

Enregistrements accélérométriques en champ proche du séisme d'Annecy du 6 Avril 2013 ($M_L=2.7$ ¹)

Equipe Risques, ISTerre, 9 avril 2013.

Le séisme survenu le 6 Avril 2013 à Annecy a été largement ressenti par la population locale et également très bien enregistré par les stations du [Réseau Accélérométrique Permanent \(RAP\)](#), qui comporte 5 stations dans l'agglomération annécienne. Ces stations ont été installées dans les années qui ont suivi le [séisme d'Epagny](#) ($M_L=5,2$, $M_w = 4.2$; Dufumier, 2002²) du 15 Juillet 1996. La distribution géographique des stations est représentée sur la figure 1, avec la position de l'épicentre du séisme déterminée par le réseau [Sismalp](#) du [service d'observation de ISTerre](#); les dates d'installation et les distances épacentrales pour ce séisme sont indiquées dans le Tableau 1.

Comme le montre la Figure 1 et en tenant compte de l'incertitude sur la localisation de l'événement, toutes les stations accélérométriques se trouvent dans un rayon de 5 kilomètres de l'épicentre. Leurs enregistrements sont très utiles pour comprendre la variabilité du mouvement sismique et ils seront utiles à l'avenir pour prédire plus finement ce mouvement dans l'hypothèse d'un séisme de plus forte magnitude qui se produirait sur la même faille sismique.

¹ La magnitude peut être estimée de différentes manières. C'est la raison pour laquelle il existe des magnitudes dites locale (ML), de moment (Mw), des ondes de volume (Mb), des ondes de surface (Ms). Des explications sur les différentes mesures de magnitude peuvent être trouvées sur le document [« Idée reçue N° 4 : L'échelle de magnitude de Richter contient dix niveaux - La magnitude des séismes »](#)

² Dufumier, H., 2002. Synthesis of magnitude and focal mechanism computations for the $M \geq 4.5$ earthquakes in France for the period 1995–2000, Journal of Seismology, 163-181.

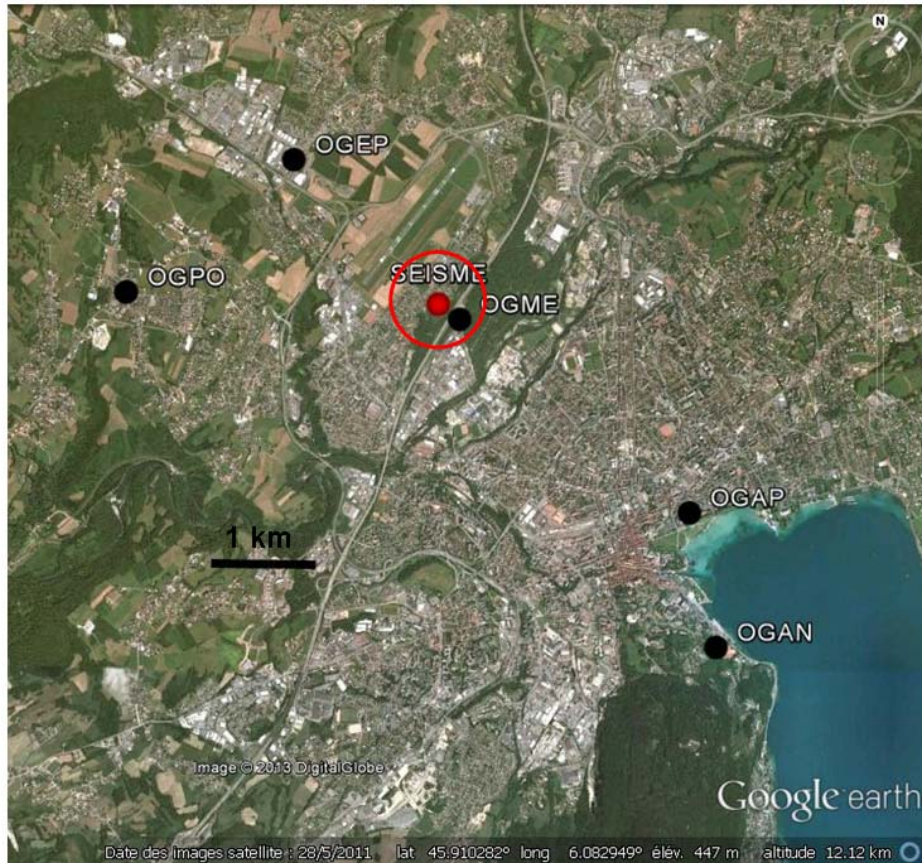


Figure 1 : Localisation des stations accélérométriques de l'agglomération annécienne et de l'épicentre du séisme du 6 Avril 2013 (localisation Sismalp). Le cercle rouge indique l'ordre de grandeur de l'incertitude sur la localisation de l'épicentre qui est de l'ordre du demi-kilomètre.

Tableau 1 : informations générales sur les stations RAP d'Annecy.

Nom station	Localisation	Date installation	Distance épacentrale approximative (localisation Sismalp)
OGME	Meythet	11/03/2005	Moins de 1 km
OGEP	Epagny	21/03/2002	2 km
OGAP	Préfecture Annecy	02/05/1998	3 km
OGPO	Poisy	21/03/2002	3 km
OGAN	Annecy	18/02/1997	4 km

Les valeurs extrêmes (maxima positifs et négatifs) de l'accélération du sol mesurées pendant les quelques secondes de la secousse sont représentées dans le Tableau 2. Ces valeurs sont extrêmement variables spatialement et elles sont remarquablement élevées à la station OGME : elles sont parmi les plus fortes enregistrées dans les Alpes par le Réseau Accélérométrique Permanent depuis sa création voici près de 20 ans comme le montre la distribution des accélérations enregistrées de juin 1995 à juillet 2011 sur la Figure 2 !

