

cahier 2

2004

collection CONCEPTION PARASISMIQUE

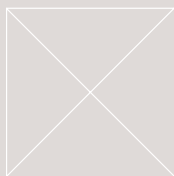
UN PROJET NATIONAL OUVERT SUR LE MONDE

UNE STATION EXPERIMENTALE AU SERVICE DE LA CONSTRUCTION

UNE VOCATION - L'AMÉLIORATION DES SAVOIRS ET DES TECHNIQUES CONSTRUCTIVES

UN MOYEN - L'APPROCHE INTERCULTURELLE

UNE AMBITION - DÉVELOPPER LES SAVOIR-FAIRE ET LA QUALITÉ DE LA CONSTRUCTION



# vulnérabilité et renforcement

MILAN ZACEK

les grands

ateliers

de l'Isle d'Abeau

## Remerciements

S'adressant aux architectes et ingénieurs, enseignants et professionnels, ainsi qu'aux étudiants et chercheurs, la **collection des cahiers parasismiques** constitue un ensemble de référence des connaissances nécessaires à la conception, la construction et la protection des édifices et des villes contre le phénomène sismique.

Cette collection a été développée avec l'aide du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable dans le cadre du programme d'actions confié aux Grands Ateliers pour améliorer l'enseignement des concepts et méthodes de la conception et de la construction parasismiques au sein des formations initiales des divers intervenants de l'acte de construire.

Elle est publiée par les **Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau**, groupement d'établissements d'enseignement supérieur d'architecture, d'ingénierie, d'art et de design, destiné à faire progresser la formation et la recherche sur la construction et les matériaux.

La collection comprend actuellement les cahiers suivants :

1. Conception parasismique, niveau avant-projet, Milan Zacek,
2. Vulnérabilité et renforcement, Milan Zacek,
- 2-a. Guide d'évaluation de la présomption de vulnérabilité aux séismes des bâtiments existants – Cas des constructions en maçonnerie et béton armé, Milan Zacek
3. Urbanisme et aménagement territorial en zone sismique, objectifs et problématique. Patricia Balandier,
4. Sismologie appliquée à l'usage des architectes et ingénieurs, Patricia Balandier.

A paraître :

5. Comportement dynamique des structures
6. Construction parasismique, se déclinant sur les diverses technologies : béton armé, acier, bois, constructions en terre, ainsi que sur le second œuvre.

**cahier 2**

# **vulnérabilité et renforcement**

**MILAN ZACEK**

**Mai 2004**



## TABLE DES MATIERES

	Page n°
<b>1. OBJECTIF ET METHODE</b>	3
<b>2. CONTEXTE</b>	5
<b>3. SPECIFICITE DES CONSTRUCTIONS EXISTANTES</b>	7
<b>3.1. SITUATION GENERALE</b>	7
<b>3.2. DIFFICULTES TECHNIQUES</b>	7
<b>4. PROJET DE REHABILITATION PARASISMIQUE D'UN BATIMENT</b>	9
<b>4.1. ETAPES</b>	9
<b>4.2. EVALUATION DE LA VULNERABILITE AUX SEISMES D'UN     BATIMENT</b>	10
<b>4.2.1. Typologie</b>	10
<b>4.2.2. Relevé des facteurs de vulnérabilité (inventaire)</b>	11
<b>4.2.3. Evaluation de la présomption de vulnérabilité</b>	11
<b>4.2.4. Evaluation de la vulnérabilité</b>	13
<b>4.2.5. Exemples de méthodes d'évaluation de la         vulnérabilité des ouvrages aux séismes</b>	13
<b>4.3. EVALUATION DE LA VULNERABILITE AUX SEISMES     A L'ECHELLE URBAINE</b>	29
<b>4.3.1. Vulnérabilité globale d'une zone</b>	29
<b>4.3.2. Vulnérabilité d'un ensemble de constructions</b>	30
<b>4.3.3. Guide HAZUS 99</b>	32
<b>4.4. STRATEGIES DE REHABILITATION PARASISMIQUE</b>	37
<b>4.4.1. Présentation générale</b>	37
<b>4.4.2. Réduction du niveau d'action sismique</b>	39
<b>4.4.3. Amélioration du niveau de performance d'un         bâtiment</b>	41
<b>4.5. TECHNIQUES DE RENFORCEMENT</b>	43
<b>5. CONCLUSIONS ET PROPOSITIONS</b>	45
<b>6. BIBLIOGRAPHIE ET REFERENCES</b>	47
<b>ANNEXE</b>	53



# 1. OBJECTIF ET METHODE

Le bâti existant pose des problèmes importants de sécurité en cas de tremblement de terre. Il est omniprésent et les opérations visant à lui conférer une certaine résistance aux séismes sont de plus en plus fréquentes, en accord avec l'évolution sociétale.

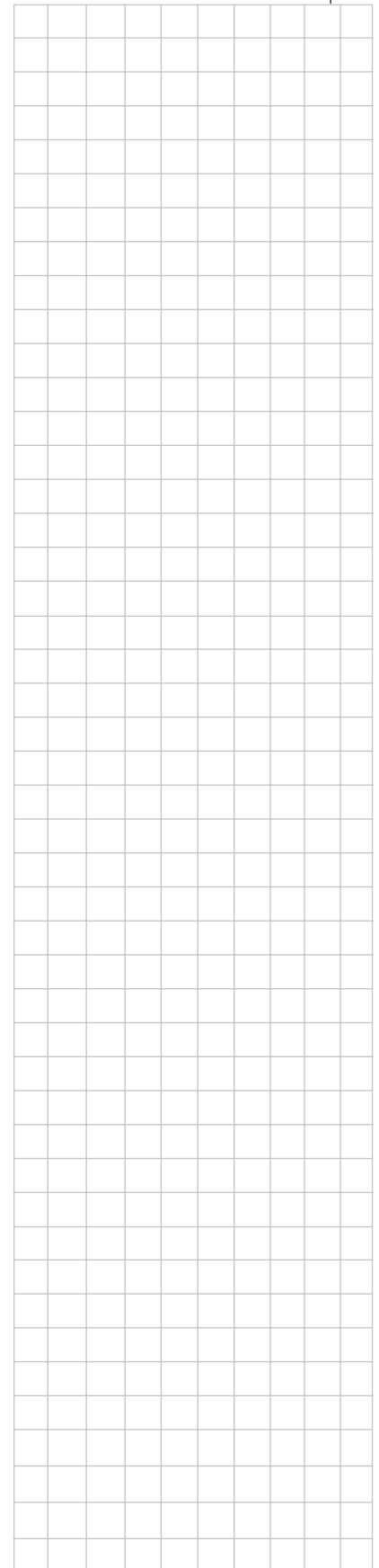
L'objectif de cette étude est de réaliser un panorama des problèmes liés à la réhabilitation parasismique des bâtiments : présenter différentes approches permettant d'effectuer un diagnostic de vulnérabilité aux séismes et adopter une stratégie de réhabilitation pertinente. Le but est pédagogique et non pas opérationnel.

La problématique est abordée sur un plan méthodologique et illustrée par des exemples d'approches variées. Une bibliographie différenciée par thème figure à la fin de l'étude.

L'étude elle-même est basée sur les travaux personnels et sur la compilation d'articles, de communications et de guides totalisant plusieurs milliers de pages. Elle est destinée à l'enseignement dans les écoles d'architecture et, d'une manière générale, à l'usage des architectes. En outre, elle constitue un cadre dont on peut dériver des méthodes pratiques détaillées, utilisables pour des opérations de réhabilitation parasismique.

L'étude facilite donc la rédaction de guides spécifiques développant une ou plusieurs démarches présentées, portant sur :

- l'évaluation de la vulnérabilité aux séismes,
- les stratégies de réhabilitation parasismique,
- les techniques de renforcement des structures.





## 2. CONTEXTE

A l'échelle du globe, les tremblements de terre se produisent régulièrement et il n'y a pratiquement pas d'année où une agglomération importante ne soit gravement touchée par leurs effets.

La France a été épargnée ces dernières années, mais elle est bien sismique. En métropole, elle recèle des structures sismogènes pouvant donner lieu à des tremblements de terre atteignant une magnitude proche de 6.5, qui sont destructeurs compte tenu de la faible profondeur de leurs foyers. Aux Antilles, des séismes d'une magnitude 8 sont possibles à la limite des plaques tectoniques " Amérique " et " Caraïbes ", proche des départements de Guadeloupe et de Martinique.

Dans les territoires de souveraineté française, l'application des règles parasismiques à la construction neuve est obligatoire pour la quasi-totalité d'ouvrages situés dans une zone différente de zéro. En revanche, aucune obligation de renforcement préventif n'existe en ce qui concerne les bâtiments existants. Or, la vulnérabilité aux séismes de ces derniers est parfois très élevée et, dans les zones les plus exposées, de nombreuses pertes en vies humaines pourraient être occasionnées par des tremblements de terre de forte intensité.

Le risque sismique est donc important dans ces zones. Rappelons qu'il est défini comme la probabilité, pour une période de référence, de pertes de biens, d'activité de production et de vies humaines, exprimée en coût ou en pourcentage. Il dépend de l'aléa sismique (probabilité de subir un séisme d'une intensité donnée dans la même période de temps) et de la vulnérabilité aux séismes des biens exposés.

Par conséquent, les quartiers ou bâtiments anciens présentent un risque sismique considérable.

Si aucun renforcement parasismique préventif n'est obligatoire a priori, l'arrêté du 29 mai 1997 relatif aux règles de construction parasismique applicables aux bâtiments " à risque normal " impose la mise aux normes parasismiques des bâtiments de classes B, C et D à l'occasion de certains travaux de réhabilitation.

La conformité avec les règles parasismiques est requise pour la totalité du bâtiment, additions comprises, dans les cas suivants :

- remplacement total des planchers en superstructure dans les bâtiments des classes B, C ou D ;
- addition par surélévation dans les bâtiments des classes B, C ou D;
- addition par juxtaposition de locaux dans les bâtiments des classes C ou D, non désolidarisée par un joint de fractionnement
- création d'au moins un niveau intermédiaire dans les bâtiments des classes C ou D.





La conformité avec les règles parasismiques est requise pour les seules additions dans les cas suivants :

- addition par juxtaposition de locaux dans les bâtiments de classe B, non désolidarisée par un joint de fractionnement ;
- addition par juxtaposition de locaux dans les bâtiments des classes B, C ou D, désolidarisée par un joint de fractionnement.

**Rappel des classes de risque :**

**classe A** : les ouvrages dont la défaillance ne présente qu'un risque minimale pour les personnes ou l'activité économique ;

**classe B** : les ouvrages dont la défaillance présente un risque dit " moyen " pour les personnes (habitations et bureaux dont h < 28m, bâtiments industriels, bâtiments accueillant 300 personnes au plus...) ;

**classe C** : les ouvrages dont la défaillance présente un risque élevé pour les personnes et ceux présentant le même risque en raison de leur importance socio-économique (habitations et bureaux avec h < 28 m, bâtiments accueillant plus de 300 personnes...) ;

**classe D** : les bâtiments, les équipements et les installations dont le fonctionnement est primordial pour la sécurité civile, pour la défense ou pour le maintien de l'ordre public (centres de télécommunications, bâtiments abritant des moyens de secours ou de défense...).

Les ouvrages dont la défaillance peut compromettre la sécurité d'un bâtiment voisin sont à ranger dans la classe de ce dernier si elle est plus contraignante.

Un marché de réhabilitation parasismique s'ouvre donc et la mise en place d'une formation des architectes dans ce domaine est souhaitable.

## 3. SPECIFICITE DES CONSTRUCTIONS EXISTANTES

### 3.1. SITUATION GENERALE

Les bâtiments existants édifiés avant l'obligation d'appliquer les règles parasismiques ou avant leur publication sont souvent situés au centre des agglomérations car ils ont été les premiers construits.

Ils abritent, en plus de logements, de nombreux équipements, services, commerces et administrations dont certains stratégiques, indispensables à la gestion d'une crise (mairie, préfecture, casernes de pompiers, centraux téléphoniques, etc.).

Cette concentration d'activités, qui conduit à une présence importante de personnes, se conjugue avec une résistance des constructions aux séismes souvent faible ou médiocre, notamment dans les quartiers historiques.

L'attente d'un remplacement " naturel " du bâti existant par des ouvrages neufs, conformes aux règles parasismiques, semble peu pertinente. Le renouvellement du parc immobilier français s'effectue à un taux de seulement 1 % par an environ ; en outre, de nombreux bâtiments sont conservés et protégés en raison de leur valeur historique.

Il apparaît donc nécessaire d'entreprendre des opérations de confortement préventif (non seulement à l'occasion de travaux) si on souhaite réduire la probabilité de pertes en cas de séisme. La politique de la puissance publique va dans ce sens. Le ministère de l'Environnement et de l'Aménagement du Territoire (MATE) a lancé plusieurs études pilotes dans le domaine de la mitigation du risque sismique du bâti existant.

### 3.2. DIFFICULTES TECHNIQUES

Lors de la conception d'un ouvrage à construire, toutes les données et caractéristiques ayant une incidence sur son comportement sous action sismique sont généralement disponibles.

Dans le cas des bâtiments existants, il en est souvent autrement. Les incertitudes se situent à plusieurs niveaux :

- 1- Les constructions existantes font souvent partie d'un ensemble bâti dont elles sont séparées par un joint " sans épaisseur " et parfois même elles en constituent un élément mécaniquement solidaire ; leur comportement dynamique ne peut, dans ce cas, être dissocié du bloc dans lequel elles s'insèrent. Or, l'expertise des bâtiments voisins est rarement possible. Par ailleurs, le degré de couplage mécanique peut être difficile à évaluer.





2- Le calcul de la descente de charges et la connaissance de la résistance des éléments porteurs (évaluée habituellement à l'aide de sondages structuraux), ne sont pas suffisants pour décider d'un renforcement. En effet, étant donné que le comportement dynamique d'ensemble conditionne la distribution des charges sismiques sur les éléments participant au contreventement, on devrait connaître la nature et l'efficacité de toutes les liaisons structurales (la prise en compte des conditions d'encastrement ou d'articulation réelles a une importance capitale pour déterminer le comportement d'une ossature exposée à un séisme), le degré d'amortissement procuré par la construction, la raideur des éléments porteurs principaux et leur capacité à tolérer les déformations imposées dans le domaine élastoplastique. Or, plus la construction est ancienne, plus il est difficile, voire quasi impossible, d'obtenir tous ces paramètres pour l'ensemble de la structure. Sa modélisation est alors très délicate et un jugement d'expert qualitatif peut être plus fiable qu'une approche purement quantitative. On estime d'ailleurs que pour établir un diagnostic fiable, une expérience " vécue ", permettant de " sentir " le comportement de la structure étudiée, est indispensable.

3- La nature du sol influe considérablement sur le comportement des constructions qui y sont fondées. D'une part, si les périodes propres d'oscillation d'un ouvrage et du sol sont proches, l'effet de résonance peut considérablement accroître les charges sismiques. D'autre part, sur certains types de sol de faibles caractéristiques mécaniques, des dommages importants aux constructions sont très fréquents.

Ainsi, les cartes des dommages établies pour Salon-de-Provence (Bouches-du-Rhône) après le séisme de Lambesc (1919) font apparaître, pour un même type de construction, des effondrements systématiques dans certaines zones bien délimitées et des dommages nettement moindres dans les zones voisines ; ces différences sont vraisemblablement dues à la variation de la nature du sol.

La connaissance du sol d'assise est donc indispensable pour évaluer la vulnérabilité aux séismes d'une construction. Cependant, une campagne géotechnique d'envergure est rarement envisageable lors des opérations courantes.

4- La méthodologie de l'évaluation de la vulnérabilité aux séismes des ouvrages existants n'est pas évidente a priori. Or, il n'existe pas en France de méthode " officielle " ; aucune norme, aucun document technique unifié (DTU) ou guide ne sont disponibles. L'adoption de méthodes étrangères (italiennes, américaines, canadienne,...) est possible, mais elles ne sont pas écrites en langue française et sont très peu connues dans notre pays.

