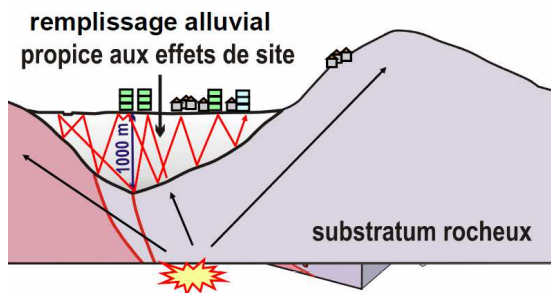
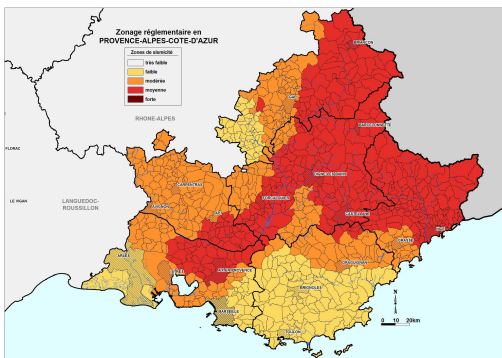
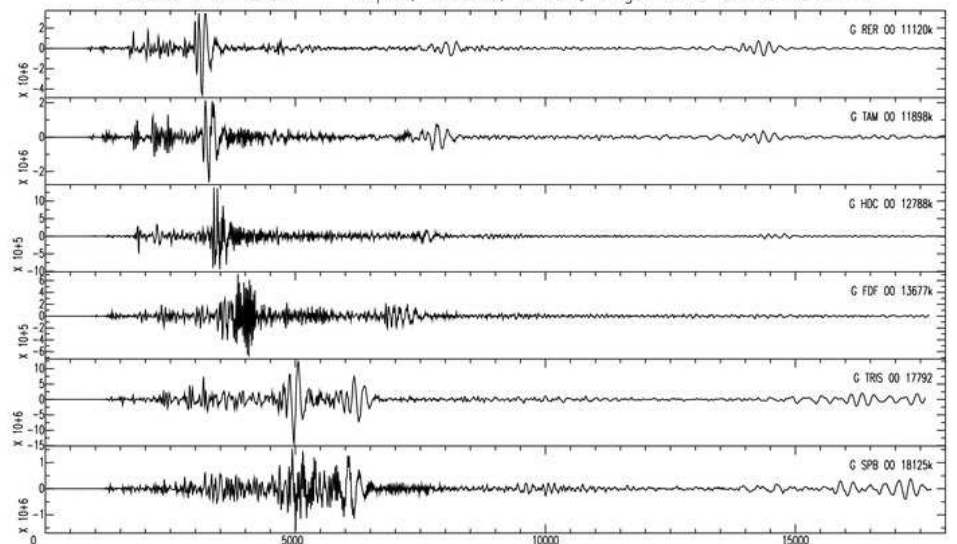


Études préalables à l'établissement du Plan de Prévention des Risques sismiques

Microzonage des communes de Grans, Salon et Pélissanne



March 11th 2011 - Japan, Honshu, M=8.9, origin time 05h46m24s UTC



Études préalables à l'établissement du Plan de Prévention des Risques sismiques

Microzonage des communes de Grans, Salon de Provence et Pélissanne

date : octobre 2015

auteur : Direction Territoriale Méditerranée

responsable de l'étude : Etienne Bertrand

participants : Etienne Bertrand, Philippe Langlaude, Michel Pernoud, Diego Mercerat

résumé de l'étude :

Ce rapport présente une mise à jour des études menées par le CETE Méditerranée en 1998 puis 2005 en vue de la prescription d'un PPR sismique sur les communes de Grans, Salon de Provence et Pélissanne. Cette mise à jour a pour objectif de :

- prendre en compte le passage à la nouvelle réglementation parasismique française (décret n°2010-1255 du 22 octobre 2010),
- vérifier les types de sols sur les communes par l'application d'expérimentations sismologiques nouvelles (analyse en réseau du bruit de fond sismique)
- considérer les données géotechniques, géologiques et sismologiques nouvelles éventuellement disponibles dans la région.

Les éléments du rapport CETE Méditerranée daté de 2005 sont ainsi repris ici et modifiés le cas échéant.

zone géographique : Département des Bouches du Rhône

nombre de pages : 49

n° d'affaire : C13MN0038

maître d'ouvrage : DDTM13

Historique des versions du document

Version	Date	Commentaire
0	27/10/2014	Version initiale
2	13/11/2014	Prise en compte des remarques de E. Trielli
3	09/07/2015	Prise en compte des remarques de la DDTM13
4	27/10/2015	Prise en compte des remarques de la DDTM13
5	28/01/2016	Prise en compte des remarques de la DDTM13

Affaire suivie par

Etienne BERTRAND - Service Risque Sismique

Tél. : 04 92 00 81 61/ Fax : 04 92 00 81 39

Courriel : etienne.bertrand@cerema.fr

Rédacteur

Etienne BERTRAND- Service Risque Sismique

Relecteur

Elise TRIELLI - Service Risques Géologiques, Géotechnique et Chaussées

SOMMAIRE

1	Introduction.....	7
1.1	Études précédentes.....	7
1.2	Objectifs de l'étude.....	7
1.3	Contexte réglementaire en France	7
2	Contexte physique	10
2.1	Contexte géographique	10
2.2	Contexte géologique.....	11
2.3	Contexte géotechnique.....	15
2.4	Contexte hydrogéologique.....	18
3	Évaluation de l'aléa régional	18
3.1	Approche réglementaire.....	18
3.2	Séismes historiquement ressentis sur la zone d'étude.....	20
3.3	Connaissances nouvelles	22
3.4	Accélérogrammes de référence	22
4	Évaluation de l'aléa local (Microzonage).....	23
4.1	Les effets de site lithologiques	23
4.1.1	<i>Approche réglementaire.....</i>	<i>24</i>
4.1.2	<i>Enregistrement de bruit de fond.....</i>	<i>25</i>
4.1.3	<i>Spectres de réponse élastiques.....</i>	<i>33</i>
4.2	Les effets de site topographiques	44
5	Conclusion	47

1 Introduction

1.1 Études précédentes

Un Plan d'Exposition aux Risques avait été prescrit en 1985 pour les aléas inondation, mouvement de terrain et séisme sur les communes de Salon de Provence, Grans et Pélissane. Des études préliminaires ont été réalisées en 1988 par le BRGM et le CETE Méditerranée pour les risques "mouvements de terrain" et "séisme". Ces études ont été complétées en 2005 par le CETE Méditerranée afin de prendre en compte :

- L'amélioration de la connaissance et de l'appréciation du niveau de sismicité des failles.
 - L'évolution des méthodes d'évaluation des effets de site.
 - Les avancées dans le domaine de l'approche de la vulnérabilité des structures aux séismes.
- En effet, des projets de scénario de risque ont été conduits en France notamment (GEM-GEP et RISKUE). La réalisation de ces scénarii a conduit à mettre au point différentes méthodes d'approche statistique de la vulnérabilité.

L'évolution de la réglementation en 2010 a poussé la DDTM13 à demander au service Risque Sismique de la DTER MED du CEREMA une nouvelle mise à jour des études. Celle-ci permet également de bénéficier des derniers progrès en matière de définition de l'aléa régional et local.

1.2 Objectifs de l'étude

La mission consiste à actualiser les études effectuées en 1988 et 2005 en vue de la prescription d'un PPR sur les risques sismique et éventuellement mouvements de terrain sur les communes de Grans, Salon de Provence et Pélissane. Les données sur l'aléa sismique seront revues et complétées si nécessaires à l'aide de techniques récentes ou données récemment acquises. Le microzonage sismique sera notamment mis à jour en tenant compte de la nouvelle réglementation parasismique nationale. Ainsi, la technique du bruit de fond sismique en réseau sera utilisée en plusieurs points de la zone afin de préciser ou confirmer les colonnes de sol définies dans les études antérieures. Une recherche de sondages géotechniques nouveaux sera effectuée et les études nouvelles sur les failles au voisinage de la zone d'étude seront analysées. La carte réglementaire proposée sera actualisée en fonction des cartes des aléas naturels induits pris en compte et de microzonage sismique conformément aux remarques émanant de la DDTM13.

1.3 Contexte réglementaire en France

À la date de rédaction de ce rapport et pour l'essentiel, la réglementation parasismique à mettre en œuvre sur le territoire national est inscrite dans les articles L563-1 du Code de l'Environnement et L112-18 du Code de la Construction et de l'Habitat. Cette réglementation se réfère :

- au décret n°2010-1254 du 22 octobre 2010 portant sur la Prévention du Risque Sismique,
- au décret n°2010-1254 du 22 octobre 2010 portant sur la délimitation des zones de sismicité du territoire français,
- à l'arrêté du 22 octobre 2010 décrivant la classification et les règles de construction parasismique pour les bâtiments entrants dans la classe des ouvrages à risque normal (ORN), avec les arrêtés modificatifs suivants dont le dernier en date du 15 septembre 2014.
- à l'arrêté du 26 octobre 2011 décrivant la classification et les règles de construction parasismique des ponts,

- à l'arrêté du 24 janvier 2011 décrivant les règles de construction parasismique des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE).

La réglementation parasismique se base sur un zonage sismique datant de 2005 découpant le territoire national en cinq zones de sismicité croissante : zone 1 d'aléa très faible, zone 2 d'aléa faible, zone 3 d'aléa modéré, zone 4 d'aléa moyen et zone 5 d'aléa fort (réservé aux Antilles française). Ce découpage communal est présenté dans la figure suivante.

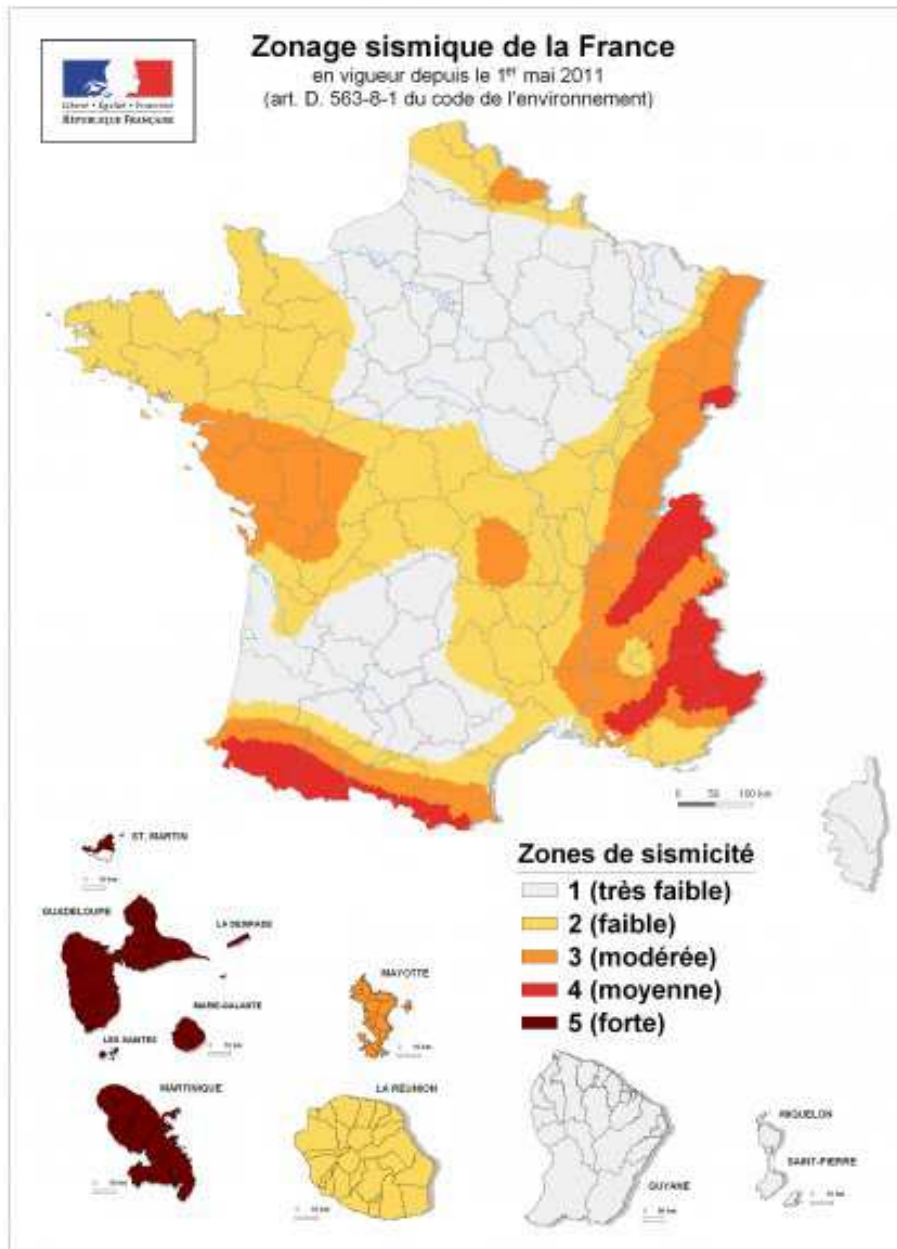


Figure 1: Zonage sismique réglementaire de la France.

Zone de sismicité	Catégorie d'importance d'ouvrages		
	II	III	IV
1	0,4	0,48	0,56
2	0,7	0,84	0,98
3	1,1	1,32	1,54
4	1,6	1,92	2,24
5	3,0	3,6	4,2

Tableau 1 : Accélération nominales d'ancrage (en m/s²) à prendre en compte selon la réglementation en vigueur en 2014 selon la catégorie d'importance de l'ouvrage (ORN) et la zone de sismicité.

2 Contexte physique

2.1 Contexte géographique

La zone d'étude se trouve au Nord-Nord-Ouest du département des Bouches-du-Rhône. Elle s'est développée au contact de deux grandes unités morphologiques dont la limite suit sensiblement le tracé de l'autoroute A7 :

- A l'Ouest l'extrémité orientale de la plaine de la Crau
- A l'Est les premiers reliefs liés à la chaîne des Costes

La plaine de la Crau: avec une altitude moyenne comprise entre 70 et 90 m, elle constitue une zone particulièrement plane qui occupe presque les deux tiers du territoire de la commune.

L'extrémité de la chaîne des Costes : on y rencontre deux types de relief:

- Au Nord un relief assez vif constitué par les calcaires et marno-calcaire Crétacé. On y observe des escarpements importants avec des dénivellations pouvant atteindre 100 m.
- Au Sud des reliefs peu marqués de collines et petits escarpements constitués par les molasses tertiaires.
- Au Sud, la plaine alluviale de la rivière *Touloubre* qui traverse les communes de GRANS et PELISSANNE d'Ouest en Est, caractérisée par une morphologie plus méandriforme sur la commune de GRANS. Les villages de GRANS et PELISSANNE sont situés le long de la rivière. Au Sud de GRANS, le paysage est marqué par de faibles reliefs formant de petits plateaux, localement des buttes témoin.

Le canal de Craponne traverse également la commune de PELISSANNE dans une direction globale Nord-Sud.



Figure 2 : Photo aérienne des communes de Salon, Grans et Pélissanne.

2.2 Contexte géologique

Les différentes formations sédimentaires qui affleurent sur la commune (ou dans ses environs), permettent de reconstituer l'histoire géologique de cette région de la Provence depuis le début de l'ère secondaire. Ses principales étapes sont les suivantes:

- à une sédimentation sous faible épaisseur d'eau au Trias (entre 230 et 195 MA¹) fait suite une sédimentation essentiellement carbonatée franchement marine au jurassique et au Crétacé inférieur (entre 195 et 110 MA),
- à la fin du Crétacé inférieur, il y a 120 MA les mouvements prémonitoires à la formation de la chaîne pyrénéo-provençale entraînent la surrection et l'émergence d'une partie de la Provence, constituant ce que l'on appelle l'"isthme durancien" sur lequel, en conséquence d'une érosion subaérienne, se développe une surface karstique où seront piégées des bauxites,
- il y a 45 MA (Eocène supérieur) la formation de la chaîne pyrénéo-provençale s'exprime par la mise en place de grands chevauchements et localement de nappes,

¹ Millions d'Années

- l'Oligocène (-40 à -20 MA) est essentiellement caractérisé par une tectonique en distension avec une sédimentation détritique puis carbonatée,
- premiers mouvements alpins fin Oligocène,
- sédimentation marine épicontinentale au Miocène sur des bassins qui peuvent être indépendants des bassins Oligocène avec une phase terminale lacustre,
- mouvement alpin post Miocène, provoquant les chevauchements de la chaîne des Costes vers le Sud.

Un levé au 1/10000 réalisé en 1988 par le CETE méditerranée en collaboration avec le BRGM précise la géologie de la commune. Une mise à jour a été effectuée dans le cadre de la présente étude à partir des éléments disponibles. Les descriptions qui suivent se bornent à l'aspect lithologique des formations et à la localisation de leurs principaux affleurements.

