

Étude de faisabilité NFL long terme études d'exploitation, de faisabilité technique et d'insertion territoriale

Réseau Ferré de France
DR Rhône Alpes Auvergne

Expertise vibrations

Identification

	Projet	Numéro	Version	Pages
Identification	3670	RG140479	B	35

	Établi par	Vérifié par	Approuvé par
Nom	Alexis Rochat	Michel Fontanel	Nicolas Clerc
Fonction	Ingénieur	Expert géotechnicien	Chef de Projet
Date	19/09/2014	19/09/2014	19/09/2014



Objet du document

La présente note rend compte de l'impact des vibrations sur le projet d'élargissement des infrastructures ferroviaires du grand Lyon

Indice	Établi par	Date	Objet de la modification
A1	Alexis ROCHAT	28/05/2014	Création du document
A2	Alexis ROCHAT	06/06/2014	Prise en compte des corrections formulées par Nicolas Clerc
A3	Alexis ROCHAT	23/06/2014	Etablissement d'une relation de propagation empirique pour le site de Saint Fons Grenay.
B	Alexis ROCHAT	19/09/2014	Prise en compte des remarques formulées par RFF



Sommaire

1 Synthèse	4
1.1 Contexte	4
1.2 Description des vibrations	4
1.3 Cadre normatif	5
1.4 Principe de l'analyse	5
1.5 Conclusion	5
2 Mesures	6
2.1 Localisation des mesures	6
2.2 Méthode de mesure	7
2.3 Séquence de traitement	8
3 Résultats des mesures et calage du modèle	12
3.1 Clinique du parc	12
3.1.1 Configuration des mesures	12
3.1.2 Paramètres d'acquisition	13
3.1.3 Comparaison avec les seuils normatifs	15
3.1.4 Modèle de propagation des vibrations	17
3.1.5 Impact du projet sur les vibrations	19
3.2 Boulevard des Tchécoslovaques	20
3.2.1 Configuration des mesures	20
3.2.2 Paramètres d'acquisition	22
3.2.3 Comparaison avec les seuils normatifs	23
3.2.4 Modèle de propagation des vibrations	26
3.2.5 Impact du projet sur les vibrations	27
3.3 Saint Fons Grenay	28
3.3.1 Configuration des mesures	28
3.3.2 Paramètres d'acquisition	30
3.3.3 Comparaison avec les seuils normatifs	31
3.3.4 Modèle de propagation des vibrations	33
3.3.5 Modèle de propagation des vibrations – établissement d'une relation empirique	34
3.3.6 Impact du projet sur les vibrations	35
4 Conclusions sur l'impact du projet	37

1 Synthèse

1.1 Contexte

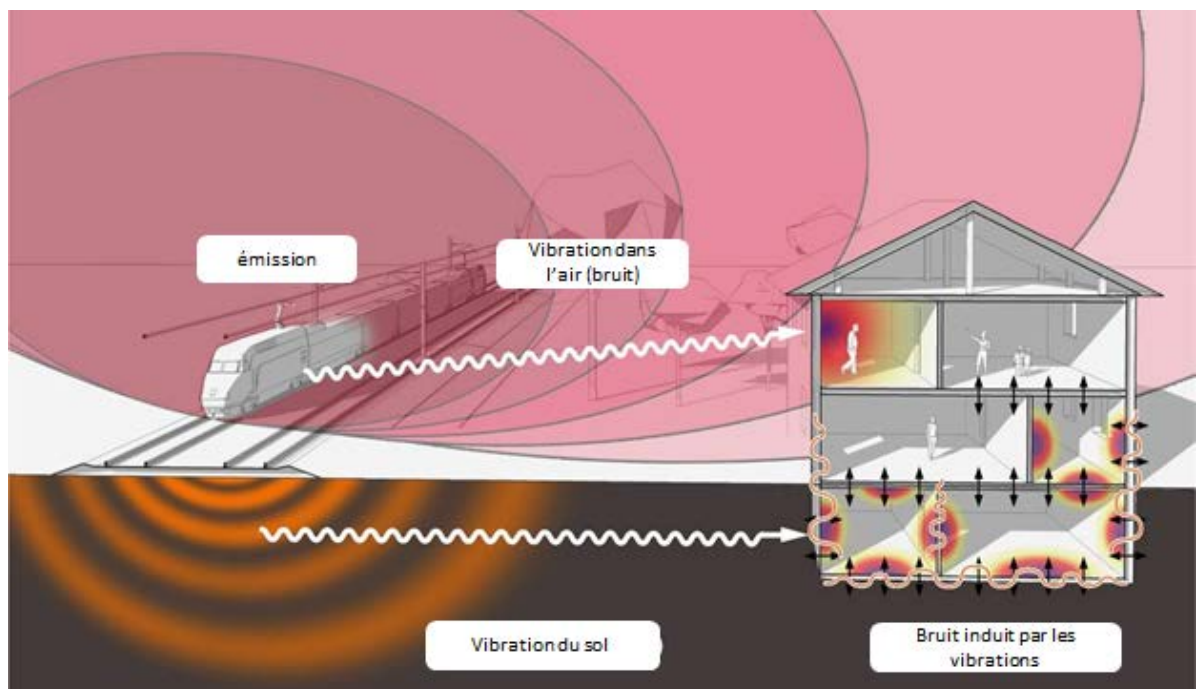
Le projet NFL long terme prévoit la réalisation de nouvelles infrastructures ferroviaires dans l'environnement urbain du grand Lyon.

Dans la mesure où l'élargissement du réseau rapprochera les nouvelles voies des bâtiments existants, les vibrations liées aux circulations ferroviaires pourraient avoir un impact négatif sur ceux-ci. Pour traiter cette problématique une expertise vibratoire est réalisée.

1.2 Description des vibrations

Lors du passage d'un train, une partie de l'énergie vibratoire est transmise dans l'air (bruit), le reste se propageant dans le sol sous forme de vibrations (Figure 1).

Figure 1: vibrations générées par le passage d'un train



L'état des rails, des rames, la vitesse de circulation des trains, la composition des terrains sous-jacents sont autant de facteurs pouvant influencer sur la propagation des vibrations. De même, lorsque le sol devient hétérogène, la propagation devient très complexe avec des phénomènes de dispersion, diffraction, d'amortissement et conversion de types d'ondes. Dès lors, l'évaluation des vibrations sans mesures in-situ devient difficilement envisageable.



Généralement, on constate que l'amplitude des ondes diminue au cours de la propagation : l'énergie de vibration diminue graduellement lorsque la distance à la source augmente. Ce phénomène est appelé phénomène d'amortissement. Plus la fréquence des ondes est élevée, plus l'atténuation est rapide, en pratique, seule l'énergie de la bande de fréquence 0-180 Hz est significative. Les données brutes (vitesses de déplacement du sol en mm/s) nécessitent donc une phase de traitement et d'analyse fréquentielle avant d'être interprétables.

1.3 Cadre normatif

Il n'existe pas à ce jour de norme spécifique pour les vibrations provoquées par l'activité ferroviaire. Néanmoins, l'étude s'appuiera sur plusieurs normes et circulaires :

- La *Circulaire du 23 juillet* pour l'impact des vibrations sur le bâti, dans un contexte plus général,
- La norme française *NF E90-020 de juillet 2007* pour le mesurage des vibrations.

1.4 Principe de l'analyse

L'expertise vibration s'appuiera sur la méthodologie suivante:

- Sélection de sites représentatifs pour la réalisation de mesures in-situ
- Réalisation de mesures de vibrations à différentes distances des voies ferroviaires
- Traitement des données
- Calage d'un modèle de propagation sur la base des mesures
- Estimation de l'impact du projet sur la base du modèle

1.5 Conclusion

Les mesures effectuées in situ montrent que les vibrations générées par la circulation des trains se propagent aujourd'hui à de faibles distances. Toutes les mesures effectuées indiquent des niveaux bien en dessous des normes. Les vibrations sont fortement amorties par les ouvrages existants : pont rail ou murs de soutènement.

L'impact du projet sera donc négligeable. L'augmentation de l'amplitude des vibrations ne sera pas sensible avec des niveaux qui resteront largement en dessous des normes.

2 Mesures

2.1 Localisation des mesures

L'emplacement des mesures a été défini par EGIS en concertation avec de RFF (Figure 2). Les sites sélectionnés ont pour intérêt de :

- Etre proche du réseau existant
- Se situer dans une zone ou un élargissement du réseau est envisagé,
- Présenter des enjeux importants (zones résidentielle, clinique),
- Etre faciles d'accès,
- Présenter des configurations variées : voies en viaduc, en tranchée, au niveau du terrain naturel.

La campagne de mesure s'est déroulée sur deux jours, les 28 et 29 avril 2014.

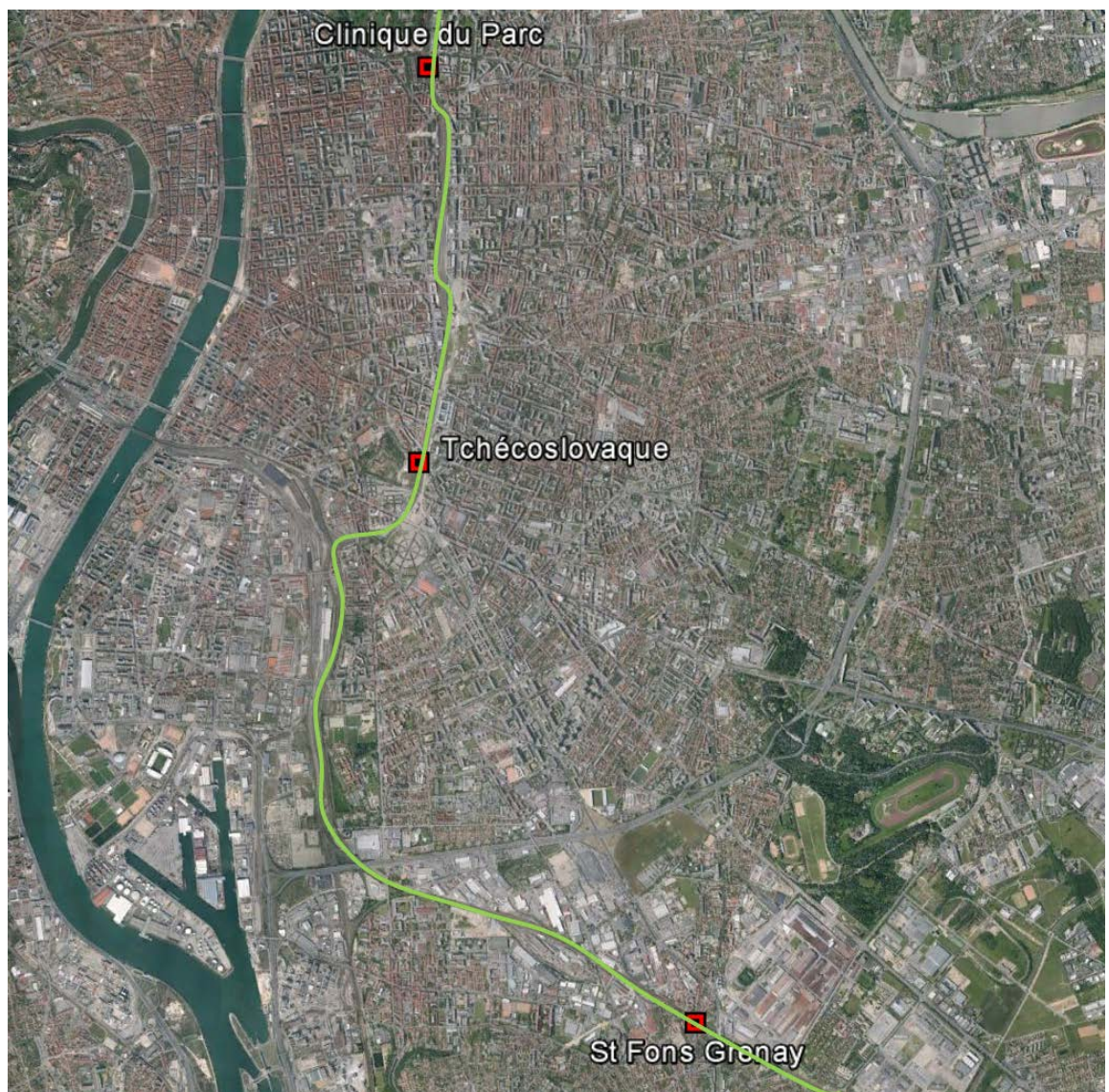


Figure 2: localisation des mesures

2.2 Méthode de mesure

Le matériel de mesure utilisé est de la marque IDETEC (centrale d'acquisition et capteurs) (Figure 3). Les capteurs utilisés sont des capteurs tri-directionnels permettant de mesurer les vibrations suivant trois dimensions (X, Y et Z).



