

BWG
OFEG
UAFEG
FOWG



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

MESURES *IN SITU* DES FREQUENCES PROPRES DE BATIMENTS ET DE SITES « FREE FIELD »

– PROJET PILOTE D’AIGLE –



Auteurs

Blaise Duvernay¹, Florian Widmer¹, Vincent Pellissier²

¹ Office Fédéral des Eaux et de la Géologie, Bienne, Suisse

² Ecole Polytechnique Fédérale, Lausanne, Suisse

Table des matières

Table des matières.....	2
1. Résumé.....	2
2. Zusammenfassung.....	2
3. Introduction.....	3
4. Mesures sur les bâtiments	4
5. Résultats des mesures de fréquences sur les bâtiments	7
6. Mesures « Free Field ».....	11
7. Enseignements des campagnes de mesures	13
8. Bibliographie.....	14

1. Résumé

Cet article résume les résultats obtenus lors d'une campagne de mesures dans le cadre d'un projet pilote portant sur l'évaluation du risque sismique pour une petite ville de Suisse, Aigle. Des mesures des fréquences propres de bâtiments et de sites « free-field » en différents points de la ville ont été effectuées. Cela a permis de désigner les bâtiments présentant un danger de résonance lors d'un tremblement de terre. De plus, une méthode d'évaluation rapide du risque sismique a été appliquée pour les bâtiments sélectionnés pour les mesures de fréquences propres.

2. Zusammenfassung

Im vorliegenden Artikel werden die Ergebnisse einer Messkampagne, die im Rahmen einer Versuchsreihe für ein Pilotprojekt in der Stadt Aigle stattgefunden hat, zusammengefasst. Messungen der Eigenfrequenzen der Gebäuden und eine Methode zur schnellen Abschätzung des Erdbebenrisikos wurden angewendet. Gleichzeitig wurden Messungen der Eigenfrequenz an verschiedenen Stellen des Stadtgebietes durchgeführt. Hierdurch war es möglich den vorhandenen Gebäuden eine Gefährdung durch Resonanz zuzuordnen.

3. Introduction

Dans le cadre d'un projet visant à estimer le risque sismique d'une petite ville de Suisse [Pellissier 2003], une campagne de mesure des fréquences propres de 8 bâtiments représentatifs, par leur matériau de construction, leur âge les normes en vigueur lors de leur dimensionnement, leur taille en étages ainsi que leur utilisation, a été effectuée. Pour ce faire, un système de mesure *Syscom MR-2002*, équipé d'un capteur de vitesse trois axes, de type *Syscom MR-2003*, a été utilisé.

Une campagne de mesure des fréquences propres des sols a également été menée avec les appareils du Service sismologique suisse partiellement en parallèle avec le système *Syscom MR-2002* pour des buts de comparaison entre les 2 systèmes de mesure.

La taille de la ville, comprenant environ 1'500 bâtiments, permet une analyse visuelle de la totalité des bâtiments tout en proposant une grande variété de structures. Cette étape préliminaire est présentée dans un inventaire sismique de la ville [Brennet 2002]. Aigle est représentative par bien des aspects de nombreuses petites villes de Suisse. Cela aussi bien d'un point de vue de la constitution du bâti, puisqu'on y trouve la plupart des catégories sismiques importantes, que de l'activité socio-économique.

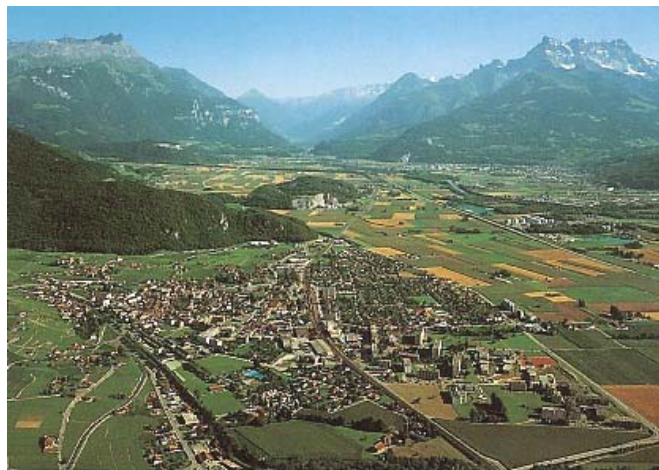


Figure 1 Vue générale de la ville d'Aigle

Ce document montre, sous forme graphique, les principaux résultats obtenus lors de cette campagne. Les mesures ont permis de confronter les fréquences propres des principales catégories de bâtiments de la ville aux fréquences des sols rencontrés dans la région. On a pu constater que le risque de résonance est relativement faible du fait de l'éloignement de ces fréquences.