Tableau 2: valeurs minimales et maximales de l'accélération du sol (en cm/s/s) mesurée pendant le séisme d'Annecy du 6/4/2013.

Nom station	Composante Est-Ouest	Composante Nord-Sud	Composante Verticale
OGME	-62.16 / 106.26	-101.88 / 87.27	-72.27 / 74.64
OGEP	-29.35 / 23.84	-51.77 / 49.38	-41.45 / 19.26
OGAP	-22.05 / 21.49	-15.72 / 16.45	-37.81 / 24.28
OGPO	-14.07 / 11.93	-7.59 / 8.48	-16.42 / 13.87
OGAN	-1.93 / 2.51	-1.75 / 1.38	-1.64 / 1.61

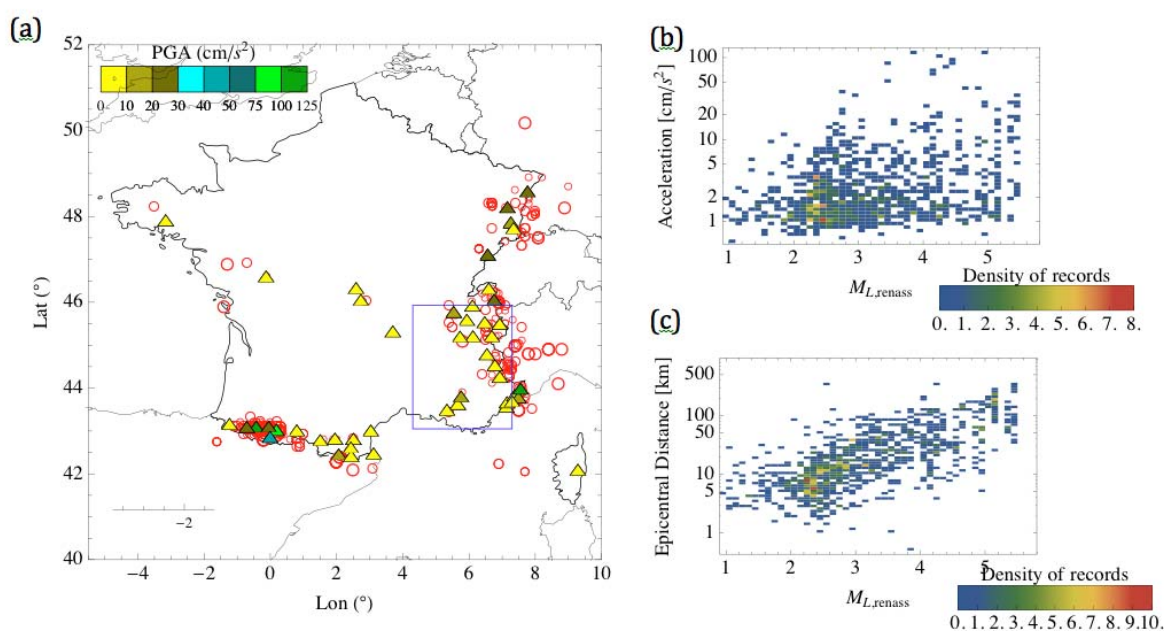


Figure 2: Base de données accélérométriques du RAP de juin 1995 à juillet 2011 pour des accélérations minimales de 1 cm/s/s et 48 stations dites au rocher [Regnier et al. 2010³]. (a) triangles : stations au rocher, l'échelle de couleur correspond aux accélérations maximales observées à chaque station pendant la durée d'observation (qui varie de 5 à 16 ans); cercles: séismes responsables de ces accélérations; (b) distribution des accélérations maximales de l'ensemble de la base considérée, en fonction des magnitudes ML estimées par le RENASS correspondantes; (c) distribution des accélérations maximales de la base considérée, en fonction de la distance épacentrale; l'échelle de couleur indique le nombre d'enregistrement par intervalles. Figure extraite des travaux de thèse de Hilal Oksuz-Tasan (en cours)

Bien sûr de telles valeurs d'accélération sont à relativiser : elles concernent des hautes fréquences auxquelles les bâtiments ne sont pas trop sensibles, et elles sont mesurées à proximité immédiate de la faille comme le montre l'analyse des enregistrements. Les Figures 3, 4 et 5 montrent l'accélération du sol enregistrée pendant 20 secondes selon les 3 composantes des 5 stations annéciennes. Le signal est très impulsif, très court. L'onde P arrive à la station OGME après moins d'un dixième de seconde et la différence de temps d'arrivée des ondes S et P est de l'ordre de 0,4 secondes, ce qui situe l'hypocentre à environ 3 km d'OGME.

L'analyse des spectres de Fourier des accélérations du sol (Figure 6) suggère que le pic d'accélération à OGME est contrôlé par des fréquences très élevées (entre 15 et 30 Hz), elles montrent aussi une

³ Régnier J., Laurendeau A., Duval A.-M. and Guéguen P. 2010. From heterogeneous set of soil data to VS profile : Application on the French permanent accelerometric network (RAP) sites. Proc. 14 EEC, Ohrid, 30 August - 03 September 2010

composante très basse fréquence à la station de la préfecture (OGAP) qui se trouve sur une importante quantité de sédiments lacustres qui amplifient notablement le mouvement sismique à partir d'une fréquence légèrement inférieure à 1 Hz.

Les vitesses et les déplacements du sol, obtenus après intégration (et filtrage passe-haut au dessus de 0,4 Hz) des accélérations, sont représentés sur les Figures 7, 8, 9 et 10, 11, 12. On remarque qu'un vélocimètre aurait pu saturer à OGME et à OGEP où les valeurs de vitesse maximales atteignent respectivement 14 et 15 mm/s. La figure 13 illustre pour des enregistrements du mouvement du sol suite au séisme de ML4.4 de Barcelonnette du 26 février 2012, le phénomène de saturation qui rend inutilisable les enregistrements vélocimétriques.