La sédimentation marine Crétacé (lithologie n°1, figure 4)

Les formations rapportées à cette période affleurent sur les communes de SALON et PELISSANNE en formant :

- des reliefs vifs du Nord de la commune de SALON (Crétacé). Il s'agit essentiellement de calcaires compacts bioclastiques (faciès Urgonien du Barrémien), série chevauchante sur les calcaires Hauterivien où certains niveaux sont composés de calcaire argileux.
- des îlots au sein des alluvions dans la partie Sud de la commune PELISSANNE. Ils forment au Nord les reliefs du Roc de Caronte. Dans la partie Sud, leur pendage très variable montre que ces terrains sont affectés par de nombreux replis. Cette formation représente le substratum d'un bassin miocène particulièrement bien représenté au Nord de PELISSANNE. Ce substratum forme un repli anticlinal faillé au niveau du Roc de Caronte qui vient chevaucher vers le Sud le bassin miocène dont les sédiments sont fortement redressés au contact. Cette faille, qui souligne le chevauchement, porte le nom de faille des Costes. La base du bassin est probablement occupée par un conglomérat oligocène qui n'affleure pas au niveau de la commune, mais qui a été reconnu près du Château de La Barben à l'Est. Cette formation détritique, discordante sur les terrains crétacés a une épaisseur inconnue, probablement faible. Localement, des brèches burdigaliennes recouvrent vraisemblablement les conglomérats oligocènes. Elles forment des placages de faible épaisseur.

Les sédiments jurassiques-crétacés n'affleurent pas sur la Commune de Grans, mais peuvent être observés plus au Sud, près de Lançon.

La sédimentation marine Miocène (lithologies n°3,4,5, figure 4)

Ces sédiments affleurent au droit des trois communes.

A l'Ouest de SALON et au Nord de PELISSANNE on observe une importante série Miocène (Helvétien) constituée d'une alternance de marnes sableuses et de molasses calcaires. On y note deux unités bien distinctes:

- le Miocène tabulaire de Vernègues qui occupe toute la partie la plus à l'Ouest;
- le Miocène plissé de SALON, qui se développe jusqu'au lieu dit les "Manières" et borde au Sud la série précédente.

Le contact entre ces deux unités s'effectue le long d'une faille oblique. Il est possible de décrire la structure plissée et écaillée du Miocène de SALON.

Au pli anticlinal des Manières que l'on découvre au Nord de la tranchée du canal succède le synclinal de St-Norbert. Le flanc Nord de ce dernier pli est séparé par faille oblique de l'unité tabulaire du Val de Cuech. La position relative des molasses révèle un enfouissement (sous-charriage) du dispositif tectonique de Val de Cuech sous celui de St Norbert. L'exaltation du phénomène à l'Ouest (Semboules) se traduit par un froissement des couches et une individualisation d'écaillés.

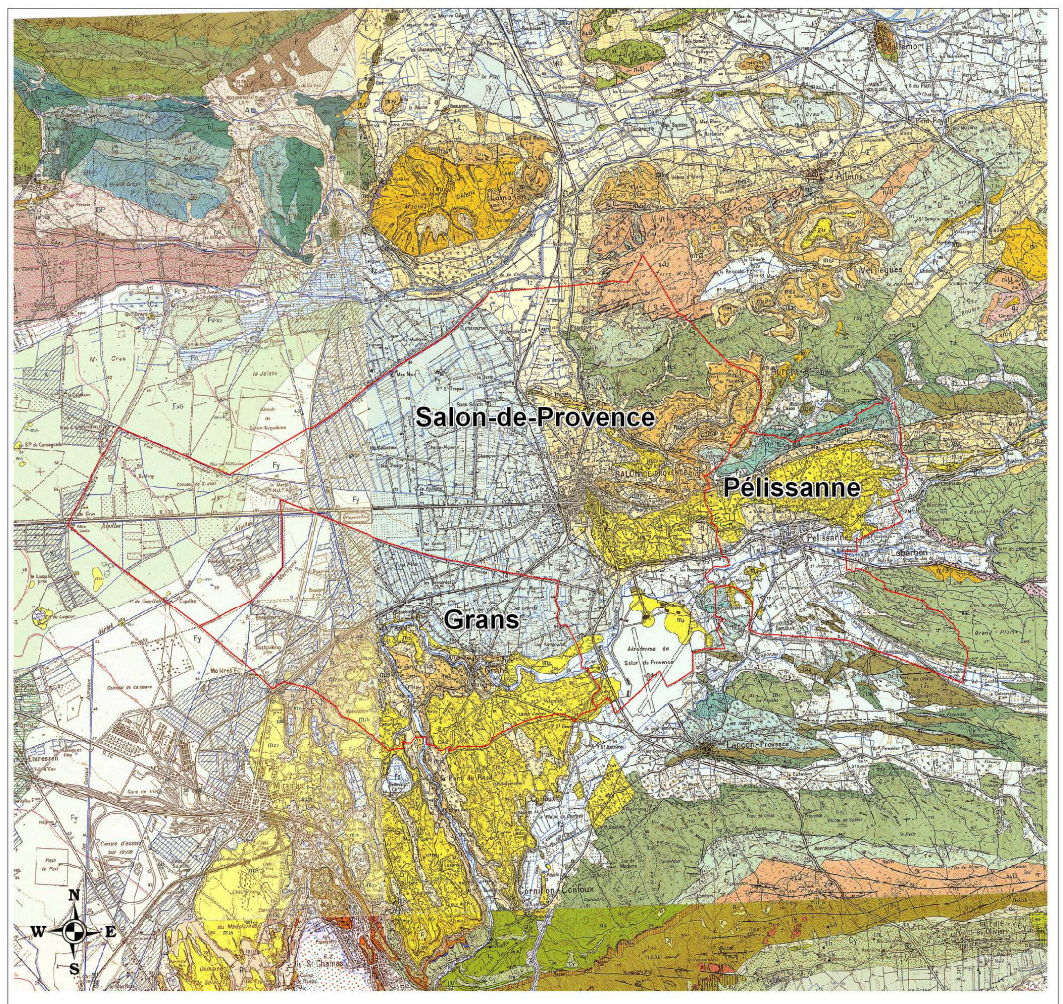
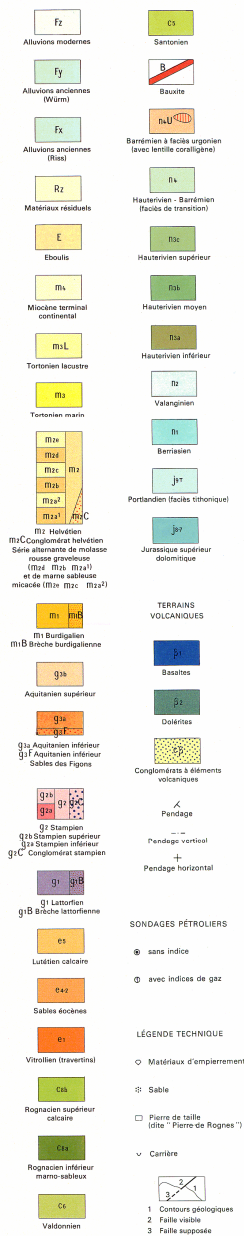


Figure 3 : Géologie des communes de Salon, Grans et Pélissanne

(extrait de la carte géologique au 1/50 000, éditions BRGM)

Les déformations tectoniques du Miocène de la région salonnaise sont en relation avec un déplacement vertical, suivi d'un mouvement de translation vers le Sud, du horst d'Aurons Vernègues.

La flexure située à la limite des deux secteurs, tabulaire et plissé, évoluant ultérieurement en faille, témoigne du déplacement de bas en haut des formations crétacées. Le plissement du Miocène, accompagné d'un écaillage des flancs de plis, traduit de son côté une poussée vers le SSW ne pouvant avoir pour origine qu'un déplacement du horst dans cette direction. La preuve d'un tel déplacement nous est fournie par la position chevauchante du Jurassique et du Crétacé de Caronte sur le Miocène de Pélissanne. Ces mouvements tectoniques datent de la fin du Miocène.

Sur la Commune de GRANS, au Sud, la série, subhorizontale, d'une épaisseur moyenne de 30m, forme de petits plateaux. Elle est surmontée par la molasse tortonienne.

L'effondrement de la Crau est contemporain de ces mouvements. Cependant, l'évolution du réseau hydrographique de la Durance, au nord de SALON, montre un nouveau rejet des failles de la bordure Ouest à la fin du Pliocène (d'après C. Gouvet).

L'unité plissée de SALON est surmontée par la molasse Tortonienne qui peut localement être discordante sur le Crétacé: (Aérodrome de SALON), son épaisseur est de 40 m environ.

Les dépôts quaternaires (lithologies n°2,6,7 et 8, figure 4)

Alluvions anciennes, Fy :

La quasi totalité de ces dépôts est constituée par les alluvions quaternaires de la Crau composées essentiellement de galets à liant limoneux. Suite à l'affaissement du seuil de Lamanon, la Durance abandonne son lit d'Eyguières. Sollicitée par une mer en régression, elle emprunte le sillon effondré et répand ses cailloutis dans la nouvelle dépression.

Cet affaissement semble s'être poursuivi tardivement créant des accidents nord-sud depuis le seuil de Lamanon. Les cailloutis de la Crau ont été déposés au Wurm, mais une partie du matériel détritique qui les constitue appartient à une terrasse rissienne remaniée. L'épaisseur de cette formation décroît globalement d'Ouest en Est. Ainsi, au Sud Ouest de Salon la puissance des cailloutis n'excède pas 3 à 5 m alors que l'épaisseur moyenne peut atteindre 20 à 30 m. La présence d'accidents Nord-Sud a pu également induire localement des surépaisseurs de cailloutis par affaissement d'un compartiment du substratum (13 m de cailloutis au niveau de la Gare de Salon).

Dans l'ancien lit de la Durance, l'épaisseur des dépôts augmente pour atteindre localement 150 m. Sous les cailloutis on trouve alors des niveaux de graviers surmontant des dépôts silteux. Les données de sondages, les coupes géologiques interprétées et les profils géophysiques effectués dans la plaine de la Crau mettent en évidence un niveau continu de poudingue très induré de 2 mètres d'épaisseur vers 1 à 3 mètres de profondeur. Dans cette formation, la vitesse de propagation des ondes P serait de l'ordre de 1200 m/s.

Eboulis, E:

Des éboulis et éluvions divers se sont déposés en pied des anciens reliefs soit sur les calcaires et molasses, soit pour partie sur les dépôts Wurmiens. Ils forment une bande qui limite les reliefs calcaires et molassiques. On y distingue deux compartiments séparés par un petit relief de molasse (LE TOURET). Au Nord mis à part une frange en pied des reliefs, l'épaisseur de ces dépôts atteint 10 à 20 m. Au Sud de ce relief les épaisseurs sont beaucoup plus faibles et n'excèdent pas 3 à 5 m.

Des matériaux résiduels (Rz) sont également représentés à l'affleurement sur la commune de SALON ; Il s'agit d'une formation provenant d'une accumulation sur place d'éléments résiduels d'anciennes terrasses mêlés à des éluvions (dégradation du substratum des anciens épandages alluviaux) et à des apports colluviaux auxquels s'ajoutent les limons d'irrigation.

Alluvions modernes, Fz :

On inclura également dans les dépôts quaternaires les alluvions de la Touloubre. Leur épaisseur connue est toujours inférieure à 10 m.

La Figure 4 présente la carte géologique mise à jour pour la présente étude.

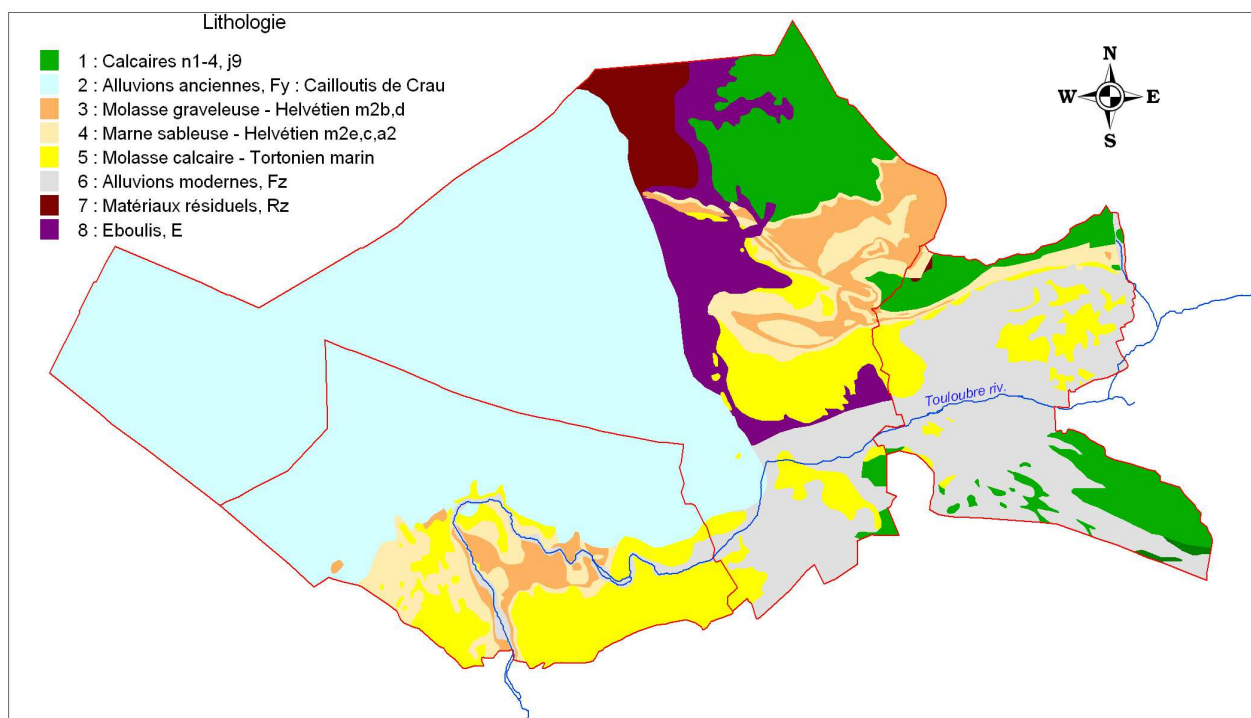


Figure 4 : Géologie détaillée des communes de Salon, Grans et Pélissanne, levée au 1/10 000. Trait rouge : limite des communes

2.3 Contexte géotechnique

Les études de 2005 ont permis d'obtenir près de 150 sondages sur les communes de Salon, Grans et Pélissanne à partir de la BSS (banque de données du sous-sol, <http://infoterre.brgfm.fr>) et des archives de la DTER Méditerranée. Cependant, la plupart de ces sondages ne comportent pas d'essai géotechnique. Ils nous permettent toutefois de connaître la nature et l'épaisseur des niveaux quaternaires.

Une nouvelle recherche n'a pas permis de trouver des sondages pertinents pour l'étude plus récents. Cependant certaines caractéristiques mécaniques ont pu être trouvées dans certains sondages analysés. Ces paramètres entrent dans la description des colonnes de sol et permettent de contraindre la modélisation numérique de la réponse des sites. Elles sont rappelées ici.

Limons argileux	E compris entre 2 et 15 MPa Pl compris entre 0,3 et 0,6 MPa
Molasse miocène	E compris entre 100 et 150 MPa Pl > 3,5 MPa
Cailloutis	E > 20 MPa Pl > 2,5 MPa

E: module pressiométrique Pl: Pression limite Q facteur de qualité

De plus, pour réaliser la carte de microzonage sismique des effets de site, les caractéristiques mécaniques retenues pour les différentes formations ont été évaluées par analogie avec des terrains équivalents connus dans la région. Les données géotechniques nécessaires au microzonage sismique sont résumées dans le tableau suivant:

NATURE	MASSE VOLUMIQUE g/cm ³	VITESSE DES ONDES - S km/s	FACTEUR DE QUALITE Q
Alluvions et Cailloutis récents (Fz, Rz)	1,8	0,1 -0,3	30
Alluvions anciennes et Ebouli (E,Fy)	2,0	0,5 -0,8	50
Molasses calcaires et Molasses graveleuses (m3-m1, m2d-m2b)	2,0	1,2	70
Molasses et Marnes sableuses (m2c. m2a2 - m2e)	2,0	0,8	40
Calcaires (n1-4, j9)	2,4	2,5	100

Tableau 2 : Caractéristiques géotechniques moyennes retenues pour les principales formations lithologiques

Les vitesses de propagation des ondes S ont été estimées dans les PER de 1988 à partir de valeur standard. Ces caractéristiques permettent une première évaluation de la qualité géomécanique des matériaux. Ainsi, selon les normes EC8, un rocher est caractérisé par une vitesse de propagation de sondes S supérieure à 800 m/s.

