un élément vertical doit être armé comme un nœud poteau-poutre [FIG. VIII • 7].

Afin d'éviter l'effet de poteau court sous les longrines, leur face inférieure doit se trouver en dessous de la face supérieure de la semelle ou de la semelle sur pieu [FIG. VIII • 8].

- Dallage sur empierrement comportant des armatures de liaison

La liaison entre fondations isolées est assurée par des longrines noyées dans le dallage, formant des bandes d'une largeur minimale de 30 cm pour les bâtiments de 3 niveaux au plus et de 40 cm pour les bâtiments plus élevés. Le pourcentage minimal d'armature sur les faces inférieure et supérieure est de 0,4 % sur une largeur du dallage

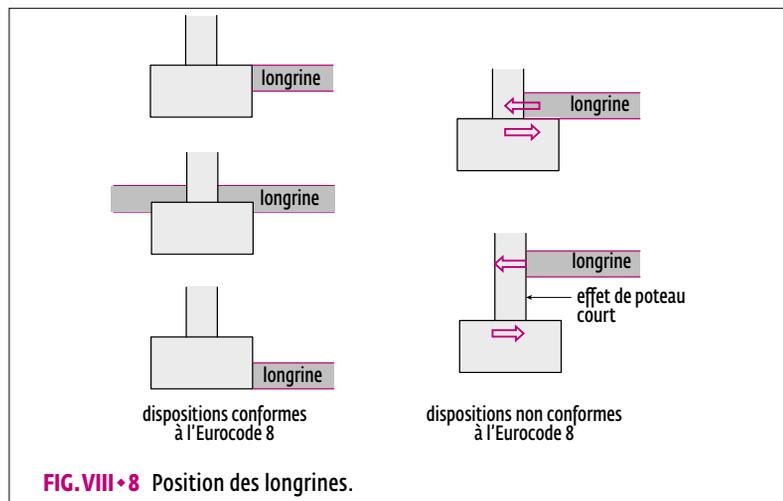
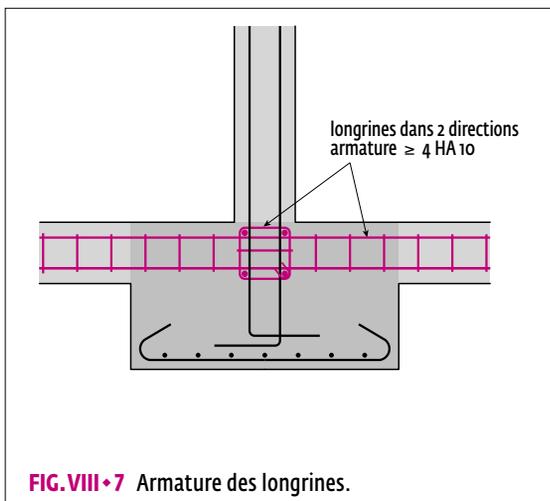


TABLE DES TABLEAUX ET ENCADRÉS

TABLEAU 1	Échelle d'intensité macrosismique EMS 98	19
TABLEAU 2	Classification des dommages sismiques selon l'EMS 98	20
TABLEAU 3	Classes de vulnérabilité des bâtiments aux séismes selon l'EMS 98	21
TABLEAU 4	Magnitude conventionnelle pour l'analyse de la liquéfaction du sol	29
TABLEAU 5	Distance L_g au-delà de laquelle les mouvements sismiques du sol peuvent être considérés comme indépendants	43
TABLEAU 6	Grille d'évaluation de la présomption de vulnérabilité	50
TABLEAU 7	Coefficients d'importance des bâtiments	60
TABLEAU 8	Accélérations de référence au rocher	60
TABLEAU 9	Paramètres de sol	60
TABLEAU 10	Périmètre d'application obligatoire des règles parasismiques aux bâtiments neufs	65
TABLEAU 11	Périmètre d'application obligatoire des règles parasismiques aux bâtiments existants	65
TABLEAU 12	Travaux sur l'existant donnant lieu à application obligatoire de règles parasismiques	65
TABLEAU 13	Accélérations de référence au rocher pour les ICPE à risque spécial nouvelles (arrêté du 15 février 2018)	68
TABLEAU 14	Accélérations de référence au rocher pour les ICPE à risque spécial existantes (arrêté du 15 février 2018)	68