Figure 3: centrale d'acquisition ATV15 (a), centrale d'acquisition SC6 (b), capteurs tri-directionnels 4.5 Hz (c), capteurs tri-directionnels 2 Hz (d)

Le protocole de mesure a été réalisé conformément à la NF E90-020. Le signal a été enregistré sur une durée suffisamment longue pour assurer une précision statistique raisonnable et pour garantir que les vibrations soient caractéristiques des expositions en cours d'évaluation.

Pour chaque site, entre 5 et 7 capteurs ont été déployés perpendiculairement aux voies ferroviaires à une distance variant entre quelques mètres et une quarantaine de mètres. Deux centrales d'acquisitions (ATV15 et SC6) ont été utilisées simultanément quand un obstacle venait intercepter la ligne de capteurs (typiquement les voies en circulation, car le passage de véhicules peut altérer les câbles). Les vibrations mesurées pour chaque capteur ont ainsi pu être confrontées à la distance entre le capteur et la voie pour en déduire un facteur

d'amortissement des vibrations. De plus, dans la mesure du possible, des bâtiments sensibles ont été instrumentés (en pied de façade et sur la façade) pour caractériser les transferts d'énergie dans la structure.

Les capteurs tridirectionnels sont orientés de façon à ce que leur axe des x soit aligné avec la source des vibrations (voies ferroviaires). Pour un bon couplage sol-capteur, ces derniers sont vissés sur des supports en métal eux même scellés au sol (ou mur) avec du plâtre. L'inclinaison des capteurs doit être nulle et contrôlée au niveau à bulle. En présence de sol trop meuble (terre végétale) les capteurs sont enterrés à une profondeur importante (Figure 4)



Figure 4 : fixation des capteurs

2.3 Séquence de traitement

Généralement, ce type de mesure est réalisé pour deux applications majeures :

- Caractériser l'impact des vibrations sur le bâti : l'effet des vibrations mécaniques répétées sur les constructions peut induire des dégâts sur la structure : fissuration, etc.

- Caractériser l'impact des vibrations sur le confort de l'individu. En fonction de leur intensité, les vibrations peuvent être imperceptibles, inconfortables voir dangereuses pour la santé des personnes exposées. De fait, au même titre que pour le bâti, cette problématique est soumise à des normes et des seuils doivent être respectés.

Le traitement des données est différent selon la problématique étudiée, mais la méthode d'acquisition des signaux reste identique. Les seuils admissibles définis dans les normes sont plus restrictifs pour le confort des individus que pour la vulnérabilité du bâti. De plus, pour l'analyse d'impact sur le bâti on considère uniquement le pic maximal du signal (brut et filtré), alors que pour le confort des individus le signal vibratoire est analysé dans son ensemble : le calcul de son énergie, sa durée dans le temps et sa répétitivité sur une journée sont à considérés.

Dans ce rapport, les vibrations mesurées seront uniquement traitées et interprétées en termes d'impact sur le bâti.

Pour l'impact sur le bâti, les traitements sont plus limités que pour l'impact sur le confort des individus. Ces traitements sont adaptés à la norme en vigueur, à savoir la circulaire du 23 juillet 1986. La circulaire prend en compte le fait que dans un signal vibratoire, les vibrations basses fréquences sont plus dommageables que les vibrations hautes fréquences. Ainsi, en fonction de la sensibilité du bâtiment surveillé, différents seuils devront être respectés, selon les fréquences observées (Figure 5).

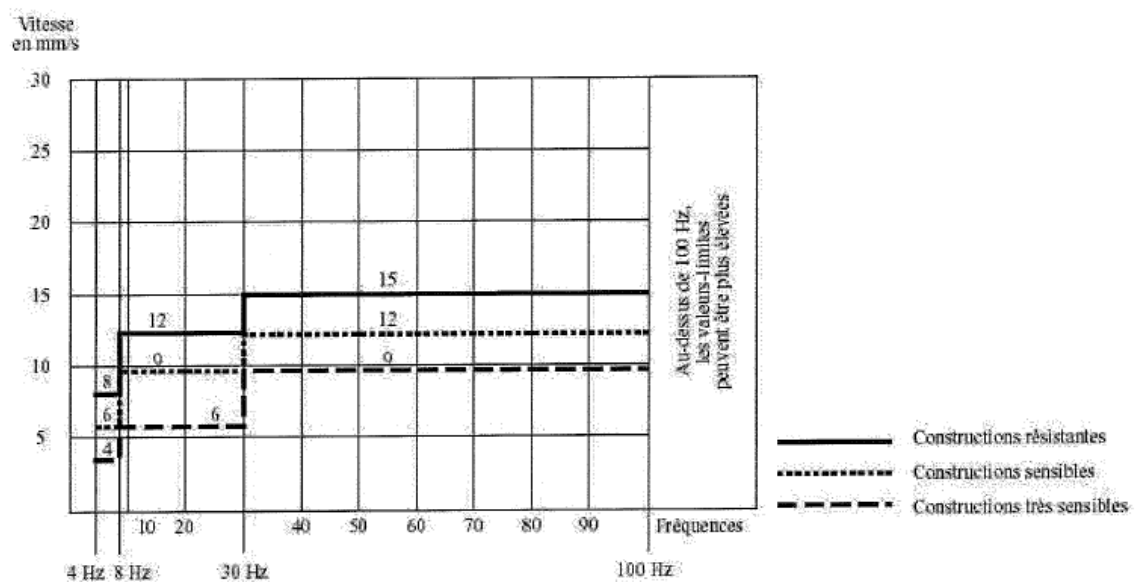


Figure 5: seuils d'admissibilité des vibrations pour le bâti, circulaire du 23 juillet 1986

De fait, la valeur brute du signal mesurée n'est pas le seul indicateur du niveau de vibrations et le contenu fréquentiel du signal doit être analysé. Pour une construction très sensible, les seuils sur les vitesses particulières mesurées doivent rester inférieures à :

- 9 mm/s maximum pour le signal filtré à 100Hz
- 6 mm/s maximum pour le signal filtré à 30Hz
- 4 mm/s maximum pour le signal filtré à 8Hz.

Pour pouvoir analyser le contenu fréquentiel du signal et comparer les amplitudes aux normes définies par la circulaire du 23 juillet 1986, différents filtrages doivent être appliqués :

- Filtrage passe bas du signal à 8Hz, 30 Hz et 100 Hz. Les valeurs maximales des vitesses ainsi filtrées seront ensuite comparées aux seuils de la circulaire du 23 juillet 1986.

Un signal temporel donné est composé de plusieurs fréquences. Le calcul du spectre de puissance (en effectuant la transformée de Fourier du signal), permet de déterminer quelles sont les fréquences les plus représentées dans ce signal (Figure 6).

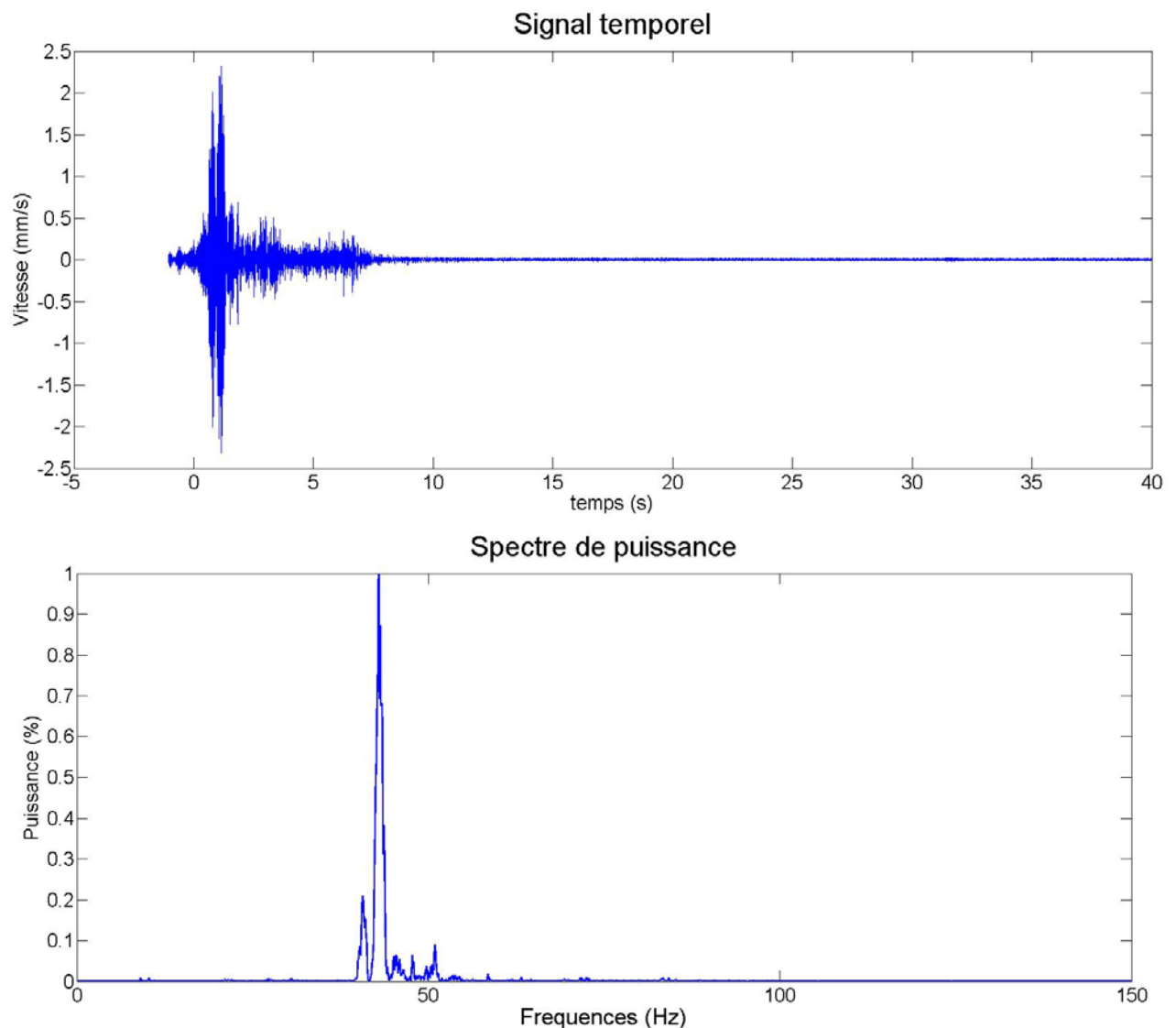


Figure 6: Signal temporel mesuré à Saint Fons Grenay et son spectre de puissance

Sur la Figure 6, le signal est majoritairement composé de fréquences comprises entre 40 et 55 Hz. Un filtre passe bas ne laisse passer que les fréquences du signal qui sont inférieures à la valeur du filtre. Ainsi, pour le signal précédent, un filtre passe-bas à 100Hz aura peu d'effet sur le signal, alors qu'un filtre à 8Hz filtrera quasiment l'intégralité du signal puisque très peu d'énergie est comprise entre 0 et 8Hz.