Cette campagne a été réalisée par la Centrale de coordination pour la mitigation des séismes de l'Office Fédéral des Eaux et de la Géologie, à Bienne, et par l'Ecole Polytechnique Fédérale, à Lausanne. L'interprétation des résultats, issus des mesures de vibrations ambiantes des sols, a été réalisée par le Dr. Donat Fäh, du Service sismologique suisse, à Zurich [Fäh 2001].

4. Mesures sur les bâtiments

4.1. Eléments de risque

Le risque sismique est calculé comme la combinaison de ses éléments constitutifs, à savoir :

$$\text{Risque} = \text{Aléa sismique} \times \text{Vulnérabilité physique} \times \text{Valeur exposée}$$

On donne ci-dessous une définition sommaire des différentes parties de cette équation et l'on présente au chapitre 4.2 une méthode d'application rapide pour une évaluation préliminaire du risque.

a. Zone sismique

Cette notion considère l'aléa sismique régional déterminé sur la base des séismes historiques du contexte tectonique régional [Rüttener 1995].

b. Effet de site

L'effet de site ou aléa local, dépend des conditions géologiques locales [Widmer 2002]. On peut, grâce aux mesures faites en deuxième partie de cet article (mesures « free field ») estimer la fréquence propre des formations meubles constitutives des sites, ce qui est une donnée importante de l'effet de site.

c. Vulnérabilité physique

Sur la base des propriétés observées d'un bâtiment, des indications sur sa vulnérabilité peuvent être déduites. De nombreuses incertitudes sur le comportement réel sous sollicitations sismiques subsistent cependant.

d. Valeur exposée

On distingue principalement dans notre étude deux valeurs exposées; les personnes (intégrité physique) et la valeur économique immobilière assurée.

4.2. Estimation rapide du risque sismique des bâtiments

Une méthode d'évaluation rapide du risque sismique développée à l'OFEG [OFEG 2002] a été utilisée en parallèle. Cette approche repose sur une inspection visuelle, permettant d'en donner rapidement une estimation qualitative. Les résultats pour les 8 bâtiments sont donnés au tableau 1.

On donne ci-après une définition des principaux indicateurs contenus dans ce tableau.

a. Prix

Cet indicateur représente le prix d'assurance du bâtiment (valeur de remplacement à neuf). Il exprime la valeur économique directe du bien immobilier.

b. Utilisation

On mentionne ici le type d'utilisation du bâtiment étudié. Cette notion donne une indication de son importance, par exemple en tant que «lifeline». Cette information permet de traiter de manière différente les bâtiments considérés comme particulièrement importants (hôpitaux, centres de secours,...)

c. Indice humain

Cet indice montre le niveau d'occupation, en nombre et en durée, du bâtiment par les personnes. Il décrit le niveau de concentration humaine. Il exprime la valeur humaine contenue dans le bâtiment étudié. Plus cet indice est grand, plus le nombre de vies humaines en jeu est important.

d. Danger contextuel

Ce concept donne une indication sur le bâtiment dans son environnement. C'est-à-dire qu'il couple à la fois une notion d'aléa (régional et local) et le type de norme utilisée lors de son dimensionnement (âge de construction). Plus cette valeur est grande, plus le danger est important.

e. Indice de vulnérabilité physique

On estime par cet indice le comportement physique du bâtiment étudié face à un tremblement de terre. Cette estimation est faite sur la base de considérations constructives obtenues lors d'une inspection visuelle succincte et rapide. Plus cette valeur est grande, plus le bâtiment est vulnérable, donc susceptible de s'effondrer lors d'un séisme. Les deux méthodes utilisées dans les campagnes de terrain (estimation visuelle et mesure *in situ*), donnent, de manière complémentaire, des indications sur la vulnérabilité physique de l'édifice. Cependant de nombreuses incertitudes sur le comportement réel de la structure en cas de séisme demeurent.

f. Indice de probabilité d'effondrement

Cet indice donne la propension d'un édifice à s'écrouler dans un contexte donné. Usuellement, une valeur plus grande que 65 est considérée comme étant très dangereuse par la Confédération.

g. Indice de risque

Le risque est la combinaison des éléments précédemment présentés (valeur économique, utilisation, et valeur humaine, danger contextuel et vulnérabilité physique). Il détermine les priorités d'actions en donnant une base objective aux décideurs. Usuellement, une valeur plus grande que 500 est considérée comme trop importante pour la Confédération

	Valeurs			Danger contextuel	Indice de vulnérabilité physique	Indice de probabilité d'effondrement	Indice de Risque
	Prix [Frs]	Utilisation	Indice humain				
Bâtiment 1	3'750'000.00	Logistique Secours	2	6	9.0	102.0	1'012.5
Bâtiment 2	2'850'000.00	-	5	6	17.5	105.0	598.5
Bâtiment 3	2'800'000.00	Ecole	9	8	9.0	72.0	403.2
Bâtiment 4	17'250'000.00	-	28	8	4.0	32.0	552.0
Bâtiment 5	820'000.00	-	2	6	17.0	102.0	83.6
Bâtiment 6	1'550'000.00	Ecole	1	6	16.5	99.0	306.9
Bâtiment 7	1'680'000.00	-	4	12	13.0	156.0	262.1
Bâtiment 8	2'650'000.00	-	13	8	15.0	120.0	201.6

