

4.1 Introduction

Depuis plusieurs années, les régions du monde qui ont subi de forts séismes ayant provoqué d'importantes destructions ont initié de nombreuses approches d'évaluation de la vulnérabilité des ouvrages aux séismes, notamment dans les pays de forte sismicité (Italie, Etats- Unis, Yougoslavie,...) [18].

L'évaluation de la vulnérabilité des constructions existantes est un élément clé qui permet de mieux évaluer les pertes et de réduire les conséquences économiques consécutives aux tremblements de terre. En effet, l'évaluation de la vulnérabilité permet de construire les courbes d'endommagement (ou les courbes de fragilité) qui constituent une information et une donnée fondamentale et incontournable, en bref, elles ne peuvent pas être remplacées par un autre type d'informations en vue de l'estimation des dommages.

L'étude de la vulnérabilité sismique consiste, à partir d'un mouvement sismique donné, à déterminer les bâtiments et les structures les plus vulnérables vis-à-vis du séisme au niveau d'une région, d'une ville, d'un grand nombre de bâtiments ou d'une structure, donc une étude de vulnérabilité sismique est le premier pas vers la détermination des bâtiments nécessitant des confortements éventuels.

Avant de procéder à l'explication des différentes approches d'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtis existants, il est nécessaire d'évoquer la définition du terme "vulnérabilité sismique" et les objectifs d'étude de cette dernière.

4.2 Le concept de vulnérabilité

Les ouvrages humains (constructions, équipements, aménagements, etc.) ne sont pas tous capables d'absorber et de dissiper, sans dommage (rupture), les efforts transmis par les ondes sismiques. Selon leur nature et leur conception, ils sont plus ou moins vulnérables à ces sollicitations.

Nous définirons ainsi la vulnérabilité sismique comme la relation entre les degrés de dommages conséquents (au sens large du terme) et les différents niveaux d'agression sismique subis. Généralement, lorsque l'on parle de vulnérabilité, on fait référence aux bâtiments, mais le concept peut être appliqué à d'autres ouvrages, tels que des ponts, des routes, des installations industrielles, des réseaux de distribution de gaz, des réseaux électriques... Plus largement, à ces vulnérabilités « physiques », on peut ajouter des

vulnérabilités humaines, fonctionnelles, économiques, sociales... Il s'agit d'un paramètre intrinsèque au système étudié, indépendant de sa situation géographique ; un bâtiment peut être vulnérable et ne présenter aucun risque parce qu'il est situé dans une zone sans danger sismique .

Plus précisément, la vulnérabilité sismique est la probabilité d'obtenir un certain dommage pour un système lors d'un séisme donné. Pour déterminer cette probabilité, il est nécessaire de définir ce dommage, souvent considéré comme une variable continue (D) variant de 0 (pas de dommage) à 1 (ruine), et lié à un indicateur plus ou moins complexe ; on peut citer par exemple les travaux de Nazé [24]. Pour des raisons de facilité de prise de décision notamment, la variable d'endommagement est utilisée pour définir qualitativement des « degrés » de dommages. Par exemple, l'EMS 98 [25], qui sert de référence en Europe, compte 5 degrés de dommages aux constructions :

- Degré DG 1 : dégâts négligeables à légers avec $0 \leq D < 0,2$;
- Degré DG 2 : dégâts modérés avec $0,2 \leq D < 0,4$;
- Degré DG 3 : dégâts sensibles à importants avec $0,4 \leq D < 0,6$;
- Degré DG 4 : dégâts très importants avec $0,6 \leq D < 0,8$;
- Degré DG 5 : effondrement partiel ou total (destruction) avec $0,8 \leq D \leq 1$.

4.3 Objectifs de réalisation des études de vulnérabilité:

Les objectifs de l'étude de la vulnérabilité sismique sont multiples et dépendent de l'échelle d'analyse. On distingue ainsi plusieurs échelles d'investigation [26]:

4.3.1 Échelle d'analyses très globales: Utilisant directement les répartitions statistiques de dommages des échelles d'intensité (échelles MSK, EMS 98...) en fonction de typologies de structures. Ces dernières sont caractérisées par une classe de vulnérabilité entre A (la plus vulnérable) et D (la moins vulnérable) qui pour une intensité donnée de séisme seront plus ou moins endommagés. Le niveau d'endommagement respecte une échelle de D1 (faibles dommages) à D5 (destruction totale). Ces méthodes s'appliquent bien à des évaluations pour un nombre important de bâtiments sur une zone donnée. Elles sont sommaires mais nous

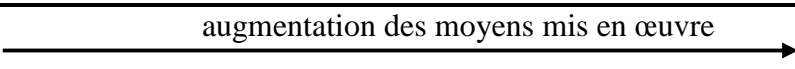
permettent néanmoins une première évaluation rapide;

4.3.2 Échelle d'analyses globales

Où les bâtiments ne sont pas analysés individuellement mais de façon statistique. Néanmoins, l'auscultation des bâtiments se fait individuellement. Le traitement des données recueillies sur le parc immobilier vise généralement à classer les bâtiments dans des typologies prédéfinies dont on a une estimation de la vulnérabilité sismique. Des paramètres modérateurs, définis en fonction des caractéristiques géométriques et structurales, sont ensuite appliqués pour moduler leur vulnérabilité. La sollicitation s'exprime en fonction de l'intensité ou parfois en fonction d'un niveau d'accélération maximale du sol appelé PGA « Peak Ground Acceleration ». D'autres évaluations représentent l'endommagement par une probabilité de dépassement d'un certain niveau de dommage (par exemple, 60% d'endommagement), intégrant directement la typologie de la construction et le niveau d'aléa ;

4.3.3 Échelle d'analyses précises: où les bâtiments sont analysés individuellement mais avec des méthodes simplifiées. Des calculs simplifiés sont parfois effectués à ce niveau. Des exemples d'utilisation de méthodes de calculs non linéaires du type Pushover sont donnés par Lang and Bachman pour les bâtiments en maçonnerie et par Kircher et al, et Faccioli et al pour les bâtiments en béton armé .