La Figure 7 est issue du même signal auquel on a appliqué plusieurs filtres passe-bas. On peut ainsi voir que l'amplitude du signal diminue quand la fréquence du filtre passe-bas diminue.

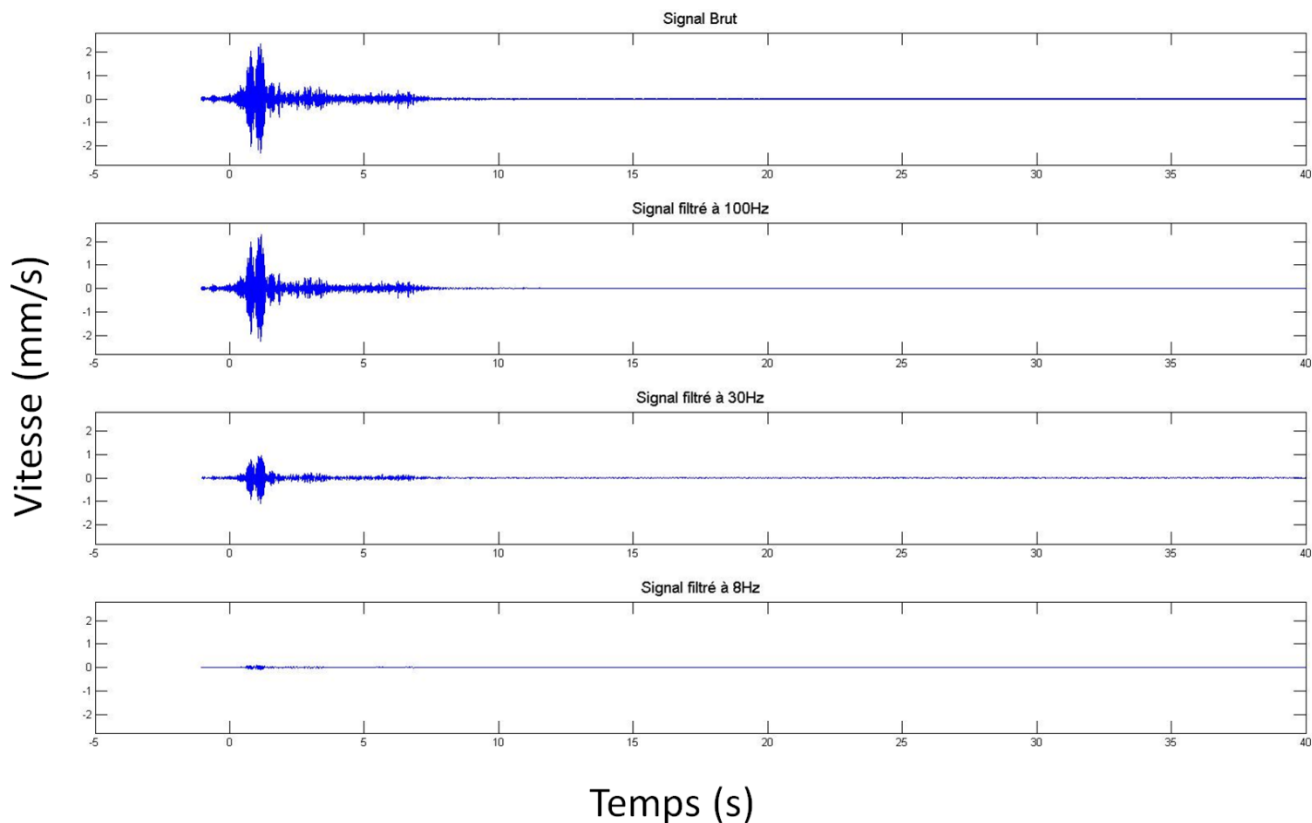


Figure 7: différents filtrages du signal.

3 Résultats des mesures et calage du modèle

3.1 Clinique du parc

3.1.1 Configuration des mesures

Sept capteurs ont été déployés sur le site de la clinique du parc (Figure 8). Les capteurs C'1 et C'2 ont été connectés à la station d'acquisition SC6. Les capteurs C1 à C5 ont été connectés à la station d'acquisition ATV15. Les trains circulent en viaduc sur 4 voies différentes.

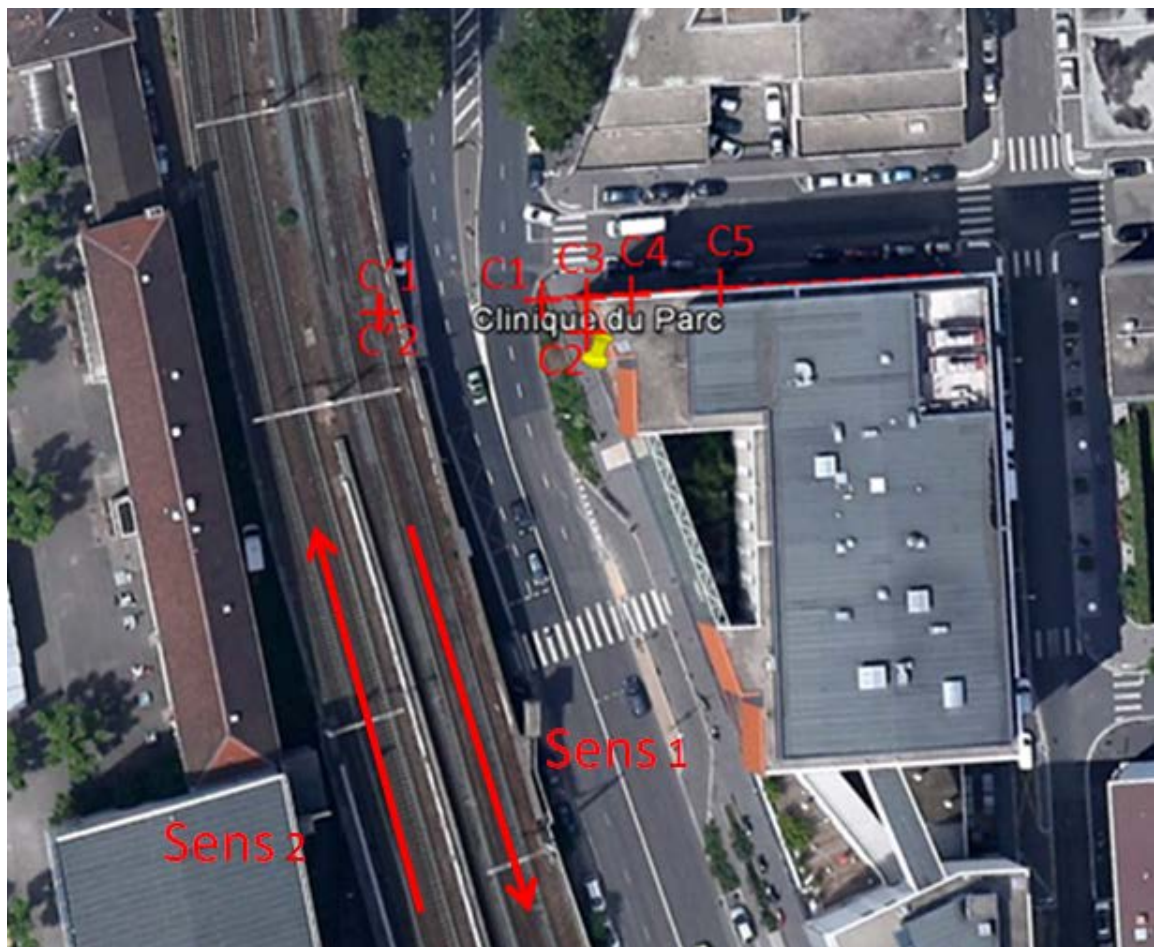


Figure 8: emplacement des capteurs - clinique du Parc

Les distances relevées entre les capteurs et les voies sont les suivantes :

C1	C2	C3	C4	C5	C'1	C'2
19 m	22 m, sur le bâtiment, angle	24 m	29 m	37 m	0 m, sur la pile à 1 m du sol	0 m, au sol côté voies

La Figure 9 présente l'emplacement des capteurs.



Figure 9: emplacement des capteurs

3.1.2 Paramètres d'acquisition

Dans un premier temps, les mouvements du sol (vitesse particulière en mm/s) sont enregistrés pendant 333s sur les capteurs C1 à C5 (lancement de l'acquisition par déclenchement manuel) (Figure 10). Cette durée correspond à la durée maximale d'enregistrement pour la station d'acquisition ATV15 (pour un échantillonnage de 2000Hz, et 5 capteurs).

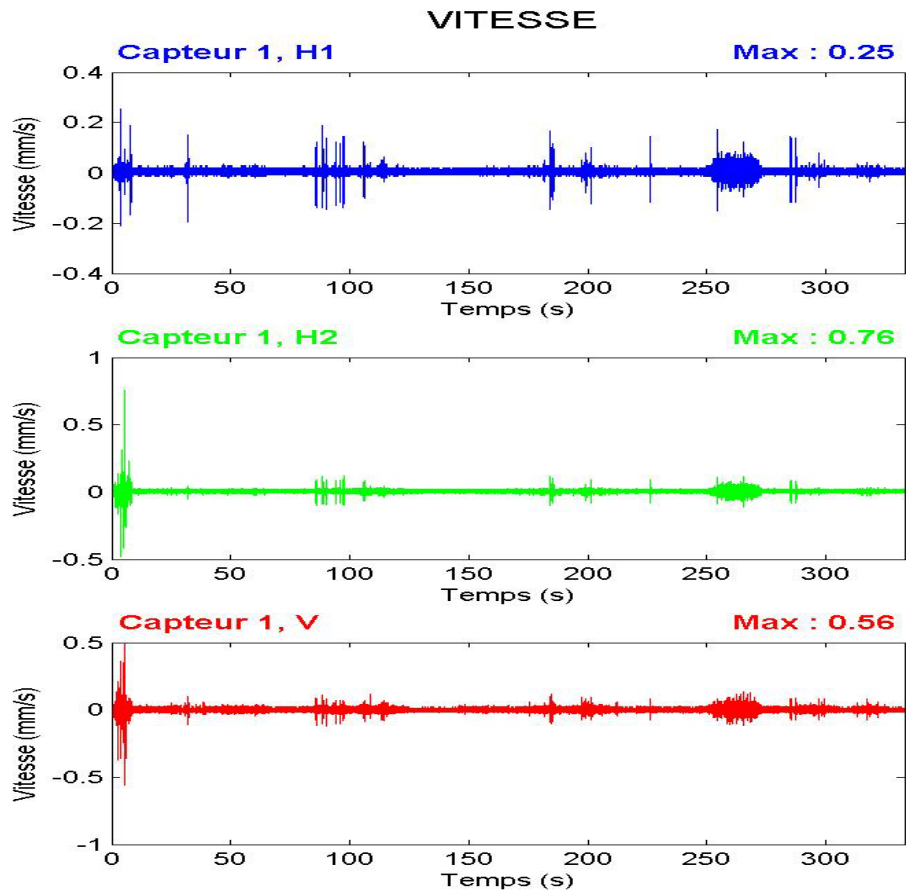


Figure 10: enregistrement du bruit sur 333s, capteur C1

Cet enregistrement doit permettre de déterminer :

- Le niveau de bruit ambiant
- Les seuils de déclenchement lors du passage de trains (à $t=10s$, $t=100s$, $t=250s$ par exemple sur la Figure 10).