Tableau 1 Résultats de l'estimation rapide du risque sismique des bâtiments

Les résultats présentés sous forme d'indice de risque au tableau 1 sont des résultats relatifs qui permettent de fixer des priorités pour une analyse plus avancée des bâtiments. En règle générale pour un indice de risque supérieur à 500, une étude approfondie est désirable. L'indice de probabilité d'effondrement est lui aussi un indice relatif. Cependant en pratique on considère que si cet indice est inférieur à 65, le bâtiment a plutôt un comportement satisfaisant en cas de séisme.

4.3. Détermination *in situ* des fréquences propres des bâtiments

Les mesures ont été réalisées sur les principales catégories sismiques rencontrées dans des zones représentatives de la ville. On montre à la figure 2 la localisation des bâtiments où les mesures ont été réalisées.

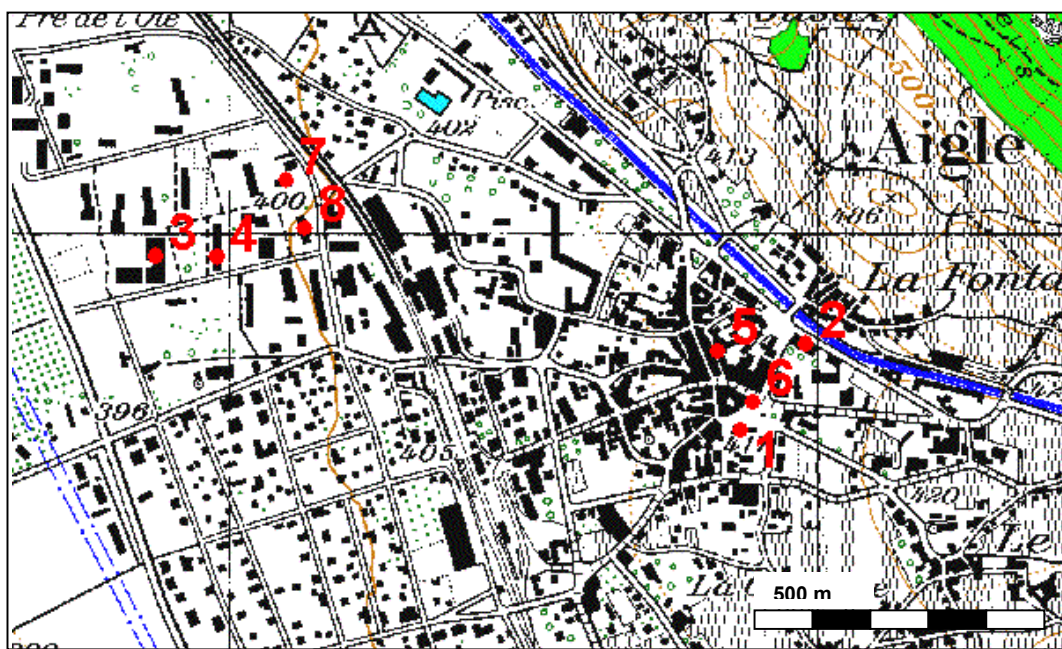


Figure 2 Localisation des bâtiments 1 à 8

L'appareil d'acquisition utilisé est un capteur de vitesse triaxial *Syscom MR-2003* couplé à une station d'acquisition *MR-2002*. Les mesures ont été effectuées par fenêtres de 20 secondes sur une période d'environ 10 minutes à l'étage supérieur des bâtiments. Le traitement des données a été effectué avec le logiciel *View 2002* de Ziegler Consultants. Le principal résultat est la moyenne des spectres de Fourier calculés pour chaque fenêtre de 20 secondes. Les pics de ces moyennes correspondent aux fréquences propres des bâtiments. Les résultats sont présentés selon deux axes; X (longitudinal) et Y (transversal).