Sur les figures 7, 8, 9 et 10, 11, 12, on distingue également les effets de l'amplification basse fréquence aux stations OGAP et OGPE, et particulièrement à la station OGAP. La Figure 14 montre les rapports H/V entre les amplitudes spectrales mesurées sur les composantes horizontales et la composante verticale du mouvement du sol. Ces rapports H/V montrent que le mouvement sismique a été amplifié à partir des fréquences de 0.7 Hz pour OGAP, 1 Hz pour OGPO et OGME et 2 Hz pour OGEP. A contrario, le rapport H/V observé à la station OGAN ne montre pas clairement de fréquences amplifiées, ce qui est cohérent avec le fait que cette station est située au rocher.

Enfin, on peut noter la présence d'une « rampe » sur les déplacements enregistrés à OGME, une signature typique de sismogrammes enregistrés en « champ proche ».

Les spectres de réponse en accélération sont comparés sur la Figure 15 aux spectres de réponse réglementaires de la région, située en zone 4 du nouveau zonage sismique de la France, correspondant à une accélération d'ancrage de 1,6 m/s². On y voit que fort heureusement et fort logiquement, les mouvements mesurés restent très en dessous des spectres réglementaires. On peut cependant noter le caractère exceptionnel des mouvements au site OGME, qui malgré la faible magnitude sont comparables aux niveaux réglementaires à très courte période. Pour la bande de période d'intérêt en génie parasismique courant, les niveaux mesurés restent cependant très faibles. On peut, toutes proportions gardées, rapprocher cette observation de celles effectuées à Lorca (Espagne, 2011), Christchurch (Nouvelle-Zélande, 2011) ou L'Aquila (Italie, 2009) : ces séismes, de magnitude modérée mais beaucoup plus importante que celle de ce séisme d'Annecy (respectivement Mw 5,1, Mw 6,3 et Mw 6,3), s'étaient produits à l'aplomb de zones urbaines bien instrumentées, et avaient donné lieu à des enregistrements plus (à considérablement plus) forts que les valeurs réglementaires.

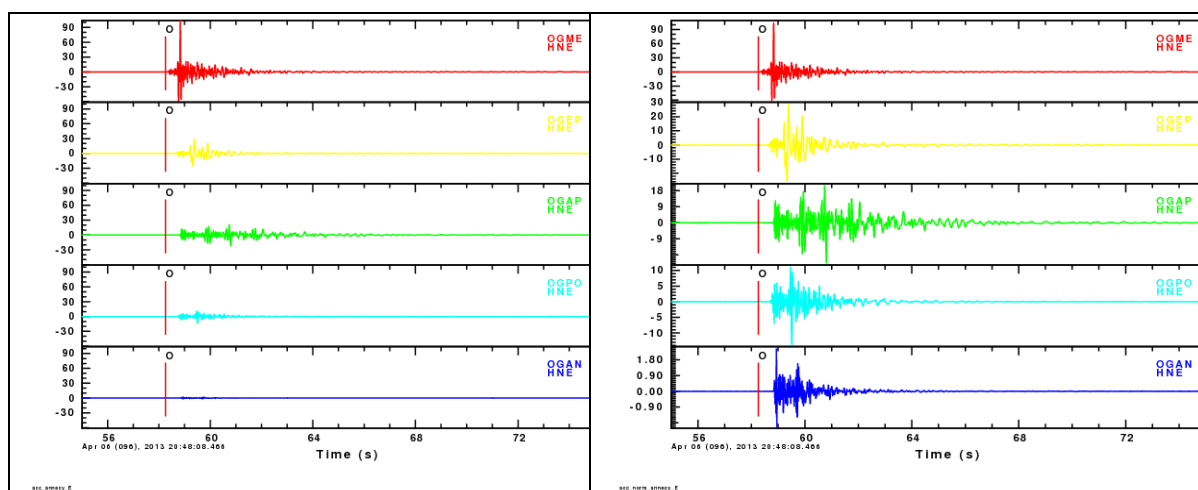


Figure 3 : composante Est-Ouest de l'accélération du sol en cm/s/s enregistrée par les stations locales RAP, en amplitude absolue (gauche) et relative (droite). La taille de la fenêtre est de 20 secondes.

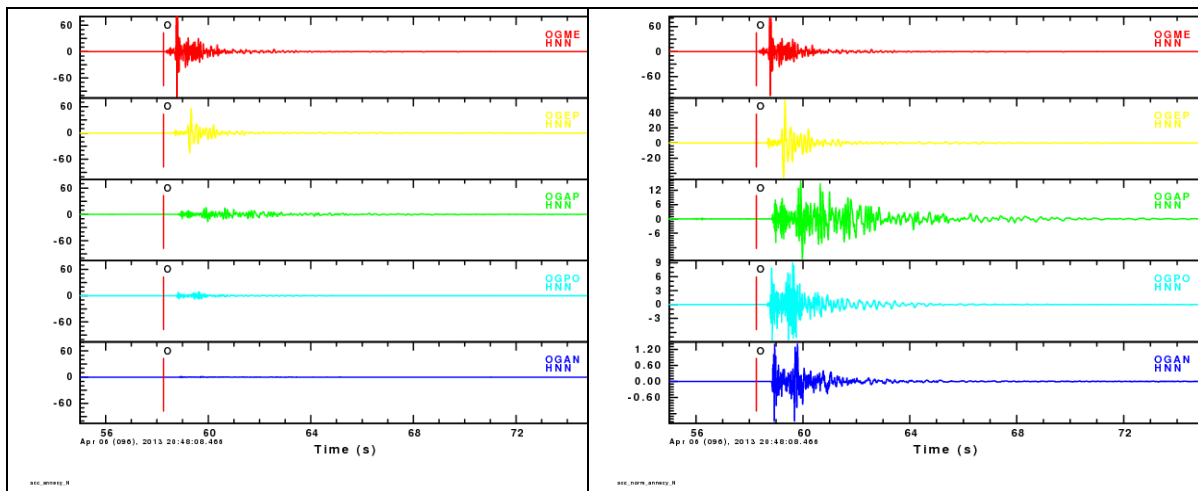


Figure 4 : composante Nord-Sud de l'accélération du sol en cm/s/s enregistrée par les stations locales RAP, en amplitude absolue (gauche) et relative (droite).