Tableau 4.1 Échelles d'analyse et leur applicabilité [26]

<div align="center">  </div>					
Echelle d'analyse	Plusieurs centaines de Bâtiments		Quelques bâtiments		Bâtiments individuels
Méthodes	Vulnérabilité EMS98	Indice de Vulnérabilité	Avis d'expert	Calculs analytiques simples	Analyse numérique modélisation -
Applicabilité	Ville- commune - quartier – parcs immobiliers – bâtiments stratégiques				
Moyens humains	Sans formation- étudiants- techniciens- ingénieurs- ingénieurs confirmés				

⇒ Objectifs d'étude de la vulnérabilité à grande échelle (ville, région)

- la détermination de l'intensité macrosismique de la zone étudiée;
- l'estimation des dommages prévisibles aux personnes et aux biens juste après le séisme pour décider des moyens de secours à mettre en place ;
- Les estimations économiques des dégâts causés par un séisme.

⇒ Objectifs d'étude de la vulnérabilité à l'échelle de la structure

- le dimensionnement des structures neuves à un niveau de protection parasismique fixé par la réglementation;
- l'évaluation des bâtiments existants en vue d'une requalification;
- L'identification des bâtiments les plus vulnérables aux séismes de façon à planifier et organiser une politique de renforcement du bâti existant.

4.4 Méthodes Empiriques

Dans la plupart des méthodes, les bâtiments sont préalablement classés selon une typologie. Ces méthodes se fondent sur l'observation des caractéristiques structurales des bâtiments pour leur attribuer un indice de vulnérabilité (IV). Différents niveaux de précision d'analyse sont généralement prévus, selon les informations disponibles, qui conduisent à une qualité variable de l'estimation de la vulnérabilité. Ces méthodes proposent une relation reliant l'indice de vulnérabilité à une échelle de dommage pour un mouvement sismique donné, un scénario probable ou un séisme historique [18]. Les paramètres pertinents, les coefficients qui leur sont attribués dans le calcul de l'indice de vulnérabilité (IV) et le lien entre IV et dommage sont déterminés à partir du retour d'expérience réalisé par des experts lors de missions post-sismique. Malheureusement, le mouvement du sol qui a généré les dégâts observés n'est généralement pas connu car il n'a pas été enregistré. Il est donc généralement représenté par l'intensité macrosismique estimée elle-même à partir des dégâts. Cette incohérence est une des limitations de ces méthodes. Par ailleurs, les relations entre paramètres structuraux et dommages sont estimées de manière statistique. Ces méthodes permettent donc d'avoir une vision statistique, à l'échelle d'une ville par exemple, et n'ont pas d'intérêt pour un bâtiment isolé.

a- Analyse des bâtiments

Une campagne dans une ville consiste à relever le type des bâtiments ainsi qu'éventuellement d'autres critères structuraux sur des fiches prévues pour chaque méthode. Les méthodes disposent généralement de plusieurs niveaux de détail selon la qualité de l'information collectée, le plus simple étant généralement appelé niveau 1 [13]. Les critères communément utilisés sont :

- le nombre d'étage;
- la localisation de la structure (dans une pente ou non);
- la qualité de son sol de fondation;
- sa régularité en plan (forme, protubérance. . .), la torsion;
- sa régularité en élévation (retraits, saillies. . .), la présence d'un étage transparent;
- la distance entre ses murs;
- les caractéristiques de sa toiture;
- ses éléments non -structuraux (cheminées. . .);
- son état de conservation;
- la position de la structure dans l'îlot (isolée, en travée, en coin. . .);
- la présence d'éléments lourds;
- la présence de poteaux courts l'absence de joints parasismiques.

Ces critères peuvent entrer dans le calcul direct de l'indice de vulnérabilité (IV). Les scores donnés pour chaque critère et les poids qui leur sont affectés sont déterminés à partir du retour d'expérience. La note obtenue pour chaque bâtiment est normalisée par le score maximal qui peut être atteint de manière à échelonner l'IV entre 0 (structure pas vulnérable) et 1 (structure très vulnérable) ou entre 0 et 100 selon les méthodes.

b- Calcul du dommage

Le dommage d est considéré par ces méthodes comme une variable continue variant de 0 (pas de dommage) à 1 (ruine) ou de 0 à 100. Cependant, il est nécessaire de ramener d à

un niveau de dommage qui est défini qualitativement car il peut être facilement déterminé lors des interventions post-sismiques [27]

4.4.1.1 Approche statistique

Les premières méthodes développées pour évaluer la fragilité des constructions vis à vis des actions sismiques sont basées sur l'analyse des dommages causés aux constructions par les séismes passés. L'identification des typologies constructives est fondée sur les techniques et matériaux de construction, et le paramètre considéré pour établir une corrélation entre le dommage observé et la sévérité du séisme est l'intensité dont la définition (échelle MMI) est justement basée sur un constat, une observation [27].

a- Approche Statistique Européenne "l'échelle EMS98"

On pourrait penser que la prise en compte explicite de la vulnérabilité des bâtiments dans l'échelle EMS 98 représente une innovation substantielle. Les types de bâtiments n'étaient pas différenciés dans ces échelles sur la base de considération esthétiques, mais parce qu'il s'agissait d'une manière facile de traiter le problème de la vulnérabilité, même si le terme n'était pas employé explicitement [18] :

Typologie EMS98

Il est évident que la simple utilisation du type de bâtiment considéré comme analogue à la vulnérabilité est insuffisante. Dans le premier cas, les variations de résistance à l'intérieur d'un même type de bâtiment peuvent être souvent aussi importantes que les variations entre des types de bâtiment différents et ce point a été la source d'un certain nombre de difficultés lors de l'attribution des intensités. Dans le second cas, un système de cette nature est relativement peu souple dès lors qu'il s'agit d'ajouter de nouveaux types de bâtiment. Pour cela, l'EMS 98 a introduit des notions de conception des structures, en distinguant le degré de conception parasismique (sans, moyen, bon) pour les structures en béton, des systèmes de renforcement employés pour les structures en maçonnerie.

Les différentes typologies sont ainsi présentées dans le tableau 4.2, leur détail étant disponible dans le document EMS98. Simultanément, pour chaque type de construction est attribuée une classe de vulnérabilité la plus probable et son incertitude.

Tableau 4.2 Définition des typologies EMS98 et la classe de vulnérabilité associée.