## 4. PROJET DE REHABILITATION PARASISMIQUE D'UN BATIMENT

### 4.1. ETAPES

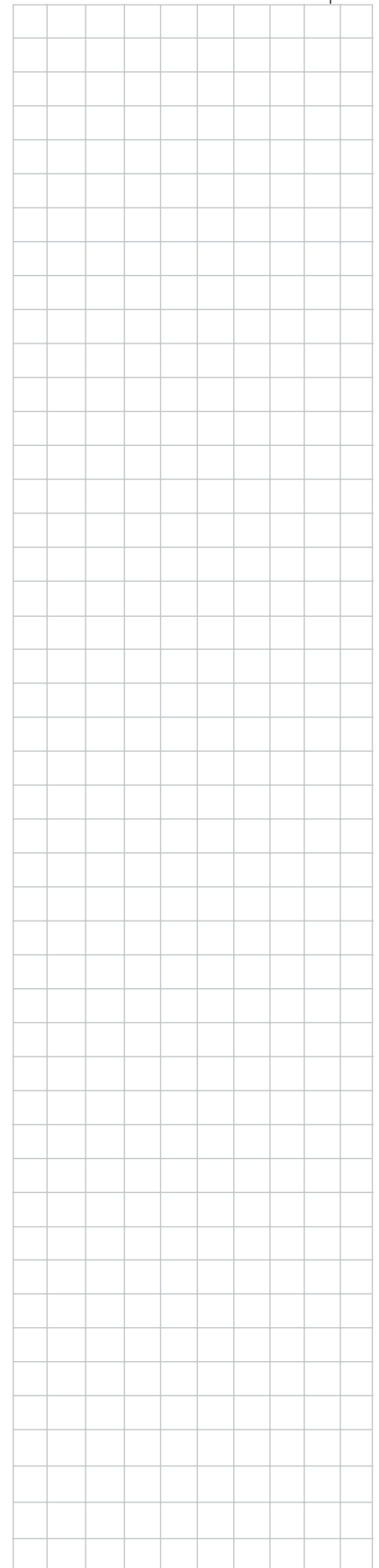
Dans le cadre d'une réhabilitation classique, non parasismique, les éléments structuraux sont dimensionnés pour les nouvelles descentes de charges verticale et horizontale, cette dernière consistant à transmettre au sol d'assise la pression de vent exercée sur l'enveloppe du bâtiment. Il s'agit donc d'organiser au préalable les éléments porteurs d'une manière compatible à la fois avec les nouveaux espaces créés et avec un schéma structural réaliste.

Lorsque la réhabilitation doit tenir compte des charges sismiques, la démarche est beaucoup plus complexe car ces charges sont engendrées, non seulement verticalement, mais aussi horizontalement, dans chaque masse présente. Le comportement dynamique qui en résulte peut varier, selon le cas, d'acceptable à très défavorable. L'importance des mouvements sismiques du sol ne constitue donc pas nécessairement le facteur déterminant car la distribution des masses, ainsi que celle des éléments rigides, régissent le comportement dynamique de l'ouvrage, et par là le degré d'amplification par la structure des oscillations qui leur sont imposées au niveau du sol. On observe régulièrement l'effondrement de constructions même lors des séismes de faible magnitude.

Lors d'une réhabilitation " parasismique ", la première étape consiste à effectuer un diagnostic de comportement de l'ouvrage sous l'action sismique et identifier ses faiblesses, c'est-à-dire évaluer sa **vulnérabilité aux séismes**. On doit déterminer si pour une intensité de séisme donnée, la construction est apte à présenter le comportement désiré. Il ne semble pas réaliste de rechercher le même niveau de protection que pour les constructions neuves. Par conséquent, il convient de formuler, avec le maître d'ouvrage, les exigences de comportement pour la structure, pour les éléments non structuraux et pour l'équipement. Ces exigences sont traduites en termes de **niveaux de performance**, en empruntant le vocabulaire en usage dans les pays anglo-saxons. En d'autres termes, on doit décider du degré de dommage accepté lors des tremblements de terre. Cette approche, connue comme " performance based design ", est de plus en plus adoptée dans les pays concernés.

Lors de l'étape suivante, en fonction du comportement recherché, différentes **stratégies de renforcement** devraient être examinées. Ainsi, on peu:

- limiter l'action sismique sur la construction, par exemple en prévenant la résonance du bâtiment avec le sol ou en optant pour l'isolation parasismique ;





- " jouer la carte " de la résistance mécanique en augmentant d'une manière significative la capacité portante des éléments structuraux.
- favoriser la dissipativité, c'est-à-dire l'aptitude de l'ouvrage à tolérer des déformations élastoplastiques notables, fissuration ou encore rupture de certains éléments sans s'effondrer.

Bien entendu, il est possible d'opter pour une combinaison de stratégies.

Le coût des différentes démarches est certainement un facteur de décision important. La stratégie adoptée est en général un **compromis entre le coût de la réhabilitation et le degré de dommages accepté.**

L'ultime étape du projet de réhabilitation parasismique est le choix des **techniques de renforcement**. Il peut s'agir d'un renforcement de la construction ou d'un traitement du sol d'assise. Souvent les deux sont requis.

## 4.2. EVALUATION DE LA VULNERABILITE AUX SEISMES D'UN BATIMENT

### 4.2.1. TYPOLOGIE

Les bâtiments existants ont été bâtis à différentes époques, avec des modes de construction variés et présentent une grande richesse de formes.

L'évaluation doit donc être différenciée et basée sur une typologie. La difficulté réside dans la diversité des paramètres pouvant faire l'objet d'une typologie (situation, époque ou type de construction, configuration, etc.). Cependant, il semble qu'une classification par type de construction convienne le mieux. Exemples :

- maçonnerie en terre crue
- maçonnerie ancienne en pierre
- maçonnerie non ancienne en pierre
- maçonnerie en béton ou blocs de béton non chaînée
- maçonnerie en briques ou blocs de béton chaînée  
maçonnerie armée
- ossature en béton armé coulé en place avec remplissage en maçonnerie
- etc.

Généralement, les différents modes de construction correspondent à une période historique ou actuelle donnée. La typologie est plus ou moins différenciée, selon qu'il s'agit d'une évaluation détaillée, sommaire ou intermédiaire.





- l'architecture (la configuration et le détail architectural),
- le système constructif,
- les dispositions constructives apparentes,
- l'état de conservation,
- l'interaction avec l'environnement construit,
- le site.

## 2 Niveau d'agression sismique

La vulnérabilité croît avec l'intensité du séisme. On peut ne l'évaluer que pour le séisme maximal retenu ou par rapport à plusieurs niveaux d'agression sismique, généralement trois :

- **séisme faible**, correspondant au degré VII à l'échelle d'intensité macrosismique EMS 92 ou à une accélération maximale du sol  $a_s = 1 \text{ m/s}^2$  ;
- **séisme moyen**, correspondant à l'intensité VIII ou à  $a_s = 2 \text{ m/s}^2$  ;
- **séisme fort**, correspondant à l'intensité IX ou à  $a_s = 4 \text{ m/s}^2$ .

## 3- Niveaux de performance

Divers niveaux de comportement peuvent être recherchés pour un niveau d'agression sismique donné. Il paraît pertinent d'apprécier la capacité de la structure au moins par rapport à deux degrés de " performances : non-effondrement et fonctionnalité.

Exemple de quatre niveaux de performance :

- **Non-effondrement** : cette exigence, visant à assurer la sauvegarde des vies humaines, est suffisante pour la plupart des bâtiments courants. L'ouvrage peut nécessiter la démolition après un séisme fort.
- **Dommages lourds ne nécessitant pas la démolition.**
- **Dommages réparables rapidement** : le volumes des travaux est limité.
- **Fonctionnalité** : l'ouvrage et son exploitation doivent pouvoir " fonctionner " après un tremblement de terre. Les dommages structuraux et les dommages non structuraux ne compromettant pas le fonctionnement ou ne rendant pas la construction impropre à sa destination (par exemple confinement de produits toxiques) sont donc admis. Cette exigence est requise pour les ouvrages stratégiques, abritant des activités nécessaires à la gestion de la crise et pour tout bâtiment dont le maître d'ouvrage exige la poursuite d'exploitation immédiate.

## 4- Méthode d'évaluation

En l'absence d'une méthode standardisée, de nombreuses approches de l'évaluation de la présomption de vulnérabilité des ouvrages aux séismes ont

été proposées, notamment dans les pays de forte sismicité (Italie, Etats-Unis, Yougoslavie,...). Plusieurs méthodes sont présentées au § 4.2.5. Elles ont été sélectionnées en raison des différences d'approches ou d'objectifs.

Dans l'évaluation de la présomption de vulnérabilité, il s'agit en général d'estimer un degré de vulnérabilité global.

A cet effet, les " faiblesses " constatées sont hiérarchisées et une " note " ou coefficient caractérisant leur gravité leur est attribué. Leur prise en compte pondérée, dont les modalités varient d'une méthode à l'autre, permet de conclure sur les degrés de vulnérabilité prédéfinis (3 à 5 en général).

En fonction du degré de vulnérabilité, il est décidé d'entreprendre une réhabilitation ou non. Les situations suivantes peuvent se présenter :

- état acceptable, renforcement non nécessaire ;
- état nécessitant un renforcement économiquement envisageable ;
- étude plus poussée nécessaire ;
- très forte vulnérabilité, la faisabilité économique d'un renforcement doit être étudiée.

#### 4.2.4. EVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ

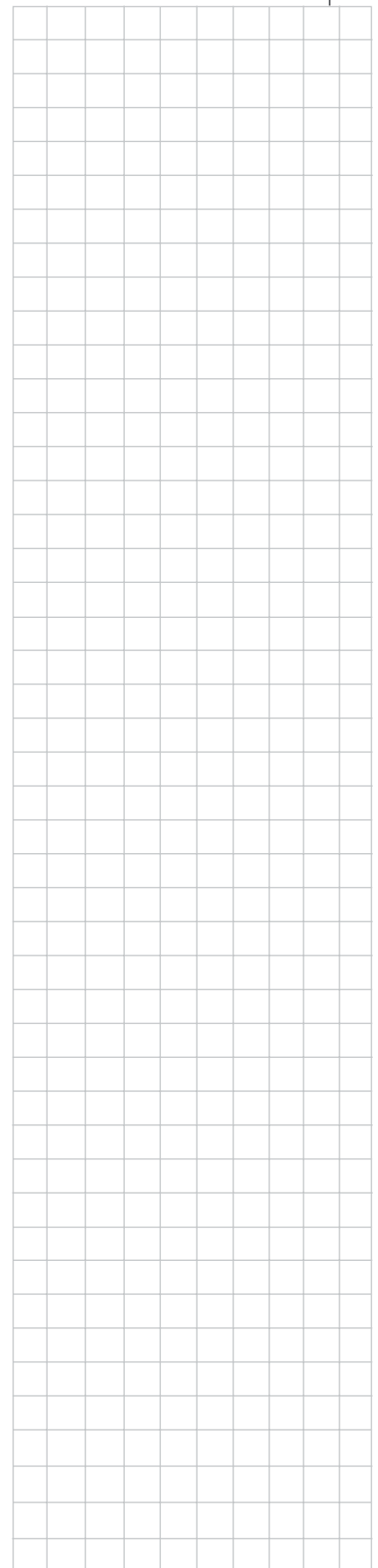
Une étude quantitative d'évaluation de la vulnérabilité est nécessaire lorsque l'examen qualitatif effectué lors de la phase précédente présente de fortes incertitudes ou lorsqu'on décide de réhabiliter une construction dont on a constaté la vulnérabilité aux séismes. Bien qu'on ait souvent recours aux méthodes de vérification de résistance et de rigidité destinées à la construction neuve, il est préférable d'utiliser des méthodes spécifiquement établies pour la réhabilitation parasismique. Il n'en existe pas en France. Deux guides américains font actuellement référence dans ce domaine (15) (46).

#### 4.2.5. EXEMPLES DE MÉTHODES D'ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ DES OUVRAGES AUX SÉISMES

Etant donné la complexité de la problématique, des méthodes d'évaluation diverses ont été élaborées. Les méthodes présentées visent chacune un objectif, donc également un besoin différent. Elles ont été classées par ordre croissant de complexité. Le but de cette présentation est d'illustrer la grande diversité des approches.

##### • *Méthode simplifiée à l'usage des architectes (M. Zacek)*

Rédigée en 1993, cette méthode rapide (33) et peu coûteuse permet d'évaluer une présomption de vulnérabilité des constructions aux séismes par un examen visuel seulement. Elle peut être utilisée par des non-spécialistes afin d'identifier les constructions potentiellement dangereuses. La durée d'examen est de 30 mn/construction environ.





A l'origine, il s'agissait d'un guide destiné à l'Agence d'urbanisme et d'aménagement de la Guadeloupe (ADUAG), qui envisageait d'établir un état des lieux de la présomption de la vulnérabilité aux séismes des constructions existantes dans des communes pilotes. Dans une forme élargie et complétée par une vérification quantitative, la méthode a été utilisée par le BRGM pour évaluer la vulnérabilité de bâtiments à Pointe-à-Pître (Guadeloupe) et Fort-de-France (Martinique) dans le cadre de l'opération GEMITIS.

Les constructions et les éléments constructifs particulièrement vulnérables aux séismes sont présentés dans une grille, en même temps qu'une évaluation des dommages correspondants qu'ils pourraient subir pendant des oscillations du sol.

Trois niveaux d'agression sismique ont été considérés : séismes faibles, moyens et forts. Le résultat est obtenu par une simple lecture de la grille, en retenant la situation la plus grave. Lorsque la construction cumule certains facteurs de vulnérabilité, les dommages potentiels sont majorés d'un degré. Ni l'interaction avec le sol, ni les effets de site ne sont pris en compte. Toutefois, les différentes situations pénalisantes sont citées et doivent être signalées sur la fiche de relevé. L'avis d'un géotechnicien spécialisé peut ainsi être sollicité.

Afin d'attirer l'attention de l'utilisateur sur les points faibles importants, un résumé des dommages sismiques caractéristiques pour les types de constructions courants figure dans la grille. La fiche de relevé et un extrait de la grille d'évaluation sont présentés sur les pages suivantes.





FICHE DE RELEVÉ : exemple d'application

LOCALISATION : 124, rue Lantier 13100 Beaupuy

CARACTERISTIQUES GENERALES

Propriétaire : M. Francis JOLI  
 Occupant : idem  
 Nombre maximal d'occupants : 6  
 Destination (usage) : habitation individuelle  
 Nombre de niveaux : 1 + exhaussement des pilotis  
 Type de construction : portiques b.a. avec murs de remplissage  
 Type de toiture : tribune bois non accessible

Année de construction : entre 1980 et 1985  
 Surface au sol (m<sup>2</sup>) : 120  
 Hauteur en mètres : 3,20 à 8  
 Epaisseur des murs extérieurs : 30 cm  
 Présence d'un sous-sol : oui non

PLAN ET ELEVATIONS (croquis ou photos)

FACTEURS DE VULNERABILITE

1. Construction

1.1. Caractéristiques

Forme en plan symétrique selon deux axes - forme symétrique selon un axe - forme irrégulière - construction de grande longueur - asymétrie des parties rigides (niveau sur pilotis) - niveaux en retrait - niveaux en saillie (poteaux courts) (poteaux trop élancés) - angle affaibli - absence de chaînages horizontaux et verticaux - absence d'encadrements de baies (ossature non contreventée) - ossature à étage en bois avec poteaux non continus - liaisons précaires entre éléments constructifs - auvents importants - consoles non contreventées - avancée de toiture importante - toiture-terrasse plantée - acrotère haut lourd - balustrade en pierre ou béton - conduit de fumée élancé - bâtiment mitoyen sans joint vide d'au moins 4 cm - autres caractéristiques : garde-corps en bois

1.2. Etat de conservation : normal excellent mauvais

1.3. Evaluation sommaire de vulnérabilité :

en cas de séisme faible : dommages modérés - importants graves  
 en cas de séisme moyen : dommages modérés - importants graves  
 en cas de séisme fort : dommages modérés - importants graves

2. Nature du sol

Rocher sain (rocher altéré ou fracturé) - graviers et sables secs et compacts - graviers et sables humides - argiles ou marnes dures - argiles et marnes molles - autres alluvions molles - sables lâches - remblais anciens - remblais récents - terrain inondable - autres sols :

3. Situation dans le site

Terrain plat - pente modérée uniforme (pente forte uniforme) (proximité d'un changement de pente) - abord de falaise - sommet - crête - proximité d'une limite entre roche et alluvions - plaine - vallée alluviale - plateau - proximité de murs de soutènement en amont - autres cas :

AUTRES RENSEIGNEMENTS

1. Etude approfondie nécessaire oui non

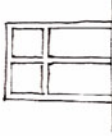
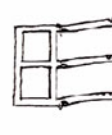
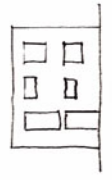
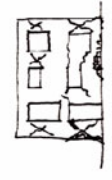
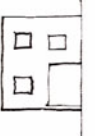



2. Observations :

- le niveau des pilotis ne comporte aucun mur pouvant contribuer à la stabilité latérale

3. Auteur du relevé (nom, organisme) : Jean Sérin, mairie de Beaupuy

4. Date du relevé : le 25 février 1993

Fig. 2 - Exemple d'application de la fiche de la fig. 1 (d'après 33)

FACTEURS DE VULNERABILITE	DOMMAGES TYPIQUES	SEISME FAIBLE		SEISME MOYEN		SEISME FORT	
		dommages modérés	dommages graves	dommages modérés	dommages graves	dommages modérés	dommages graves
<ul style="list-style-type: none"> <li>• POTEAUX TROP ELANCÉS</li> </ul>			○		○		○
<ul style="list-style-type: none"> <li>2. PERCEMENTS ET OUVERTURES</li> <li>• NOMBREUSES FENETRES OU PORTES (AIRE TOTALE &gt; 50% DU PAVILLON PORTEUR)</li> </ul>			○		○		○
<ul style="list-style-type: none"> <li>• ANGLE AFFAIBLI</li> </ul>			○		○		○
<ul style="list-style-type: none"> <li>3. PORTIQUES AVEC MURS DE REMPLISSAGE</li> </ul>			○				○

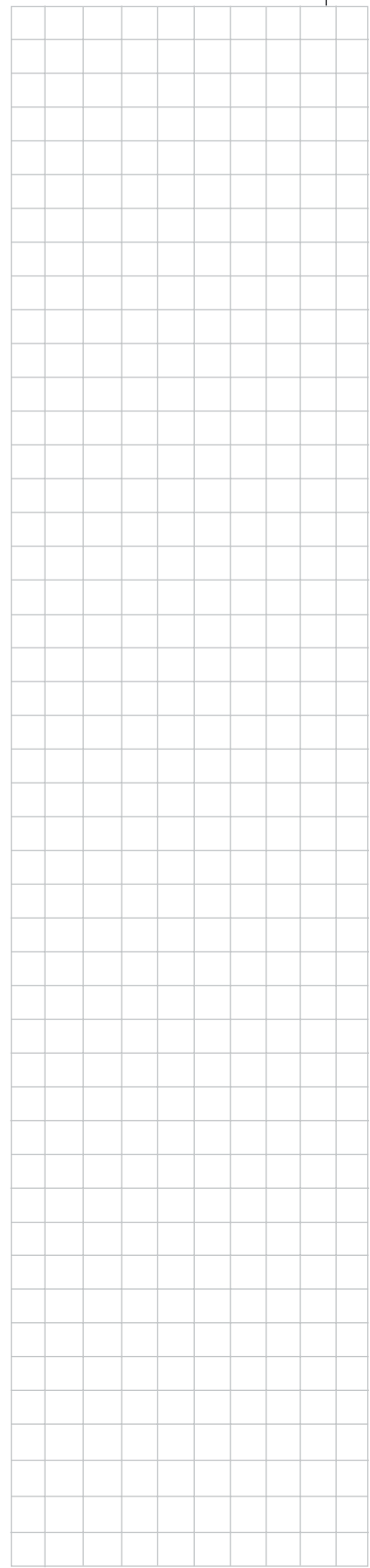


Fig. 3 - Extrait d'une grille d'évaluation de la présomption de vulnérabilité (d'après 33



• **Méthode proposée par le groupe de travail " Vulnérabilité du bâti existant " de l'Association française du génie parasismique (AFPS) [14]**

Cette méthode est applicable aux bâtiments construits depuis 1960. Deux niveaux d'évaluation sont visés. Le premier consiste en une approche qualitative et le second en une vérification quantitative.

