

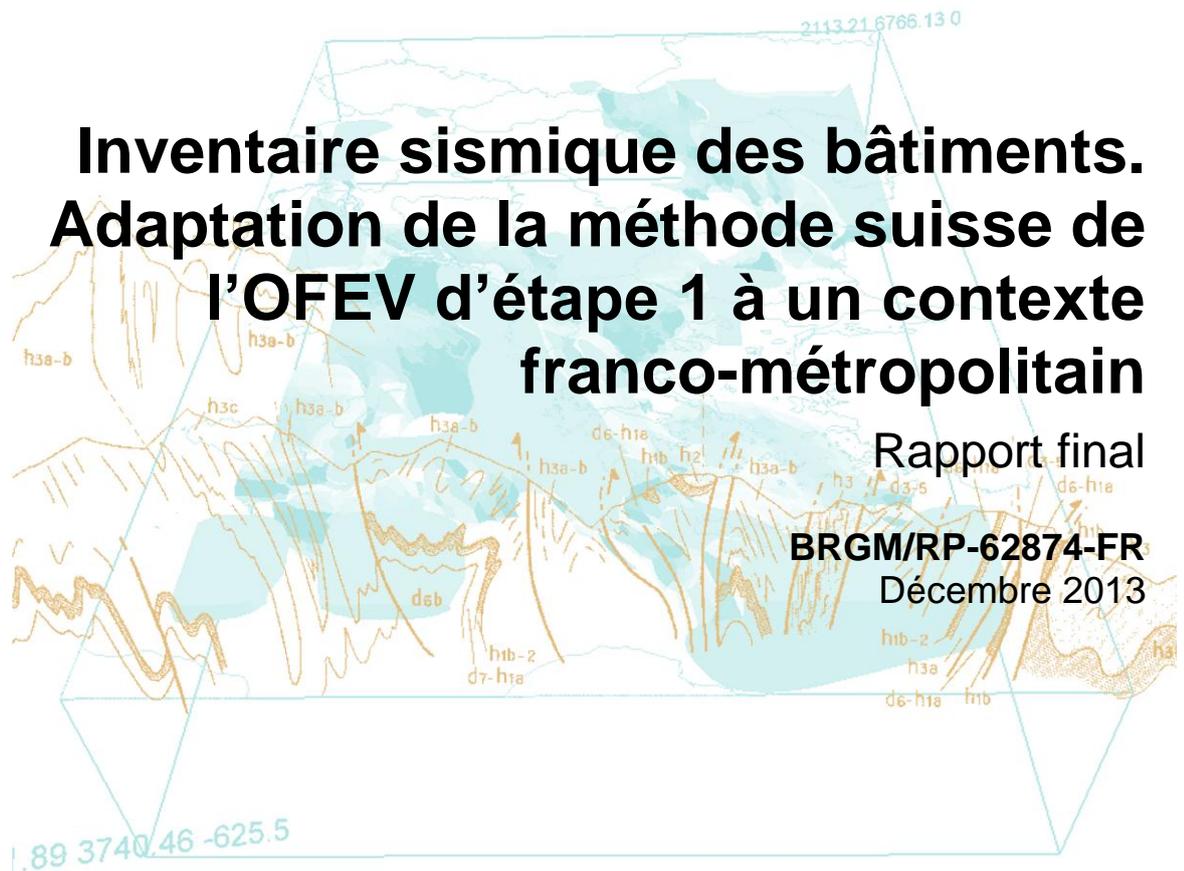


Inventaire sismique des bâtiments. Adaptation de la méthode suisse de l'OFEV d'étape 1 à un contexte franco-métropolitain

Rapport final

BRGM/RP-62874-FR

Décembre 2013



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Inventaire sismique des bâtiments. Adaptation de la méthode suisse de l'OFEV d'étape 1 à un contexte franco-métropolitain

Rapport final

BRGM/RP-62874-FR
Décembre 2013

Convention MEDDE-BRGM n°2200626840 – Action C.8

D. Monfort

Avec la collaboration de C. Negulescu

Vérificateur :

Nom : Myriam Belvaux.

Date : 30-4-2014

Signature :

Approbateur :

Nom : Gilles Grandjean

Date : 20/05/2014

Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité et de l'environnement

est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Mots clés : risque sismique, vulnérabilité, risques naturels, inventaire

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Monfort D. (2014). Inventaire sismique des bâtiments. Adaptation de la méthode suisse de l'OFEV d'étape 1 à un contexte franco-métropolitain. BRGM/RP- 62874-FR. 136 p., 12 figures, 38 tableaux, 4 annexes.

© BRGM, 2014, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

L'Office Fédéral des Eaux et de la Géologie (OFEG, devenue ultérieurement l'Office Fédérale de l'Environnement OFEV) en Suisse propose une démarche en 3 étapes pour classer, hiérarchiser et identifier les bâtiments pour lesquels un risque d'effondrement (en cas de séisme significatif) et un renforcement sont pertinents. Cette méthodologie est basée sur une première phase (étape 1) qui consiste à inventorier un parc bâti avec des critères pertinents sur son exposition et sa vulnérabilité au risque sismique.

L'étape 1 de la méthode de l'OFEG sans aucune adaptation au contexte franco-métropolitain pouvait difficilement s'appliquer sur un parc bâti français. La présente étude, réalisée avec le soutien du ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (convention MEDDE-BRGM n°2200626840), part de l'intérêt et de l'originalité de l'application d'une telle méthode d'inventaire sismique d'étape 1 en France Métropolitaine et propose une méthode « inspirée » qui intègre les spécificités françaises ainsi que les remarques à la méthode originale suite à une application effectuée en Italie (Brignola et al. 2012).

Le travail a notamment consisté en trois étapes :

- Etudier la pertinence en France Métropolitaine des critères choisis par l'OFEG pour mener l'analyse multicritère, portant sur :
 - l'importance économique et sociétale de chaque bâtiment
 - l'aléa sismique, la probabilité d'un effondrement
 - le niveau de conception parasismique
 - les facteurs de vulnérabilité de chaque construction
- Evaluer et adapter ces critères afin d'obtenir un classement en groupes de priorité, à partir d'un calage des facteurs en fonction de cas synthétiques
- Appliquer la méthode sur quatre parcs bâtis des différentes zones de sismicité de la Métropole.

Cette étude a démontré la faisabilité et l'intérêt d'une telle méthode d'inventaire et de classification des bâtiments vis-à-vis du risque sismique en France. L'application sur des cas réels a permis de classer comme prioritaires des bâtiments avec une conjonction de vulnérabilité et fort enjeu sociétal. Cette application a identifié au même temps les limites d'usage et les besoins en données d'entrée.

Sommaire

1. Introduction et objectifs	11
1.1. LES OBJECTIFS D'UN INVENTAIRE SISMIQUE ET L'INNOVATION DE LA METHODE DE L'OFEG.....	11
1.2. LES OBJECTIFS DE LA PRESENTE ETUDE.....	12
2. La méthode d'étape 1 de l'OFEG.....	15
2.1. INTRODUCTION A LA METHODE.....	15
2.2. AZPS : INDICATEUR DES DOMMAGES DIRECTS.....	16
2.3. WZ : PROBABILITE D'EFFONDREMENT DE L'OUVRAGE	17
2.3.1. Paramètre WEP	18
2.3.2. Paramètre WB.....	18
2.3.3. Paramètre WG	19
2.3.4. Paramètre WA.....	20
2.3.5. Paramètre WK.....	20
2.3.6. Paramètre WW.....	20
2.3.7. Paramètre WD	21
2.3.8. Paramètre WF.....	21
3. Application en Italie	23
4. Discussion de l'adaptation de la méthode OFEG au cas franco-métropolitain	26
4.1. LA PROBABILITE D'EFFONDREMENT D'UN BATIMENT STANDARD	26
4.1.1. Les hypothèses de base de la méthode OFEG	26
4.1.2. Discussion pour le cas de la Métropole	26
4.2. DISCUSSION SUR LES CRITERES DE VULNERABILITE PHYSIQUE DES BATIMENTS.....	36
4.3. DISCUSSION SUR LES FACTEURS D'ALEA LOCAL	37
4.4. DISCUSSION SUR L'IMPORTANCE D'UN BATIMENT	38
4.5. TESTS DE SENSIBILITE	38
4.5.1. Influence de la zone de sismicité et de la conception parasismique sur le facteur WZ	38
4.5.2. Test sur un spectre large de bâtiments.....	41

5. Adaptation proposée en France	47
5.1. AZPS : INDICATEUR DES DOMMAGES DIRECTS.....	47
5.1.1. Facteur AIF	47
5.1.2. Facteur ADS.....	47
5.1.3. Facteur ADP	48
5.2. WZ : PROBABILITE D'EFFONDREMENT DE L'OUVRAGE.....	48
5.2.1. Paramètre WPS, conception parasismique	48
5.2.2. Paramètre WY, aléa	49
5.2.3. Paramètre WT, effet de site topographique	49
5.2.4. Paramètre WB, effet de site lithologique.....	49
5.2.5. Paramètre WS, état de conservation	50
5.2.6. Paramètre WG, contreventement en plan.....	50
5.2.7. Paramètre WA, contreventement en élévation.....	51
5.2.8. Paramètre WK, irrégularités	51
5.2.9. Paramètre WW, nature du contreventement.....	52
5.2.10. Paramètre WD, ductilité	52
5.2.11. Paramètre WF, fondation.....	53
5.3. LES CRITERES DE CLASSIFICATION.....	53
6. Application sur un parc bâti existant	55
6.1. INFORMATIONS SUR L'IMPORTANCE ET LA FREQUENTATION DES BATIMENTS.....	56
6.1.1. Informations sur l'occupation des bâtiments	56
6.1.2. Information sur les catégories d'importance des ouvrages	57
6.1.3. Informations sur les surfaces.....	58
6.2. INFORMATIONS SUR LES CARACTERISTIQUES CONSTRUCTIVES DES BATIMENTS.....	59
6.2.1. Information sur l'âge et l'application des règles parasismiques.....	59
6.2.2. Informations sur la nature des sols	60
6.2.3. Contreventement en plan, paramètre WG	61
6.2.4. Type de contreventement, paramètre WW	63
6.2.5. Paramètre ductilité, WD.....	65
6.2.6. Contreventement en élévation, paramètre WA	67
6.2.7. Critère irrégularité, paramètre WK.....	68
6.2.8. WS, état de conservation.....	70
6.3. RESULTATS	71

6.3.1. Classement selon la priorité	71
6.3.2. Influence des autres critères	75
7. Conclusions	81
8. Bibliographie	83

Liste des Figures

Figure 1 : zonage sismique réglementaire de la France (article. D.563-8-1 du code de l'environnement), entré en vigueur le 1-5-2011.	12
Figure 2 : intensités maximales attendues pour une période de retour de 475 ans selon la méthode statistico-historique (avec paramètres de référence et traitement SIG). D'après Rey et al. (2008).	29
Figure 3 : relation entre les intensités EMS98, les classes de vulnérabilité et les degrés de dommages attendus. D'après Grunthal et al. (1998).	31
Figure 4 : exemples de classification en priorités de trois bâtiments « type ». ZS : zone sismicité. CPS : conception parasismique.	44
Figure 5 : représentation des limites pour la classification en priorités selon le critère AZPS, WZ et le produit RZPS.	54
Figure 6 : zonage sismique de la France annexe aux règles PS69.	60
Figure 7 : répartition par classes de priorité (1+, 1, 2, 3 et 4), par zones de sismicité (moyenne MOY, modérée MOD et très faible TF) et par niveau de conception parasismique (sans CPS, PS69 et PS92).	72
Figure 8 : répartition des priorités sur l'ensemble de bâtiments étudiés (en pourcentage).	72
Figure 9 : distribution des bâtiments en priorités selon les facteurs WZ et AZPS. Rappel : $RZPS=WZ*AZPS$	74
Figure 10: répartition en priorités selon le parc bâti considéré.	75
Figure 11 : répartition en groupes de priorités en fonction du critère WBAU ou vulnérabilité intrinsèque.	77

Liste des tableaux

Tableau 1 : codification paramètre AIF et équivalent au contexte français.	17
Tableau 2 : paramètre WEP pour les zones de sismicité du zonage suisse SIA 160 et SIA 261.	18
Tableau 3 : classes de sol du code SIA 26.	19
Tableau 4 : coefficients du paramètre WG (contreventement en plan).	19
Tableau 5 : coefficients du paramètre WA (contreventement en élévation).	20
Tableau 6 : coefficients du paramètre WK (forme).	20
Tableau 7 : coefficients du paramètre WW (nature du contreventement)	21

Tableau 8 : coefficients du paramètre WD (ductilité).	21
Tableau 9 : coefficients du paramètre WF (fondation).	22
Tableau 10 : adaptation faite pour le paramètre WG pour des bâtiments en maçonnerie (Brignola et al. 2012).	23
Tableau 11 : adaptation du paramètre WD faite par Brignola et al. (2012).....	24
Tableau 12 : paramètre WS proposé par Brignola et al. (2012).	24
Tableau 13 : équivalences entre le zonage sismique du code SIA 261 et les zonages sismiques français. nz : nouveau zonage sismique de la France () ; az : ancien zonage sismique de la France.....	27
Tableau 14 : équivalences approximées entre les PGA de chaque zone réglementaire et les intensités maximales attendues selon Rey et al. (2008).	30
Tableau 15 : probabilités annuelles d'effondrement total ou partiel (états D4 ou D5 selon l'échelle EMS98) pour différents types de bâtiments et pour différents niveaux d'intensité (période de retour 475 ans).....	32
Tableau 16 : probabilités annuelles d'effondrement pour différents types de bâtiment (indices de vulnérabilité RISK-UE) et pour les 4 zones d'aléa en Métropole. Extrait de Nicol (2013). Les « ratios sur TF » ont été calculés dans cette étude.	33
Tableau 17 : facteur fonction du niveau de conception parasismique d'un bâtiment	35
Tableau 18 : facteur réducteur en fonction des zones d'aléa sismique françaises.....	36
Tableau 19 : valeurs du paramètre WZ, test pour les 4 zones de sismicité, 3 niveaux de conception parasismique, 3 types de sol et 3 niveaux de facteurs de vulnérabilité.....	39
Tableau 20 : principales caractéristiques des bâtiments « type » pris en compte dans l'analyse.....	41
Tableau 21 : codification paramètre AIF et équivalent au contexte français.....	47
Tableau 22 : évaluation du paramètre WT, effet de site topographique.	49
Tableau 23 : évaluation simplifiée du paramètre WB, effet de site lithologique.....	50
Tableau 24 : évaluation du critère WS, état de conservation.....	50
Tableau 25 : coefficients du paramètre WG (contreventement en plan).....	51
Tableau 26 : coefficients du paramètre WA (contreventement en élévation).	51
Tableau 27 : coefficients du paramètre WK (forme).....	52
Tableau 28 : coefficients du paramètre WW (nature du contreventement).....	52
Tableau 29 : coefficients du paramètre WD (ductilité).	53
Tableau 30 : coefficients du paramètre WF (fondation).	53
Tableau 31 : exemples d'évaluation du critère WG, contreventement en plan.....	61
Tableau 32 : exemples d'évaluation du critère WW, nature du contreventement.....	64
Tableau 33 : exemples d'évaluation du critère WD, ductilité.....	65
Tableau 34 : exemples d'évaluation du critère WA, contreventement en élévation.	67
Tableau 35 : exemples d'évaluation du facteur WK, irrégularité.	69

Tableau 36 : exemples d'évaluation du facteur WS, état de conservation.....	70
Tableau 37: répartition en groupes de priorités en fonction de l'importance relative des bâtiments (coefficient AZPS).....	76
Tableau 38 : répartition en groupe de priorités en fonction des catégories d'importance des bâtiments.....	76
Tableau 39 : correspondance observée entre l'époque de construction et le facteur WBAU-vulnérabilité intrinsèque.	77

Liste des annexes

Annexe 1 Test de sensibilité pour des bâtiments standard	85
Annexe 2 Evolution des zonages sismiques de la France	93
Annexe 3 Méthode d'inventaire sismique d'étape 1 de l'OFEG	99
Annexe 4 Calcul de l'endommagement par la méthode RISK-UE	125
Annexe 5 Textes de référence relatifs aux règles parasismiques pour les différents types d'ouvrages	131

1. Introduction et objectifs

1.1. LES OBJECTIFS D'UN INVENTAIRE SISMIQUE ET L'INNOVATION DE LA METHODE DE L'OFEG

L'ex-Office Fédéral des Eaux et de la Géologie (OFEG)¹ en Suisse propose une démarche en 3 étapes pour classer, hiérarchiser et identifier les bâtiments (Directive de l'OFEG 2005) pour lesquels un risque d'effondrement en cas de séisme est notable et un renforcement est pertinent. Cette méthodologie est basée sur une première phase qui consiste à inventorier un parc bâti avec des critères pertinents sur son exposition et sa vulnérabilité au risque sismique. L'objectif principal d'un inventaire sismique de bâtiments est la hiérarchisation, quelle que soit la méthode utilisée. Au stade de l'inventaire, aucune décision concluante sur un ouvrage – travaux de renforcement, reconstruction – ne peut être prise.

Jusqu'à présent, en France, les inventaires sismiques de bâtiments sont plutôt rares. On peut citer le démonstrateur de la BDBati Antilles (Bertil et al. 2008), qui compilait des informations de plusieurs sources sur les diagnostics de vulnérabilité d'une série de bâtiments de catégories d'importance III et IV (ex-classes C et D) aux Antilles combinée à leur localisation sous SIG. Des collectivités ont établi des diagnostics de vulnérabilité de leurs bâtiments, plus ou moins accompagnés d'une phase d'inventaire géolocalisé. On peut dénombrer aussi la liste des établissements recevant du public (ERP) incluant les SDIS ou le SIDPC, mais qui intègrent uniquement la composante « catégorie de bâtiment » par tranche de fréquentation.

Ces pré-diagnostics de vulnérabilité ont comme objectif l'analyse de la vulnérabilité des structures en perspective de la pertinence ou non – et de quel type – d'un renforcement sismique, comme par exemple le guide de renforcement du CSTB-AFPS (2013). Par contre, souvent, ces pré-diagnostics ne visent pas l'établissement d'un inventaire exhaustif des bâtiments ni d'une hiérarchisation entre bâtiments. Elles citent à titre d'information l'usage du bâtiment, son effectif ou sa fréquentation et sa surface, mais le résultat final est un constat plus ou moins qualitatif de la vulnérabilité de la structure, une liste des points à améliorer et des pistes de renforcement. Par la suite il appartient au maître d'ouvrage ou au propriétaire du parc bâti d'utiliser et d'interpréter ces diagnostics et d'appliquer ou non les recommandations qui sont émises.

Dans le cas français il existe actuellement une hiérarchisation implicite et non formalisée des bâtiments vis-à-vis du risque sismique, dans le fait de ne pas faire de diagnostics de vulnérabilité pour des bâtiments dans des zones peu sismiques selon la réglementation actuelle (Figure 1) ou pour des bâtiments à faible enjeu. Le principal

¹ L'Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG) et l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP) ont fusionné en 2006 pour former l'Office fédéral de l'environnement (OFEV).

atout de la méthode de l'OFEG d'étape 1 est qu'elle formalise ces critères de classification à partir de la combinaison des critères intrinsèques à la vulnérabilité du bâtiment, des critères d'aléa sismique régional et local et des critères d'importance économique et de la fréquentation du bâtiment pour obtenir un résultat qui permet une hiérarchisation des actions à mener. L'inventaire sismique proposé intègre un petit outil d'aide à la décision qui permet l'identification des bâtiments prioritaires pour passer en étape 2, c'est à dire, dans une deuxième phase avec une analyse plus poussée de la résistance du bâtiment au séisme nominal.

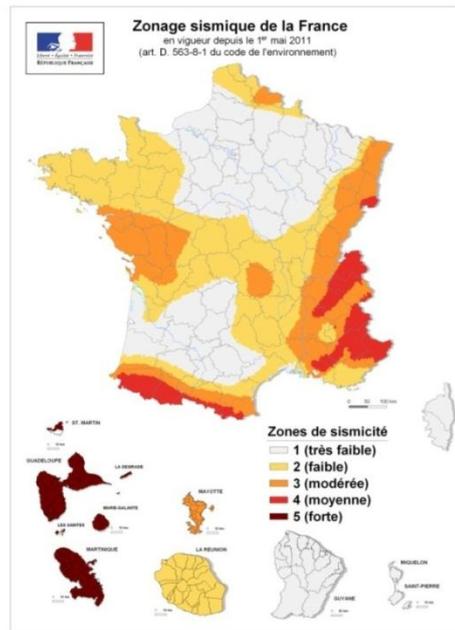


Figure 1 : zonage sismique réglementaire de la France (article. D.563-8-1 du code de l'environnement), entré en vigueur le 1-5-2011.

1.2. LES OBJECTIFS DE LA PRESENTE ETUDE

La présente étude, réalisée avec le soutien du ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (convention MEDDE-BRGM n°2200626840), se propose d'appliquer, en démonstrateur et en France Métropolitaine, une méthode d'inventaire sismique des bâtiments de niveau 1 inspirée de celle utilisée en Suisse.

Cette méthode d'inventaire s'utilise en Suisse depuis quelques années. Elle repose sur une série d'hypothèses qui sont très liées au contexte suisse, aussi bien au niveau des évolutions des différentes règles parasismiques en Suisse, qu'au niveau de l'aléa sismique ou encore du type de données disponible pour chaque bâtiment.

Cette étude discutera la pertinence des paramètres pour le cas franco-métropolitain, la façon dont ils peuvent être évalués et la façon dont les informations nécessaires peuvent être récoltées. Tout cela avec comme concept de base, cette phase d'inventaire d'étape 1 doit rester sommaire et basée sur des données facilement

accessibles ou disponibles à partir d'une visite sur site, à partir d'une consultation des plans et à partir d'un entretien avec les gestionnaires de l'établissement. Les analyses plus poussées doivent rester en phase 2 ou 3.

L'objectif est d'évaluer l'intérêt de l'application de ce type d'inventaire en Métropole et cela par rapport à l'approche qui consisterait à recenser et juger prioritaires tous les bâtiments de catégories d'importance III et IV en zones de sismicité modérée ou moyenne construits avant l'entrée en vigueur des codes parasismiques.

2. La méthode d'étape 1 de l'OFEG

2.1. INTRODUCTION A LA METHODE

L'Office Fédéral des Eaux et de la Géologie (OFEG) de Suisse a été chargé de recenser les bâtiments de la Confédération des classes II et III (proches des catégories d'importance III et IV en France) situés dans les zones d'aléa sismique 2 et 3 (selon la norme SIA 160). Pour ce faire, l'OFEG (2005, en annexe, Kolz et al. 2010) a décidé d'élaborer et de mettre en œuvre une démarche en trois phases :

- première étape consistant à recenser sommairement les principaux composants des bâtiments et le risque sismique auquel ils sont exposés, en recourant aux plans d'architecte et si nécessaire à une visite locale ;
- deuxième étape, pour laquelle il convient d'examiner plus en détail le risque affectant certains ouvrages, en se basant sur des plans d'ingénieur ;
- troisième phase qui vise à donner une réponse définitive avec des méthodes avancées, consistant à mettre au point des mesures destinées à un nombre restreint d'ouvrages particulièrement menacés, et à les réaliser le cas échéant.

Lors de l'**étape 1** (Figure 1), les caractéristiques importantes du bâtiment sont relevées à l'aide de plans d'architecte et d'une éventuelle visite. Le risque sismique est ensuite établi de manière grossière sur la base d'une check-list (**env. 4 heures par bâtiment**). L'estimation du risque ne nécessite pas de calculs détaillés, mais ne délivre également pas une appréciation absolue. Les priorités pour une analyse plus détaillée sont définies sur la base d'un indice de risque et d'un indice de probabilité d'effondrement.

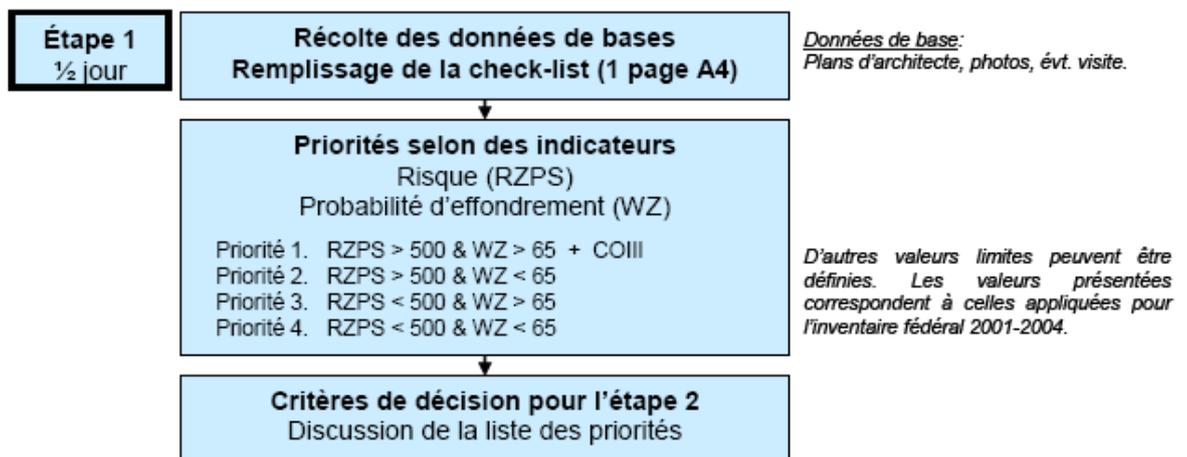


Figure 1 : schéma de l'étape 1 d'inventaire sismique des bâtiments. Extrait d'OFEG (2005)

L'estimation des risques ne requiert pas de calcul détaillé et ne livre pas de résultats en valeur absolue. Son objectif consiste à recenser au moyen d'indicateurs les propriétés des ouvrages qui déterminent leur tenue au séisme et à évaluer le danger auquel sont

exposés les bâtiments, les personnes et les biens. On suit un schéma d'évaluation pour déterminer :

- l'indicateur **AZPS** qui désigne l'ampleur des dommages corporels et des dégâts matériels ;
- puis l'indicateur **WZ** qui témoigne de la probabilité d'effondrement de l'ouvrage.

En multipliant ces deux paramètres, on obtient l'indicateur du risque **RZPS** :

$$\mathbf{RZPS = AZPS \times WZ}$$

Le classement par priorités se fait à partir des indices **RZPS** et **WZ** (Figure 2).

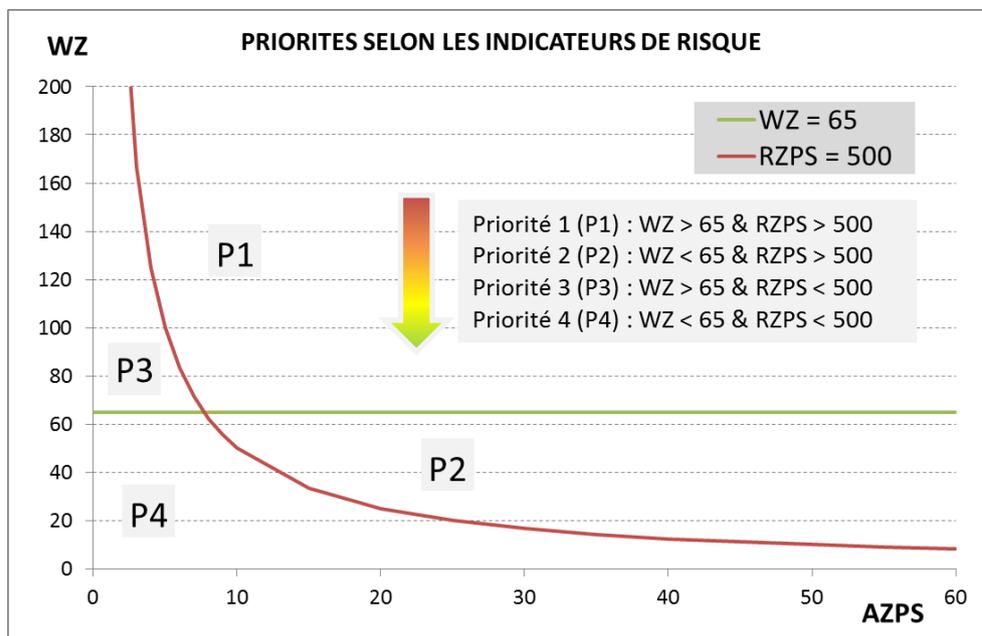


Figure 2 – hiérarchisation des priorités d'après OFEG (2005)

2.2. AZPS : INDICATEUR DES DOMMAGES DIRECTS

L'indicateur des dommages directs de l'immeuble se calcule d'après la formule suivante :

$$\mathbf{AZPS = (ADS + ADP) \times AIF}$$

Où ADP prend en compte le facteur risque pour la population, ADS prend en compte la valeur économique du bien et AIF pondère la somme selon l'importance de l'ouvrage. Le coefficient AIF est fonction du type d'ouvrage du code parasismique (

Tableau 1). ADS est un coefficient qui prend en compte les dégâts matériels directs rapportés à la valeur d'assurance du bâtiment en millions de francs suisses.

Tableau 1 : codification paramètre AIF et équivalent au contexte français.

AIF	Type d'ouvrage code suisse	Type d'ouvrage/Catégorie d'importance code français
1	I	I et II
2	II	III
5	III	IV

ADP est l'indicateur relatif aux dommages corporels directs exprimé comme le nombre d'occupants moyen annuel du bâtiment multiplié par 0,1. Par exemple, si 240 personnes se trouvent pendant 8 heures par jour et 5 jours par semaine et 42 semaines par an dans un bâtiment et qu'il est pratiquement vide le reste du temps, alors $ADP = 0,1 \times 240 \times 8/24 \times 5/7 \times 42/52 = 4,6$.

2.3. WZ : PROBABILITE D'EFFONDREMENT DE L'OUVRAGE

La probabilité d'effondrement exprime la probabilité qu'un bâtiment s'effondre sous l'effet d'un séisme d'une intensité donnée. L'intensité du séisme est celle incluse dans la carte d'aléa sismique en Suisse. Les réflexions suivantes guident la démarche pour son application en Suisse :

- La probabilité d'effondrement d'un bâtiment donné construit avant 1970 est dix fois plus faible s'il est situé dans la zone 1 (la plus faible) d'aléa sismique que s'il se trouve dans la zone 3b (la plus élevée).
- Si l'on se réfère à un terrain de fondation de qualité moyenne, la probabilité d'effondrement d'un bâtiment donné est réduite de moitié s'il est fondé sur un bon terrain et doublée s'il est sur un mauvais terrain.
- La probabilité d'effondrement d'un bâtiment donné est la même dans toutes les zones d'aléa sismique s'il a été conçu selon les règles parasismiques de la norme SIA 160 de 1989 (réactualisé en SIA 261 en 2003).
- La probabilité d'effondrement d'un bâtiment donné situé dans la zone 1 d'aléa sismique est trois fois plus grande s'il a été dessiné avant 1970 que s'il a été conçu et construit après 1989 selon les règles parasismiques de la norme SIA 160. Dans la zone 3b, le rapport est de 30 à un.
- La probabilité d'effondrement d'un bâtiment conçu judicieusement à tous égards, et notamment vis-à-vis des séismes, est environ 20 fois plus faible que s'il est mal conçu à tout point de vue.

L'indicateur de la probabilité d'effondrement **WZ** regroupe toutes les caractéristiques décrites ci-dessus. Il résulte de la formule suivante, qui prend en compte les indicateurs calculés à propos de la structure porteuse :

$$WZ = WEP \times WB \times (1 + WG + WA + WW + WK + WD + WF)$$

↓ Contexte sismique
 ↓ Contexte géologique
 } WBAU=Vulnérabilité intrinsèque du bâtiment

2.3.1. Paramètre WEP

Le paramètre **WEP** dépend de l'année de construction du projet et de la zone sismique selon le code suisse.

Tableau 2 : paramètre WEP pour les zones de sismicité du zonage suisse SIA 160 et SIA 261.

Zone sismique	1	2	3a	3b
Année du projet				
< 1970	3	6	15	30
1970 - 1989	2	3	8	15
> 1989	1	1	1	1

2.3.2. Paramètre WB

WB est le paramètre sol, qui s'évalue comme suit :

- WB = 1 est à choisir pour un rocher ou un sol très compact (classes de sol A et B selon la norme SIA 261 (2003)) ;
- WB = 2 est à choisir pour les sols meubles de classe C, D et E selon la norme SIA 261 pour lesquels aucun effet induit (liquéfaction, thixotropie, glissement) ni amplification importante due à la géométrie du soubassement rocheux ne sont attendus ;
- WB = 4 est à choisir pour les sols où des effets induits comme la liquéfaction, la thixotropie ou les glissements sont attendus (classe de sol F selon la norme SIA 261, ainsi que pour les cas où une forte amplification due à la géométrie du soubassement rocheux est attendue (possible pour les classes de sol C, D et E).

Les classes de sols considérées par la norme SIA sont proches de celles utilisées par la réglementation française. La caractérisation est la suivante :

Tableau 3 : classes de sol du code SIA 26.