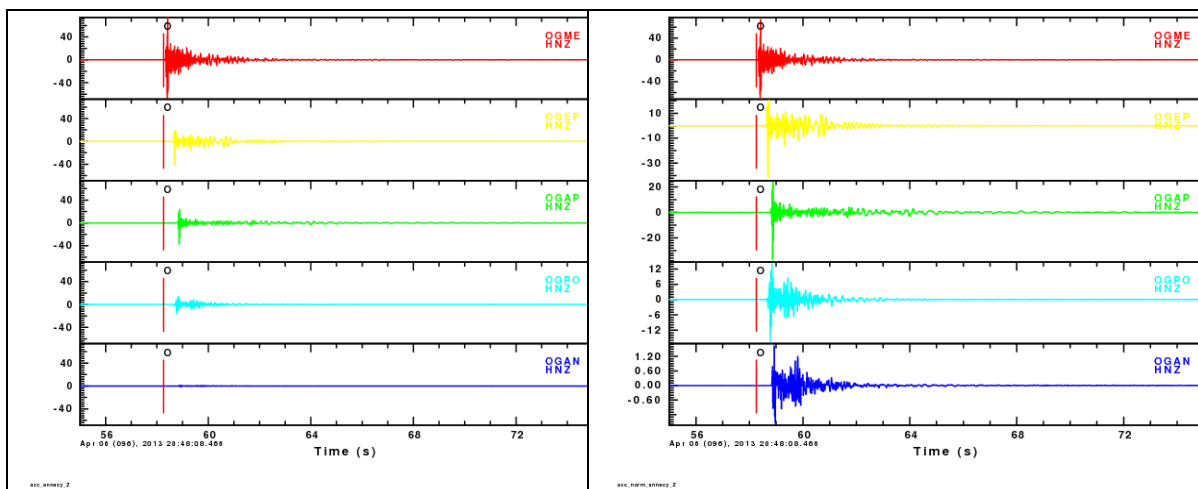


Figure 5 : composante verticale de l'accélération du sol en cm/s/s enregistrée par les stations locales RAP, en amplitude absolue (gauche) et relative (droite).

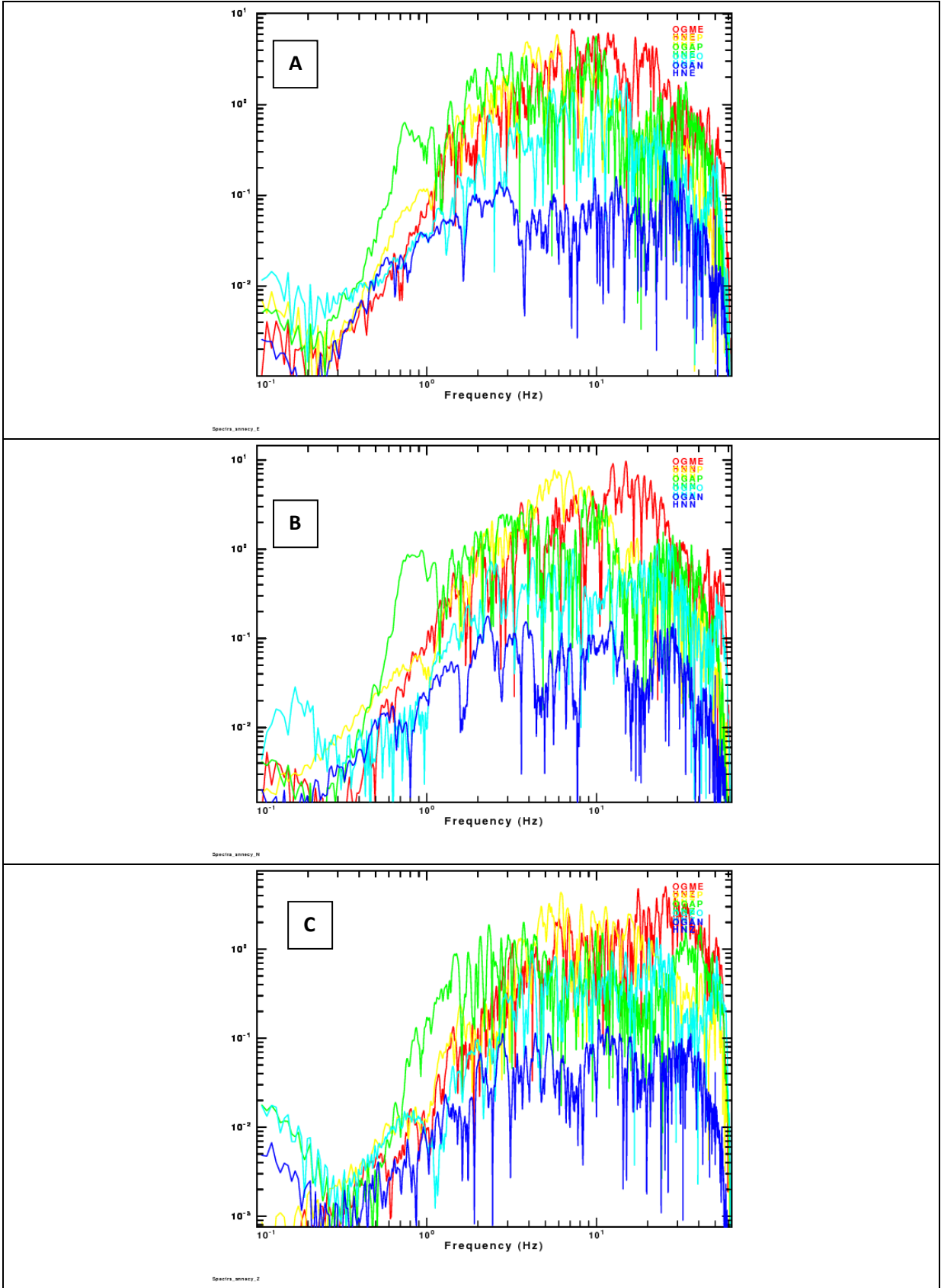


Figure 6 : Spectres de Fourier des accélérations du sol selon les composantes Est-Ouest (A), Nord-Sud (B) et verticale (C). Le code des couleurs est celui utilisé pour les figures 1 à 3.