**Niveau 1 : approche qualitative**

Une grille de relevé détaillée doit être remplie lors d'une inspection extérieure et intérieure du bâtiment étudié. L'évaluation est faite à l'aide d'un tableau d'évaluation, dans lequel une cote (coefficient de pénalité) est attribuée aux divers facteurs de vulnérabilité (fig. 4). Ces cotes permettent de calculer un coefficient K variant de 0 à 100. Selon la valeur de K, on conclut sur une présomption de :

- très forte vulnérabilité,  $K > 100$
- forte vulnérabilité,  $50 < K \leq 100$
- moyenne vulnérabilité,  $25 < K \leq 50$
- faible vulnérabilité,  $10 < K \leq 25$
- très faible vulnérabilité,  $K \leq 10$ .

Afin d'éviter d'aggraver la " note " par un nombre important de facteurs de vulnérabilité faibles, une correction du résultat est prévue.

Lorsque  $K > 50$ , une évaluation quantitative est nécessaire. Dans le cas contraire, on peut conclure directement sur un niveau de vulnérabilité, correspondant à un des types de dommages définis dans le guide (fig.5). Ces types sont les degrés de dommages 2, 3, 4 et 5 de l'échelle macrosismique européenne EMS 92.

Pour les valeurs de  $K < 50$ , la correspondance avec le degré de dommages est la suivante :

*Présomption de vulnérabilité moyenne :  $25 < K \leq 50$*

- 0.1 g : dommages légers
- 0.2 g : dommages modérés
- 0.4 g : dommages graves

*Présomption de vulnérabilité faible :  $10 < K \leq 25$*

- 0.1 g : dommages négligeables
- 0.2 g : dommages légers
- 0.4 g : dommages modérés

*Présomption de vulnérabilité très faible :  $K \leq 10$*

- 0.1 g : dommages nuls à négligeables
- 0.2 g : dommages négligeables à légers
- 0.4 g : dommages légers à modérés.

EVALUATION QUALITATIVE DE LA PRESOMPTION DE VULNERABILITE

Propriétaire du bâtiment :

Dénomination et adresse du bâtiment :

Année de construction :

Date du diagnostic :

Auteur du diagnostic :

<b>A</b> Implantation du bâtiment	1 Pente générale du terrain > 40 % 5		2 Proximité d'un changement de pente D < 2H du bâtiment 15		Observations			
<b>B</b> Environnement du bâtiment	1 Bâtiments accolés : joint = 0 ou rempli d'un matériau 25		2 Joints entre blocs adjacents < 2 cm 25 2 à 4 cm 10 > 4 cm 5					
<b>C</b> Type de structure	1 Murs en maçonnerie de blocs 15	2 Murs en béton non armé 10	3 Murs en béton armé 5	4 Ossature poteaux-poutres sans remplissage 20	5 Ossature poteaux-poutres avec remplissage 25	6 Système mixte murs en maçonnerie et ossature 20	7 Panneaux de façade BA préfabriqués porteurs 10	8 Ossature BA préfabriquée porteuse 50
<b>D</b> Forme en plan	1 Irrégulière 5		2 Elancement en plan L/l > 4 5		3 Parties saillantes ou rentrantes 5			
<b>E</b> Forme en élévation	1 Etages en encorbellement > 2 m 15	2 Retrait en façade > 40 % 20	3 Planchers d'un même étage situés à des hauteurs différentes 10	4 Présence d'un plancher lourd ou d'une toiture lourde 10	5 Absence de diaphragme horizontal en toiture 20			
<b>F</b> Contreventement	1 Variation verticale croissante des rigidités 0 à 100 (voir formule 1)		2 Dissymétrie : torsion <b>faible : 5</b> <b>accusée : 50</b>		3 Absence de contreventement dans le sens des x ou y 100		4 Densité de voiles de contreventement sens x ou y 0 à 100 (voir formule 2)	
<b>G</b> Zones ou éléments critiques	1 Descente de charge en baïonnette 25	2 Présence de poteaux courts ou partiellement brisés participant au contreventement 50		3 Présence de poteaux élançés 10		4 Percements inserts dans les poteaux e > d/3 25	5 Percements inserts dans les poutres e > d/3 10	6 Percements inserts dans les nœuds e > d/3 50
	7 Présence d'un angle de façade affaibli 15		8 Axes poteaux et poutres non concourants e > c/2 10		9 Diaphragmes horizontaux avec grandes ouvertures s > 10 % S 10		10 Absence de chaînages encadrant les murs de contreventement en MAC <b>verticaux : 25</b> <b>horizontaux : 75</b>	
<b>H</b> Divers	1 Etat de conservation du gros œuvre <b>médiocre : 10</b> <b>mauvais : 25</b>		2 Risque de chute d'éléments non structuraux 5		3 Façade BA préfabriquée non porteuse 10			
<b>Total des pénalités</b>								

Fig. 4 - Tableau d'évaluation de présomption de vulnérabilité (d'après 14)



TYPE DE DOMMAGES	NATURE DES DOMMAGES	REPARATION	PERTES EN VIES HUMAINES
Nuls à négligeables	Microfissures ( 1mm) dans quelques cloisons. Fatigue des bâtiments sans signe apparent d'endommagement	Appréciation au cas par cas	Nulles
Légers	Dégâts mineurs aux éléments non structuraux: - fissures dans cloisons de distribution, - chute de plâtras, - chute d'éléments légers de plafonds suspendus	Réparation sans évacuation des occupants	Rares
Modérés	Dégâts importants aux éléments non structuraux ; chute de cheminées  Dégâts possibles aux éléments structuraux, fissurés ou plastifiés, mais non détruits	Réparation pouvant nécessiter l'évacuation des occupants	Peu nombreuses
Graves	Dégâts très importants aux éléments non structuraux, rupture ou effondrement localisé d'éléments structuraux	Expertise pour décision de réparer ou non	Possibilité de pertes nombreuses
Effondrement	Effondrement partiel ou total du bâtiment	Réparation lourde ou non envisageable	Possibilité de pertes très nombreuses

Fig. 5 - Typologie des dommages sismiques (d'après 14)

### Niveau 2 : approche quantitative

L'évaluation est faite pour les trois niveaux d'agression sismique cités en 4.2.3. par une des méthodes d'analyse suivantes, choisie en fonction des critères de régularité figurant dans les règles PS 92 :

- analyse forfaitaire,
- analyse simplifiée,
- analyse complète.

Il est également procédé à la vérification de la stabilité au renversement, de la stabilité interne et de la résistance des éléments porteurs.

Les résultats de l'analyse sismique sont hiérarchisés de la manière suivante

- instabilité d'un élément de contreventement : **effondrement**,
- contrainte excessive dans un élément de contreventement : **effondrement à désordres graves**,
- déformations excessives de la structure : **effondrement partiel** (effets du second ordre pour les systèmes à portiques ou entrechoquement des deux blocs contigus) à désordre modérés.

En recensant tous les facteurs de vulnérabilité établis qualitativement et en examinant les résultats d'une analyse quantitative, on établit une évaluation de la vulnérabilité en plaçant une croix dans la case appropriée du tableau ci-après :

NATURE DU SEISME	NATURE DES DOMMAGES				
	Négligeables	Légers	Modérés	Graves	Effondrement
(VII) Faible (0.1g)					
(VIII) Moyen (0.2g)					
(IX) Fort (0.4g)					

Fig. 6 - Grille de présentation des résultats de l'évaluation de vulnérabilité

#### • Méthode " FEMA 310 "

Présentée sous forme de guide [20], cette méthode de la Federal Emergency Management Agency américaine, datant de 1998, constitue une pré-norme. Elle est le résultat de mises à jour de méthodes antérieures, intégrant les enseignements des études postsismiques récentes.

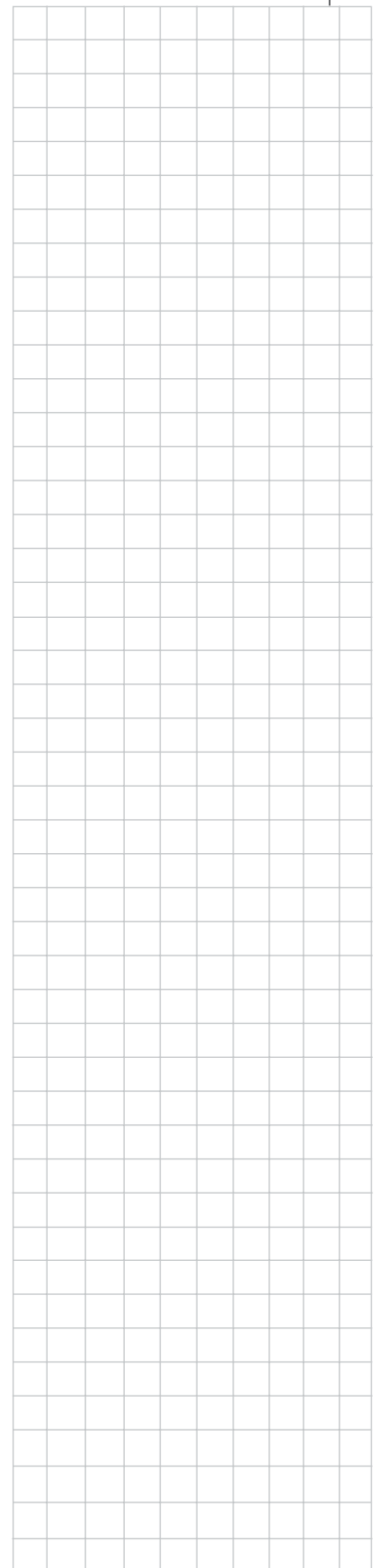
L'évaluation est systématiquement faite par rapport à deux niveaux de performance :

- sauvegarde des vies humaines (SVH),
- fonctionnalité immédiate (FI).

Trois niveaux d'évaluation sont proposés.

#### Niveau 1 : présomption de vulnérabilité

Cette évaluation concerne tous les types de bâtiments et vise à identifier ceux qui n'atteignent pas le niveau de performance requis. L'état de la construction est examiné à l'aide d'une série de " check-lists " détaillées dans le guide et portant sur la structure, les éléments non structuraux et l'interface sol/fondations. Si des points vulnérables sont détectés, il peut être décidé de procéder à l'évaluation du niveau 2 ou de se satisfaire des résultats obtenus.





NIVEAU " FAIBLE " : la résistance de tout niveau vis-à-vis des charges horizontales ne doit pas être inférieure à 80 % de celle des niveaux du dessus ou du dessous, pour les performances SVH et FI.

NIVEAU " SOUPLE " : la rigidité du système de contreventement ne doit pas être inférieure à 70 % de celle des niveaux adjacents, ni inférieure à 80 % de la rigidité moyenne des trois niveaux immédiatement supérieurs ou inférieurs, pour les performances SVH et FI.

GEOMETRIE : les dimensions horizontales du système de contreventement ne doivent pas varier de plus de 30 % par rapport à celles du contreventement des niveaux adjacents, à l'exclusion des derniers niveaux en retrait, pour les performances SVH et FI.

DISCONTINUITÉ VERTICALES : tous les éléments verticaux de contreventement doivent être continus jusqu'aux fondations.

MASSE : la masse effective ne doit pas varier de plus de 50 % d'un niveau à l'autre, pour les performances SVH et FI.

TORSION : la distance entre les centres de rigidité et de gravité ne doit pas dépasser 20 % de la largeur du bâtiment dans toutes les directions, pour les performances SVH et FI.

DETERIORATION DE L'ACIER : il ne doit pas y avoir de traces de rouille, de fissures ou d'autres détériorations visibles dans les éléments et assemblages assurant la résistance vis-à-vis des charges verticales ou horizontales.

DETERIORATION DU BETON : il ne doit pas y avoir de détérioration visible du béton ou des armatures dans les éléments assurant la résistance vis-à-vis des charges verticales et horizontales.

FISSURES DANS LES VOILES : la largeur des fissures obliques dans les voiles doit être inférieure à 3 mm pour le niveau SVH et à 1,5 mm pour le niveau FI. Les fissures ne doivent pas être concentrées en un endroit ni former des figures en forme de X.

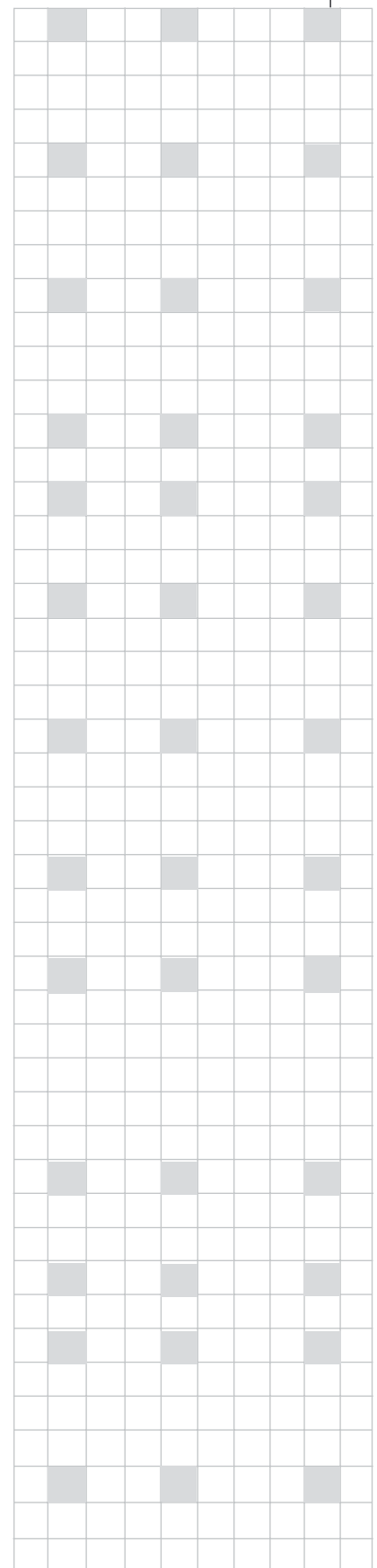
### **Systeme de contreventement**

OSSATURE : l'ossature secondaire en acier ou béton armé doit constituer un système capable de transmettre les charges verticales.

HYPERSTATICITE : pour le niveau FI, la structure doit comporter au moins deux voiles dans chaque direction principale.

CONTRAINTES DE CISAILEMENT : ces contraintes, calculées selon la méthode simplifiée présentée, doivent être inférieures aux valeurs indiquées dans le guide.

ARMATURE DU BETON : le rapport de la section des armatures à la section totale doit être supérieur à 0,0015 dans la direction verticale et à 0,0025 dans la direction horizontale, pour les niveaux SVH et FI. L'espacement des barres ne doit pas être supérieur à 45 cm.