5. Résultats des mesures de fréquences sur les bâtiments

Bâtiment 1 : Hôtel de ville

Type	Béton armé et colonnes en acier
Adresse	Place du marché 1
Construction	1961-1962
Plans à disposition	Oui
Nombre d'étages	5
Propriétaire	Commune
Zone cadastrale	Centre-ville non contigu
Remarque	Un mode de torsion à 3.8 Hz a été identifié



Figure 3 Bâtiment 1

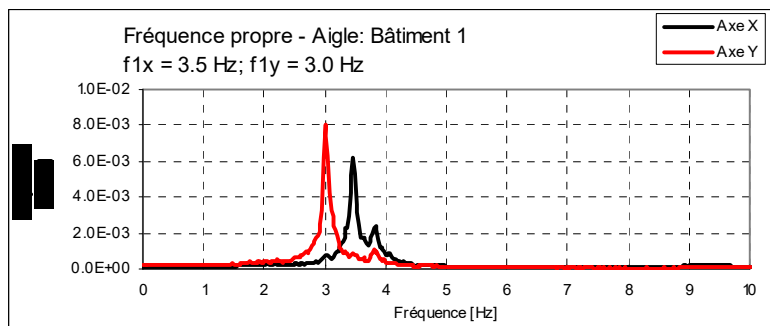


Figure 4 Fréquence propre du bâtiment 1

Bâtiment 2 : Ancien collège

Type	Murs en boules et maçonnerie
Adresse	Rue du Collège
Construction	1869
Plans à disposition	Oui
Nombre d'étages	3.5
Propriétaire	Commune
Zone cadastrale	Centre-ville non contigu



Figure 5 Bâtiment 2

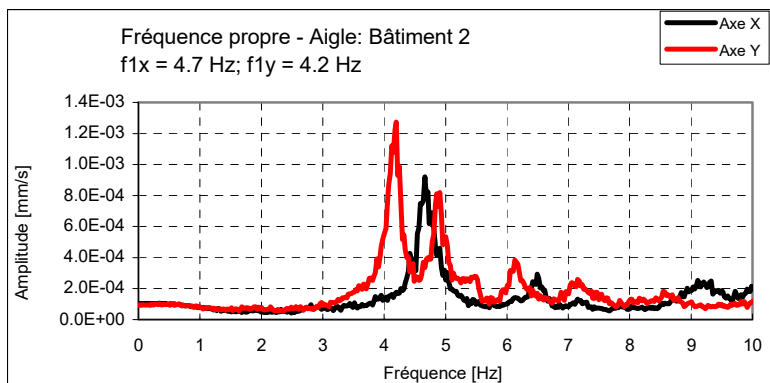


Figure 6 Fréquence propre du bâtiment 2

Bâtiment 3 : Collège de la Planchette

Type Poteaux métalliques (refends maçonnerie) et planchers mixtes
 Adresse Chemin de la Planchette
 Construction 1971-1972
 Plans à disposition Oui
 Nombre d'étages 3
 Propriétaire Commune
 Zone cadastrale Résidentielle collectif



Figure 7 bâtiment 3

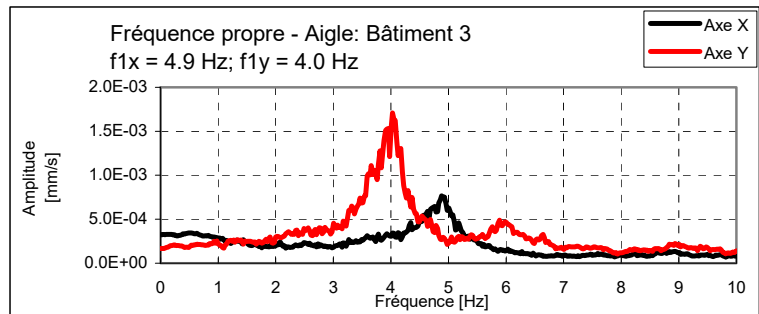


Figure 8 Fréquence propre du bâtiment 3

Bâtiment 4 : Bâtiment d'habitations collectives

Type Béton armé /maçonnerie
 Adresse Chemin de la Planchette
 Construction Env. 1970
 Plans à disposition Non
 Nombre d'étages 10
 Propriétaire Privé (inconnu)
 Zone cadastrale Résidentielle collectif
 Résultats Pics peu clairs, certainement du fait d'un système statique hétérogène



Figure 9 Bâtiment 4

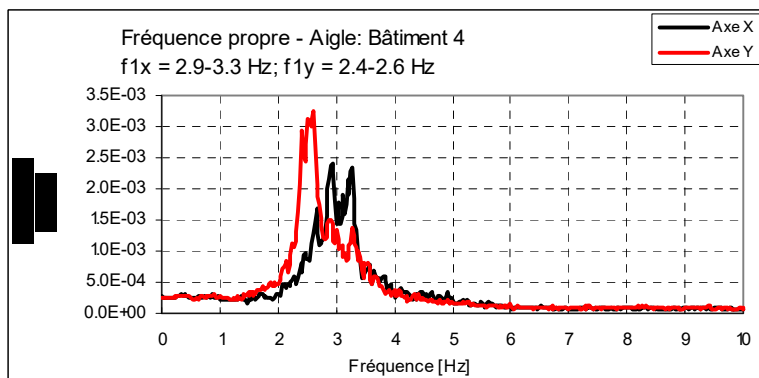


Figure 10 Fréquence propre du bâtiment 4

Bâtiment 5 : Bâtiment d'habitations du centre-ville contigu

Type Pierres taillée/hourdis
 Adresse Rue de Jerusalem 13
 Construction XIVème
 Plans à disposition Non
 Nombre d'étages 4
 Propriétaire Privé (Sutter)
 Zone cadastrale Centre-ville contigu
 Résultats L'axe X est difficile à interpréter.
 On voit un double pic selon Y, difficile à interpréter.