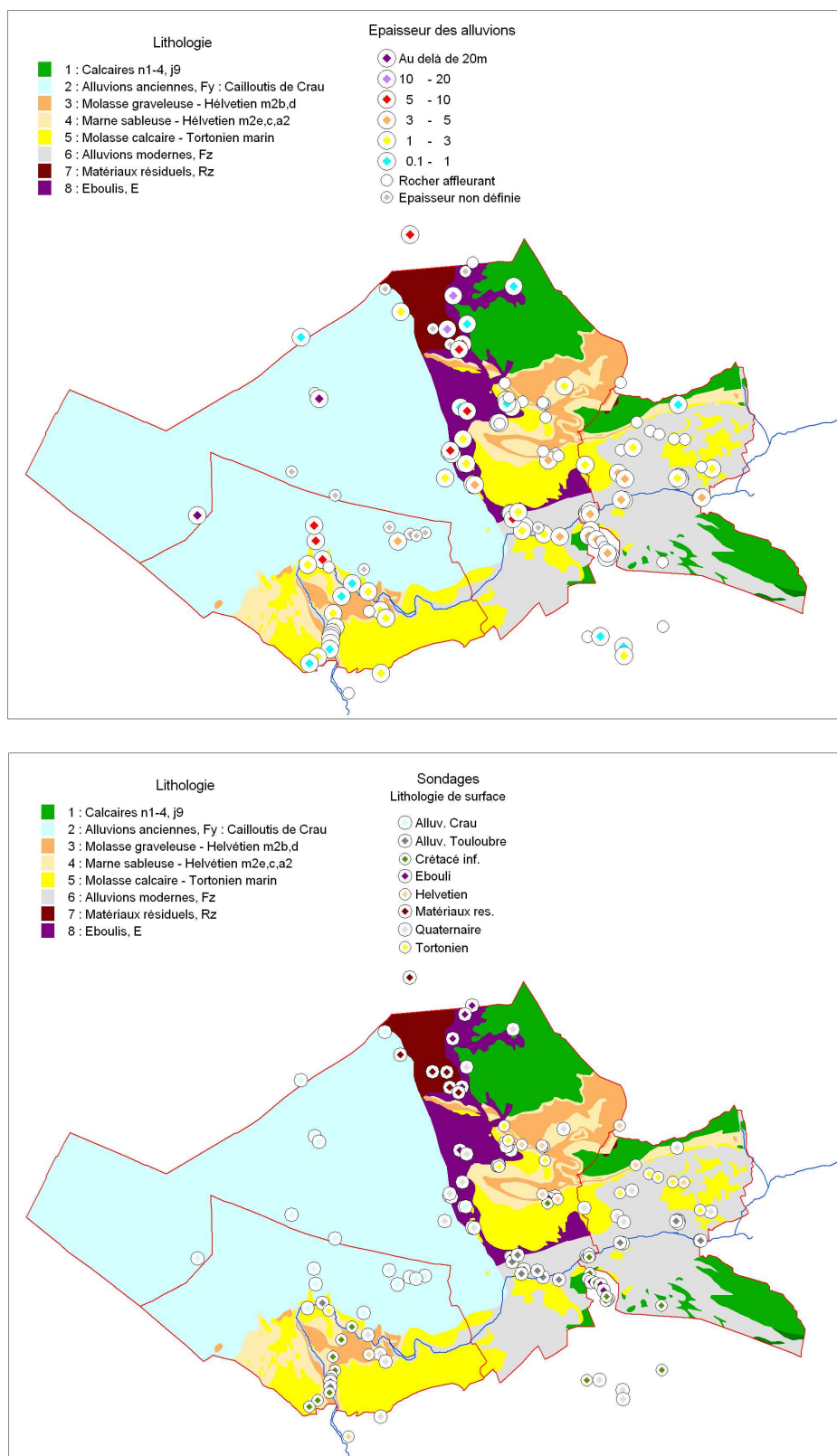


Figure 5 : Sondages géotechniques analysés

2.4 Contexte hydrogéologique

Le réservoir aquifère de la Crau s'étend sur environ 50000 ha. Il est constitué de cailloutis grossiers déposés par l'ancienne Durance lorsqu'elle passait par le seuil d'Eyguières au Villafranchien (Crau d'Arles verdoyante) ou par le seuil de Lamanon au quaternaire récent (Crau de Miramas).

Le substratum des cailloutis le plus souvent grés-marneux a un modelé très irrégulier, il affleure même en certains points. En fonction de ce modelé, l'épaisseur des cailloutis varie entre 0 et 50 m (Sillon de Richebois). Ils sont recouverts d'une couche de limons qui constituent une richesse pour les agriculteurs.

La perméabilité est élevée et la transmissivité, très variable en fonction de l'épaisseur de l'aquifère, atteint 0,5 m²/s dans le sillon qui longe la bordure Est. Lorsque la nappe est libre ce qui est le cas le plus général, les coefficients d'emmagasinement s'étagent de 1.10⁻² à 6,5.10⁻².

Le débit moyen de la nappe d'après diverses estimations serait compris entre 5 et 7,5 m³/s à l'aval près des exutoires.

L'alimentation de la nappe provient pour les 3/4 de l'infiltration des excès d'irrigation. Leur suppression ou la modification technique d'arrosage provoqueraient une baisse généralisée et même son tarissement.

La nappe s'écoule du col de Lamanon en direction d'un réseau de drainage établi en bordure du Rhône et de la mer. Dans la zone considérée la nappe s'établit au NE à la côte + 90 et au SW côte + 65.

La molasse tortonienne, ainsi que le sommet de l'Helvétien sont situés au-dessus du niveau de base hydrogéologique imposé par la Touloubre et ne sont donc pas aquifères.

Les terrains de l'Helvétien ont des caractéristiques hydrodynamiques variables tant verticalement que latéralement, les variations de faciès étant importantes. Dans les terrains les plus aquifères, (molasses, quelques niveaux sableux), la perméabilité est cependant relativement faible, juste suffisante pour l'alimentation individuelle.

Les calcaires crétacés et jurassiques doivent être le lieu de circulations profondes dans un karst développé. Les caractéristiques de ce système karstique sont peu connues (peu de forages ayant exploré ces niveaux).

3 Évaluation de l'aléa régional

3.1 Approche réglementaire

La zone d'étude est classée en zone de sismicité moyenne selon le décret n°2010-1255 du 22 octobre 2010 (Figure 6). Par conséquent, l'accélération maximale de référence au niveau d'un sol rocheux de la classe A au sens de la norme NF EN 1998-1 (Eurocodes 8), dénommée a_{gr} , est égale à 1,6 m/s² dans cette zone. Le spectre de réponse élastique à 5% d'amortissement associé est présenté sur la figure Figure 7. Ce spectre de réponse élastique représente l'aléa régional à prendre en compte pour un bâtiment (ORN) de catégorie d'importance II selon la classification précisée dans la réglementation parasismique.

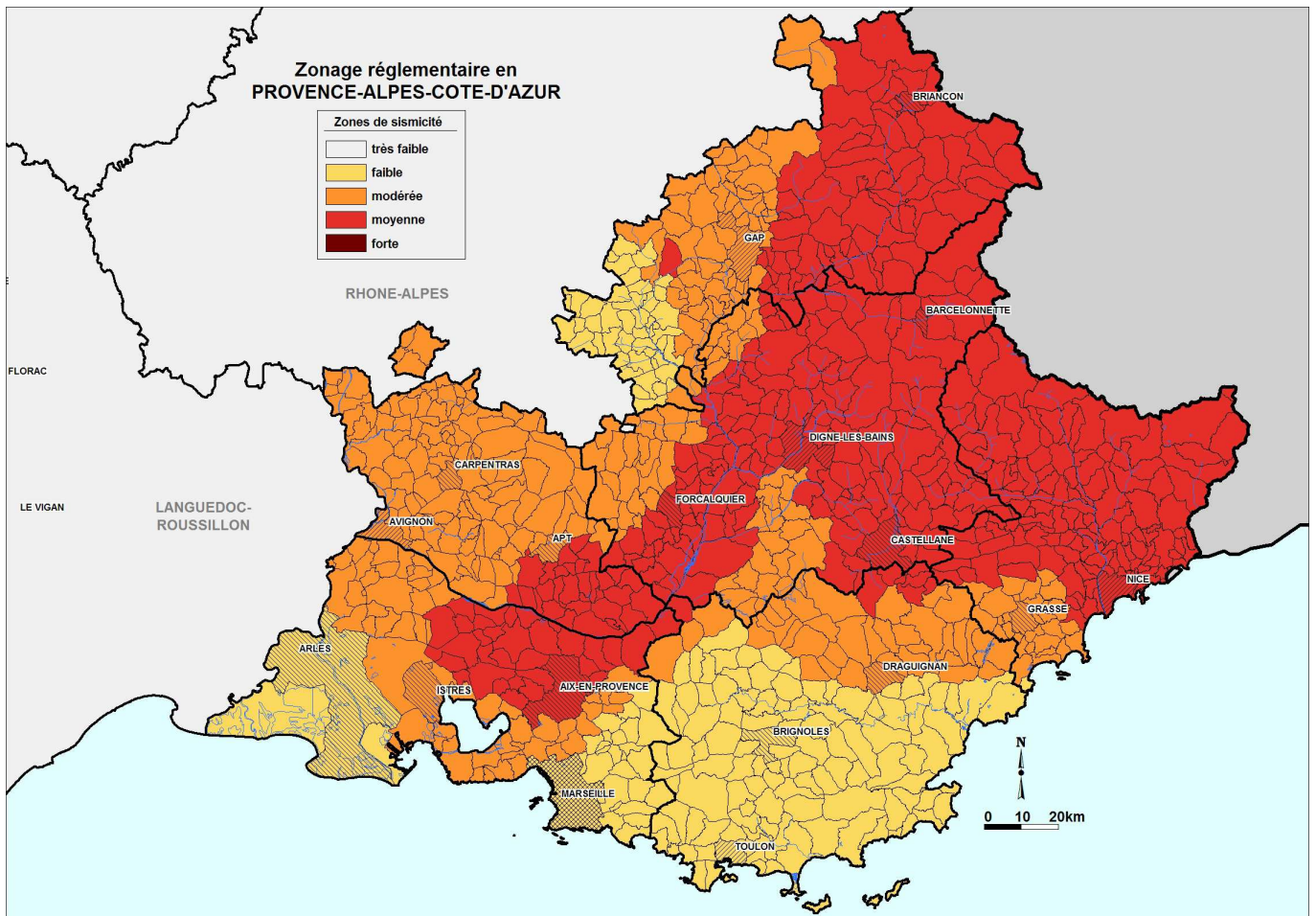


Figure 6 : Zonage réglementaire en vigueur en 2014 en région PACA

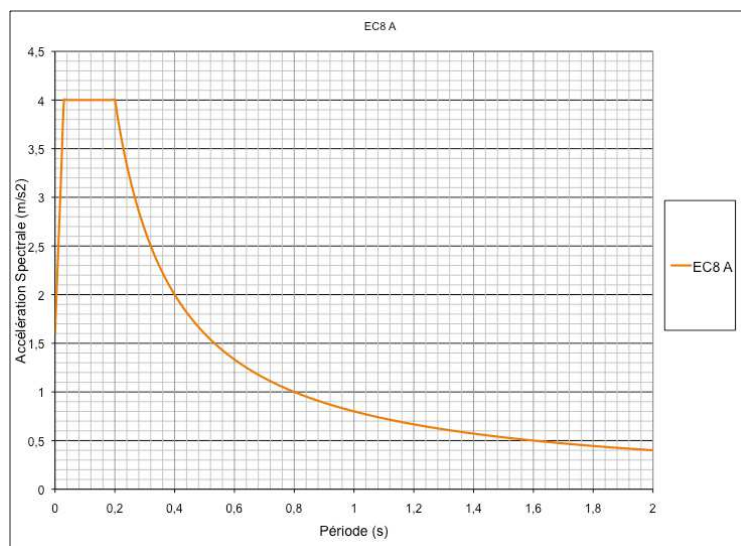


Figure 7 : Spectre de réponse élastique réglementaire pour les sols rocheux de classe A selon la norme NF EN 1998-1 pour Salon, Grans et Pélissanne (5% d'amortissement)

Le zonage sismique en vigueur actuellement dérive d'une étude probabiliste menée par un groupement de scientifiques et dirigée par GEOTER (GEOTER, 2002). Cette étude est basée sur une analyse de la sismicité historique et instrumentale combinée à une étude sismotectonique intégrant les aspects géologiques, géodynamiques et tectoniques.

3.2 Séismes historiquement ressentis sur la zone d'étude

L'étude de la sismicité historique en France s'appuie sur le fichier SISFRANCE. Cette liste rassemble toutes les données macro sismiques disponibles relatives pour près de 5 000 évènements recensés depuis le Moyen-Age. Ce fichier comporte également les données relatives aux séismes d'origine étrangère ressentis en France.

Pour chaque séisme, sont précisées:

- l'origine: proche (P) ou lointaine (L) ; sont considérés comme proche, les séismes dont l'épicentre est distant de moins de 30 km du site,
- la date et l'heure,
- la relation éventuelle du séisme avec d'autres évènements: précurseurs ou répliques,
- la localisation de l'épicentre: coordonnées en longitude et latitude (degrés sexagésimaux) précédées d'un code (A à E) exprimant la fiabilité de la localisation,
- l'intensité épiscopentrale (échelle MSK) précédée d'un code (A à C, ou I) traduisant la fiabilité de cette évaluation (Tableau 3),
- l'intensité connue ou vraisemblable sur la commune, ainsi que celle atteinte en diverses localités proches.

Type de secousse)

: choc principal ; R : réplique ; Z : série de secousses non différenciées

CHARACTERISTIQUES MACROSISMQUES

Io : intensité épiscopentrale, échelle MSK

IMAX : intensité ponctuelle maximale observée

NOBS : nombre d'observations

N. SOURCES : nombre de références bibliographiques

QI : code de qualité de la valeur de l'intensité épiscopentrale

A : sûre, distribution serrée et valeur précise des intensités ponctuelles maximales

B : assez sûre, distribution moins serrée et valeur précise des intensités ponctuelles maximales

C : incertaine, distribution éparse et valeur peu précise des intensités ponctuelles

K : assez sûre, issue d'un calcul fondé sur une loi d'atténuation (Sponheuer)

E : arbitraire, compte tenu de la faible quantité et de l'éloignement des intensités ponctuelles

QPOS : code de qualité de la localisation de l'épicentres

A : (quelques km) - précise dans une aire d'intensité maximale bien circonscrite par une isoséiste

B : (autour de 10 km) - assez sûre dans une aire d'intensité maximale relativement bien circonscrite par une isoséiste

C : (entre 10 et 20 km) - imprécise dans une aire d'intensité maximale insuffisamment délimitée par une isoséiste

D : (de quelques km à 50 km) - fortement supposée dans une aire d'intensité macrosismique non limitée par une isoséiste

E : (supérieure à 50 km) - arbitraire, compte tenu de la grande dispersion des observations ponctuelles

Tableau 3 : Légendes du fichier SISFRANCE

Les séismes de la base de données, pour lesquels l'intensité épiscopentrale n'est pas disponible, n'ont pas été considérés dans cette étude car ils sont trop mal connus.

A partir du fichier SISFRANCE, la distance entre chaque épiscopentrale et le centre de Salon-de-Provence, pris comme référence, a été calculée. Le Tableau 4 présente les caractéristiques des séismes ayant provoqué les plus fortes secousses sur la zone d'étude. Ce tri dans la sismicité est expliqué dans les paragraphes suivants par l'application de lois empiriques d'atténuation du signal sismique avec la distance.

Les analyses réalisées à partir du fichier SISFRANCE montrent que l'intensité maximale observée sur Salon de Provence est consécutive au tremblement de terre provençal du 11 juin 1909, dont l'origine se situe à proximité de LAMBESC et qui atteint l'intensité IX à LAMBESC causant de sérieux dommages.

Indépendamment des répliques de ce séisme destructeur dont certaines ont été ressenties assez fortement (septembre-octobre 1909, novembre 1910), des événements d'origine plus lointaine comme ceux du 23.12.1887, 13.02.1509, 14.08.1708, 15.06.1731 ou d'origine proche tel celui du 14.11.1887 ou supposée proche tel ceux du 1.02.1622 et du 03.07.1756 ont vraisemblablement été fortement ressentis sur la commune avec une intensité supérieure ou égale à V.

Les séismes d'origine lointaine se concentrent dans 3 ensembles principaux :

- Moyenne Durance (séisme de 1509, 1708, 1913)
- Alpes et côte ligure (séismes de 1854, 1866, 1884, février 1887)
- Vallée du Rhône (séisme de 1873).

Les séismes proches sont à rapporter à 3 secteurs:

- chaînons des Costes et de la Trévaresse (séismes de 1783, 1909 et répliques)
- région de Cavillon (séismes de 1731, 1763, 1863, novembre 1887),
- environs immédiats de SALON (séismes de 1934).

N° CETE	Jour	Mois	Année	Localisation	Longitude	Latitude	Q POS	Io	QI	IMAX	Nb OBS	Nombre de sources	Distance au point de référence (km)	Magnitude estimée (H'Faiedh)
1	1	11	1910	ENVIRONS DE SALON-DE-PROVENCE	5°06'	43°39'	D	V	B	V	3	1	1	3,8
2	11	6	1909	TREVARESSE (LAMBESC)	5°19'	43°39'	A	VIII-IX	A	IX	351	65	18	5,9
3	25	3	1783	ENVIRONS DE MALLEMORT	5°11'	43°44'	D	VI	C	VI	3	1	12	4,4
4	22	9	1909	TREVARESSE (LAMBESC)	5°18'	43°39'	B	VI-VII	B	VI-VII	5	1	16	4,7
5	22	5	1910	TREVARESSE (LAMBESC)	5°16'	43°39'	D	VI	B	VI	7	6	13	4,4
6	10	7	1909	TREVARESSE (LAMBESC)	5°19'	43°38'	D	VI	C	VI	13	3	17	4,4
7	15	6	1731	ENVIRONS DE CAVAILLON	5°02'	43°50'	D	VI-VII	B	VI-VII	5	4	22	4,7
8	14	11	1887	ENVIRONS DE CAVAILLON	5°02'	43°50'	A	VI-VII	A	VI-VII	29	6	22	4,7
9	12	7	1763	ENVIRONS DE MAUBEC-CAVAILLON	5°13'	43°50'	D	VI-VII	B	VI-VII	13	13	23	4,7
10	14	8	1708	VALLEE DE DURANCE (MANOSQUE)	5°46'	43°49'	C	VIII	B	VIII	18	32	57	5,6
11	13	12	1509	VALLEE DE DURANCE (MANOSQUE)	5°47'	43°50'	D	VIII	C	VIII	2	9	59	5,6

Tableau 4: Informations SISFRANCE sur les séismes étudiés, la magnitude est estimée à partir de la formule de H'Faiedh (1983) : $M=0.6I_o+0.78$.