ASSEMBLAGES ENTRE POTEAUX : les assemblages entre les poteaux en acier noyés dans les extrémités des voiles doivent avoir une résistance à la traction au moins égale à celle des poteaux. Cette exigence ne concerne que le niveau FI.

### Assemblages

TRANSMISSION DES EFFORTS : les diaphragmes doivent être armés et ancrés de manière à assurer la transmission des charges sur les voiles et, pour le niveau FI, avoir une résistance au cisaillement dans leur plan au moins égale à celle des voiles.

ANCORAGE DES MURS : les voiles doivent être ancrés dans les fondations. Pour le niveau FI, la résistance de l'ancrage ne doit pas être inférieure à celle du mur.

ANCORAGE DES POTEAUX D'EXTREMITES DES VOILES : les poteaux situés aux extrémités des voiles doivent être ancrés dans la fondation. Pour le niveau FI, la résistance de l'ancrage à la traction ne doit pas être inférieure à celle des poteaux.

Remarque : la ventilation des " points " en trois groupes ne semble pas toujours cohérente ; ceci est sans incidence sur la méthode.

### Niveau 2 : analyse quantitative

Cette analyse consiste à appliquer une méthode de calcul élastique linéaire simplifiée aux bâtiments désignés comme non conformes au niveau 1. L'objectif est d'identifier les constructions qui ne nécessitent pas de réhabilitation, ainsi que celles qui présentent une réelle vulnérabilité.

Le tableau suivant précise, en fonction du nombre de niveaux, les types de construction nécessitant une analyse de niveau 2 ou éventuellement de niveau 3, même s'ils ont été considérés comme conformes au niveau 1.





### Niveau 3 : analyse approfondie

Les évaluations aux niveaux 1 et 2 étant assez conservatrices en raison de l'approche simplifiée, l'analyse du niveau 3 vise à une évaluation précise qui ne se justifie que dans des cas spécifiques.

On peut utiliser des méthodes statiques ou dynamiques linéaires ou non linéaires, non précisées dans le document FEMA 310. Le lecteur est renvoyé au guide 46 .

Un plan du rapport final figure dans le guide. Ce rapport devrait comporter au moins les informations suivantes :

- Objectif, méthode, type d'analyse, niveaux de performance vérifiés.
- Description du bâtiment : destination, capacité, forme, dimensions, système porteur, éléments non structuraux, type de bâtiment par référence à une typologie, importance historique,...
- Description du site : topographie, sismicité, type de sol,...
- Liste des hypothèses adoptées : propriétés des matériaux, effets liés au site, nature du sol,...
- Liste des points faibles constatés.
- Annexes : références, notes de calcul,...

L'ensemble des démarches préconisées dans le guide est résumé dans le tableau de la page suivante.

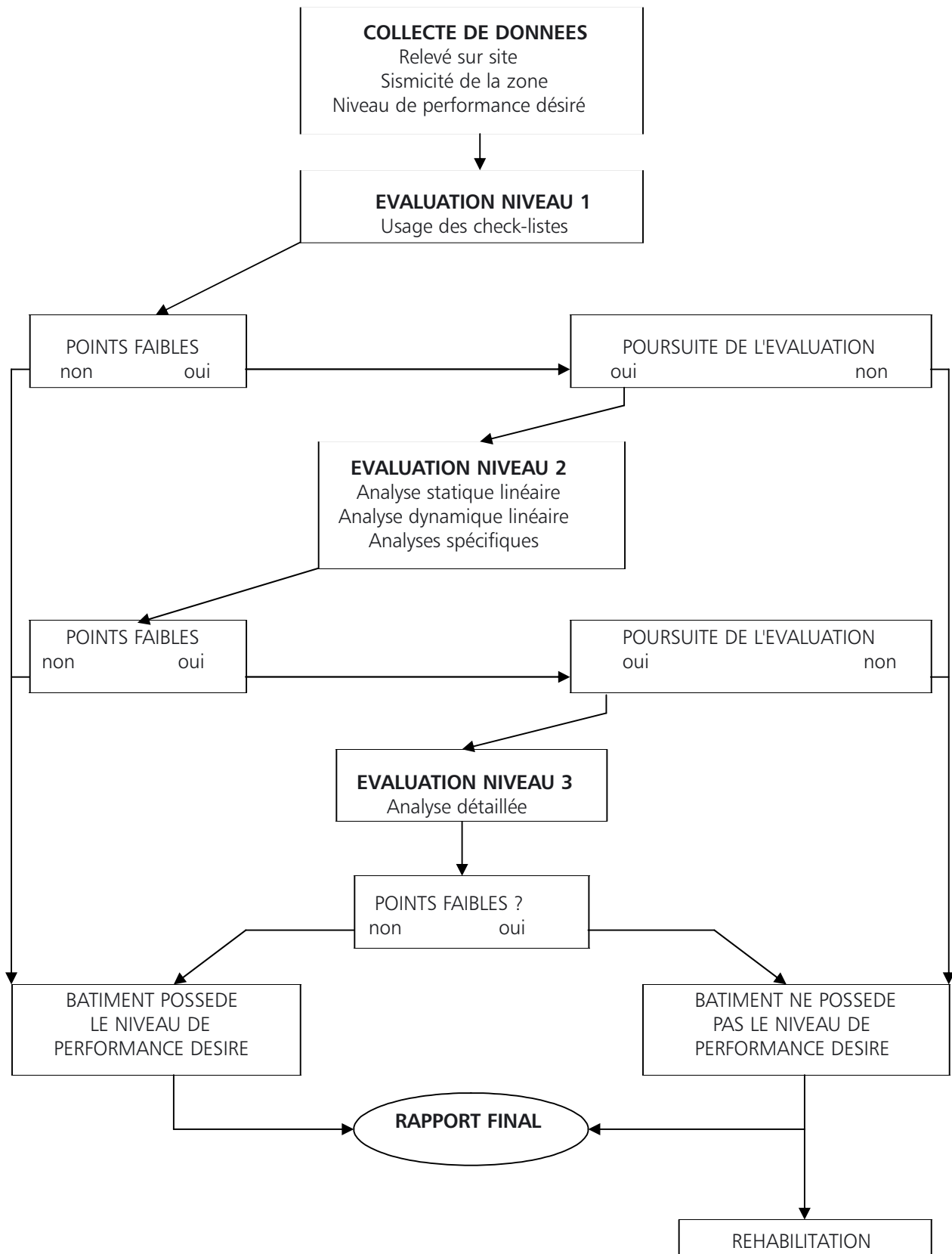


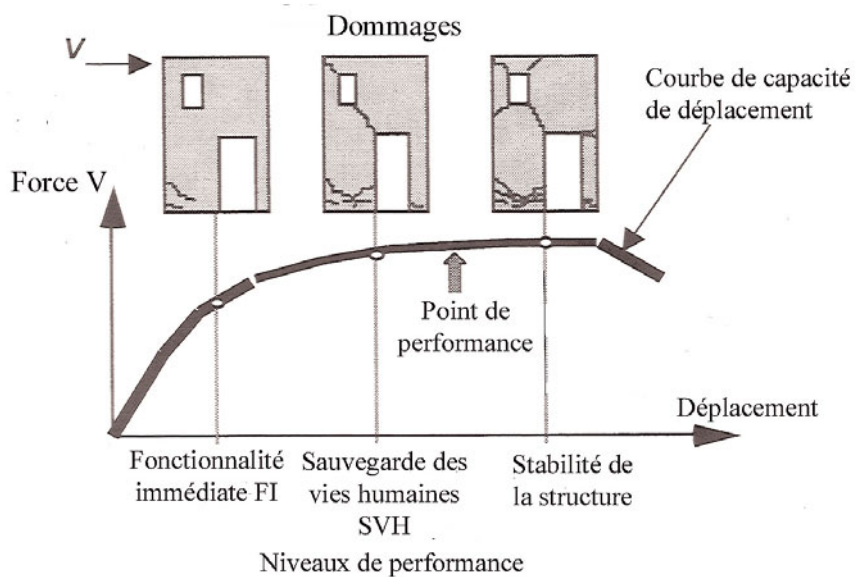
Fig. 9 - Organigramme de la méthode " FEMA 310 " (20)

• **Méthode " ATC 40 "**

Cette méthode, conçue pour les constructions de béton armé, publiée aux Etats-Unis en 1986 par Applied Technology Council [15], est innovante par rapport aux approches classiques. La capacité d'atteindre un niveau de performance est évaluée en termes de déplacements et non en termes de forces, car lors des déformations postélastiques, l'importance des dommages est davantage fonction des déplacements que des forces.

La vulnérabilité est évaluée pour les mêmes niveaux de performance que dans la méthode " FEMA 310 " : sauvegarde des vies humaines (SVH) et fonctionnalité immédiate (FI), par une méthode de calcul statique non linéaire. Des courbes de capacité de déplacement (donc de déformabilité) sont tracées pour les bâtiments étudiés. Elles dépendent des caractéristiques de ces derniers et non pas d'une agression sismique. Les différents degrés de dommages correspondant aux déplacements sont localisés sur la courbe.

En corrélant la courbe de capacité de déplacement du bâtiment avec le déplacement maximal provoqué par un mouvement sismique de sol donné, déterminé par une méthode proposée dans le document, on obtient un point appelé " point de performance " (traduit parfois en français comme " point de fonctionnement "). Sa position par rapport au niveau de performance recherché indique si ce niveau est atteint ou non (fig. 10).



**Fig. 10** - Courbe de capacité de déplacement d'un bâtiment, d'après 15 . Le point de performance correspond au déplacement maximal du bâtiment sous l'action du séisme considéré. Le bâtiment montré est donc vulnérable, car il peut subir des déplacements supérieurs à ceux du niveau de performance minimal exigé (SVH)

La méthode " ATC 40 " a suscité un grand intérêt dans le monde entier. Toutefois, elle n'est accessible qu'aux spécialistes, car le type de calcul utilisé pour déterminer les courbes de capacité de déplacement est peu courant (calcul statique " pas à pas ").

## 4.3.EVALUATION DE LA VULNERABILITE AUX SEISMES A L'ECHELLE URBAINE

### 4.3.1. VULNERABILITÉ GLOBALE D'UNE ZONE

La prévention du risque sismique dans le bâti existant ne peut reposer sur la seule initiative privée ou celle d'organismes publics isolés. Pour être efficace, elle doit être mise en place à l'échelle urbaine, voire régionale.

A cet effet, il est nécessaire d'évaluer la vulnérabilité aux séismes de toute une zone. Cette évaluation ne saurait se limiter aux bâtiments, mais doit porter également sur les équipements urbains, la voirie, les transports, les réseaux utilitaires. Elle doit également tenir compte des pertes et préjudices induits ou indirects ; la ville ou la zone est à considérer comme un système.

La connaissance de la vulnérabilité et de l'aléa sismique (probabilité d'occurrence d'un séisme qui atteindrait ou dépasserait une intensité donnée) permet l'élaboration de scénarios de risques et de prendre des mesures de prévention immédiates ou différées (fig. 11).

L'évaluation de la vulnérabilité urbaine est complexe et requiert la collaboration de spécialistes de nombreuses disciplines. En France, la ville de Nice (Alpes-Maritimes), située dans l'une des zones les plus sismiques de la France métropolitaine, a été choisie comme ville pilote pour une opération de ce type (GEMITIS). A l'heure actuelle (début 2001), elle est au stade d'achèvement.

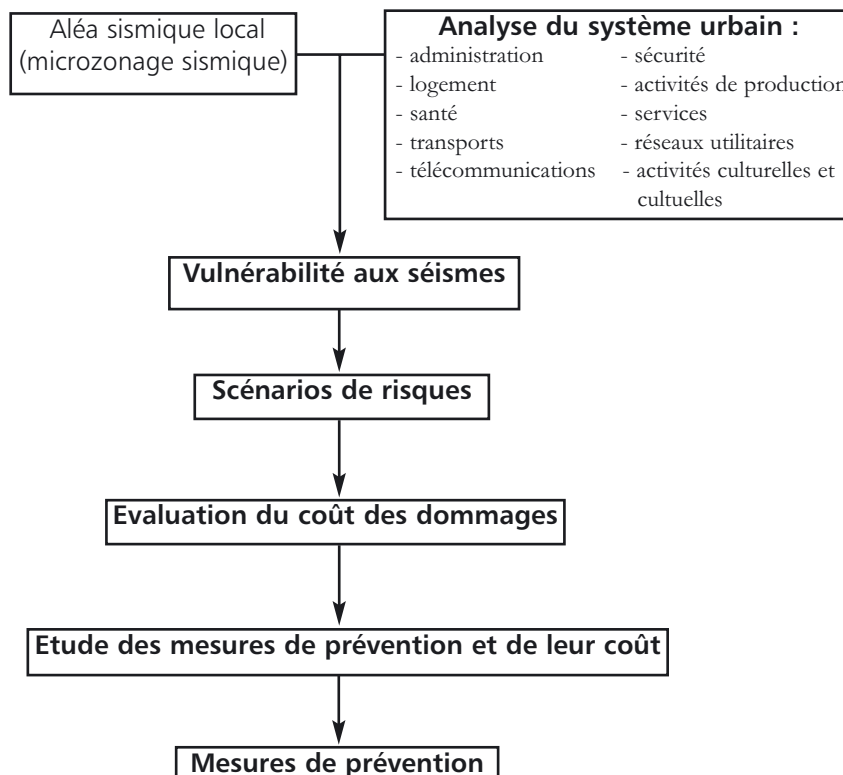
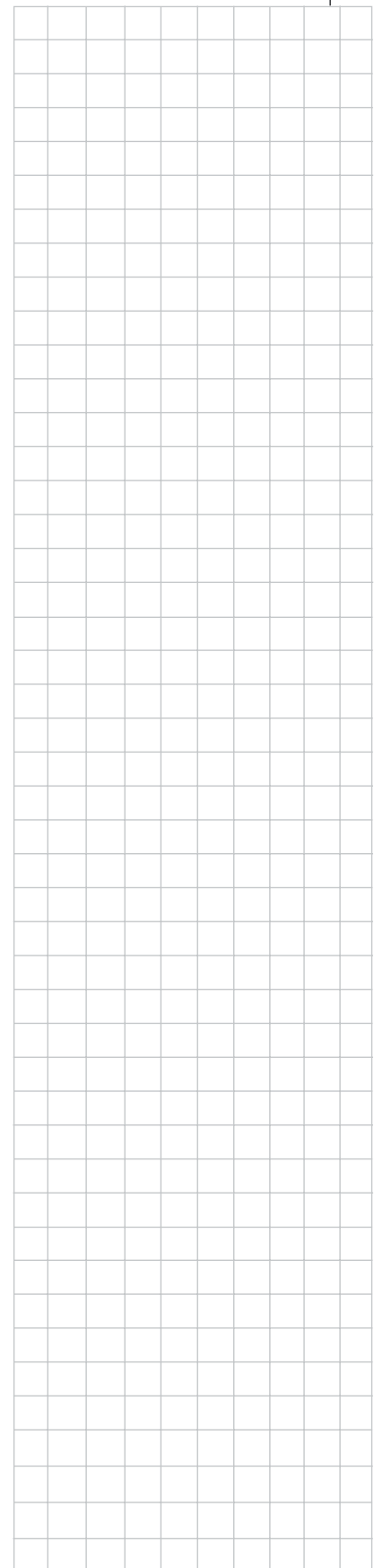


Fig. 11 - Prévention du risque sismique à l'échelle urbaine



### 4.3.2. VULNÉRABILITÉ D'UN ENSEMBLE DE CONSTRUCTIONS

La réhabilitation parasismique d'une construction particulière nécessite au préalable un diagnostic de vulnérabilité déterministe, spécifique. L'objectif est différent à l'échelle d'un ensemble de constructions. On cherche à évaluer la **probabilité d'endommagement** en fonction du niveau d'agression sismique.

Il s'agit d'un résultat global, pouvant être inexact s'il est appliqué à une construction particulière, car le but est d'obtenir une estimation fiable à l'échelle de la zone étudiée et non à celle d'un bâtiment.

On peut procéder de la manière suivante :

**1- Inventaire et cartographie des constructions** : cet inventaire est effectué à l'aide d'un examen de photos aériennes, suivi d'une visite sur les lieux. Toutes les sources disponibles peuvent être exploitées : cartes, cadastre, relevé photographique, etc.

**2- Identification d'îlots homogènes** : les bâtiments de ces îlots correspondent en général à une même époque donc également à un mode de construction.

**3- Typologie des constructions** : les types sélectionnés doivent être les bâtiments les plus caractéristiques de chaque îlot (un ou plusieurs types par îlot). Les bâtiments mécaniquement solidaires devraient être considérés comme une seule construction.

**4- Diagnostic de vulnérabilité sommaire de chaque type de bâtiment** : une des méthodes décrites précédemment peut être utilisée. La vulnérabilité est évaluée en termes de degrés de dommages préalablement définis (au minimum trois).