A partir de ces informations, les seuils de déclenchements peuvent être déterminés : la centrale d'acquisition déclenchera l'enregistrement du signal si le niveau de vibration dépasse le seuil défini. Ce seuil doit être suffisamment bas pour détecter le passage de tous les trains mais suffisamment haut pour se situer au niveau du bruit ambiant (circulation routière, piétonne, etc.).

Fréquence d'acquisition		Durée du signal		Seuils de déclenchement	
2000 Hz pour C1 à C5	512 Hz pour C'1 et C'2	30 s pour C1 à C5	15 s pour C'1 et C'2	0.2 mm/s pour C1 à C5	0.5 mm/s pour C'1 et C'2



3.1.3 Comparaison avec les seuils normatifs

Le tableau suivant présente les résultats mesurés (bruts et filtrés) pour le site de la clinique du parc. Le maximum des vibrations a été enregistré pour le train numéro 15. Les signaux 2 et 3 semblent être des déclenchements parasites (piétons)

N° train	Heure	Sens	Maximum brut mm/s	Maximum filtré 100Hz mm/s	Maximum filtré 30Hz mm/s	Maximum filtré 8Hz mm/s	Capteurs mesurants	commentaire
1	11h20		0.75	0.75	0.71	0.62	C1 à C5	Enregistrement du bruit sur 333s
2	11h30	1	0.70	0.43	0.18	0.04	C1 à C5	Déclenchement parasite. Piéton ?
3	11h36	2	0.22	0.19	0.13	0.02	C1 à C5	Déclenchement parasite. Piéton ?
4	11h42	1	3.58	1.83	0.85	0.15	Tous les capteurs	Train non identifié
5	11h45	1	5.37	2.45	1.35	0.22	Tous les capteurs	Train non identifié
6	11h52	1	0.31	0.27	0.15	0.03	C1 à C5	Train non identifié
7	11h53	2	1.43	0.84	0.48	0.11	Tous les capteurs	TGV
8	11h57	1	4.65	2.58	1.02	0.3	Tous les capteurs	TGV
9			0.21	0.19	0.12	0.03	C1 à C5	Train non identifié
10	12h12	2	1.37	0.83	0.44	0.08	Tous les capteurs	Train non identifié
11			0.28	0.27	0.15	0.06	C1 à C5	Train non identifié
12	12h17	2	1.37	0.88	0.49	0.15	Tous les capteurs	Long TER.
13	12h29	1	4.77	2.31	0.99	0.23	Tous les capteurs	TGV.
14	12h39		0.32	0.27	0.17	0.09	C1 à C5	Train non identifié
15	12h45	1	5.55	2.74	1.36	0.24	Tous les capteurs	Long TER.

Pour un certain nombre de passage de trains, la centrale d'acquisition SC6 a pu enregistrer des données sur les capteurs C'1 et C'2. Ce sont les données où les plus fortes amplitudes sont atteintes puisque les capteurs sont situés sous les voies circulées. Néanmoins, les amplitudes mesurées restent faibles : pour le capteur C'1 pourtant situé sur la pile du viaduc, les vitesses brutes et filtrées en mm/s restent largement inférieures aux seuils définis par la norme :

	Maximum mesuré	Norme pour des bâtiments très sensibles
Filtré à 100 Hz	2.74 mm/s	9 mm/s
Filtré à 30 Hz	1.36 mm/s	6 mm/s
Filtré à 8Hz	0.24 mm/s	4 mm/s

Le maximum mesuré (train numéro 15, capteur C'1) est présenté Figure 11. Sur les trois graphes de gauche, le signal brut (vitesse particulière du sol en mm/s) pour les trois composantes (deux horizontales et une verticale) est représenté. Le maximum est atteint pour la composante « v » (-5.55 mm/s selon l'axe z). Les spectres de puissance de ces trois signaux sont représentés à droite de la figure. Les spectres de puissance décrivent le contenu fréquentiel des signaux mesurés. Pour une fréquence donnée (en abscisse), plus son amplitude (en ordonnée) est élevée et plus cette fréquence est représentée dans le signal. On peut notamment remarquer que la majorité du signal est compris entre 20 et 50Hz et autour de 150Hz. En revanche, peu de signal émerge entre 0 et 10Hz, ce qui est positif étant donné que le bâti est surtout vulnérable aux basses fréquences.

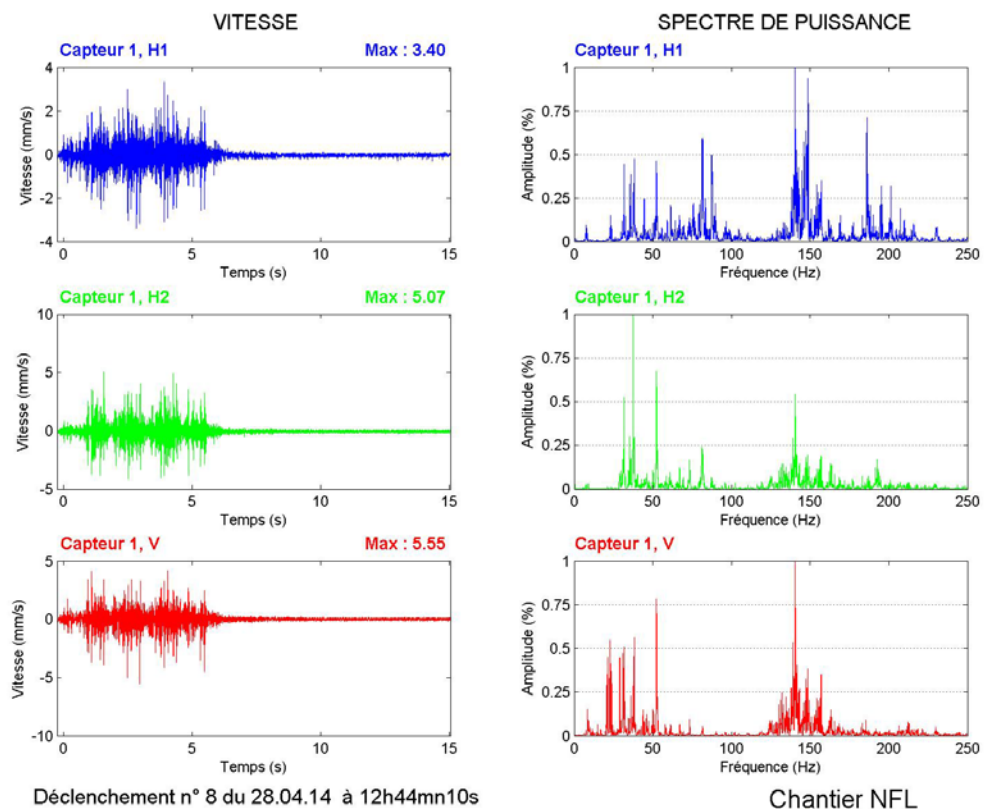


Figure 11 : signal brut, maximum mesuré sur le site de la clinique du parc, capteur C'1

3.1.4 Modèle de propagation des vibrations

Pour réaliser un modèle « moyen » de propagation des vibrations, pour chaque capteur, la moyenne des maximums bruts (sur tous les trains) est calculée. Etant donnée la faible amplitude des signaux mesurés par rapport aux seuils définis par la norme, ce calcul ne serait pas représentatif pour les signaux filtrés à 100, 30 et 8 Hz.

capteur	C'1 (pile)	C'2	C1	C2 (façade)	C3	C4	C5
Distance à la voie la plus proche	0 m	0 m	19 m	22 m	24 m	29 m	37 m
Moyenne des maximums bruts	3.37 mm/s	1.26 mm/s	0.34 mm/s	0.05 mm/s	0.13 mm/s	0.13 mm/s	0.09 mm/s

La Figure 12 représente le report de ces valeurs sur la vue satellite. L'échelle de couleur sera commune pour les trois sites étudiés. Elle est adaptée de façon à obtenir la dynamique de couleur la plus parlante possible, elle n'est pas corrélée aux seuils définis dans la norme.

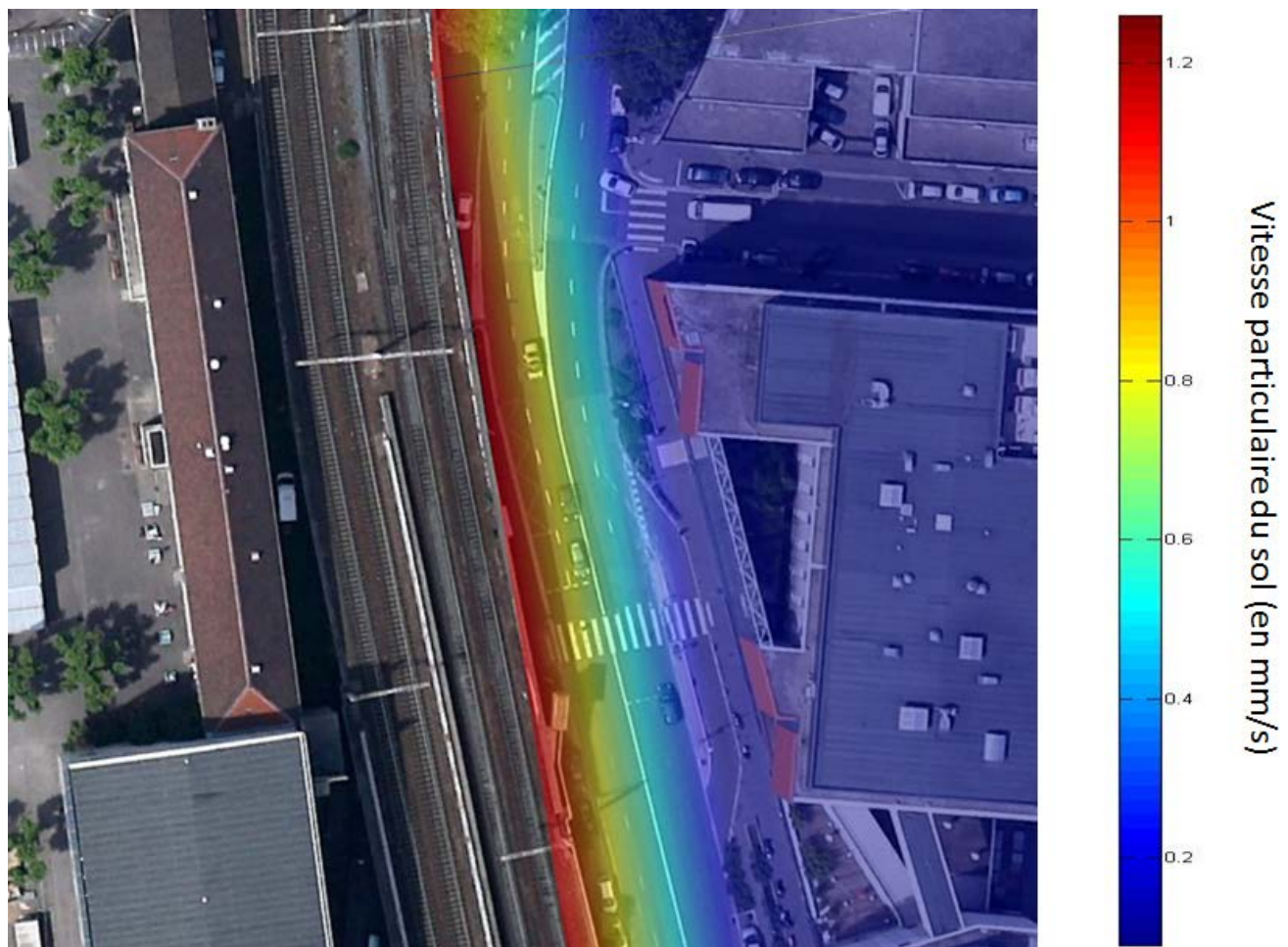


Figure 12: Pics de vibrations moyens - clinique du Parc

Ces résultats illustrent que :