3.3 Connaissances nouvelles

Depuis l'étude de GEOTER ayant produit le zonage sismique de la France, un certain nombre d'études ont été menées sur des failles au voisinage de Salon, Grans, Pélissane. On peut citer :

- L'identification et hiérarchisation des failles actives de la Région Provence - Alpes - Côte d'Azur (BRGM 2002-2006).
- Les travaux du CEREGE sur la faille de la Trévaresse (2003-2005) ont précisé l'activité de la faille et ont confirmé l'attachement du séisme de Lambesc (1909) à celle-ci.
- L'étude de la faille de Salon-Cavaillon (BRGM, 2008) a permis de mieux connaître ce système, sa géométrie et sa segmentation. L'étude a ainsi mis en évidence deux segments de faille de longueur comprise entre 20 km et 31 km, pouvant potentiellement produire au maximum un séisme de magnitude proche de 6.6. Si le segment Ouest est visible à l'affleurement, le segment Est est beaucoup plus incertain. Aucun mouvement récent (i.e : au Quaternaire, moins de 1,75 Million d'années) n'a pu cependant être mis en évidence sur ce système de failles. Les périodes de récurrence associées aux séismes majeurs pouvant être produits par la faille de Salon-Cavaillon semblent de ce fait très grande. De ce fait, ces évènements ne contribuent pas à l'aléa sismique de la zone pour les bâtiments courants.

Ces études ne remettent pas en cause le zonage sismique national. De ce fait, **le spectre de réponse élastique donné par la réglementation parasismique en vigueur en 2014 est pris en compte. Il est applicable dans les zones où le rocher affleurant est de très bonne qualité mécanique. Son accélération maximale (PGA) est de 1,6 m/s².**

Par ailleurs, au vu des connaissances actuelles, aucun rejet de faille en surface n'est attendu dans la zone d'étude pour les périodes de retour intéressant les bâtiments ORN (ouvrages à risque normal).

3.4 Accélérogrammes de référence

Pour simuler la réponse des sites, il est nécessaire de recourir à des enregistrements de séismes au rocher qui respectent la sismicité de la zone étudiée. Pour cela, une recherche d'accélérogrammes réels a été effectuée dans la base de donnée européenne des mouvements forts (Ambraseys *et al.*, 2000). Cette base de donnée est constituée de plus de 450 enregistrements accélérométriques effectués dans la zone euro-méditerranéenne, dans un contexte sismotectonique assimilable à celui de la région d'étude. La sélection s'est portée sur des enregistrements au rocher de séismes dont les paramètres de PGA, Magnitude et distance épacentrale sont compatibles avec la sismicité de la zone d'étude. Quatre accélérogrammes ont été ainsi sélectionnés (Tableau 5).

ID	Séisme	Date	Temps	Latitude épcentre	Longitude épcentre	Ms	Intensité épacentrale	Station	Dist. km	Comp.	PGA m/s ²
365	Lazio Abruzzo	07/05/1984	17:49:42	41.666	13.82	5.79	VII+	Atina	5	NS	1.08
665	Umbria Marche	26/09/1997	09:40:30	43.031	12.862	5.9	VIII+	Assisi-Stallone	21	NS	1.64
242	Valnerina	19/09/1979	21:35:37	42.76	13.02	5.84	incon.	Cascia	5	NS	1.99
6335	Islande	21/06/2000	00:51:48	63.97	-20.71	6.6	incon.	Selfoss-City Hall	15	EW	0.661

Tableau 5 : Accélérogrammes sélectionnés

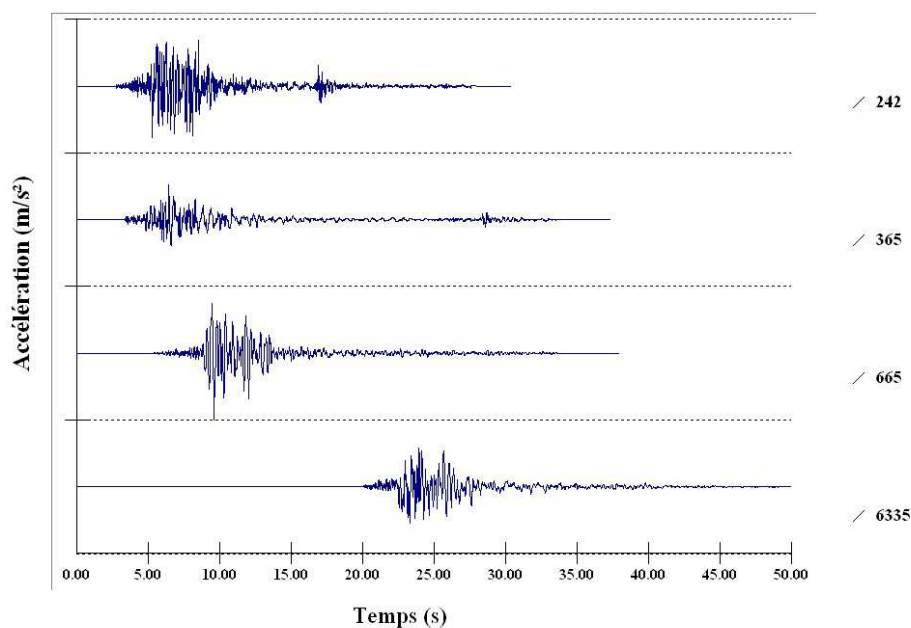


Figure 8 : Enregistrements accélérométriques réels sélectionnés

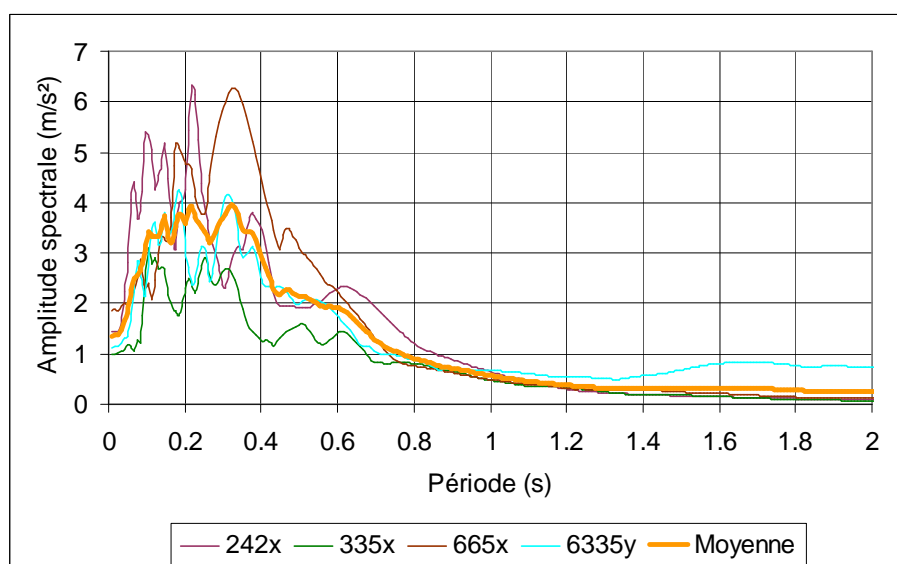


Figure 9 : Spectres de réponse élastique horizontal des accélérogrammes réels (5% d'amortissement)

4 Évaluation de l'aléa local (Microzonage)

4.1 Les effets de site lithologiques

Les effets de site sont des phénomènes physiques qui préoccupent de plus en plus les responsables de la gestion para-sismique. L'observation post-sismique a montré en effet que les conditions de sols en sub-surface (dans les 100 premiers mètres de la croûte terrestre en général) pouvaient augmenter l'agressivité d'un séisme.

Dans le cas le plus courant, des effets de site se manifestent sur un remplissage sédimentaire ou anthropique, meuble, surmontant un substratum rigide. Les ondes sismiques peuvent être piégées dans la couche meuble.

Cela conduit à un véritable phénomène de résonance et à une amplification du signal en surface. Cette amplification se fera principalement à une fréquence fondamentale, f_0 , liée aux caractéristiques de la couverture sédimentaire.

L'évaluation de l'aléa sismique local a pour principal objectif la définition des zones qui présentent une réponse sismique particulière par rapport aux sites purement rocheux. La méthode utilisée ici se base sur une approche en trois phases :

- Approche expérimentale : calcul des rapports spectraux H/V sur les enregistrements de bruit de fond sismique;
- Approche numérique : modélisation linéaire équivalente de réponse de site, par le logiciel Cyberquake© du BRGM en utilisant en entrée les mouvements sismiques correspondant à un site rocheux;
- Calcul des coefficients d'amplification des spectres de réponse élastique : une courbe d'amplification est calculée puis appliquée au spectre de réponse élastique au rocher afin de définir le spectre de réponse spécifique pour chaque zone du microzonage.

4.1.1 Approche réglementaire

La réglementation EC8 (norme NF EN 1998-1), définit pour prendre en compte la composante locale de l'aléa sismique, quatre formes standard de spectre de réponse élastique (A, B, C, D et E). L'attribution de ces spectres à un site dépend de la nature du sous-sol (propriétés mécaniques des sols).

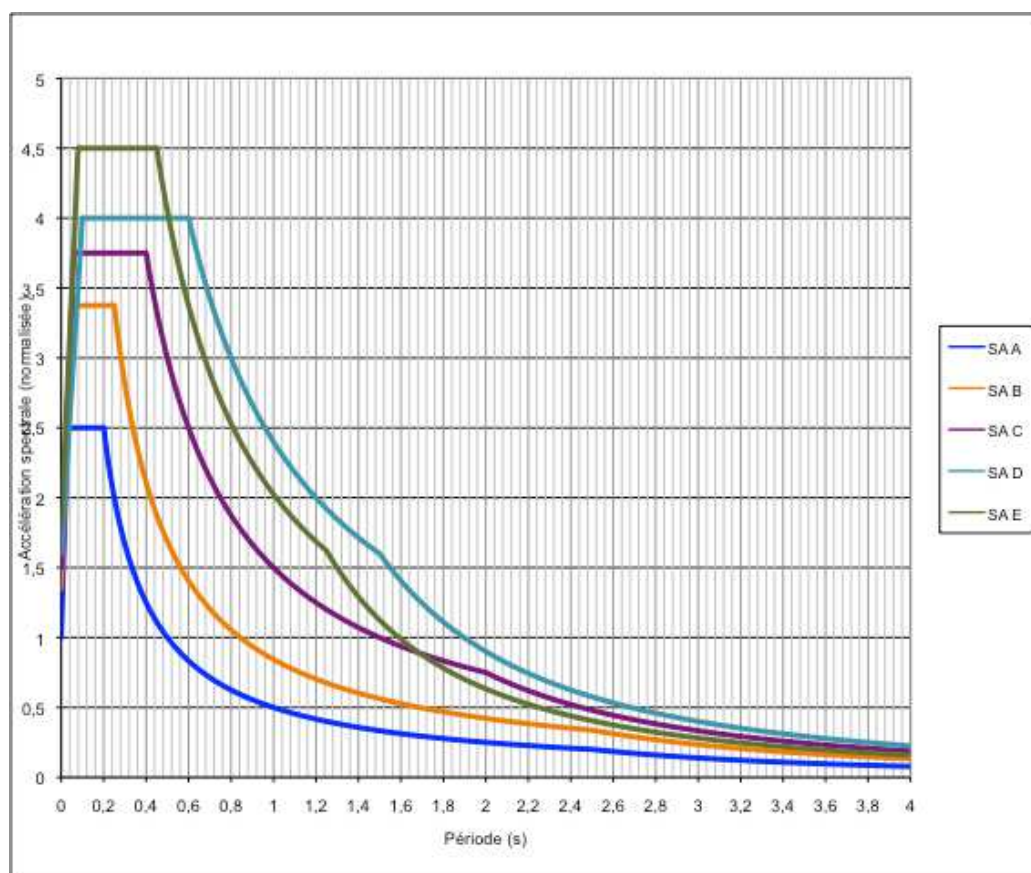


Figure 10 : Spectres de réponse élastique normalisés réglementaires, norme EC8 (NF EN 1998-1)

Pour la zone d'étude, les propriétés mécaniques des sols rappelés dans le Tableau 2 nous permettent d'associer un spectre à chaque type de sol. Un microzonage spécifique est toutefois déterminé afin de mieux prendre en compte les effets de site locaux.

NATURE	VITESSE DES ONDES - S km/s	EPAISSEUR des terrains sédimentaires	SPECTRE DE REPONSE EC8
Alluvions et Cailloutis récents (Fz, Rz)	0,1 -0,3	< 10 m	E
Alluvions et Cailloutis récents (Fz, Rz)	0,1 -0,3	> 10 m	C
Alluvions anciennes Cailloutis de Crau (Fy)	0,5 -0,8	> 15 m	B
Eboulis (E)	0,5 -0,8	< 15 m	A
Molasses calcaires et Molasses gréseuses (m1-m3, m2d-m2b)	1,2		A
Molasses et Marnes sableuses (m2c. m2a2 - m2e)	0,8		A
Calcaires (n1-4, j9)	2,5		A

Tableau 6 : Détermination de la classe de sol selon la norme NF EN 1998-1

4.1.2 Enregistrement de bruit de fond

Les bases de la méthode « H/V bruit de fond » ont été établies dès les années 1950 au Japon (voir Aki, 1957 et Aki, 1993). Cette méthode est aujourd'hui de plus en plus utilisée pour

identifier les sites présentant des risques d'amplification sismique afin de déterminer les fréquences de résonance. Sur le plan de l'expérimentation, la méthode consiste à poser un capteur de vibration tri-directionnel sur le sol à étudier. Le bruit ambiant est alors enregistré par une station d'acquisition sismologique durant quelques minutes.

Le traitement des trois traces sismiques (vertical, nord-sud et est-ouest) obtenues par enregistrement est le suivant :

- 1- Pour chaque enregistrement on recherche d'abord des fenêtres de signal dans lesquelles le signal est le plus stable (stationnaire) possible. Un traitement spectral est alors appliqué sur ces fenêtres;
- 2- **H** représente l'amplitude spectrale lissée des composantes horizontales du bruit de fond sismique, obtenue par combinaison de l'amplitude spectrale des deux voies nord-sud et est-ouest;
- 3- **V** représente l'amplitude spectrale lissée de la voie verticale du même enregistrement;
- 4- Le rapport entre ces deux amplitudes spectrales est effectué sur plusieurs fenêtres de temps et le rapport moyen est donné en résultat.

La courbe résultante du traitement présente un pic à une fréquence **F₀** (et une amplitude **A₀**) correspondant à la fréquence de résonance du site, s'il existe un effet de site au point de mesure. En effet, les sites sur lesquels des phénomènes d'amplification sont attendus montrent des courbes H/V bruit de fond avec des pics, alors que les mêmes courbes sont généralement plates sur des sites rocheux.

4.1.2.1 Matériel utilisé

Les enregistrements ont été effectués avec un enregistreur sismologique autonome et un capteur Lennartz.

Géophone

Le capteur utilisé est un sismomètre 3 composantes Lennartz LE3D. Les trois géophones (Vertical, transversal, longitudinal) ont une fréquence propre de 0,2 Hertz (5 secondes). Leur transduction est de 400 microvolts/micromètre/seconde.

Station d'acquisition

La station d'acquisition est du type Marslite (fabricant : Lennartz). Elle comprend un amplificateur, un numériseur, un système horaire et un système de stockage de l'information. Cette station de 3 kilogrammes peut enregistrer un signal en continu selon trois composantes avec une fréquence d'acquisition pouvant aller jusqu'à 250 Hertz. Différents gains peuvent être mis en œuvre. Les données sont stockées sur des disques magnéto-optiques de 230 Mo.



Figure 11 : Chaîne d'acquisition : numériseur Marslite et capteur vélocimétrique LE3D

4.1.2.2 Mise en oeuvre

La campagne d'enregistrement de bruit de fond sur la zone d'étude a été réalisée fin Avril – début Mai 2005. 37 points de mesure ont été faits à travers la commune de Salon de Provence, 12 points sur Pélissanne et 22 points sur Grans. La couverture de la région a été modulée selon les zones géologiques : moins dense sur la plaine de la Crau (supposée relativement homogène), plus dense sur les zones plus urbanisées et où les terrains présentent des lithologies bien distinctes.