**5- Diagnostic affiné** : le diagnostic sommaire est éventuellement corrigé en fonction des données relatives à la nature du sol et du site. D'une manière générale, la vulnérabilité est aggravée par la présence de sols ayant une faible résistance mécanique (alluvions, remblais,...) et par l'exposition à des effets de site (effets topographiques, géodynamiques ou effets liés à l'hétérogénéité des formations souterraines) ou des effets induits (liquéfaction des sols, mouvements de terrain, jeu de faille, tsunami, seiche,...).

La vulnérabilité d'un type de construction est en général présentée sous forme de **fonctions de vulnérabilité**, appelées aussi **fonctions d'endommagement** (fig. 12). Ces fonctions donnent la probabilité de dommages (faibles, modérés, graves,...) en fonction de l'importance du séisme, exprimée en termes d'intensité macrosismique, d'accélération maximale ou de déplacement maximal. La fig. 13 montre des fonctions de vulnérabilité établies pour divers types de constructions.

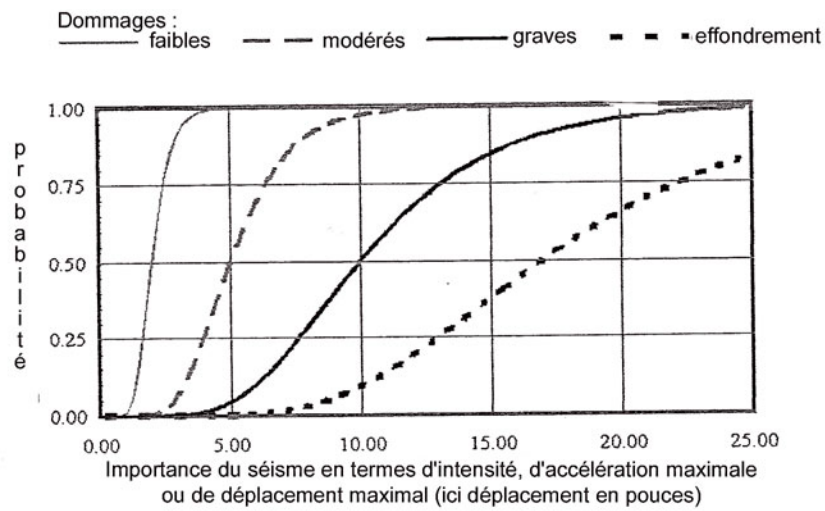


Fig. 12 - Allure des fonctions de vulnérabilité (d'après 40)

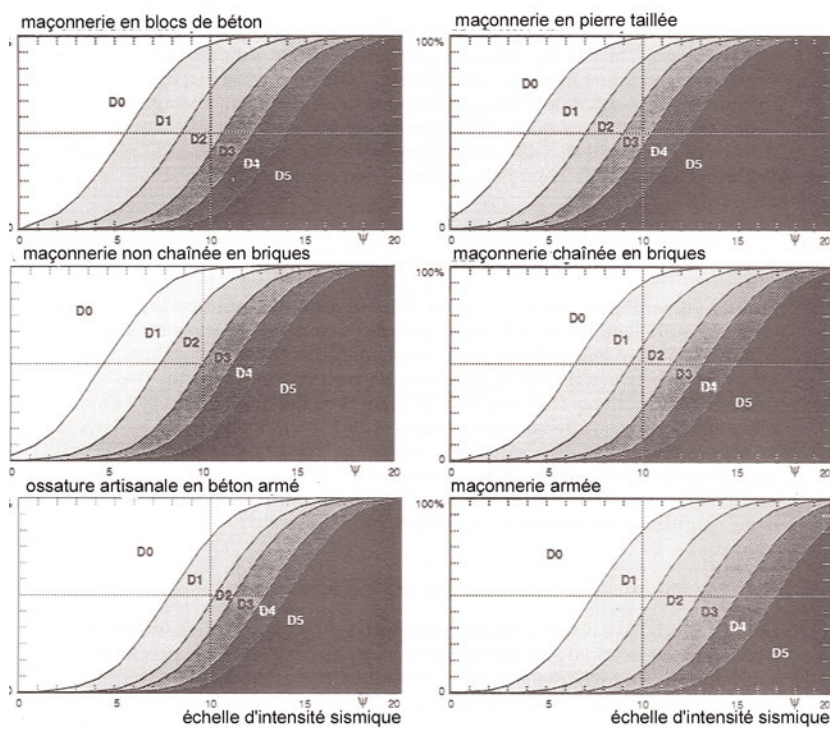


Fig. 13 - Fonctions de vulnérabilité pour divers types de constructions (d'après 39). Ces fonctions donnent la probabilité des dommages suivants, préalablement définis dans l'ouvrage : dommages nuls (D0), dommages faibles (D1), dommages modérés (D2), dommages importants (D3), effondrement partiel (D4), effondrement total (D5).

**6- Etudes statistiques** : l'ensemble des fonctions de vulnérabilité contient une multitude d'informations pouvant être mises en évidence selon l'intérêt porté à tel ou tel aspect :

- dommages par quartier,
- dommages en fonction de l'affectation du bâtiment (logements, logements avec commerces en rez-de-chaussée, bureaux, bâtiments administratifs,...),
- dommages en fonction du nombre de niveaux,
- dommages par mode de construction,
- dommages par époque de construction,
- relation entre l'intensité du séisme et le nombre ou le pourcentage de constructions endommagées,
- distribution des dommages en fonction de l'intensité macrosismique (fig. 14),
- etc.

Degré de dommages	Pourcentage d'endommagement	Probabilité de dommages (%) en fonction de l'intensité macrosismique				
		VI	VII	VIII	IX	X
1	0	95	49	7	0	0
2	0,5	3	48	11	1	0,1
3	5	1,5	8	22	2	0,2
4	20	0,4	2	31	10	0,7
5	45	0,1	1,5	17	15	9
6	80	0	1	10	21	24
7	100	0	0,5	2	51	66

**Fig. 14** - Exemple de distribution de divers types de dommages dans une zone, en fonction de l'intensité macrosismique (adapté d'après 37)

En corrélant les dommages avec l'occupation estimée des logements et locaux, une évaluation de pertes en vies humaines peut être effectuée.

Ces relations sont en général présentées sous forme de tableaux ou d'histogrammes et utilisées pour l'élaboration de scénarios de risque à l'échelle urbaine. Elles peuvent également être cartographiées à l'aide du " Système d'informations géographiques " (SIG), en couleurs différenciées, ce qui en facilite la lisibilité (fig. 15).

La vulnérabilité des équipements et des réseaux, de même que l'estimation des pertes induites et indirectes, ne sont pas abordées dans ce texte. Une méthodologie très complète de l'évaluation de la vulnérabilité de l'ensemble des fonctions urbaines est traitée dans la réf. 40 , présentée au paragraphe suivant.

#### 4.3.3. GUIDE HAZUS 99

Edité par la Fédéral Emergency Management Agency américaine (FEMA), ce guide 40 présente une méthode détaillée d'évaluation de la vulnérabilité à l'échelle urbaine. Le but est de permettre une estimation des pertes

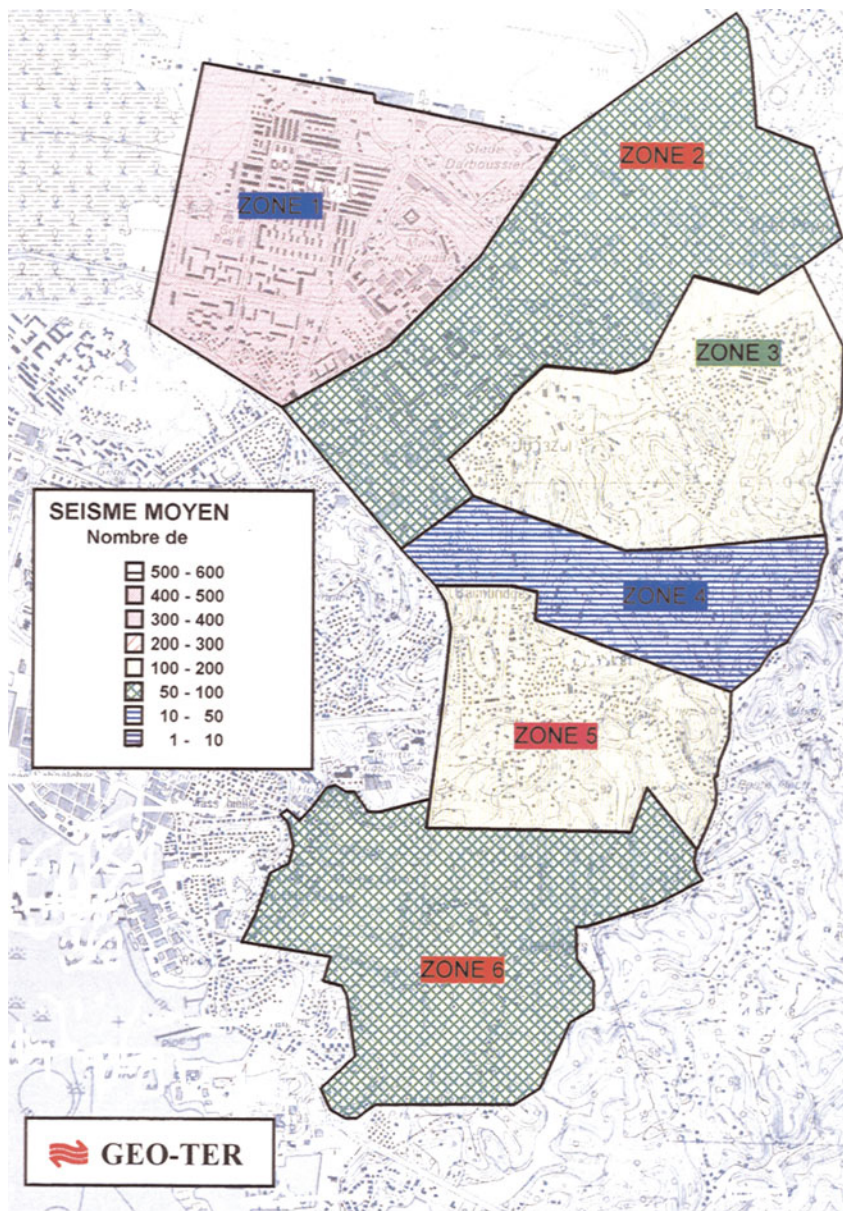


Fig. 15 - Exemple de cartographie de la vulnérabilité aux séismes à l'échelle urbaine (d'après 41).

qu'une zone ou région pourrait subir lors d'un tremblement de terre. L'évaluation est destinée aux autorités nationales, régionales et locales afin de constituer une base pour l'élaboration d'une politique de prévention du risque sismique et de gestion de la situation postsismique.

La méthodologie a été élaborée par une équipe composée de scientifiques, ingénieurs, architectes, économistes, planificateurs, sociologues et informaticiens. Ainsi, le guide couvre une large gamme de thèmes et disciplines, notamment les sciences de la terre, génie parasismique et sciences économiques et sociales. Les méthodes utilisées ont été validées à l'occasion de séismes récents et soumises à l'avis d'experts reconnus.

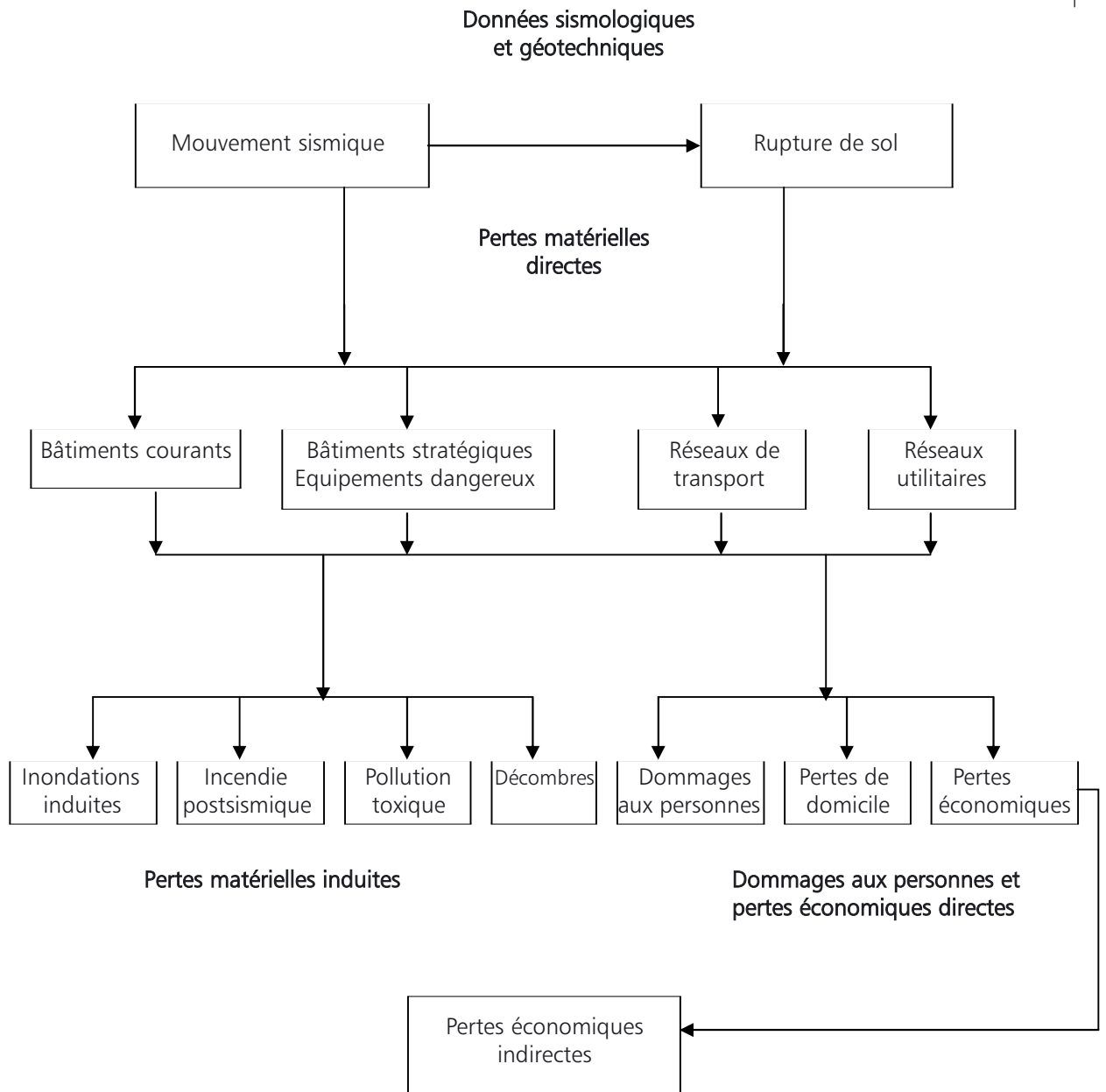


Le guide comprend un manuel technique en trois volumes, qui s'adresse aux lecteurs possédant un certain niveau technique, et un guide plus sommaire en deux volumes, accompagné d'un logiciel, présentant la méthodologie d'une manière plus accessible aux non-spécialistes.

La méthode permet d'élaborer aussi bien des évaluations sommaires que des estimations détaillées, nécessitant une approche sophistiquée.

Le diagramme de la fig. 16 montre les domaines traités dans le guide. Chaque pavé correspond à un chapitre qui propose une méthode d'évaluation des pertes en fonction de la vulnérabilité. Des méthodes standardisées sont proposées pour :

- sélection des scénarios de tremblements de terre,
- collecte des données,
- utilisation de bases de données géotechniques (type de sol, mouvement sismique, rupture de sol,...),
- évaluation de l'occupation des logements et des lieux de travail,
- typologie des bâtiments,
- typologie des dommages,
- élaboration des fonctions de vulnérabilité (fig. 17),
- typologie et analyse des réseaux urbains,
- évaluation des coûts,
- interprétation des résultats compte tenu des incertitudes liées à la fiabilité des données et à la modélisation.