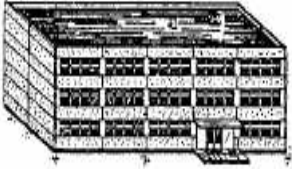

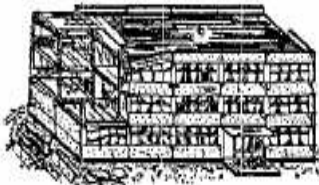

Typologie des Structures		Classe de Vulnérabilité					
		A	B	C	D	E	F
MAÇONNERIE	Moellon brut - pierre tout-venant	○					
	Brique crue (adobe)	○	—				
	Pierre brute	—	○				
	Pierre Massive		—	○	—		
	Maçonnerie non armée avec des éléments préfabriqués	—	○	—			
	Maçonnerie non armée avec des planchers en béton armée		—	○	—		
	Maçonnerie renforcée ou chaînée			—	○	—	
BÉTON ARMÉ	Ossature sans conception parasismique	—	—	○	—		
	Ossature avec un niveau moyen de conception parasismique		—	—	○	—	
	Ossature avec un bon niveau de conception parasismique			—	—	○	—
	Murs en béton armé sans conception parasismique		—	○	—		
	Murs en béton armé avec un niveau moyen de conception parasismique			—	○	—	
	Murs en béton armé avec un bon niveau de conception parasismique				—	○	—
ACIER	Bâtiments en charpente métallique			—	—	○	—
BOIS	Bâtiments en bois de charpente		—	—	○	—	

○ classe de Vulnérabilité — gamme la plus probable
 --- gamme la moins probable, cas exceptionnel

Échelle des dommages EMS 98

L'échelle EMS 98 comprend 5 degrés de dommage. Le tableau 4.3 donne la définition de ces 5 degrés de dommage pour les bâtiments en béton armé respectivement. Purement qualitative, elle décrit la nature des dommages observables.

Tableau 4.3 Classification et description des dommages, bâtiments en béton armé, d'après [18].

Classification des dégâts aux bâtiments en BETON ARME	
	<p>Degré 1 : Dégâts négligeables à légers (aucun dégât structurel, légers dégâts non structuraux)</p> <p>Fissures fines dans le plâtre sur les parties de l'ossature ou sur les murs à la base. Fissures fines dans les cloisons et les remplissages..</p>
	<p>Degré 2 : Dégâts modérés (dégâts structuraux légers, dégâts non structuraux modérés)</p> <p>Fissures dans les structures de types portiques (poteaux et poutres) et dans les structures avec murs. Fissures dans les cloisons et les murs de remplissage ; chute des revêtements friables et du plâtre. Chute du mortier aux jonctions entre les panneaux des murs.</p>
	<p>Degré 3: Dégâts sensibles à importants (dommages structuraux modérés, dommages non structuraux importants)</p> <p>Fissures dans les poteaux et dans les nœuds à la base de l'ossature et aux extrémités des linteaux des murs avec des ouvertures. Ecaillage du revêtement de béton, flambement des barres d'armature longitudinale. Fissures importantes dans les cloisons et les murs de remplissage, défaillance de certains panneaux de remplissage.</p>
	<p>Degré 4: Dégâts très importants (Dégâts structuraux importants, dégâts non structuraux très importants)</p> <p>Fissures importantes dans les éléments structuraux avec défaillance en compression du béton et rupture des barres à haute adhérence ; perte de l'adhérence acier-béton ; basculement des poteaux. Eroulement de quelques poteau ou d'un étage supérieur.</p>
	<p>Degré 5: Destruction (Dégâts structuraux très importants)</p> <p>Effondrement total du rez-de-chaussée ou de parties de bâtiments.</p>

Estimation des dommages prédits par l'EMS 98

La définition de l'échelle d'intensité macrosismique EMS 98 permet d'estimer les dommages observés sur différents types de structures (si le niveau de séisme utilisé est l'intensité). Cette méthode utilise l'intensité comme donnée d'entrée du séisme. Elle est définie à l'origine pour caractériser les régions autour des épicentres des séismes en fonction des effets sur les constructions, les objets et les humains. Dans le cadre d'une analyse de vulnérabilité, son application est détournée en ce sens qu'on décrit les dommages probables en fonction de l'intensité, sur la base des répartitions statistiques des dommages observés par typologie.

Tableau 4.4 Définition de la caractérisation des dommages en fonction des intensités [26].

Degrés d'intensité	Descriptions
Intensité V: Fort	Dégâts de degré 1 de quelques bâtiments de classes de vulnérabilité A et B
Intensité VI: Dégâts légers	Dégâts de degré 1 de nombreux bâtiments de classes de vulnérabilité A et B Dégâts de degré 2 de quelques bâtiments de classes de vulnérabilité A et B Dégâts de degré 1 de quelques bâtiments de classes de vulnérabilité C
Intensité VII: Dégâts	De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité A subissent des dégâts de degré 3, quelques uns de degré 4 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité B subissent des dégâts de degré 2, quelques uns de degré 3 Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité C subissent des dégâts de degré 2 Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 1
Intensité VIII: Dégâts importants	De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité A subissent des dégâts de degré 4, quelques uns de degré 5 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité B subissent des dégâts de degré 3, quelques uns de degré 4 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité C subissent des dégâts de degré 2, quelques uns de degré 3 Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 2
Intensité IX: Destructions	De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité A subissent des dégâts de degré 5 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité B subissent des dégâts de degré 4, quelques uns de degré 5 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité C subissent des dégâts de degré 3, quelques uns de degré 4 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 2, quelques uns de degré 3 Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité E subissent des dégâts de degré 2
Intensité X: Destructions importantes	La plupart des bâtiments de la classe de vulnérabilité A subit des dégâts de degré 5 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité B subissent des dégâts de degré 5 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité C subissent des dégâts de degré 4, quelques uns de degré 5 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 3, quelques uns de degré 4 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité E subissent des dégâts de degré 2, quelques uns de degré 3 Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité F subissent des dégâts de degré 2
Intensité XI: Catastrophe	La plupart des bâtiments de la classe de vulnérabilité A et B subit des dégâts de degré 5 La plupart des bâtiments de la classe de vulnérabilité C subit des dégâts de degré 4, quelques uns de degré 5 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 4, quelques uns de degré 5 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité E subissent des dégâts de degré 3, quelques uns de degré 4 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité F subissent des dégâts de degré 2, quelques uns de degré 3

b- Approche Statistique Américaine

Dans la méthode américaine, les paramètres de base définissant le niveau de dommage (D_i) utilisés dans l'approche statistique sont issus du retour d'expérience spécifique à la région. On a donc à faire à l'utilisation de dommages observés sur des constructions dont le système constructif et les techniques de réalisation sont propres à cette dernière [18].