Figure 12 : Exemple de mesures de bruit de fond sismique

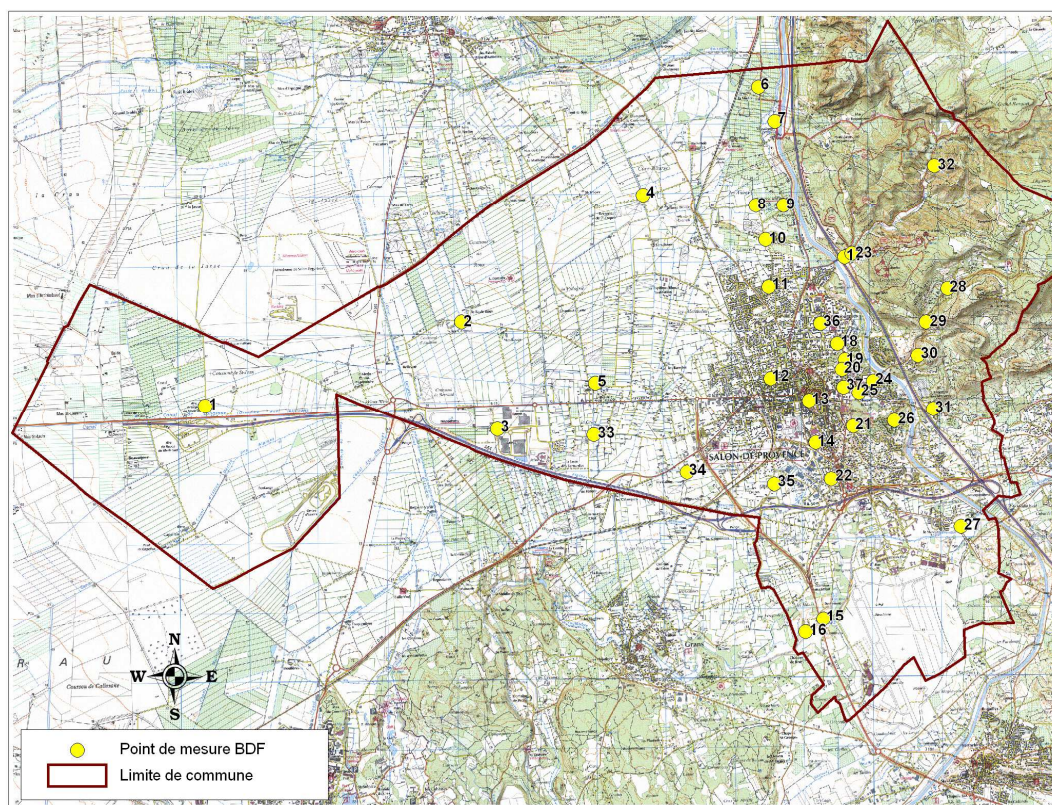


Figure 13 : Repérage des points de mesure de bruit de fond sismique sur la commune de Salon.

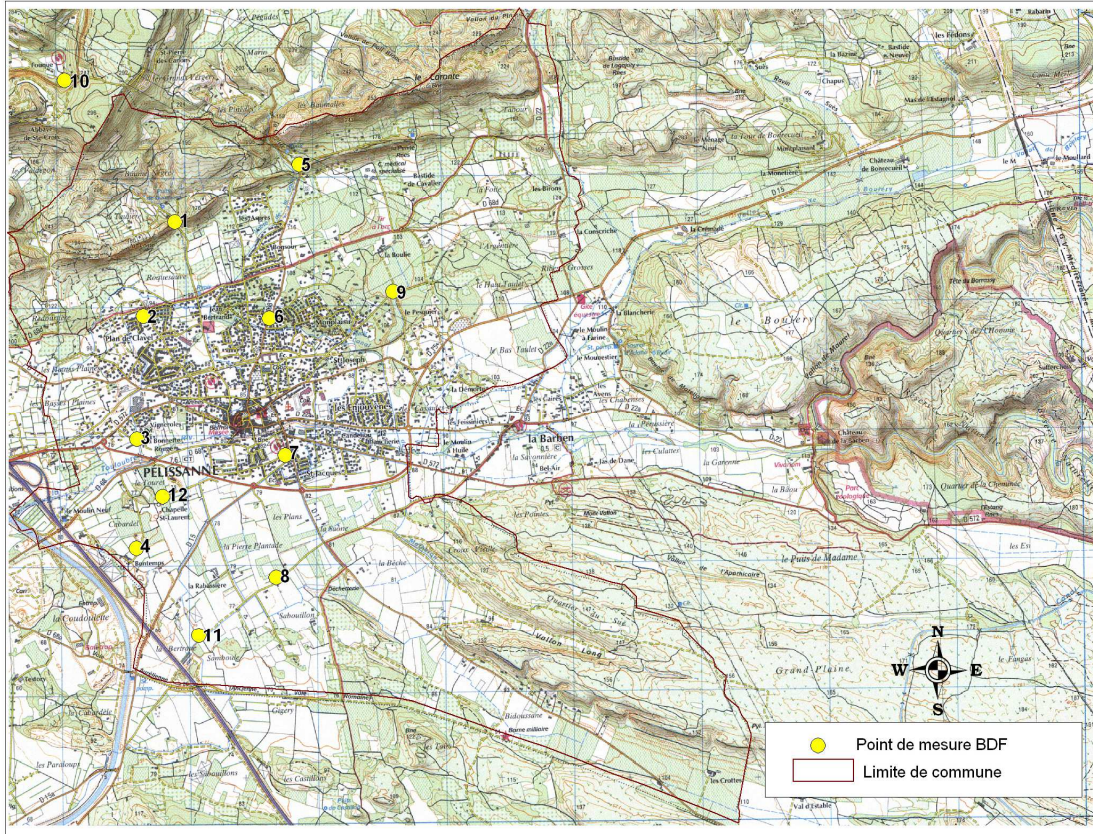


Figure 14 : Repérage des points de mesure de bruit de fond sismique sur la commune de Pélissanne

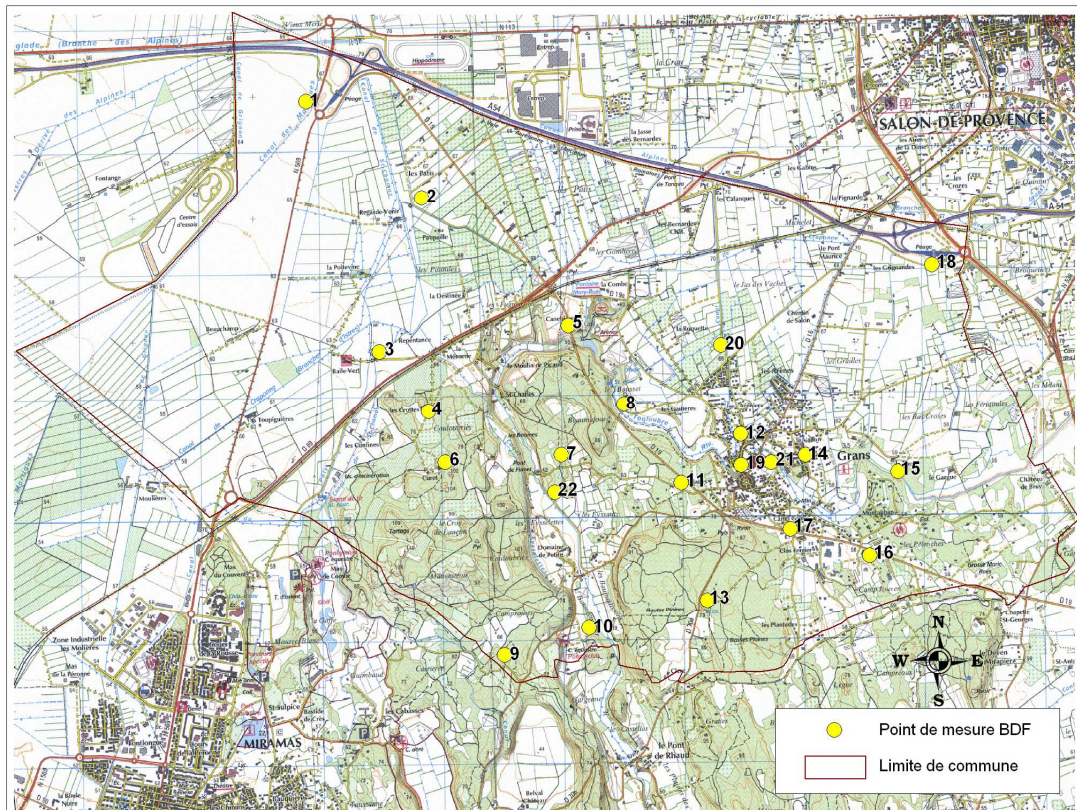


Figure 15 : Repérage des points de mesure de bruit de fond sismique sur la commune de Grans.

4.1.2.3 Résultats et définition des zones

Pour 25 points situés sur la commune de Salon de Provence, les courbes H/V sont relativement plates et leur amplitude est inférieure à 3 sur l'ensemble de l'intervalle de fréquence pouvant intéresser le génie parasismique (0,3-20 Hz). Il s'agit essentiellement de mesures effectuées dans le bassin de la Crau, à l'ouest du centre ville, ainsi que sur les reliefs rocheux de l'Est de la commune.

Pour 7 points, les courbes H/V ont un pic sous 2 Hz. Ces points sont situés à l'Est de Salon, sur les éboulis et les molasses affleurantes du Tortonien.

Les mesures effectuées aux points 9 et 32, au droit ou à proximité des calcaires massifs du Crétacé, ont donné des courbes H/V avec un pic bien marqué vers les hautes fréquences (19 Hz). Ce pic est certainement lié à une fine couche (épaisseur inférieure à 2 m) très ponctuelle de matériaux colluvionnaires ou d'érosion de surface.

Pour les points 8, 15 et 23, les courbes H/V ont un pic bien exprimé entre 4 et 11 Hz reflétant des conditions de sols variés.

Points	Position		fo	Ao
N°	X_L2	Y_L2	Hz	
1	814255.35	1852486.54		
2	818094.05	1853718.72		
3	818431.22	1852154.18		
4	820572.37	1855536.44		
5	819865.72	1852797.94		
6	822241.96	1857097.31		
7	822478.89	1856599.86		
8	822204.15	1855382.35	4.6	5
9	822608.69	1855383.84	19	9.5
10	822348.28	1854885.13		
11	822450.13	1854191.65	1.05	3.2
12	822526.09	1852826.01	1.05	3.6
13	822923.52	1852576.94		
14	823116.45	1851922.53	1.1	3.6
15	823301.59	1849440.88	7.8	11
16	822928.56	1849220	1.6	3.4
17	823508.04	1854573.39		
19	823470.24	1853179.79		
20	823439.76	1852958.1		
21	823586.29	1852164.49	1.2	3.2
22	823294.83	1851431.72		
23	823592.48	1854689.1	11	6.4

24	823905.48	1852847.09		
25	823732.94	1852644.99		
26	824206.68	1852275.4	1.4	3.2
27	825126.42	1850698.95		
28	824979.43	1854183.4		
29	824667.01	1853697.98		
30	824551.53	1853218.63		
31	824776.76	1852446.22		
32	824791.09	1855962.86	19	3
33	819862.85	1852070.66		
34	821215.32	1851525.55		
35	822454.71	1851432.87		
36	823144.87	1853712.19		
37	823476.31	1852754.52	0.6	3.6

Tableau 7 : Résultats des mesures H/V à Salon de Provence

A Pélissanne, en 5 points, les courbes H/V sont relativement plates et leur amplitude est inférieure à 3 sur l'ensemble de l'intervalle de fréquence pouvant intéresser le génie parasismique (0,3-20 Hz). Il s'agit essentiellement des mesures effectuées sur les affleurements rocheux du nord et du sud de la commune.

Pour 4 points, les courbes H/V ont un pic sous 2 Hz. Ces points sont situés sur les éboulis et les molasses affleurantes du Tortonien, ou couvert d'une fine couche d'alluvions superficielles. Au point 3, proche de la Touloubre, nous obtenons une amplification marquée vers 10Hz tandis qu'au point 8, au sud du village un pic apparaît vers 8 Hz.

Points	Position		fo	Ao
N°	X_L2	Y_L2	Hz	
1	826776.88	1853255.52	1	3.6
2	826533.77	1852520.11	0	2.4
3	826483.02	1851556.83	9	4.8
4	826478.32	1850710.4	15	4
5	827749.56	1853712.19	0	0
6	827518.25	1852506.25	1.1	5
7	827640.84	1851431.72	0.8	4
8	827573.24	1850485.05	7.5	5.5

9	828484.74	1852711.44	1.6	3
10	825914.31	1854364.07	0	0
11	826964.54	1850028.61	0	0
12	826684.66	1851111.96	0	0

Tableau 8 : Résultats des mesures H/V à Pélissanne.

Sur la commune de Grans, les courbes H/V obtenues à 16 points de mesures sont relativement plates et leur amplitude est inférieure à 3 sur l'ensemble de l'intervalle de fréquence pouvant intéresser le génie parasismique (0,3-20 Hz). Il s'agit essentiellement des mesures effectuées dans le bassin de la Crau, au nord de la commune, ainsi que sur les plateaux du sud où les roches miocènes affleurent. Pour 4 points, les courbes H/V ont un maximum sous 2 Hz. Ces points situés pour la plupart sur les molasses affleurantes du Tortonien montrent que les conditions géologiques sont localement assez hétérogènes. Pour les points 19 et 22, les courbes H/V ont un pic bien exprimé entre 5 et 15 Hz reflétant des conditions de sols au droit du remplissage sédimentaire de la Touloubre.

Points N°	Position		fo	Ao
	X_L2	Y_L2	Hz	
1	816754.87	1851915.42	0	2.4
2	817715.06	1851112.31	0	2.4
3	817365.51	1849838.89	0	3
4	817776.35	1849344.53	0	2
5	818938.98	1850058.29	0.5	3.6
6	817913.72	1848920.52	0	2
7	818881.12	1848985.25	0	2.4
8	819398.85	1849407.77	0	2
9	818407.62	1847319.32	0	2
10	819112.66	1847544.22	0.65	5.5
11	819875.91	1848753.48	0.9	5
12	820373.14	1849155.38	0	2.2
13	820093.82	1847775.76	0	0
14	820908.17	1848985.02	0	0
15	821681.5	1848845.36	0	2

16	821446.29	1848150.39	0	0
17	820785.46	1848368.42	0	2.8
18	821962.99	1850560.78	0.6	5.2
19	820373.36	1848896.57	5.5	8.5
20	820206.33	1849898.01	0	2
21	820625.41	1848920.29	0	2.4
22	818826.59	1848671.79	14	4.4

Tableau 9 : Résultats des mesures H/V à Grans.

La corrélation entre la lithologie et les mesures de bruit de fond nous a conduit à distinguer six zones dans le microzonage de Salon, Grans et Pélissanne (planche correspondante et Figure 16). Pour ne pas les confondre avec le zonage réglementaire, ni les études antérieures, nous les avons numérotées de Z1 à Z6.

- **Z1 Rocher** : Cette zone regroupe les points pour lesquels la carte lithologique indique soit un affleurement de calcaire sain anté-cénozoïque soit un affleurement de formation Miocène. Cette zone regroupe également des points pour lesquels il existe un recouvrement colluvionnaire de surface d'épaisseur faible et négligeable. Les courbes H/V ne montrent pas d'amplification dans cette zone. Dans les normes EC8 cette zone correspond à la classe A.
- **Z2 Sol raide** : cette zone correspond aux sédiments indurés du bassin de Crau : bien que les courbes H/V ne présentent pas d'amplification notable, une amplification modérée sur tout le spectre devra être prise en compte. Dans les normes EC8 cette zone correspond à la classe B.
- **Z3 Bassin Miocène et Éboulis** : dans cette zone, rassemblant des terrains de lithologie diverse, les mesures de bruit de fond conduisent à tenir compte d'une amplification faible vers les basses fréquences (entre 1 et 3Hz), la zone est équivalente à la zone S2 déterminée dans le microzonage de Cornillon-Confoux. Dans les normes EC8 cette zone correspond à la classe B.
- **Z4 Alluvions de la Touloubre** : cette zone est caractérisée par une amplification entre 5Hz et 15Hz , elle est équivalente à la zone S4 du microzonage de Cornillon-Confou. Dans les normes EC8 cette zone correspond à la classe E.
- **Z5 Colluvions indifférenciées** : la zone rassemble les points pour lesquels une amplification entre 8Hz et 10Hz est attendue, zone équivalente à la zone S1 du microzonage de Cornillon-Confou. Dans les normes EC8 cette zone correspond à la classe E.
- **Z6 Matériaux résiduels** : au nord de Salon, cette zone est caractérisée par une amplification vers 4Hz. Dans les normes EC8 cette zone correspond à la classe C.