Classe du sol de fondation	Description	V_s [m/s]	N_{SPT}	s_u [kN/m ²]	S	T_B [s]	T_C [s]	T_D [s]
A	Roche dure (p.ex. granite, gneiss, quartzite, calcaire siliceux, calcaire) ou roche tendre (p.ex. grès, Nagelfluh, marne jurassique, argile opalinus), sous une couverture de terrain meuble d'une épaisseur maximale de 5 m	> 800	–	–	1,00	0,15	0,4	2,0
B	Dépôts étendus de sable et de gravier cimentés et/ou sol préconsolidé d'une épaisseur supérieure à 30 m	400...800	> 50	> 250	1,20	0,15	0,5	2,0
C	Dépôts de sable et gravier normalement consolidés et/ou matériau morainique d'une épaisseur supérieure à 30 m	300...500	15...50	70...250	1,15	0,20	0,6	2,0
D	Dépôts de sable fin non consolidé, de limon et d'argile d'une épaisseur supérieure à 30 m	150...300	< 15	< 70	1,35	0,20	0,8	2,0
E	Couche alluviale superficielle des classes de sols de fondation C ou D, d'une épaisseur de 5 à 30 m reposant sur une couche plus compacte des classes de sols de fondation A ou B	–	–	–	1,40	0,15	0,5	2,0
F	Dépôts à structure sensible et organiques (p.ex. tourbe, craie lacustre, masses glissées), d'une épaisseur supérieure à 10 m	–	–	–	–	–	–	–

2.3.3. Paramètre WG

Le contreventement, qui doit absorber les efforts horizontaux, joue un rôle particulièrement important dans la tenue au séisme des structures porteuses. Trois de ses caractéristiques sont abordées dans la présente démarche, qui le considère en plan et en élévation, tout en tenant compte de sa nature.

WG intègre le contreventement en plan. Le contreventement en plan WG correspond à l'agencement des éléments porteurs sollicités pour reprendre les efforts horizontaux occasionnés par les séismes. Il est en général le plus efficace lorsque le centre de rigidité est proche du centre de masse, ce qui permet d'éviter des contraintes de torsion excessives.

Tableau 4 : coefficients du paramètre WG (contreventement en plan).

Contreventement en plan	WG
Approprié (contreventé dans les 2 directions)	0
Inapproprié (asymétrique, absence de contreventement dans une direction)	2
Aucun (pas de voiles de contreventement)	5

2.3.4. Paramètre WA

WA représente le contreventement en élévation. Ce paramètre examine la continuité verticale des voiles de contreventement du bâtiment. Ainsi les niveaux souples seront représentés comme les plus défavorables. Les dispositions avec une non-continuité verticale (décalage horizontal des ouvertures) seront aussi pénalisées. La condition idéale est quand la rigidité est la même pour tous les étages.

Tableau 5 : coefficients du paramètre WA (contreventement en élévation).

Contreventement en élévation	WA
Voiles de contreventement continus en vertical	0
Discontinu (voiles de contreventement décalés d'un étage à l'autre)	2
Transparence ou niveau souple	5

2.3.5. Paramètre WK

WK intègre les irrégularités de forme. En effet, les formes irrégulières ou anguleuses ne sont pas favorables à la résistance de l'ouvrage car elles peuvent engendrer de la torsion sous l'action sismique.

La méthode originale fait référence à un critère basique de forme en plan. Comme présenté par la suite en 4.2 et 5.2.8, on propose une extension de ce critère pour toutes les situations des bâtiments sans joints parasismiques avec les bâtiments voisins et pour les bâtiments qui présentent des éléments architecturaux estimés dangereux (cas de balcons, auvents, cheminées, etc.).

Tableau 6 : coefficients du paramètre WK (forme).

Forme	WK
Régulière	0
Irrégulière, angles rentrants, différences de hauteur. Balcons et/ou auvents dangereux	1

2.3.6. Paramètre WW

WW considère la nature du contreventement. La qualité du contreventement dépend également de sa nature **WW**. Les noyaux et parois sont les mieux adaptés. Les cadres (en acier) sont en général un peu moins rigides, ce qui favorise l'apparition de dégâts mais ne conduit pas forcément à l'effondrement précoce. Les treillis à nœuds centraux, sont moins aptes à reprendre les efforts engendrés par les séismes. Cependant, ce sont les portiques partiellement remplis de maçonnerie qui ont la plus mauvaise tenue, car cette dernière tend à reporter de gros efforts tranchants supplémentaires et de

direction défavorable sur les poteaux du cadre (poteaux courts). L'expérience montre que les contreventements à configuration combinée sont également douteux.

Tableau 7 : coefficients du paramètre WW (nature du contreventement)

Nature du contreventement	WW
Noyau, parois, voiles	0
Cadres translatables	1
Treillis	2
Portiques avec remplissage en maçonnerie	2 à 4
Système mixte	3

2.3.7. Paramètre WD

WD représente la ductilité globale du bâtiment. Cette « ductilité » peut être appréhendée sommairement en fonction du mode de construction et des matériaux constituant les éléments porteurs. Les ouvrages entièrement bâtis en maçonnerie ou en béton non armé s'avèrent particulièrement sensibles, surtout s'ils sont hauts et dépourvus de planchers rigides.

Tableau 8 : coefficients du paramètre WD (ductilité).

Ductilité	WD
Béton armé, acier, composite	0
Maçonnerie armée	2
Préfabriqué, bois	3
Maçonnerie, béton non armé - Planchers flexibles (bois, composite, poutrelles) - Planchers rigides (dalle en béton)	- 3+nb étages - 3+nb étages/2

2.3.8. Paramètre WF

WF caractérise le mode de fondation de l'ouvrage considéré. Un tremblement de terre peut également occasionner des déplacements différentiels dans les sous-sols et entre les fondations. Ces mouvements sont susceptibles de générer localement des contraintes excessives, pouvant conduire à l'effondrement du bâtiment.

Les ouvrages fondés sur un terrain hétérogène, à des profondeurs variables ou dont les fondations permettent des mouvements différentiels ont une tenue au séisme particulièrement médiocre. Sont notamment menacées les constructions dotées de fondations isolées ou de semelles filantes non reliées par des traverses. L'évaluation de ce critère n'est pas toujours évidente sans plans de fondations.

Tableau 9 : coefficients du paramètre WF (fondation).

Fondations	WF
Toute la surface	0
Isolée, sur un terrain hétérogène, à profondeur variable, semelles filantes non reliées	1

3. Application en Italie

La méthode d'inventaire sismique des bâtiments, dans son étape 1, a été appliquée en Italie et testée sur un parc bâti qui avait subi des dommages suite au séisme de Molise en 2002 (Brignola et al. 2012, Podesta et al. 2012). Cette application s'est uniquement focalisée sur la partie vulnérabilité et probabilité d'effondrement de l'ouvrage, c'est à dire, le paramètre WZ. Le calcul des autres indicateurs et son adaptation au cas italien n'ont pas été traités.

Brignola et al. (2012) ont adapté les paramètres originaux de la méthode OFEG pour les bâtiments en maçonnerie en pierre ou moellons. Ils ont été amenés à les adapter suite à une première application de la méthode, au cours de laquelle sans aucune adaptation des paramètres, ils n'arrivaient pas à obtenir des résultats cohérents avec l'endommagement observé en réalité. Concrètement il n'y avait pas de corrélation entre le paramètre WZ (probabilité d'effondrement) et le ratio réel observé de bâtiments habitables ou non habitables après le séisme.

Comme une grande majorité des bâtiments endommagés était constituée de structures en maçonnerie à l'ancienne, ils ont proposé à la fois des nouveaux facteurs en fonction des observations et l'application de la méthode sur un parc bâti de 608 bâtiments endommagés lors du séisme de Molise en Italie (2002), concrètement dans la commune de Ripabottoni.

Le paramètre WG, le contreventement en plan

Considérant que le contreventement pour des structures en maçonnerie est constitué des murs porteurs, il a été décidé d'approcher ce paramètre par la régularité et la connectivité avec les éléments horizontaux et la nature des planchers. Cette adaptation est spécifique au cas de Ripabottoni (Molise) et le format d'entrée des relevés de vulnérabilité.

Tableau 10 : adaptation faite pour le paramètre WG pour des bâtiments en maçonnerie (Brignola et al. 2012).

Contreventement	Informations		WG	
	Régularité	Éléments horizontaux	Plancher rigide	Plancher flexible
Favorable dans les deux directions	Régulier	Bien connectés	0	1
Favorable dans une direction	Régulier	Peu/mal connectés	1	2
Défavorable	Régulier	Peu/mal connectés	2	3

Aucun	Régulier	Peu/mal connectés	5	5
-------	----------	-------------------	---	---

Le facteur WD, la ductilité.

A Ripabottoni Brignola et al. (2012) ont observé que le ratio d'édifices habitables ou non-habitables restait invariant selon le nombre de niveaux. Par conséquent ils ont décidé de réduire la somme de « +n » à « +n/2 ». Une distinction est faite par « qualité de maçonnerie ».

Tableau 11 : adaptation du paramètre WD faite par Brignola et al. (2012).

Maçonnerie	WD
Bonne qualité	$2.5+n/2$
Mauvaise qualité	$5+n/2$

Le paramètre WF, les fondations

Pour les fondations, Brignola et al. (2012) proposent une valeur intermédiaire de 0.5 pour les fondations du type semelles filantes, lorsqu'il n'y a pas de fondation homogène continue ou des pieux profonds (facteur 0) mais qui ne sont pas non plus des fondations isolées (facteur 1).

Le paramètre WS, l'état de conservation

Finalement Brignola et al. (2012) proposent d'ajouter un nouveau facteur pour l'état de préservation du bâtiment (WS). Ce facteur WS multiplie la somme du reste de facteurs. Ainsi un bon état de préservation réduira la note finale de la vulnérabilité de l'édifice et au contraire, un état très vétuste l'incrémentera.

Tableau 12 : paramètre WS proposé par Brignola et al. (2012).

Etat de préservation	WS
Bon état	0.8
Etat moyen ou fissures en superficie	0.9
Etat médiocre ou fissures moyennes	1
Etat vétuste ou fissuration importante	1.2

Brignola et al. (2012) proposent d'intégrer un facteur pour les effets de site topographiques (WT). Pour des bâtiments situés en zone sensible aux effets de site topographiques, ils proposent de multiplier le résultat de WZ directement par le coefficient des Eurocodes 8. Pour les effets de site lithologiques, ils appliquent les

coefficients d'amplification des microzonages sismiques s'ils existent ou les coefficients d'amplification des Eurocodes 8 le cas échéant.

D'après leurs travaux, le reste des paramètres de la méthode originale ne changent pas, c'est à dire, l'irrégularité (paramètre WK), le contreventement en élévation (WA) et le type de contreventement (WW).

Conclusions de Brignola et al. (2012)

Une première application de la méthode OFEG sur un parc bâti endommagé en Italie a permis de constater que la méthode sans modifications n'était pas adaptée aux bâtiments en maçonnerie. Les auteurs considèrent que les modifications apportées à la méthode originale en termes de caractérisation des bâtiments en maçonnerie améliorent sensiblement la méthode originale. Ils estiment également que l'exemple d'application spécifiquement réalisée en Italie est adaptée à une typologie particulière, celle des bâtiments en maçonnerie comme ceux de Ripabottoni et ceci pour un niveau d'aléa comparable.

4. Discussion de l'adaptation de la méthode OFEG au cas franco-métropolitain

4.1. LA PROBABILITE D'EFFONDREMENT D'UN BATIMENT STANDARD

4.1.1. Les hypothèses de base de la méthode OFEG

La méthode de l'OFEG se base sur un postulat de base (cf. chapitre 2.3) sur les probabilités d'effondrement des bâtiments en Suisse en fonction des différents niveaux de conception parasismique et en fonction de différents niveaux d'aléa probabiliste selon le code sismique suisse.

La probabilité d'occurrence d'un séisme pouvant engendrer des dommages dépend de l'endroit considéré et de la période de temps. La norme suisse SIA 160 découpe le territoire suisse en quatre zones d'aléa sismique. Ces zones correspondent aux accélérations attendues lors de séismes (période de retour 475 ans). On peut également considérer qu'elles coïncident avec la probabilité d'occurrence d'un tremblement de terre d'intensité donnée. Dans la méthode originale de l'OFEG, le paramètre WEP met en relation la zone sismique selon la carte d'aléa et l'année de construction du bâtiment.

Pour la période précédant 1970, le paramètre WEP, qui peut prendre les valeurs de 3 à 30, est étroitement corrélé avec ce découpage. Autrement dit, un bâtiment sans conception parasismique (construit avant 1970) situé dans la zone d'aléa le plus fort en Suisse aura 10 fois plus de chances de s'effondrer à cause d'un séisme que le même bâtiment situé dans la zone d'aléa le plus faible.

Pour les ouvrages conçus et construits après 1989, cette différenciation géographique disparaît, sachant que la norme SIA 160 vise à homogénéiser/garantir la sécurité parasismique dans toute la Suisse. Pour les bâtiments les plus récents la méthode considère que la probabilité d'effondrement est la même quelle que soit la localisation géographique en Suisse. Pour la période courant de 1970 à 1989, il a été procédé à une interpolation linéaire dans un but de simplification.

4.1.2. Discussion pour le cas de la Métropole

Cet ensemble d'hypothèses a été revu dans ce sous-chapitre pour juger s'il est pertinent de les appliquer en France métropolitaine.

- Quels sont les probabilités d'effondrement pour une structure sans conception parasismique pour les différentes régions du zonage sismique en France métropolitaine ?

- Le critère « homogénéisation » de la probabilité d'effondrement pour tous les bâtiments récents est-il pertinent dans le cas franco-métropolitain ?

Les probabilités d'effondrement pour les bâtiments existants

Tout d'abord l'équivalence entre les niveaux d'accélération règlementaires en Suisse et en métropole a été examinée (Tableau 13). Les valeurs d'accélération seuil des différentes zones de sismicité ne sont pas tout à fait les mêmes. En particulier la zone de sismicité française qualifiée « très faible » ne semble pas avoir d'équivalent en Suisse.

Tableau 13 : équivalences entre le zonage sismique du code SIA 261 et les zonages sismiques français. nz : nouveau zonage sismique de la France (Figure 1 : zonage sismique réglementaire de la France (article. D.563-8-1 du code de l'environnement), entré en vigueur le 1-5-2011.) ; az : ancien zonage sismique de la France.

Zone Suisse	Accélérations en Suisse	Zone France (nz)	Accélérations en France (nz)	Zone France (az)	Accélérations en France (az)
1	0.6 m/s ²	1 et 2	Très faible 0.4 et faible 0.7 m/s ²		
2	1 m/s ²	3	Modéré 1.1 m/s ²	I a	1 m/s ²
3a	1.3 m/s ²	/	/	/	/
3b	1.6 m/s ²	4	Moyen 1.6 m/s ²	I b	1.5 m/s ²
				II	2.5 m/s ²

Pour estimer si les ratios de probabilités d'effondrement entre zones d'aléa appliqués en Suisse (Tableau 2) sont pertinents en Métropole, il a été décidé de travailler avec des intensités macrosismiques potentiellement attendues pour chacune des zones d'aléa en France et les corrélations existantes entre niveaux d'intensité et endommagement moyen pour différents types de bâtiment.

• Travaux de Labbé (2008), Douglas et al. (2013) et Ulrich et al. (2014)

L'étude de Labbé (2008) est une des premières connues en France sur une approche « risque sismique global ». Il donne des probabilités annuelles de subir des dommages intermédiaires (dommages de niveau D2 et D3 selon l'échelle EMS98) pour des bâtiments en maçonnerie (probabilité annuelle de subir un état de dommage D3 ou supérieur estimé à $4.9 \cdot 10^{-5}$ en zone sismique).

Les travaux de Douglas et al. (2013) sur les notions du risque inverse en France ont également été consultés. Les objectifs de la présente étude et l'article en question ne sont pas tout à fait les mêmes dans leur philosophie. En effet, Douglas et al. (2013) partent d'une probabilité annuelle d'effondrement d'un bâtiment constante égale à 10^{-5} sur toute la Métropole et examinent quel aléa est susceptible de correspondre à cette condition. D'une certaine manière, on pourrait dire que Douglas et al. (2013) s'intéressent à l'homogénéisation de la protection parasismique des nouveaux

bâtiments à venir tandis que la présente étude s'intéresse à l'existant, qui par nature n'est pas homogène.

L'étude d'Ulrich et al. (2014) s'intéresse à la vulnérabilité des bâtiments conçus selon les Eurocodes 8 pour chacune des zones sismiques de la France (Figure 1). Ils considèrent un même bâtiment de référence (structure poteaux-poutres en béton armé) dimensionné selon les EC8 pour chacune des accélérations nominales qui sont imposées par la nouvelle réglementation parasismique française dans les cinq zones sismiques. Ils calculent ensuite une courbe de fragilité pour chaque zone d'aléa sismique. Le résultat montre qu'un bâtiment dimensionné pour des accélérations faibles ($a_g \leq 1.1 \text{ m/s}^2$, ce qui correspond aux zones de sismicité 1, 2, 3, « très faible », « faible » et « modérée ») a des courbes de fragilité très similaires lorsqu'il est implanté dans ces trois zones. D'une certaine manière ceci revient dire qu'un bâtiment moderne conçu selon les règles EC2 (règles standard pour la construction d'un bâtiment en béton armé) ou selon les règles sismiques EC8 face à des faibles accélérations nominales aura un comportement sous sollicitation sismique très proche.

Ce n'est qu'à partir d'une accélération égale ou supérieure à 1.7 m/s^2 (valeur proche de celle de référence de la zone de sismicité moyenne) que l'effet de l'accélération de dimensionnement devient plus visible. Cet effet se traduit par une diminution de la vulnérabilité du bâtiment lorsque l'accélération de dimensionnement augmente.

Pour résumer, la probabilité d'effondrement des bâtiments face aux accélérations du zonage sismique sont faibles et similaires, inférieures à 10% dans tous les cas (<10%). C'est complètement normal dans la mesure où ils ont été dimensionnés pour résister à ces niveaux de sollicitation. En revanche, la probabilité d'atteindre la limite d'élasticité atteint 80% pour la zone de sismicité forte (Antilles), 60% pour la zone de sismicité moyenne, 40% pour la zone de sismicité modérée et est autour de 20% pour la zone de sismicité faible. Il faut rappeler que cette limite d'élasticité correspond à un niveau de dommage bien avant l'effondrement de la structure. Donc un bâtiment en zone de sismicité moyenne aurait trois fois plus de chances d'atteindre la limite d'élasticité qu'un bâtiment en zone de sismicité faible. En conséquence, l'étude d'Ulrich et al. (2014) montre que la réglementation actuelle tend vers une homogénéisation du risque pour les bâtiments récents – en termes de probabilité d'effondrement – mais qu'en même temps les zones d'aléa moyen et fort méritent plus d'attention que les autres, surtout en termes de probabilité d'atteindre la limite d'élasticité.

• Calcul relatif de probabilités d'effondrement entre les différentes régions en France

Pour analyser les probabilités d'effondrement d'un bâtiment standard sur différents territoires de la Métropole, dans cette étude nous avons décidé de travailler avec une méthode empirique basée sur l'intensité macrosismique (méthode RISK-UE, Milutinovic et al. 2003). Pour ce faire, la carte de l'aléa sismique obtenue par Rey et al. (2008) selon une approche statistico-historique a été utilisée comme donnée spatialisée de l'aléa (Figure 2). L'utilisation de cette carte d'aléa permet de travailler directement en intensité macrosismique sur le territoire métropolitain. De plus, ceci permet d'éviter les biais qui existent dans les relations de transformation entre les

accélération au rocher issues des cartes réglementaires et l'intensité macrosismique. L'autre avantage de cette carte est qu'elle prend déjà en compte l'effet de site moyen, car il est implicitement inclus dans les intensités macrosismiques historiques observées. L'utilisation de cette carte permet en plus travailler sur une probabilité d'occurrence homogène sur le territoire.

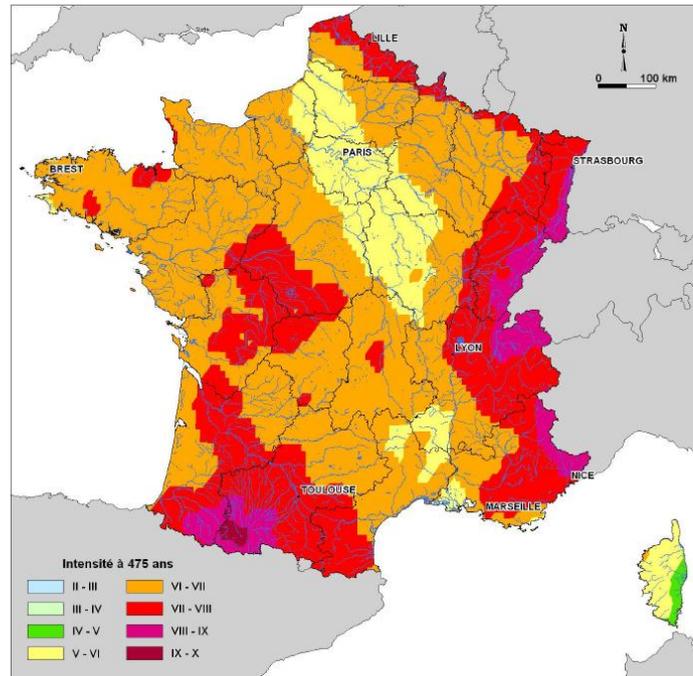


Figure 2 : intensités maximales attendues pour une période de retour de 475 ans selon la méthode statistico-historique (avec paramètres de référence et traitement SIG). D'après Rey et al. (2008).

Sur la Figure 2 on peut observer que pour une même période de retour en France métropolitaine (475 ans), les intensités varient entre IX-X (zone de Lourdes) et IV-V (Est de la Corse). Le Tableau 14 indique des équivalences approximatives tirées de la comparaison entre les niveaux de PGA du zonage réglementaire et les intensités de la carte obtenue par Rey et al. (2008).

Tableau 14 : équivalences approximées entre les PGA de chaque zone réglementaire et les intensités maximales attendues selon Rey et al. (2008).

Zonage sismique France	Pga réglementaire m/s ²	Etude BRGM-2008
Très faible	0.4	V-VI
Faible	0.7	VI-VII
Modéré	1.1	VII-VIII
Moyen	1.6	VIII-IX ou VII-VIII

Quatre niveaux d'intensité sont considérés dans l'analyse qui suit : V-VI, VI-VII, VII-VIII et VIII-IX, qui correspondent aux quatre zones (jaune, orange, rouge, violet) de la carte de la Figure 2. Ces zones ne sont pas équivalentes et ne se superposent pas à celles du zonage sismique réglementaire de la France. Cette variation entre niveaux d'intensités peut néanmoins être considérée comme représentative de la variation attendue en termes d'intensité macrosismique entre les zones d'aléa très faible et les zones d'aléa moyen pour une même probabilité d'occurrence.

Ensuite un calcul d'endommagement moyen pour ces valeurs d'intensités a été fait, sur la base des indices de vulnérabilité associés à l'échelle EMS98. Quatre types de bâtiments sont considérés : classe de vulnérabilité A, classe de vulnérabilité B, classe de vulnérabilité C et classe de vulnérabilité D :

- Un bâtiment de classe de vulnérabilité A, correspondant à un bâtiment construit par exemple en maçonnerie en moellons non renforcée ou en adobe.
- Un bâtiment de classe de vulnérabilité B qui peut correspondre à une structure en béton armé non parasismique et avec des défauts de conception, mais aussi à certains bâtiments en maçonnerie ancienne (pierre tout venant, chainages en pierres de taille).
- Un bâtiment de classe de vulnérabilité C, qui correspond à des bâtiments en béton armé sans conception parasismique et sans grands défauts ou à des bâtiments en maçonnerie récente non renforcée.
- Un bâtiment de classe de vulnérabilité D, qui correspond à un bâtiment avec conception parasismique.

Quatre indices de vulnérabilité moyens (respectivement 0.9, 0.75, 0.6 et 0.45) sont associés à ces classes de vulnérabilité. A chaque classe de vulnérabilité (Figure 3) correspond une relation entre l'intensité d'un séisme et les dommages observés lors de ce même séisme. La probabilité de subir des dommages graves (effondrement total ou partiel, dommages de classe 4 ou 5 selon l'échelle EMS98) a été calculée pour ces quatre types de bâtiments.

Class A					
Damage Intensity	1	2	3	4	5
V	Few				
VI	Many	Few			
VII			Many	Few	
VIII				Many	Few
IX					Many
X					Most
XI					
XII					

Class B					
Damage Intensity	1	2	3	4	5
V	Few				
VI	Many	Few			
VII		Many	Few		
VIII			Many	Few	
IX				Many	Few
X					Many
XI					Most
XII					

Class C					
Damage Intensity	1	2	3	4	5
V					
VI	Few				
VII		Few			
VIII		Many	Few		
IX			Many	Few	
X				Many	Few
XI					Many
XII					Most

Class D					
Damage Intensity	1	2	3	4	5
V					
VI					
VII	Few				
VIII		Few			
IX		Many	Few		
X			Many	Few	
XI				Many	Few
XII					Most

Class E					
Damage Intensity	1	2	3	4	5
V					
VI					
VII					
VIII					
IX		Few			
X		Many	Few		
XI			Many	Few	
XII					

Class F					
Damage Intensity	1	2	3	4	5
V					
VI					
VII					
VIII					
IX					
X		Few			
XI		Many	Few		
XII					

Figure 3 : relation entre les intensités EMS98, les classes de vulnérabilité et les degrés de dommages attendus. D'après Grunthal et al. (1998).

Le calcul de l'endommagement moyen μ_D peut se faire par corrélation avec l'intensité macrosismique I et l'indice de vulnérabilité V_i , à partir de la formule suivante :

$$\mu_D = 2.5 \left(1 + \tanh \left(\frac{I + 2.5V_i - 13.1}{2.3} \right) \right)$$

Cet endommagement moyen est par la suite transformé en distribution statistique de dommages. Ce n'est pas l'objet de la présente étude de détailler la méthode de calcul de ces distributions de dommages. Un bref descriptif est présenté en annexe 4.

Les résultats en termes de probabilités d'effondrement total ou partiel (états D4 ou D5 selon l'échelle EMS98) sont intéressants car ils permettent d'avoir un ordre de grandeur et une comparaison entre les zones d'intensités macrosismiques et les classes de vulnérabilité (Tableau 15) :

- un bâtiment de classe de vulnérabilité B a 600 fois plus de chances de s'effondrer en zone d'intensité VIII-IX qu'en zone d'intensité V-VI. Ce ratio monte à 750 si le bâtiment est de classe de vulnérabilité C et descend à 175 s'il est de classe A.
- Quelle que soit sa classe de vulnérabilité, un bâtiment en zone d'intensité VII-VIII, a de 7 à 15 fois plus de chances de subir un effondrement qu'en zone d'intensité VI-VII.
- En zones d'intensité VI-VII et VII-VIII, un bâtiment de classe B a une probabilité 10 fois plus grande de s'effondrer qu'un bâtiment de classe C, et celui-ci a une probabilité 10 fois plus grande de s'effondrer qu'un bâtiment de classe D.

Tableau 15 : probabilités annuelles d'effondrement total ou partiel (états D4 ou D5 selon l'échelle EMS98) pour différents types de bâtiments et pour différents niveaux d'intensité (période de retour 475 ans).

Intensité Classe EMS98	V-VI	VI-VII	VII-VIII	VIII-IX
A	6.53E-07	5.26E-06	3.79E-05	1.14E-04
B	6.32E-08	5.05E-07	6.32E-06	4.00E-05
C	9.05E-09	4.84E-08	6.11E-07	6.84E-06
D	2.11E-09	7.58E-09	5.89E-08	6.53E-07

Ces résultats sont cohérents avec les postulats de base de l'échelle macrosismique européenne de la Figure 3, où ce n'est qu'à partir des intensités VII que sont attendus des dommages graves comme les effondrements.

• **Les travaux du groupe de travail QERIR de l'AFPS**

En octobre 2013 suite aux travaux du Groupe de Travail de l'AFPS sur la Quantification effective du risque sismique (GT QERIR), Nicol (2013) et Dunan et al. (2014) présentent également des comparaisons entre les différentes zones d'aléa sismique en France en termes de probabilité d'endommagement, probabilité de pertes humaines et probabilité de pertes économiques. Cette étude a estimé pour 40 villes de la Métropole, une probabilité d'effondrement pour 4 types de bâtiment qui correspondent à 4 indices de vulnérabilité. La démarche est donc assez proche à celle suivie dans la présente étude. Les résultats sont exprimés en probabilités annuelles de subir des dommages de type D4 ou D5 selon l'échelle macrosismique européenne.

A partir de ces probabilités moyennes par zone de sismicité et par type de bâtiment, nous avons calculé/extrait un ratio par rapport à la probabilité d'effondrement en zone de sismicité très faible (Ratio sur TF, Tableau 16). Ceci permet de constater que les bâtiments les plus vulnérables ($V_i=0.9$) ont 10 fois plus de chances de subir des dommages très forts en zone de sismicité moyenne que s'ils étaient situés en zone de sismicité très faible. Au premier abord, ce résultat peut sembler assez bas, mais en regardant plus en détail l'étude de Nicol (2013), pour cette classe de vulnérabilité ce ratio peut atteindre la centaine (par exemple entre les villes de Lourdes et d'Orléans). Un bâtiment avec un $V_i=0.7$ (classe de vulnérabilité B) aurait 155 fois plus de chances de s'effondrer que le même bâtiment en zone de sismicité très faible. Ces ratios augmentent d'ordre de grandeur lorsque l'indice de vulnérabilité diminue.

Tableau 16 : probabilités annuelles d'effondrement pour différents types de bâtiment (indices de vulnérabilité RISK-UE) et pour les 4 zones d'aléa en Métropole. Extrait de Nicol (2013). Les « ratios sur TF » ont été calculés dans cette étude.

Aléa	$V_i = 0.3$	Ratio sur TF	$V_i = 0.5$	Ratio sur TF	$V_i = 0.7$	Ratio sur TF	$V_i = 0.9$	Ratio sur TF
Moyen	6.00E-05	230769	6.00E-05	3750	1.10E-04	155	2.00E-04	10
Modéré	1.30E-07	500	3.70E-06	231	3.80E-05	54	1.60E-04	8
Faible	1.70E-09	6.5	9.00E-08	6	3.10E-06	4	6.40E-05	3
Très Faible	2.60E-10	1	1.60E-08	1	7.10E-07	1	2.00E-05	1

Si l'on compare ces résultats avec les postulats de départ de la méthode d'inventaire sismique de l'OFEG (Tableau 2), on observe que la différence entre la probabilité d'effondrement d'une même structure entre le niveau d'aléa le plus fort et le plus faible en France serait d'un ordre de grandeur plus grand qu'en Suisse (en France le ratio est de l'ordre de la centaine en fonction de la source, en Suisse elle est estimée à 30). Ces résultats peuvent en partie s'expliquer par le fait qu'en Suisse, par la taille même du pays, les niveaux d'aléa sont moins nombreux qu'en France. Il suffit de regarder l'accélération au rocher de la zone de sismicité faible en Suisse ($0,6 \text{ m/s}^2$) qui est comparable à la zone de sismicité faible en France ($0,7 \text{ m/s}^2$). La zone de sismicité française « très faible » n'a pas donc d'équivalent dans le zonage suisse et donc la méthode de l'OFEG ne prévoit pas cette situation. **Il semble donc indispensable qu'une adaptation de cette méthode au contexte franco-métropolitain prenne en compte ce fait et ajoute un niveau d'aléa sismique de plus, équivalent à la zone de sismicité très faible du zonage français.**

L'ensemble de ces calculs et résultats montrent bien que les variations en termes de probabilité d'effondrement pour les différentes zones d'aléa sismique et les différents types de bâtiment ne sont pas linéaires. La méthodologie d'inventaire discutée ici se

doit de rester assez simpliste et de ne pas rentrer dès l'étape 1 dans un calcul complexe de probabilités d'effondrement et de dommages. Par conséquent, nous proposons par la suite de considérer un cas moyen, qui correspond à un bâtiment en classe de vulnérabilité EMS98 entre B et C. Par ailleurs, l'étape 1, qui vise une hiérarchisation d'un parc bâti, ne va pas s'intéresser à la valeur absolue des probabilités de dommages, mais plutôt à une comparaison entre plusieurs situations. D'où l'intérêt de calculer les ratios par rapport aux zones les moins sismiques en France.

Homogénéisation de la probabilité d'effondrement pour les bâtiments récents ?

La méthode de l'OFEG considère que tous les bâtiments récents, construits selon les règles SIA 160 (équivalentes en termes de périodes de vigueur aux règles PS92 en France), ont par définition la même probabilité de s'effondrer. Cette hypothèse est fondée sur le fait que l'application de règles parasismiques pour les constructions nouvelles, doit dans l'idéal donner la même probabilité d'effondrement pour un même bâtiment, quelle que soit la zone du zonage sismique réglementaire où il est construit. Les études de Douglas et al. (2013) et Ulrich et al. (2013) semblent indiquer que les bâtiments dimensionnés selon la réglementation actuelle tendront en effet vers une homogénéisation du risque, surtout d'effondrement. En revanche ces travaux montrent qu'en termes de probabilité d'atteindre la limite d'élasticité, il existe une différence entre les zones d'aléa.