TABLEAU 15	Paramètres de sol pour les ICPE à risque spécial (classes de sol de l'Eurocode 8-1)	68
TABLEAU 16	Choix du système porteur en zone sismique	86
TABLEAU 17	Périodes propres fondamentales approximatives des bâtiments	116
TABLEAU 18	Principales recommandations pour la conception d'ensemble des bâtiments	170
TABLEAU 19	Tableau des classes de sol de l'Eurocode 8-1 complété par des ordres de grandeur des valeurs correspondantes obtenues par un pénétromètre statique et un pressiomètre de Ménard	175
TABLEAU 20	Solidarisation de la dalle collaborante avec les dalles alvéolées	195
TABLEAU 21	Espacement minimal de pointes (Eurocode 5)	199
TABLEAU 22	Épaisseurs minimales des panneaux en bois, en mm (Guide CPMI-EC8 zones 3-4)	201
TABLEAU 23	Valeurs minimales de la somme des sections transversales des murs de contreventement dans chaque direction, en pourcentage de la surface totale de chaque niveau (Annexe nationale à l'Eurocode 8-1)	206
TABLEAU 24	Valeurs du coefficient k (Règles PS-MI 89/92)	210
TABLEAU 25	Distances maximales entre raidisseurs verticaux pour les murs en adobe	222
TABLEAU 26	Ténacité des aciers et épaisseurs maximales des tôles selon la classe de ductilité (Annexe nationale à l'Eurocode 8-1)	250
TABLEAU 27	Classes de ductilité des structures en bois (Eurocode 8-1 et Annexe nationale)	264
TABLEAU 28	Sections minimales des éléments de stabilité des fermettes (Guide CPMI-EC8 zones 3-4)	273
TABLEAU 29	Familles d'éléments non structuraux du cadre bâti	286
TABLEAU 30	Éléments non structuraux du cadre bâti soumis à l'obligation de protection parasismique	287
TABLEAU 31	Choix des vitrages en fonction des objectifs de protection sismique (d'après le DTU 39P5)	293
TABLEAU 32	Composition des vitrages isolants inclinés (d'après le DTU 39P5)	293
TABLEAU 33	Protection des câbles et des chaînes des ascenseurs	313

TABLEAU 34		
	Résumé des dispositions parasismiques relatives aux ascenseurs	314
TABLEAU 35		
	Périodes TB, TC et TD des composantes horizontales du mouvement sismique (Arrêté du 22 octobre 2010 modifié)	343
TABLEAU 36		
	Périodes TB, TC et TD des composantes verticales du mouvement sismique (Arrêté du 22 octobre 2010 modifié le 1er août 2022)	343
ENCADRÉ 1		
	Exemple d'instructions de comportement avant, pendant et après un séisme	55
ENCADRÉ 2		
	Période propre d'un bâtiment. Modes d'oscillation	112
ENCADRÉ 3		
	Exemples d'évaluation de la période propre des sols	115
ENCADRÉ 4		
	Joints sismiques	118
ENCADRÉ 5		
	Effet de niveau « souple »	127
ENCADRÉ 6		
	Effet de poteau court	131
ENCADRÉ 7		
	Principe « poteau fort-poutre faible »	136
ENCADRÉ 8		
	Systèmes fonctionnant en pendule inversé	138

TABLE

AVANT-PROPOS	5
INTRODUCTION	7
CHAPITRE I	
LES TREMBLEMENTS DE TERRE	9
I•1	
La tectonique des plaques et la genèse des tremblements de terre	9
I•2	
Géographie des séismes	11
I•3	
Classement des séismes	12
I•3•1	
Séismes déclenchés par l'homme	12
I•3•2	
Séismes naturels	13
I•4	
Ondes sismiques	14
I•5	
Enregistrement des séismes	15
I•6	
Mesure de la force des séismes	17
I•6•1	
Puissance des séismes : la magnitude	17
I•6•2	
Effets des séismes : l'échelle macrosismique d'intensité	18
CHAPITRE II	
EFFETS ENGENDRÉS PAR LES TREMBLEMENTS DE TERRE	25
II•1	
Effets sur l'environnement naturel	25
II•1•1	
Types d'effets sur l'environnement naturel	25
II•1•2	
Effets de site	25
II•1•2•1	
Effets topographiques	25
II•1•2•2	
Effets lithologiques	27