Figure 11 Bâtiment 5

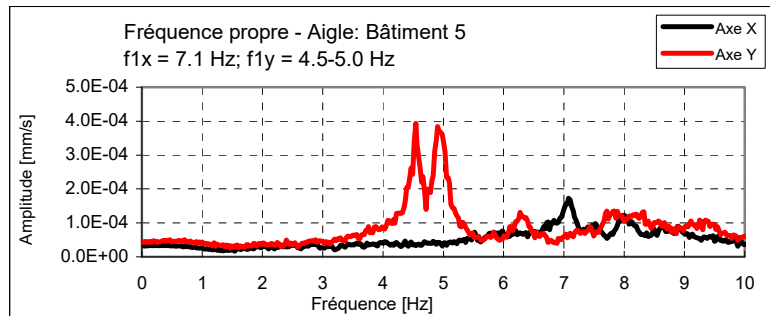


Figure 12 Fréquence propre du bâtiment 5

Bâtiment 6 : Ancien Hôtel de ville

Type Moellons traditionnels
 Adresse Place du marché
 Construction XVIIème
 Plans à disposition Oui
 Nombre d'étages 3.5
 Propriétaire Commune
 Zone cadastrale Centre-ville contigu
 Particularités Symétrique
 Difficilement interprétable (système statique hétérogène)
 Pics mal définis
 Niveau de bruit dans le bâtiment très faible



Figure 13 Bâtiment 6

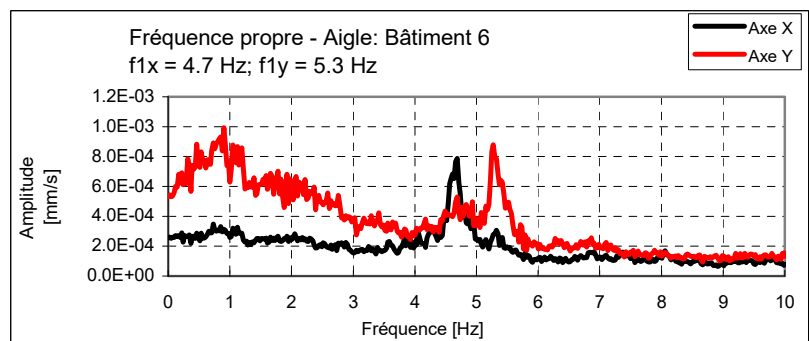


Figure 14 Fréquence propre du bâtiment 6

Bâtiment 7 : Bâtiment d'habitation collective

Type Murs maçonnerie, dalles en béton armé
 Adresse Chemin des Lieugex
 Construction Env. 1950
 Plans à disposition Non
 Nombre d'étages 4.5
 Propriétaire Privé
 Zone cadastrale Résidentielle collectif



Figure 15 Bâtiment 7

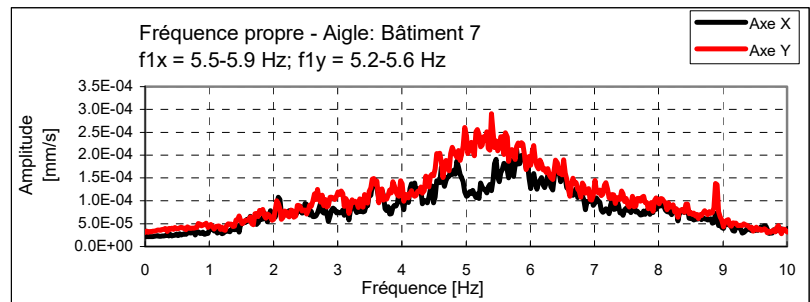


Figure 16 Fréquence propre du bâtiment 7

Bâtiment 8 : Bâtiment d'habitation collective

Type Murs maçonnerie et béton armé, dalles en béton armé
 Adresse Chemin des Lieugex
 Construction Env. 1970-80
 Plans à disposition Non
 Nombre d'étages 6
 Propriétaire Privé
 Zone cadastrale Résidentielle collectif