L'hypothèse d'une probabilité d'effondrement homogène parmi tous les bâtiments récents, qui serait vraie dans une situation idéale d'application des règles constructives, peut devenir trop favorable vis-à-vis des constructions récentes en zone de sismicité modérée ou moyenne. En effet, lors de l'application de la méthode de l'OFEG dans les lycées des Pyrénées-Orientales (Monfort et al. 2012), il a été observé que les bâtiments récents tendaient à apparaître non prioritaires quelle que soit leur vulnérabilité. Cette hypothèse peut donc entraîner la sous-estimation de la vulnérabilité d'un certain nombre de bâtiments.

On pourrait envisager d'ignorer cet aspect concernant l'aléa régional et de supposer que le niveau réglementaire d'aléa soit considéré implicitement : ce qui revient aussi à ne pas s'intéresser aux inventaires sismiques des bâtiments en zone de sismicité très faible. En effet, si tout un parc bâti est examiné selon le même niveau d'aléa régional, les points discriminants pour un classement de priorités seront : la vulnérabilité, la prise en compte d'un niveau de conception parasismique, l'aléa local et l'importance (en personnes et en valeur économique) du bâtiment. Ce sont d'ailleurs ces aspects qui rendent originale la méthode de l'OFEG. Mais ces indicateurs risquent de trop se diluer lorsque tout est pondéré en fonction de la zone d'aléa et de l'âge de construction. D'un autre côté, au niveau d'un département (échelle typique pour mener ce genre d'inventaire), il peut y avoir coïncidence de plusieurs zones de sismicité (cas de la Haute-Garonne ou des Bouches-du-Rhône qui contiennent les 4 zones de sismicité). Par conséquent, nous confirmons que le critère d'aléa réglementaire (ou d'aléa régional) doit être pris en compte d'une manière ou d'une autre, dans une méthode de hiérarchisation.

Adaptation du critère aléa régional – probabilité d'effondrement pour la Métropole

A la différence de la méthodologie proposée par l'OFEG où l'application du niveau de conception parasismique et du niveau d'aléa régional sont groupés dans le même tableau (renvoi Tableau 2), nous proposons dans notre approche de découpler ces deux critères. Typiquement en France l'attribution d'un niveau de conception parasismique lors de la construction d'un bâtiment dépendra de l'évolution des zonages sismiques avec le temps (avec des territoires/communes ayant été surclassées ou déclassées selon l'évolution des zonages). Le zonage réglementaire actuel est considéré comme « la référence nationale sur l'évènement sismique plausible avec une période de retour de 475 ans pour chaque commune du territoire ». Pour bien se rendre compte des variations entre les différentes générations de cartes de zonage sismique en France, l'annexe II présente les cartes correspondantes aux règles PS69, PS92 et celle du zonage actuel.

Ainsi pour l'adaptation en France de la méthode OFEG, nous proposons de pénaliser les bâtiments sans conception parasismique d'un facteur 10 par rapport aux constructions ayant respecté la réglementation parasismique en vigueur (Tableau 17). Ce facteur n'est pas vraiment associé à une probabilité d'effondrement, il a été choisi arbitrairement et calé en fonction des situations qui nous semblent prioritaires et non prioritaires et de la discussion décrite ci-dessous. Il est important de noter que les bâtiments pour lesquels l'application des PS92 est présumée ont néanmoins été pénalisés dans l'analyse, car lors de tests de sensibilité il a été observé que pour certains bâtiments cette hypothèse était trop favorable. Une alternative pourrait être de faire la différence entre un bâtiment ayant des garanties de respect des normes PS92 (facteur 1) et celui dont l'application est uniquement présumée (facteur 2). Les résultats montrés par la suite ne considèrent pas cette distinction, c'est-à-dire que l'application des PS92 reste réputée dans tous les cas (facteur 2).

Tableau 17 : facteur fonction du niveau de conception parasismique d'un bâtiment

Niveau de conception parasismique	Facteur	Alternative
Sans conception parasismique	10	10
Niveau faible-moyen de conception parasismique (PS69 ou PS69 addenda 82)	5	5
Application des PS92 réputée et/ou avérée	2	Réputée 2 Avérée 1

La présomption d'application des règles est directement liée à l'année de construction et de conception du projet. Il faut néanmoins tenir compte des décalages qu'il peut y avoir entre l'année associée aux documents techniques des règles et l'année d'entrée en vigueur des textes réglementaires qui les rendent obligatoires. Par exemple, les règles PS92 ne doivent pas se rapporter à l'année 1992, mais aux dates d'entrée en

vigueur des règles définies par l'arrêté du 29 mai 1997, applicables sur la base du zonage sismique défini dans le décret n°91-461 du 14 mai 1991 (cf. annexe 5).

L'adaptation proposée du critère d'aléa régional est de réduire les résultats issus du produit (Somme facteurs vulnérabilité * facteur type de sol * niveau conception parasismique) par un facteur tenant compte de l'aléa régional et implicitement de la probabilité associée de subir des dommages en fonction du niveau d'intensité attendu pour chaque zone.

L'hypothèse de base est qu'un bâtiment quelconque en zone de sismicité moyenne a une probabilité 100 fois plus grande de subir des dommages graves (effondrement total ou partiel) qu'un bâtiment en zone de sismicité très faible. Cette valeur a été inspirée de la discussion du sous-chapitre précédent (Tableau 15) et elle est également cohérente avec l'ordre de grandeur des résultats/travaux du GT QERIR de l'AFPS pour un bâtiment avec une vulnérabilité moyenne (Tableau 16). Les autres valeurs intermédiaires sont tirées des rapports de probabilités obtenus dans le Tableau 15.

Tableau 18 : facteur réducteur en fonction des zones de sismicité françaises.

Zones de sismicité zonage 2011	Facteur réducteur
Très faible	0.01
Faible	0.05
Modérée	0.25
Moyenne	1

4.2. DISCUSSION SUR LES CRITERES DE VULNERABILITE PHYSIQUE DES BATIMENTS

L'ensemble de paramètres de la check-list de l'OFEG décrivant la vulnérabilité « intrinsèque » du bâtiment est décrit dans le sous-chapitre 2.3.

Les critères de l'OFEG semblent assez bien adaptés aux bâtiments en béton armé et aussi à ceux en acier, bien que beaucoup plus rares. Ils pénalisent des situations comme les transparences et les asymétries ou les discontinuités du contreventement par rapport à des dispositions régulières et cela a tout son sens. Les contreventements en murs armés sont considérés moins vulnérables que ceux en portiques. Les données demandées en entrée de la check-list constituent des critères « visibles » de la vulnérabilité d'un bâtiment.

En revanche, comme déjà évoqué par Brignola et al. (2012), et comme montré lors de l'étude préliminaire faite dans les Pyrénées-Orientales (Monfort et al. 2012), ces

critères sur la vulnérabilité semblent moins adaptés au cas des constructions en maçonnerie. La méthode originale de l'OFEG ne considère le type de maçonnerie que dans un seul critère et d'une manière relativement vague quant à sa définition (la ductilité, WD), alors que les principales classifications typologiques des bâtiments vis-à-vis du risque sismique (par exemple celles de l'EMS98) font des distinctions spécifiques entre la maçonnerie à l'ancienne (en moellons, en pierres tout venant) et la maçonnerie moderne, en intégrant aussi le type de planchers (rigides ou pas) et l'existence ou non de chaînage. L'ajout d'un critère réducteur ou amplificateur du résultat en fonction de l'état de préservation du bâtiment semble aussi très pertinent. Les propositions de Brignola et al. (2012) apportent donc plus de précisions et s'adaptent à un bâtiment typique/fréquemment rencontré en Europe et en France métropolitaine.

Un dernier point non évoqué dans la méthode originale, ni dans les travaux de Brignola et al. (2012), et qui ponctuellement peut être important surtout en zone de sismicité modérée, concerne les éléments non structuraux dangereux (cheminées, corniches, auvents), la présence ou non de joints parasismiques et les effets induits par les bâtiments environnants (entrechoquements). Nous proposons d'intégrer tous ces facteurs aggravants sous un même critère « irrégularité », qui à l'origine incluait uniquement les irrégularités en plan (cf. sous-chapitre 2.3.5).

En résumé, les apports sur les critères de vulnérabilité portent plus sur des précisions au niveau de certains aspects constructifs que sur l'ajout de nouveaux critères. Cette dernière possibilité d'ajouter beaucoup plus de paramètres alourdirait significativement la mise en place de ce type d'inventaire.

Les critères finalement retenus et leurs explications sont présentés dans le chapitre 5.2.

4.3. DISCUSSION SUR LES FACTEURS D'ALEA LOCAL

L'aléa local comprend les effets de site dus à la lithologie et aux caractéristiques géotechniques des sols (amplification du mouvement sismique), les effets de site topographiques et les effets induits (comme les mouvements terrain et la liquéfaction).

Même si les solutions de renforcement ne sont pas tout à fait les mêmes pour protéger un bâtiment exposé aux phénomènes de liquéfaction ou présentant un défaut de contreventement de sa structure, à ce stade de l'inventaire il n'est pas possible de tenir compte de ces différences. Cependant le critère d'aléa local doit faire partie de l'analyse. Le principe est le suivant : pour une même vulnérabilité physique, un bâtiment sera considéré plus prioritaire s'il est situé sur une zone à effet de site lithologique ou topographique. Autrement dit, le risque d'un bâtiment est incrémenté s'il est exposé à un effet de site.

La méthode originale de l'OFEG contient déjà une classification des sols selon le code suisse. Pour le cas français, il est proposé de l'adapter aux classes de sol selon la réglementation française, c'est-à-dire la classification de sols EC8. Il est également

proposé d'inclure dans la classe la plus pénalisante des bâtiments exposés à des effets induits tels que la liquéfaction et les mouvements de terrain.

Même si en France il n'existe pas de cartographie à l'échelle nationale de l'effet de site topographique, il semble pertinent d'incorporer ce critère afin de pénaliser des constructions localisées en bordure de fortes pentes ; ce critère devra être évalué qualitativement sur la base d'un jugement d'expert.

4.4. DISCUSSION SUR L'IMPORTANCE D'UN BATIMENT

Dans la méthode de l'OFEG, l'importance relative d'un bâtiment est appréhendée à partir de la valeur assurée, de la fréquentation des personnes et de l'importance systémique ou sociétale du bâtiment, par le moyen du facteur AZPS. Cette manière de quantifier l'importance n'étant pas intrinsèque au cas suisse, il semble pertinent de la considérer également en France. D'autant plus que ce facteur AZPS est l'une des plus fortes originalités de la méthode.

La fréquentation en nombre et en heures d'un bâtiment doit rester invariable dans l'analyse.

L'importance d'un bâtiment pour la société est considérée par le biais des catégories d'importance définies dans la réglementation parasismique française. Cette classification considère quatre catégories d'importance : I, II, III et IV (Arrêté du 20-10-2010), qui est conservée dans notre analyse avec néanmoins le regroupement des catégories d'importance I et II en une seule.

La valeur assurée semble un critère pertinent/intéressant pour intégrer la valeur économique du bien dans l'analyse, mais elle est assez difficile à connaître. Il est proposé de transformer la donnée « valeur assurée » en un paramètre proportionnel à la « SHON construite » (Surface Hors Œuvre Nette) ou la « SHOB » (Surface Hors Œuvre Brute) (cf. 5.1.2). Pour des bâtiments standards, la valeur assurée est partiellement corrélée à la surface. Par conséquent l'importance patrimoniale ne sera pas prise en compte.

4.5. TESTS DE SENSIBILITE

4.5.1. Influence de la zone de sismicité et de la conception parasismique sur le facteur WZ

L'influence de la zone de sismicité et du niveau de conception parasismique sur le calcul du facteur WZ (probabilité d'effondrement) a été basée sur les hypothèses de calcul suivantes :

- 4 zones de sismicité pour la métropole : très faible, faible, modérée et moyenne, selon l'évaluation proposée dans le tableau 18.

- 3 types de sol : rocher (facteur 1), sol à effet de site (facteur 1.6) et sol à très fort effet de site et/ou effets induits comme la liquéfaction, les mouvements de terrain ou chutes de blocs (facteur 2).
- 3 niveaux de facteurs de vulnérabilité (WBAU) sur un même bâtiment : 2 (peu de facteurs), 5 (nombre moyen de facteurs de vulnérabilité) et 10 (beaucoup de facteurs de vulnérabilité).
- 3 niveaux de conception parasismique : sans application de règles, niveau faible (PS69) et niveau moyen-fort (PS92).

Il faut rappeler que WZ (cf. sous-chapitre 2.3) est le produit de ces 4 facteurs : les zones de sismicité, les types de sol, la vulnérabilité intrinsèque du bâtiment et les niveaux de conception parasismique.

Tableau 19 : valeurs du paramètre WZ, test pour les 4 zones de sismicité, 3 niveaux de conception parasismique, 3 types de sol et 3 niveaux de facteurs de vulnérabilité.

CPS	SOL	Zone très faible 0.01			Zone faible 0.05			Zone modérée 0.25			Zone moyenne 1		
		WB AU =2	WBAU =5	WBAU =10	WBAU =2	WBAU =5	WBAU =10	WBAU =2	WBAU =5	WBAU =10	WBAU =2	WBAU =5	WBAU =10
Pas CPS	1 : R	0.2	0.5	1	1	2.5	5	5	12.5	25	20	50	100
	1.4 : ES	0.32	0.8	1.6	1.6	4	8	8	20	40	32	80	160
	2: MVT	0.4	1	2	2	5	10	10	25	50	40	100	200
PS6 9	1 : R	0.1	0.25	0.5	0.5	1.25	2.5	2.5	6.25	12.5	10	25	50
	1.4 : ES	0.16	0.4	0.8	0.8	2	4	4	10	20	16	40	80
	2: MVT	0.2	0.5	1	1	2.5	5	5	12.5	25	20	50	100
PS9 2	1 : R	0.04	0.1	0.2	0.2	0.5	1	1	2.5	5	4	10	20
	1.4 : ES	0.06 4	0.16	0.32	0.32	0.8	1.6	1.6	4	8	6.4	16	32
	2: MVT	0.08	0.2	0.4	0.4	1	2	2	5	10	8	20	40

En rouge sont indiquées les valeurs du facteur WZ supérieures à 20. La valeur moyenne des valeurs de l'index WZ du Tableau 19 est 16,1. Nous cherchons à définir une valeur seuil à partir de cet index, qui sera utilisée dans la suite de l'analyse pour distinguer les bâtiments présentant un fort risque d'effondrement. Plusieurs tests de cette valeur seuil ont été réalisés et la valeur WZ=20 est finalement retenue ; elle correspond à la valeur strictement supérieure à la moyenne dans le Tableau 19. Ce chiffre n'a pas de correspondance directe avec une valeur physique ou une probabilité. Une valeur beaucoup plus élevée aurait tendance à ne travailler que sur les bâtiments

en zone de sismicité moyenne et au contraire un chiffre plus bas tendrait à classer trop de situations. Finalement ce choix réside/repose sur un avis d'expert entre les différentes situations à trier.

Le choix de ce chiffre/cette valeur seuil ne doit pas être considéré comme définitif. Lors d'une utilisation ultérieure de cette méthode, il sera toujours possible de l'augmenter ou de le diminuer selon les besoins. Ce choix relève aussi d'une décision du maître d'ouvrage.

Il ressort de ce test de sensibilité sur le facteur WZ que :

- les bâtiments en zone de sismicité faible ou très faible sont très difficilement classés en prioritaire ($WZ < 20$)
- les bâtiments sans conception parasismique en zone de sismicité moyenne sont presque systématiquement au-dessus de la valeur seuil, pour toutes les conditions de vulnérabilité et de sol.
- un bâtiment avec de nombreux facteurs de vulnérabilité, conçu selon les règles les plus récentes, peut devenir néanmoins prioritaire en zone de sismicité moyenne. Ce cas a été particulièrement cherché, c'est-à-dire, le respect présumé des règles n'est pas suffisant si le relevé des facteurs de vulnérabilité est très important.
- les bâtiments en zone de sismicité modérée ont un coefficient supérieur à 20 uniquement en cas de :
 - présence de facteurs de vulnérabilité
 - possibilité d'un effet de site
 - absence de conception parasismique ou niveau de conception parasismique faible.

Le classement presque systématiquement prioritaire des bâtiments sans conception parasismique de la zone de sismicité moyenne montre également la limite de l'exercice. Est-il acceptable? Autrement dit, un bâtiment sans conception parasismique en zone de sismicité moyenne doit-il toujours être classé comme prioritaire ?

Sans chercher à ajouter des classes de priorité supplémentaires, il devient compliqué à ce stade de faire un tri simplifié, car à la base la méthode se veut être assez souple pour traiter un large spectre de situations. On peut proposer deux critères pour trier parmi les bâtiments classés en priorité 1 :

- Un critère basé sur la somme des facteurs de vulnérabilité intrinsèque de la structure ($WBAU > 10$), qui permettrait de distinguer les bâtiments avec une conjonction de facteurs de vulnérabilité de ceux situés sur des zones à fort effet de site, en zone de sismicité moyenne. En effet si l'inventaire sismique se situe dans le cadre des actions de réduction de la vulnérabilité, ce critère peut être prépondérant.

- Un critère basé sur le facteur RZPS, qui est finalement basé sur le risque total du bâtiment.

4.5.2. Test sur un spectre large de bâtiments

Afin de voir/tester l'influence des différents paramètres portant sur l'importance des constructions et regroupés sous le facteur AZPS, une série de bâtiments «synthétiques» a été constituée. Ces exemples essaient de couvrir un ensemble large de types de bâtiments pour lesquels un inventaire sismique est envisageable : des ERP divers, des bâtiments administratifs, des bâtiments scolaires mais aussi une maison individuelle. A chacun de ces établissements type, a été assigné « à dire d'expert » une surface, un nombre de personnes, un ratio d'occupation annuel et un coefficient d'importance AIF, qui est lié directement au coefficient d'importance du code sismique (arrêté du 22 octobre 2010). Au total, 14 bâtiments ont été définis ; ils sont listés dans le Tableau 20.

Ainsi nous observons que les bâtiments avec un facteur AZPS le plus élevé sont ceux ayant une grande surface et un taux d'occupation annuel élevé (occupation jour et nuit).

Tableau 20 : principales caractéristiques des bâtiments « type » pris en compte dans l'analyse.

Type usage	SHOB (m ²)	AIF	Personnes	Ratio occu./an	Facteur AZPS
Sanitaires Etab. Scolaire	50	2	1	0.025	0.122
Maison individuelle	120	1	3	0.5	0.29
Ecole rurale	350	2	20	0.2	1.6
Lycée, bâtiment administratif	400	2	20	0.228	1.85
Habitat collectif, 10 log	1200	1	30	0.5	2.9
Gendarmerie rurale	350	5	5	1	4.55
Lycée, petit externat	1000	2	60	0.19	4.63
Hôtel de ville	600	5	40	0.238	8.3
Salle de fêtes	2500	2	400	0.047	9.7

SDIS rural	1500	5	5	1	11.3
Lycée, grand externat	3000	2	250	0.19	16.57
Tour habitat collectif, 100 logements	15000	2	300	0.5	65.2
Lycée, grand externat & internat	6000	2	1000 et 500 internes	0.38	71.2
Hôtel de police en ville	17500	5	50	1	127

La suite de l'exercice a consisté à croiser ces bâtiments « type » du Tableau 20 avec les résultats du Tableau 19, c'est à dire, pour chaque bâtiment « type » nous testons l'effet des différentes situations en termes de vulnérabilité, localisation et niveau de conception parasismique, avec les hypothèses suivantes :

- Le situer successivement dans les 4 zones de sismicité de la Métropole ;
- Le situer successivement sur une zone rocheuse, une zone à effet de site ou une zone à très fort effet de site ou à effet induit ;
- Lui attribuer 3 niveaux de conception parasismique (PS92, PS69, sans conception) ;
- Lui attribuer 3 notes différentes de facteurs de vulnérabilité (WBAU).

Proposition de classement prioritaire des bâtiments

Ces différents tests visent à sélectionner des critères pertinents pour classer les bâtiments par groupes de priorités. A la différence de la méthode originale de l'OFEG avec son classement en 4 groupes, nous proposons d'ajouter une classe supplémentaire qui consiste à trier parmi les bâtiments classés en priorité 1, ceux susceptibles de subir de très grandes pertes.

Rappelons que la valeur seuil de l'indice WZ est fixée à 65 par l'OFEG et que pour l'adaptation proposée ici la valeur seuil de WZ est de 20 car la méthodologie de calcul a varié. Par conséquent, la valeur seuil de l'indice RZPS, qui était fixée à 500 par l'OFEG, a également été revue à la baisse. Un respect des proportions entre ces valeurs telles que définies dans l'OFEG donnerait une valeur de la valeur seuil de RZPS égale à 150. Nous proposons néanmoins de prendre une valeur plus basse, égale à 130. Comme précédemment indiqué lors du choix de la valeur seuil de WZ, les options prises sont certes arbitraires mais elles permettent d'équilibrer un certain

nombre de situations entre elles. Le maître d'ouvrage concerné par un tel inventaire aura toujours le choix de calibrer ces valeurs seuil en fonction de ses besoins.

Cette analyse n'a pas considéré le fait que certaines pratiques constructives sont très corrélées avec l'âge de la construction.

Par rapport à la méthodologie de l'OFEG originale, il est proposé d'ajouter une classe de priorité « 1+ » qui regroupe les bâtiments pour lesquels la valeur de l'indice RZPS est très élevée, supérieure à 1000. En effet, Monfort et al. (2012) proposaient d'ajouter une classe supérieure/supplémentaire pour trier les nombreux cas classés en priorité 1.

Finalement les règles de classification proposées sont :

Priorité 1+ : $RZPS > 1000$

Si $RZPS < 1000$:

Priorité 1 : $RZPS > 130$ et $WZ > 20$

Priorité 2 : $RZPS < 130$ et $WZ > 20$

Priorité 3 : $RZPS > 130$ et $WZ < 20$

Priorité 4 : $RZPS < 130$ et $WZ < 20$

Les résultats obtenus pour les différentes options sont détaillées dans l'annexe I.

La Figure 4 donne un extrait des résultats pour trois bâtiments type : une maison individuelle, une caserne de gendarmerie rurale et un grand hôtel de police en ville.

Usage	Nv CPS	Sol	WBAU 2	WBAU 5	WBAU 10	WBAU 2	WBAU 5	WBAU 10	WBAU 2	WBAU 5	WBAU 10	WBAU 2	WBAU 5	WBAU 10		
			ZS Très Faible	ZS Faible	ZS Modérée	ZS Moyenne										
Maison Individuelle	Sans CPS	R														
		ES														
		MVT														
	PS69	R														
		ES														
		MVT														
	PS92	R														
		ES														
		MVT														
Gendarmerie rurale	Sans CPS	R														
		ES														
		MVT														
	PS69	R														
		ES														
		MVT														
	PS92	R														
		ES														
		MVT														
Grand hôtel de police	Sans CPS	R														
		ES														
		MVT														
	PS69	R														
		ES														
		MVT														
	PS92	R														
		ES														
		MVT														



Figure 4 : exemples de classification en priorités de trois bâtiments « type ». ZS : zone sismicité. CPS : conception parasismique.

L'application des critères ci-dessus sur une série de cas fictifs fait ressortir les tendances suivantes :

- Aucun bâtiment situé en zone de sismicité très faible n'apparait classé en priorité 1. Uniquement les bâtiments les plus importants (hôtel de police, grand externat, grande tour d'habitat collectif) ayant des facteurs de vulnérabilité, sans conception parasismique et sur des zones à effet de site, seraient classés en priorité 3.
- Pour les zones de sismicité faible, seraient classés en priorité 3 uniquement les bâtiments importants (par exemple grand externat, hôtel de police). A la différence de la zone de sismicité très faible, ils seraient classés en groupe 3 pour un plus grand nombre de situations. Par ailleurs, des bâtiments très importants en taille et en effectif peuvent déjà apparaître en P1+ (RZPS>1000).
- Pour les zones de sismicité modérée, un certain nombre de cas seraient classés en priorité 1. Ce sont toujours des cas avec une présence de facteurs de vulnérabilité, un faible niveau de conception parasismique et une importance moyenne-forte de l'immeuble. Si l'importance est vraiment très forte, ces

bâtiments sont classés en P1+. Un bâtiment d'importance modérée comme une école rurale serait classé en priorité 2 pour les cas où le bâtiment présente des facteurs de vulnérabilité et une conception selon les règles PS92. Les bâtiments très importants (grand externat, grand hôtel de police) de construction récente sont classés en priorité 3 s'ils présentent des facteurs de vulnérabilité.

- Pour les zones de sismicité moyenne, le nombre de situations classées en priorité 1+, 1, 2 et 3 devient nettement plus grand. Les bâtiments importants (grand externat, hôtel de police) sont classés soit en priorité 1+, 1 ou 3. Ils sont classés en priorité 4 uniquement s'ils sont de construction récente, sans facteurs de vulnérabilité et situés sur une zone sans effet de site. Les bâtiments moins importants (maison individuelle, sanitaires d'un collège) sont classés en priorité 2 lorsqu'ils ont été conçus avant les règles PS92. Un bâtiment d'importance modérée, comme une école rurale ou un petit immeuble d'habitat collectif, sont classés en priorité 1 lorsqu'ils ont été construits avant l'application des règles PS92 et lorsqu'ils présentent des facteurs de vulnérabilité.
- Le critère « conception parasismique » qui est lié à l'année de construction du bâtiment reste un critère très fort dans le classement. Ainsi par exemple dans la zone de sismicité « moyenne », les bâtiments sans conception parasismique sont, dans ce test sur un parc synthétique, presque toujours classés en priorité 2 ou 1 selon leur importance et leur vulnérabilité. Ce seraient uniquement les bâtiments qui remplissent les deux conditions suivantes, sans effet de site et faible nombre de facteurs de vulnérabilité, qui ne seraient pas classés comme prioritaires.
- En général, les bâtiments en 1+ ou 1 semblent correspondre à des situations à risque et avec des fortes pertes potentielles conséquentes. La priorité 2 correspond à des édifices avec un niveau de risque comparable aux bâtiments du groupe 1, mais pour lesquels l'enjeu ou l'importance sont limités. Un bâtiment avec les mêmes caractéristiques (vulnérable, en zone de sismicité moyenne), utilisé comme maison individuelle serait classé en priorité 2 et s'il est utilisé comme caserne de gendarmerie serait classé en priorité 1.
- La priorité 3 semble couvrir un nombre de cas limités et correspond aux bâtiments pour lesquels l'enjeu et la perte occasionnée serait très grande, même pour des situations de risque faible.

Malgré certaines limites qui peuvent être identifiées pour ce parc bâti « standard » et non réel, ce test de sensibilité montre que la méthodologie a la capacité de hiérarchiser les cas critiques pour lesquels il existe a priori une priorité dans le traitement et les actions à suivre. Au vu de cet ensemble de tests, il paraît clair que la méthode originale a besoin d'une adaptation au cas franco-métropolitain.

Le chapitre suivant expose les critères proposés pour le cas métropolitain.

Jusqu'ici, la somme des facteurs de la check-list de vulnérabilité est indépendante de l'application ou non d'un code parasismique. En réalité ces deux facteurs sont corrélés. Certaines pratiques constructives qui peuvent induire des conjonctions importantes de facteurs de vulnérabilité (facteur WBAU) sont très corrélées à l'année de conception du bâtiment. Le cas le plus typique de cette situation est l'utilisation de la maçonnerie en pierre qui date en général d'avant-guerre.

5. Adaptation proposée en France

Le chapitre précédent a discuté les différents paramètres à prendre en compte suite aux tests de sensibilité. Ce chapitre présente la méthodologie finalement retenue pour le cas de la métropole et la façon d'évaluer les paramètres.

5.1. AZPS : INDICATEUR DES DOMMAGES DIRECTS

Comme dans l'étape 1 d'inventaire sismique des bâtiments de l'OFEG, l'indicateur des dommages directs de l'immeuble se calcule d'après la formule suivante :

$$AZPS = (ADS + ADP) \times AIF$$

5.1.1. Facteur AIF

Ce facteur considère l'importance telle que définie selon les règles parasismiques françaises.

Tableau 21 : codification paramètre AIF et équivalent au contexte français.

AIF	Catégorie d'importance / code français
1	I et II
2	III
5	IV

Le facteur AIF peut être adapté selon les critères particuliers des maîtres d'ouvrage. Par exemple parmi les bâtiments de catégorie d'importance IV, une distinction peut être faite entre ceux qui sont vraiment indispensables pour la gestion de la crise (AIF=5) et ceux qui ne le sont pas (AIF=4).

5.1.2. Facteur ADS

A l'origine, ADS est un coefficient décrivant les dégâts matériels directs rapportés à la valeur d'assurance du bâtiment en millions de francs suisses. Etant donnée la difficulté de connaître la valeur assurée des biens, nous proposons une estimation du prix du bâtiment en fonction du prix au m² de SHON neuve. Une valeur de 2000 euros/m² SHON est proposée, qui est une valeur supérieure à la moyenne nationale des prix de la construction neuve (valeur moyenne en Métropole égale à 1189€/m² pour l'habitat individuel selon les données EPTB 2012) et qui intègre donc globalement le coût des équipements et des contenus. En fonction de l'usage de l'immeuble, l'enquêteur peut toujours proposer des prix au mètre carré différents, comme ceux fournis par exemple par Nicol (2013). Dans notre approche, nous proposons de garder un prix unique et de

faire la différence uniquement par la surface construite. La conversion entre euros et francs suisses a été fixée à 1 euro = 0.783 francs suisses.

Finalement le critère ADS s'évalue comme suit :

$$ADS = SHON \text{ (en m}^2\text{)} * 2000 * 0.783 / 1000000$$

L'évaluation de ce paramètre par une surface et un prix moyen au m² de SHON n'empêche pas une évaluation du critère fidèle à la méthode originale, en intégrant la valeur économique du bâtiment et de son contenu, à condition de faire la conversion entre euros et francs suisses.

5.1.3. Facteur ADP

ADP est l'indicateur relatif aux dommages corporels directs exprimé comme le nombre d'occupants moyen annuel du bâtiment multiplié par 0,1. Il s'évalue de la même manière que dans la méthode originale de l'OFEG (cf. sous-chapitre 2.2.)

5.2. WZ : PROBABILITE D'EFFONDREMENT DE L'OUVRAGE

La probabilité d'effondrement exprime la probabilité qu'un bâtiment s'effondre sous l'effet d'un séisme d'intensité donnée.

L'indicateur de la probabilité d'effondrement **WZ** regroupe toutes les caractéristiques décrites ci-dessus. Il résulte de la formule suivante, qui prend en compte les indicateurs calculés à propos de la structure porteuse :

$$WZ = WPS \times WY \times WT \times WB \times WS \times (1 + WG + WA + WW + WK + WD + WF)$$

Conception parasismique Aléa Topo Sol WBAU=Vulnérabilité intrinsèque du bâtiment

Les différents paramètres intégrés dans l'indicateur WZ sont présentés ci-après :

5.2.1. Paramètre WPS, conception parasismique

Le paramètre **WPS** se rapporte au niveau de conception parasismique de l'ouvrage.

Implicitement ce paramètre intègre l'année de construction et la localisation par rapport aux anciens/différents zonages sismiques. Comme indiqué précédemment, il faut garder un laps de temps (souvent quelques années) entre l'année associée à l'édition des règles techniques et la date d'entrée en vigueur de ces règles mentionnée par le texte réglementaire qui les rend obligatoires (cf. 4.1.2).

Le paramètre **WPS** s'évalue selon le Tableau 17.

5.2.2. Paramètre WY, aléa

Ce paramètre prend en compte la localisation du bâtiment par rapport au zonage sismique de référence, défini par l'article D.563-8-1 du code de l'environnement, applicable à partir du 1^{er} mai 2011.

Le paramètre **WY** s'évalue selon le Tableau 18.

5.2.3. Paramètre WT, effet de site topographique

Le paramètre **WT** évalue les effets de site topographiques, selon le Tableau 22.

Tableau 22 : évaluation du paramètre *WT*, effet de site topographique.

Description	WT
Pas d'effet de site topographique	1
Zone à possible effet de site topographique (en haut d'une colline, zone à forte pente)	1.4

5.2.4. Paramètre WB, effet de site lithologique

Brignola et al. (2012) proposaient une adaptation de ce critère en donnant directement les coefficients d'amplification selon les EC8. Mais dans l'esprit original de la méthode proposée par l'OFEG, ce critère « sol » va un peu plus loin que les simples classes de sols selon les EC8, car il intègre aussi les risques de glissement de terrain ou de liquéfaction.

Si sur le secteur d'étude il existe une cartographie des sols selon les critères de l'Eurocode8 (PPR sismique, microzonage), les facteurs d'amplification des EC8 peuvent être pris/considérés.

Sinon, le Tableau 23 montre une simplification de l'évaluation du critère **WB** qui s'approche de l'idée originale de l'OFEG, en pénalisant les effets induits et en ne pénalisant pas l'effet de site faible de la classe de sols EC8 B. Les valeurs proposées dans ce tableau restent en même temps proche des coefficients d'amplification par effet de site lithologique donnés par la réglementation.