II • 1 • 3	Principaux effets induits	28
II • 1 • 3 • 1	Liquéfaction des sols	28
II • 1 • 3 • 2	Glissement et éboulement de terrains	29
II • 1 • 3 • 3	Tassements importants, affaissements et effondrements de terrains	32
II • 1 • 3 • 4	Tsunami	32
II • 1 • 3 • 5	Seiches	34
II • 1 • 4	Apparition en surface de la faille sismogène	34
II • 2	Effets sur les constructions : aspects généraux	36
II • 2 • 1	Nature des charges sismiques	36
II • 2 • 2	Oscillations horizontales	36
II • 2 • 3	Oscillations verticales	40
II • 2 • 4	Oscillations de torsion.	41
II • 2 • 5	Déformations imposées par les variations spatiales du mouvement du sol	43
II • 3	Effets sur l'homme	43

CHAPITRE III

LE RISQUE SISMIQUE ET SA PRÉVENTION 45

III • 1	Notion de risque sismique	45
III • 2	Aléa sismique	45
III • 2 • 1	Définition	45
III • 2 • 2	Aléa sismique régional	45
III • 2 • 3	Aléa sismique local	46
III • 3	Vulnérabilité des constructions aux séismes	46
III • 4	Prévention du risque sismique	47
III • 4 • 1	Stratégies de prévention	47
III • 4 • 2	Protection des constructions contre les effets des séismes	48
III • 4 • 2 • 1	Construction neuve	48

III • 4 • 2 • 2	Bâtiments existants	49
III • 4 • 3	Aménagement du territoire	51
III • 4 • 3 • 1	Plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPR)	51
III • 4 • 3 • 2	Urbanisme parasismique	52
III • 4 • 4	Information et formation	54
III • 4 • 4 • 1	Droit à l'information préventive sur les risques	54
III • 4 • 4 • 2	Formation en protection parasismique des bâtiments	56
III • 4 • 5	Organisation pour la gestion de crise	56

CHAPITRE IV

RÉGLEMENTATION PARASISMIQUE DES BÂTIMENTS 57

IV • 1	Objet de la réglementation parasismique	57
IV • 2	Classification des ouvrages	57
IV • 2 • 1	Ouvrages à risque normal (ORN)	58
IV • 2 • 2	Ouvrages à risque spécial (ORS)	59
IV • 3	Zonage sismique réglementaire	59
IV • 4	Niveau de protection des ouvrages à risque normal	60
IV • 4 • 1	Protection minimale	60
IV • 4 • 1 • 1	Intensité du mouvement sismique sur site	60
IV • 4 • 1 • 2	Exigences de performance des bâtiments	61
IV • 4 • 2	Règles parasismiques autorisées	61
IV • 4 • 3	Bâtiments à risque normal soumis à obligation d'appliquer des règles parasismiques	63
IV • 4 • 4	Historique des règles parasismiques françaises pour les bâtiments à risque normal	66
IV • 5	Protection des ouvrages à risque spécial (ORS)	67
IV • 5 • 1	Installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE)	67
IV • 5 • 2	Barrages	69
IV • 5 • 3	Installations nucléaires	69

IV•6	Limites de la protection parasismique réglementaire	70
-------------	--	-----------

CHAPITRE V

	CHOIX DU TERRAIN À CONSTRUIRE, IMPLANTATION DES BÂTIMENTS	71
--	--	-----------

CHAPITRE VI

	DE LA STRUCTURE	73
--	------------------------	-----------

VI•1	Caractéristiques générales des structures	73
-------------	--	-----------

VI•1•1	Actions mécaniques sur les structures. Charges	73
---------------	---	-----------

VI•1•2	Solidité	74
---------------	-----------------	-----------

VI•1•3	Stabilité d'ensemble	74
---------------	-----------------------------	-----------

VI•1•3•1	Définition	74
-----------------	-------------------	-----------

VI•1•3•2	Stabilité d'ensemble interne	75
-----------------	-------------------------------------	-----------

VI•1•3•3	Contreventement	75
-----------------	------------------------	-----------

VI•1•4	Résistance mécanique des éléments structuraux	79
---------------	--	-----------

VI•1•5	Rigidité	79
---------------	-----------------	-----------

VI•1•6	Comportement ductile et comportement fragile	80
---------------	---	-----------

VI•1•7	Structures isostatiques et structures hyperstatiques	81
---------------	---	-----------