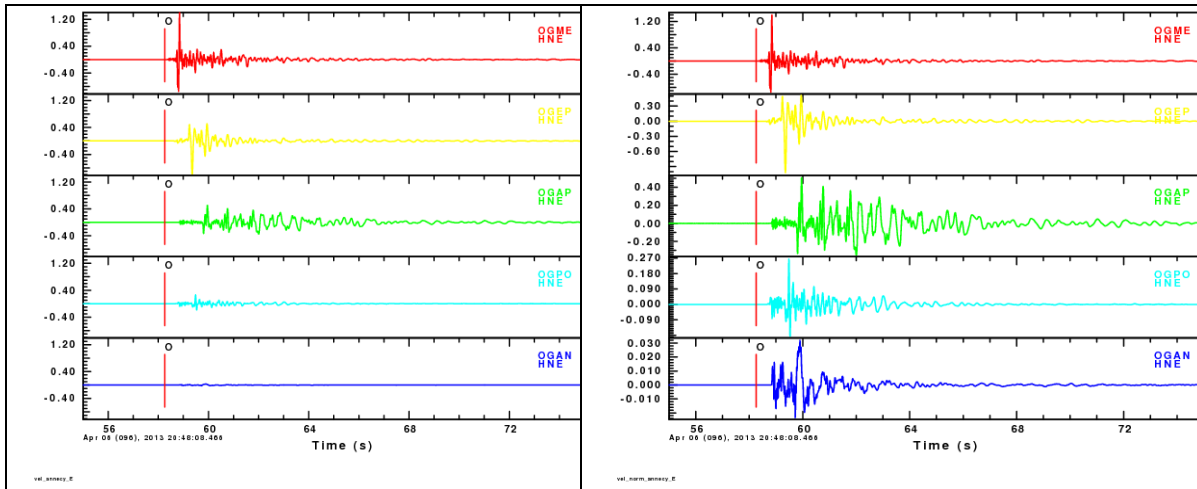


Figure 7 : composante Est-Ouest de la vitesse du sol en cm/s enregistrée par les stations locales RAP, en amplitude absolue (gauche) et relative (droite).

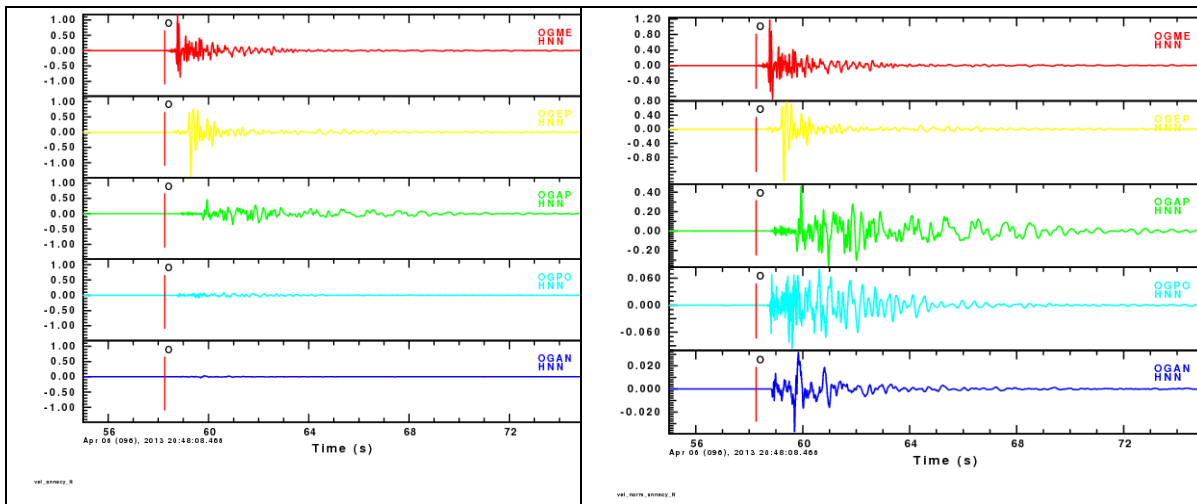


Figure 8 : composante Nord-Sud de la vitesse du sol en cm/s enregistrée par les stations locales RAP, en amplitude absolue (gauche) et relative (droite).