**Fig. 16** - Organigramme de l'analyse du risque sismique urbain (d'après 40)

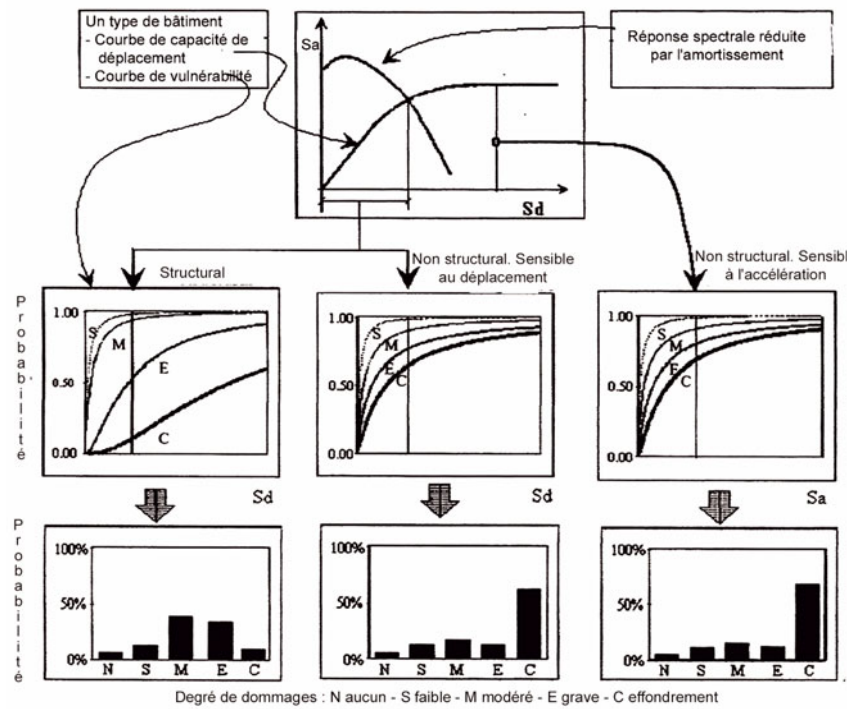


Fig. 17 - Méthode de détermination des fonctions de vulnérabilité pour un type de bâtiment, (d'après 40)

Trois types d'analyse sont proposés :

### 1- Analyse sommaire

Effectuée avec des données générales, elle permet de dégrossir le problème et de se prononcer sur la nécessité d'une analyse plus détaillée. Les risques requérant des données spécifiques (liquéfaction des sols, glissements de terrain, jeu de faille, tsunami, rupture de barrage, etc.) ne peuvent pas être évalués par ce type d'analyse.

### 2- Analyse standard

Cette analyse traite les données réelles fournies par l'utilisateur ; elle est basée sur les méthodes standardisées décrites dans le guide et permet d'obtenir des résultats d'une bonne précision.

### 3- Analyse approfondie

L'analyse approfondie est basée sur des études et expertises spécifiques dans les domaines concernés et suppose une étroite collaboration des propriétaires des biens analysés. La durée estimée d'une telle analyse est de 6 mois à 2 ans.

## 4.4. STRATEGIES DE REHABILITATION PARASISMIQUE

### 4.4.1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE

Le choix du type de réhabilitation a en général une incidence non négligeable sur l'architecture de l'ouvrage. Par conséquent, il devrait être effectué par un architecte.

Deux grandes familles de démarches sont possibles :

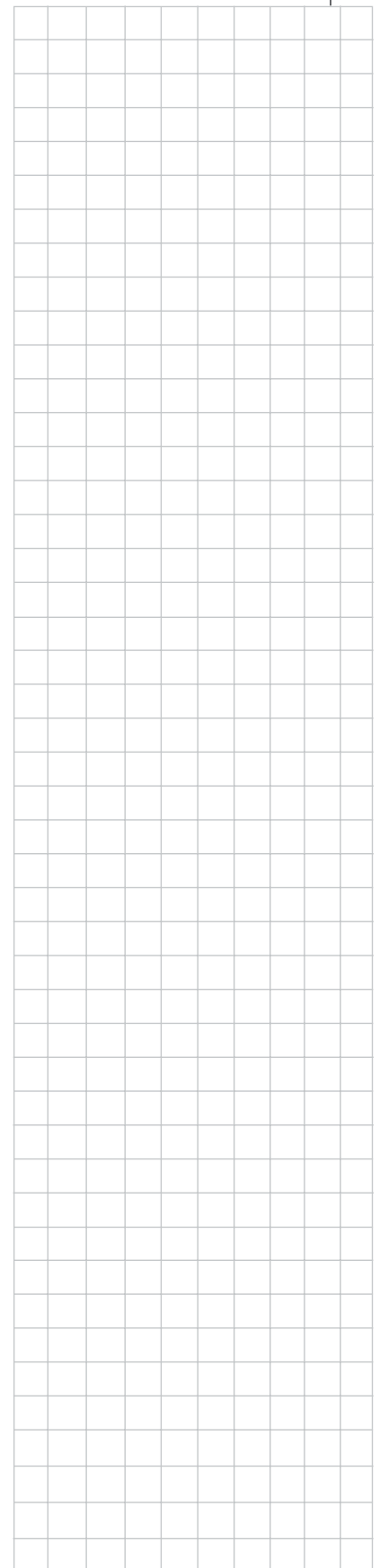
- réduire le niveau des charges sismiques auxquelles l'ouvrage pourrait être exposé ;
- améliorer le niveau de performances de l'ouvrage.

Ces approches peuvent être adoptées simultanément ; en outre, certaines stratégies comme l'accroissement de la dissipativité, agissent sur les deux " tableaux ".

La réduction des charges sismiques est la démarche philosophiquement la plus rationnelle car elle vise à soustraire partiellement l'ouvrage à l'action sismique plutôt que de le renforcer afin qu'il résiste à des charges élevées. Dans de nombreux cas, elle est également la moins coûteuse.

L'amélioration du niveau de performances d'une structure est souvent identifiée à l'augmentation de sa résistance mécanique. Un tel raisonnement est erroné car l'objectif est d'atteindre un niveau de performances (non-effondrement, réparabilité, etc.) et non pas un niveau de résistance aux forces donné (cependant, lorsqu'on vise l'absence de dommages, l'accroissement de la résistance peut être une solution). En effet, même en cas de baisse de résistance, un niveau de performance peut être maintenu ou amélioré par une augmentation appropriée de la ductilité ou, en termes plus généraux, de la dissipativité.

L'agression sismique sur les ouvrages n'est pas constituée par des forces appliquées, mais par l'énergie cinétique générée lors des déplacements imposés du sol d'assise et dont l'action se traduit par des déformations de la construction. Si toute l'énergie cinétique présente dans la construction est absorbée par stockage temporaire (grâce aux déformations élastiques) et par dissipation (lors des déformations non élastiques), il n'y a pas de rupture d'éléments structuraux. Par conséquent, pour atteindre un même niveau de performance qu'une structure très résistante, qui absorbe l'énergie essentiellement au moyen de stockage, une structure moins résistante compense le manque de sa capacité à stocker l'énergie par la dissipation (c'est la quantité totale d'énergie absorbée qui compte).



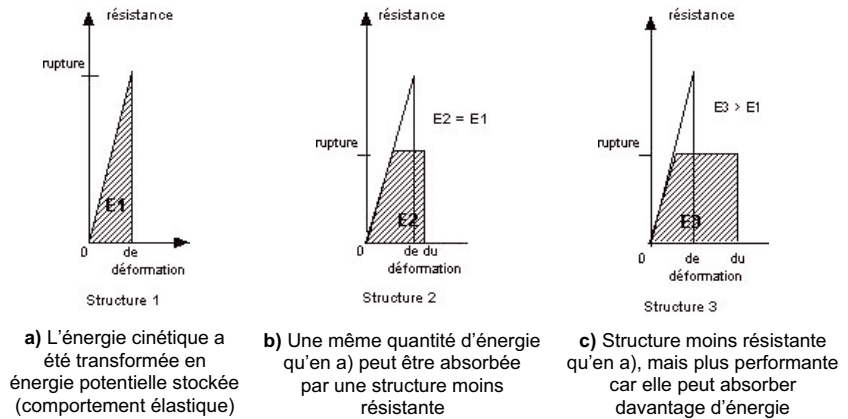


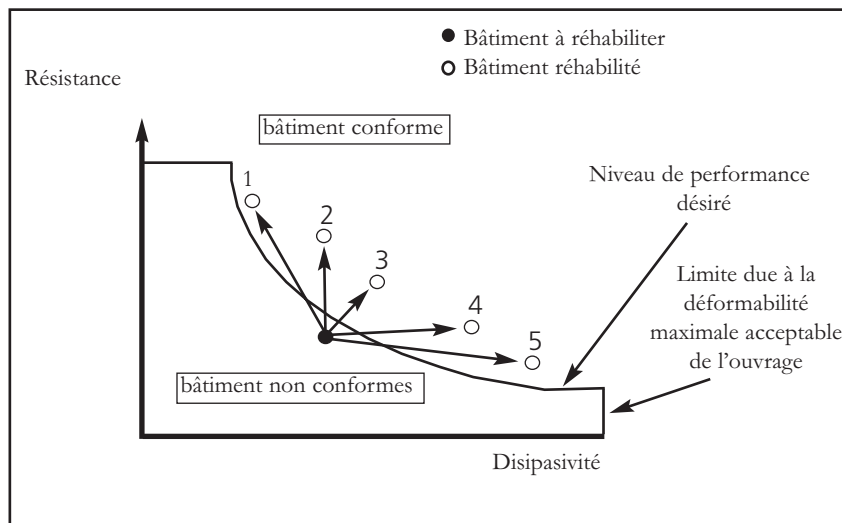
Fig. 18 - Efficacité structurale en termes de quantité d'énergie cinétique absorbée

La fig. 18 illustre cette situation (l'énergie absorbée est proportionnelle à l'aire hachurée sous la courbe résistance-déformation). La structure 2, moins résistante que la structure 1, possède le même niveau de sécurité structurale. La structure 3, également moins résistante, offre une meilleure sécurité que la structure 1.

Différentes stratégies permettant d'améliorer le niveau de performance d'un bâtiment sont résumées sur la fig. 19, inspirée par l'article de J. Amman et al publié dans la réf. 61 :

- 1- **Augmentation de la résistance et baisse de la dissipativité** : ces démarches peuvent convenir pour obtenir la fonctionnalité immédiate d'un bâtiment car elles se traduisent par une réduction des déformations.
- 2- **Augmentation de la résistance sans modifier la dissipativité.**
- 3- **Augmentation de la résistance et de la dissipativité** : cette stratégie convient pour les bâtiments assez vulnérables.
- 4- **Augmentation de la dissipativité sans modifier la résistance** : cette démarche peut être jumelée avec la recherche d'une réduction des charges sismiques, par exemple par l'utilisation d'amortisseurs.
- 5- **Baisse de la résistance et augmentation importante de la dissipativité** : cette démarche peut convenir aux constructions très vulnérables dont on cherche à assurer le non-effondrement. Un accroissement notable de la dissipativité nécessite en général une baisse de la résistance ultime.

L'augmentation de la dissipativité est limitée par les déformations maximales compatibles avec le niveau de performances recherché (fig.10).



**Fig. 19** - Stratégies permettant d'atteindre ou de dépasser, après réhabilitation parasismique, un niveau de performance exigé. Il s'agit de faire varier la résistance et/ou la dissipativité de la construction (d'après [61]).

#### 4.4.2. RÉDUCTION DU NIVEAU D'ACTION SISMIQUE

La vulnérabilité aux séismes d'un ouvrage diminue avec la baisse des charges sismiques auxquelles il est susceptible d'être exposé. Ces charges dépendent de sa masse et des accélérations qu'il subit. Les deux grandeurs peuvent donc être minimisées, par des moyens classiques ou, en ce qui concerne l'accélération, également par des procédés non traditionnels.

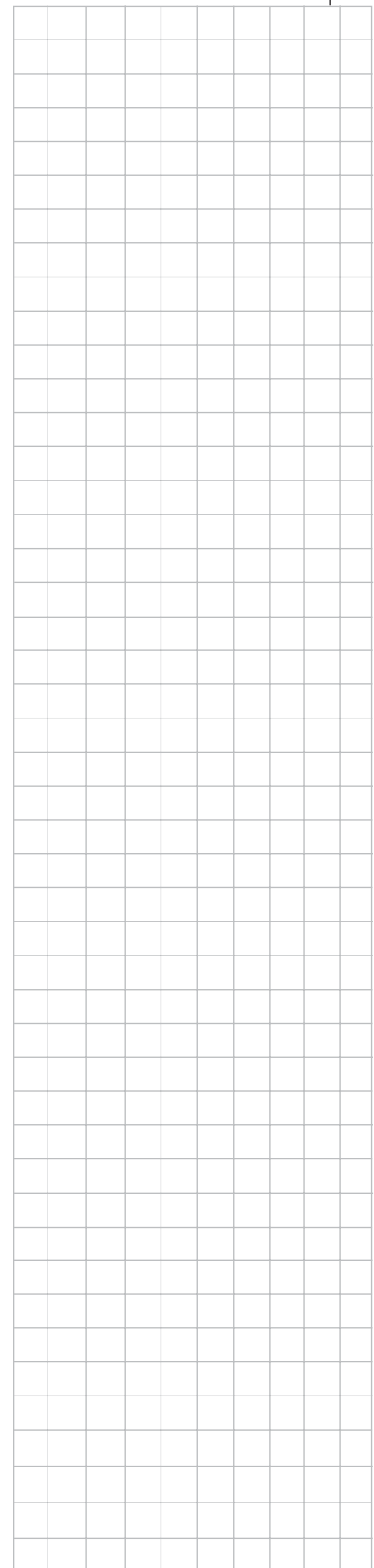
La réduction peut porter sur les actions sismiques d'ensemble ou sur des actions locales. Différentes démarches possibles sont passées en revue ci-après. En général, elles ne peuvent pas être toutes pratiquées simultanément.

##### 1- Réduction des masses

Cette démarche est en général adoptée lors d'une réhabilitation lourde : remplacement des planchers ou de la charpente, remplacement de la couverture, etc. Il convient dans ces cas d'opter pour des solutions légères (planchers métalliques, charpente en acier ou en bois lamellé-collé, etc.).

##### 2- Recherche de non-résonance

La résonance d'une construction avec le sol est en général à l'origine de dommages sismiques importants, pouvant aller jusqu'à l'effondrement. Elle se produit lorsque la période propre fondamentale du bâtiment est proche de celle du sol. Les charges sismiques diminuent avec l'éloignement des deux périodes. Il s'agit donc de modifier la période du bâtiment afin de l'éloigner le plus possible de la période dominante du sol. Selon le cas, il peut être souhaitable de l'allonger ou, au contraire, de la raccourcir.





En pratique, dans la plupart des cas, une réduction de la période est nécessaire. Elle peut être obtenue par une réduction des masses déjà citée et par l'accroissement de la rigidité de l'ouvrage. Dans ce cas, l'incidence architecturale peut être importante car elle se traduit par l'ajout d'éléments verticaux de contreventement : murs en maçonnerie, voiles en béton, palées de stabilité en acier, etc. La précontrainte des maçonneries ou du béton armé peut également être utilisée.

### 3- Limitation de la torsion d'ensemble

Les mouvements sismiques entraînent une torsion d'ensemble des constructions lorsque leur centre de gravité d'un ou plusieurs niveaux ne coïncide pas avec leur centre de rigidité. Il peut donc être nécessaire d'ajouter des murs ou autres éléments de contreventement placés de manière à rééquilibrer la distribution des éléments rigides. La torsion étant un facteur de vulnérabilité important, sa limitation devrait être systématiquement recherchée.

### 4- Suppression des " points durs "

Les éléments structuraux isolés participant au contreventement et possédant une rigidité transversale beaucoup plus grande que les autres éléments assurant la même fonction, subissent en cas de séisme des charges très élevées car celles-ci sont distribuées sur les éléments résistants en proportion de leurs rigidités. Or les concentrations de charges ne sont pas souhaitables.

La suppression des éléments constituant les points durs étant généralement impossible, une solution consiste à ajouter, en les disposant symétriquement, des murs ou autres éléments ayant une rigidité très supérieure à celle des points durs initiaux, de manière qu'ils reprennent une partie prépondérante des charges.

### 5- Prévenir l'entrechoquement

L'entrechoquement se produit entre deux constructions voisines ou entre deux blocs d'un même bâtiment séparés par un joint de fractionnement ayant une largeur insuffisante. Les solutions à ce problème sont radicalement opposées : créer un joint plus large ou le supprimer par injection de résines assurant un couplage mécanique.

### 6- Isolation parasismique

Ce procédé non traditionnel permet de diviser les charges sismiques par un facteur de 5 ou 6. Dans la réhabilitation, il est utilisé pour les constructions ne dépassant pas six niveaux.

L'isolation parasismique est une solution très coûteuse dans le cas du bâti existant et, de ce fait, elle est réservée à des bâtiments dont le fonctionnement après un séisme est impératif ou pour les monuments historiques. Elle a l'avantage d'assurer, en plus de la sauvegarde des vies humaines, la protection de la construction, des équipements et des matériels, donc la fonctionnalité de l'ouvrage. Au plan architectural, le réaménagement de la transition bâtiment/sol extérieur est nécessaire.

## 7- Amortisseurs parasismiques

Une réduction notable des charges sismiques peut être obtenue par des amortisseurs à frottement ou à fluide visqueux placés dans des éléments assurant le contreventement. L'utilisation de cette technique pour les bâtiments est très récente, mais elle est très prometteuse car elle peut être plus économique que les méthodes traditionnelles.