VI•2	Structures parasismiques	82
-------------	---------------------------------	-----------

VI•2•1	Pourquoi certains bâtiments résistent aux séismes et d'autres non	83
---------------	--	-----------

VI•2•2	Stratégies de protection parasismique des bâtiments	83
---------------	--	-----------

VI•2•3	Choix du système porteur	84
---------------	---------------------------------	-----------

VI•2•4	Choix du matériau de structure	88
---------------	---------------------------------------	-----------

VI•2•5	Structure principale et structure secondaire	90
---------------	---	-----------

VI•2•6	Mécanisme de résistance des constructions aux séismes	90
---------------	--	-----------

VI•2•7	Capacité des constructions à dissiper l'énergie	92
---------------	--	-----------

VI•2•7•1	Mécanismes de dissipation d'énergie	92
-----------------	--	-----------

VI • 2 • 7 • 2	Ductilité des structures	94
VI • 2 • 7 • 3	Amortisseurs parasismiques	99
VI • 2 • 8	Utilisation d'une masse passive	107
VI • 2 • 9	Contrôles actif et semi-actif	108

CHAPITRE VII

PARTI ARCHITECTURAL : ESQUISSE ET AVANT-PROJET

VII • 1	Incidence de l'architecture sur le comportement d'un bâtiment exposé aux séismes	111
VII • 2	Résonance du bâtiment avec le sol	112
VII • 3	Dimensions horizontales des bâtiments	117
VII • 4	Parti architectural en plan	120
VII • 4 • 1	Plans de forme sensiblement carrée ou rectangulaire	121
VII • 4 • 2	Plans comportant des ailes, des retraits ou des surfaces en saillie	143
VII • 4 • 3	Plans de forme trapézoïdale	147
VII • 4 • 4	Plans de forme triangulaire	148
VII • 4 • 5	Plans de forme circulaire, elliptique ou polygonale proche du cercle	149
VII • 4 • 6	Plans de forme irrégulière	151
VII • 5	Parti architectural en élévation	151
VII • 5 • 1	Bâtiments de dimensions horizontales constantes sur toute sa hauteur	151
VII • 5 • 2	Bâtiments comportant un ou plusieurs niveaux en retrait et bâtiments en forme de pyramide	151
VII • 5 • 3	Bâtiments comportant un ou plusieurs niveaux saillants	156
VII • 5 • 4	Bâtiments « inclinés »	157
VII • 5 • 5	Bâtiments-ponts	157
VII • 5 • 6	Constructions adossées à une pente	158
VII • 6	Cas particulier des coques	159

VII • 7	Cas particulier des membranes textiles	160
VII • 7 • 1	Caractéristiques générales	160
VII • 7 • 2	Membranes gonflées	160
VII • 7 • 3	Membranes portées	161
VII • 8	Cas particulier des constructions à toitures en câbles	161
VII • 9	Parties de bâtiment	162
VII • 9 • 1	Angles de bâtiment	162
VII • 9 • 2	Escaliers	164
VII • 9 • 2 • 1	Escaliers intérieurs	164
VII • 9 • 2 • 2	Escaliers extérieurs	165
VII • 9 • 3	Mezzanines et galeries	166
VII • 9 • 4	Balcons, auvents et autres éléments en porte-à-faux	167
VII • 9 • 5	Passerelles et escaliers entre bâtiments	169
VII • 9 • 6	Recommandations communes pour la conception d'ensemble	170

CHAPITRE VIII

PROJET D'EXÉCUTION ET RÉALISATION 173

VIII • 1	Dispositions constructives parasismiques	173
VIII • 2	Sols et fondations	174
VIII • 2 • 1	Conditions de sol	174
VIII • 2 • 2	Choix du niveau de fondation en fonction du sol d'assise	176
VIII • 2 • 3	Interaction sol-structure	176
VIII • 2 • 4	Fondations	177
VIII • 2 • 4 • 1	Dispositions générales	177
VIII • 2 • 4 • 2	Fondations superficielles	180
VIII • 2 • 4 • 3	Niveaux enterrés formant un caisson rigide	183
VIII • 2 • 4 • 3	Fondations profondes	183