4.4.1.2 Approche probabiliste

Comme dans la méthode EMS98, l'analyse d'un bâtiment doit permettre de déterminer son type en le rattachant à une typologie précise. La typologie américaine a été publiée dans l'ATC21 puis reprise dans le rapport 154 de la FEMA en 1988.

A partir de cette typologie, la vulnérabilité de chaque structure s'établit à partir d'une fiche de relevés d'indicateurs structuraux.

Les critères recherchés au moment de l'analyse visuelle sont :

- Nombre d'étages (bâtiments de grande hauteur);
- Conditions d'entretien;
- Régularité verticale;
- Présence d'un étage pilotis;
- Torsion;
- Régularité en plan;
- Possibilité d'entrechoquement;
- Présence des éléments lourds;
- Poteaux courts ;
- Année de construction;

Une fois la typologie est définie, l'indice de vulnérabilité de base de chacune des typologies (appelé BSH) est modulé en fonction des critères structuraux relevés lors de l'analyse visuelle. Une note est attribuée à chacun de ces critères de vulnérabilité.

Le résultat du relevé est donc une note "ou critère de vulnérabilité global" permettant d'estimer la vulnérabilité sismique du bâtiment.

4.4.1.3 Approche déterministe

Utilisant des courbes de vulnérabilité qui donnent le dommage moyen en fonction du niveau sismique (en intensité ou en accélération) et non plus une probabilité de dépasser un niveau de dommage donné. De plus ce dommage moyen permet de connaître le pourcentage de bâtiments dans un niveau de dommage donné [18].

Exemple de l'approche déterministe

La méthode du GNDT italien a défini des courbes qui donnent le dommage moyen en fonction de l'accélération maximale du sol (PGA). Puis vient l'étude Giovinazi et Lagomarsino qui proposent une formule permettant d'estimer le dommage moyen en fonction de l'intensité du séisme I et de l'indice de vulnérabilité IV calculé par la relation (4.1) (voir Figure 4.1).

$$d = 0.5 + 0. (0.55 \cdot (I - 10.2 + 0.05IV)) \quad , \quad 0 < d < 1 \quad (4.1)$$

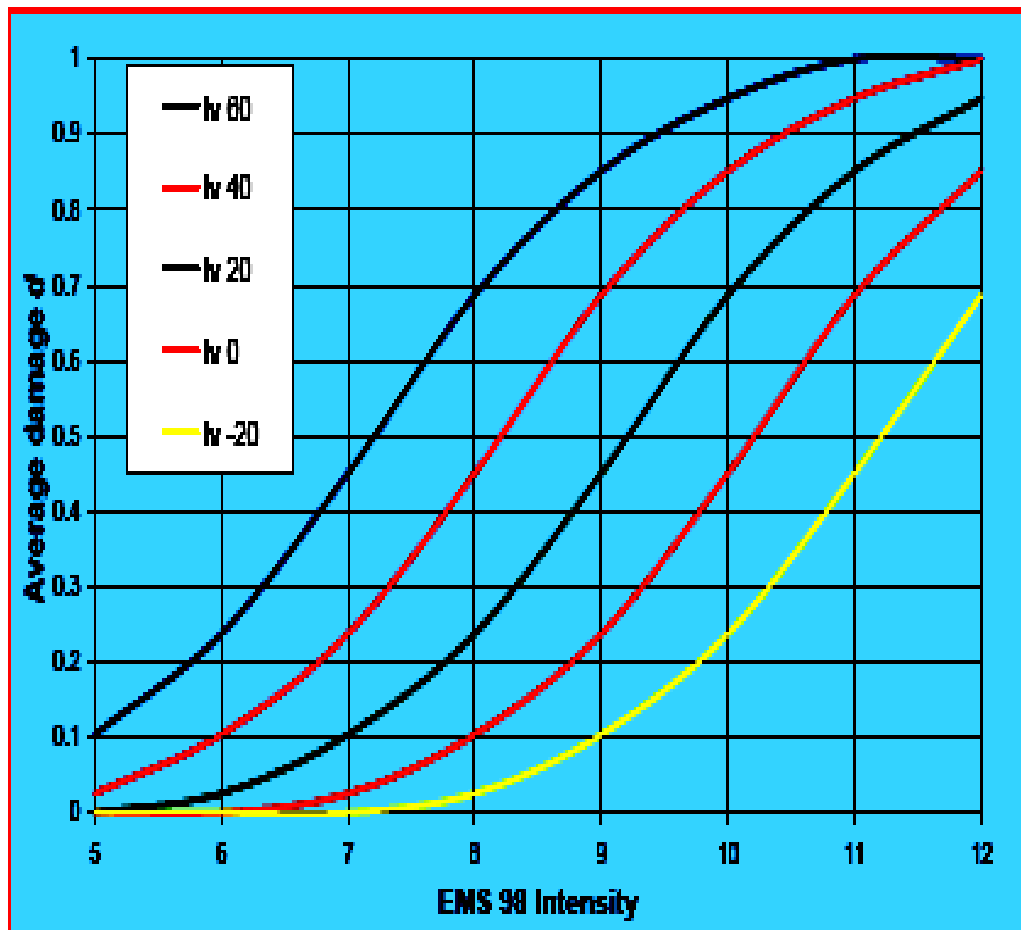


Figure 4.1 Evolution du dommage moyen (d) en fonction de l'intensité du séisme (EMS98) pour plusieurs classes de vulnérabilité [18].

4.5 Méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité d'un bâtiment

La méthodologie utilisée pour l'estimation de la vulnérabilité sismique à l'échelle d'un bâtiment se décompose en trois étapes, décrites sur la(figure 4.2). Les deux premiers éléments en sont la capacité du bâtiment à résister aux contraintes (courbe de capacité) et les contraintes sur la structure dues à la sollicitation sismique (demande sismique) ; la courbe de vulnérabilité est obtenue à partir de la comparaison de la courbe de capacité et de la courbe de demande.