- Une part importante de l'énergie (plus de 50%) est dissipée lors du transfert entre la pile du viaduc et le sol (rapport entre C'1 et C'2).
- Pratiquement la totalité de l'énergie est dissipée lors du transfert entre le sol et la façade de la clinique (rapport entre C1 et C2, sur la façade de la clinique). La Figure 13 présente un exemple de signal brut pour le capteur C2. On peut y voir que le signal provoqué par le passage du train est difficilement différenciable du bruit (maximum brut enregistré à 0.04 mm/s). les fréquences mesurées sont généralement comprises entre 0 et 50 Hz (voir spectre de fréquence), mais sans incidence sur le bâti tant les signaux mesurés sont faibles.
- Les vibrations s'atténuent rapidement avec la distance, puisque pour les capteurs C3, C4 et C5 situés à plus de 25 m de la voie la plus proche, les vibrations sont négligeables. La Figure 14 présente un exemple de signal brut pour le capteur C4. Ici aussi les vitesses mesurées restent proches du bruit (0.09 mm/s en valeur maximale brute), avec des fréquences comprises entre 0 et 50Hz.

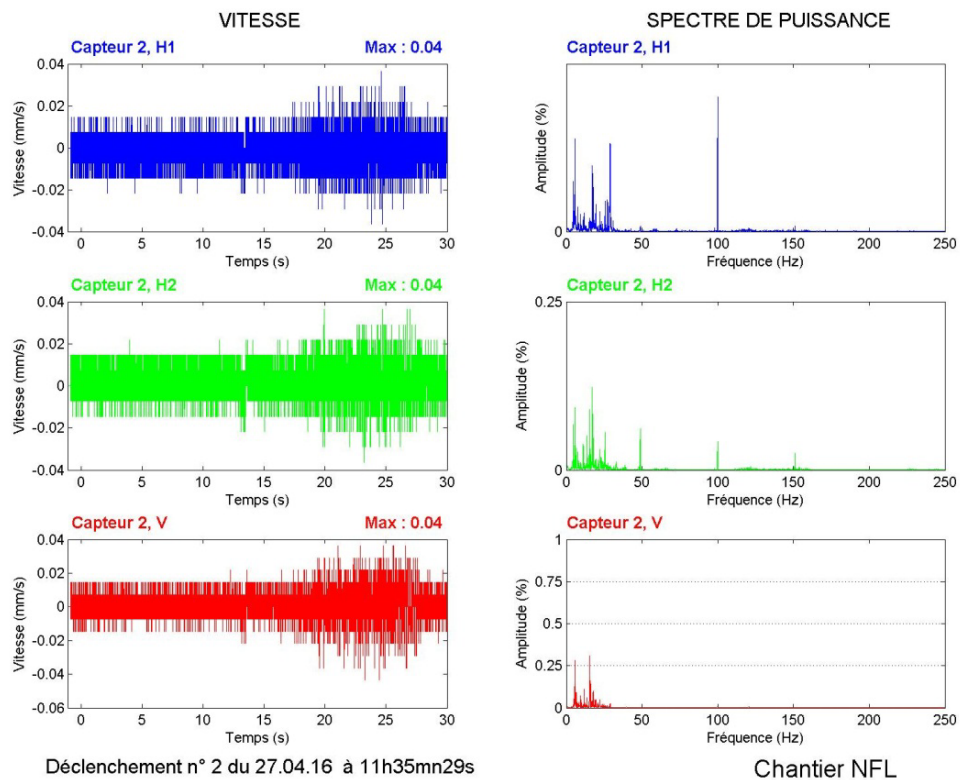


Figure 13: signal brut représentatif pour le capteur C2

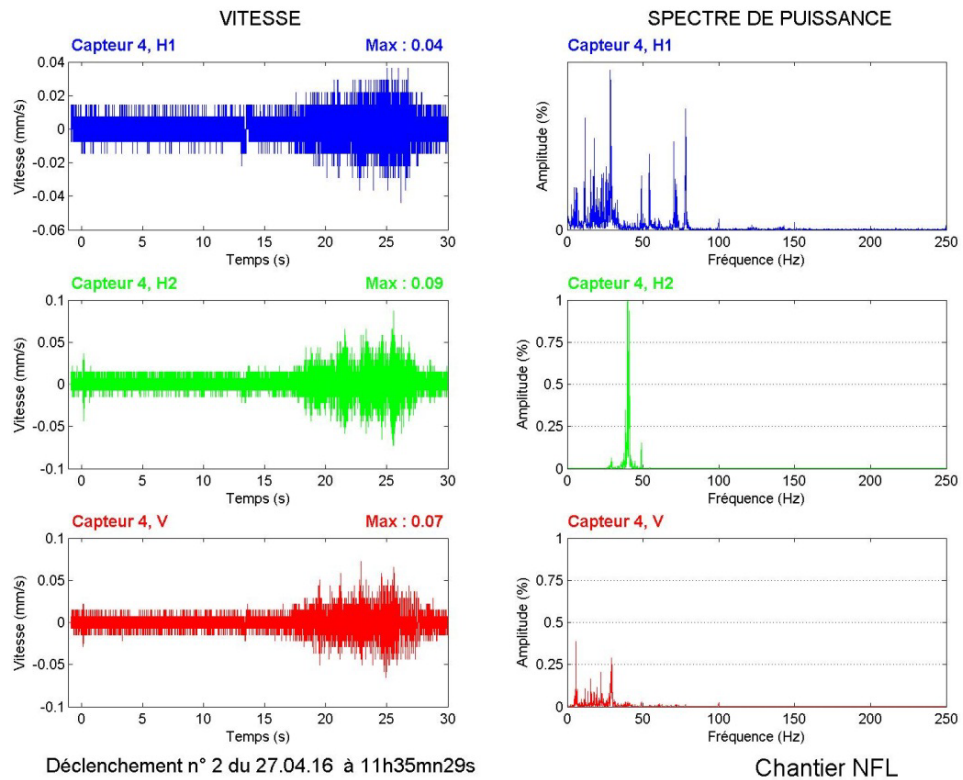


Figure 14 : signal brut représentatif pour le capteur C4

3.1.5 Impact du projet sur les vibrations

A la lumière de ces résultats, nous n’avons pas de préconisations particulières à formuler concernant la mitigation des vibrations en cas de travaux d’élargissement des voies. Pour ce site, les niveaux de vibrations devraient rester en dessous des seuils définis par la loi : les vibrations n’excèdent pas 5.5 mm/s sur la pile du viaduc, et 2 mm/s au pied de la pile (Figure 15). Les valeurs filtrées restent elles aussi très largement en dessous des seuils.

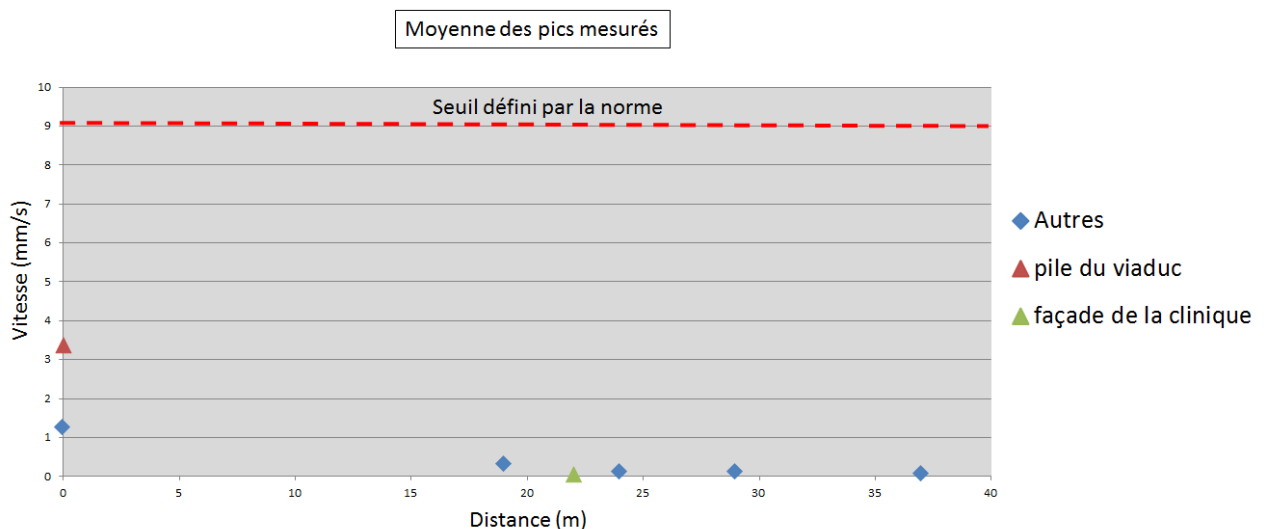


Figure 15 : propagation des vibrations avec la distance, valeurs brutes

3.2 Boulevard des Tchécoslovaques

3.2.1 Configuration des mesures

Six capteurs ont été déployés sur le site du Boulevard des Tchécoslovaques (Figure 16). Les capteurs C'1 et C'2 ont été connectés à la station d'acquisition SC6. Les capteurs C1 à C4 ont été connectés à la station d'acquisition ATV15. Les trains circulent en tranchée sur quatre voies différentes.