Il faut noter ici que la liquéfaction des sols est un phénomène qui se produit à partir d'un certain seuil d'accélération au sol, et la réglementation française ne prévoit sa prise en compte que pour les zones de sismicité modérée ou supérieures, c'est-à-dire que dans une zone de sismicité faible un sol ne pourra pas être classé « sol à risque de liquéfaction ».

Tableau 23 : évaluation simplifiée du paramètre WB, effet de site lithologique.

Description	WS
Rocher ou faible effet de site, classes de sol A et B	1
Effet de site, classe de sol C	1.6
Fort effet de site, classes de sol D et E ou ; Zone à risque de mouvement/glisement induit ou liquéfaction ou ; Bâtiment avec problème géotechnique avéré	2

5.2.5. Paramètre WS, état de conservation

Brignola et al. (2012) proposent un critère « état de conservation ». Il est en effet pertinent de le prendre en compte (Tableau 24) car un mauvais état peut accroître la vulnérabilité de l'ouvrage. La méthode originale de l'OFEG ne le considérait pas.

Même s'il s'agit d'un critère conçu au départ uniquement pour les structures en maçonnerie, il a été décidé de le garder aussi pour celles en béton armé.

Tableau 24 : évaluation du critère WS, état de conservation.

Etat de conservation	WS
Bon	0.8
Etat de conservation moyen. Présence de dégradations dues à l'usage du bâtiment, présence de fissures fines	0.9
Etat de conservation médiocre, présence de fissures moyennes. Eléments non structuraux présentant des risques	1
Etat de conservation vétuste	1.2

5.2.6. Paramètre WG, contreventement en plan

L'évaluation du critère WG, contreventement en plan, intègre les modifications conseillées par Brignola et al. (2012) pour les structures en maçonnerie. Pour évaluer ce paramètre, une distinction est proposée entre les bâtiments en maçonnerie et les autres systèmes porteurs (Tableau 25).

Tableau 25 : coefficients du paramètre WG (contreventement en plan).

Type de système porteur	Contreventement en plan	WG
Structure en béton armé, métallique ou bois	Approprié (contreventé dans les 2 directions)	0
	Inapproprié (asymétrique, absence de contreventement dans une direction)	2
	Aucun (pas de voiles de contreventement)	5
Maçonnerie, plancher rigide, éléments horizontaux bien connectés	Approprié (contreventé dans les 2 directions)	0
	Favorable dans une seule direction	1
	Défavorable	2
	Absence de voiles de contreventement dans les 2 directions	5
Maçonnerie, plancher fragile, éléments horizontaux peu/mal connectés	Approprié (contreventé dans les 2 directions)	1
	Favorable dans une seule direction	2
	Défavorable	3
	Absence de voiles de contreventement dans les 2 directions	5

5.2.7. Paramètre WA, contreventement en élévation

Le paramètre **WA** représente le contreventement en élévation. Il est proposé de l'évaluer de la même manière que dans la méthode originale de l'OFEG, sans faire la distinction entre types de systèmes porteurs. Les dispositions/agencements les plus défavorables sont les niveaux transparents ou souples.

Tableau 26 : coefficients du paramètre WA (contreventement en élévation).

Contreventement en élévation	WA
Voiles de contreventement continues en vertical	0
Discontinu (voiles de contreventement déplaces d'un étage à l'autre)	2
Transparence ou niveau souple	5

5.2.8. Paramètre WK, irrégularités

Le paramètre **WK** intègre les irrégularités de forme qui peuvent induire de la torsion. La méthode originale fait référence à un critère basique de forme en plan. On propose une extension de ce critère pour toutes les situations de bâtiments sans joints

parasismiques avec les bâtiments voisins et pour les bâtiments qui présentent des éléments architecturaux estimés dangereux (cas de balcons, auvents, cheminées, etc.).

Tableau 27 : coefficients du paramètre WK (forme).

Forme	WK
Régulière	0
Irrégulière, angles rentrants, différences d'hauteur. Balcons et/ou auvents dangereux Absence de joints	1

5.2.9. Paramètre WW, nature du contreventement

Le paramètre WW se réfère à la nature du contreventement. Il s'évalue selon les mêmes critères que la proposition originale de l'OFEG (cf. sous-chapitre 2.3.6). Il faut signaler que les murs ne sont pas distingués par types (béton armé, maçonnerie).

Tableau 28 : coefficients du paramètre WW (nature du contreventement)

Nature du contreventement	WW
Noyau, murs, voiles	0
Cadres en acier	1
Treillis	2
Portiques (béton armé ou acier) avec remplissage en maçonnerie	2 à 4. 2 si sans défauts, 4 si poteaux courts/bridés
Système mixte	3

5.2.10. Paramètre WD, ductilité

WD représente la ductilité globale du bâtiment.

Pour les bâtiments en maçonnerie, il est proposé de moduler ce paramètre avec le nombre de niveaux du bâtiment « n ». Une distinction est aussi faite entre une maçonnerie de mauvaise qualité d'un point de vue sismique ou à l'ancienne, et une maçonnerie de qualité.

Tableau 29 : coefficients du paramètre WD (ductilité).

Ductilité	WD
Béton armé, acier, composite	0
Préfabriqué, bois	3
Maçonnerie de bonne qualité, planchers rigides	$2.5+n/2$
Maçonnerie de mauvaise qualité, à l'ancienne, planchers fragiles	$5+n/2$

5.2.11. Paramètre WF, fondation

Le paramètre WF caractérise le type de fondations.

En référence aux propositions originales de l'OFEG et comme conseillé par Brignola et al. (2012), nous avons ajouté une classe intermédiaire pour les fondations linéaires et la présence de longrines, qui est un type de fondation plus défavorable que les fondations surfaciques mais moins vulnérable que les fondations isolées. Par rapport au tableau original de l'OFEG (Tableau 9), nous ajoutons aussi un type « fondations profondes ».

Tableau 30 : coefficients du paramètre WF (fondation).

Fondations	WF
Sur toute la surface, fondations profondes	0
Fondations linaires, présence de longrines	0.5
Fondations isolées, sur un terrain hétérogène, à profondeur variable, semelles filantes non reliées	1

5.3. LES CRITERES DE CLASSIFICATION

La méthode originale de l'OFEG propose quatre groupes de priorité, calculés en fonction des critères WZ (probabilité d'effondrement) et RZPS, qui résulte du produit des facteurs WZ et AZPS (pertes potentielles).

Etant donné que l'adaptation proposée pour le cas franco-métropolitain a induit des changements de valeurs de certains paramètres, les valeurs seuil suisses ne sont plus utilisables. De plus, il est proposé d'ajouter un groupe de priorité 1+ pour les bâtiments pour lesquels la conjonction de l'importance de l'enjeu et de la vulnérabilité est très importante. Ainsi la classification en priorités est la suivante :

- **Priorité 1+** pour tous les bâtiments avec un coefficient RZPS > 1000

Pour les bâtiments avec un coefficient $RZPS < 1000$

- **Priorité 1** : $WZ > 20$ et $RZPS > 130$
- **Priorité 2** : $WZ > 20$ et $RZPS < 130$
- **Priorité 3** : $WZ < 20$ et $RZPS > 130$
- **Priorité 4** : $WZ < 20$ et $RZPS < 130$

La Figure 5 montre graphiquement comment se répartissent les cinq priorités en fonction de ces valeurs.

L'indice WZ est volontairement stoppé à 250 pour une question de restitution graphique, car toutes les valeurs sont généralement inférieures à ce chiffre. Cependant d'après la méthode, l'indice WZ peut parfois prendre des valeurs supérieures. Pour les bâtiments en béton armé, la pire situation possible (vulnérabilité intrinsèque maximale, effets de site, zone de sismicité moyenne) donne un indice WZ égal à 571. Pour les bâtiments en maçonnerie, ce chiffre peut être encore plus élevé car il existe une dépendance avec le nombre d'étages.

La valeur de l'indice $AZPS$ n'est pas bornée (surface construite, fréquentation des immeubles).

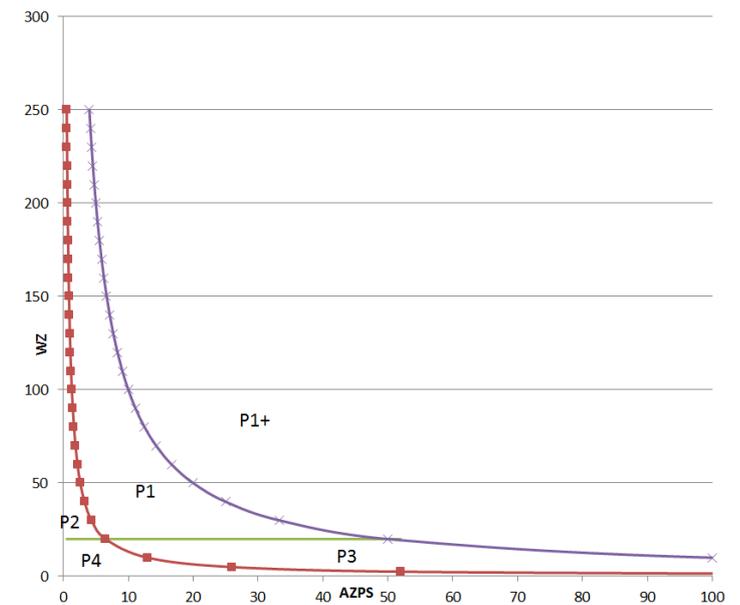


Figure 5 : représentation des limites pour la classification en priorités selon le critère $AZPS$, WZ et le produit $RZPS$.

6. Application sur un parc bâti existant

La méthodologie décrite ci-dessus et les adaptations successives et/ou modifications testées sur quelques cas fictifs ont aussi été appliquées sur un parc bâti réel. Cette application se base sur les diagnostics réalisés antérieurement par le BRGM ou par d'autres organismes.

Cet ensemble de bâtiments peut se diviser en 4 parcs bâtis, appartenant à 4 régions différentes de la métropole. L'ensemble de ces bâtiments appartient aux zones de sismicité 3 et 4 selon le zonage sismique réglementaire de la France en vigueur, c'est à dire, aux zones de sismicité modérée et moyenne. Pour l'exercice il aurait été intéressant d'inclure des bâtiments en zone de sismicité 1 et 2, mais les études de pré-diagnostic visuel de vulnérabilité sismique de bâtiments disponibles se concentrent (en toute logique) dans les zones de sismicité au moins modérée.

Afin d'inclure au moins deux exemples réels de bâtiments en zone de sismicité très faible, deux bâtiments de catégorie d'importance III du site du BRGM à Orléans (zone de sismicité 1, très faible) ont été ajoutés à l'analyse.

Les parcs bâtis pris en compte sont :

- Les lycées publics du département des Pyrénées-Orientales. Ce parc bâti a fait l'objet d'un pré-diagnostic de vulnérabilité sismique par le BRGM dans le cadre du projet Interreg SISPYR (Monfort et al. 2012). Au total ce sont 128 bâtiments.
- Quelques bâtiments de catégorie d'importance III et IV des cantons de Luchon et de Saint-Béat dans le département de la Haute Garonne, visités par le BRGM dans le cadre du projet Interreg SISPYR. Au total ce sont 17 bâtiments.
- Un parc bâti de bâtiments de catégorie d'importance IV dans le département des Hautes-Pyrénées, pour lesquels un pré-diagnostic de vulnérabilité a été fait par le CSTB (Taillefer et al. 2012). Au total 73 bâtiments ont été pris en compte dans cette étude.
- Quelques bâtiments communaux de catégorie d'importance II, III et IV du département des Alpes de Haute Provence et du Vaucluse, visités par le BRGM dans le cadre de la préparation d'un exercice de crise RICHTER-Cadarache (Rivet et al. 2012). Au total ce sont 14 bâtiments.
- Les bâtiments de la cantine-restaurant et la tour principale du site du BRGM à Orléans (Loiret), tous les deux classés en catégorie d'importance III d'après les règles sismiques actuelles.

Ce parc bâti réel comprend les principaux types de bâtiments pour lesquels un inventaire sismique de première étape est intéressant à mener, c'est à dire, des bâtiments publics de différents usages (scolaire, sanitaire, d'utilité pour la gestion de la crise, administratif) et des ERP de différentes classes.

6.1. INFORMATIONS SUR L'IMPORTANCE ET LA FREQUENTATION DES BATIMENTS

6.1.1. Informations sur l'occupation des bâtiments

La fréquentation moyenne du bâtiment tout le long de l'année détermine le paramètre AIF. Il est pourtant nécessaire d'estimer pour chaque bâtiment l'ordre de grandeur de l'effectif et les horaires d'occupation de l'immeuble.

La visite de diagnostic sur site permet souvent de récupérer un certain type de données. Ainsi les bâtiments ERP sont déclarés pour accueillir un nombre maximal de personnes. Ce chiffre, qui conditionne toute une série de normes de sécurité du bâtiment, ne représente pas forcément l'occupation moyenne du bâtiment tout au long de l'année. Un autre chiffre qui est récupéré facilement auprès des gestionnaires est l'effectif total de l'établissement.

Nous présentons ci-dessous les principales hypothèses considérées dans le présent travail pour calculer ce critère AIF, basées sur les informations collectées sur place. Il faut savoir que ces chiffres sont estimatifs, c'est-à-dire qu'ils ne représentent pas les conditions réelles de chaque bâtiment. En cas d'hésitation, il est proposé de toujours choisir l'hypothèse la plus pénalisante, c'est à dire, celle qui donne un coefficient AIF le plus élevé.

Pour les établissements scolaires, le nombre d'occupants de chaque bâtiment est estimé en fonction du nombre total d'élèves de l'établissement et du nombre de salles de classe par bâtiment. Pour les écoles maternelles et primaires, l'occupation est supposée être de 5j par semaine et 36 semaines par année. Pour les lycées et lycées professionnels, qui accueillent souvent pendant l'été des stagiaires externes à l'établissement, l'occupation est supposée être de 42 semaines par année et 6h par jour. Pour les bâtiments utilisés comme internat, est uniquement considéré le nombre d'internes déclaré par l'établissement et non pas le nombre de lits/chambres disponibles. Lors de l'application/exercice, nous avons pu observer que certains bâtiments destinés à l'internat en zone rurale ont une capacité d'accueil beaucoup plus grande que le nombre d'internes. Dans ce cas particulier, l'inventaire reflète d'une certaine manière l'exode rural et les changements de mode de vie des 40-50 dernières années.

Pour les bâtiments utilisés comme logements, une moyenne de 2,5 personnes par logement est considéré présente dans le logement 12 heures par jour toute la semaine et toute l'année (moyenne nationale selon les données INSEE 2009 2,4 personnes par logement en résidence principale). On ne distinguera pas entre la semaine ouvrée et le weekend.

Pour les bâtiments à usage de réfectoire ou de cantine, l'occupation journalière est supposée être de 2h, par la moitié uniquement de l'effectif de l'établissement.

Pour les bâtiments type administration-bureaux de casernes de gendarmerie, police ou centres de secours, une occupation par un effectif de 5 personnes a minima est

supposée tous les jours de toute l'année. Si l'effectif de ces établissements est très important, nous considérons qu'un tiers de l'effectif (par un comptage type trois-huit) est toujours présent sur place.

Pour les bâtiments hospitaliers, un taux d'occupation maximal est considéré toute l'année en prenant en compte a minima le nombre de lits par bâtiment.

Des bâtiments administratifs ou de bureaux (par exemple mairie, bâtiment administratif d'un lycée) sont considérés ouverts 5j/7, 8h par jour et toute l'année.

Les bâtiments dont l'occupation est la plus difficile à estimer sont ceux avec une forte capacité d'accueil et une fréquentation très irrégulière dans le temps, c'est à dire, des salles polyvalentes, auditoriums, gymnases, salles de fêtes, etc. En général, ces bâtiments accueillent des activités plus ou moins journalières à faible fréquentation et connaissent des pics de fréquentation jusqu'à atteindre la capacité maximale à des moments précis de l'année. Ici il est proposé de faire deux calculs du coefficient AIF, l'un qui considère une occupation journalière par un faible effectif en cohérence avec les activités qui se déroulent toutes les semaines, et l'autre qui suppose atteinte la capacité maximale du bâtiment à certains moments de l'année (exemple pour une salle polyvalente, célébration de festivités durant 3 heures et 15 samedis dans l'année).

Dans le parc bâti considéré, se trouvent aussi des bâtiments où la présence humaine est très sporadique, mais qui stockent ou hébergent du matériel important pour les établissements et pour certains pour la gestion de la crise. Par exemple, les garages des gendarmeries et des centres de secours sont considérés occupés toute la journée et toute l'année par 2 personnes a minima. En revanche, les garages ou ateliers des services techniques des mairies ou des hôpitaux ne sont considérés occupés que durant les horaires d'ouverture.

6.1.2. Information sur les catégories d'importance des ouvrages

En France métropolitaine, seuls quelques départements semblent avoir démarré une action d'inventaire de leurs bâtiments de catégorie d'importance III et IV, mais dans tous les cas ce type d'inventaire n'est pas exhaustif. Ces inventaires sont d'ailleurs souvent limités et circonscrits à un seul propriétaire du parc bâti. En plus, et à la différence de la classification des ERP en cinq catégories, qui est en général connue par les maîtres d'ouvrage, le classement/l'appartenance à une zone sismique reste peu connue par les maîtres d'ouvrage et demande une consultation des calculs faits lors de la conception du bâtiment, pour vérifier si le bâtiment a été conçu selon les règles parasismiques de l'époque.

Pour l'inventaire sismique d'un parc bâti tel qu'appliqué dans la présente étude, le paramètre d'importance sera appréhendé en fonction de l'usage du bâtiment et de la classification ERP déclarée sur place.

L'arrêté du 22 octobre 2010 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux bâtiments est explicite pour la plupart des ouvrages, mais il existe des cas soumis à interprétation. Les hypothèses prises dans la présente

étude sont données ci-dessous. Il faut signaler que ces hypothèses généralistes peuvent varier en fonction des conditions particulières de chaque établissement.

Les logements de fonction des établissements de maintien de la sécurité et de l'ordre (police, gendarmerie, centres de secours) sont considérés en catégorie d'importance IV. En revanche, les logements de fonction des établissements scolaires sont rapprochés de l'habitat courant (catégorie d'importance II).

Les hôtels de ville ou mairies, en tant que bâtiments qui hébergent en général le poste de crise au niveau communal, sont classés en catégorie d'importance IV.

Les bâtiments des services techniques, en tant que des bâtiments qui abritent des moyens de secours en personnels et matériels, sont classés en catégorie d'importance IV.

Les bâtiments annexes des établissements scolaires, pour lesquels la présence humaine de longue durée est exclue et qui de toute manière n'abritent pas d'activité scolaire sont classés en catégorie d'importance II.

L'ensemble des bâtiments fonctionnels d'un centre hospitalier est classé en catégorie d'importance IV, c'est à dire les bâtiments à usage d'atelier, accueil, administratif, blanchisserie, etc. Uniquement des bâtiments sans importance pour le fonctionnement de l'hôpital sont classés en catégorie d'importance II ou III. Les établissements type « maison de retraite » ou « centre de rééducation » sont classés en catégorie d'importance III.

6.1.3. Informations sur les surfaces

L'information sur la surface des bâtiments est utilisée pour le calcul du coefficient ADS. Dans la méthode originale de l'OFEG, ce coefficient représente la valeur assurée de chaque immeuble, ici elle est approximée par la SHON et un prix au m² de SHON neuve.

Il est rare d'obtenir des informations sur la SHOB ou la SHON des bâtiments. Les diagnostics de vulnérabilité ont parfois accès aux plans des édifices mais pas toujours. Même les occupants ou les gestionnaires des bâtiments n'ont pas toujours accès à cette information.

Lorsque ces informations sur les surfaces étaient disponibles, elles ont été directement utilisées. Dans le cas contraire, la surface SHOB a été appréhendée à travers la BDTopo de l'IGN, qui donne la surface de l'emprise au sol des bâtiments et sa hauteur. Considérant qu'un étage mesure plus ou moins 3m de haut, la SHOB est estimée par un calcul *surface emprise au sol * nombre de niveaux*. La SHOB est ensuite convertie en SHON en la multipliant par un facteur 0,8. L'incertitude de ce calcul est certes élevée, mais au moins cela permet de distinguer les grands édifices des petits.

6.2. INFORMATIONS SUR LES CARACTERISTIQUES CONSTRUCTIVES DES BATIMENTS

6.2.1. Information sur l'âge et l'application des règles parasismiques

L'information sur l'âge s'avère être l'un des critères les plus importants pour ce recensement. En réalité ce n'est pas forcément l'âge qui constitue l'information la plus pertinente, mais plutôt le niveau de conception parasismique appliqué lors de la construction du bâtiment.

En général les occupants ou les gestionnaires des bâtiments connaissent l'âge des bâtiments. Sinon les plans d'architecte contiennent cette information. Le cas échéant il faut consulter les archives du maître d'ouvrage. Une autre possibilité est de dater l'époque de construction en exploitant les anciennes images aériennes mises en ligne par l'IGN dans son site Internet www.ign.fr. Dans l'idéal c'est l'âge du projet constructif et non pas l'âge de la construction effective qui doit être pris en compte.

L'information sur l'âge ne permet pas de savoir si les règles parasismiques applicables à l'époque ont réellement été prises en compte dans le projet constructif. Cette information sur la prise en compte des règles nécessite la consultation spécifique du projet constructif. En pratique, cette information est rarement disponible sur place.

Si l'inventaire des bâtiments concerne des ouvrages de catégories d'importance III et IV en zones de sismicité modérée et moyenne, la présomption de l'application des règles parasismiques devrait être assez corrélée avec l'âge. Mais le problème est lié aux évolutions des différents zonages sismiques en métropole et aux surclassements et déclassements des différents territoires.

Regardons par exemple le cas des lycées des Pyrénées-Orientales construits pendant les années 1970-1980. La carte du zonage sismique liée aux règles PS69-addenda 82 (Figure 6) indique qu'au niveau du massif des Pyrénées seulement une partie des départements des Pyrénées-Atlantiques, des Hautes-Pyrénées et de la Haute-Garonne est classée en sismicité faible. Le reste du massif pyrénéen n'était pas classé dans le zonage réglementaire PS69, et par conséquent les projets constructifs n'étaient pas soumis a priori à l'application des règles parasismiques. Même si à l'époque il existait déjà en France un code parasismique pour les constructions nouvelles, on ne peut pas supposer que l'ensemble de ces bâtiments aient pu respecter une conception parasismique.

Pour l'évaluation du critère « âge et conception parasismique », il est proposé de dater l'époque de conception du bâtiment, et ensuite se référer au zonage sismique en vigueur à l'époque pour savoir si le bâtiment a été contraint ou non de suivre une conception parasismique (les trois zonages sismiques réglementaires de la France sont présentés en annexe 2). Si la documentation disponible lors de la phase d'inventaire permet de savoir si le bâtiment a suivi une règle parasismique ou pas, cette information sera bien évidemment privilégiée.

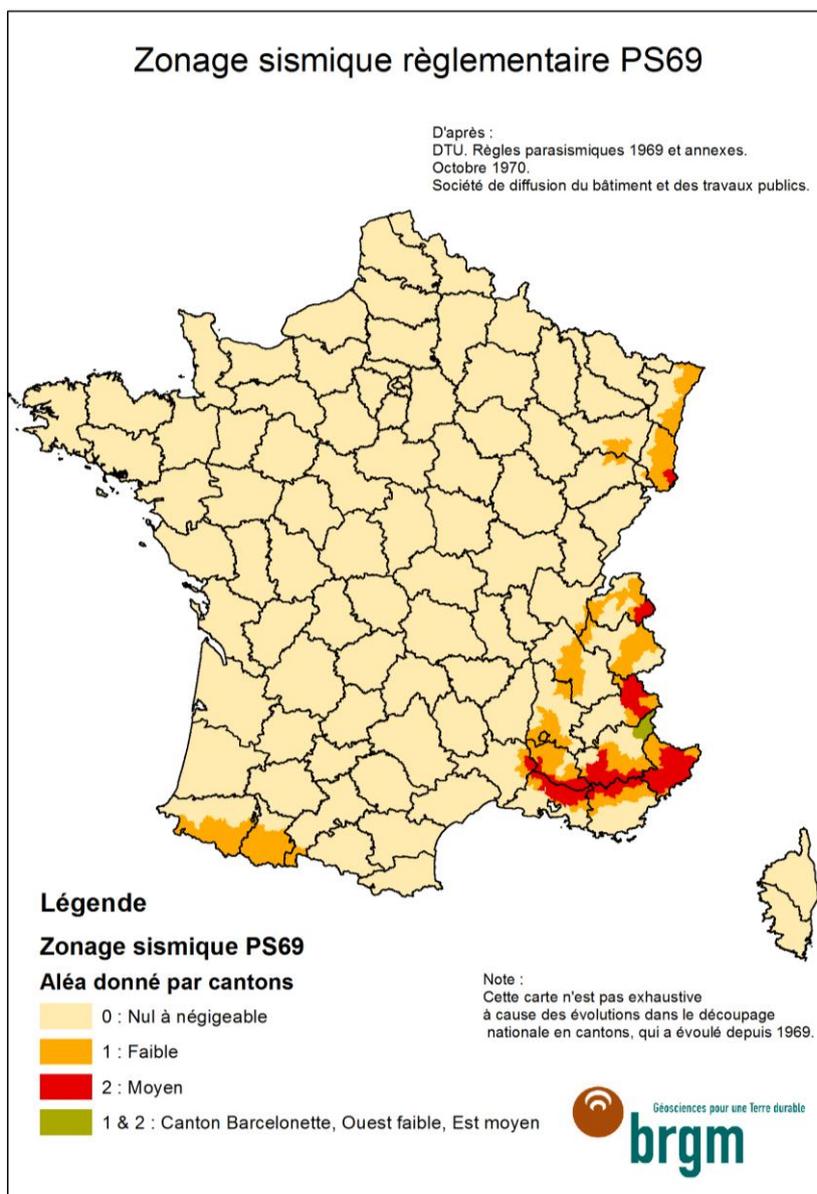


Figure 6 : zonage sismique de la France annexe aux règles PS69.

6.2.2. Informations sur la nature des sols

Les informations sur la nature du sol sur lequel le bâtiment est fondé sont utilisées pour le calcul du paramètre WB.

Cette information est disponible uniquement lorsque les documents du projet constructif du bâtiment peuvent être consultés sur place et qu'ils font référence à la

nature des sols et aux éventuels sondages géotechniques réalisés. Sinon dans la majorité des cas, la seule information disponible sur la nature des sols est la carte géologique de la France au 1/50000^{ème}. Or cette cartographie ne constitue pas une carte des sols selon les critères des EC8.

Pour classer un sol à partir de la carte géologique, il est indispensable de consulter en parallèle la banque des données du sous-sol (BSS) disponible en ligne sur le site infoterre.brgm.fr et qui fournit les forages et sondages géotechniques disponibles dans le secteur du site d'implantation. Ceci permet de connaître les épaisseurs des couches superficielles et donc de classer qualitativement les sols selon leur nature et leur épaisseur.

Pour un certain nombre de bâtiments, des informations sur la nature des sols et sur la classification selon les EC8 étaient disponibles grâce à l'existence d'études de microzonages sismiques, de macrozonages sismiques et de PPR sismiques.

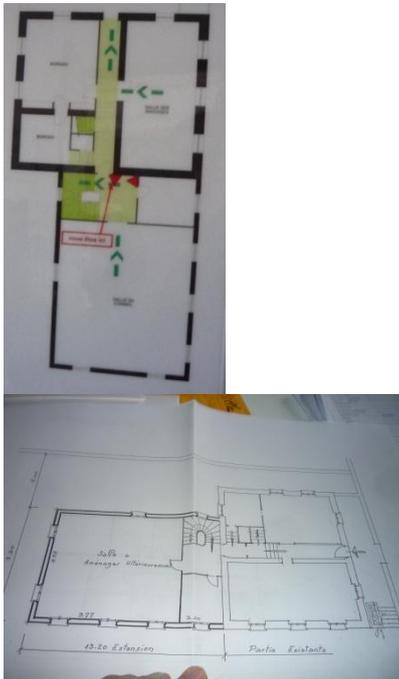
6.2.3. Contreventement en plan, paramètre WG

Le Tableau 31 présente des exemples de l'évaluation du critère WG, contreventement en plan.

Tableau 31 : exemples d'évaluation du critère WG, contreventement en plan.

	<p>Bâtiment circulaire avec des murs en béton armé, trumeaux dans toutes les directions.</p> <p>WG=0</p>
	<p>Bâtiment présentant un angle affaibli et une disposition asymétrique des murs,</p> <p>WG=2.</p>

	<p>Bâtiment avec une structure mixte en béton armé portiques-voiles. Le contreventement est assuré par les voiles des cages d'escaliers et de l'ascenseur, situés au centre du bâtiment. Les extrémités du bâtiment sont plus souples que le noyau rigide.</p> <p>WG=2</p>
	<p>Bâtiment en portiques en béton armé manquant de rigidité en façade. Présence de facteurs aggravants comme les poteaux bridés.</p> <p>WG=5.</p>
	<p>Bâtiment en maçonnerie à l'ancienne. La façade a beaucoup d'ouvertures, un contreventement favorable est supposé dans une seule direction seulement.</p> <p>Planchers fragiles en bois.</p> <p>WG=2</p>

	<p>Bâtiment en maçonnerie construit en 2 temps. Le bloc ancien est en maçonnerie à l'ancienne avec planchers en bois ; l'extension est récente en maçonnerie chaînée et planchers rigides. Pour l'analyse seul le bloc ancien, plus pénalisant, est retenu.</p> <p>Le contreventement est assuré par les murs porteurs extérieurs et intérieurs, situés dans les 2 directions. Le plancher est fragile.</p> <p>WG=1</p>
--	---

6.2.4. Type de contreventement, paramètre WW

Ce paramètre évalue le type de solution constructive utilisée pour contreventer le bâtiment.

Il faut rappeler que ce paramètre ne fait pas référence aux matériaux de construction utilisés, mais au type de solution constructive choisie pour contreventer le bâtiment. Si l'on prend l'exemple des bâtiments avec des murs en maçonnerie à l'ancienne, ce n'est pas le système de contreventement en murs qui doit être pénalisé (en principe il est considéré positif), mais le fait qu'il s'agisse de murs plus fragiles que les voiles en béton et de planchers peu rigides en bois.

La note proposée pour les systèmes en portiques et remplissage en maçonnerie varie entre 2 et 4 (Tableau 32). Les bâtiments avec des remplissages partiels, qui créent des poteaux bridés ou poteaux courts, seront les plus pénalisés.

Tableau 32 : exemples d'évaluation du critère WW, nature du contreventement.

	<p>Contreventement en noyau, voiles et murs</p> <p>Voiles en béton armé. WW=0.</p>
	<p>Murs en maçonnerie en pierre, WW=0.</p> <p>Les systèmes en maçonnerie non chaînée ou maçonnerie à l'ancienne ne sont pas pénalisés ici, mais ils le sont à travers le critère ductilité (WD).</p>
	<p>Structure métallique contreventée par treillis.</p> <p>WW=2.</p>
	<p>Cadres en acier avec contreventement en Croix de Saint-André.</p> <p>WW=1.</p>

	<p>Portiques en béton armé. Les remplissages sont déconnectés de l'ossature en béton.</p> <p>WW=2</p>
	<p>Structure métallique avec remplissage en maçonnerie. La structure métallique n'est pas contreventée.</p> <p>WW=3.</p>
	<p>Portique et remplissage en maçonnerie. Le remplissage n'est pas présent sur toute la hauteur du poteau et donc il risque de se comporter comme un poteau court sous sollicitation sismique.</p> <p>WW=4.</p>
	<p>Système mixte mur-portiques.</p> <p>Les poteaux sont bridés en tête par le remplissage.</p> <p>WW=3.</p>

6.2.5. Paramètre ductilité, WD

Le Tableau 32 présente des exemples d'évaluation du paramètre WD, ductilité.

Tableau 33 : exemples d'évaluation du critère WD, ductilité.

Pour les structures en béton armé ou métalliques	
	<p>Bâtiment en béton armé. WD=0.</p>
	<p>Bâtiment en ossature en acier. WD=0.</p>
	<p>Bâtiment en ossature bois. WD=3.</p>
	<p>Bâtiment en pièces préfabriquées en façade. WD=3.</p>
Pour les bâtiments en maçonnerie	
	<p>Bâtiment en maçonnerie à l'ancienne, avec un chaînage de très faible résistance. Planchers en bois.</p> <p>WD = $5+3 \text{ niveaux} / 2 = 6.5$ (le niveau des combles n'est pas considéré).</p>

		<p>Bâtiment en maçonnerie récente, réputée chaînée car conçu selon les règles PS69 d'après le CCTP. Planchers rigides.</p> <p>$WD=2.5+ 2 \text{ niveaux}/2 = 3.5$</p>
---	--	--

6.2.6. Contreventement en élévation, paramètre WA

Le Tableau 34 présente quelques exemples d'évaluation du paramètre WA, contreventement en élévation.

Tableau 34 : exemples d'évaluation du critère WA, contreventement en élévation.