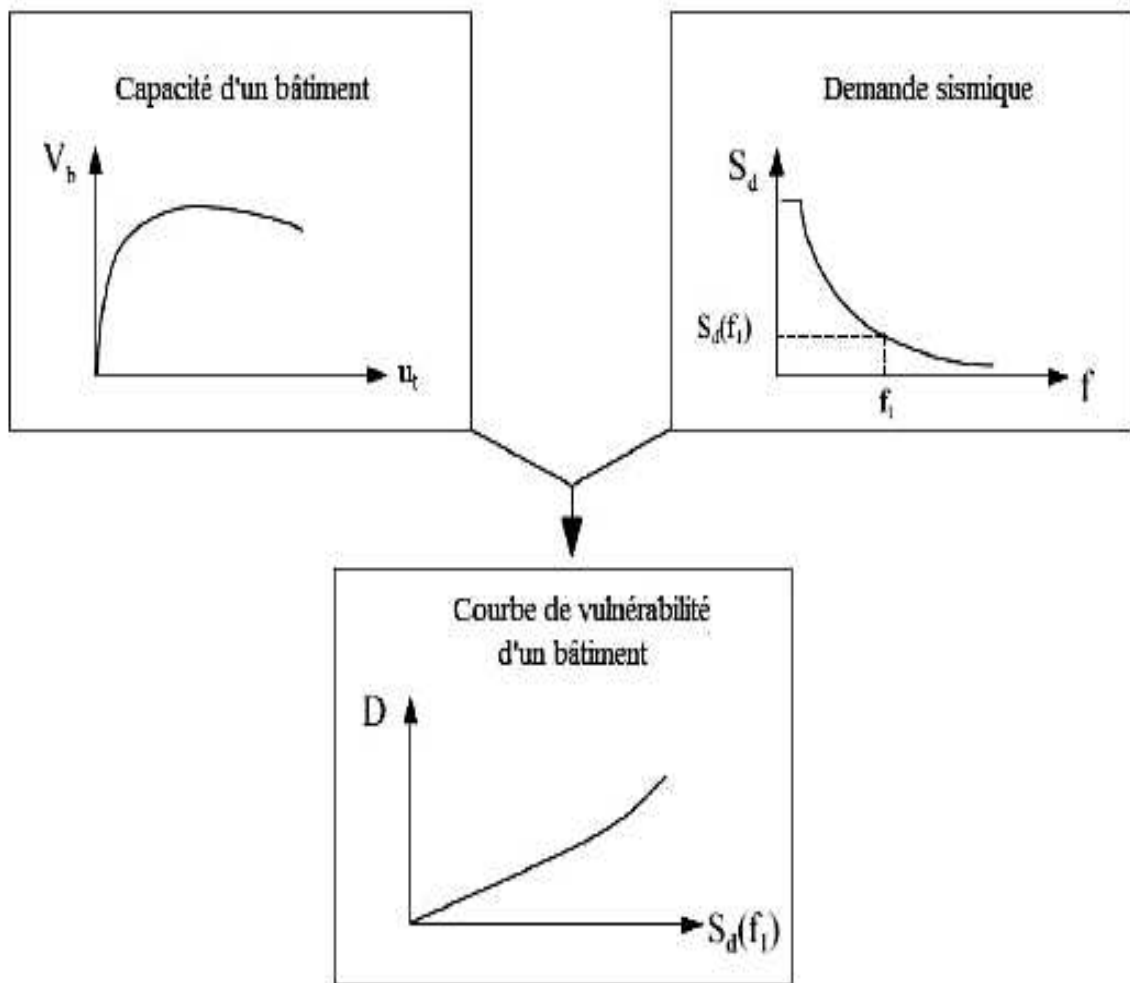


Figure 4.2. Méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité sismique à l'échelle d'un bâtiment

4.5.1 la courbe de capacité

chargement latéral, dû à la sollicitation sismique, conduit à un déplacement à son sommet (u_t) et à un effort de réaction à sa base (V_b). Dans le cadre de ce travail, nous admettons les hypothèses généralement retenues. La première de ces hypothèses concerne la nature de la sollicitation la répartition de la force horizontale sur la hauteur doit être conforme à la déformée modale du mode fondamental de vibration de la structure, dont une forme simplifiée triangulaire est habituellement utilisée. Pour évaluer le comportement global, on procède généralement à partir d'une analyse statique en poussée progressive ou analyse Pushover [28] ; au cours d'une analyse statique non linéaire, l'intensité du

chargement latéral est augmentée jusqu'à ce que les modes d'endommagement commencent à apparaître. Les résultats conduisent à la valeur de l'effort tranchant à la base, exprimée en fonction du déplacement au sommet (figure 4.3).

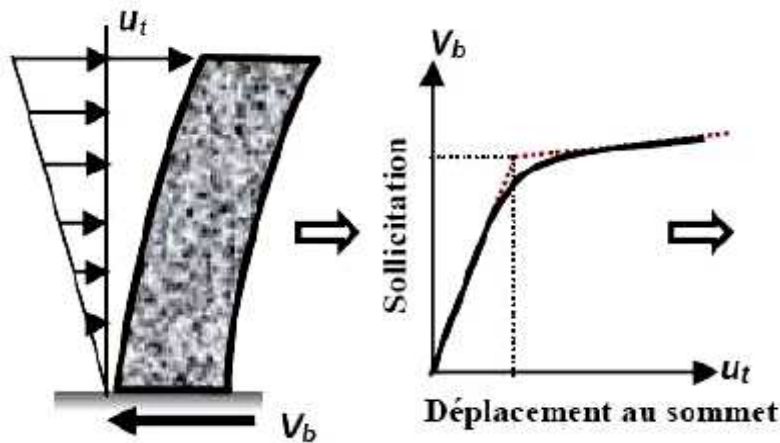


Figure 4.3. Principe d'élaboration d'une courbe de capacité

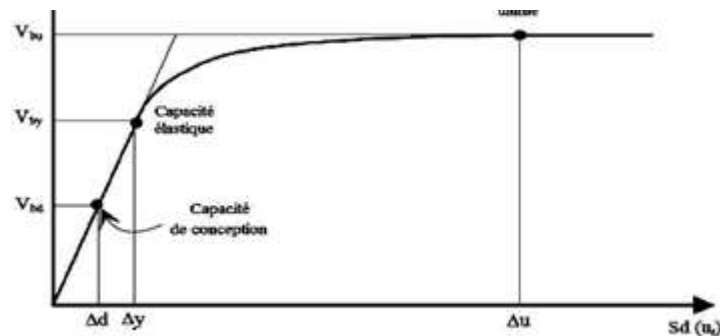


Figure 4.4 courbe de capacité type d'un bâtiment

La courbe-type de capacité d'un bâtiment (figure 4.4) est caractérisée par trois points de contrôle [29] : le point de capacité de conception (V_{bd} , Δ_d) représentant la résistance nominale, le point de capacité élastique (V_{by} , Δ_y) à partir duquel la structure présente un comportement ductile, et le point de capacité ultime (V_{bu} , Δ_u), assimilée à la limite de ruine.