Figure 17 Bâtiment 8

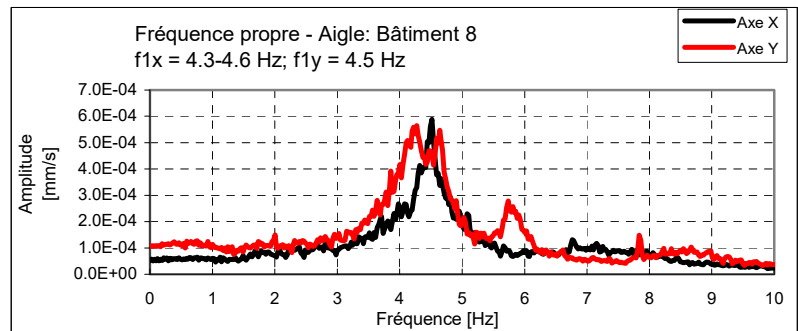


Figure 18 Fréquence propre du bâtiment 8

6. Mesures « Free Field »

Une série de mesures de fréquences propres de sites selon la méthode des rapports spectraux H/V [Nakamura 2000] a été effectuée. Les emplacements des points de mesure sont montrés à la figure 18. Les résultats sont résumés dans le tableau 2. On donne également, à titre d'exemple, la représentation graphique d'un point de mesure à la figure 19.

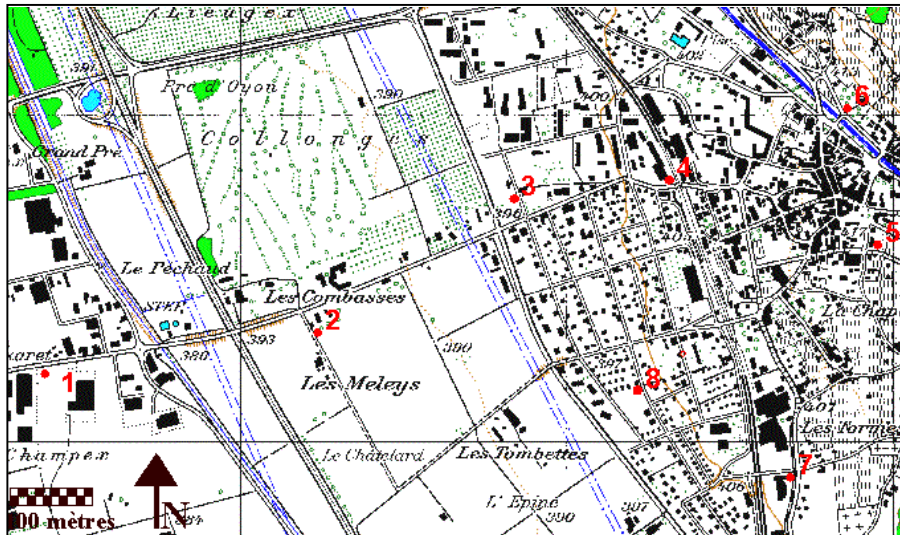


Figure 18 Localisation des points de mesure « Free Field »

Les 8 points de mesure ont été choisis de manière à rendre compte de la variation de la fréquence propre des sols au voisinage de la ville d'Aigle. Une durée d'acquisition de 30 minutes environ a été appliquée pour chacun d'entre eux.

Le traitement du signal, réalisé au Service sismologique suisse, permet d'obtenir le graphique H/V en fonction de la fréquence (Figure 19). La fréquence propre correspond alors à l'amplitude du pic le plus élevé du spectre H/V [Fäh 2001].

n°	Fréquence de résonance f_0	$f_{0 \text{ min}}$	$f_{0 \text{ max}}$	$\log_{10}(H/V)$	$\log_{10}(H/V)$ min	$\log_{10}(H/V)$ max	Coordonnées absolues
1	0.28	0.262	0.323	0.797	0.713	0.698	N 46°18.483 E 006°56.151
2	0.33	0.235	0.403	0.562	0.615	0.698	N 46°18.510 E 006°56.544
3	0.60	0.498	0.696	0.448	0.425	0.417	N 46°19.052 E 006°57.225
4	0.98	0.807	1.282	0.691	0.653	0.607	N 46°19.068 E 006°57.439
5	1.26	0.978	1.547	0.592	0.615	0.531	N 46°19.015 E 006°58.139
6	Pas de résultat interprétable (du fait de la trop faible profondeur de sédiments)						N 46°19.149 E 006°58.086
7	1.66	1.453	2.079	0.729	0.729	0.683	N 46°18.383 E 006°58.004
8	0.99	0.826	1.191	0.569	0.584	0.546	N 46°18.463 E 006°57.408