		<p>Structure métallique contreventée</p> <p>WA=0</p>
		<p>Bâtiment en maçonnerie à l'ancienne. Le contreventement est assuré par les murs porteurs extérieurs. Les trumeaux sont continus sur toute la hauteur.</p> <p>WA=0</p>

	<p>Bâtiment avec une structure mixte en béton armé portiques-voiles.</p> <p>Le contreventement est supposé assumé par les voiles de la cage d'ascenseur et des escaliers, qui sont continus sur tous les étages jusqu'au sous-sol. Le contreventement est donc continu verticalement.</p> <p>WA=0</p>
	<p>Le contreventement du bâtiment est assuré en partie par les murs extérieurs (trumeaux).</p> <p>Le trumeau indiqué en rouge est interrompu par une ouverture au dernier étage.</p> <p>WA=2.</p>
	<p>Bâtiment en ossature en béton armé. Sur cette façade, le RDC présente un angle affaibli.</p> <p>Le deuxième niveau est complètement transparent par rapport aux étages supérieurs.</p> <p>Le bâtiment présente des poteaux bridés.</p> <p>WA=5.</p>

6.2.7. Critère irrégularité, paramètre WK

Ce paramètre s'avère être l'un des plus faciles à évaluer de visu ou sur plan.

A l'origine ce paramètre est simplement évalué en fonction de la régularité horizontale du bâtiment.

Ici il est proposé d'élargir le critère aux irrégularités verticales (présence de porte à faux importants, saillie ou retrait en élévation) et aussi à l'absence de joints parasismiques avec les bâtiments voisins. Les éléments non structuraux très dangereux et posant des problèmes pour la sécurité des personnes sont aussi pénalisés avec ce paramètre.

Tableau 35 : exemples d'évaluation du facteur WK, irrégularité.

	<p>Le bâtiment analysé est celui de gauche, de forme circulaire et donc considéré avec une forme régulière. Le bâtiment est séparé du bâtiment annexe par un joint sismique et par une passerelle métallique.</p> <p>WK=0</p>
	<p>Bâtiment avec une saillie en plan.</p> <p>WK=1</p>
	<p>Le bâtiment étudié (celui de droite) n'a pas de joints avec le bâtiment voisin et en plus ils présentent les planchers à niveaux décalés.</p> <p>WK=1</p>

	<p>Le bâtiment présente des éléments non structuraux dangereux (les cheminées) et une irrégularité en élévation.</p> <p>WK=1</p>
---	--

6.2.8. WS, état de conservation

D'après les propositions de modification faites par Brignola et al. (2012) à la méthode originale, l'état de préservation joue comme un facteur multiplicateur qui incrémente ou réduit la vulnérabilité de la structure.

Les cas pour lesquels les dégradations visibles du bâtiment peuvent mettre en danger la stabilité de la structure ou la sécurité des personnes auront des facteurs entre 1 et 1,2. Les bâtiments avec des dégradations moyennes, dues à l'usure normale des installations, auront un coefficient 0,9. Le cas le plus favorable est celui d'un bâtiment sans aucune trace de dégradations.

Tableau 36 : exemples d'évaluation du facteur WS, état de conservation.

	<p>Bâtiment en ravalement de façade et réaménagement intérieur.</p> <p>WS=0.8.</p>
	<p>Etat moyen de conservation, dégradation normale due à l'usure sans présenter de risques pour les personnes en cas de secousse.</p> <p>WS=0.9</p>

	<p>Dégradation des corniches de la façade principale du bâtiment. Risques pour les personnes.</p> <p>WS=1</p>
	<p>Bâtiment en maçonnerie en pierre. Une fissure traverse le linteau de la fenêtre. Le bâtiment présente d'autres fissures de même type sur les autres façades.</p> <p>Ces fissures incrémentent la vulnérabilité de l'ouvrage.</p> <p>WS=1.2</p>

6.3. RESULTATS

6.3.1. Classement selon la priorité

La Figure 7 montre les résultats de la classification de l'ensemble des bâtiments (234 en total) en priorités selon les zones de sismicité et le niveau de conception parasismique. La Figure 8 montre cette même répartition, mais en valeur relative (pourcentage de bâtiments pour chaque niveau de priorité). Figure 9 montre ces mêmes résultats en fonction des critères WZ (probabilité d'effondrement) et RZPS (risque).

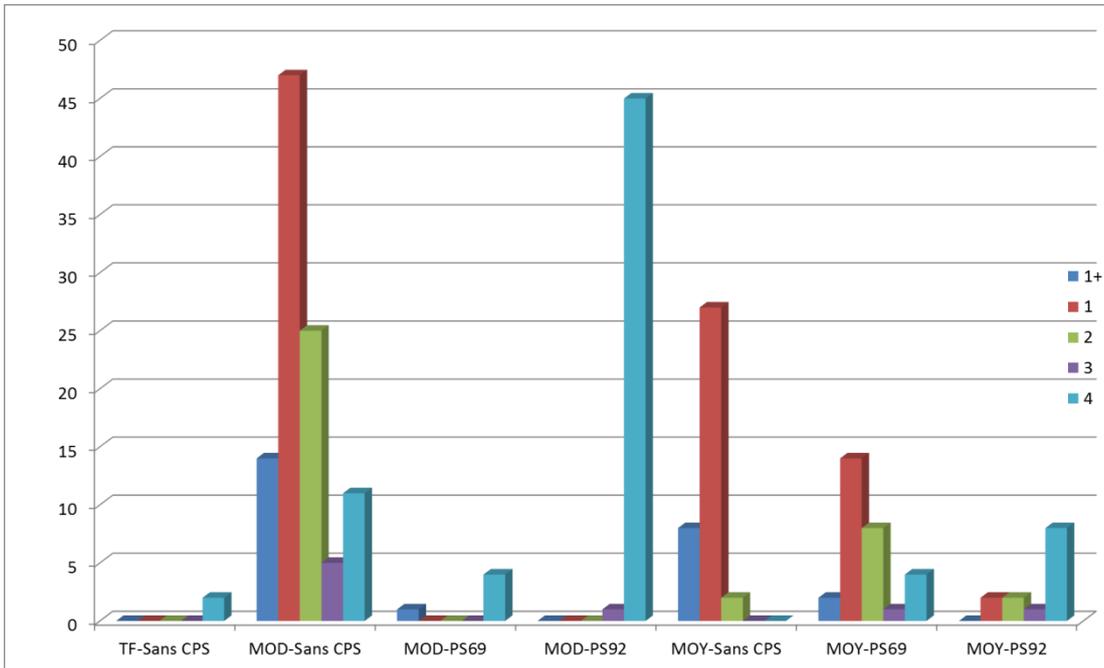


Figure 7 : répartition par classes de priorité (1+, 1, 2, 3 et 4), par zones de sismicité (moyenne MOY, modérée MOD et très faible TF) et par niveau de conception parasismique (sans CPS, PS69 et PS92).

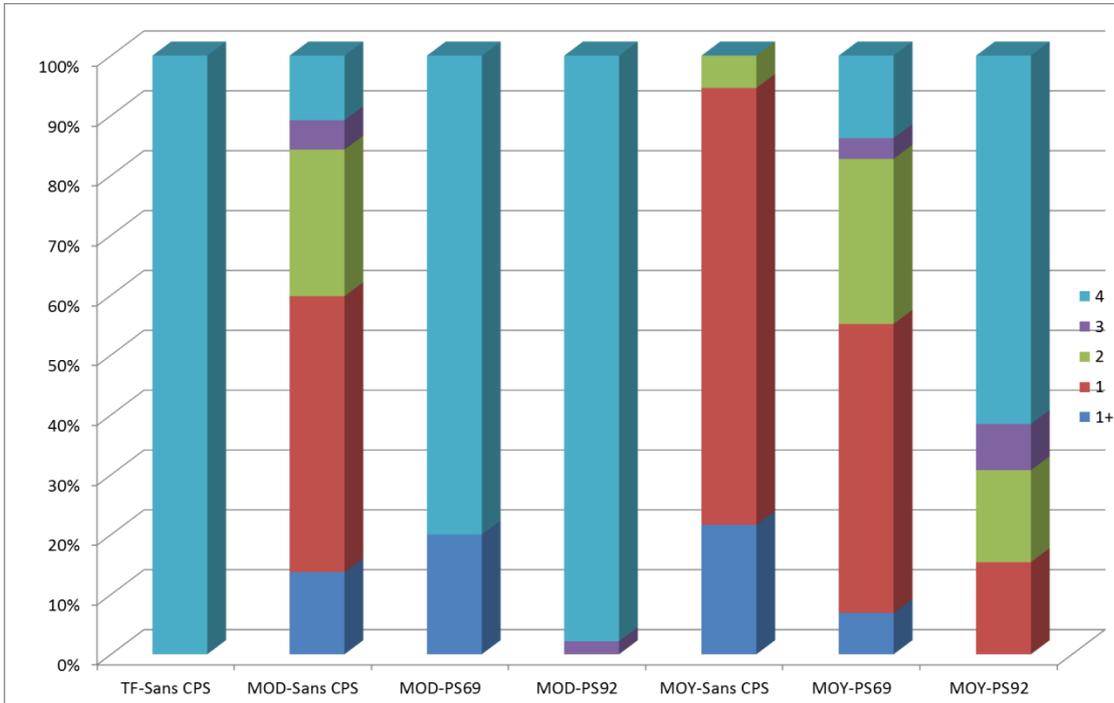


Figure 8 : répartition des priorités sur l'ensemble de bâtiments étudiés (en pourcentage).

Pour la zone de sismicité modérée, l'échantillon ne comprenait pas beaucoup de bâtiments dimensionnés selon les règles PS69. Ceci s'explique par le fait qu'une grande partie des Pyrénées, surtout du département des Pyrénées-Orientales, n'apparaissent pas comme zones sismiques dans les premiers règlements. En même temps, pour la zone de sismicité modérée, tous les bâtiments récents conçus selon les PS92 apparaissent classés en priorité 4. Ceci peut paraître trop optimiste vis-à-vis des bâtiments récents qui peuvent tout de même présenter des facteurs de vulnérabilité importants.

Les résultats pour les bâtiments réputés PS92 dans des zones à sismicité moyenne varient légèrement. Un grand nombre d'entre eux reste classé en priorité 4, mais apparaissent également des cas dans les groupes de priorité supérieure, c'est à dire 1, 2 et 3. D'une certaine manière il paraît logique que la situation pour laquelle un bâtiment réputé PS92 soit classé comme prioritaire se trouve plutôt en zone de sismicité moyenne qu'en zone de sismicité modérée.

Pour les bâtiments construits avant l'application des codes parasismiques, les résultats, à première vue, sont assez satisfaisants. En effet, pour la zone de sismicité moyenne, aucun cas ne serait classé en priorité 3 ou 4. En revanche pour la zone de sismicité modérée, les cinq groupes de priorité sont couverts, avec un pic pour les bâtiments classés en P1. Donc à priori, et sans connaître la tenue réelle de ces bâtiments face à un séisme, il semble clair que cette méthode de hiérarchisation permet de classer un parc bâti en allant plus loin qu'un simple critère d'âge de construction et de zone sismique. Les bâtiments conçus selon les règles PS69 dans la zone de sismicité moyenne suivent aussi cette tendance avec une répartition plus égale entre les groupes de priorité.

Les deux bâtiments en zone de sismicité très faible, utilisés comme indicateur, sont classés en priorité 4. Le nuage de points de la Figure 9 montre la distribution des bâtiments selon leur indice RZPS. Notons que les conditions de la priorité 3 sont rarement réunies. Cette représentation permet d'identifier les groupes de bâtiments parmi ceux classés en priorité 1+ qui apparaissent avec une importance économique et sociétale (facteur AZPS) très grande, par rapport à ceux qui sont classés plutôt par une valeur de WZ grande. Finalement ce graphique permet si on le souhaite, de choisir d'autres critères de sélection et de classification que ceux proposés dans la présente étude.

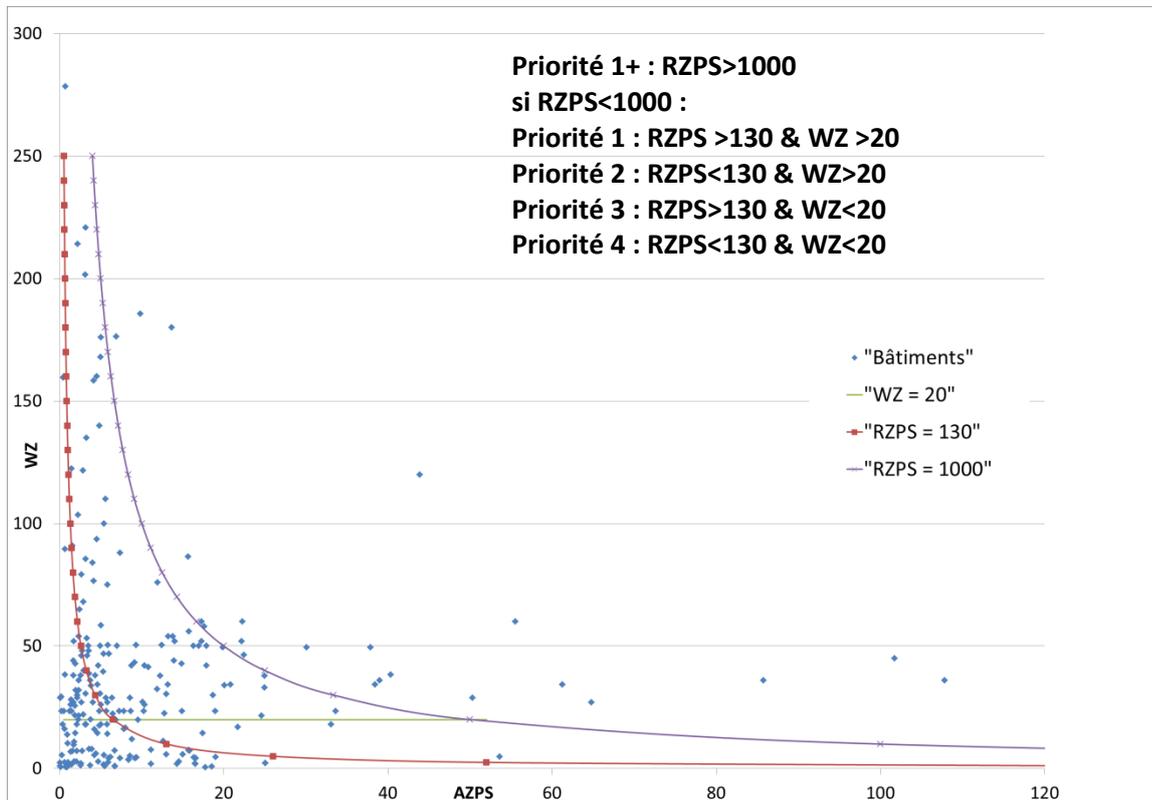


Figure 9 : distribution des bâtiments en priorités selon les facteurs WZ et AZPS. Rappel : $RZPS = WZ * AZPS$.

La Figure 10 montre la répartition en groupes de priorité selon le parc bâti considéré. Cette figure est importante car l'exercice de classification en priorités est censé se faire à niveau d'un parc bâti appartenant à un même gestionnaire. Nous observons à nouveau que dans le cas des lycées des Pyrénées-Orientales, un grand nombre de bâtiments apparaît en priorité 4, à cause du fort nombre de bâtiments de moins de vingt ans de ce parc bâti.

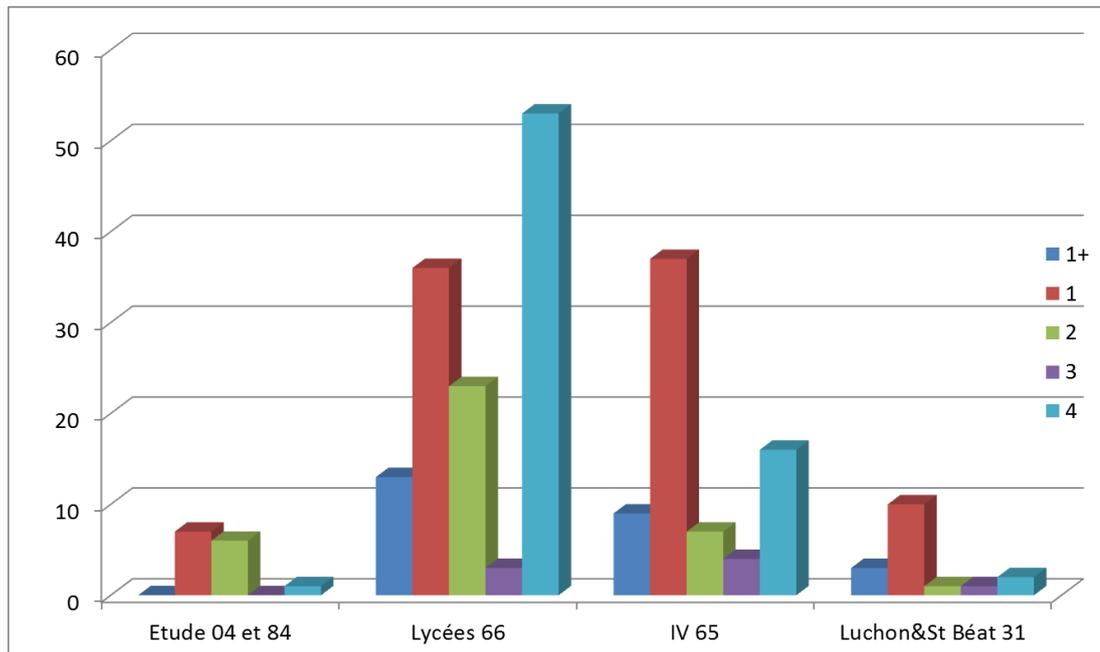


Figure 10: répartition en priorités selon le parc bâti considéré.

Les bâtiments de catégorie d'importance IV du parc bâti des Hautes-Pyrénées se répartissent dans tous les groupes de priorité, avec une nette majorité en priorité 1.

Les bâtiments situés dans les cantons de Luchon et de Saint-Béat ainsi que ceux du Vaucluse et des Alpes de Haute Provence sont moins nombreux, et par conséquent les répartitions sont moins visibles. Ainsi pour des faibles effectifs de bâtiments (<20) la classification peut être limitée.

6.3.2. Influence des autres critères

Ces résultats de classement en priorités sont corrélés ou comparés à d'autres critères. Nous allons voir que les corrélations sont très dépendantes de l'échantillon de bâtiments choisis.

L'influence de l'importance de l'ouvrage est démontrée dans le Tableau 38 et le tableau 37, en fonction de sa catégorie d'importance (II, III ou IV) et du classement associé en priorités. L'exercice s'est plutôt concentré sur des bâtiments de catégorie d'importance III et IV, et donc les résultats pour les bâtiments de catégorie d'importance II ne sont pas très représentatifs, même s'ils permettent tout-de-même de constater que le classement en priorité 1 ou 1+ pour un bâtiment de catégorie d'importance II serait rare. Pour les bâtiments de catégorie d'importance III (surtout établissements scolaires), il apparaît une forte dichotomie entre ceux classés en P4 et P1. A nouveau, il faut signaler que l'échantillon contient un grand nombre de bâtiments récents du département des Pyrénées-Orientales (majoritairement en zone de sismicité 3, modérée).

Les bâtiments à faible importance sociale et économique (paramètre AZPS<1), bien que peu nombreux, se situent plutôt en priorité 4 ou 2. Ceux avec une importance modérée apparaissent classés dans tous les groupes, mais sont rarement classés en 1+. En revanche, les bâtiments les plus importants (AZPS>10) tendent à se concentrer en priorité 1 ou 1+. Ceci est aussi un résultat positif de la méthode proposée, car il paraît évident qu'un critère « importance économique et sociale du bâtiment » permet une hiérarchisation.

Tableau 37: répartition en groupes de priorités en fonction de l'importance relative des bâtiments (coefficient AZPS).

AZPS	Priorités				
	1+	1	2	3	4
<1	0	1	8	0	12
1-10	2	56	29	3	45
10-100	19	33	0	5	17
>100	4	0	0	0	0

Tableau 38 : répartition en groupe de priorités en fonction des catégories d'importance des bâtiments.

Catégorie d'importance	Priorités				
	1+	1	2	3	4
II	0	4	9	0	10
III	14	40	22	4	48
IV	11	46	6	4	16

Le Tableau 39 montre que les bâtiments récents présentent moins de facteurs de vulnérabilité (critère WBAU) que les bâtiments anciens, indépendamment du fait qu'ils aient suivi ou non une réglementation parasismique. Ceci s'explique par la disparition à partir des années 1950 des systèmes porteurs vulnérables, comme la maçonnerie à l'ancienne, mais aussi par un passage graduel des systèmes poteaux-poutres en béton armé et remplissage vers des systèmes en voiles béton surtout dans les bâtiments publics.

Tableau 39 : correspondance observée entre l'époque de construction et le facteur WBAU-vulnérabilité intrinsèque.

Année de construction	WBAU moyen
Avant 1970	9
1970-1992	6.5
Après 1992	4.3

La Figure 11 s'intéresse à l'influence du critère WBAU et aux classements en priorités. Il est clairement observé que les facteurs WBAU les plus faibles (WBAU<5) correspondent majoritairement à des bâtiments non classés comme prioritaires. Ce sont en général les bâtiments qui présentent le moins de points de vulnérabilité. Pourtant ce graphique met en évidence que le critère WBAU, situé au cœur de la méthodologie, n'est pas complètement dilué/independant par d'autres facteurs comme le niveau de conception parasismique ou la zone d'aléa.

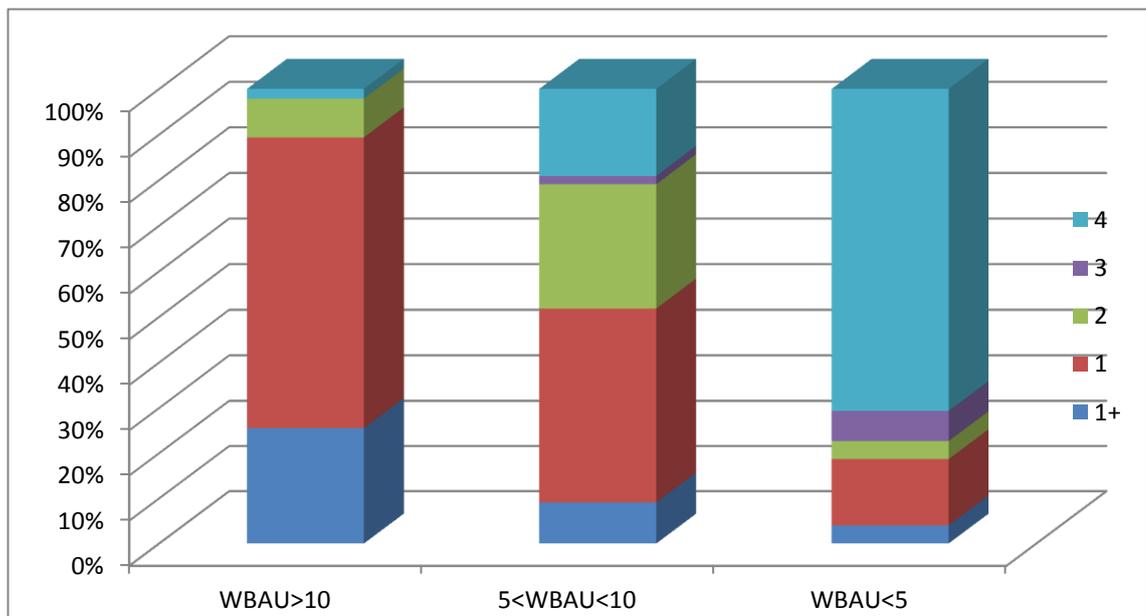


Figure 11 : répartition en groupes de priorités en fonction du critère WBAU ou vulnérabilité intrinsèque.

Un seul cas d'un bâtiment de construction récente (PS92) avec une forte valeur de vulnérabilité intrinsèque WBAU (WBAU>10) a été rencontré. Il s'agit d'un bâtiment avec une transparence très marquée en plus de la présence d'un poteau court. Ce bâtiment, situé dans une zone de sismicité modérée est resté classé en priorité 4. Dans le cas éventuel où ce bâtiment aurait été situé en zone de sismicité moyenne, la méthode l'aurait classé en priorité 2. Cette situation correspond au cas toujours ambigu des ouvrages pour lesquels la présomption d'une construction selon les règles

parasismiques les plus récentes est contradictoire avec des dispositions constructives observées sur place. Une méthode de hiérarchisation d'étape 1 ne pourra pas répondre à cette question, qui demande d'aller plus loin dans l'investigation documentaire du bâtiment (consultation des rapports du projet constructif, du contrôle technique) pour bien s'assurer que le bâtiment ait été dimensionné ou non selon les spécifications du code parasismique en vigueur.

Exemples et discussion des bâtiments qui seraient classés en P1+

Dans la continuité on montre avec un regard critique le classement de certains bâtiments en groupe de priorité P1+.

- Bâtiments d'un lycée des années 1930

Un groupe de bâtiments d'un lycée en zone de sismicité modérée apparaît classé en priorité 1+.

Ce résultat s'explique, comme beaucoup des fois, par une superposition de plusieurs effets.

- o bâtiment sans conception parasismique (années 1930), avec certains défauts dans la structure (portiques avec des poteaux bridés, absence de joints, irrégularités),
- o très grande surface bâtie et fréquentation toute l'année
- o zone à effet de site lithologique

Il s'avère que le bâtiment est un bâtiment historique. Cette valeur patrimoniale n'a pas été prise en compte dans l'analyse mais elle ne fait qu'ajouter de l'importance à l'ouvrage. Par un cumul de circonstances il semble un ensemble prioritaire.

Cet exemple montre aussi la limitation de l'analyse individualisée par bâtiment par rapport à une analyse au niveau de l'ensemble de bâtiments. Les bâtiments considérés dans l'analyse répondent au découpage fonctionnel en blocs ou ailes qui est fait par l'établissement, mais en réalité l'analyse mériterait d'être réalisée au niveau de l'ensemble. Si l'ensemble de bâtiments était traité dans l'analyse comme une seule entité, le classement deviendrait encore plus prioritaire.

- Externat d'un lycée des années 1960 (zone de sismicité modérée)

Il s'agit d'un bâtiment d'une surface très importante, ajoutée à une fréquentation de plus de 1000 élèves durant la journée et occupé aussi les nuits car il héberge l'internat. Au niveau du parc bâti des lycées départementaux c'est un bâtiment important par sa fréquentation.

Il n'a pas été conçu selon les règles parasismiques et il présente des défauts (transparence partielle, faible contreventement longitudinal, portes à faux). En plus l'état d'entretien incrémente cette vulnérabilité.

Qualitativement et d'après la visite sur place, il semble un bâtiment prioritaire.

- Hôtel de ville (zone de sismicité moyenne)

Il s'agit d'un bâtiment historique avec une extension plus récente sans présence de joints ou séparation.

La vulnérabilité du bâtiment est surtout due au système porteur de la partie principale (maçonnerie à l'ancienne, planchers fragiles) et les irrégularités en plan.

Le bâtiment est de catégorie d'importance IV, présente une grande surface et une fréquentation notable au quotidien.

Beaucoup hôtels de ville présentent ces caractéristiques. La différence par rapport à d'autres est que cet ensemble a une surface très conséquente. Sans cette grande surface ce bâtiment ne serait pas classé en priorité P1+.

- Bâtiment hospitalier (zone de sismicité moyenne)

Les bâtiments hospitaliers ont en général une surface notable et en plus ils sont classés comme bâtiments très importants pour la gestion de la crise. En zones de sismicité moyenne ou modérée il est normal qu'ils apparaissent comme prioritaires.

Ce bâtiment concret est présumé construit selon les règles PS69 mais il présente néanmoins des facteurs de vulnérabilité pénalisants. Il semble donc pertinent de prioriser les actions pour ce bâtiment afin de calculer sa tenue vis-à-vis de l'accélération nominale imposée.

- Etablissement sanitaire privé en zone sismique moyenne

Dans l'exercice présent le bâtiment a les caractéristiques suffisantes en usage et en vulnérabilité sismique pour être classé comme prioritaire.

L'établissement est un centre privé, et selon le code parasismique il serait classé en catégorie d'importance III, c'est à dire, au même niveau qu'une école.

Il appartient au maître d'ouvrage de juger l'importance et la priorité du bâtiment.

- Préfecture

Une préfecture est un bâtiment ou un ensemble de bâtiments fondamental dans la gestion de la crise. En plus, en situation normale, le nombre de personnes qui l'occupent est très important (employés et passants), tous les jours de l'année. Un bâtiment ancien d'une préfecture en zone sismique aura donc des fortes chances d'être classé comme prioritaire. Même des bâtiments de préfecture récents (PS69 ou

PS92) peuvent être classés prioritaires à cause de leur forte importance (forte fréquentation, grande surface et classe d'importance IV). Dans le cas analysé dans cette étude le bâtiment de la préfecture avait un système porteur plutôt défavorable vis-à-vis du risque sismique.

7. Conclusions

La méthode d'étape 1 proposée par l'OFEG (actuellement OFEV) a été conçue et développée pour la Suisse. Elle ne s'avère pas tout à fait pertinente à appliquer en France métropolitaine, sans un minimum de modifications, surtout concernant la prise en compte de l'aléa/du zonage sismique de la France et de l'évolution de ses règles parasismiques.

Des paramètres ont été adaptés et proposés en vue de hiérarchiser les bâtiments en Métropole. Il a été décidé que la méthode devait couvrir l'ensemble du territoire franco-métropolitain, y compris les zones de sismicité très faible.

Cette méthode devrait apporter un « plus » par rapport à des classifications très simplistes des bâtiments qui consisteraient à les classer en fonction de l'âge de construction, de la catégorie d'importance et de la zone de sismicité. Les résultats issus de l'application de la méthodologie proposée dans des zones de sismicité modérée et moyenne ont montré qu'elle permet en effet d'aller plus loin dans cette hiérarchisation. L'âge de construction, bien que lié à des critères qui influencent beaucoup la vulnérabilité sismique d'un bâtiment (changements dans les pratiques et techniques constructives, évolutions des codes constructifs), ne peut pas expliquer complètement la vulnérabilité d'un bâtiment. Les résultats sont plutôt satisfaisants, mais montrent aussi quelques limites.

En octobre 2013, le GT QERIR de l'AFPS a publié un rapport sur la quantification effective du risque sismique (Nicol, 2013, Dunand et al. 2014). Ce travail donne des chiffres et des ordres de grandeur des probabilités de pertes dues au risque sismique en Métropole en termes de perte structurelle, humaine et économique. Les résultats de ce rapport ont servi à l'analyse faite dans le chapitre 4 sur la probabilité de dommages graves pour le bâti courant dans les différentes régions en France. Ces deux études sont complémentaires, dans la mesure où le travail présenté ici propose d'appliquer jusqu'au bout une méthode très proche à celle de l'OFEG sur un parc bâti métropolitain, tandis que Nicol (2013) et Dunand et al. (2014) donnent des ordres de grandeur pour un référentiel du risque sismique en France.

L'application sur un échantillonnage de bâtiments réels a permis d'identifier quelques situations difficiles à prendre en compte et des limites d'application de la méthode :

- La séparation entre blocs. Un bâtiment peut être composé de plusieurs blocs d'âges et de vulnérabilités différents. La méthode prend difficilement en compte le fait qu'un bâtiment voisin vulnérable peut augmenter la vulnérabilité du bâtiment mitoyen. Il appartient à l'expert de juger de la dépendance ou de l'indépendance entre blocs, d'un point de vue « structure » mais aussi d'un point de vue « système », basé également sur le découpage utilisé par le maître d'ouvrage.

- Les bâtiments présumés conformes aux règles PS92 et qui présentent de nombreux facteurs de vulnérabilité. Il est très difficile de savoir si ces facteurs de vulnérabilité ont été pris en compte ou non dans la phase d'inventaire et de pré-diagnostic de visu.
- La valeur patrimoniale des bâtiments ne fait pas partie de l'analyse car elle ne se chiffre pas de la même manière que le prix d'une reconstruction neuve.
- La valeur systémique de certains bâtiments, au regard de leur importance en relation avec leur environnement, des plans de secours locaux ou régionaux, de l'étendue de la zone à gérer en cas de crise etc., ne fait pas partie de l'analyse. A l'intérieur du groupe des bâtiments de catégorie d'importance IV, il existe encore une hiérarchisation à faire, en allant au-delà des données de fréquentation et/ou surfacique.
- Au contraire du facteur précédent, la méthode n'est pas en mesure de bien évaluer des bâtiments importants en théorie, mais qui en réalité ont un usage ou une dynamique qui ne les rend pas prioritaires.
- Pour un certain nombre de bâtiments, le critère fréquentation n'est pas forcément le plus adapté, surtout pour ceux liés à la gestion de la crise. Ceci impliquerait des adaptations ou modifications du critère AZPS afin de mieux intégrer ce rôle majeur.

Finalement, le résultat montre que la responsabilité et l'interprétation correcte des inventaires sismiques des bâtiments, reviennent au maître d'ouvrage. C'est lui qui possède tous les éléments pour évaluer au mieux tous ces paramètres cités ci-dessus.

Cette méthodologie d'inventaire reste néanmoins une première étape dans la prise en compte du risque sismique des bâtiments. Il doit être clair que pour aucun bâtiment, un classement en priorités doit être lu comme un résultat absolu et définitif ; il ne s'agit que d'une hiérarchisation selon des critères donnés. De plus il faut rappeler que ces résultats indiciaires, surtout les WZ et RZPS, n'ont aucune valeur physique associée. La lecture de ce résultat doit se faire en comparant un bâtiment à d'autres bâtiments et jamais par une lecture ou interprétation individualisée.