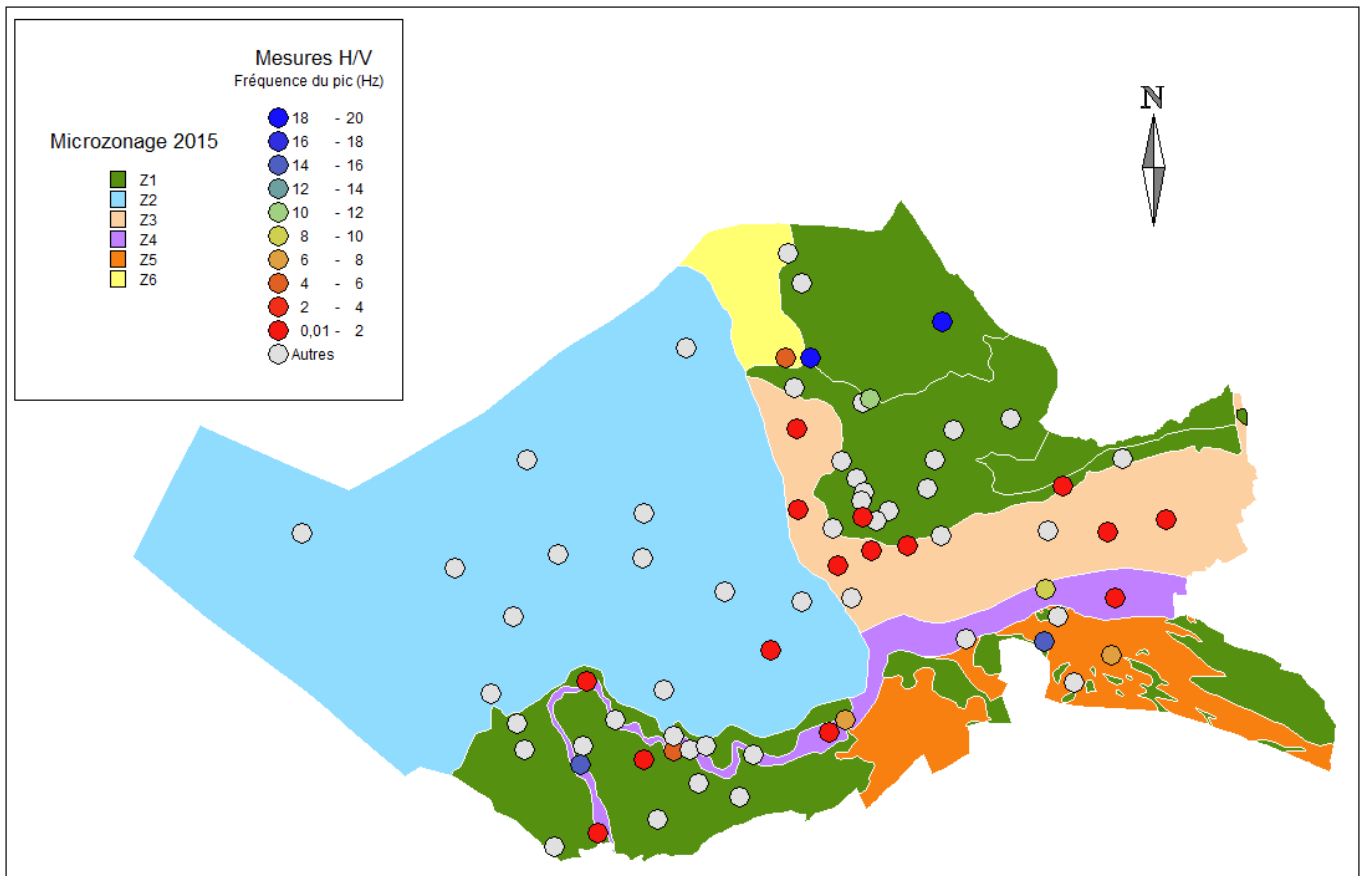


Figure 16 : Résultats des mesures de bruit de fond et microzonage

4.1.3 Spectres de réponse élastiques

Le mode de représentation des spectres de réponse élastique choisi est conforme à celui utilisé dans les règles EC8, pour un amortissement à 5%. La forme des spectres élastiques en représentation standard en période est rappelée sur la Figure 17. Pour un bâtiment de catégorie d'importance II, le spectre de réponse élastique à 5% d'amortissement répond à la formule :

$$0 \leq T \leq T_B : S_e(T) = a_{gr} \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (p-1) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_e(T) = a_{gr} \cdot S \cdot p$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_e(T) = a_{gr} \cdot S \cdot p \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right] \quad \text{avec } T \text{ la période propre considérée.}$$

$$T_D \leq T \leq 4 \text{ sec} : S_e(T) = a_{gr} \cdot S \cdot p \cdot \left[\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right]$$

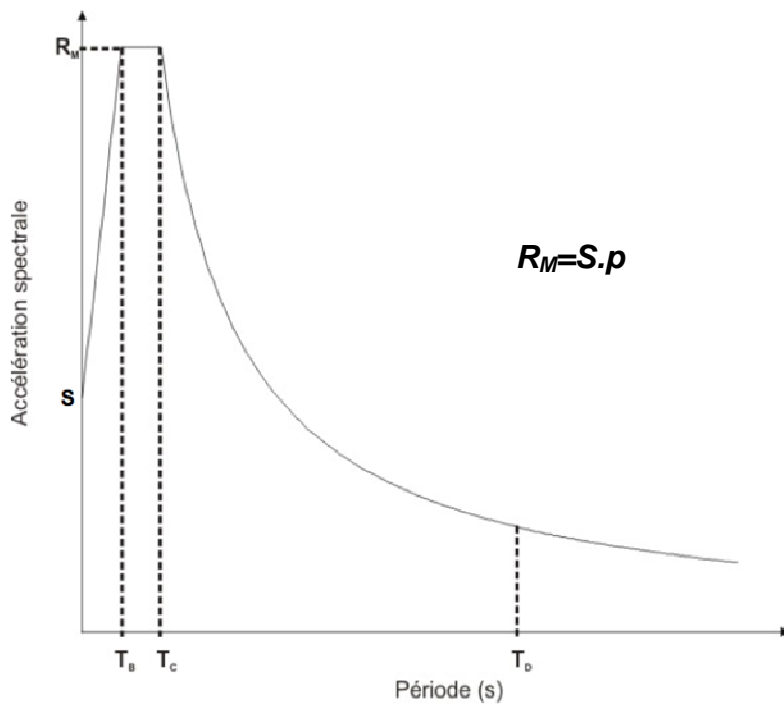


Figure 17 : Forme des spectres élastiques selon la norme NF EN 1998-1

4.1.3.1 Zone rocheuse

Pour la zone Z1, le rocher en surface est caractérisé par des vitesses de propagation des ondes de cisaillement rapides (supérieures à 860 m/s) et le spectre de réponse élastique horizontal à 5% d'amortissement proposé correspond au spectre de la norme pour les sols de classe A. Le tableau suivant rappelle les paramètres caractéristiques de ce spectre.

	T _B (s)	T _C (s)	T _D (s)	S	p	PGA _{ref} (m/s ²)	PGA (m/s ²)
Z1	0,03	0,2	2,5	1	2,5	1,6	1,6

Tableau 10 : Points remarquables du spectre proposé pour la zone Z1.

4.1.3.2 Zones sédimentaires et à effet de site.

Les zones Z2 à Z6 présentent un effet de site dépendant des conditions de sol associées. Afin de modéliser les spectres de réponse élastique propres à chaque zone, un calcul numérique a été mis en œuvre à l'aide du logiciel CyberQuake (Modaressi *et al.*, 1997). Pour cela, un modèle de sol linéaire équivalent, visco-élastique a été utilisé. Les modules de cisaillement G et les amortissements D ont été calculés à partir des valeurs des vitesses d'onde de cisaillement et des masses spécifiques de chaque couche. Ce modèle permet d'obtenir numériquement une fonction de transfert multicouche de la colonne de sol, permettant le passage des conditions au rocher horizontal affleurant aux conditions particulières de site.

Le principe de la méthode numérique utilisée est le suivant :

- 1) utilisation des accélérogrammes réels définis précédemment;
- 2) calcul de la réponse de la colonne de sol soumise à ces accélérogrammes à sa base.
- 3) calcul de la fonction d'amplification spectrale pour chaque zone

4) *définition des spectres de réponse élastique spécifiques pour chaque zone en appliquant la fonction d'amplification au spectre de réponse au rocher.*

Colonnes de sol représentatives.

L'analyse conjointe de la carte lithologique, des données de sondages et des mesures de bruit de fond permet de définir des colonnes de sol représentatives des zones non rocheuses définies dans le microzonage de Salon, Grans et Pélissanne. Ces colonnes de sol de référence sont utilisées dans les simulations numériques.

Zone Z2

La zone Z2 est constituée du bassin des alluvions de Crau. L'épaisseur de ces alluvions anciennes est variable. Afin de préciser la vitesse de propagation des ondes de cisaillement dans les différents niveaux géologiques du sous-sol, la méthode du bruit de fond en réseau a été appliquée en un point de la zone.

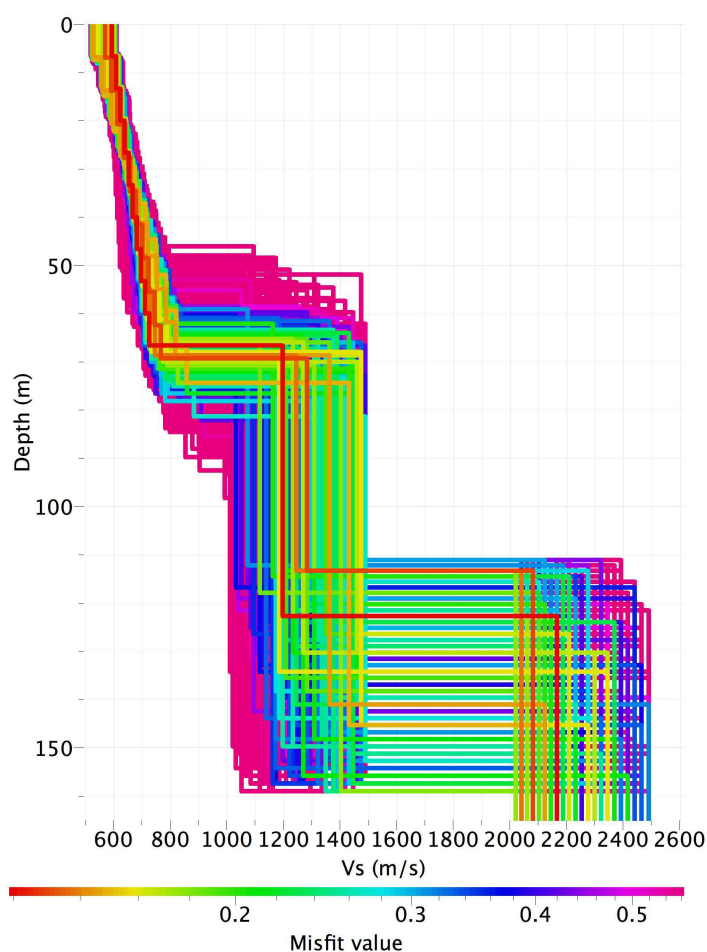


Figure 18 : Profil de vitesse de ondes de cisaillement (Vs) obtenu sur la zone Z2 par la méthode du bruit de fond en réseau.

La méthode consiste à enregistrer simultanément les vibrations ambiantes sur plusieurs capteurs sismologiques répartis selon une configuration géométrique donnée et d'analyser les ondes de surfaces traversant le réseau. La vitesse de propagation des ondes de surface dépend de leur fréquence et du milieu de propagation. En mesurant, fréquence par fréquence, cette vitesse il est alors possible de retrouver le profil de vitesse Vs sous le point de mesure. Les résultats de cette investigation géophysique ont fait l'objet d'un rapport à part (CEREMA, 2014), le profil de vitesse déduit est montré sur la Figure 18.

Parmi toutes les solutions proposées par le processus d'inversion, celles dont l'erreur par rapport à la courbe de dispersion pointée est la plus faible (courbe rouge) sont caractérisées par deux interfaces. Une première interface aux environs de 70 mètres de profondeur dont le milieu est caractérisé par un gradient de vitesse entre 600 m/s, pour la vitesse d'onde S en surface, et 800 m/s à l'interface avec le second milieu. Une deuxième interface plus profonde est ensuite atteinte aux environs de 120 mètres de profondeur. Cette couche est caractérisée par une vitesse d'onde S aux alentours de 1200 m/s et correspondrait aux molasses calcaires. Enfin, un milieu caractérisé par une vitesse d'onde S aux alentours de 2200 m/s correspond au socle calcaire retrouvé dans les sondages réalisés dans cette zone.

Selon les données géotechniques disponibles, l'épaisseur sédimentaire varie en entre 5 m et 150 m. Afin de tenir compte de ces variations, trois colonnes de sol représentatives ont été utilisées. Elles sont schématiquement replacées dans la Figure 19.

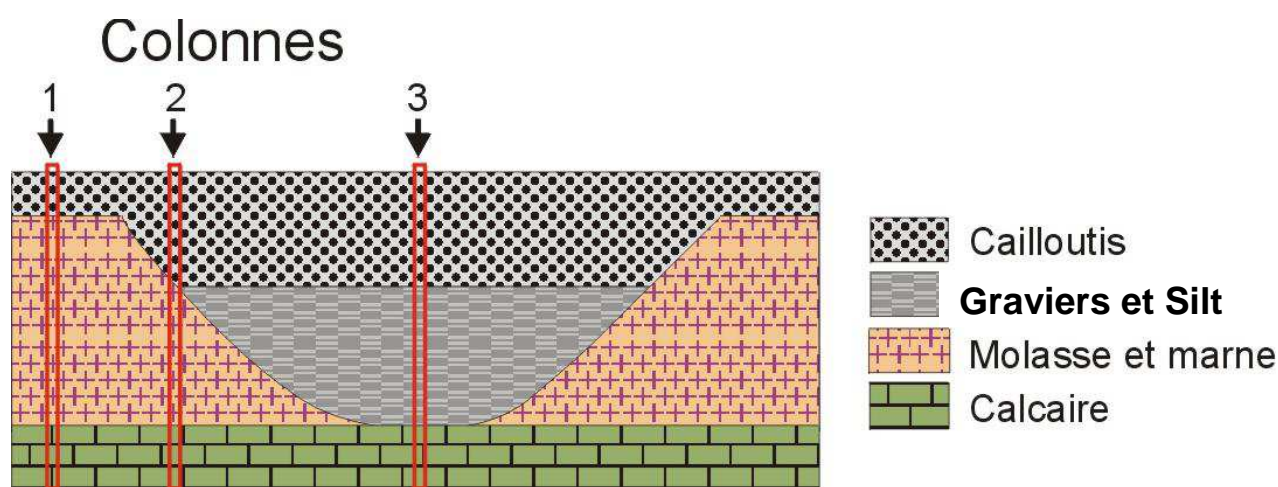


Figure 19 : Implantation schématique des colonnes de sol dans la plaine de Crau

Colonne 1

Lithologie	Age	Epaisseur (m)	ρ (Kg/m ³)	Vs (m/s)
Cailloutis	Quaternaire (Würm)	1	1800	500
Poudingue	Quaternaire (Würm)	2	1800	800
Cailloutis	Quaternaire (Würm)	2	1800	600
Molasse calcaire	Tortonien	45	2000	1200
Alternance de Molasse gréseuse et Marne sableuse	Helvétien	100	2000	1000
Calcaire	Crétacé	infinie	2400	2500

Colonne 2

Lithologie	Age	Epaisseur (m)	ρ (Kg/m ³)	Vs (m/s)
Cailloutis	Quaternaire (Würm)	1	1800	500
Poudingue	Quaternaire (Würm)	2	1800	800
Cailloutis	Quaternaire (Würm)	27	1800	600
Molasse calcaire	Tortonien	20	2000	1200
Alternance de Molasse gréseuse et Marne sableuse	Helvétien	100	2000	1000
Calcaire	Crétacé	infinie	2400	2500

Colonne 3

Lithologie	Age	Epaisseur (m)	ρ (Kg/m ³)	Vs (m/s)
Cailloutis	Quaternaire (Würm)	1	1800	500
Poudingue	Quaternaire (Würm)	2	1800	800
Cailloutis	Quaternaire (Würm)	27	1800	600
Gravier	Quaternaire (Würm)	90	1800	1000
Silt	Quaternaire (Würm)	30	1800	1200
Calcaire	Crétacé	infinie	2400	2500

Zone Z3

La zone Z3 du microzonage est constituée des sols pour lesquels les mesures H/V ont montré une amplification entre 1 Hz et 3 Hz. Dans cette zone, les molasses calcaires et gréseuses sont affleurantes où sous une très faible couche de colluvions de surface.

Afin de préciser la vitesse de propagation des ondes de cisaillement dans les différents niveaux géologiques du sous-sol, la méthode du bruit de fond en réseau a été appliquée en un point de la zone. Les résultats de cette investigation géophysique ont fait l'objet d'un rapport à part (CEREMA, 2014), le profil de vitesse déduit est montré sur la Figure 20.

Ici, deux interfaces peuvent être distinguées. Une première interface, entre 2 et 5 mètres de profondeur, sépare le premier milieu caractérisé par des vitesses d'onde S aux environs de 200 m/s d'un second milieu caractérisé par une vitesse d'onde S de 1200 m/s. Une seconde interface, entre 115 et 130 mètres de profondeur sépare la seconde couche d'une troisième caractérisée par une vitesse d'onde S aux environ de 2000 m/s.

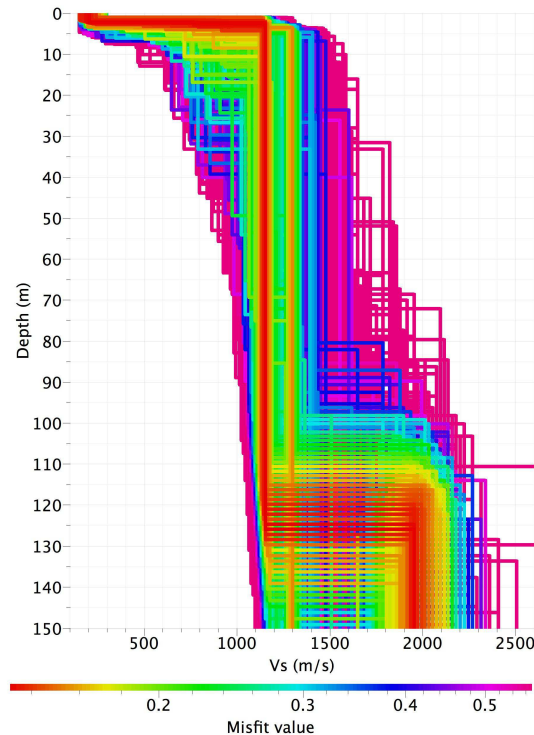


Figure 20 : Profil de vitesse de ondes de cisaillement (Vs) obtenu sur la zone Z3 par la méthode du bruit de fond en réseau.