Tableau 2 Résultats des mesures des fréquences propres des sites

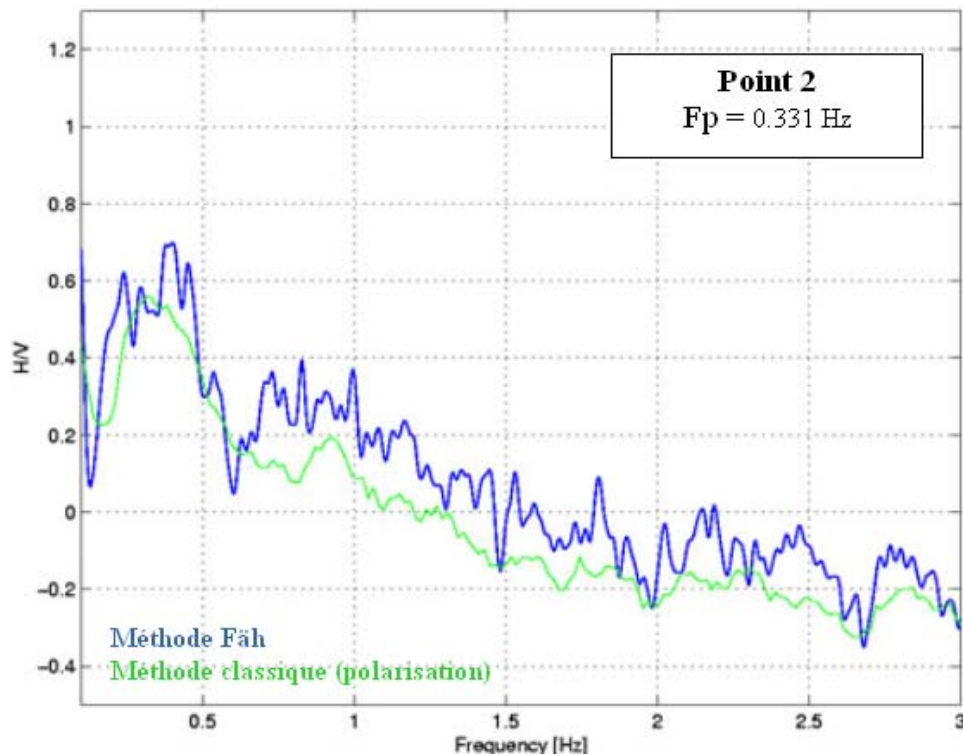


Figure 19 Exemple graphique

Les fréquences propres du sol des sites 1 à 5 ont également été mesurées à l'aide du système *MR-2002/MR-2003*, mais en utilisant une plaque de base pour le contact avec le sol qui n'était pas adaptée au séismographe *MR-2003* (plaque de base SED). La comparaison des résultats avec les mesures des appareils du SED exprimée dans le tableau 3 montre une bonne concordance pour les points 1 et 2 et une concordance moyenne à mauvaise pour les points 3 et 5. Les mesures du point 4 étaient ininterprétables. La relative mauvaise qualité des résultats pour les points 3 à 5 peut être expliquée en partie par le fait que le séismographe avait tendance à glisser sur le socle de la plaque de base utilisée. Des mesures complémentaires avec une plaque de base adaptée devraient pouvoir lever cette incertitude et permettre une meilleure comparaison des résultats. Les mesures ont été effectuées sur une période d'environ 20 à 30 minutes ce qui selon l'avis de Ziegler Consultants qui distribue le système *MR-2002/MR-2003* est un peu faible. L'influence d'une durée de mesures de 40 à 60 minutes pour les sites 3 à 5 devrait également être testée.

Points	Mesures SED			Mesures MR-2002/MR-2003			Concordance
	f_0	$f_{0 \text{ min}}$	$f_{0 \text{ max}}$	f_0	$f_{0 \text{ min}}$	$f_{0 \text{ max}}$	
1	0.29	0.26	0.32	0.29	0.26	0.32	Bonne
2	0.33	0.24	0.40	0.39	0.24	0.54	Bonne
3	0.60	0.50	0.70	?	0.12	0.59	Mauvaise
4	0.98	0.81	1.28	Ininterprétable			-
5	1.26	0.98	1.55	~1.8	1.0	2.2	Moyenne

Tableau 3. Comparaison des mesures de fréquences propres de sites free-field

7. Enseignements des campagnes de mesures

Pour les mesures « free-field », l'obtention de résultats interprétables dépend en grande partie d'un bon contraste d'impédance entre les dépôts meubles et leur substratum, ainsi qu'à une géométrie du bedrock relativement simple. La comparaison entre les deux systèmes d'appareils de mesures (SED et MR-2002) dans ce domaine doit encore faire l'objet de tests complémentaires pour être validée. La plaque de base utilisée pour le système *Syscom MR-2002* n'était pas optimale pour la qualité des résultats. De plus, le logiciel d'interprétation *View 2002* doit encore être modifié pour l'analyse des données de manière à respecter la méthode de polarisation classique.