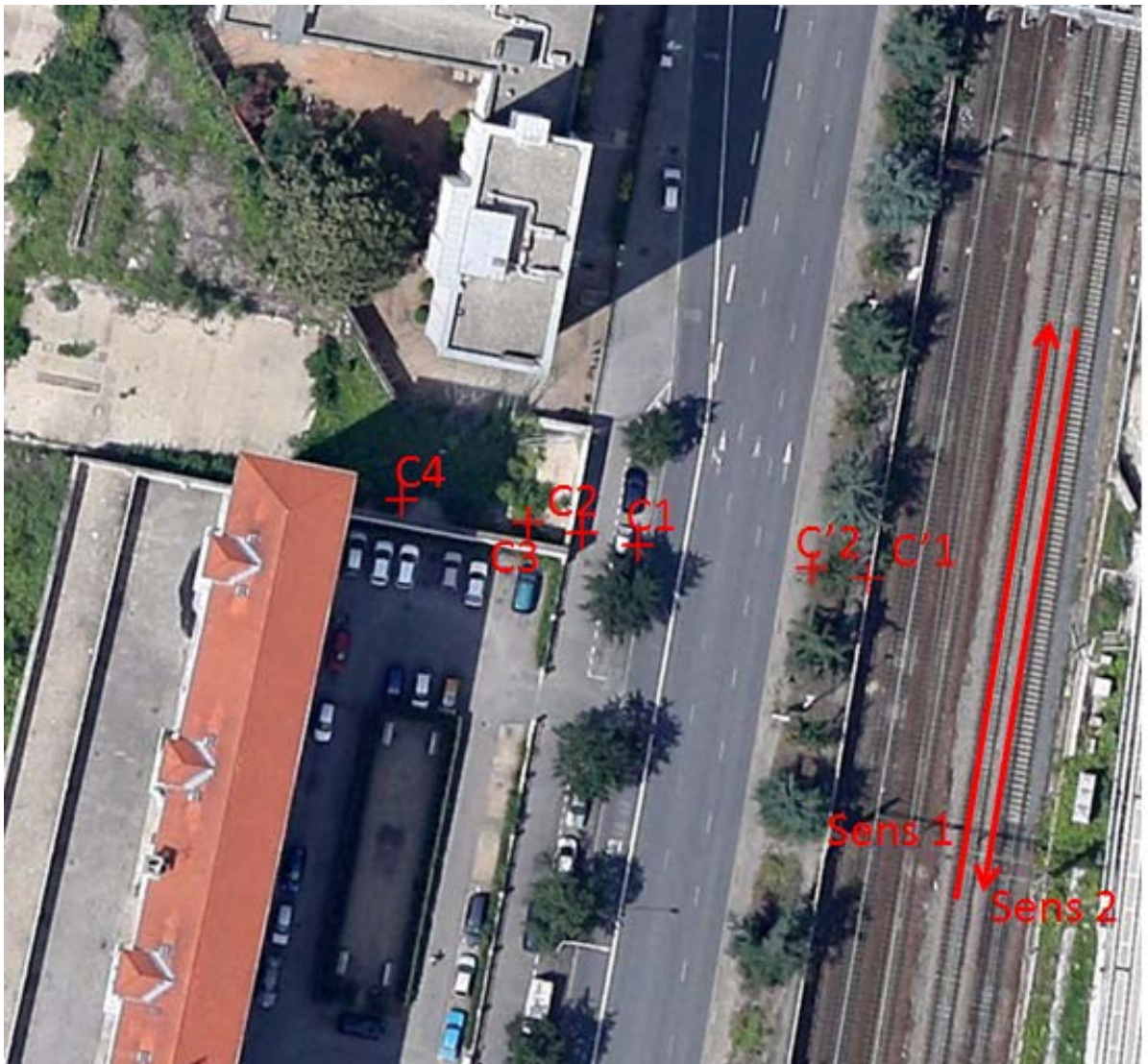


Figure 16: emplacement des capteurs - boulevard des Tchécoslovaques

Les distances relevées entre les capteurs et les voies sont les suivantes :

C1	C2	C3	C4	C'1	C'2
25 m	30 m	35 m	45 m	2 m	7 m (enterré)

La Figure 17 présente l'emplacement des capteurs.



Figure 17: emplacement des capteurs - Boulevard des Tchecoslovaques

3.2.2 Paramètres d'acquisition

Comme précédemment, pour déterminer les paramètres d'acquisition, un enregistrement manuel du bruit est effectué pendant 416s sur les capteurs C1 à C4 (connectés à la station d'acquisition ATV15) (Figure 18).

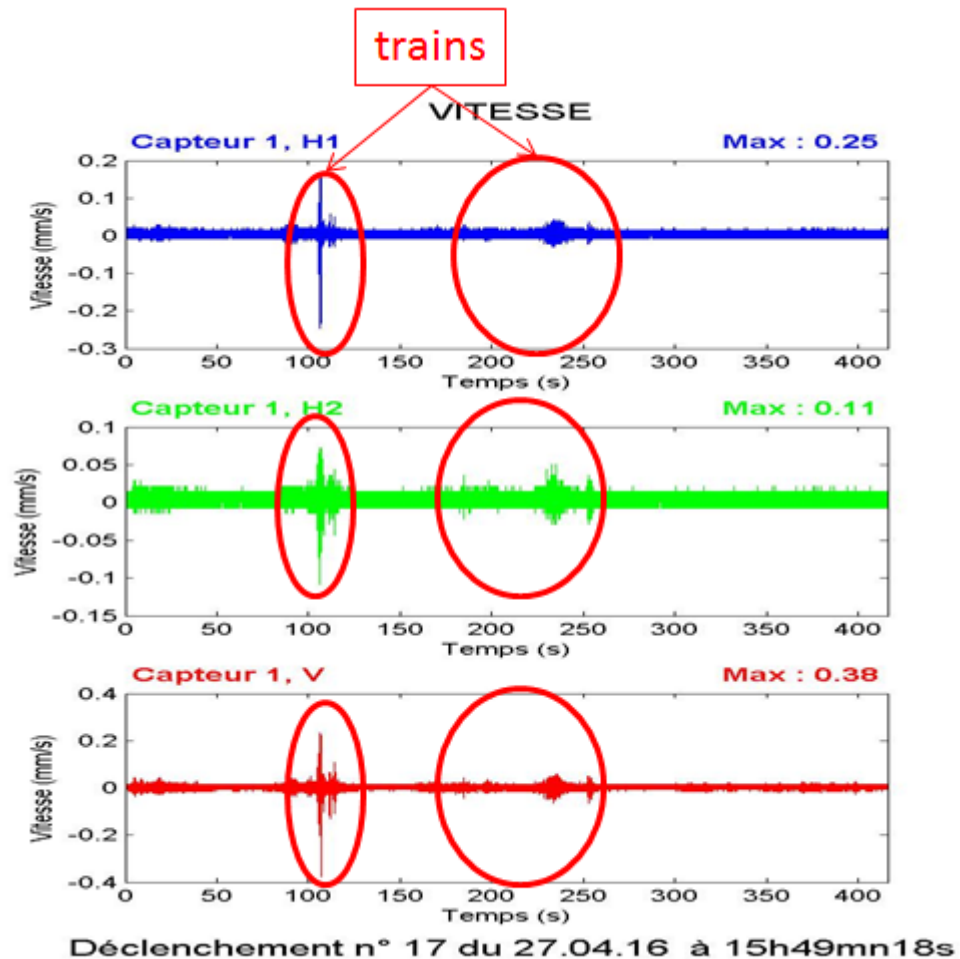


Figure 18: enregistrement du bruit sur 416s, capteur C1

L'interprétation de ces signaux a permis de sélectionner les paramètres d'acquisition suivants :

Fréquence d'acquisition		Durée du signal		Seuils de déclenchement	
2000 Hz pour C1 à C4	512 Hz pour C'1 et C'2	30s ou 45s pour C1 à C4	20 s pour C'1 et C'2	0.1 mm/s puis déclenchement manuel (à vue) pour les capteurs C1 à C4	0.2 mm/s pour C'1 et C'2

Même si sur la Figure 18 la signature du passage de deux trains émerge nettement, les niveaux de vibrations sont légèrement plus bas que sur le site précédent ; les seuils de déclenchement ont donc été revus à la baisse. Cependant, sur ce site, même avec un seuil de déclenchement à 0.1 mm/s, la majorité des trains ne provoquait pas de déclenchement sur la centrale d'acquisition ATV15 connectée aux capteurs C1 à C4 (les plus éloignés). Nous avons donc opté pour des enregistrements de 45 secondes déclenchés manuellement par l'opérateur quand un train arrive à vue.

3.2.3 Comparaison avec les seuils normatifs

Le tableau suivant présente les résultats mesurés (bruts et filtrés) pour le site du boulevard des Tchécoslovaques. Le maximum des vibrations a été enregistré pour le train numéro 5. Les signaux 2 et 3 sont dus à des déclenchements provoqués par des passages de bus.

N° train	Heure	Sens	Maximum brut mm/s	Maximum filtré 100Hz mm/s	Maximum filtré 30Hz mm/s	Maximum filtré 8Hz mm/s	capteurs	commentaire
1	15h49		0.38	0.2	0.14	0.08	Enregistrement du bruit sur 416s sur C1 à C4	
2	15h52						C1 à C4	Déclenchement parasite (bus)
3	11h57						C1 à C4	Déclenchement parasite (bus)
4	16h04	1	0.36	0.14	0.09	0.03	Tous les capteurs	Passage de 2 trains
5	16h11	1	0.48	0.27	0.08	0.04	Tous les capteurs	Train non identifié
6	16h19	1 puis 2	0.36	0.17	0.08	0.04	Tous les capteurs	Long TER puis TGV
7	16h21	1	0.48	0.23	0.05	0.03	Enregistré sur C'1 et C'2 uniquement.	TER
8	16h24	1 et 2	0.48	0.25	0.11	0.04	Tous les capteurs	passages de 2 TGV
9	16h28	2	0.36	0.18	0.08	0.03	Tous les capteurs	TER.
10	16h30	1	0.36	0.20	0.08	0.05	Tous les capteurs	TGV très long. Passage de bus sur C1 à C4
11	16h32	1	0.08	0.07	0.04	0.01	Enregistré sur C1 à C4 uniquement.	Passage de 2 TER



Comme précédemment, les plus fortes amplitudes sont mesurées pour les passages de trains mesurés par la station d'acquisition la plus proche des voies (capteurs C'1 et C'2). Sur ce site aussi, les amplitudes mesurées restent faibles : le maximum est atteint pour le train n°5, où la vitesse particulière mesurée est de 0.48 mm/s sur le capteur C'2. Ce dernier est plus éloigné des voies que le capteur C'1 mais ce cas de figure peut se rencontrer quand les mesures sont effectuées à faible distance de la source : les capteurs proches sont alors moins affectés par les vibrations car les ondes vibratoires n'ont pas le temps de se matérialiser sur de si faibles distances.

Pour le train n°5, où les vibrations les plus importantes ont été mesurées, les vitesses particulières restent là aussi bien inférieures à celle des seuils définis dans la circulaire de 1986.