4.5.1.2 La demande sismique

défini dans l'Eurocode 8 [30] (figure 4.5), ou d'un spectre de réponse réel issu d'un

La deuxième étape consiste à introduire la demande sismique, c'est-à-dire la répartition fréquentielle des niveaux d'accélération ou de déplacement imposés par le séisme .séisme particulier

Selon le contexte de l'étude, il peut s'agir d'un spectre de réponse règlementaire, par exemple

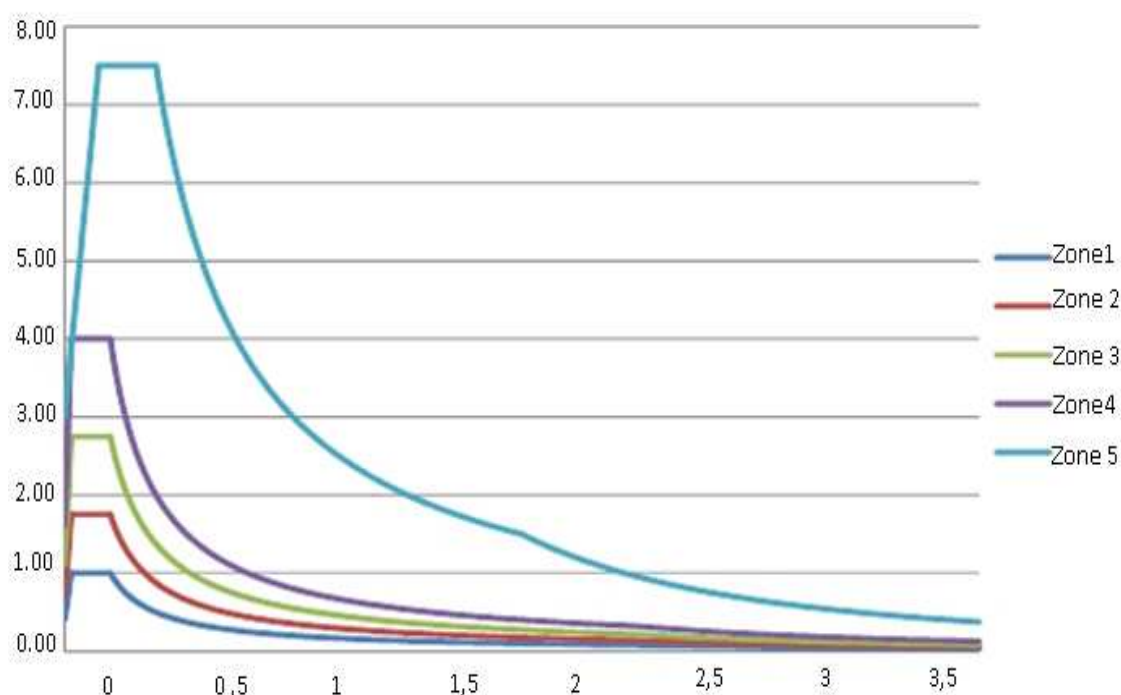


Figure 4.5. Spectres de réponse définis dans l'Eurocode 8, selon le zonage sismique français, pour un sol de classe A (rocher)

On associe le niveau de sollicitation subi par un bâtiment au séisme, en portant sur la courbe de demande la période (ou la fréquence) fondamentale de vibration de ce bâtiment. Le déplacement au sommet est relié à ce niveau de sollicitation, supposé exprimé en termes de déplacement (S_d), vibration dans laquelle .est le facteur de participation modale correspondant au, premier mode de , et par la relation :

est l'amplitude du déplacement au niveau j correspondant au premier mode de vibration (représentant le nombre de niveaux, ou étages du bâtiment).

4.5.2 La courbe de vulnérabilité

En faisant varier l'intensité du spectre de demande sismique, on peut construire point par point la courbe représentant le déplacement en toiture en fonction du spectre. Par association de la courbe de capacité et d'un « scénario de ruine », défini comme la relation entre déplacement de toiture et dommages, on peut porter les degrés de dommages sur la courbe représentée sur la figure 4.6, que nous désignerons par le terme de « courbe de vulnérabilité ». Le scénario de ruine, que nous précisons au chapitre 5, dépend de la méthode utilisée.

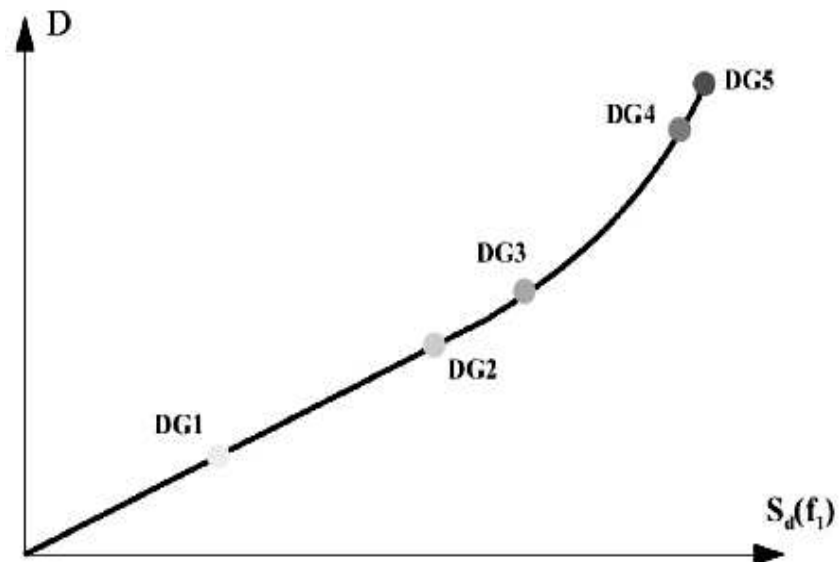


Figure 4.6. Courbe de vulnérabilité

Les facteurs influençant la vulnérabilité ont été identifiés à partir de l'observation détaillée des dégâts, notamment par Lestuzzi [31]. Il s'agit des caractéristiques du sol porteur, et notamment de sa capacité de liquéfaction, de la typologie des bâtiments (nombre d'étages, irrégularité en plan et en élévation), de leur état de conservation, et de leur structure (poteaux courts, etc.)