La bonne qualité des résultats de mesures « free-field » du centre ville tendrait à montrer que l'effet de site géométrique lié à l'encaissement de la vallée à cet endroit n'est pas significatif. En effet, on aurait pu penser a priori qu'une telle vallée, encaissée, pouvait contribuer à augmenter de manière importante le mouvement du sol en surface par le biais de multi-réflexions latérales et ainsi rendre difficile ou impossible l'identification d'une fréquence propre.

La comparaison des fréquences propres des différentes catégories de bâtiments avec les fréquences propres des sols nous donne une indication sur le risque de résonance. D'un point de vue strictement théorique, la fréquence propre d'un ouvrage doit différer de la fréquence propre du sol de fondation, afin d'éviter le phénomène de résonance. Les fréquences propres des bâtiments mesurés varient de 2.4 à 7.1 Hz, alors que celles des sols varient de 0.3 à 1.7 Hz. Dans le tableau 4, les fréquences propres des bâtiments et des sites free-field les plus proches sont représentés. La rapport entre la fréquence propre minimum du bâtiment et f_0 free-field est également représenté.

Bâtiment	f_0 bâtiment		f_0 "free field"		f_0 bâtiment / f_0 free-field
	f_0 long	f_0 lat	Point	f_0	
1	3.5	3.0	5	1.3	2.3 ?
2	4.7	4.2	5	1.3	3.2 ✓
3	4.9	4.0	3	0.6	6.7 ✓
4	2.9-3.3	2.4-2.6	3	0.6	4.0 ✓
5	7.1	4.5-5.0	5	1.3	3.4 ✓
6	4.7	5.3	5	1.3	3.6 ✓
7	5.5-5.9	5.2-5.6	4	1.0	5.2 ✓
8	4.3-4.6	4.5	4	1.0	4.3 ✓

Tableau 4. Comparaison des mesures de fréquences propres de sites free-field et des mesures de fréquences propres des bâtiments

On sait que la fréquence propre des bâtiments diminue lors d'un tremblement de terre du fait notamment de l'apparition de fissures. Il faut donc s'assurer que si la fréquence propre du sol est plus faible que celle du bâtiment qu'une séparation suffisante de ces fréquences existe. Le danger se situe a priori pour un facteur situé entre 1.5 et 3 ce qui correspond à une inertie de la structure lors du séisme de respectivement 50% à 10% de l'inertie initiale. Pour un facteur hors de cette zone, la probabilité de résonance devient faible, ce qui est bien le cas pour la plupart des bâtiments selon le tableau 4, sauf pour le

bâtiment 1. Compte tenu de toutes incertitudes inhérentes au problème, il est possible que sa fréquence propre pourrait se rapprocher de celle du sol lors d'un tremblement de terre. Un effet de résonance n'est donc pas totalement exclu pour ce bâtiment. Des analyses plus poussées notamment sur la base des matériaux de construction du bâtiment devrait pouvoir dire si la fréquence propre de la structure pourrait s'abaisser jusqu'à celle du sol en fonction de la perte d'inertie attendue lors de sollicitations sismiques. La typologie de ce bâtiment n'est cependant pas représentative du centre ville ou il se trouve ce qui exclut un problème à large échelle. Ces résultats ont été utilisée directement dans la quantification du risque sismique de la ville d'Aigle [Pellissier 2003].

A titre complémentaire, l'estimation rapide du risque pour les 8 bâtiments effectuée au chapitre 4 montre que les bâtiments 1, 2 et 4 méritent une étude plus approfondie de leur vulnérabilité physique. Il sont, selon les objectif de protection de la Confédération, classés en première priorité. Ceci prend d'autant plus de sens pour le bâtiment 1 qu'un effet de résonance n'est pas exclu

8. Bibliographie

- [Fäh 2001] **Fäh, D., Kind, F., and Giardini, D.**, *A theoretical investigation of average H/V ratios*, Geophys. J. Int., Vol. 145, 535-549, **2001**.
- [Pellissier 2003] **Pellissier V.**, *Estimation du risque sismique de la ville d'Aigle*, Mandat ECA, Pully, Suisse, **2003**.
- [Nakamura 2000] **Nakamura Y.**, Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications, 12th World Conference on Earthquake Engineering, Society for Earthquake Engineering, Paper No. 2656, Upper Hutt, New Zealand, **2000**.
- [OFEG 2002] **Office Fédéral des Eaux et de la Géologie**, *Evaluation de la sécurité parasismique des constructions existantes*, Bienne, Switzerland, **2002**.
- [Rüttener 1995] **Ruettener E.**, *Earthquake Hazard Evaluation for Switzerland*, Schweizerischer Erdbebendienst, Inst. für Geophysik - ETHZ, 29, 106, Zürich, Switzerland, 08, **1995**.
- [Widmer 2002] **Widmer F.**, *Projet pilote de microzonage sismique dans le secteur d'Yverdon*, OFEG & EPFL/GEOLEP, Bienne. Switzerland, **2002**.