VIII ♦ 3		
	Planchers	188
VIII ♦ 3 ♦ 1	Rôle des planchers en situation sismique	188
VIII ♦ 3 ♦ 2	Facteurs de rigidité des planchers-diaphragmes	190
VIII ♦ 3 ♦ 3	Dispositions constructives parasismiques pour les planchers	191
VIII ♦ 3 ♦ 3 ♦ 1	Dispositions nécessaires pour assurer la « fonction diaphragme » des planchers	191
VIII ♦ 3 ♦ 3 ♦ 2	Dalle pleine en béton armé coulé en place	191
VIII ♦ 3 ♦ 3 ♦ 3	Plancher à prédalles	193
VIII ♦ 3 ♦ 3 ♦ 4	Plancher à dalles alvéolées	195
VIII ♦ 3 ♦ 3 ♦ 5	Planchers à poutrelles et entrevous	196
VIII ♦ 3 ♦ 3 ♦ 6	Plancher en dalle mixte avec tôles nervurées en acier (plancher collaborant)	198
VIII ♦ 3 ♦ 3 ♦ 7	Plancher en panneaux à base de bois	199
VIII ♦ 3 ♦ 3 ♦ 8	Plancher en lames de bois massif	201
VIII ♦ 4		
	Constructions en maçonnerie	201
VIII ♦ 4 ♦ 1	Pathologie sismique des constructions en maçonnerie	201
VIII ♦ 4 ♦ 2	Types de construction en maçonnerie admis par l'Eurocode 8 et l'Annexe nationale	204
VIII ♦ 4 ♦ 3	Conception d'ensemble	204
VIII ♦ 4 ♦ 3 ♦ 1	L'Eurocode 8-1 — règles générales	204
VIII ♦ 4 ♦ 3 ♦ 2	Eurocode 8-1 — bâtiments simples en maçonnerie	205
VIII ♦ 4 ♦ 3 ♦ 3	Guides CPMI-EC8 — Construction parasismiques des maisons individuelles	207
VIII ♦ 4 ♦ 3 ♦ 4	Règles PS-MI 89 révisées 92 — Construction parasismique des maisons individuelles et des bâtiments assimilés	209
VIII ♦ 4 ♦ 3 ♦ 5	Règles de bonne conception	210
VIII ♦ 4 ♦ 4	Matériaux et jointoiements	211
VIII ♦ 4 ♦ 5	Dispositions constructives	212
VIII ♦ 4 ♦ 5 ♦ 1	Chainages	212
VIII ♦ 4 ♦ 5 ♦ 2	Ouvertures pour fenêtres et portes	219
VIII ♦ 4 ♦ 5 ♦ 3	Saignées dans les murs participant au contreventement	220
VIII ♦ 4 ♦ 5 ♦ 4	Mise en place des maçonneries	220
VIII ♦ 4 ♦ 5 ♦ 5	Cas particulier des maçonneries en terre crue	221

VIII • 5	Constructions en béton armé	224
VIII • 5 • 1	Pathologie sismique des constructions en béton armé	224
VIII • 5 • 2	Types de structure en béton armé selon l'Eurocode 8	228
VIII • 5 • 3	Classes de ductilité	228
VIII • 5 • 4	Dispositions communes	229
VIII • 5 • 4 • 1	Zones critiques	229
VIII • 5 • 4 • 2	Matériaux	229
VIII • 5 • 4 • 3	Continuité des barres d'armature	229
VIII • 5 • 4 • 4	Ancrage des armatures transversales	230
VIII • 5 • 5	Ossatures en portiques coulées en place (ossatures contreventées par effet de portique)	231
VIII • 5 • 5 • 1	Principe de protection selon l'Eurocode 8 (structures de classes DCM et DCH)	231
VIII • 5 • 5 • 2	Poutres primaires	233
VIII • 5 • 5 • 3	Poteaux primaires	234
VIII • 5 • 5 • 4	Nœuds poteau-poutre	235
VIII • 5 • 5 • 5	Panneaux de remplissage en maçonnerie	235
VIII • 5 • 6	Structures comportant des murs primaires en béton coulé en place	238
VIII • 5 • 6 • 1	Généralités	238
VIII • 5 • 6 • 2	Murs ductiles	238
VIII • 5 • 6 • 3	Murs ductiles couplés	241
VIII • 5 • 6 • 4	Murs de grandes dimensions en béton peu armé.	243
VIII • 5 • 7	Ossatures en poteaux et poutre préfabriqués	243
VIII • 5 • 8	Constructions en panneaux préfabriqués de grandes dimensions	245
VIII • 5 • 9	Dispositions constructives pour la structure secondaire	246
VIII • 6	Constructions en acier	247
VIII • 6 • 1	Pathologie sismique des constructions en acier	247
VIII • 6 • 2	Types de structure en acier selon l'Eurocode 8	248
VIII • 6 • 3	Classes de ductilité	249
VIII • 6 • 4	Dispositions communes	249