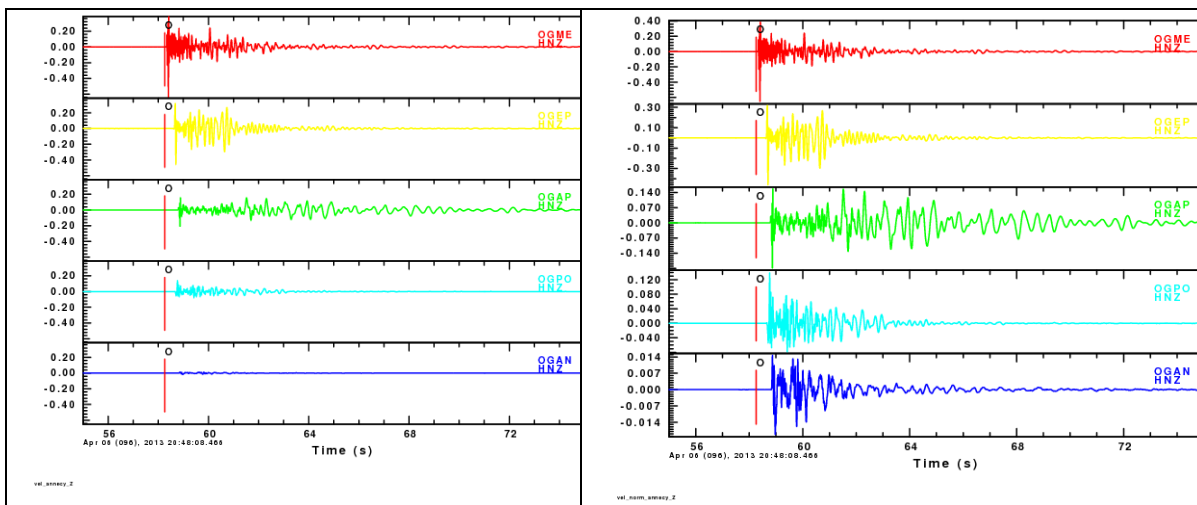


Figure 9 : composante verticale de la vitesse du sol en cm/s enregistrée par les stations locales RAP, en amplitude absolue (gauche) et relative (droite).

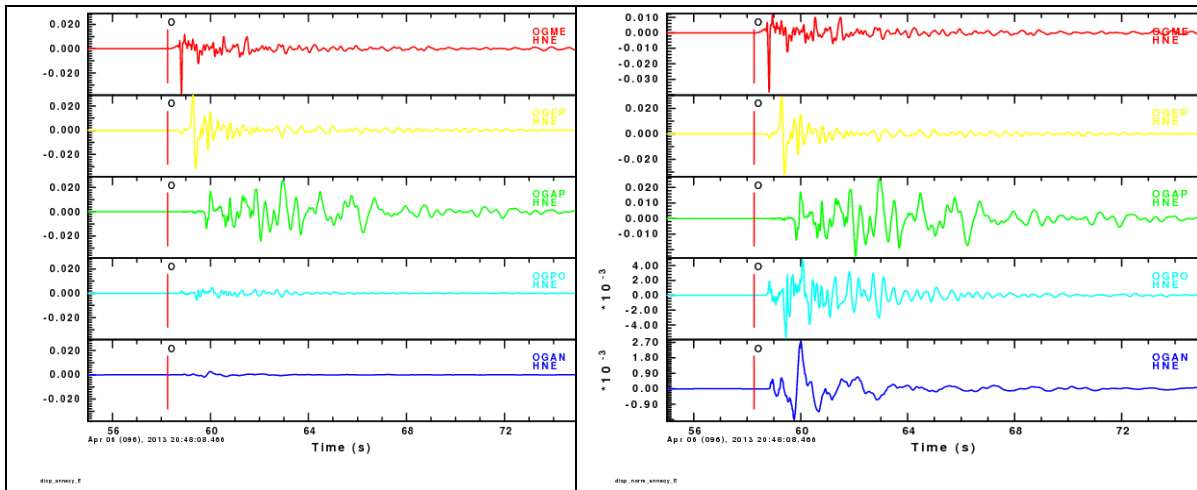


Figure 10 : composante Est-Ouest du déplacement du sol en cm enregistré par les stations locales RAP, en amplitude absolue (gauche) et relative (droite).

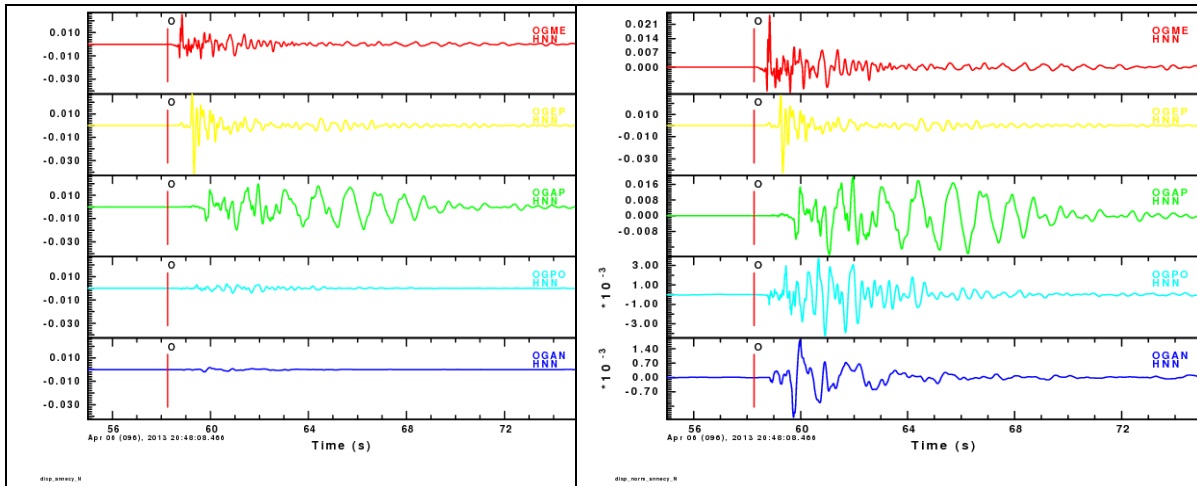


Figure 11 : composante Nord-Sud du déplacement du sol en cm enregistré par les stations locales RAP, en amplitude absolue (gauche) et relative (droite).