Dans cette zone la colonne de sol moyenne prise en compte est détaillée dans le tableau suivant.

Lithologie	Age	Epaisseur (m)	ρ (Kg/m ³)	Vs (m/s)
Alluvions : limons et sables	Quaternaire	3	1800	200
Molasse calcaire	Tortonien	47	2000	1200
Alternance de Molasse gréseuse et Marne sableuse	Helvétien	100	2000	800
Calcaire	Crétacé	infinie	2400	2500

Zone Z4

La zone Z4 recouvre les alluvions de la Touloubre. La variabilité de l'épaisseur des dépôts quaternaires dans cette zone est prise en compte en considérant deux colonnes de sol. Dans la première, les sédiments ont 3 mètres d'épaisseur tandis que dans la seconde la couche sédimentaire atteint 10 m d'épaisseur.

Colonne 1

Lithologie	Age	Epaisseur (m)	ρ (Kg/m ³)	Vs (m/s)
Alluvions : limons et sables	Quaternaire	3	1800	200
Molasse calcaire	Tortonien	infinie	2000	1200

Colonne 2

Lithologie	Age	Epaisseur (m)	ρ (Kg/m ³)	Vs (m/s)
Alluvions : limons et sables	Quaternaire	10	1800	200
Molasse calcaire	Tortonien	infinie	2000	1200

Zone Z5

Cette zone est caractérisée par les colluvions d'une épaisseur moyenne de 8 m reposant sur le calcaire du crétacé. Le contraste de vitesse entre la couche sédimentaire et le substratum rocheux doit être très important.

Lithologie	Age	Epaisseur (m)	ρ (Kg/m ³)	Vs (m/s)
Colluvions : argile et sables	Quaternaire	8	1800	280
Calcaire	Crétacé	infinie	2400	2500

Zone Z6

Cette dernière zone, au Nord de la commune de Salon de Provence, est formée par les terrains où se situent les formations résiduelles. L'épaisseur caractéristique de ces dépôts est de 17,5 m selon les données de sondage disponibles dans la zone.



Figure 21 : Profil de vitesse de ondes de cisaillement (Vs) obtenu sur la zone Z6 par la méthode du bruit de fond en réseau.

Dans cette zone la colonne de sol moyenne prise en compte est détaillée dans le tableau suivant.

Lithologie	Age	Epaisseur (m)	ρ (Kg/m ³)	Vs (m/s)
Terre végétale	Quaternaire	0,5	1800	150
Limons argileux	Quaternaire	4	1800	200
Alluvions argilo-sableuses	Quaternaire	5	1800	250
Argile plastique	Quaternaire	8	1800	300
Calcaire	Crétacé	infinie	2400	2500

Fonction d'amplification des spectres de réponse élastique horizontaux.

Les calculs des spectres de réponse élastique horizontaux tenant compte de la réponse sismique des colonnes de sol définies plus haut ont été faits en utilisant les 4 accélérogrammes réels sélectionnés dans la base de donnée des mouvements forts. Un exemple de calcul est montré Figure 22 pour la zone Z4. Une division spectrale entre ce spectre modélisé et le spectre élastique moyen des données d'entrées permet d'obtenir la fonction d'amplification de la zone. Pour les zones représentées par plusieurs colonne de sol, la courbe enveloppe est prise en considération.

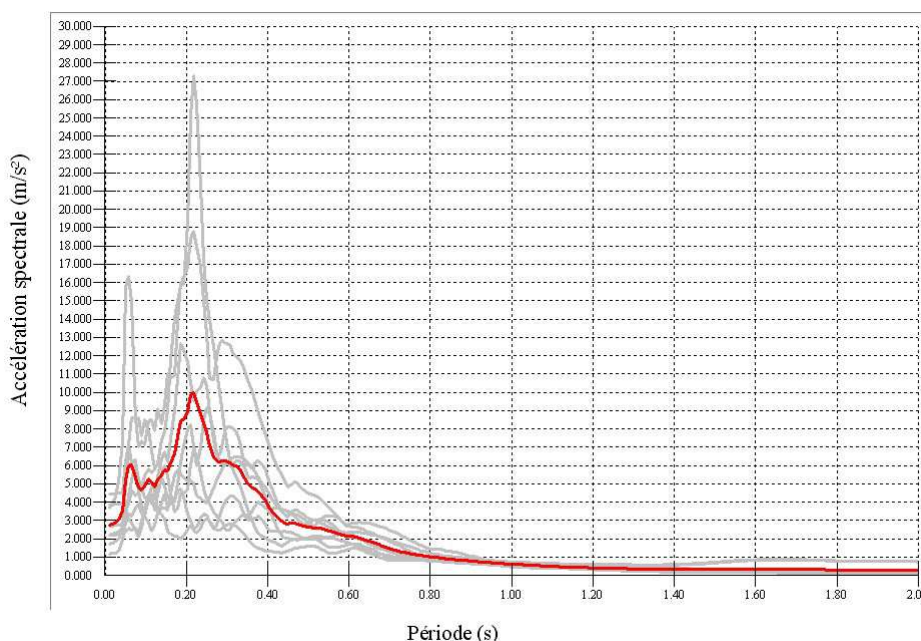


Figure 22 : Exemple de calcul des spectres de réponse élastique (zone Z4). En rouge : moyenne de toutes les simulations

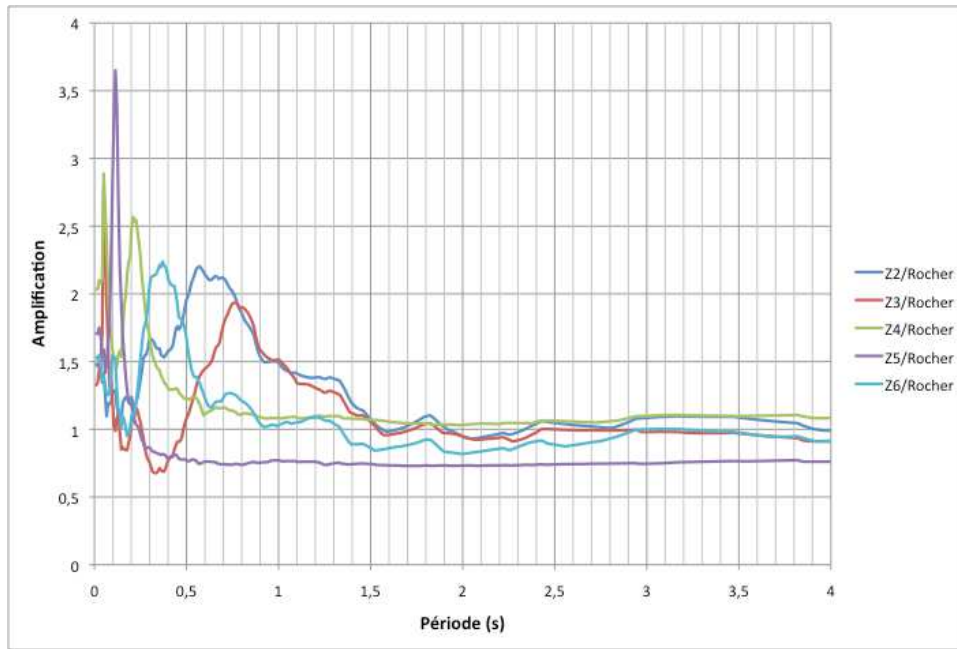


Figure 23 : Fonction d'amplification des spectres de réponse élastique des zones du microzonage.

Spectres de réponse élastique horizontaux.

Le résultat de la multiplication du spectre EC8 A avec la fonction d'amplification déterminée auparavant est lissé et modélisé selon la forme réglementaire EC8.

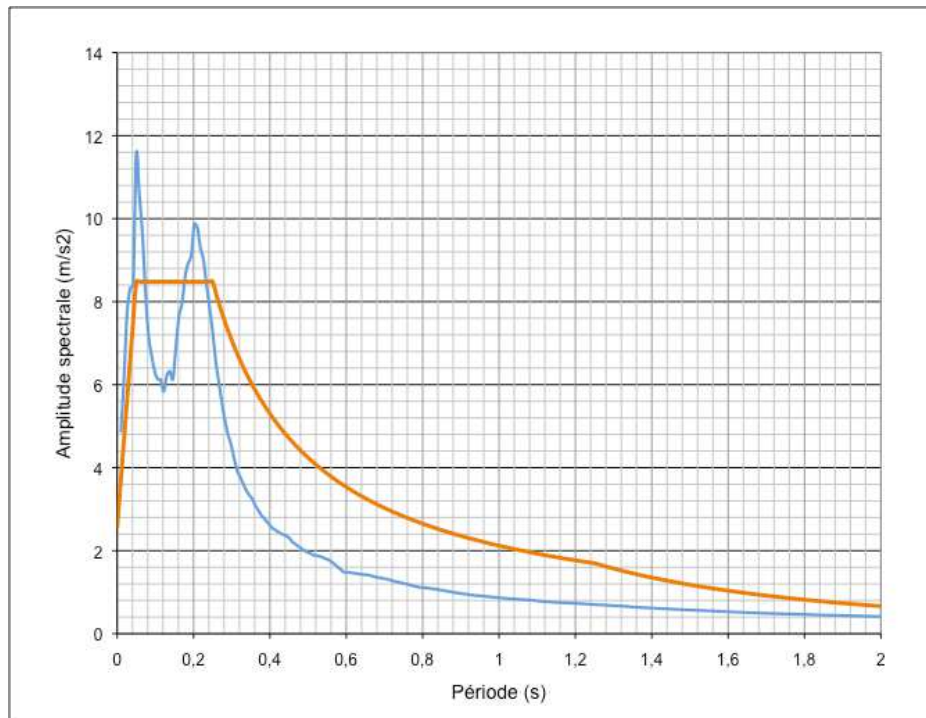


Figure 24 : Modélisation du spectre moyen calculé pour la zone Z4

Pour chaque zone est alors défini un spectre de réponse élastique horizontal à partir de la procédure décrite ici. Ces spectres ont la forme des spectres issus de la norme EC8 (Figure 25). Leurs points remarquables sont spécifiés dans le Tableau 11. Ils sont établis pour les bâtiments de catégorie d'importance II.

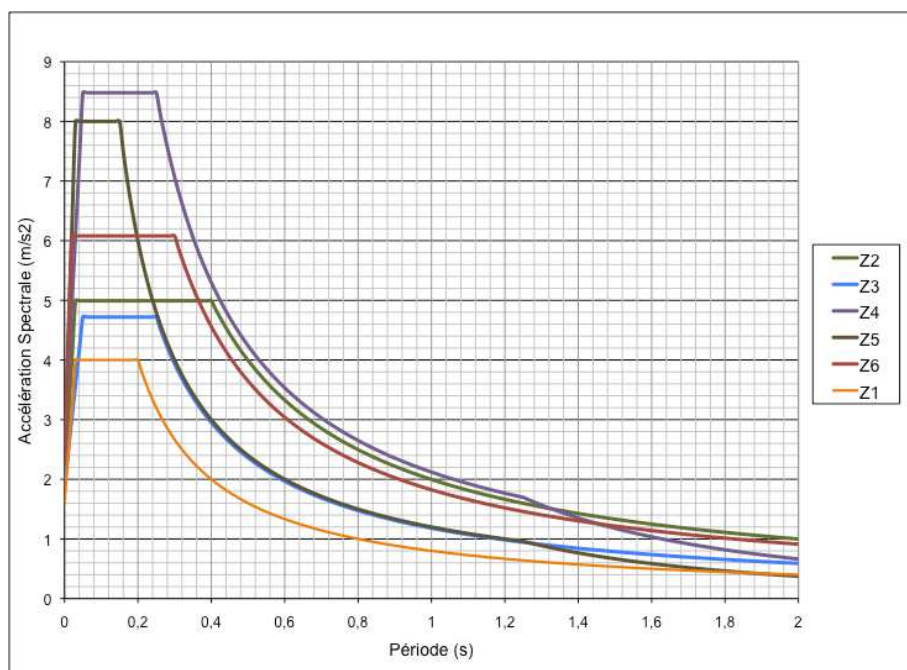


Figure 25 : Spectres de réponse élastique horizontaux proposés pour les zones Z1 à Z6 (5% d'amortissement)

	TB (s)	TC (s)	TD (s)	S	ρ	a_{gr} (m/s ²)	PGA (m/s ²)
Z2	0,03	0,4	2,5	1,25	2,5	1,6	2
Z3	0,05	0,25	2,5	1,18	2,5	1,6	1,89
Z4	0,05	0,25	1,25	1,6	3,3	1,6	2,56
Z5	0,03	0,15	1,25	1,6	3,1	1,6	2,56
Z6	0,02	0,3	2,0	1,4	2,7	1,6	2,24

Tableau 11 : Points remarquables des spectres Z2 à Z6

Comparaison avec la forme des spectres EC8.

La figure suivante permet de comparer les spectres proposés dans la présente étude avec les spectres de la norme NF EN 1998-1 pour les bâtiments de catégorie d'importance II.

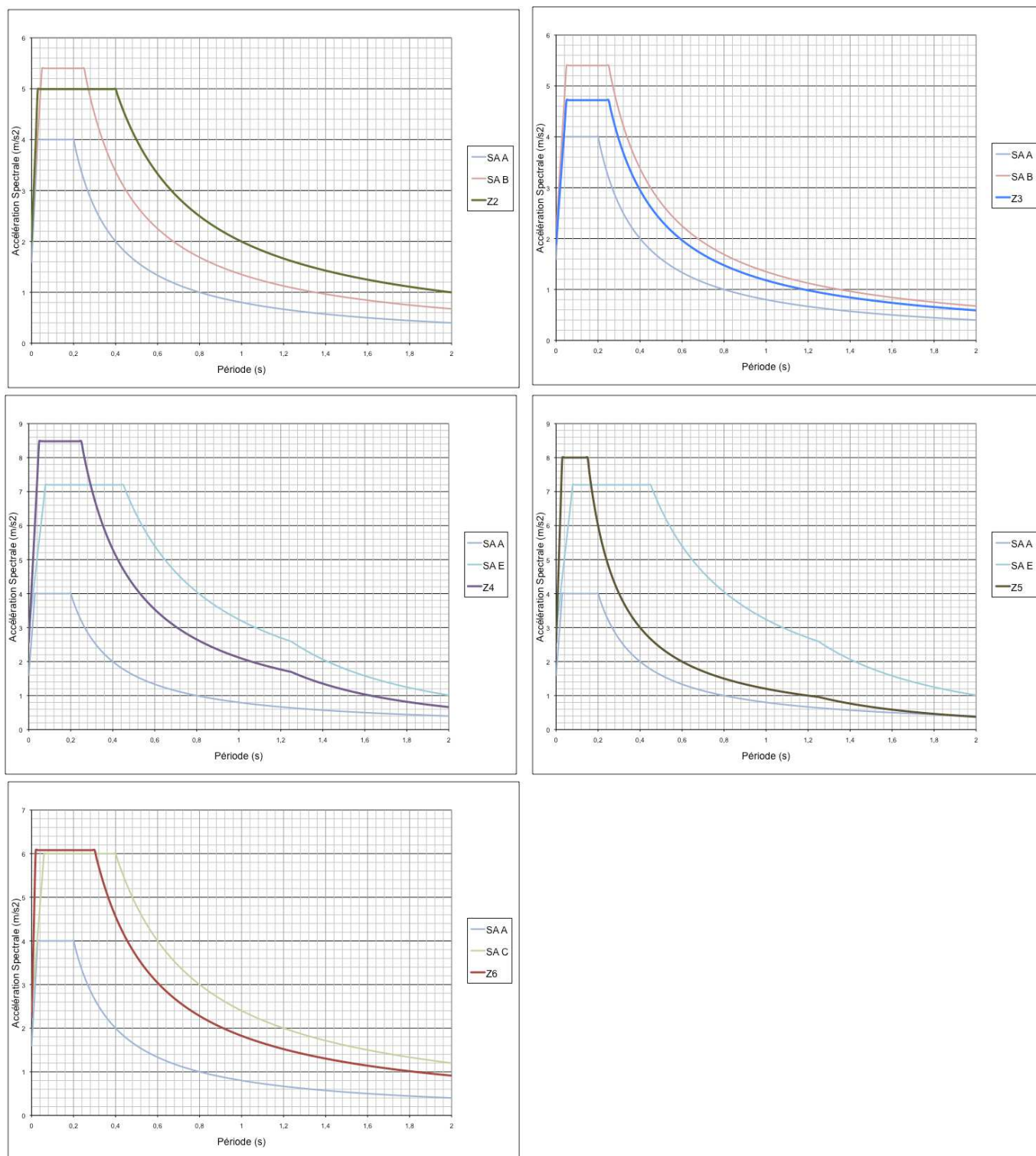
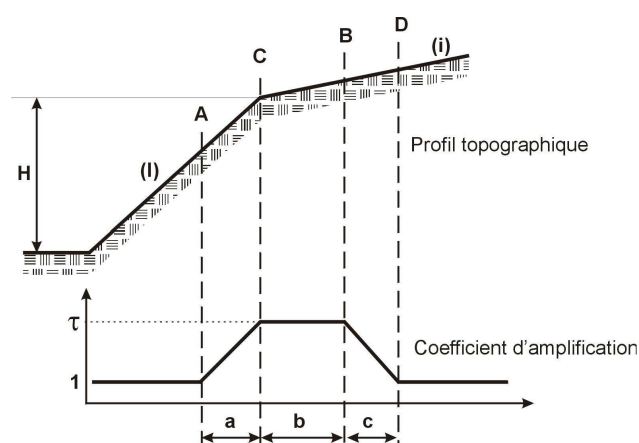


Figure 26 : Comparaison des spectres proposés avec les normes EC8

On note une différence assez marquée entre les spectres de réponse élastique de la norme EC8 et ceux déterminés dans la présente étude. Cette différence est suffisamment grande pour justifier leur prise en compte pour toutes les zones du microzonage avec effet de site lithologique.