VIII ♦ 6 ♦ 4 ♦ 1		
Matériaux		249
VIII ♦ 6 ♦ 4 ♦ 2		
Zones dissipatives		249
VIII ♦ 6 ♦ 4 ♦ 3		
Assemblages		250
VIII ♦ 6 ♦ 5		
Ossatures en portique		252
VIII ♦ 6 ♦ 6		
Ossatures avec triangulation à barres centrées		253
VIII ♦ 6 ♦ 7		
Ossatures avec triangulation à barres excentrées		254
VIII ♦ 6 ♦ 8		
Structures avec noyaux ou murs en béton		255
VIII ♦ 6 ♦ 9		
Ossatures en portiques combinés avec une triangulation à barres centrées		255
VIII ♦ 6 ♦ 10		
Ossatures en portiques avec des remplissages		255
VIII ♦ 6 ♦ 11		
Dispositions des guides CPMI-EC8 pour les bâtiments simples		256
VIII ♦ 7		
Bâtiments mixtes en acier et béton		256
VIII ♦ 7 ♦ 1		
Pathologie sismique des constructions mixtes en acier et béton		256
VIII ♦ 7 ♦ 2		
Types de structure mixtes en acier et béton		257
VIII ♦ 7 ♦ 3		
Classes de ductilité		258
VIII ♦ 7 ♦ 4		
Dispositions communes		258
VIII ♦ 7 ♦ 4 ♦ 1		
Matériaux		258
VIII ♦ 7 ♦ 4 ♦ 2		
Zones dissipatives		258
VIII ♦ 7 ♦ 4 ♦ 3		
Éléments de structure primaires		259
VIII ♦ 7 ♦ 5		
Dispositions constructives pour la structure		260
VIII ♦ 7 ♦ 5 ♦ 1		
Ossatures en portique		260
VIII ♦ 7 ♦ 5 ♦ 2		
Ossatures mixtes avec triangulation à barres centrées		260
VIII ♦ 7 ♦ 5 ♦ 3		
Ossatures mixtes avec triangulation à barres excentrées		260
VIII ♦ 7 ♦ 5 ♦ 4		
Systèmes structuraux mixtes en murs de béton armé et ossature en acier enrobée ou non		261
VIII ♦ 7 ♦ 5 ♦ 5		
Structures à voiles mixtes avec une plaque en acier verticale		261
VIII ♦ 8		
Constructions en bois		262
VIII ♦ 8 ♦ 1		
Pathologie sismique des constructions en bois		262
VIII ♦ 8 ♦ 2		
Classes de ductilité		264
VIII ♦ 8 ♦ 3		
Dispositions communes		264

VIII • 8 • 3 • 1	Matériaux	264
VIII • 8 • 3 • 2	Assemblages	264
VIII • 8 • 3 • 3	Durabilité	266
VIII • 8 • 3 • 4	Contrôle de qualité	266
VIII • 8 • 4	Constructions en murs à ossature en bois	266
VIII • 8 • 4 • 1	Comportement et constitution	266
VIII • 8 • 4 • 2	Stabilité d'ensemble	266
VIII • 8 • 4 • 3	Dispositions constructives parasismiques	267
VIII • 8 • 5	Charpentes de toiture en bois	271
VIII • 8 • 5 • 1	Charpentes industrielles légères de type fermettes	271
VIII • 8 • 5 • 2	Charpentes à fermes et pannes	274
VIII • 8 • 6	Ossatures en poteaux et poutres de portées courantes	277
VIII • 8 • 6 • 1	Ossatures en portiques bidirectionnels	277
VIII • 8 • 6 • 2	Ossatures contreventées	278
VIII • 8 • 7	Charpentes de grande portée	279
VIII • 8 • 7 • 1	Caractéristiques générales	279
VIII • 8 • 7 • 2	Structures en portiques	280
VIII • 8 • 7 • 3	Structures en arcs	283
VIII • 8 • 8	Voiles courbes	283
VIII • 9	Éléments non structuraux	285
VIII • 9 • 1	Comportement des éléments non structuraux sous charge sismique et types de protection	285
VIII • 9 • 2	Dispositions réglementaires	285
VIII • 9 • 3	Façades	288
VIII • 9 • 3 • 1	Façades en panneaux préfabriqués de béton armé	288
VIII • 9 • 3 • 2	Façades Légères	289
VIII • 9 • 3 • 3	Fenêtres	291
VIII • 9 • 3 • 4	Murs de parement en maçonnerie	294
VIII • 9 • 3 • 5	Revêtement muraux attachés en pierre mince	294
VIII • 9 • 4	Éléments suspendus devant les façades	295