### 4.4.3. AMÉLIORATION DU NIVEAU DE PERFORMANCE D'UN BÂTIMENT

#### 1- Renforcement

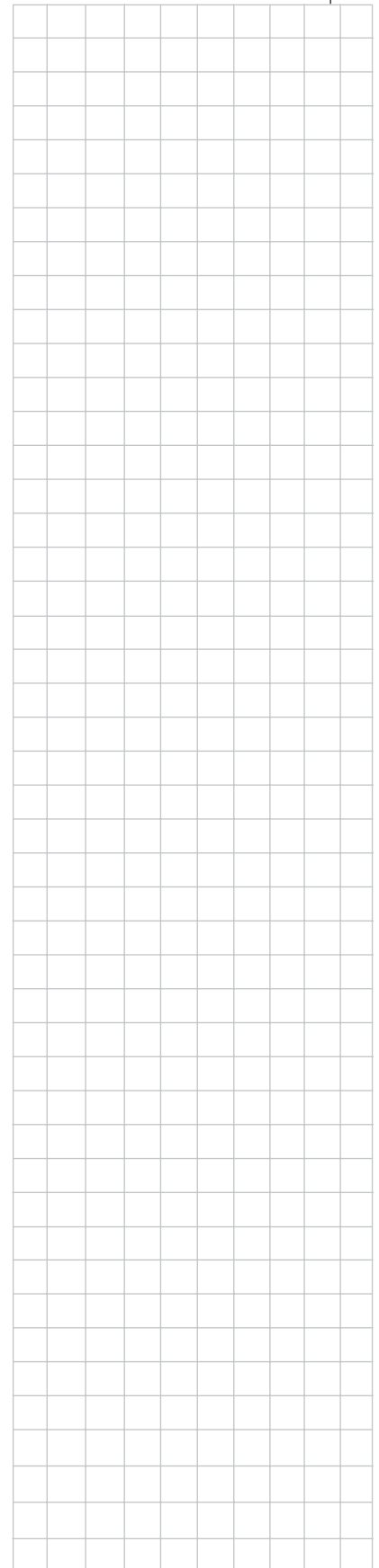
Le renforcement, appelé également " confortement préventif ", est la stratégie la plus traditionnelle et la plus fréquente lors de la réhabilitation parasismique d'un bâtiment, auquel il confère une meilleure résistance mécanique. Il peut comporter les opérations suivantes :

- redimensionnement, consolidation ou remplacement d'éléments structuraux ;
- ancrage efficace des éléments de contreventement horizontal et vertical (ce qui implique la création de chaînages dans les maçonneries qui en sont dépourvues) ;
- création d'un nouveau système de contreventement, couplé à la structure existante ;
- renforcement et liaisonnement des fondations ;
- traitement du sol d'assise.

En général, pour des raisons économiques, une partie seulement des éléments porteurs est renforcée. Il est donc important de veiller à ne pas aggraver le comportement d'ensemble car la résistance d'une structure n'est pas égale à la somme des résistances de ses éléments. La distribution des charges et celle des éléments rigides (les deux étant liées) jouent un rôle déterminant. Un renforcement local déplace le " problème " sur les éléments voisins non renforcés.

Afin d'éviter les écueils, on devrait notamment :

- dans le cas où tous les niveaux du bâtiment ne sont pas réhabilités, réduire progressivement vers le haut la rigidité latérale nouvellement conférée à la structure ; l'interface entre les niveaux renforcé et non renforcé constitue une zone particulièrement fragile ;
- à chaque niveau, répartir la rigidité symétriquement afin de limiter la torsion d'ensemble ; en effet, un renforcement localisé entraîne en général un déplacement du centre de rigidité ;
- s'abstenir de créer des " points durs " isolés, qui " attirent " les charges sismiques ;





- ne pas créer une structure hybride, couplant des éléments ayant un comportement dynamique très différent ;
- éviter le mode de ruine par cisaillement pour les poteaux et les poutres (ce qui est le cas des poteaux courts ou bridés, des poutres-allèges, des poutres assurant un transfert de charges, etc.), car il donne lieu à une rupture fragile.

## 2- Amélioration de la dissipativité

Cette stratégie est très avantageuse car elle autorise une réduction du niveau de résistance mécanique de la structure à atteindre (cf. 4.4.1.). Or, il est rarement possible économiquement de conférer à un bâtiment existant le niveau de résistance exigé pour la construction parasismique neuve.

La dissipativité d'une construction peut être améliorée de plusieurs manières :

- augmenter la ductilité de la structure :
  - faire travailler les éléments structuraux à la flexion,
  - augmenter la section des porteurs verticaux,
  - prévenir les instabilités locales des éléments à parois minces (par raidissage),
  - autoriser un allongement notable des boulons d'ancrage,
  - supprimer les affaiblissements locaux, effets d'entaille et tout changement brusque de forme ou de section des éléments de contreventement,
  - réaliser une armature adéquate des éléments en béton armé,
  - supprimer le bridage des poteaux par des éléments rigides comme les allèges en maçonnerie ou les cloisons n'atteignant pas le plafond,
  - confiner les maçonneries par des chaînages,
  - etc.
- utiliser des amortisseurs (cf. plus haut).

## 3- Suppression ou redistribution des zones faibles

Les zones " faibles ", même renforcées ou rendues plus ductiles, restent des zones faibles. Il est donc intéressant et avantageux soit de les supprimer, soit d'atténuer les inconvénients qu'elles génèrent ou encore de les déplacer. L'architecte joue un rôle déterminant dans le choix de ces solutions.

Quelques exemples permettront d'éclairer ces démarches :

- Un rez-de-chaussée sur pilotis ou largement ouvert constitue souvent un niveau souple, car sa rigidité latérale est très inférieure à celle des autres niveaux. Un renforcement des poteaux peut apporter une amélioration mais ne résout pas complètement le problème. Par contre, l'effet de niveau souple peut être :
  - supprimé, en conférant au rez-de-chaussée une rigidité comparable à celle des autres niveaux par un contreventement en façade, par adjonction d'un noyau rigide central (donc en retrait des façades)

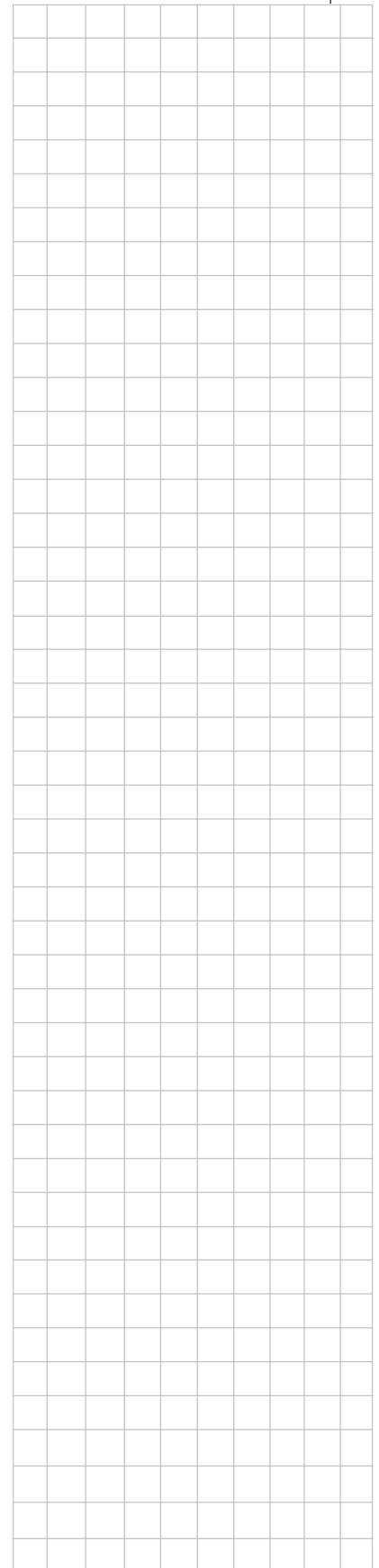
ou en réduisant la rigidité des niveaux supérieurs, par exemple en optant pour une façade légère découplée de l'ossature,  
- atténué, en faisant varier progressivement la rigidité du rez-de-chaussée vers le haut, au moyen de goussets importants en tête des poteaux ou en créant un effet d'arc entre les pilotis.

- Les bâtiments comportant des ailes, symétriquement disposées ou non, peuvent subir des dommages graves dans les angles rentrants en raison des déplacements importants des extrémités des ailes ; cet effet peut être :
  - supprimé, en fractionnant la construction par des joints parasismiques (solution coûteuse),
  - atténué, en plaçant des voiles transversaux aux extrémités des ailes afin de limiter leurs déformations, ou en modifiant la forme du bâtiment (ce qui est parfois possible) de manière à arrondir l'angle rentrant.
- Les cages d'escalier se trouvent souvent en façade des bâtiments. Dans ce cas, les trémies sont " mal placées " car elles affaiblissent les planchers sur leur périphérie, où les sollicitations atteignent les intensités les plus importantes. Afin de pallier cet inconvénient, on peut :
  - supprimer les trémies en optant pour des escaliers extérieurs,
  - déplacer les cages d'escalier vers le milieu du bâtiment, ce qui permet par ailleurs de gagner de la surface de plancher bénéficiant d'une possibilité d'éclairage direct.
- Les dalles en porte-à-faux (balcons, auvents,...) sont en général assez vulnérables vis-à-vis des charges sismiques verticales. Lors des récents séismes de Kobé (Japon) et du Venezuela, des éléments en porte-à-faux se sont rompus et effondrés devant la construction. A part le renforcement classique, cette situation peut être traitée de la manière suivante :
  - supprimer les porte-à-faux en faisant porter les dalles des balcons ou de l'auvent par des voiles ou autres structures latérales,
  - faire porter les balcons par des poutres en porte-à-faux, moins vulnérables aux charges sismiques que les dalles en porte-à-faux.

#### 4.5. TECHNIQUES DE RENFORCEMENT

Les techniques de renforcement ne sont pas spécifiquement parasismiques car elles sont indépendantes des motifs de renforcement. Elles peuvent être classées en plusieurs catégories.

- 1- Renforcement par addition de nouveaux éléments de construction : voiles, palées de stabilité, contreforts extérieurs, chaînages, micropieux, parois enterrées, etc. La liaison entre la partie ajoutée et la structure existante est d'une importance capitale pour l'efficacité de la solution.
- 2- Amélioration de la résistance de la section transversale des éléments constructifs :
  - augmentation de section par enrobage,





- renforcement de l'armature,
- contrevoiles,
- plaques d'acier collées,
- tissu de fibres de carbone collé.

3- Renforcement par confinement :

- chemisage des poteaux,
- corsetage des murs, poteaux, cheminées,...
- contrevoiles bilatéraux solidarités.

4- Renforcement par précontrainte (essentiellement pour les ouvrages en béton armé ou maçonnerie).

5- Réalisation d'ancrages efficaces :

- ancrage des planchers dans les chaînages,
- ancrage des charpentes sur le niveau sous-jacent,
- ancrage à la fondation des ossatures préfabriquées,
- ancrage des équipements lourds.

6- Réparation :

- injection de fissures,
- remplacement de béton et d'armatures détériorés,
- remplacement des éléments de maçonnerie détériorés,
- traitement de surface afin d'améliorer la durabilité des bétons et des aciers.

7- Traitement de sol visant à :

- augmenter sa capacité portante,
- prévenir les tassements importants en cas de séisme,
- supprimer la susceptibilité de liquéfaction,
- prévenir des mouvements de terrain : glissements, éboulements, affaissements, coulées lentes, etc.

Le choix des techniques de renforcement s'effectue selon les critères habituels : coût, rapidité de mise en œuvre, durabilité, réversibilité (possibilité de retour ultérieur en arrière, ce qui est parfois demandé pour les monuments historiques), disponibilité, compétence des entreprises locales, etc.

Les solutions techniques retenues doivent également tenir compte d'un éventuel impératif de non-interruption de l'exploitation du bâtiment. En effet, cette exigence est très fréquente.

## 5. CONCLUSIONS ET PROPOSITIONS

La présente étude résume, sans les traiter en détail, les étapes de la réhabilitation parasismique des bâtiments, montre différentes approches de la problématique et propose un inventaire commenté des démarches possibles.

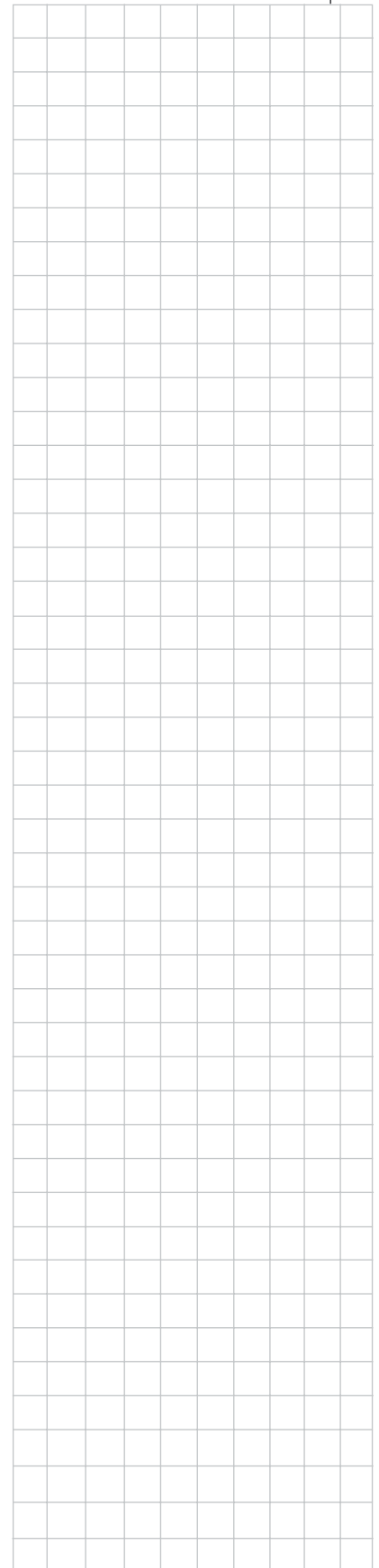
Il apparaît que la part de l'ingénieur dans la réhabilitation parasismique des constructions est essentielle. Cependant, l'architecte également peut et devrait y jouer un rôle important car le choix d'un parti ou d'une démarche influant sur la conception architecturale doit être effectué. Son intervention peut diriger la stratégie adoptée vers des solutions discrètes ou, au contraire, modifier radicalement l'expression architecturale même du bâtiment.

Par ailleurs, un architecte formé en conception parasismique des bâtiments est en mesure d'effectuer une évaluation rapide de présomption de la vulnérabilité aux séismes d'un bâtiment ou d'un ensemble urbain, et de constituer ainsi des éléments permettant d'identifier les risques et de mettre en place des priorités d'action de renforcement préventif ou de prévention (déclassement de la construction, relogement, relocalisation des services, etc.).

Afin de faciliter l'appropriation de ces problématiques par les architectes, il est souhaitable de disposer de guides didactiques où les démarches présentées dans cette étude seraient développées et abondamment illustrées, notamment en ce qui concerne le diagnostic préliminaire de vulnérabilité et les stratégies de réhabilitation.

Le champ d'activité de l'architecte pourrait ainsi légitimement s'élargir à des marchés relevant de la prévention du risque sismique dans le bâti existant, qui lui échappent actuellement.

Il serait donc opportun d'entreprendre la rédaction de tels guides, de même que la traduction en français de méthodes étrangères traitant ce domaine d'une manière exhaustive. Ces méthodes, en général rédigées à l'intention des ingénieurs de structure, ne sont pas en mesure de remplacer les guides adaptés à la démarche d'un architecte, mais elles montrent quels phénomènes et situations doivent être pris en compte, de quelle manière et où trouver les données correspondantes.