L'application de la méthodologie de l'OFEG sur plusieurs cas réels a démontré que même si une telle méthodologie d'étape 1 ne pourra pas répondre à toutes les questions, elle s'avère un outil d'aide à la décision utile/pertinent pour la gestion d'un parc bâti, en intégrant des critères d'exposition au risque sismique. Il faut signaler que cet outil propose des critères a priori faciles à obtenir par un maître d'ouvrage, car la simplicité pour l'obtention de la donnée est au cœur même de la démarche de l'OFEG.

La méthode de l'OFEG propose des étapes 2 et 3, dans lesquelles des analyses plus poussées sont réalisées sur la résistance sismique des structures et les possibles solutions de renforcement et prenant en compte la notion de risque accepté. Cette étape 1 est le premier pas pour choisir les bâtiments pour lesquels des actions plus coûteuses sont intéressantes.

8. Bibliographie

Groupe de travail AFPS – CSTB (2013). Diagnostic et renforcement du bâti existant vis-à-vis du séisme. Guide construction parasismique http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/DGALN_guide_sismique_DRBE_mars_2013.pdf

BERTIL.D., GEHL.P., AUFFRET.C., GATEAU.C., BARRAS.A.V., CHAUVET.M., BENGOUBOU.VALERIUS.M., VANOUUDHEUSDEN.E., VERRHIEST.G., CHAILLE R. (2008). Mise en œuvre d'une base de données du bâti aux Antilles. Rapport final. BRGM/RP-56822-FR.

Brignola A., Luchini C., Parodi S. et Podestà S. (2012). The Swiss procedure for the evaluation of seismic vulnerability of existing buildings. 15 WCEE Lisboa 2012.

Despeyroux J. et Godefroy P. (1985). Nouveau zonage sismique de la France en vue de l'application des règles parasismiques de construction et de la mise en œuvre des plans d'exposition aux risques (P.E.R). Rapport BRGM, 85 SGN 508 GEG.

Directive de l'OFEG (2005). Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants. Concept et directives pour l'étape 1. Disponible en ligne : <http://www.bafu.admin.ch/erdbeben/07641/07647/index.html?lang=fr>

Document Technique Unifié. (1970). Règles parasismiques 1969 et annexes. Etablies avec l'accord du groupe de coordination des textes techniques. Société de diffusion des techniques et des travaux publics. Règles PS 1969.

Douglas J., Ulrich T. et Negulescu C. (2013). Risk-targeted seismic design maps for mainland France. Nat Hazards (2013) 65:1999–2013.

Dunand F., Nicol J., Moutou-Pitti R., Fournely E. et Toussaint E. (2014). Seismic risk quantification in France : probabilistic evaluation. Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Istanbul. August 25-29, 2014.

Grünthal G., Musson R. M. W., Schwarz J., Stucchi M., (1998). European Macroseismic Scale 1998 (EMS98). Cahiers du centre européen de géodynamique et de séismologie, volume 15, Luxembourg.

Kolz, E. et Burge, M. (2010). Exercices d'application de la fiche 1 CH. Evaluation de la sécurité parasismique à l'aide d'indicateurs de risque. Atelier sismo. Sion 9 et 10 juin 2010. Disponible à http://www.risknet-alcotra.org/rna/allegati/risknat-base-ppt_259.pdf

Labbé P.B. (2008). COMPARISON OF TWO METHODS OF SEISMIC RISK ASSESSMENT IN FRANCE. 14 WCEE Beijing (Chine).

Milutinovic Z. V., Trendafiloski G. S., (2003) - Vulnerability of current buildings, September report 2003, RISK-UE, Work Package 4. An advanced approach to

earthquake risk scenarios with applications to different European towns, Nice, September 2003.

Ministère du Développement Durable (2011). Zonage sismique de la France. <http://www.planseisme.fr/Zonage-sismique-de-la-France.html>

Monfort D. (2012). Pré-diagnostic de vulnérabilité des bâtiments importants et stratégiques : cantons de Bagnères-de-Luchon et Saint-Béat. Module 4.2 Risk scenarios. Projet SISPYR.

Monfort D., Negulescu C., Colas B. (2012). Seismic vulnerability inventory of existing building stock and prioritization criteria. Application to Secondary Schools buildings of Pyrénées-orientales department. Conference WCEE Lisboa 2012.

Nicol J. (2013). Quantification effective du risque sismique. GTR/R&D/0613. GT AFPS GERIS – Sous-groupe QERIR, 87p.

Podesta S. (2012). Validation de la fiche d'inventaire CH de niveau 1. Oral presentation. Sion, 15 mars 2012.

REY.J., DEWEZ.T., LAMBERT.J., IMBAULT.M. (2008). Carte de l'aléa sismique par l'approche statistico-historique. Rapport final. BRGM/RP-54983-FR.

Rivet F. et Monfort D. (2012). Diagnostic simplifié de la vulnérabilité de bâtiments choisis sur 3 communes : Exercice de crise sismique organisé par l'ASN et la Préfecture des Bouches-du-Rhône sur le site de Cadarache. Rapport final. BRGM/RP-60745-FR.

SIA 160 (1989). Actions sur les structures porteuses, Swiss norms SIA Zurich (in French).

SIA 261:2003 (2003). Bâtiment génie civil. Actions sur les structures porteuses. Remplace avec la norme SIA 261/1, le chiffre 4 de la norme SIA 160, Édition de 1989.

Taillefer N. et Amir-Mazaheri D. (2012). Etude de présomption de vulnérabilité sismique et pertinence de renforcement des bâtiments dans les Hautes-Pyrénées. Rapport d'étude. CSTB-Dam design. Etude pour la DDT65.

Ulrich T., Negulescu C. et Douglas J. (2014). Fragility curves for risk-targeted seismic hazard maps. Bulletin of earthquake engineering. Bull Earthquake Eng 12:1479–1491.

Annexe 1

Test de sensibilité pour des bâtiments standard

Tableau avec la classification en 5 groupes de priorité pour les cas synthétiques étudiés.

Acronymes utilisés dans le tableau :

MVT : mouvement de terrain ou effet de site très fort

ES : effet de site

R : rocher (pas d'effet de site)

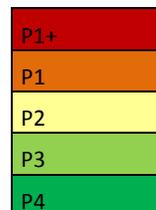
CPS : conception parasismique

ZS : zone sismique selon le zonage sismique de la France (en vigueur depuis le 1-5-2011)

WBAU : somme des facteurs liés à la vulnérabilité intrinsèque ou physique du bâtiment.

Inventaire sismique de bâtiments : la méthode de l'OPEG

Usage	Nv CPS	Sol	WBAU 2	WBAU 5	WBAU 10	WBAU 2	WBAU 5	WBAU 10	WBAU 2	WBAU 5	WBAU 10	WBAU 2	WBAU 5	WBAU 10
			ZS Très Faible			ZS Faible			ZS Modérée			ZS Moyenne		
Sanitaires collège	Sans CPS	R	P4	P4	P4	P4	P4	P4	P4	P4	P4	P4	P4	P4
		ES												
		MVT												
	PS69	R												
		ES												
		MVT												
	PS92	R												
		ES												
		MVT												
Maison Individuelle	Sans CPS	R	P4	P4	P4	P4	P4	P4	P4	P4	P4	P4	P4	P4
		ES												
		MVT												
	PS69	R												
		ES												
		MVT												
	PS92	R												
		ES												
		MVT												
Ecole Rurale	Sans CPS	R	P4	P4	P4	P4	P4	P4	P4	P4	P4	P4	P4	P4
		ES												
		MVT												
	PS69	R												



	PS92	ES	■	■	■	■	■	■	■								
		MVT								■	■	■	■	■	■	■	
		R															
		ES															
		MVT															
Bâtiment administratif lycée	Sans CPS	R	■	■	■	■	■	■	■								
		ES															
		MVT															
	PS69	R								■	■	■	■	■	■	■	■
		ES															
		MVT															
	PS92	R								■	■	■	■	■	■	■	■
		ES															
		MVT															
Habitat collectif 10 logements	Sans CPS	R	■	■	■	■	■	■	■								
		ES															
		MVT															
	PS69	R								■	■	■	■	■	■	■	■
		ES															
		MVT															
	PS92	R								■	■	■	■	■	■	■	■
		ES															
		MVT															
Gendarmerie rurale	Sans CPS	R	■	■	■	■	■	■	■								
		ES															
		MVT															
	PS69	R															

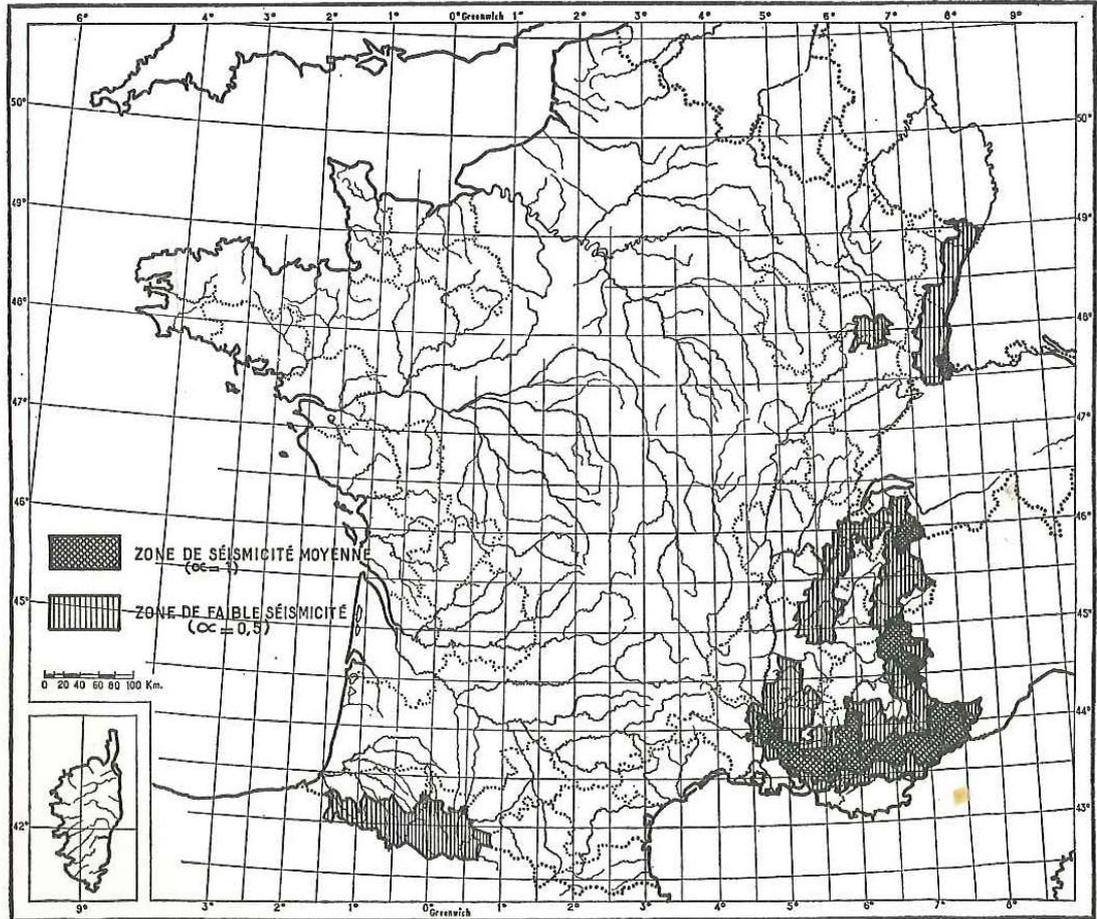
Inventaire sismique de bâtiments : la méthode de l'OFEG

	PS92	ES	[Green]	[Green]	[Green]	[Green]	[Red]	[Red]
		MVT						
		R						
		ES						
		MVT						
Grand internat/externat	Sans CPS	R	[Green]	[Green]	[Green]	[Green]	[Red]	[Red]
		ES						
		MVT						
	PS69	R						
		ES						
		MVT						
	PS92	R						
		ES						
		MVT						
Grand hôtel de police	Sans CPS	R	[Green]	[Green]	[Green]	[Green]	[Red]	[Red]
		ES						
		MVT						
	PS69	R						
		ES						
		MVT						
	PS92	R						
		ES						
		MVT						

Annexe 2

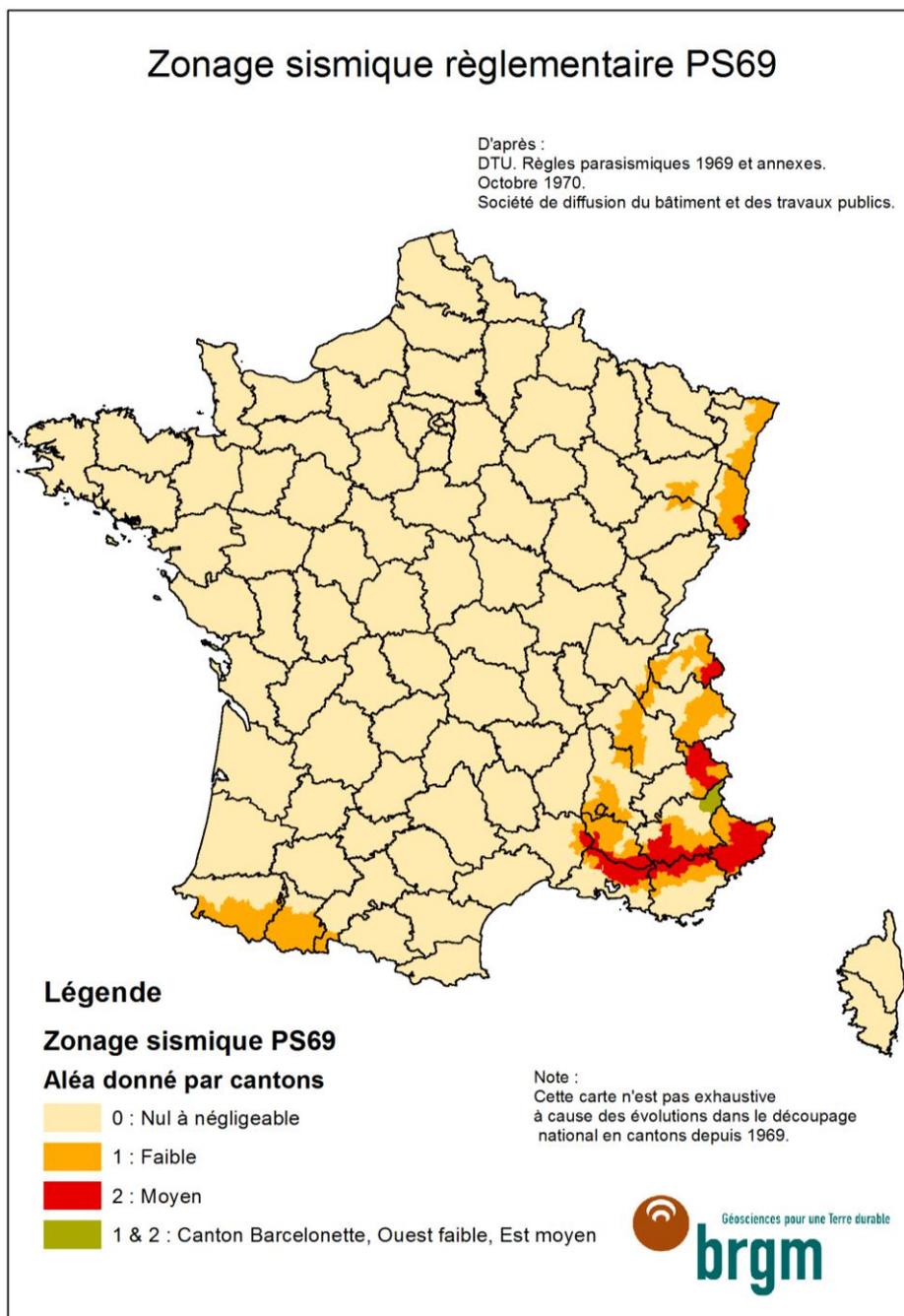
Evolution des zonages sismiques de la France

Zonage sismique de la France selon les règles PS69. Extrait du DTU 1970.

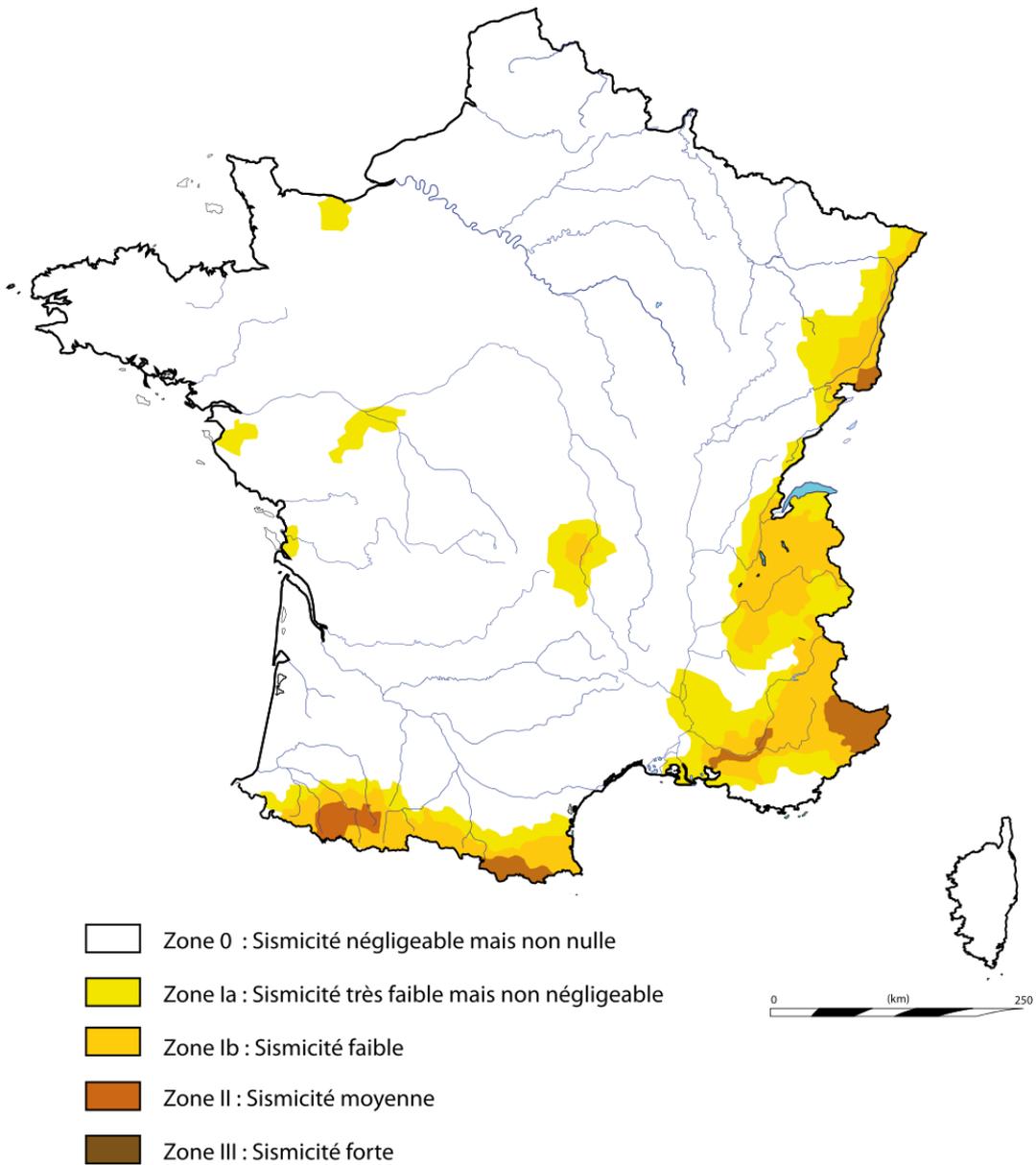


Zonage sismique de la France métropolitaine pour les règles parasismiques PS69. Interprétée et refaite à partir de la carte originale présente dans les règles PS 1969.

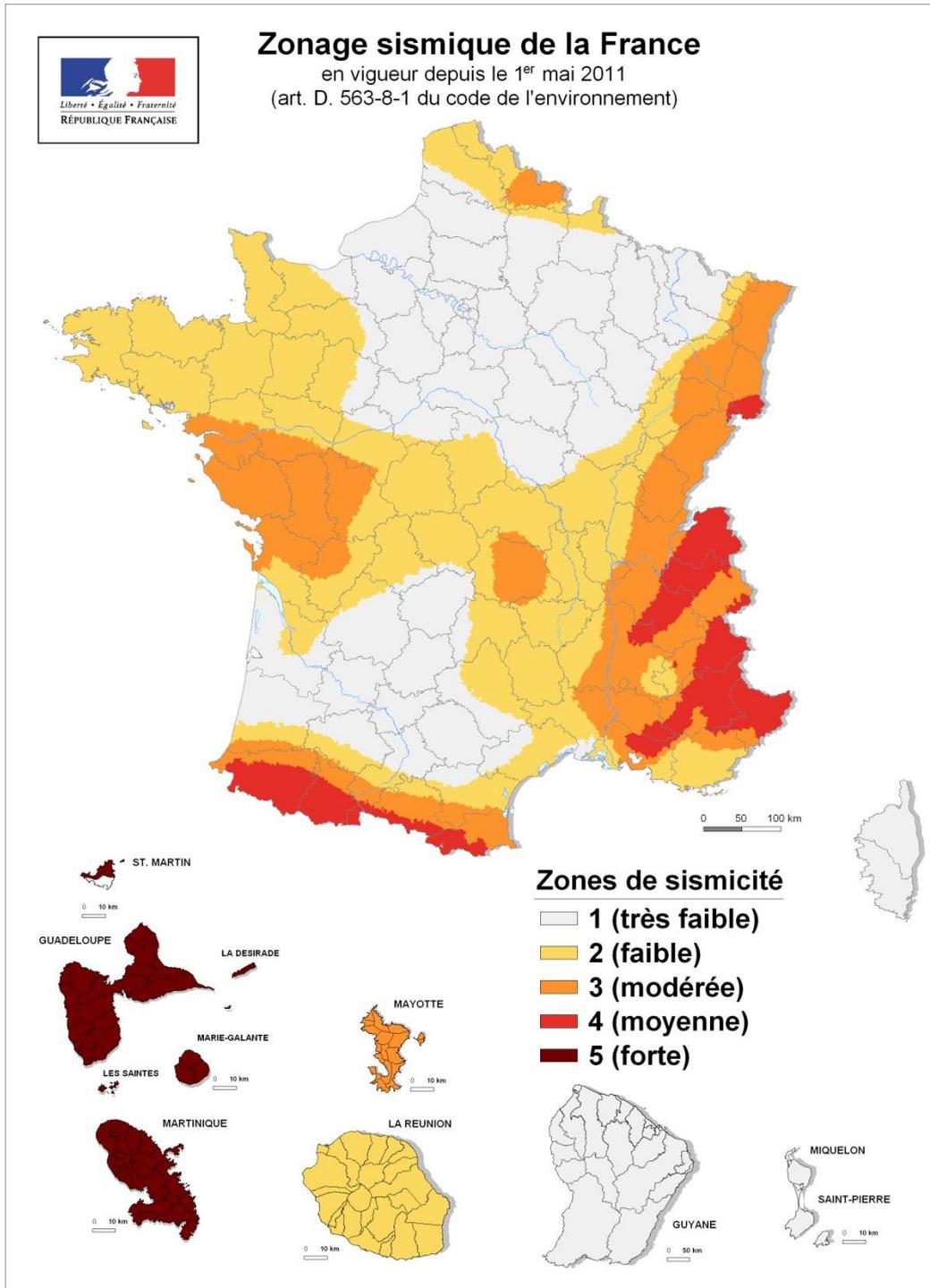
Les règles PS69-addenda 82 incorporaient une extension de la zone de faible sismicité dans les Pyrénées, un reclassement du canton de Tende (Alpes Maritimes) et l'ajout des cantons du Haut-Rhin et le territoire de Belfort. Malheureusement cette carte n'a pas été retrouvée.



Zonage sismique de la France métropolitaine (Despeyroux et Godefroy, 1985) appliqué pour les règles parasismiques PS92. Entrée en vigueur en 1993 jusqu'au 1-5-2011. Extrait de wikipedia.

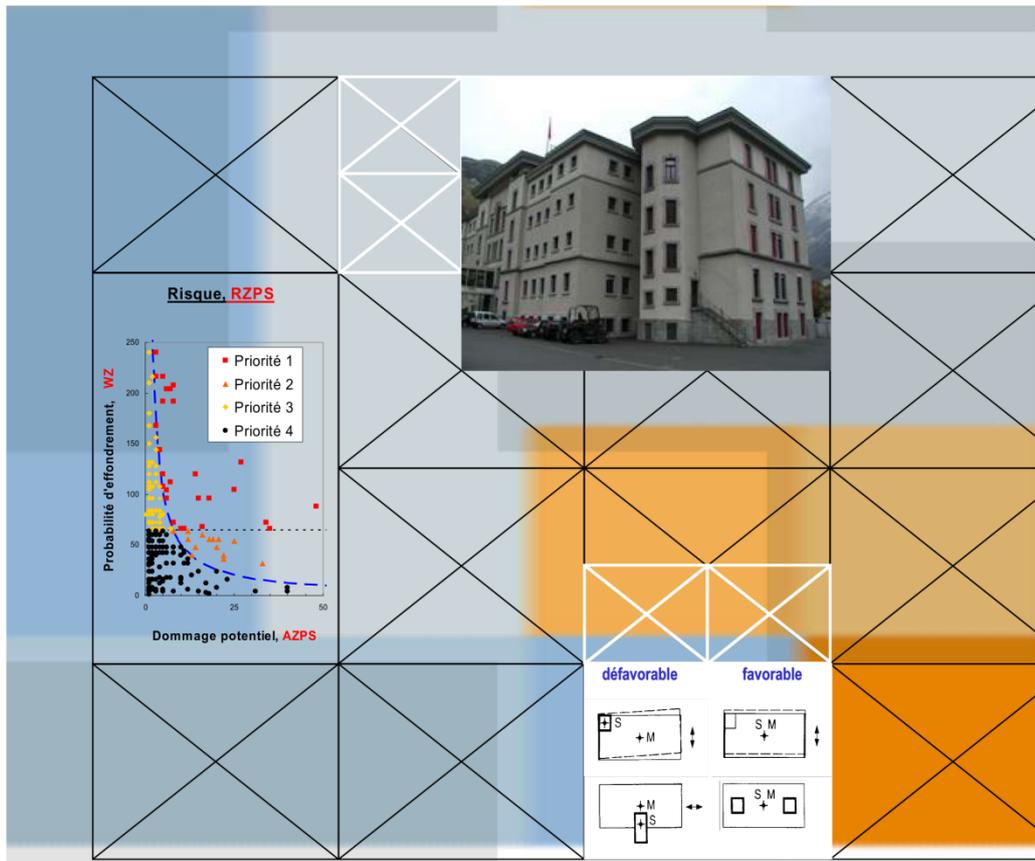


Zonage sismique de la France, applicable à partir du 1-5-2011.



Annexe 3

Méthode d'inventaire sismique d'étape 1 de l'OFEG



Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants Concept et directives pour l'étape 1

Richtlinien des BWG – Directives de l'OFEG – Dirretive dell'UFAEG
Berne, 2005

Deuxième édition



Bundesamt für Wasser und Geologie **BWG**
Office fédéral des eaux et de la géologie **OFEG**
Ufficio federale delle acque e della geologia **UFAEG**
Uffizi federal per aua e geologia **UFAEG**
Federal Office for Water and Geology **FOWG**

Avant propos

Selon la décision du Conseil Fédéral du 11 décembre 2000, tous les projets de transformation et d'assainissement de la Confédération ou subventionnés par elle, ainsi que tous les bâtiments existants de classe d'ouvrage II et III appartenant à la Confédération doivent être vérifiés concernant leur sécurité parasismique. En présence de lacunes essentielles les ouvrages doivent être renforcés en tenant compte de la proportionnalité des coûts.

Pour les ouvrages existants de la Confédération pour lesquels les coûts de protection parasismique peuvent s'élever selon l'objet entre 2% et 10% (voir 20%) de la valeur de l'ouvrage, il est nécessaire de disposer d'une procédure de priorisation, ainsi que de répartir les interventions de protection parasismique sur plusieurs décennies.

Pour ce faire, l'OFEG a décidé d'élaborer et de mettre en œuvre une démarche en trois étapes. Pour l'inventaire de la sécurité parasismique des bâtiments existants de classe d'ouvrage II et III, les trois étapes sont à appliquer successivement. Pour la vérification de projets de transformation et d'assainissement, l'étape 3 doit être appliquée directement.

L'entreprise *Risk&Safety AG* a été mandatée pour élaborer la procédure d'investigation de l'étape 1 ainsi que pour en enseigner la mise en œuvre aux spécialistes concernés.

La deuxième édition de cette directive n'apporte pas de modifications à la méthodologie de l'étape 1. Les modifications concernent les conditions cadres (partie 1), ainsi que la mise en page de la directive et de la fiche d'évaluation. Comme nouveauté également, la présentation principale du cours d'introduction à l'étape 1 se trouve également en annexe.

Bienne, mars 2005
Blaise Duvernay
Centrale de Coordination de la Confédération pour la Mitigation des Séismes.

Impressum

Editeur :	Office Fédéral des Eaux et de la Géologie, OFEG
Auteurs:	E. Kölz, Risk&Safety AG, Gipf-Oberfrick (1 ^{ère} édition) B. Duvernay, Office Fédéral des Eaux et de la Géologie, Bienne (2 ^{ème} édition)
Tirage:	Format PDF, à disposition sur le site Internet de l'OFEG http://www.bwg.admin.ch/themen/naturf/index.htm
Source: à mentionner :	Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants Concept et directive pour l'étape 1 (2 ^{ème} édition), Directives de l'OFEG (2005)
Copyright:	Directives de l'OFEG: © OFEG, Bienne, 2005

Table des matières

1. Introduction	1
1.1 Situation initiale	1
1.2 Objectif	1
1.3 Concept pour la première étape	1
1.4 Déroulement de la procédure en 3 étapes pour le contrôle de la sécurité parasismique des bâtiments existants	2
2. Directive pour l'étape 1	4
2.1 Généralités	4
2.2 Recensement de l'ampleur des dommages	4
2.2.1 Généralités	
2.2.2 Indicateur des dommages directs	
2.2.3 Indicateur des dommages indirects	
2.2.4 Indicateur de l'ampleur des dommages	
2.3 Recensement de la probabilité d'effondrement	6
2.3.1 Généralités	
2.3.2 Année du projet et emplacement de l'ouvrage	
2.3.3 Tenue au séisme de la structure porteuse	
2.3.4 Indicateur de la probabilité d'effondrement	
2.4 Evaluation du risque sismique	10
2.4.1 Indicateur du risque	
2.4.2 Listes de priorité	
2.4.3 Définition des priorités et sélection pour l'étape 2 selon l'inventaire fédéral 2001-2004	
3. Documents à fournir	13
4. Liste bibliographique	13
Annexes	
Formulaire d'évaluation de l'étape 1	
Présentation principale du cours d'introduction à l'étape 1	

1. Introduction

1.1 Situation initiale

L'aléa sismique a longtemps été sous-estimé en Suisse. C'est pourquoi la sensibilité des ouvrages aux tremblements de terre a été prise en compte tardivement dans les normes de la Société suisse des ingénieurs et architectes (SIA) et par conséquent par les milieux de la construction. Parue en 1970, la norme SIA 160 *Norm für die Belastungsannahmen, die Inbetriebnahme und die Überwachung der Bauten* [1] comprenait pour la première fois des dispositions parasismiques et introduisait, sous la forme d'un effort de remplacement horizontal et indépendant de la fréquence, des règles aidant à concevoir les ouvrages en fonction des tremblements de terre. Le danger qu'ils occasionnent est approfondi dans la norme SIA 160 *Actions sur les structures porteuses* [2], éditée en 1989, qui lui accorde une plus large place. On considère que les dispositions de cette norme jettent de bonnes bases pour concevoir les nouvelles constructions en tenant compte des tremblements de terre.

En Suisse, 90 % des bâtiments ont été planifiés et construits avant 1989, et 70% avant 1970. La majorité n'est pas prévue pour résister aux tremblements de terre. Leur tenue au séisme est mal connue. Ils ne satisfont probablement pas aux exigences récentes.

Selon la directive SIA 462 *Evaluation de la sécurité parasismique des ouvrages existants* [3], il y a lieu de contrôler la résistance des constructions lorsque cela s'avère opportun au vu des connaissances nouvellement acquises. Aujourd'hui, l'heure est venue de procéder à cet examen.

1.2 Objectifs

Conformément à la décision du Conseil fédéral du 11.12.2000, l'Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG) est chargé de recenser les bâtiments de la Confédération des classes II et III situés dans les zones d'aléa sismique 2 et 3 (selon la norme SIA 160) et d'en contrôler la tenue au séisme d'ici à fin 2004.