VIII • 9 • 5	Acrotères en maçonnerie ou béton	295
VIII • 9 • 6	Garde-corps	297
VIII • 9 • 7	Conduits de fumée et de ventilation en maçonnerie	297
VIII • 9 • 8	Couvertures	300
VIII • 9 • 9	Cloisons intérieures	301
VIII • 9 • 9 • 1	Cloisons et doublages en maçonnerie	302
VIII • 9 • 9 • 2	Cloisons en pavés de verre	303
VIII • 9 • 9 • 3	Cloisons en plaques de plâtre sur ossature	303
VIII • 9 • 9 • 4	Cloisons en carreaux de plâtre	303
VIII • 9 • 9 • 5	Cloisons en menuiserie	304
VIII • 9 • 10	Revêtements muraux	305
VIII • 9 • 11	Plafonds solidaires de la structure	306
VIII • 9 • 12	Plafonds suspendus	306
VIII • 9 • 13	Planchers surélevés (planchers techniques)	308
VIII • 10	Équipement d'immeubles	309
VIII • 10 • 1	Effets des séismes sur les équipements et types de protection	309
VIII • 10 • 2	Dispositions de l'Eurocode 8 et principes de conception communs	310
VIII • 10 • 3	Réservoirs d'eau sur toit	310
VIII • 10 • 4	Ascenseurs	312
VIII • 10 • 5	Équipement lourd : moteurs, machines tournantes, compresseurs, groupes électrogènes, pompes, cuves, réservoirs sous pression, échangeurs, chaudières, chauffe-eau...	315
VIII • 10 • 6	Équipement électrique	316
VIII • 10 • 7	Équipement de climatisation	319
VIII • 10 • 8	Tuyauterie	319
VIII • 10 • 9	Armoires et rayonnages	322
VIII • 10 • 10	Appareils de table : ordinateurs, moniteurs, microscopes, appareils électroniques, appareils de soins médicaux, etc.	326
VIII • 10 • 11	Extincteurs et bouteilles de gaz	327

VIII • 10 • 12	Chariots et appareils sur roulettes	327
VIII • 11	Isolation parasismique	328
VIII • 11 • 1	Principe et performances	328
VIII • 11 • 2	Avantages de l'isolation parasismique	328
VIII • 11 • 3	Inconvénients de l'isolation parasismique	329
VIII • 11 • 4	Emplacement des appuis parasismiques	330
VIII • 11 • 5	Dispositions constructives générales	331
VIII • 11 • 6	Types d'appuis parasismiques	332
VIII • 11 • 6 • 1	Appuis à déformation	332
VIII • 11 • 6 • 2	Appuis à glissement	334
VIII • 11 • 6 • 3	Appuis à déformation et glissement	336
VIII • 11 • 6 • 4	Appuis à roulement	336
VIII • 11 • 6 • 5	Procédés d'isolation expérimentaux	337
VIII • 11 • 6 • 6	Conclusion	339

CHAPITRE IX

CALCUL DES ACTIONS SISMIQUES D'ENSEMBLE 341

IX • 1	Méthodes de calcul des charges sismiques	341
IX • 2	Modélisation des bâtiments	341
IX • 3	Méthodes d'analyse spectrale	342
IX • 4	Analyse chronologique non linéaire (analyse temporelle)	346
IX • 5	Analyse en poussée progressive (« pushover »)	347

ANNEXES 349

GLOSSAIRE 365

BIBLIOGRAPHIE ET RÉFÉRENCES 373

CRÉDITS 377

TABLE DES TABLEAUX ET ENCADRÉS 379