4.5.3 Classes de vulnérabilité

Pour regrouper les bâtiments appartenant à un même parc, on introduit la notion de classe de vulnérabilité, représentant, d'une manière ou d'une autre, les probabilités

d'atteindre un degré de dommage en fonction des sollicitations et de leur distribution. Leur définition précise dépend de la norme utilisée, allant de l'introduction de scalaires dénommés indices de vulnérabilité [32], à la définition de classes plus détaillées [25]. Par exemple, la figure 4.7 représente la classe de vulnérabilité A (sur une échelle allant de A à F) des bâtiments les plus vulnérables, selon l'EMS 98 ; pour chaque intensité EMS, on y lit les taux de dommages pour chaque degré (pourcentage de bâtiments atteignant ou dépassant ce degré).

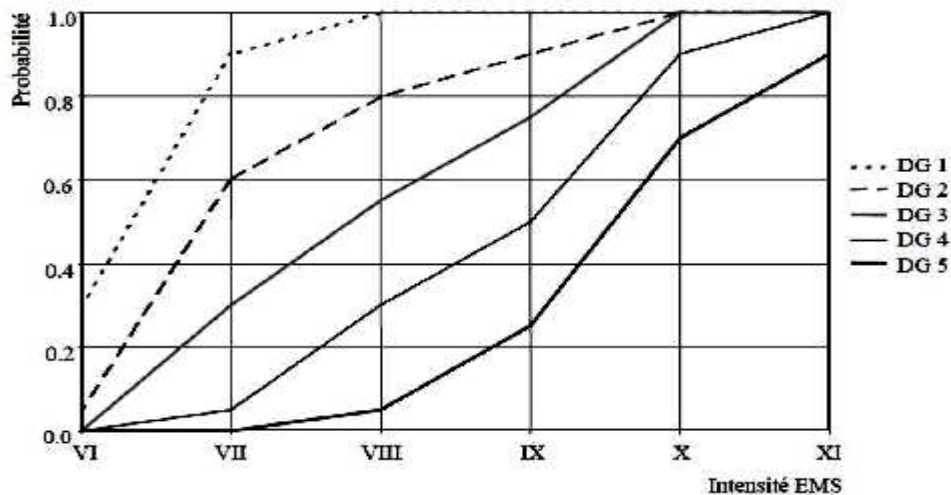


Figure 4.7. Exemple de classes de vulnérabilité (selon l'EMS 98)

Une autre manière de regrouper les bâtiments consiste à porter la probabilité d'atteindre le degré D_j en fonction de l'intensité et de sa distribution ; c'est le cas des « classes de fragilité » de Michel et al. [34] utilisant la fonction erreur pour l'évaluation de ces probabilités (figure 4.8).

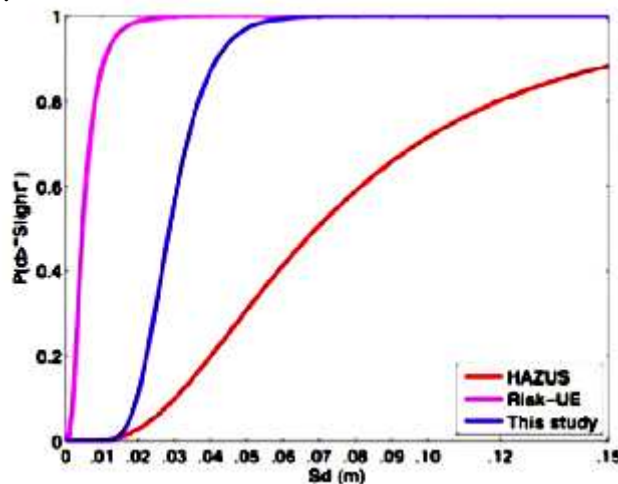


Figure 4.8. Courbes de fragilité de l'hôtel de Ville de Grenoble (selon Michel et al.)

4.5.4 Méthodes analytiques

Dans l'évaluation de la vulnérabilité sismique à l'échelle d'une structure on préconise l'utilisation des méthodes de calculs.

Plusieurs méthodes sont utilisées, en fonction de la typologie structurale et des objectifs recherchés. Parmi les méthodes les plus courantes, on peut citer [27] :

- Les méthodes d'analyse linéaires souvent préconisées par les codes parasismiques (analyse en forces latérales, analyses modales avec l'utilisation d'un spectre de réponse).
- Les méthodes non-linéaires (analyses statiques non linéaires "Pushover", analyses dynamiques temporelles non linéaires avec utilisation d'Accélérogrammes). le Tableau 4.5 illustre les quatre grandes approches analytiques.

Tableau 4.5 Grandes approches analytiques

<div> <div>Action</div> <div>Structure</div> </div>	Statique	Dynamique
	Force de Remplacement	Linéaire Dynamique
Non –linéaire	Pushover	Non –linéaire Dynamique

4.5.4.1 Méthodes d'analyse linéaires

4.5.4.1.1 Méthode statique équivalente (force de remplacement)

Cette Méthode est fréquemment utilisée si ses conditions d'application telles que décrites dans le RPA sont satisfaites. C'est une méthode d'usage relativement simple et qui a plusieurs décennies d'expérience.

La Méthode statique équivalente a comme principe de base de substituer aux efforts dynamiques développés dans une structure par le mouvement sismique du sol, des

sollicitations statiques calculées à partir d'un système de forces, dans la direction du séisme, et dont les effets sont censés équivalents à ceux de l'action sismique [22]:

▪ La force statique résultante équivalente est donnée par une expression forfaitaire (4.2) qui relie, d'une façon quantitative, les paramètres de mouvement du sol, les propriétés physiques et dynamiques du bâtiment et son usage principal. Elle agit à la base du bâtiment et elle est supposée répartie sur sa hauteur depuis sa base où elle est nulle jusqu'au sommet (voir Figure 4.9).

$$V = \frac{A.D.Q}{R} W \quad (4.2)$$

Avec :

A : l'accélération de zone

D : facteur d'amplification dynamique

R : facteur de comportement de la structure ou du système constructif.