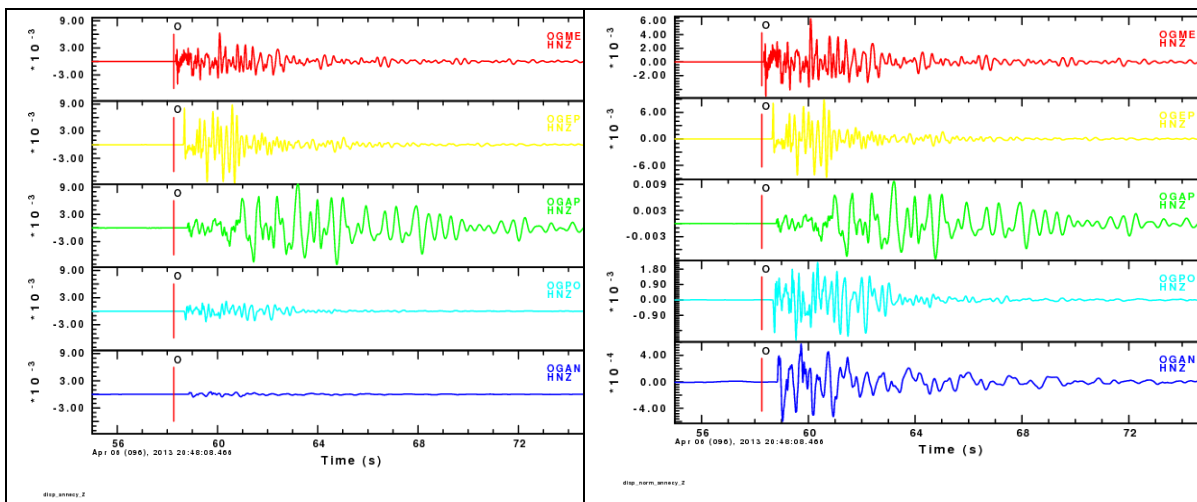


Figure 12 : composante verticale du déplacement du sol en cm enregistré par les stations locales RAP, en amplitude absolue (gauche) et relative (droite).

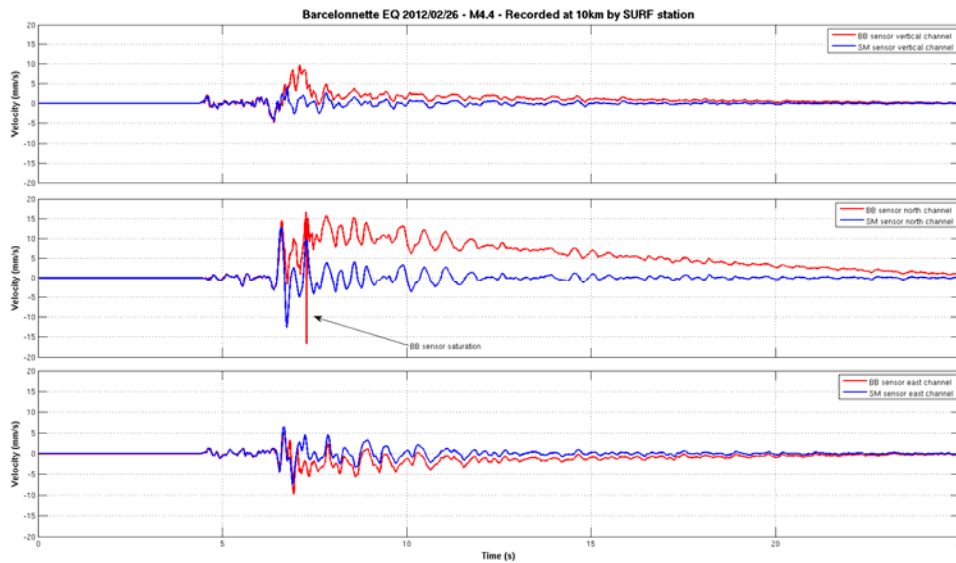


Figure 13 : Vitesses du sol enregistrées à la station SURF (site [RLBP/RAP](#)) lors du séisme de Barcelonnette du 26/02/2012 (M_L 4.4). La distance épicentrale est de 10 km. La courbe rouge représente la vitesse du sol mesurée par un vélocimètre large-bande (de type Trillium T120PA) tandis que la courbe bleue représente la vitesse du sol dérivée de l'accélération mesurée par un accéléromètre (de type EST). La saturation du vélocimètre est visible sur les trois composantes, et en particulier sur la composante Nord-Sud.