Pour ce faire, l'OFEG a décidé d'élaborer et de mettre en œuvre une démarche en trois phases. La première consiste à recenser sommairement les principaux composants des bâtiments et le risque sismique auquel ils sont exposés, en recourant aux plans d'architecte et si nécessaire à une vision locale. Dans une deuxième étape, il convient d'examiner plus en détail le risque affectant certains ouvrages, en se basant sur des plans d'ingénieur. La troisième phase consiste à mettre au point des mesures d'assainissement à l'attention d'un nombre restreint d'ouvrages particulièrement menacés, et à les réaliser le cas échéant.

Il y a lieu de concevoir cette démarche par étapes de manière à utiliser au mieux les moyens limités à disposition. Il en résulte notamment que l'on consacrera un montant relativement modeste aux investigations de la première phase.

L'entreprise *Risk&Safety AG* a été mandatée pour élaborer la procédure d'investigation de l'étape 1 ainsi que pour en enseigner la mise en œuvre aux spécialistes concernés.

1.3 Le concept pour l'étape 1

L'Office fédéral des eaux et de la géologie a décidé de baser ces investigations sur le concept [4] proposé par l'entreprise *Risk&Safety AG*. Celui-ci a été développé à l'Institut für Baustatik und Konstruktion » de l'EPF de Zurich sous la direction du professeur J. Schneider et a déjà mis en œuvre avec succès dans plusieurs cantons (Argovie, Berne, Grisons, Lucerne, St-Gall, Zoug). Il s'agit d'une procédure d'évaluation globale, axée sur le risque et structurée par étapes, qui permet d'utiliser judicieusement et en toute connaissance de cause les moyens limités à disposition.

La première étape de cette procédure éprouvée constitue la base de la présente directive, qui régit l'inventaire et l'évaluation des ouvrages de la Confédération, ainsi que la première phase d'appréciation du risque.

1.4 Déroulement de la procédure en 3 étapes pour le contrôle de la sécurité parasismique des bâtiments existants

Selon la décision du Conseil fédéral du 11 décembre 2000, les postes responsables de l'administration fédérale sont chargés de vérifier la sécurité parasismique de tous les bâtiments de classe d'ouvrage II et III de la Confédération, ainsi que de tous les projets d'assainissement ou de transformation d'ouvrages ou d'installations de la Confédération. En présence de lacunes essentielles, ces ouvrages doivent être renforcés en tenant compte de la proportionnalité des coûts. L'Office fédéral des eaux et de la géologie a pour ce faire développé et appliqué un concept de procédure en trois étapes.

Pour l'inventaire de la sécurité parasismique des bâtiments existants de classe d'ouvrage II et III, les trois étapes sont à appliquer successivement. Pour la vérification de projets de transformation et d'assainissement, l'étape 3 doit être appliquée directement.

- Lors de l'**étape 1**, les caractéristiques importantes du bâtiment sont relevées à l'aide de plans d'architecte et d'une éventuelle visite. Le risque sismique est ensuite établi de manière grossière sur la base d'une check-list (**env. 4 heures par bâtiment**).

L'estimation du risque ne nécessite pas de calculs détaillés, mais ne délivre également pas une appréciation absolue. Les priorités pour une analyse plus détaillée sont définies sur la base d'un indice de risque et d'un indice de probabilité d'effondrement.

- Lors de l'**étape 2**, les défauts des ouvrages avec un potentiel de risque élevé doivent être analysés de manière plus détaillée à l'aide de questionnaires et de calculs d'ingénieur simples (**env. 3 à 5 jours par bâtiment**).

Des questionnaires sont à disposition pour la plupart des types structuraux présents en Suisse. La procédure étant relativement simple, elle est fondamentalement conservatrice en comparaison avec l'étape 3. Pour l'évaluation numérique de la sécurité structurale, le principe du facteur de conformité selon le cahier technique SIA 2018 doit être (si possible) suivi. Les priorités pour une étude détaillée de la sécurité parasismique et du projet de renforcement éventuel sont définies sur la base de l'importance des défauts et du niveau du facteur de conformité.

- Lors de l'**étape 3**, une réponse définitive concernant la sécurité parasismique doit être fournie sur la base de méthodes avancées. Si nécessaire, des propositions de mesures doivent être développées (**une semaine ou plus par bâtiment**).

Le cahier technique SIA 2018 (2004) „Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants » sert de base pour l'étape 3. Il donne des indications, sur la base d'un facteur de conformité α_{eff} (rapport entre la résistance et les actions selon les normes) et de critères d'efficacité des mesures, pour savoir si un bâtiment doit être renforcé ou si son état actuel peut être accepté.

Pour l'appréciation de la sécurité des bâtiments, deux domaines principaux sont distingués. Un domaine où le niveau de sécurité des personnes est jugé inacceptable (déficit de sécurité) et un domaine où le niveau de sécurité des personnes est jugé acceptable.

Pour le domaine où la **sécurité des personnes** est jugée **inacceptable**, des mesures d'intervention doivent être mises en place. Le coût des mesures est toutefois limité par le **critère de l'exigibilité** (coût de sauvetage inférieur à 100 mio de francs par vie humaine sauvée). Si aucune mesure exigible n'est possible, le risque doit être réduit par des mesures organisationnelles (limitation de l'occupation). Si celles-ci sont impossibles, l'état actuel peut être accepté.

Pour le domaine où la **sécurité des personnes** est jugée **acceptable**, des mesures d'intervention ne doivent être mises en place que si elles respectent le critère de proportionnalité (coût de sauvetage inférieur à 10 mio de francs par vie humaine sauvée). Si aucune mesure proportionnée n'est possible, l'état actuel peut être accepté.

Les directives des 3 étapes de la procédure sont téléchargeables gratuitement sur le site Internet de l'OFEG (<http://www.bwg.admin.ch/themen/natur/f/index.htm>).

La figure 1 présente la procédure pour la vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants de classe d'ouvrage II ou III de la Confédération. Les ouvrages de classe d'ouvrage III doivent dans tous les cas être analysés jusqu'à l'étape 3.

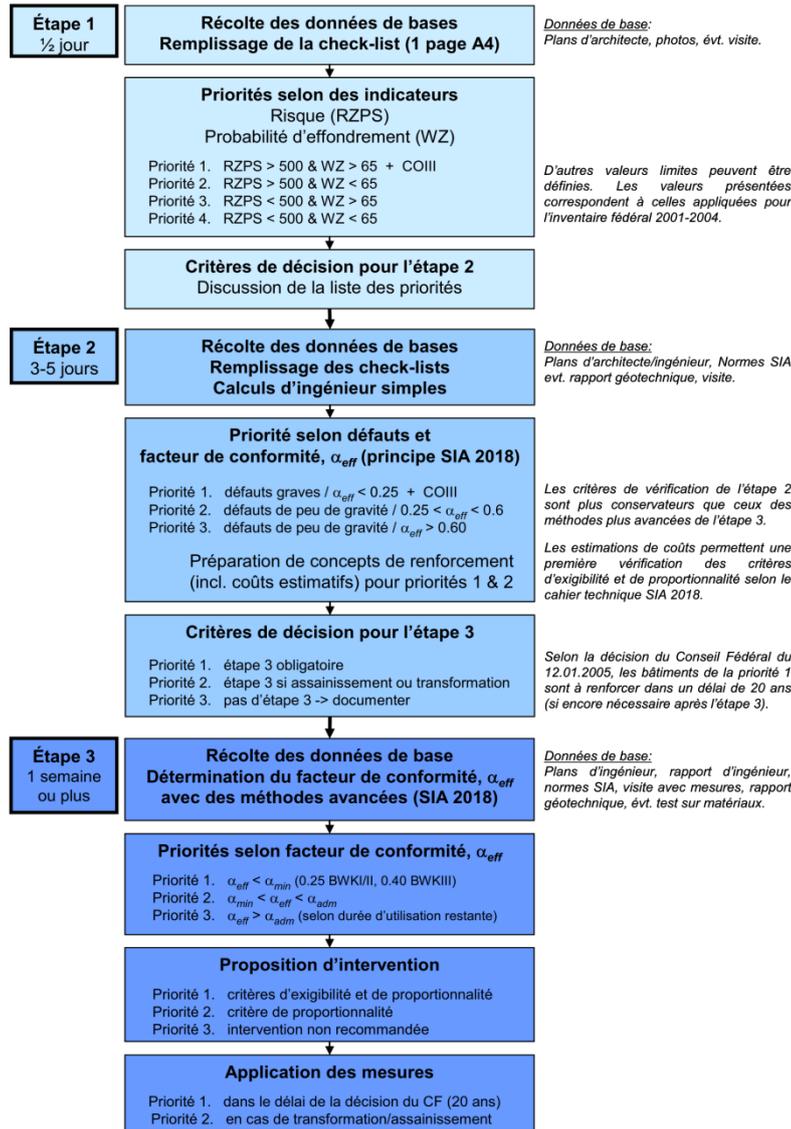


Figure 1 : Explication schématique de la procédure en trois étapes pour la vérification de la sécurité parasismique des bâtiments de la Confédération de classe d'ouvrage II et III.

2. Directive pour l'étape 1

2.1 Généralités

La première phase d'évaluation des ouvrages se fonde sur les réflexions, recommandations, exigences et conditions suivantes:

- L'évaluation d'un ouvrage doit prendre une heure au plus à deux spécialistes qualifiés de la construction qui se basent sur l'étude de plans d'architecte, exceptionnellement complétée par une vision locale.
- Pour garantir une interprétation homogène, il convient que l'un des spécialistes - de préférence un ingénieur civil formé à la statique de la construction et expérimenté en la matière - participe à l'évaluation d'un vaste parc de bâtiments.
- L'estimation sommaire des risques comprendra l'ensemble des dommages corporels directs, dégâts aux bâtiments et autres dégâts matériels consécutifs aux tremblements de terre.
- Les ouvrages importants pour les principales chaînes de sauvetage appelées à intervenir lors d'une catastrophe seront examinés minutieusement et leurs caractéristiques brièvement décrites.

Dans la fiche d'inventaire, on commence par désigner l'ouvrage, son emplacement et son code. Puis on précise sa place et sa fonction dans les chaînes de secours et on consigne des informations complémentaires à son sujet. Ces données seront ensuite traitées pour produire une recommandation.

L'estimation des risques ne requiert pas de calcul détaillé et ne livre pas de résultats en valeur absolue. Son objectif consiste plutôt à recenser au moyen d'indicateurs les propriétés des ouvrages qui déterminent leur tenue au séisme et à évaluer le danger auquel sont exposés les bâtiments, les personnes et les biens. On suit un schéma d'évaluation pour déterminer l'indicateur **AZPS**¹ qui désigne l'ampleur des dommages corporels et des dégâts matériels, puis l'indicateur **WZ** qui témoigne de la probabilité d'effondrement de l'ouvrage. En multipliant ces deux paramètres, on obtient l'indicateur du risque **RZPS**.

Dans la première phase des travaux, l'évaluation des ouvrages suivra la présente *Directive*, qui comprend une *Fiche d'inventaire*.

2.2 Recensement de l'ampleur des dommages

2.2.1 Généralités

L'ampleur des dommages à recenser décrit les dégâts qui seraient occasionnés, lors d'un tremblement de terre, par l'effondrement de l'ensemble de l'ouvrage ou la perte de toutes ses fonctions. Le fait que la défaillance de l'ouvrage dépende de l'intensité du tremblement de terre, de la nature du sous-sol et de la structure de la construction est intégré lorsque l'on détermine l'indicateur relatif à la probabilité d'effondrement.

On utilise des indicateurs pour déterminer l'ampleur des dommages. Leur but n'est pas de la quantifier en valeur absolue. Ce sont plutôt des valeurs auxiliaires, cohérentes entre elles, qui servent à établir une classification. Les indicateurs sont représentés par deux lettres ou plus en caractères gras. La première, qui désigne l'ampleur des dommages, est un **A**. La deuxième et les éventuelles suivantes, qui sont précisées par la suite, spécifient de quel indicateur il s'agit.

¹ Pour des raisons d'homogénéité au plan suisse, les indicateurs sont désignés dans toutes les régions linguistiques en recourant aux mêmes lettres - qui synthétisent leur libellé en allemand.

2.2.2 Indicateur des dommages directs

Le montant des dégâts subis par un bâtiment lors de son effondrement plus ou moins complet correspond grosso modo à sa valeur d'assurance augmentée du coût inhérent au démantèlement de ses ruines. Vient s'y ajouter la valeur de son contenu, qui est sensiblement proportionnelle au montant des dégâts au bâtiment, sauf s'il s'agit d'un ouvrage particulier. Pour simplifier la procédure, on affecte à l'indicateur **ADS** décrivant ces dégâts matériels directs la valeur d'assurance du bâtiment en millions de francs. Si elle est de 12 millions de francs, **ADS** = 12. Les résultats sont arrondis à une décimale pour les valeurs basses et à l'entier supérieur pour les valeurs plus élevées (0,15 = 0,2; 12.15 = 13).

Si le contenu du bâtiment a une valeur particulièrement élevée, elle sera évaluée de la même manière et prise en compte en majorant d'autant l'indicateur **ADS**.

Si un ouvrage s'effondre lors d'un tremblement de terre, les personnes qui se tiennent à l'intérieur ou à proximité immédiate sont directement menacées. L'ampleur des dommages prévisibles dépend donc aussi du nombre moyen **N** de personnes qui se trouvent en même temps dans le bâtiment ou dans la zone dangereuse qui l'entoure. Pour simplifier la procédure, l'indicateur **ADP** relatif aux dommages corporels directs est défini comme étant égal à **N** multiplié par le facteur 0,1. Par exemple, si 240 personnes se trouvent pendant 8 heures par jour et 5 jours par semaine et 42 semaines par an dans un bâtiment et qu'il est pratiquement vide le reste du temps, alors **ADP** = 0,1 · 240 · 8/24 · 5/7 · 42/52 = 4,6. Il est inutile de rechercher une trop grande précision. Le résultat sera arrondi à une décimale pour des valeurs de ADP faibles et à l'arrondi supérieur pour des valeurs élevées.

L'indicateur des dommages directs résulte de la somme des dégâts matériels et des dommages corporels:

$$AD = ADS + ADP \quad (1)$$

Les indicateurs sont des nombres adimensionnels.

2.2.3 Indicateur des dommages indirects

Aux dommages corporels et dégâts matériels directement causés par l'effondrement d'un bâtiment peut venir s'ajouter la mise en danger indirecte de personnes et de biens. Les principaux dommages indirects, également nommés consécutifs ou secondaires, résultent de la perturbation ou l'interruption des chaînes de secours (pompiers, ambulances, hôpitaux et leurs voies d'accès) et de la dissémination de substances dangereuses à partir d'installations industrielles ou de dépôts.

Dans cette première phase d'évaluation, les dommages indirects sont répertoriés de manière très simplifiée, en multipliant les indicateurs **AD** et **AIF** (**A** pour ampleur, **I** pour indirect et **F** pour fonction). La valeur de **AIF** est donnée par la classe de fonction (I-III) de l'ouvrage, selon le tableau 1. Elle peut exceptionnellement être majorée dans une mesure raisonnable, notamment lorsque **AD** est peu élevé. Le recours à ce procédé sera dans tous les cas décrit et justifié dans la fiche d'inventaire.

Classe de fonction	AIF
FK I	1
FK II	2
FK III	5

Tab. 1: Dommages consécutifs

La classe de fonction III comprend les hôpitaux et établissements associés, les bâtiments afférents à la protection contre les catastrophes (casernes de pompiers, garages pour ambulances, etc.) ainsi que certains ouvrages et installations destinés à l'approvisionnement, à l'élimination et aux télécommunications ou alors susceptibles de porter préjudice à l'environnement s'ils sont endommagés.

La classe de fonction II inclut des bâtiments analogues à ceux de la classe III, mais qui semblent moins importants ou moins menacés. Quant à la classe I, elle regroupe tous les autres ouvrages, à savoir les logements, les bureaux, les constructions artisanales et industrielles, les dépôts, les parkings à étages et les installations associées, pour autant qu'ils ne figurent pas dans la classe II ou III.

2.2.4 Indicateur de l'ampleur des dommages

Au niveau de détail de la première phase, l'indicateur **AZPS** relatif à l'ampleur des dommages de toute nature prend donc la valeur:

$$AZPS = (ADS + ADP) \cdot AIF \quad (2)$$

L'indicateur **AZPS** est sans dimension. Il est arrondi à une décimale ou à l'entier supérieur selon sa valeur.

2.3 Recensement de la probabilité d'effondrement

2.3.1 Généralités

La probabilité d'effondrement exprime la probabilité qu'un bâtiment s'effondre plus ou moins complètement sous l'effet d'un séisme d'intensité donnée. Les réflexions suivantes guident la démarche:

- La probabilité d'effondrement d'un bâtiment donné est dix fois plus faible s'il est situé dans la zone 1 d'aléa sismique que s'il se trouve dans la zone 3b.
- Si l'on se réfère à un terrain de fondation de qualité moyenne, la probabilité d'effondrement d'un bâtiment donné est réduite de moitié s'il est fondé sur un bon terrain et doublée s'il est sur un mauvais terrain.
- La probabilité d'effondrement d'un bâtiment donné est la même dans toutes les zones d'aléa sismique s'il a été conçu selon les règles parasismiques de la norme SIA 160 de 1989.
- La probabilité d'effondrement d'un bâtiment donné situé dans la zone 1 d'aléa sismique est trois fois plus grande s'il a été dessiné avant 1970 que s'il a été conçu et construit après 1989 selon les règles parasismiques de la norme SIA 160. Dans la zone 3b, le rapport est de quinze à un.
- La probabilité d'effondrement d'un bâtiment conçu judicieusement à tous égards, et notamment vis-à-vis des tremblements de terre, est environ 20 fois plus faible que s'il est mal conçu à tout point de vue.

S'agissant de la probabilité d'effondrement, ce n'est pas une valeur précise qui est calculée dans la suite de la démarche, mais un indicateur **WZ** qui permet de comparer les ouvrages entre eux.

On utilise des indicateurs pour déterminer la probabilité d'effondrement. Leur but n'est pas de la quantifier en valeur absolue. Ce sont plutôt des valeurs auxiliaires, cohérentes entre elles, qui servent à établir une classification. Les indicateurs sont représentés par deux lettres ou plus en caractères gras. La première, qui désigne la notion de probabilité est un **W**. La deuxième et les éventuelles suivantes, qui sont précisées par la suite, spécifient de quel indicateur il s'agit.

2.3.2 Année du projet et emplacement de l'ouvrage

L'étude des dégâts que les bâtiments ont subi lors du tremblement de terre de Kobe (1995) a montré qu'on peut réduire considérablement la probabilité d'effondrement si l'on met en pratique les connaissances en génie parasismique acquises au cours des dernières années. Avant 1970, les normes SIA ne comprenaient encore aucune disposition relative aux tremblements de terre. La norme SIA 160 de 1970 était la première à prévoir un effort de remplacement horizontal. Quant à la norme SIA 160 de 1989, elle correspond à l'état actuel des connaissances. Si l'on part du principe que les règles parasismiques de la SIA disponibles à l'époque ont été suivies lorsque les ouvrages ont été conçus, leur résistance aux tremblements de terre est fonction de l'année du projet **P**, qui contribue donc à déterminer l'indicateur **WEP**.

La probabilité d'occurrence d'un tremblement de terre d'intensité donnée dépend de l'endroit considéré. La norme SIA 160 [2] découpe le territoire suisse en quatre zones d'aléa sismique ("macrozonation"). Ces zones **E** correspondent aux accélérations attendues lors de séismes. On peut également considérer qu'elles coïncident avec la probabilité d'occurrence d'un tremblement de terre d'intensité donnée. L'ouvrage [6] comprend des informations à ce sujet. Les différentes zones d'aléa sismique sont délimitées dans la carte 3 de la norme SIA 160. Pour la période précédant 1970, l'indicateur **WEP**, qui peut prendre les valeurs de 3 à 30, est corrélé étroitement avec ce découpage. Pour les ouvrages conçus et construits après 1989, la différenciation disparaît, sachant que la norme SIA 160 vise à homogénéiser la sécurité parasismique dans toute la Suisse. Pour la période courant de 1970 à 1989, il a été procédé à une interpolation linéaire dans un but de simplification.

Zone sismique	1	2	3a	3b
Année du projet				
< 1970	3	6	15	30
1970 - 1989	2	3	8	15
> 1989	1	1	1	1

Tab. 2: WEP selon la macrozonation et l'année de planification

Outre la macrozonation, le terrain **B** sur lequel l'ouvrage est fondé joue un rôle important. Les séismes sont susceptibles de provoquer une dégradation des terrains de fondation allant jusqu'à la liquéfaction du sol. En général, ce sont les sols fins et peu cohérents qui sont les plus sensibles aux tremblements de terre. Les pentes, les terrains en glissement et les remblais sont également des emplacements défavorables. Cette "microzonation" n'a pas été réalisée à l'échelle de la Suisse, c'est pourquoi il convient d'y procéder au cas par cas. L'indicateur **WB** tient compte de l' "effet de site", à savoir du fait que les propriétés d'un sol soumis à un tremblement de terre dépendent du lieu considéré.

Terrain	WB
Bon	1
Moyen	2
Mauvais	4

Tab. 3: Terrain

WB = 1 est à choisir pour un rocher ou un sol très compact (classes de sol A et B selon la norme SIA 261 (2003)) [7].

WB = 2 est à choisir pour les sols meubles de classe C, D et E selon la norme SIA 261 pour lesquels aucun effet induit (liquéfaction, thixotropie, glissement) ni amplification importante due à la géométrie du soubassement rocheux ne sont attendus.

WB = 4 est à choisir pour les sols où des effets induits comme la liquéfaction, la thixotropie ou les glissements sont attendus (classe de sol F selon la norme SIA 261, ainsi que pour les cas où une forte amplification due à la géométrie du soubassement rocheux est attendue (possible pour les classes de sol C, d et E).

2.3.3 Tenue au séisme de la structure porteuse

Le comportement d'une structure soumise aux effets d'un tremblement de terre est extrêmement complexe. Dans cette première phase de l'évaluation, on se borne à quelques caractéristiques livrées par l'étude des actes relatifs à l'ouvrage, éventuellement complétée par une vision locale. Egalement synthétisées sous la forme d'indicateurs, ces propriétés permettent de déterminer la tenue au séisme de la structure porteuse. Pour obtenir des explications plus détaillées à ce sujet, on se référera aux ouvrages [5] et surtout [6].

Le contreventement, qui doit absorber les efforts horizontaux, joue un rôle particulièrement important dans la tenue au séisme des structures porteuses. Trois de ses caractéristiques sont abordées dans la présente démarche, qui le considère en plan et en élévation, tout en tenant compte de sa nature.

Le contreventement en plan **G** correspond à l'agencement des éléments porteurs sollicités pour reporter les efforts horizontaux occasionnés par les tremblements de terre. Il est en général le plus efficace lorsque le centre de rigidité (ou centre de cisaillement) est proche du centre de masse (ou point d'application de la somme des forces d'inertie), ce qui permet d'éviter des contraintes de torsion excessives. Il est judicieux de redoubler le contreventement, afin de compenser la chute d'un élément porteur. Comme les effets des séismes peuvent se faire sentir dans toutes les directions, c'est le contreventement selon la direction la plus faible qui est déterminant. Il y a lieu de déterminer l'indicateur en se basant sur ces considérations. Malheureusement, on trouve encore occasionnellement des ouvrages dont le contreventement est médiocre de haut en bas dans une des deux directions, s'il ne manque pas totalement. Dans ce cas, **WG** prend une valeur élevée, ce qui devrait amener les bâtiments concernés dans la partie supérieure de la liste de priorité.

Contreventement en plan	WG
Approprié	0
Inapproprié	2
Aucun	5

Tab. 4: Contreventement en plan

Le contreventement et la forme du bâtiment en élévation **A** influencent son comportement oscillatoire lors d'un tremblement de terre. L'indicateur varie selon que le contreventement est continu ou non. Il est discontinu si ses éléments sont décalés horizontalement d'un étage à l'autre ou si des portions de plancher sont décalées verticalement. Cette subdivision repose notamment sur les connaissances acquises lors des récents tremblements de terre, où il s'est avéré que la rigidité devait être si possible la même à tous les étages. La situation est particulièrement délicate lorsque la rigidité diverge fortement entre deux niveaux directement superposés. Les piliers décalés d'un étage à l'autre présentent également une configuration défavorable. Les *Soft Storeys* sont particulièrement sensibles. Il s'agit de planchers plus "mous" que les autres qui, tenus par la seule résistance à la flexion des piliers, ont tendance à lâcher rapidement lors d'un tremblement de terre.

Contreventement en élévation	WA
Continu	0
Discontinu	2
"Soft Storey"	5

Tab. 5: Contreventement en élévation

La qualité du contreventement dépend également de sa nature **W**. Les noyaux et parois sont les mieux adaptés. Les cadres sont en général un peu moins rigides, ce qui favorise l'apparition de dégâts mais ne conduit pas forcément à l'effondrement précoce. Les treillis à nœuds centraux, comme on en a construit beaucoup en Suisse, sont moins aptes à reprendre les efforts engendrés par les tremblements de terre. Cependant, ce sont les cadres partiellement remplis de maçonnerie qui ont la plus mauvaise tenue, car cette dernière tend à reporter de gros efforts tranchants supplémentaires et de direction défavorable sur les piliers du cadre. L'expérience montre que les contreventements à configuration combinée sont également douteux.

Nature du contreventement	WW
Noyau, parois	0
Cadres translatables	1
Treillis	2
Cadres avec parois de remplissage	2-4
Système combiné	3

Tab. 6: Nature du contreventement

A l'instar du contreventement, le contour de l'ouvrage **K** contribue à sa tenue au séisme. Les formes anguleuses, dotées d'angles rentrants, ne sont pas appropriées. Les ouvrages allongés peuvent également poser des problèmes. Si une structure allongée dans la direction du vent dominant est en général judicieuse pour reprendre les efforts qu'il engendre, cette disposition n'est pas toujours suffisante vis-à-vis des séismes. Quant aux ouvrages dont les éléments peuvent osciller individuellement et de manière différentielle, ils sont particulièrement critiques. Il en résultera d'importants mouvements relatifs entre les compartiments, qui pourraient subir des dégâts en se heurtant mutuellement.

Le comportement d'une structure vis-à-vis des tremblements de terre dépend aussi bien de sa résistance que de sa ductilité ou déformabilité **D**. Il est peu probable qu'un ouvrage très déformable s'effondre, même si la résistance de son contreventement est relativement faible. Mais l'appréciation exhaustive de la déformabilité, qui exige des connaissances détaillées sur la structure, sort du cadre de cette première phase d'évaluation.

Mode de construction, ductilité	WD
Béton armé, acier, composite	0
Maçonnerie armée	2
Préfabriqué, bois	3
Maçonnerie, béton non armé	
- planchers flexibles	3 + n
- planchers rigides	3 + n/2

Tab. 7: Mode de construction, ductilité

La ductilité peut cependant être appréhendée sommairement en fonction du mode de construction et des matériaux constituant les éléments porteurs. Les ouvrages entièrement bâtis en maçonnerie ou en béton non armé s'avèrent particulièrement sensibles, surtout s'ils sont hauts et dépourvus de voiles de plafond rigides. Dans ce cas, l'indicateur **WD** prend en compte le nombre d'étages. Si les plafonds de ces bâtiments ont un effet diaphragme incertain, par exemple s'ils sont à poutrelles ou à hourdis, **n** correspond au nombre d'étages. Si l'effet diaphragme est garanti, ce qui est en général le cas pour les plafonds en béton armé, **n** est égal à la moitié du nombre d'étages et arrondi si nécessaire à l'entier supérieur.

Un tremblement de terre peut également occasionner des déplacements différentiels dans les sous-sols et entre les fondations **F**. Ces mouvements sont susceptibles de générer localement des contraintes excessives, pouvant conduire à l'effondrement du bâtiment. Les ouvrages fondés sur un terrain hétérogène, à des profondeurs variables ou dont les fondations permettent des mouvements différentiels ont une tenue au séisme particulièrement médiocre. Sont notamment menacées les constructions dotées de fondations isolées ou de semelles filantes non reliées par des traverses.

Fondation	WF
Toute la surface	0
Isolée	1

Tab. 8: Fondation

2.3.4 Indicateur de la probabilité d'effondrement

L'indicateur de la probabilité d'effondrement **WZ** regroupe toutes les caractéristiques décrites ci-dessus (§ 2.3). Il résulte de la formule suivante, qui prend en compte les indicateurs calculés à propos de la structure porteuse:

$$WZ = WEP \cdot WB \cdot (1 + WG + WA + WW + WK + WD + WF) \quad (3)$$

2.4 Evaluation du risque sismique

2.4.1 Indicateur du risque

On obtient l'indicateur du risque **RZPS** en appliquant les règles usuelles de calcul du risque aux indicateurs relatifs à l'ampleur des dommages et à la probabilité d'effondrement:

$$RZPS = AZPS \cdot WZ \quad (4)$$

L'indicateur **RZPS** représente une mesure du risque sismique qu'il convient d'attribuer à l'ouvrage considéré. Il est inscrit sur la fiche d'inventaire, comme les indicateurs relatifs à l'ampleur des dommages et à la probabilité d'effondrement. Sa valeur est arrondie à l'entier supérieur.

2.4.2 Listes de priorité

Les ouvrages examinés peuvent être classés en fonction de leur indicateur de risque **RZPS**. Il en résulte une liste de priorité qui met en évidence le risque encouru par les bâtiments.

Une liste de priorité décroissante selon l'indicateur **AZPS** met quant à elle en évidence l'ampleur prévisible des dommages. Elle signale notamment les cas où les risques dépendent surtout de la valeur du bâtiment et de son usage.

Une liste décroissante selon l'indicateur **WZ** signale les bâtiments qui s'effondreront le plus probablement lors d'un tremblement de terre et ceux où l'assainissement de la structure porteuse permettrait de réduire les risques. En interprétant cette liste, il convient de ne pas oublier que les indicateurs relatifs à la probabilité d'effondrement sont affectés d'une grosse incertitude inhérente au mode de recensement.

Il peut également s'avérer judicieux d'établir des listes décroissantes selon **ADS** ou **ADP**, qui pourraient ne prendre en compte que les ouvrages des classes de fonction II et III.

Un formulaire standard sous Excel est à disposition pour saisir les données et dresser de telles listes.

On peut finalement représenter dans un diagramme **WZ/AZx** (x selon que l'ampleur des dommages se réfère aux personnes **P**, aux biens **S** ou aux personnes et aux biens **PS**) les indicateurs relatifs à l'ampleur des dommages, à la probabilité d'effondrement et au risque. Chaque ouvrage recensé est figuré par un point dans le diagramme. L'indicateur **RZPS** du risque encouru par un ouvrage correspond à la surface du rectangle inscrit entre les axes de coordonnées et les parallèles aux axes passant par le point considéré. La figure 1 fournit un exemple issu de la première application de la procédure. Elle se borne aux risques de dommages corporels, qui ont été calculés en recourant à des indicateurs définis de diverses manières.

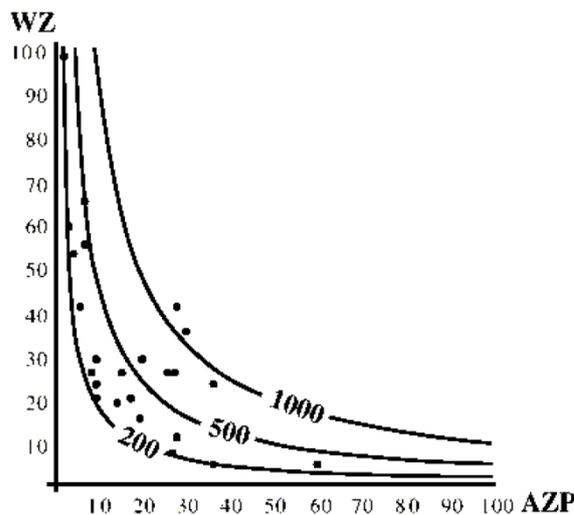


Figure 1: Exemple de diagramme **WZ/AZP**
(Canton d'Argovie, $RZP > 200$)

Ce mode de représentation est particulièrement bien adapté pour évaluer les possibilités de réduire les risques et pour établir des priorités. Les points situés dans la partie supérieure du diagramme symbolisent les ouvrages dont l'assainissement parasismique de la structure porteuse peut s'avérer efficace, les points situés tout à droite signalant plutôt les constructions dont le changement d'affectation peut s'avérer judicieux.

Les courbes soulignent le lieu géométrique des indicateurs de risque de valeurs données. Les ouvrages dont les points se situent à droite et au-dessus de la courbe correspondant à une valeur fixée devront être examinés plus en détail dans une deuxième phase d'évaluation.

Il peut s'avérer judicieux de distinguer les risques affectant les personnes et les biens en établissant des diagrammes spécifiques pour **ADP** et **ADS** au lieu d'une représentation globale selon **AZPS**.

2.4.3 Définition des priorités et sélection pour l'étape 2 selon l'inventaire fédéral 2001-2004

Lors de l'inventaire fédéral 2001-2004, 322 bâtiments existants de classe d'ouvrage II et III en zone sismique 2, 3a et 3b ont été évalués à l'aide de l'étape 1.