Q : facteur de qualité, donné par la formule.

W : le poids de la structure.

- La structure étant soumise à ces forces statiques équivalentes, on est alors ramené à un calcul de contreventement s'effectuant par les méthodes usuelles de calcul des structures
- Le dimensionnement de capacité des éléments structuraux est ensuite effectué en utilisant les règlements de béton armé en vigueur.

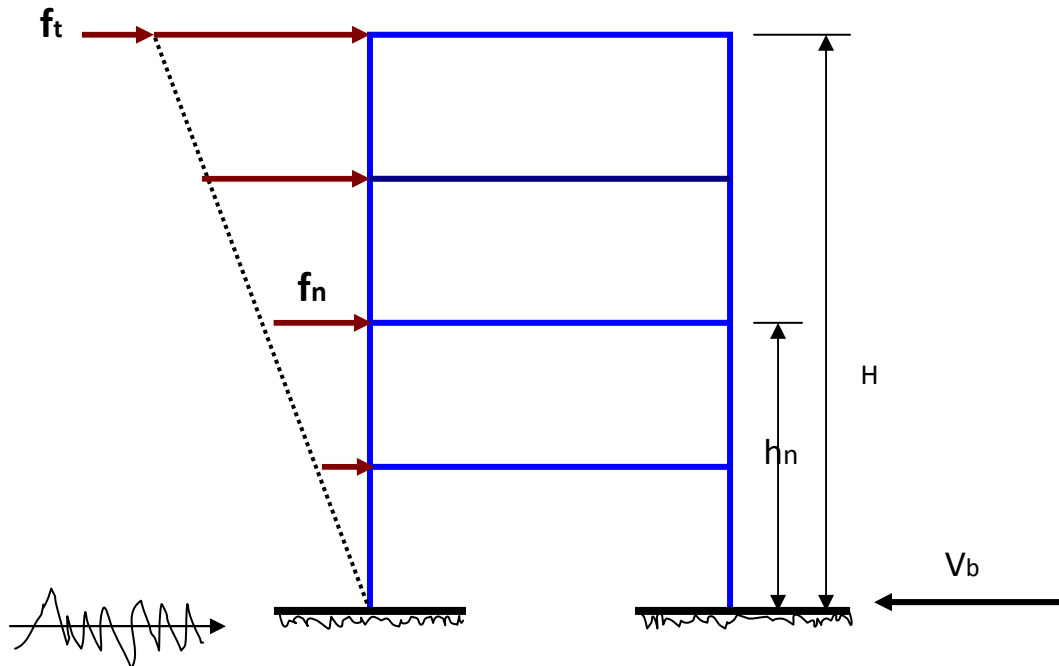


Figure 4.9 Répartition verticale des forces sismiques

Il faut souligner que les forces et les déformations obtenues pour l'élément à partir des méthodes d'analyse statiques pour les charges de conception recommandées sont inférieures aux forces et aux déformations qui seraient observées sur la structure sous les effets d'un séisme majeur pour lequel les charges ont été spécifiées. Ce dépassement des forces est équilibré par le comportement ductile qui est fourni par les détails de construction de l'élément. C'est pourquoi l'utilisation de cette méthode ne peut être dissociée de l'application rigoureuse des dispositions constructives garantissant à la structure:

- Une ductilité suffisante
- La capacité de dissiper l'énergie vibratoire transmise à la structure par des secousses sismiques majeures

La difficulté de l'application de cette méthode pour des constructions existantes réside dans l'appréciation du facteur de comportement (R) et du facteur d'amplification (D) qui est fonction de la période et de l'amortissement de la structure.

4.5.4.1.2. Méthode dynamique linéaire

Si les conditions de régularité ou de hauteur d'une structure, exigées par la méthode statique équivalente ne sont pas satisfaites, il est admis d'utiliser une méthode dynamique pour l'analyse de l'action sismique [22]. La méthode dynamique linéaire basée sur :

- La réponse maximale de la structure au moyen de spectres de réponse adaptés au site de la construction
- Un calcul direct en fonction du temps par l'utilisation d'Accélérogrammes adaptés au site de la construction.

Les méthodes temporelles modales, dans lesquelles la solution est recherchée sur la base des modes propres, il suffit alors, pour chacun des modes retenus, de résoudre l'équation différentielle de la dynamique, la solution en termes de déplacement s'obtient par combinaison de réponses modales.

Les méthodes temporelles d'intégration directe, qui utilisent des schémas de discrétisation dans le temps de l'équation dynamique, permettant de calculer la solution au temps $t + \Delta t$ (Δt étant le pas de temps) à partir de l'état connu au temps t .

Un grand nombre de schémas de ce type a été proposé, certains sont inconditionnellement stables, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de condition imposée a priori à en pratique, une bonne précision n'est obtenue que si le Δt choisi permet une bonne présentation des variations de (Γ) , pour d'autres schémas, il y a une condition de stabilité à respecter, Δt devant être inférieur à une valeur limite qui dépend des caractéristiques de la structure [34].

4.6 Conclusion

Comme nous les avons déjà développées dans ce chapitre, les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtis existants sont diverses et se basent d'une manière générale sur le retour d'expérience poste sismique. Elles sont choisies d'une part selon les objectifs espérés de l'évaluation et d'autre part selon les données et la disponibilité des moyens.

Les méthodes empiriques ne sont seulement pas utilisées pour l'évaluation des bâtis existants mais également représentent le premier pas d'une évaluation de dommages qui

sera une base de données pour l'élaboration d'un programme de gestion de risque sur une grande échelle. Tandis que les méthodes analytiques sont fondées sur une évaluation approfondie à l'échelle d'une structure afin de déterminer le degré de dommage et de prendre décision d'une éventuelle réhabilitation ou élimination, selon l'ampleur des dégâts. Elles nous permettent en outre de déterminer les points critiques d'un bâti pour y remédier dans l'avenir.

Enfin, les méthodes quantitatives (analytiques) nécessitent l'appréciation du comportement mécanique de chaque ouvrage, à la différence des méthodes empiriques.