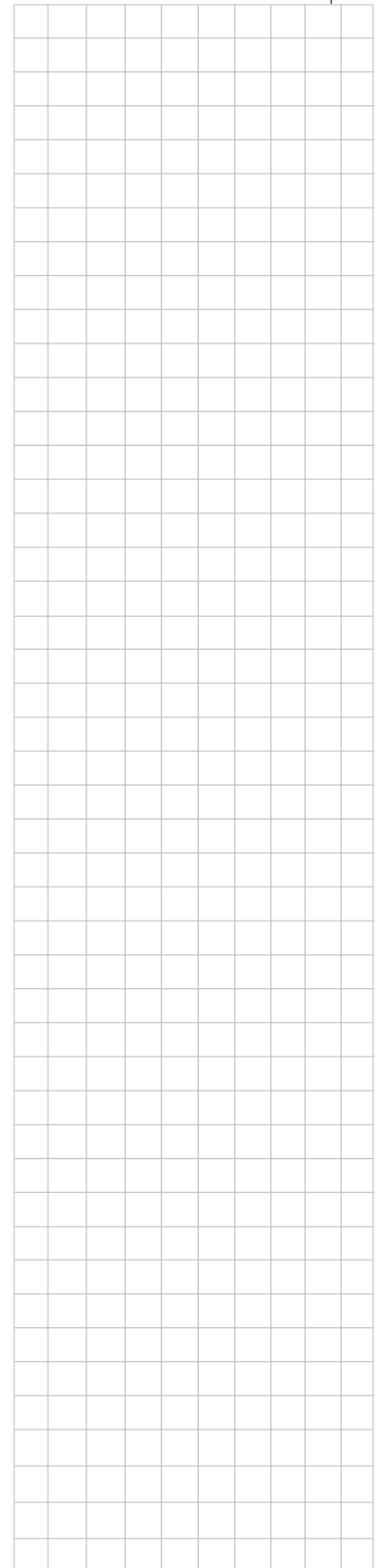


### Ouvrages généraux

- 1 Abrano D.P., Calvi G.M., (1997), Proceedings of the U.S.-Italian Workshop on Seismic Evaluation and Retrofit, MCEER, Buffalo, Etats-Unis.
- 2 AFPS, (1999), Actes du 5ème colloque national " Génie parasismique et réponse dynamique des ouvrages ", vol. I, AFPS, France.
- 3 Bisch P., Labbé P., Pecker A., (1998), Proceedings of the 11th European Conference on Earthquake Engineering, A.A. Balkema, Rotterdam, Pays-Bas.
- 4 Conseil de l'Europe, (1993), Actes du séminaire international " Historical and Monumental Structures in Seismic Regions ", Santorin, Grèce.
- 5 Davidovici V., Benedetti D., (1994), Proceedings of the Italian-French Symposium on Strengthening and Repair of Structures in Seismic Area, Ouest Editions, Nantes, France.
- 6 Gavarini C., (1991), Ingegneria antisismica, vol. II, Editoriale ESA, Milano, Italie.
- 7 Giuffrè A., (1988), Monumenti e terremoti, aspetti statici del restauro, Multigrafica Editrice, Roma, Italie.
- 8 Koridze A., (1988), Seismic Risk Assessment and Design of Building Structures, Omega Scientific, Oxon, Grande-Bretagne.
- 9 Ministry of Public Works, (1992), Actes du séminaire international " Protection of Architectural Heritage against Earthquakes ", Istanbul-Ankara, Turquie.
- 10 NZSEE, (2000), Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering in Auckland, New Zealand Society for Earthquake Engineering, Silverstream, Upper Hutt, Nouvelle Zélande.
- 11 Petrini V., Save M., (1996), Protection of the Architectural Heritage against Earthquakes, Springer-Verlag, Wien, New-York.
- 12 SMIS, (1996), Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering in Acapulco, Sociedad Mexicana de Ingenieria Sismica, Mexico.

### Evaluation de la vulnérabilité aux séismes d'un bâtiment

- 13 ABK, (1984), Methodology for Mitigation of Seismic Hazards in Existing Unreinforced Masonry Buildings : The Methodology, Topical Report 08, National Science Foundation, Washington, D.C., Etats-Unis.



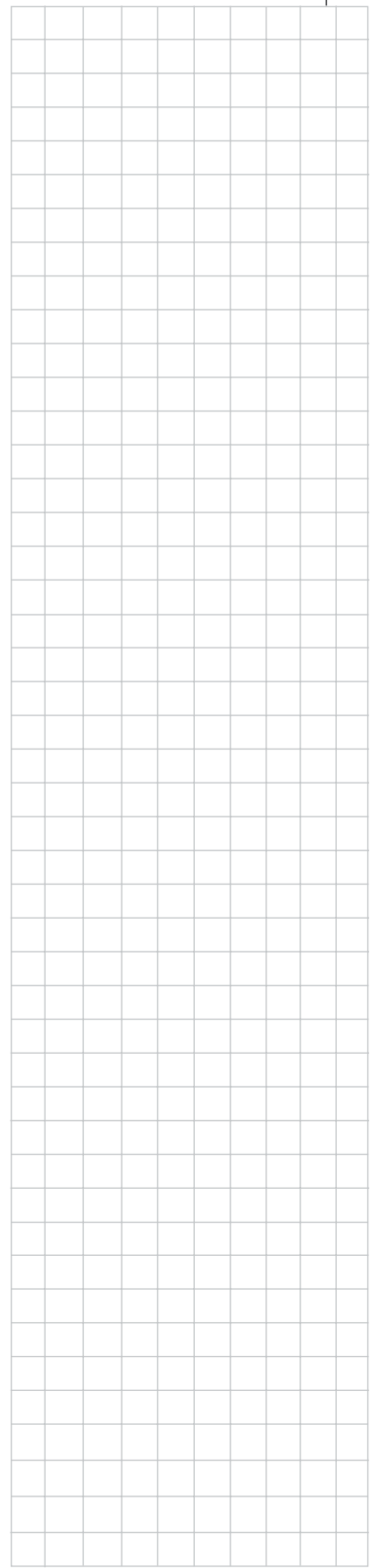


- 14 AFPS, (2000), Vulnérabilité aux séismes du bâti existant, document de travail non-publié, Association française du génie parasismique, Paris, France.
- 15 ATC, (1996), Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, ATC 40, Applied Technology Council, Redwood City, California, Etats-Unis.
- 16 ATC, (1996), Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards Training Manual, ATC 21-T, Applied Technology Council, Redwood City, California.
- 17 ATC, (1994), Critical Aspects of Earthquake Ground Motion and Building Damage Potential, ATC 10-1, Applied Technology Council, Redwood City, California.
- 18 ATC, (1992), Proceedings of Seminar and Workshop on Seismic Design and Performance of Equipment and Nonstructural Elements in Buildings and Industrial Structures, ATC 29 et ATC 29-1, Applied Technology Council, Redwood City, California, Etats-Unis.
- 19 ATC, (1989), Handbook for Seismic Evaluation of Existing Buildings (Preliminary), ATC 22, Applied Technology Council, Redwood City, California.
- 20 BSSC, (1998), Handbook for Seismic Evaluation of Buildings. a Prestandard, Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency, (FEMA 310), Washington D.C., Etats-Unis.
- 21 BSSC, (1992) NEHRP Handbook for the Seismic Evaluation of Existing Buildings, Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency (FEMA 178), Washington, D.C., Etats-Unis (publié également en tant qu'ATC-14 par Applied Technology Council, Redwood City, California).
- 22 BSSC, (1988), Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards : A Handbook, Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency (FEMA 154 et 155), Washington D.C., Etats-Unis (publié également en tant qu'ATC-21 et 21-1 par Applied Technology Council, Redwood City, California).
- 23 CNRC, (1993), Manuel de sélection des bâtiments en vue de leur évaluation sismique, IRC, Ottawa, Canada.
- 24 CNRC, (1993), Lignes directrices pour l'évaluation sismique des bâtiments existants, IRC, Ottawa, Canada.
- 25 Farsi N., (1996), Identification des structures de génie civil à partir de leurs réponses vibratoires. Vulnérabilité du bâtiment existant. Thèse de doctorat, Université Joseph-Fourier, Grenoble 1, France.
- 26 Gruppo nazionale difesa dai terremoti, (1986), Istruzioni per la compilazione della scheda di rilevamento esposizione e vulnerabilità sismica degli edifici, CNR, Regione Emilia Romagna, Italie

- 27 Johnson G.S. et al., (1999), Seismic Reliability Assessment of Critical Facilities : a Handbook, Supporting Documentation and Model Code Provisions, MCEER, Buffalo, Etats-Unis.
- 28 Scawthorn C., (1986), Techniques for Rapid Assessment of Seismic Vulnerability, American Society of Civil Engineers, Etats-Unis.
- 29 State of California, (1996), Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, (SSC 96-01), Seismic Safety Commission, Sacramento, California, Etats-Unis.
- 30 State of California, (1987), Guidebook to Identify and Mitigate Seismic Hazards in Buildings, Seismic Safety Commission, Sacramento, California, Etats-Unis.
- 31 UCBC (1997), Uniform Code for Building Conservation, USA.
- 32 Zacek M, (1997), "Méthodologie d'évaluation de la présomption de vulnérabilité aux séismes des bâtiments de classe D", commande privée.
- 33 Zacek M., (1993), Estimation de la vulnérabilité aux séismes des constructions existantes, document non publié, Laboratoire ABC, Ecole d'architecture de Marseille-Luminy, France.

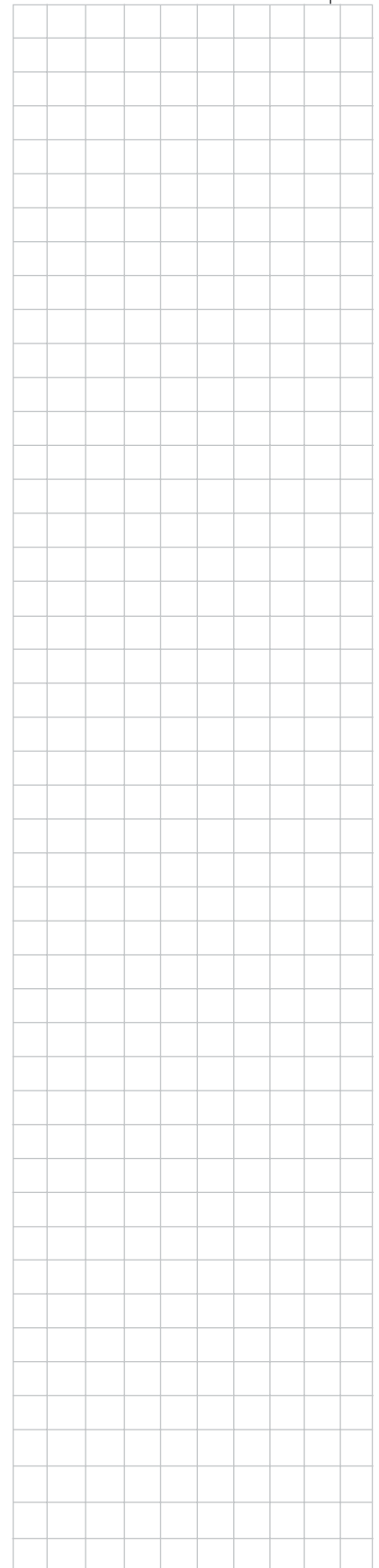
**Evaluation de la vulnérabilité aux séismes à l'échelle urbaine**

- 34 Aguilar J. et al., (1989), Statistics of building damage and of retrofitting techniques in reinforced concrete buildings, in Earthquake Spectra, 5.1, 145-152.
- 35 ATC, (1992), A Model Methodology for Assessment of Seismic Vulnerability and Impact of Disruption of Water Supply Systems, ATC 25-1, Applied Technology Council, Redwood City, California, Etats-Unis.
- 36 CGS, Vulnérabilité et évaluation du risque sismique en Algérie, CGS, Alger, Algérie.
- 37 Coburn A., Spence R., (1992), Earthquake Protection, Wiley, Chichester, Grande-Bretagne.
- 38 Coburn A., (1986), Relative vulnerability assessment, 8th European Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal.
- 39 Coburn A., (1982), Models of vulnerability, 9th Regional Conference on Earthquake Engineering, Istanbul, Turquie.
- 40 FEMA, (1999), Earthquake Loss Estimation Methodology HAZUS 99, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C., Etats-Unis.
- 41 Martin C., (1998), Méthodologie d'évaluation du risque sismique aux échelles locale et régionale applicable aux maisons individuelles, Rapport GTR/BRGM/0199-98, GEOTER, Clapiers, France.





- 55 Ministère de l'Equipement et du Logement, (1992), Recommandations techniques pour la réparation et le renforcement des ouvrages, CGS, Alger, Algérie.
- 56 NZNSEE, (1985), Earthquake Risk Buildings : Recommandations and Guidelines for Classifying, Interim Seminary and Strenghtening, New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Wellington, Nouvelle Zélande.
- 57 Pekcan G. Mander G.B., Chen S.S., (1999), Design and Retrofit Methodology for Building Structures with Supplement Energy Dissipation Systems, MCEER, Buffalo, Etats-Unis.
- 58 SAC, (1995), Interim Guidelines : Evaluation, Repair, Modification and Design of Steel Moment Frames, SAC Joint Venture (SAC 95-02) for the Federal Emergency Management Agency, (FEMA 267), Washington D.C., Etats-Unis.
- 59 SAC, (1997), Interim Guidelines Advisory n° 1 : Supplement to FEMA 267, SAC Joint Venture (SAC 96-03) for the Federal Emergency Management Agency, (FEMA 267A), Washington D.C., Etats-Unis.
- 60 SAC, (1995), Experimental Investigations of Materials, Weldments and Nondestructive Examination Techniques, SAC Joint Venture (SAC 95-08) for the Federal Emergency Management Agency, Washington D.C., Etats-Unis.
- 61 SIA, (1992), Renforcement du bâti existant, Exposés de la journée d'étude du 20 novembre 1992 à Genève, SIA D 096, Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich, Suisse.





## **ANNEXE**

Extrait de la grille de relevé de facteurs de vulnérabilité des  
bâtiments aux séismes figurant dans (32 )















## **Collection des cahiers parasismiques**

### **Cahier 1, Conception parasismique niveau avant-projet, Milan Zacek,**

Le cahier 1 porte sur la conception parasismique des bâtiments neufs, et montre l'importance de la prise en compte du phénomène sismique par l'architecte et l'ingénieur dès le début de la conception, et de l'adoption de dispositions architecturales et de principes de construction appropriés.

### **Cahier 2, Vulnérabilité et renforcement, Milan Zacek,**

Le cahier 2 présente différentes méthodes de diagnostic de vulnérabilité aux séismes des bâtiments existants, et propose des stratégies de réhabilitation parasismique, ainsi que les techniques de renforcement des structures en béton armé.

Il est complété par le cahier 2-a qui propose une méthode d'évaluation de présomption de vulnérabilité, ou « pré-diagnostic » se déclinant selon la complexité de l'édifice.

### **Cahier 2-a, Guide d'évaluation de la présomption de vulnérabilité aux séismes des bâtiments existants – Cas des constructions en maçonnerie et béton armé, Milan Zacek,**

Le cahier 2-a, annexé au cahier 2, présente différentes méthodes de diagnostic de vulnérabilité aux séismes des bâtiments existants en béton armé et maçonnerie, et propose des stratégies de réhabilitation parasismique, ainsi que les techniques de renforcement des structures.

Il propose une méthode d'évaluation de présomption de vulnérabilité, ou « pré-diagnostic » se déclinant selon la complexité de l'édifice, une telle étude pouvant être réalisée par un architecte sans formation parasismique particulière, complétée, en ce qui concerne les sols et effets de site, par l'avis d'un géotechnicien.

### **Cahier 3, Urbanisme et aménagement territorial en zone sismique, objectifs et problématique, Patricia Balandier,**

Le cahier 3 examine les dispositions en matière d'urbanisme et d'aménagement, généralement inappropriées, et propose des actions et des recommandations pour réduire le bilan des catastrophes et améliorer la préparation de la société à leur éventualité.

Résultant des observations réalisées à l'occasion de missions post-sismiques, et de l'examen de très nombreux rapports ou dépêches après séismes, ces propositions sont en grande partie généralisables pour se préparer à d'autres types de risques majeurs, naturels ou technologiques.

### **Cahier 4, Sismologie appliquée à l'usage des architectes et ingénieurs, Patricia Balandier,**

Le cahier 4 décrit les mécanismes de la tectonique des plaques et les phénomènes sismiques, qui provoquent les différents types de séismes, leurs caractéristiques et leurs modes de propagation. La connaissance de ces phénomènes est nécessaire au constructeur pour comprendre leurs effets sur les constructions, et aborder les questions de politique de prévention. L'ouvrage aborde enfin comment la traduction réglementaire de ces études de sismologie, qui simplifie nécessairement la prise en considération des phénomènes étudiés plus haut, ne doit pas dissimuler leur complexité, mais permettre de mieux comprendre les arbitrages qui président à la mise en œuvre de la politique de mitigation du risque sismique.



les  
grands  
ateliers  
de l'Isle d'Abeau

BOULEVARD DE VILLEFONTAINE  
BP 43, 38092 VILLEFONTAINE CEDEX  
FRANCE  
Tél 33 (0)4 74 96 88 70  
Fax 33 (0)4 74 96 88 71

[www.lesgrandsateliers.fr](http://www.lesgrandsateliers.fr)

S'adressant aux architectes et ingénieurs, enseignants et professionnels, la collection des cahiers parasismiques constitue un ensemble de référence des connaissances nécessaires à la conception, la construction et la protection des édifices et des villes contre le phénomène sismique.

Le présent cahier présente différentes méthodes de diagnostic de vulnérabilité aux séismes des bâtiments existants, et propose des stratégies de réhabilitation parasismique, ainsi que les techniques de renforcement des structures en béton armé.

Il est complété par le cahier 2-a qui propose une méthode d'évaluation de présomption de vulnérabilité, ou « pré-diagnostic » se déclinant selon la complexité de l'édifice.

## DANS LA COLLECTION CONCEPTION PARASISMIQUE



cahier 1

CONCEPTION PARASISMIQUE  
NIVEAU AVANT-PROJET  
MILAN ZACEK



cahier 2

VULNÉRABILITÉ  
ET RENFORCEMENT  
MILAN ZACEK



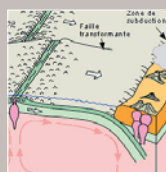
cahier 2-a

ÉVALUATION DE LA PRÉSUMPTION  
DE VULNÉRABILITÉ AUX SEISMES  
DES BÂTIMENTS EXISTANTS  
MILAN ZACEK



cahier 3

URBANISME  
ET AMÉNAGEMENT  
PATRICIA BALANDIER



cahier 4

SISMOLOGIE  
APPLIQUÉE  
PATRICIA BALANDIER

ISBN : 2-913962-01-7



9 782913 962019