La liste de priorité pour l'étape 2 a été établie avec 4 degrés de priorité (voir tableau 9 et figure 2). Après discussion de la liste des priorités, les bâtiments devant être étudiés selon l'étape 2 ont été définitivement sélectionnés. Le tableau 9 résume les résultats.

Priorité	RZPS	WZ	Nombre en étape 1	Sélectionnés pour l'étape 2	%
1	> 500	> 65	48	40	83%
2	> 500	≤ 65	22	19	86%
3	≤ 500	> 65	83	31	37%
4	≤ 500	≤ 65	169	4	2%
			322	94	29%

Tableau 10: Mise ne priorité et sélection pour l'étape 2 selon l'inventaire fédéral 2001-2004.

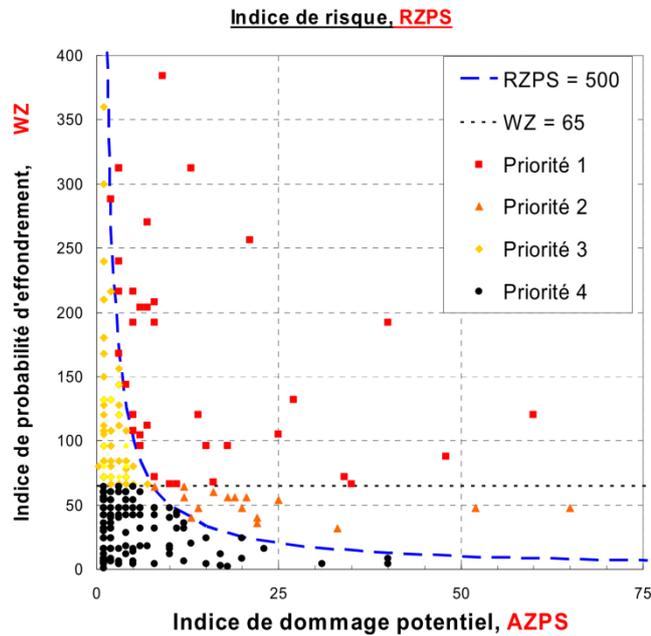


Figure 2: Définition des priorités selon l'inventaire fédéral 2001-2004.

3 Documents à remettre

Les spécialistes qui procèdent aux examens sont tenus de remplir et de transmettre les fiches d'inventaire relatives aux ouvrages qui leur ont été assignés. Les différents indicateurs seront également reportés sur un formulaire Excel (fourni), qui permettra de procéder à une évaluation comparative et de classer les ouvrages selon différents critères.

Tout commentaire relatif à l'ouvrage examiné ou à la méthode appliquée est le bienvenu.

4. Liste bibliographique

- [1] Norm SIA 160: "Norm für die Belastungsannahmen, die Inbetriebnahme und die Überwachung der Bauten". Zürich, 1970.
- [2] Norme SIA 160: "Actions sur les structures porteuses". Zurich, 1989.
- [3] Directive SIA 462: "Evaluation de la sécurité structurale des ouvrages existants". Zurich, 1994.
- [4] Bürge M. et al.: "Handlungsprioritäten für die Erdbebensicherung bestehender Bauten der öffentlichen Hand". In SIA Dokumentation D 0145, Zürich, 1997.
- [5] Wenk T.: "Verstärkung bestehender Bauwerke". Zürich, 1996 (documentation de cours).
- [6] Bachmann H.: "Erdbebensicherung von Bauwerken". Birkhäuser Verlag, Zürich, 1995.
- [7] Norme SIA 261: "Actions sur les structures porteuses". Zurich, 2003.
- [8] SIA 2018 (2004), Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants, Cahier technique, Société suisse des Ingénieurs et des Architectes, Zurich.
- [9] OFEG (2005), Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants, Principes et directives pour l'étape 2 (2^{ème} édition), Office Fédéral des Eaux et de la Géologie, Bienne (en préparation).
<http://www.bwg.admin.ch/themen/naturff/index.htm>.
- [10] OFEG (2005), Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants, Principes et directives pour l'étape 3, Office Fédéral des Eaux et de la Géologie, Bienne.
<http://www.bwg.admin.ch/themen/naturff/index.htm>.



Recensement du risque sismique affectant les bâtiments Inventaire - Etape 1

Ouvrage Code

Rue

PLZ Lieu

Coordonnées CH E: N:

Numéro de la commune Canton

Classe d'ouvrage selon la Norme SIA 261: I II III

Utilisation :

Bien culturel non oui: importance nationale oui: importance régionale

Conséquences possibles de l'effondrement du bâtiment:

Effondrement:

- Aucune répercussion
- Répercussions limitées
- Graves répercussions

Perte de fonction:

- Aucune fonction
- Transports publics
- Logistique
- Hôpital
- Communications
- Alimentation en énergie
- Unité de secours
-

Remarques:

.....

.....

Documents:

Contact:

E - Mail:

Téléphone:

Evaluation basée sur: Levé effectué par: Date:

- Vision locale
- Plans
- Photos

Société

Signature



Recensement du risque sismique affectant les bâtiments Inventaire - Etape 1

Ouvrage Code

Nombre d'étages au-dessus du terrain:

Planchers: planchers rigides (b.a.) planchers flexibles (bois,...)

Classification en fonction des conséquences et de l'ampleur des dommages:

Classe de fonction: **AIF**

FK I 1 **ADP = 0,1** • • / 24 • / 7 • / 52 =
 FK II 2
 FK III 5 **ADS =** **AZPS = (ADS + ADP) • AIF =**

Zone sismique, année du projet	WEP				Terrain	WB
	1	2	3a	3b		
Zone sismique:					Bon	1
Année du projet: < 1970	3	6	15	30	Moyen	2
1970 - 1989	2	4	8	15	Mauvais	4
> 1989	1	1	1	1		

WEPB = WEP • WB =

Structure:

Contreventement en plan	WG	Contreventement en élévation	WA
Approprié	0	Continu	0
Inapproprié	2	Discontinu	2
Aucun	5	„Soft Storey“	5
Nature du contreventement	WW	Contour de l'ouvrage	WK
Noyaux, parois	0	Compact	0
Cadres autostables	1	Anguleux ou allongé	1
Treillis	2		
Cadres avec paroi de remplissage	2 - 4		
Système mixte	3		
Mode de construction, ductilité	WD	Fondation	WF
Béton armé, acier, composite	0	Toute la surface	0
Maçonnerie armée	2	Isolée	1
Préfabriqué, bois	3		
Maçonnerie, béton non armé	3 + n		

WBAU = (1 + WG + WA + WW + WK + WD + WF) =

Indicateurs pour la définition de priorités

WZ = WEPB • WBAU =

RZPS = AZPS • WZ =

Formation Risk&Safety AG

Evaluation de la sécurité parasismique à l'aide d'indicateurs de risque

Ehrfried Kölz / Marcel Bürge

Risk&Safety AG
Ingenieure in Gemeinschaft

1

Concept d'évaluation ... Risk&Safety AG

... développé à l'EPF-Zurich pour l'évaluation de de parcs immobiliers

- engagement efficace des moyens**
engager les moyens, là où en a besoin;
évaluation en une heure (indicateurs)
- orienté risque**
le calcul d'un indicateur de risque RZ, prend en considération l'ampleur des dégâts et la probabilité d'effondrement (indicateurs)
- définir les priorités**
évaluation standardisée, liste de priorités, diagrammes W/A

Bâtiments individuels

- indice concernant le risque et le besoin de mesures**
réponse initiale sur la nécessité d'approfondir l'évaluation de la sécurité parasismique

2

Concept d'évaluation Risk&Safety AG

Documents

- plans
Plans d'architecte au 1:200, exceptionnellement plans d'ingénieur
- fiche d'évaluation

Procédure

- Interviews
un spécialiste „interviewe“ un responsable du bâtiment,
question type: „est-ce que c'est de la maçonnerie ou du béton armé?“
- spécialistes
éducation en statique et ingénierie de la construction
- évaluer de manière homogène
assurer une homogénéité dans l'évaluation d'un parc immobilier
évaluation des bâtiments appartenants à un même parc par un seul spécialiste

3

Fiche d'évaluation Risk&Safety AG

Indicateur de risque RZPS

Dégâts aux personnes et aux biens AZPS

Indicateur de la probabilité d'effondrement WZ

RZPS = AZPS · WZ

4

Fiche d'évaluation Risk&Safety AG

Identification du bâtiment

Bundesamt für Wasser und Geologie
Koordinationsstelle Erdbebenvorsorge

Erfassung der Erdbebengefährdung Eidgenössischer Bauwerke
Inventarisierung Stufe I

Bauwerk Code

Standort Ansprechpartner

Standort Akten Telefon

5

Fiche d'évaluation Risk&Safety AG

Estimation de l'ampleur des dommages AZPS

Conséquences indirectes

Mögliche Folgen eines Gebäudeeinsturzes:

Verschüttung: <input type="checkbox"/> Keine Auswirkung <input type="checkbox"/> Geringe Auswirkung <input type="checkbox"/> Schwere Auswirkung	Funktionsausfall: <input type="checkbox"/> Keine Funktion <input type="checkbox"/> Öffentlicher Verkehr <input type="checkbox"/> Logistik <input type="checkbox"/> Krankenhaus <input type="checkbox"/> Kommunikation <input type="checkbox"/> Energieversorgung <input type="checkbox"/> Rettungseinheit
---	---

Klassierung nach Konsequenzen, Schadenausmass:

Funktionsklasse:	AIF	ADP = 0.1 · <input type="text"/> / 24 · <input type="text"/> / 7 = <input type="text"/>
<input type="checkbox"/> FK I	1	
<input type="checkbox"/> FK II	2	
<input type="checkbox"/> FK III	5	ADS = <input type="text"/> AZPS = (ADS + ADP) · AIF = <input type="text"/>

Conséquences directes,...

6

Dommages directs

Dégâts directs aux biens ADS

- valeur du bâtiment en mio. de francs

Valeur de remplacement ou autre estimation, ordre de grandeur, arrondi au nombre entier supérieur

Dommages directs aux personnes ADP

- occupation moyenne

sous forme d'un facteur représentatif de l'occupation moyenne

$$ADP = 0.1 \cdot \left[\frac{\text{Nbre de personnes}}{\text{Facteur}} \cdot \frac{\text{Jours par semaine}}{7} \right] / 24 \cdot \frac{\text{Heures par jour}}{7} = \boxed{}$$

7

Exemple: ADP

Une école

- occupation régulière

400 personnes, 6 – 9 heures/jour, 5 jours par semaine

- occupation spéciale, ex. aula ou halle de sport

1000 personnes, 3 heures/jour, 1 fois par mois

Belegung

$$ADP = 0.1 \cdot \left[\frac{400}{1} \cdot \frac{5}{7} \right] / 24 \cdot \frac{5}{7} = \boxed{10}$$

8

Dommages indirects

Classe de fonction AIF

- dommages consécutifs dus à une réduction de la fonction

dommages aux biens (ex. interruption du production), dommages aux personnes (ex. dans le cas d'hôpitaux, d'industries chimiques)

- indicateur de l'amplitude des dommages AZPS

$$AZPS = (ADS + ADP) \cdot AIF$$

Classe de fonction	AIF
FK I	1
FK II	2
FK III	5

pas de dommages consécutifs
 même ordre de grandeur que les dommages directs
 dommages consécutifs considérables
 évt. pondération augmentée

9

Fiche d'évaluation

Détermination de WZ

Erdbebenzone, Planungsjahr	WEP	Baugrund	WB
Erdbebenzone:	1 2 3a 3b	Gut	1
Planungsjahr: vor 1970	3 6 15 30	Durchschnittlich	2
1970 bis 1989	2 4 8 15	Schlecht	4
nach 1989	1 1 1 1		

$$WEPB = WEP \cdot WB = \boxed{}$$

Tragwerk:	WG	Aussteifung Aufriss	WA
Aussteifung Grundriss	0	Stetig	0
Günstig	2	Unstetig	2
Ungünstig	5	Soft Storey	5
Fehlende Aussteifung			
Aussteifungsweise	WW	Konzept im Grundriss	WK
Kern, Wände	0	Kompakt	0
Verschiebliche Rahmen	1	Verwinkelt oder länglich	1
Fachwerke	2		
Rahmen mit Füllwänden	2 bis 4		
Gemischte Systeme	3		
Bauweise, Duktilität	WD	Fundation	WF
Stahlbeton, Stahl, Verbund	0	Flächenhaft	0
Bewehrtes Mauerwerk	2	Einzelgründung	1
Vorfabrikation, Holz	3		
Mauerwerk, unbewehrter Beton	3 + n		

$$WBAU = (1 + WG + WA + WW + WK + WD + WF) = \boxed{}$$

$$WZ = WEPB \cdot WBAU = \boxed{}$$

10

Année de projet / zone sismique

Normes SIA

- zone sismique

définie dans la norme de la société suisse des ingénieurs et architectes (SIA) Norme SIA 160, édition 1989

- dispositions pour les tremblements de terre

Norme 1970: rudimentaire, depuis 1989: plus avancée

- année de projet

le moment de la planification est important, pas le moment de la construction

Zone sismique	1	2	3a	3b
Planification				
avant 1970	3	6	15	30
de 1970 à 1989	2	3	8	15
après 1989	1	1	1	1

11

Sol de fondation WB

Bon → 1

- sols rigides

Ex. rocher, molasse

Moyen → 2

- ni bon, ni mauvais

Mauvais → 4

- sols fins, sols mous, sols sensibles

Ex. argile lacustre, sable lâche

- sols saturés

Nappe phréatique près de la surface

- topographie défavorable

Ex. terrain en pente, bord de vallées

- glissement de terrain, remblais artificiels

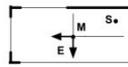
12

Exemple: WB Risk&Safety AG
Experten in Gebäudeschutz



13

Contreventement en plan WG Risk&Safety AG
Experten in Gebäudeschutz



M centre de masse
S centre de rigidité
E effort sismique (resp. mouvement)

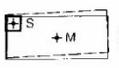
- Favorable** → 1
 - centre de rigidité S près du centre de masse M
 - Ex. disposition symétrique en plan des éléments de contreventement
- Défavorable** → 2
 - S et M sont éloignés l'un de l'autre
 - Ex. disposition asymétrique des éléments de contreventement, typique: contreventement en coin
 - contreventement faible dans une direction
- Aucun** → 5
 - pas d'éléments de contreventement significatifs

14

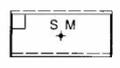
Exemples: WG Risk&Safety AG
Experten in Gebäudeschutz

M centre de masse, S centre de rigidité

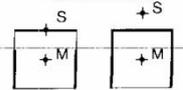
défavorable

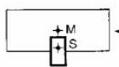


favorable

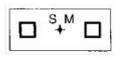


défavorable





favorable

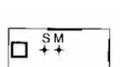


défavorable





favorable



Source: Bachmann, Erdbebensicherung von Bauwerken 15

Exemple: WG Risk&Safety AG
Experten in Gebäudeschutz



16

Contreventement en élévation WA Risk&Safety AG
Experten in Gebäudeschutz

- continu** → 1
 - rigidité identique à tous les étages ou augmentant progressivement vers le haut
- discontinu** → 2
 - changements de rigidité
 - en particulier, suppression d'éléments de contreventement
 - autres discontinuités dans le cheminement des forces
 - en particulier: évidements, planchers décalés verticalement, éléments de contreventement décalés horizontalement
- Soft Storey** → 5
 - étage avec quasi-absence de rigidité horizontale
 - typique des bâtiments avec surface commerciale au rez-de-chaussée

17

Exemples: WA Risk&Safety AG
Experten in Gebäudeschutz

défavorable



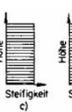
Steffigkeit a)

défavorable



Steffigkeit b)

favorable



Steffigkeit c)

favorable



Steffigkeit d)



e)



f)



g)



h)



i)



j)



k)



l)



m)

Source: Bachmann, Erdbebensicherung von Bauwerken 18

Exemple: WA Risk&Safety AG

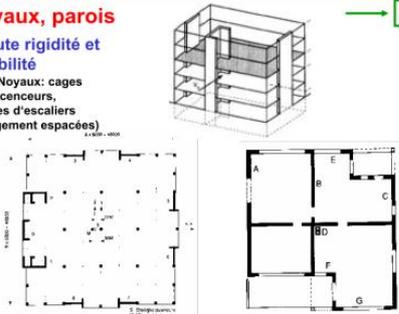


19

Nature du contreventement WW Risk&Safety AG

Noyaux, parois → 0

- haute rigidité et stabilité
- Ex. Noyaux: cages d'ascenseurs, cages d'escaliers (largement espacées)



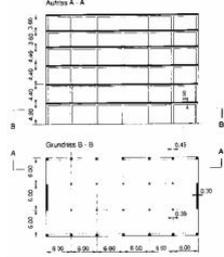
Source: Bachmann, Erdbebensicherung von Bauwerken 20

Nature du contreventement WW Risk&Safety AG

Cadres translatables → 1

- système moins rigide
- condition: pas de remplissage

Bâtiments de bureaux
Evt. halles sportives,
halles de production,
halles de stockage

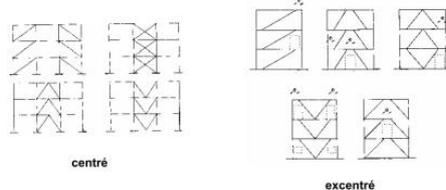


Source: Bachmann, Erdbebensicherung von Bauwerken 21

Nature du contreventement WW Risk&Safety AG

Treillis → 2

- système très rigide
- gén. centré, peu de potentiel pour la dissipation d'énergie, halles



centré excentré

Quelle: Bachmann, Erdbebensicherung von Bauwerken 22

Nature du contreventement WW Risk&Safety AG

Cadres avec parois de remplissage → 2 - 4

- système vulnérable
- plutôt favorable, si les parois de remplissage et le cadre sont liés en compression uniquement;
- particulièrement défavorable si les parois ne sont que partiellement remplies

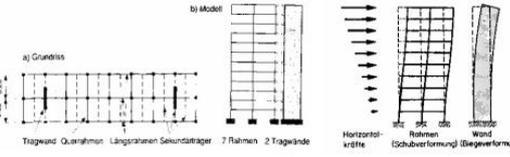


Source: Bachmann, Erdbebensicherung von Bauwerken 23

Nature du contreventement WW Risk&Safety AG

Systèmes mixtes → 3

- systèmes hétérogènes: défavorable
- différents systèmes de contreventement, souvent pour cause de transformation ou d'agrandissement.



a) Grundriss b) Modell

Tragwand Querrahmen Längsrahmen Sekundärträger 7 Rahmen 2 Tragwände Horizontal-kräfte Rahmen (Schubverformung) (Biegeverformung) Wand

Source: Bachmann, Erdbebensicherung von Bauwerken 24

Contour du bâtiment WK Risk&Safety AG

Compact → 0

- modes de vibrations uniformes

Anguleux, allongé → 1

- torsion induite par le positionnement relatif défavorable des centres de masse et de rigidité
- modes de vibrations complexes et non-uniformes
- concentration d'efforts

25

Exemples: WK Risk&Safety AG

Forme du bâtiment en plan

défavorable favorable

Configuration des évidements en plan

Source: Bachmann, Erdbbensicherung von Bauwerken 26

Mode de construction, ductilité WD Risk&Safety AG

Béton armé, acier, composite → 0

- bonne résistance (traction/compression)
- capacité de déformation plastique élevée "dissipation d'énergie"

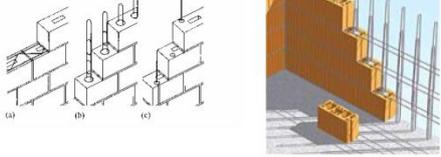


27

Mode de construction, ductilité WD Risk&Safety AG

Maçonnerie armée → 2

- bonne capacité de déformation
- résistance à la traction possible



Source: Zimmerli/Schwartz/Schwegler, Mauerwerk 28

Mode de construction, ductilité WD Risk&Safety AG

Préfabriqué, bois → 3

- connections, rigide, fragile
- le bois est léger, effet positif



29

Mode de construction, ductilité WD Risk&Safety AG

Maçonnerie, béton non-armé → 3 + n

- pas de comportement ductile, fragile, ne résiste qu'à la compression et à l'effort tranchant



30

Fondation WF

Toute la surface → 0

- **fondation continue**
Ex. radier général, semelles continues liées par des traverses, semelles isolées liées par un radier général

Isolée → 1

- **éléments de fondation isolés non liés**
Ex. semelles isolées
- **fondations hétérogènes**
Ex. éléments différents, pieux de longueurs différentes, sol de fondation très hétérogène

31

Exemple: WF

Source: Meili, Schweizerische Bauzeitung

32

Fiche d'évaluation

Conclusion

Besondere Bemerkungen: _____

RZPS = AZPS · WZ =

Beurteilung auf Grund von: Begehung Plänen Photos

Für die Aufnahme: _____ Stempel

Datum: _____ Unterschriften

33

Réduction du risque

Par la réduction de AZPS

- changement de l'utilisation du bâtiment
réduire l'occupation, changer la fonction, ...

Par la réduction de WZ

- amélioration du comportement sismique
renforcement ou „assouplissement“ de la structure porteuse, amélioration de la capacité de déformation, de la ductilité...

34

Critères pour la réduction du risque

Dangers aux personnes

- risque individuel: $WZ > xxx$
personne ne doit être menacé passé un certain seuil

Utilisation rationnelle des moyens

- ampleur du risque: $RZ... > yyy$
priorités pour une évaluation approfondie du de la sécurité parasismique des bâtiments

2000 bâtiments analysés

- max WZ = 132, max RZ = 4 680
- RZ = risque individuel direct (ADS=0; AIF=1)
- min xxx = 21, min yyy = 132

Devise

- évaluer la sécurité parasismique lors de transformations

35

Annexe 4

Calcul de l'endommagement par la méthode RISK-UE

Pour l'évaluation de la vulnérabilité et les probabilités d'endommagement de quelques exemples de bâtiments standard les principes de la méthode RISK-UE Niveau 1 ont été utilisés (Milutinovic & Trendafilovski, 2003). Développée dans le cadre d'un projet européen, cette méthode est adaptée aux principaux types de bâti de la zone d'étude. Le principe de la méthode est décrit de façon détaillée par Sedan *et al.* (2008), et dans Risk-UE (2003, 2006).

La méthode Risk-UE niveau 1 est basée sur une corrélation statistique entre l'intensité macrosismique et le dommage apparent, décrit en termes de degré de dommage. Le fondement de cette méthode repose sur une exploitation de la méthode d'évaluation des intensités de l'Echelle Macrosismique Européenne (EMS98).

En termes de dommage, le comportement sismique d'un bâtiment est subdivisé en classes de vulnérabilité. Un indice de vulnérabilité (V_i) est introduit afin de représenter et de quantifier l'appartenance d'un bâtiment à une certaine classe de vulnérabilité. Il s'agit donc de quantifier par une valeur numérique, V_i , la vulnérabilité d'un type de bâtiment qui s'exprime de manière qualitative dans l'EMS-98 (classes de vulnérabilité A à F). Les valeurs de cet indice sont comprises entre 0 (non vulnérable) et 1 (très vulnérable).

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

Définition des typologies EMS-98 et de la classe de vulnérabilité associée.

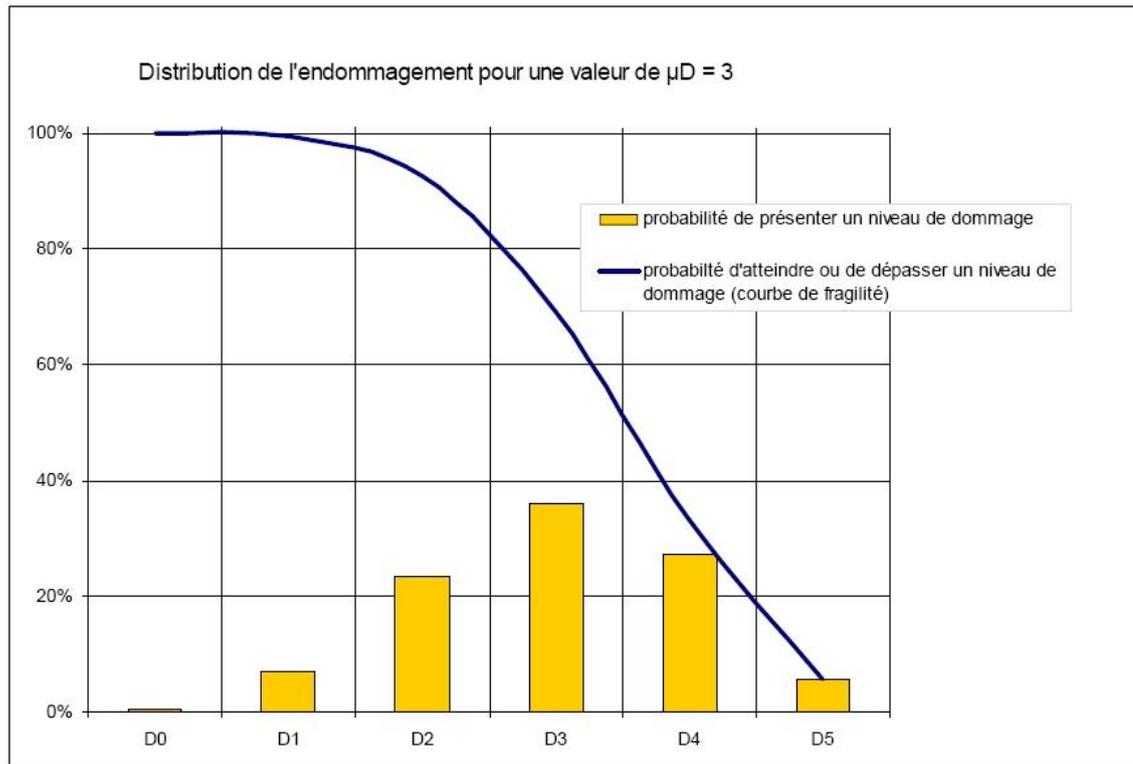
Cet indice permet le calcul d'un taux de dommage moyen μ_D , en fonction de l'intensité macrosismique I et de l'indice de vulnérabilité V_i selon l'équation suivante :

$$\mu_D = 2.5 \left[1 + \tanh \left(\frac{I + 6.25 V_i - 13.1}{2.3} \right) \right]$$

μ_D est un nombre variant entre 0 et 5 et balayant de façon continue les niveaux de dommages D0 à D5 définis par l'échelle EMS-98. $\mu_D = 0$ signifie une absence de dommages, $\mu_D = 5$ signifie un dommage D5 (destruction du bâtiment).

Une loi de distribution de type bêta permet alors de transcrire ce taux moyen de dommage en distribution d'endommagement.

Par exemple, un bâtiment dont l'indice de vulnérabilité est $V_i=0,9$, soumis à une intensité VIII aura un taux de dommage $\mu_D = 3$. La figure suivante présente un exemple de distribution de dommages et de courbe de fragilité correspondant à un degré de dommage moyen (μ_D) de 3.



Exemple de distribution de dommages et de courbe de fragilité pour $\mu_D = 3$.

En réalité, un type de bâtiment ne correspond pas à un indice de vulnérabilité V_i fixe, mais plutôt à une fourchette d'indices centrée autour d'une valeur « la plus probable » notée V_i^* , comprise entre des valeurs V_i min et V_i max, limites inférieures et supérieures des valeurs possibles de V_i . On définit aussi des bornes V_i^- et V_i^+ , plus restrictives que V_i min et V_i max, correspondant aux valeurs « plausibles » de V_i .

Des valeurs de V_i ont été définies pour 23 types principaux de bâti organisés selon la matrice de typologie Risk-UE. Elles sont représentées dans le tableau suivant.

Code	Typologie	Vimin	Vi-	Vi	Vi+	Vimax
M1	Murs porteurs en maçonnerie composée de :					
M1.1	Moellons	0,62	0,81	0,873	0,98	1,02
M1.2	Pierres appareillées	0,46	0,65	0,74	0,83	1,02
M1.3	Pierres de taille	0,3	0,49	0,616	0,793	0,86
M2	Adobe	0,62	0,687	0,84	0,98	1,02
M3	Murs porteurs en maçonnerie non armée:					
M3.1	Plancher en bois	0,46	0,65	0,74	0,83	1,02
M3.2	Voûtes en maçonnerie	0,46	0,65	0,776	0,953	1,02
M3.3	Planchers avec poutrelles métalliques et maçonnerie	0,46	0,527	0,704	0,83	1,02
M3.4	Plancher en béton armé	0,3	0,49	0,616	0,793	0,86
M4	Murs porteurs en maçonnerie armée ou confinée	0,14	0,33	0,451	0,633	0,7
M5	Constructions en maçonnerie renforcées dans leur ensemble	0,3	0,49	0,694	0,953	1,02
RC1	Système poteaux/poutres	-0,02	0,047	0,442	0,8	1,02
RC2	Murs de refend en béton	-0,02	0,047	0,386	0,67	0,86
RC3.1	Système poteaux/poutres avec mur de remplissage en maçonnerie non armée	-0,02	0,007	0,402	0,76	0,98
RC3.2	Système poteaux/poutres avec mur de remplissage en maçonnerie non armée	0,06	0,127	0,522	0,88	1,02
RC4	Structure mixte en béton armé (portiques et murs en béton)	-0,02	0,047	0,386	0,67	0,86
RC5	Murs en béton préfabriqué	0,14	0,207	0,384	0,51	0,7
RC6	Structure en béton préfabriqué avec murs de refend en béton	0,3	0,367	0,544	0,67	0,86
S1	Système poteaux/poutres en acier	-0,02	0,467	0,363	0,64	0,86
S2	Structure en acier contreventé	-0,02	0,467	0,287	0,48	0,7
S3	Système poteaux/poutres en acier avec mur de remplissage en maçonnerie non armée	0,14	0,33	0,484	0,64	0,86
S4	Système poteaux/poutres en acier avec mur de refend béton coulés en place	-0,02	0,047	0,224	0,35	0,54
S5	Système de composant acier et béton armé	-0,02	0,257	0,402	0,72	1,02
W	Structure en bois	0,14	0,207	0,447	0,64	0,86

Matrice de typologies de bâtiment et indices de vulnérabilité (méthode Risk-UE).

Annexe 5

Textes de référence relatifs aux règles parasismiques pour les différents types d'ouvrages

Le tableau suivant, d'après CETE-Méditerranée (2001), indique les textes réglementaires, les textes techniques associés et les dates d'application respectives pour les règles parasismiques relatives aux différents types d'ouvrages en France.

En particulier ce tableau montre que l'application effective des PS92 pour les bâtiments a démarré en janvier 1998.

Dates d'application	Ouvrages	Textes réglementaires	Textes techniques
Avant le 1 ^{er} juillet 1993	IGH Marchés de l'Etat ERP 1 ^{ère} , 2 ^{ème} et 3 ^{ème} catégorie Habitations collectives en zones II et III, maisons individuelles (max R+1) en zone III ERP 4 ^{ème} catégorie	Ces types d'ouvrages étaient réglementés par une série de textes réglementaires (décrets et arrêtés) parus entre 1967 et 1986.	Règles PS69 puis règles PS69/82
A partir du 1 ^{er} juillet 1993	Bâtiments autres que maisons individuelles	Décret N°91-461 du 14 mai 1991, modifié par décret N°2000-892 du 13 septembre 2000. Arrêté du 16 juillet 1992	Règles PS69/82
1 ^{er} juillet 1994	Maisons individuelles et bâtiments assimilés	Arrêté du 16 juillet 1992	Règles PS69/82 règles PS-MI 89-82 (facultatives)
1 ^{er} août 1994	Installations classées pour la protection de l'environnement	Arrêté du 10 mai 1993	Circulaire DPPR/SEI du 27 mai 1994
1 ^{er} avril 1996	Ponts	Décret N°91-461 du 14 mai 1991 modifié. Arrêté du 15 septembre 1995	Guide AFPS 1992 construction parasismique des ponts
1 ^{er} janvier 1998	Bâtiments nouveaux et bâtiments existants (sauf bâtiments d'habitation collective <=28m)	Arrêté du 29 mai 1997	Règles PS92
1 ^{er} juillet 1998	Bâtiments d'habitation collective <=28m		
1 ^{er} mai 2011	Bâtiments	Décrets n°2010-1254 et	Règles Eurocode 8

		n°2010-1255 du 22 octobre 2010, modifiant les articles R.563-1 à R.563-8 du code de l'environnement et créant l'article D.563-8-1. Arrêté du 22 octobre 2010	(Règles PS 92, avec accélérations modifiées, jusqu'au 1 ^{er} janvier 2014)
1 ^{er} janvier 2012	Ponts	Arrêté du 26 octobre 2011	Règles Eurocode 8 (Règles Guide AFPS 1992, avec accélérations modifiées, jusqu'au 1 ^{er} avril 2012)
1 ^{er} janvier 2013	Installations classées pour la protection de l'environnement	Arrêté du 24 janvier 2011 modifiant l'arrêté du 4 octobre 2010	
1 ^{er} juillet 2014	Canalisations de transport de gaz naturel ou assimilé, d'hydrocarbures et de produits chimiques	Arrêté du 5 mars 2014	Règles Eurocode 8



Centre scientifique et technique
Direction de Prévention et Risques
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34