	Maximum mesuré	Norme pour des bâtiments très sensibles
Filtré à 100 Hz	0.27 mm/s	9 mm/s
Filtré à 30 Hz	0.08 mm/s	6 mm/s
Filtré à 8Hz	0.04 mm/s	4 mm/s

Les signaux enregistrés par les capteurs C'2 et C'1 lors du passage du train n°5 sont représentés sur les Figure 19 et Figure 20. Bien que ces deux capteurs ne soient séparés que de 5 mètres, les vibrations brutes mesurées décroissent rapidement (de 0.48 mm/s pour C'1 à 0.11 mm/s pour C'2)

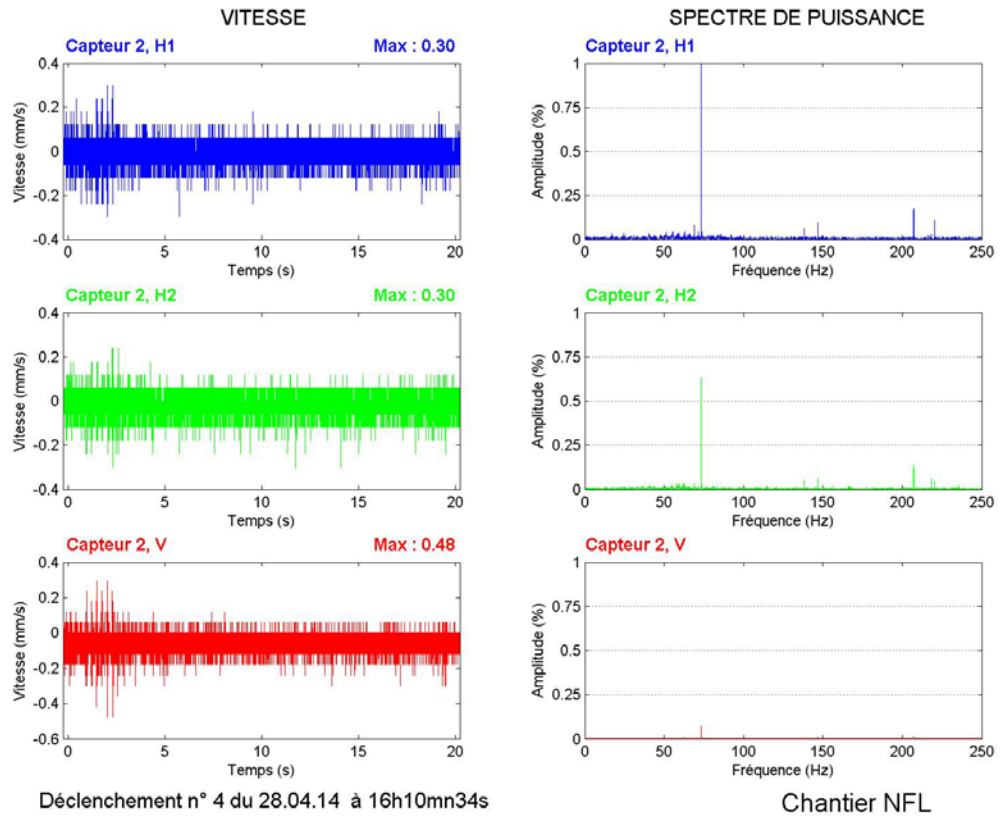


Figure 19: signal enregistré au passage du train n°5 par le capteur C'2

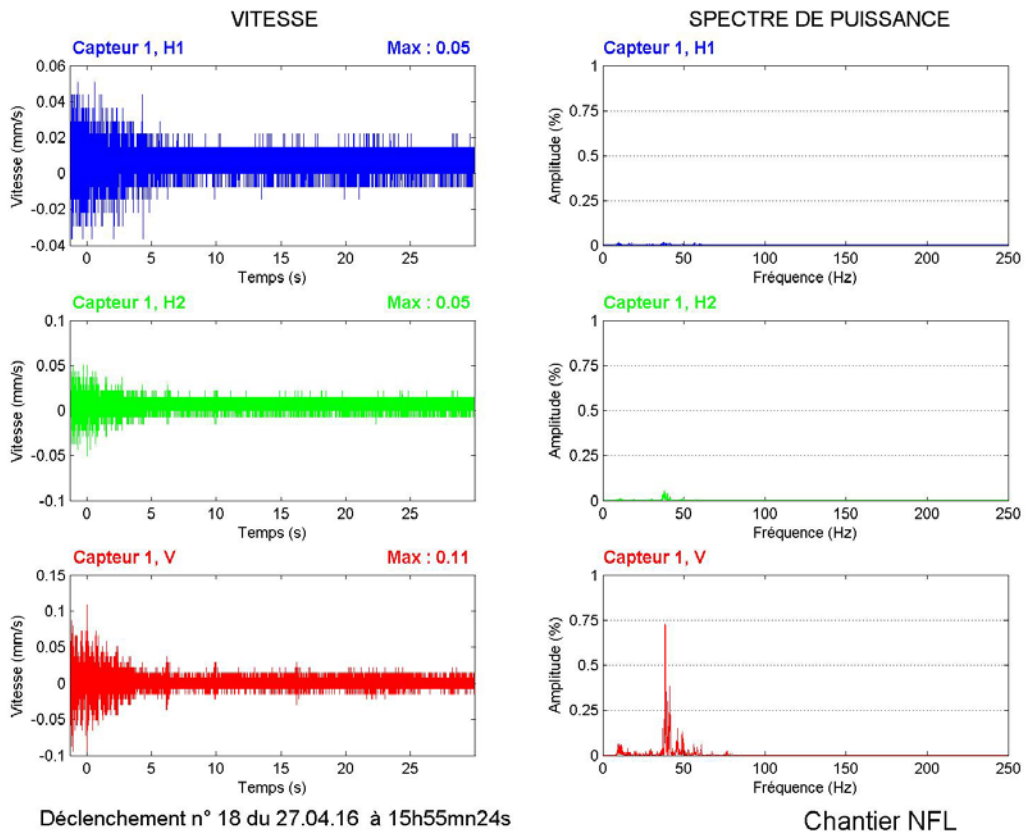


Figure 20: signal enregistré au passage du train n°5 par le capteur C'1

3.2.4 Modèle de propagation des vibrations

On calcule pour chaque capteur la moyenne (sur tous les trains) des maximums des signaux mesurés bruts :

capteur	C'1	C'2	C1	C2	C3	C4
Distance à la voie la plus proche	2 m	7 m	25 m	30 m	35 m	45 m
Moyenne des maximums bruts	0.3 mm/s	0.4 mm/s	0.16 mm/s	0.10 mm/s	0.09 mm/s	0.05 mm/s

Figure 21 représente le report de ces valeurs sur la vue satellite.

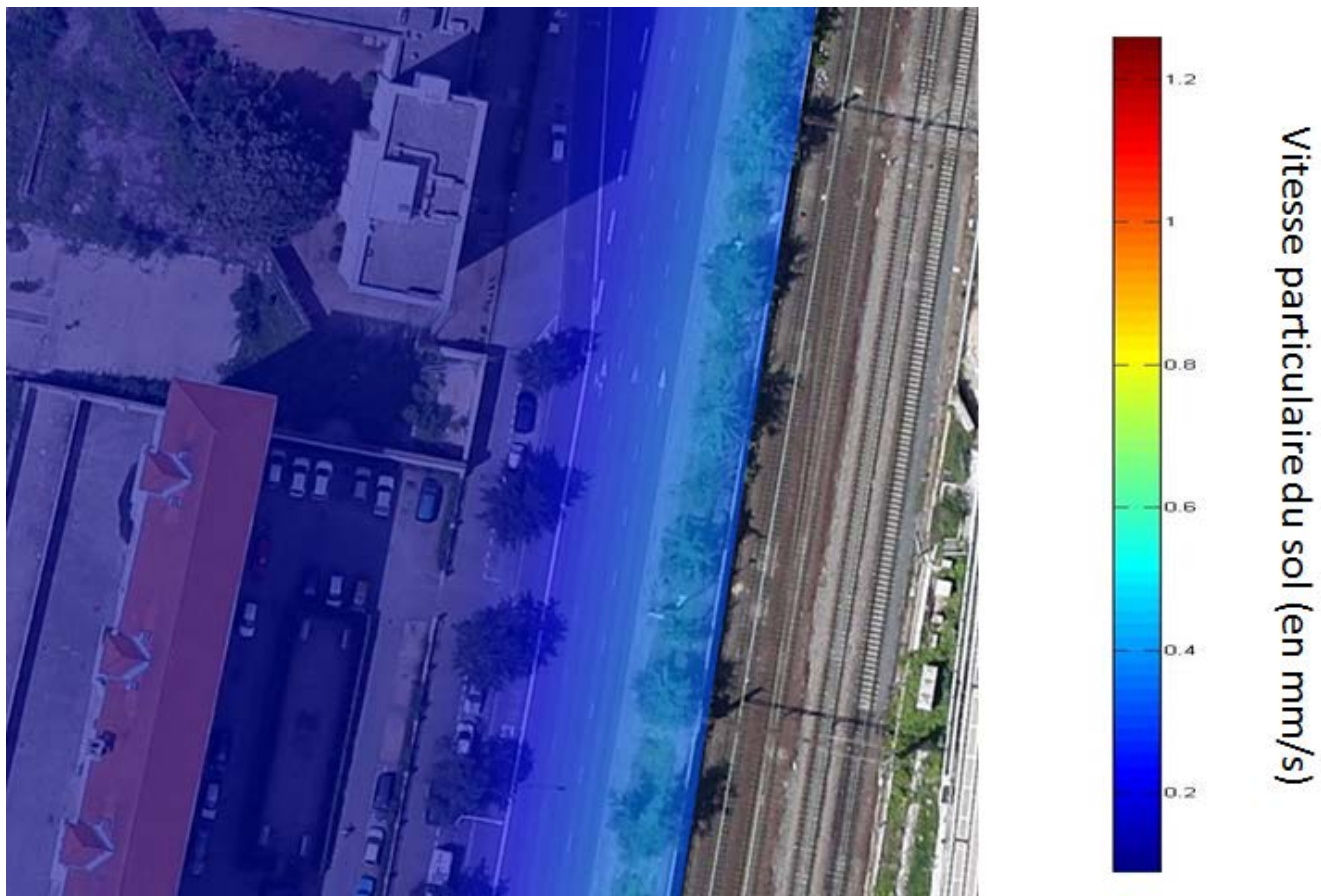


Figure 21: pics de vibrations moyens - boulevard des Tchécoslovaques

Ces résultats montrent que :

- La circulation ferroviaire en tranchée atténue l'émission des vibrations à la source
- Les vibrations s'atténuent rapidement avec la distance pour devenir négligeables pour le bâti au niveau des immeubles résidentiels (capteur C3). Bien que proches du bruit, ces signaux sont néanmoins mesurables, à condition de déclencher l'acquisition manuellement.

3.2.5 Impact du projet sur les vibrations

A la lumière de ces résultats, nous n'avons pas de préconisations particulières à formuler concernant la mitigation des vibrations en cas de travaux d'élargissement des voies. Pour ce site, la circulation du train en tranchée permet de limiter l'émergence de vibrations. Les niveaux de vibrations devraient rester en dessous des seuils définis par la loi puisque actuellement, au plus proche des voies la vitesse du sol n'excèdent pas 0.5 mm/s alors que les seuils sont fixés à 9 mm/s (Figure 22). Les valeurs filtrées restent elles aussi très largement en dessous des seuils.