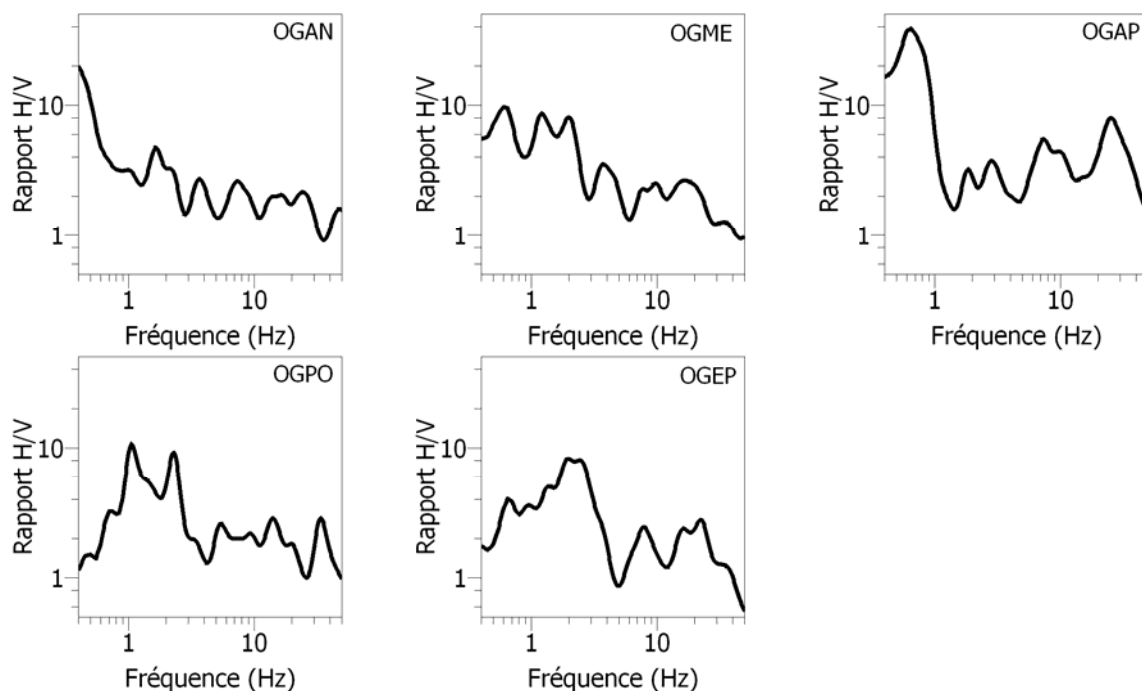


Figure 14 : Rapport (dit H/V) entre les amplitudes spectrales mesurées sur les composantes horizontales (la moyenne quadratique des composantes Nord-Sud et Est-Ouest est représentée ici) et la composante verticale du mouvement du sol. La durée de la fenêtre d'analyse est de 20 secondes à partir de l'arrivée des ondes S.

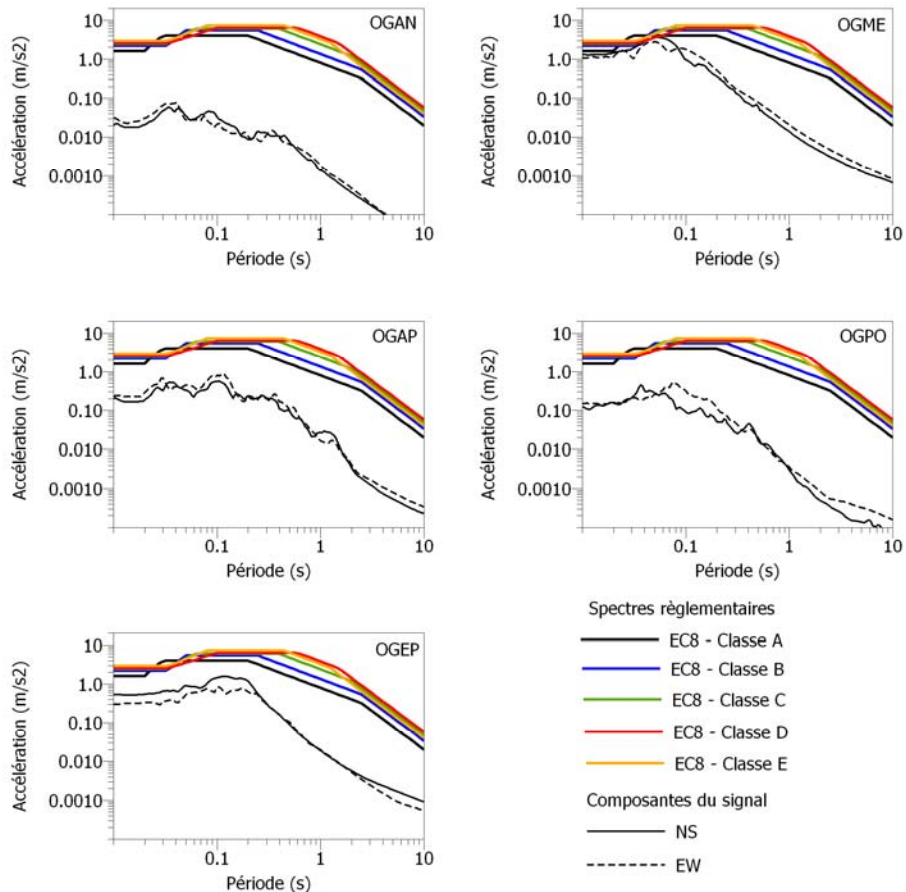


Figure 15 : Comparaison des spectres de réponse en accélération avec la réglementation EC8 pour les classes de sol A, B, C et D telles que définies sur la figure 16.

Classe de sol	Description du profil stratigraphique	Paramètres		
		$V_{s,30}$ (m/s)	N_{SP7} (bl/30cm)	c_u (kPa)
A	Rocher ou tout autre formation géologique de ce type comportant une couche superficielle d'au plus 5 m de matériau moins résistant.	> 800	–	–
B	Dépôts raides de sable, de gravier ou d'argile sur-consolidée, d'au moins plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, caractérisés par une augmentation progressive des propriétés mécaniques avec la profondeur.	360 – 800	> 50	> 250
C	Dépôts profonds de sable de densité moyenne, de gravier ou d'argile moyennement raide, ayant des épaisseurs de quelques dizaines à plusieurs centaines de mètres.	180 – 360	15 - 50	70 - 250
D	Dépôts de sol sans cohésion de densité faible à moyenne (avec ou sans couches cohérentes molles) ou comprenant une majorité des sols cohérents mous à fermes.	< 180	< 15	< 70
E	Profil de sol comprenant une couche superficielle d'alluvions avec des valeurs de V_s de classes C ou D et une épaisseur comprise entre 5 m environ et 20 m, reposant sur un matériau plus raide avec $V_s > 800$ m/s			
S_1	Dépôts composés, ou contenant, une couche d'au moins 10 m d'épaisseur d'argiles molles/vases avec un indice de plasticité élevé ($PI > 40$) et une teneur en eau importante.	< 100 (indicative)	–	10 - 20
S_2	Dépôts de sols liquéfiables d'argiles sensibles ou tout autre profil de sol non compris dans les classes A à E ou S_1			

Figure 16: Caractéristiques de classes de sol selon les EC8. Figure extraite du rapport http://www.planseisme.fr/IMG/pdf/rapport_cartographie_automatique_des_classes_de_sol_-_vs30.pdf