4.2 Les effets de site topographiques

La forme du relief peut accroître les effets dévastateurs d'un séisme notamment par l'amplification des vibrations. Les effets de site topographiques se traduisent ainsi par des amplifications pouvant être importantes au sommet des buttes, sur les crêtes allongées, les rebords de plateaux ou de falaises. Ces effets sont calculés selon une méthode qui dérive de la norme des PS92, dans laquelle le coefficient d'amplification du spectre, t , varie le long de la topographie selon le schéma ci-dessous.



$$a = H/3$$

$$b = \min \left\{ \begin{array}{l} 20I \\ \frac{H+10}{4} \end{array} \right.$$

$$c = H/4$$

τ est fonction de la pente et vaut 1,4 au maximum:

$$\tau = 1 + 0.8(I - i - 0.4)$$

Figure 27 : Variation du coefficient d'amplification suivant la topographie du site selon les PS92

En l'absence de données topographiques numériques suffisamment précises, la carte IGN au 1/25 000ème a été utilisée pour définir les effets de site topographiques sur la commune. Les variations de pente supérieures à 22° ont été repérées sur cette carte (pour $i=0$, $t>1$ si $I>22^\circ$). Les limites de zone ont été appréciées suivant le principe du schéma de la Figure 27 et en prenant l'arête principale comme point C. La procédure suivie permet d'apprécier les zones d'amplification probable auxquelles un coefficient d'amplification de 1,4 est appliqué au spectre de réponse élastique au rocher (Figure 28).

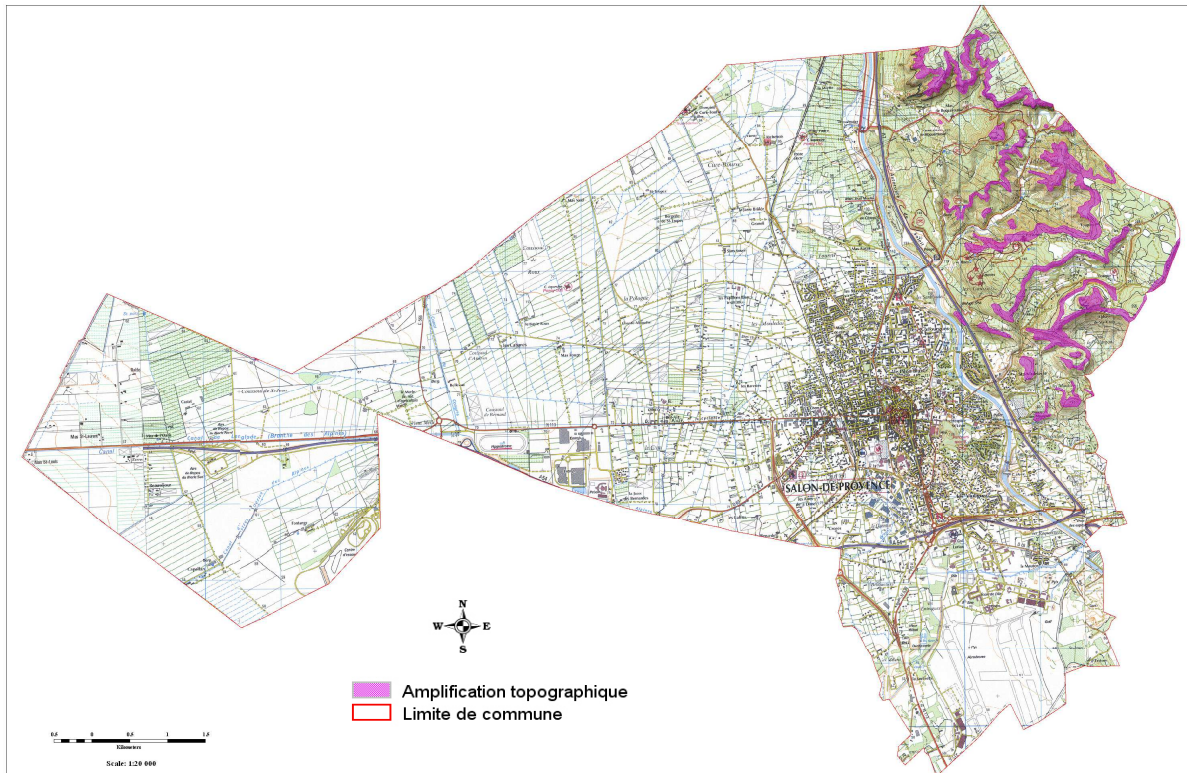


Figure 28 : Cartographie des amplifications dues à la topographie sur la commune de Salon de Provence.

Sur la commune de SALON, seuls les reliefs du Nord-Est de la commune au niveau de la terminaison occidentale de la Chaîne des Costes peuvent entraîner une modification du mouvement sismique. Ces amplifications éventuelles sont repérées sur la Figure 28.

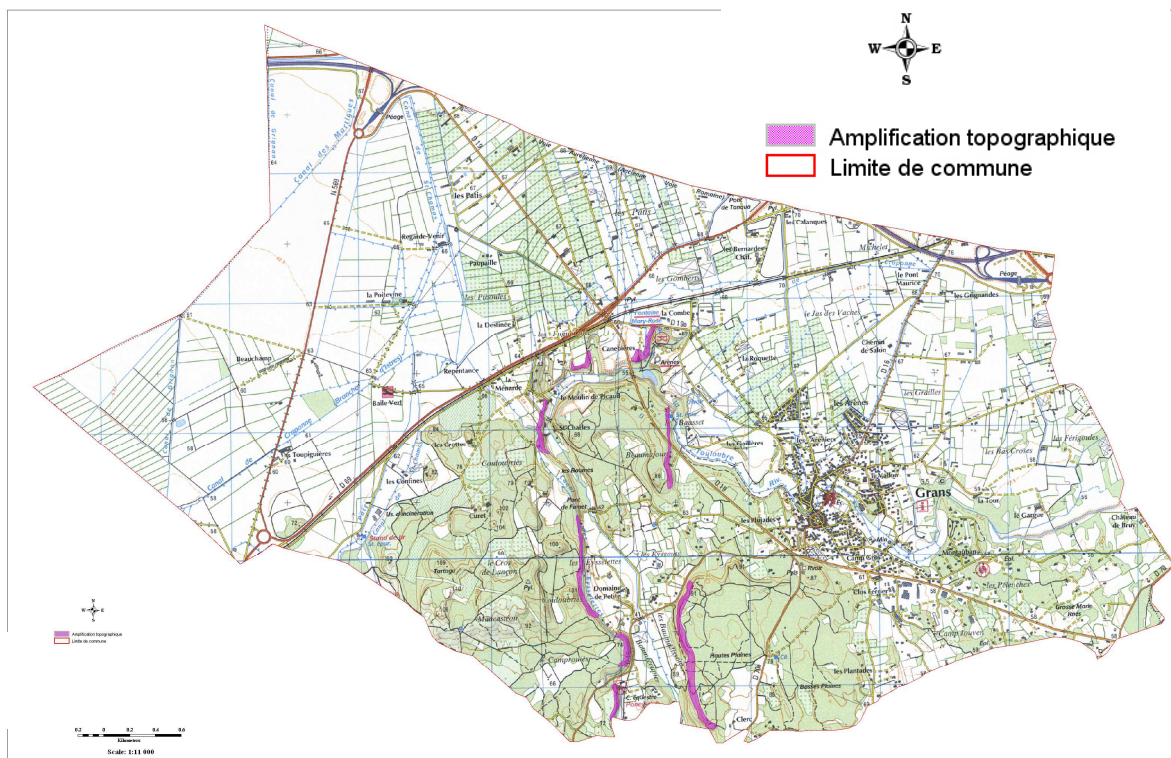


Figure 29 : Cartographie des amplifications dues à la topographie sur la commune de Grans.

La géographie de la commune de Grans ne présente que très peu de reliefs. Une légère amplification peut être cependant attendue localement sur les crêtes des contreforts du sillon de la Touloubre. Ces amplifications éventuelles sont repérées sur la Figure 29.

La majeure partie de la commune de Pélissanne se situe dans la plaine de la Touloubre, seuls les reliefs du Nord et, dans une moindre mesure, la topographie du sud-est peuvent entraîner une amplification du mouvement sismique. Ces amplifications éventuelles sont repérées sur la Figure 30.

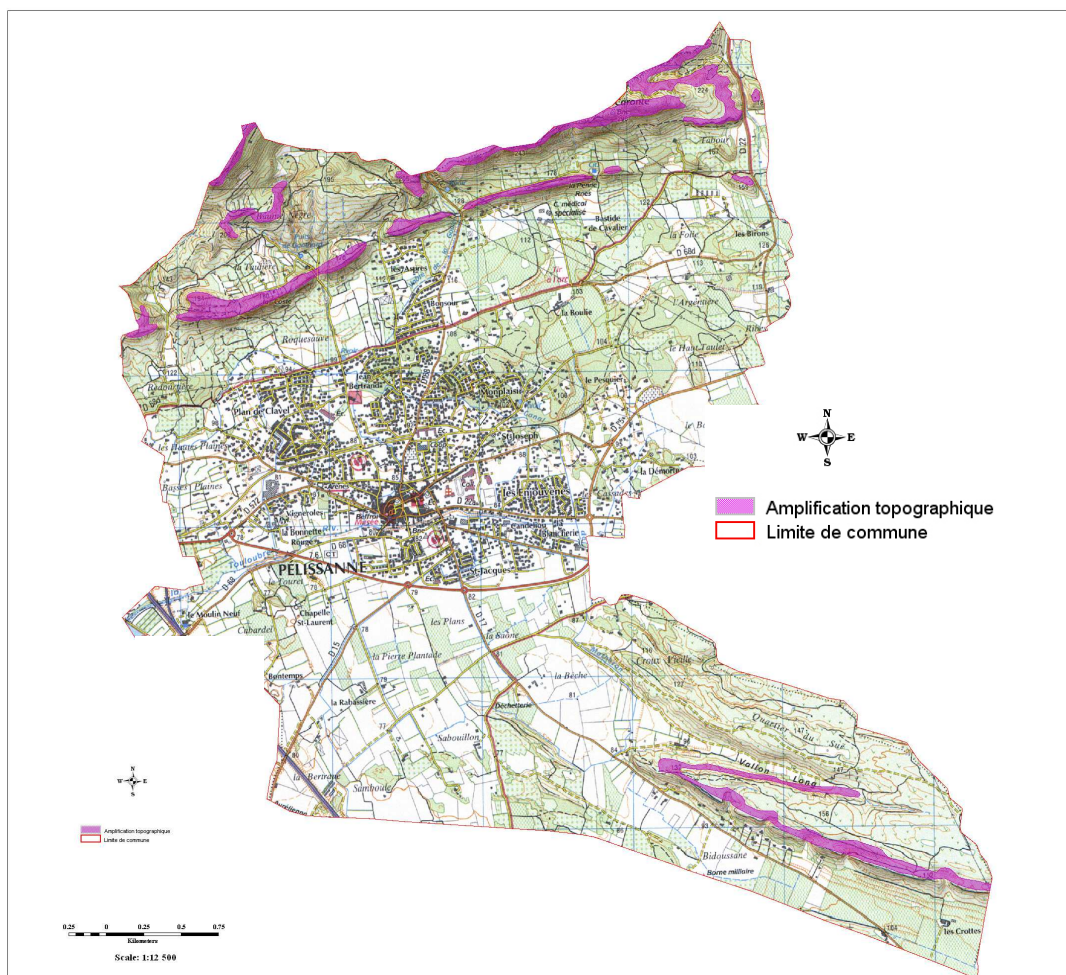


Figure 30 : Cartographie des amplifications dues à la topographie sur la commune de Pélissanne

Les incertitudes liées à ces estimations paraissent aujourd'hui trop importantes pour être transcrites en termes réglementaires. Une étude spécifique pourra être demandée pour des constructions en bord de crête dans les zones repérées sur les 3 communes.

5 Conclusion

Les études préalables aux plans de prévention des risques sismiques pour les communes de Grans, Salon de Provence et Pélissanne ont permis d'établir un microzonage sismique pour les trois communes. Ce microzonage comprend 5 zones à effet de site lithologique, une zone à effet de site topographique et une zone sans effet de site, au rocher. Pour chaque zone, un spectre de réponse élastique horizontal à 5% d'amortissement et spécifié pour les bâtiments de catégorie d'importance II selon la norme parasismique.

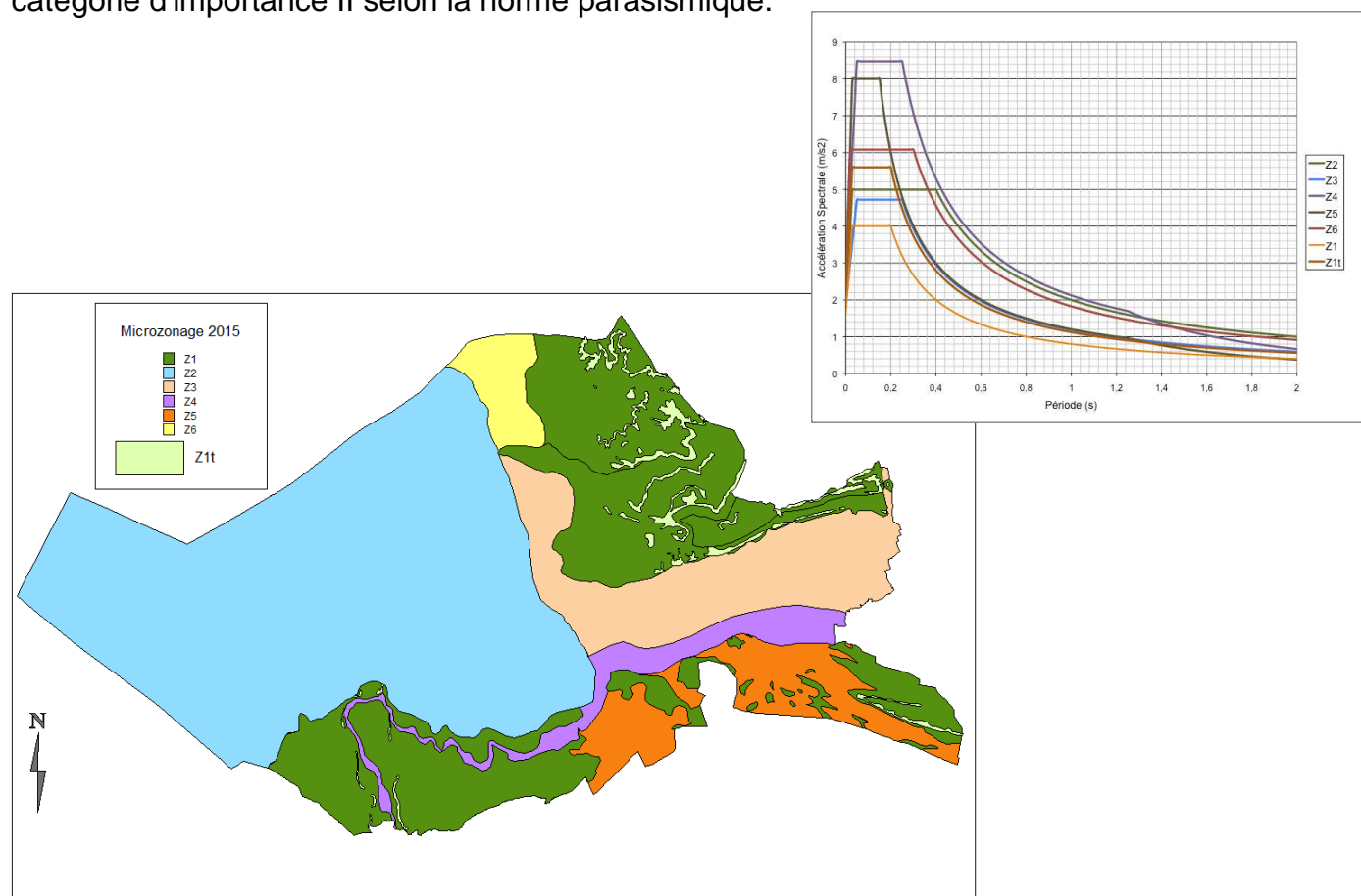


Figure 31 : Microzonage des communes de Grans, Salon de Provence et Pélissanne

Le chef du service Risque Sismique

Le chef du laboratoire de Nice

Etienne Bertrand

P.I. Patrice Maurin

Connaissance et prévention des risques - Développement des infrastructures - Énergie et climat - Gestion du patrimoine d'infrastructures
Impacts sur la santé - Mobilités et transports - Territoires durables et ressources naturelles - Ville et bâtiments durables