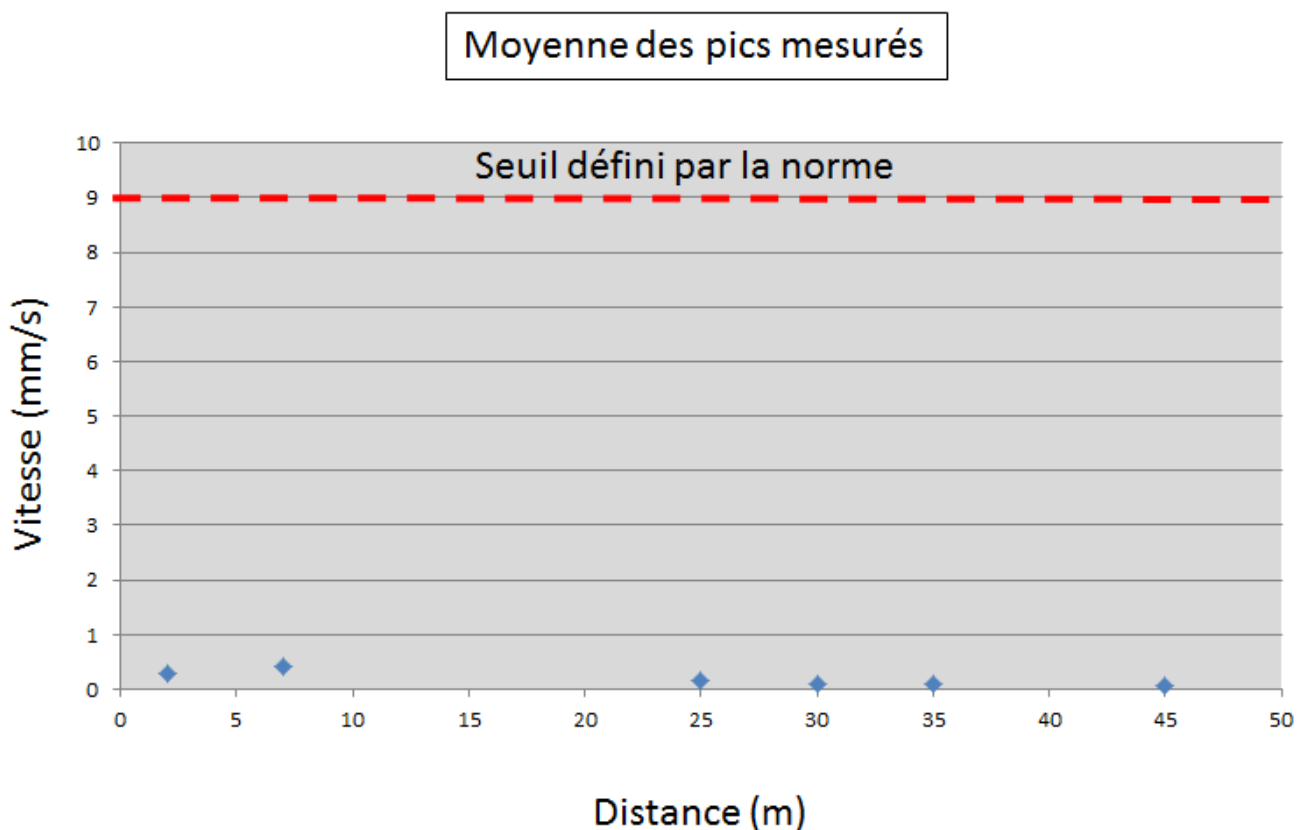


Figure 22: propagation des vibrations avec la distance, valeurs mesurées brutes

3.3 Saint Fons Grenay

3.3.1 Configuration des mesures

Sur ce site, aucun obstacle (route) n’empêche la réalisation d’un profil linéaire de mesures. Une seule station d’acquisition (ATV15) a donc été utilisée, connectée à 5 capteurs numérotés de C1 à C5 (

Figure 23). Les trains circulent à hauteur du terrain naturel sur trois voies différentes.

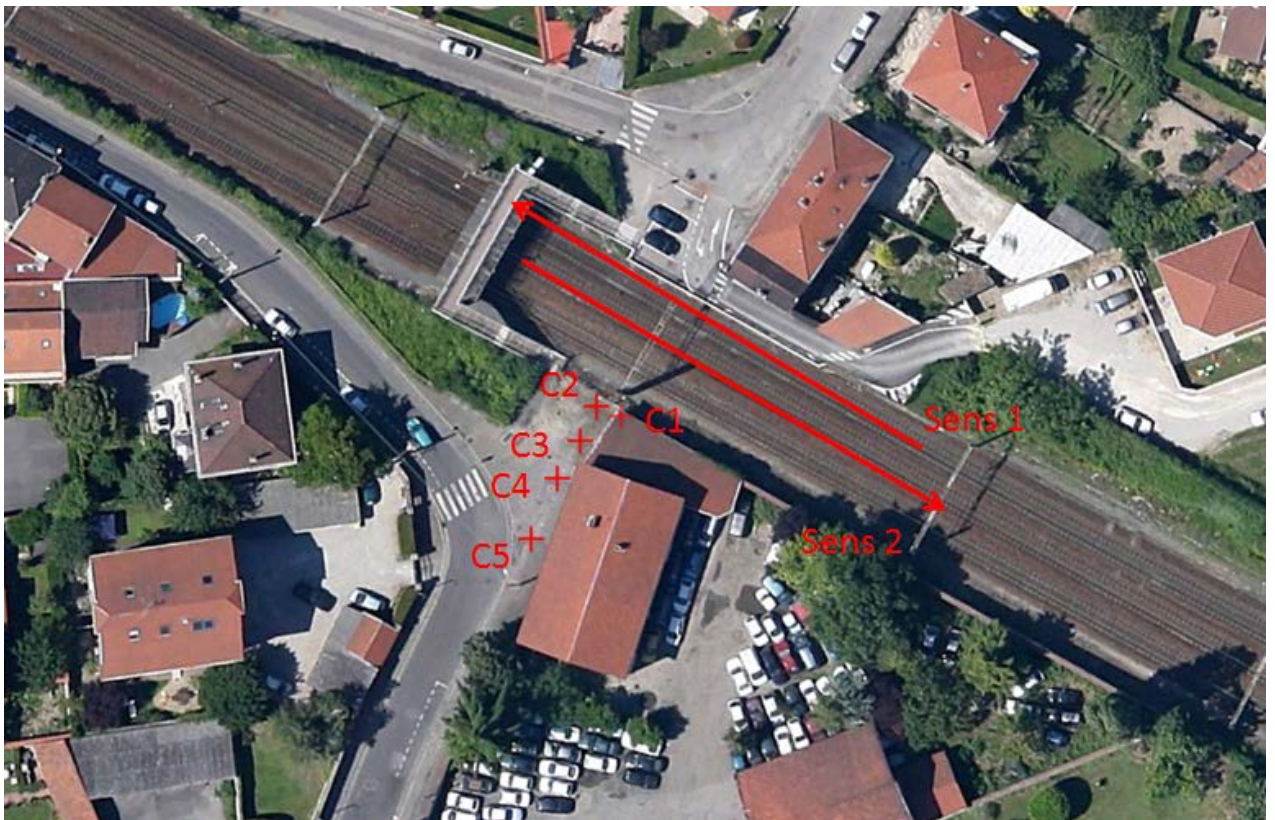


Figure 23: emplacement des capteurs - Saint Fons Grenay

Les distances relevées entre les capteurs et les voies circulées sont les suivantes :

C1 (sur façade bâtiment)	C2 (enterré)	C3 (enterré)	C4	C5
2 m	2 m	7 m	12 m	22 m

Les emplacements des capteurs sont décrits Figure 24.



Figure 24: emplacement des capteurs - Saint Fons Grenay

3.3.2 Paramètres d'acquisition

L'enregistrement manuel bruit pendant 333s sur les capteurs C1 à C5 est présenté (pour C2 uniquement).

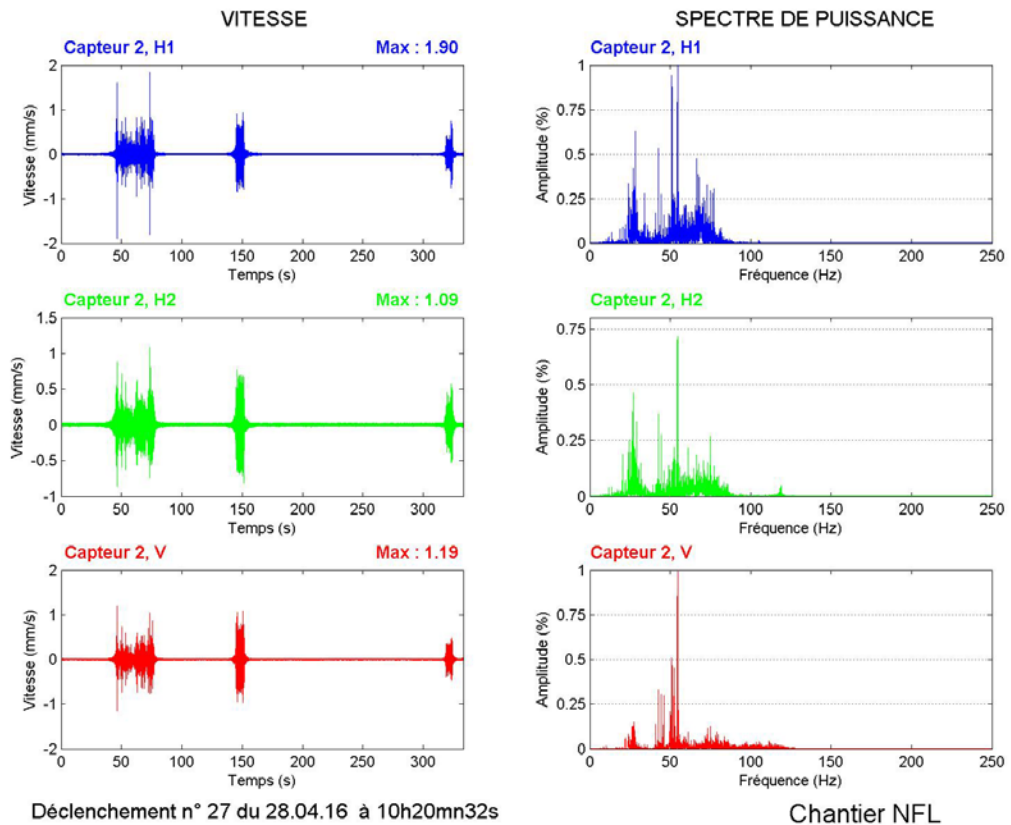


Figure 25: enregistrement manuel pendant 333s

On y distingue nettement trois passages de trains. Les amplitudes mesurées étant suffisamment élevées, l'enregistrement des signaux n'a pas posé de problème particulier. Les paramètres d'acquisition utilisés sont les suivants :

Fréquence d'acquisition	Durée du signal	Seuils de déclenchement
2000 Hz	45 s	0.2 mm/s

3.3.3 Comparaison avec les seuils normatifs

N° train	Heure	Sens	Maximum brut mm/s	Maximum filtré 100Hz mm/s	Maximum filtré 30Hz mm/s	Maximum filtré 8Hz mm/s	commentaire
1	10h20		1.9	1.69	0.6	0.1	Long train de fret sens 2, TGV sens 1, TER sens 2
2	10h26	1	2.25	1.99	0.69	0.05	Long fret (lent), pas enregistré en entier
3	10h28	1	1.13	0.96	0.22	0.03	Fin du fret précédent
4	10h36	1	1.69	1.54	0.7	0.1	Petit TER, rapide
5	10h42	1	2.04	1.79	0.59	0.08	TGV rapide
6	10h46	1	2.06	1.87	0.62	0.07	TGV rapide (sur voie 3) puis fret (sur voie 1)
7	10h55	1	2.8	2.7	1.09	0.13	Fret court sur voie 1
8	11h00	1	0.7	0.68	0.44	0.04	Petit TER sur voie 2
9	11h05	2	0.9	0.79	0.23	0.04	Long TGV sur voie 3
10	11h11	1	2.53	2.4	0.92	0.11	Vieux TER, sur voie 2
11	11h21	2	1.44	1.32	0.35	0.05	Long TGV sur voie 3

Généralement, les vibrations les plus importantes sont mesurées sur les capteurs 2 et 3. La vitesse particulière la plus importante a été mesurée lors du passage du train n°7 sur le capteur C2 (2.8 mm/s,

Figure 26). Le signal émerge très nettement du bruit (rapport 100 entre le signal et le bruit).

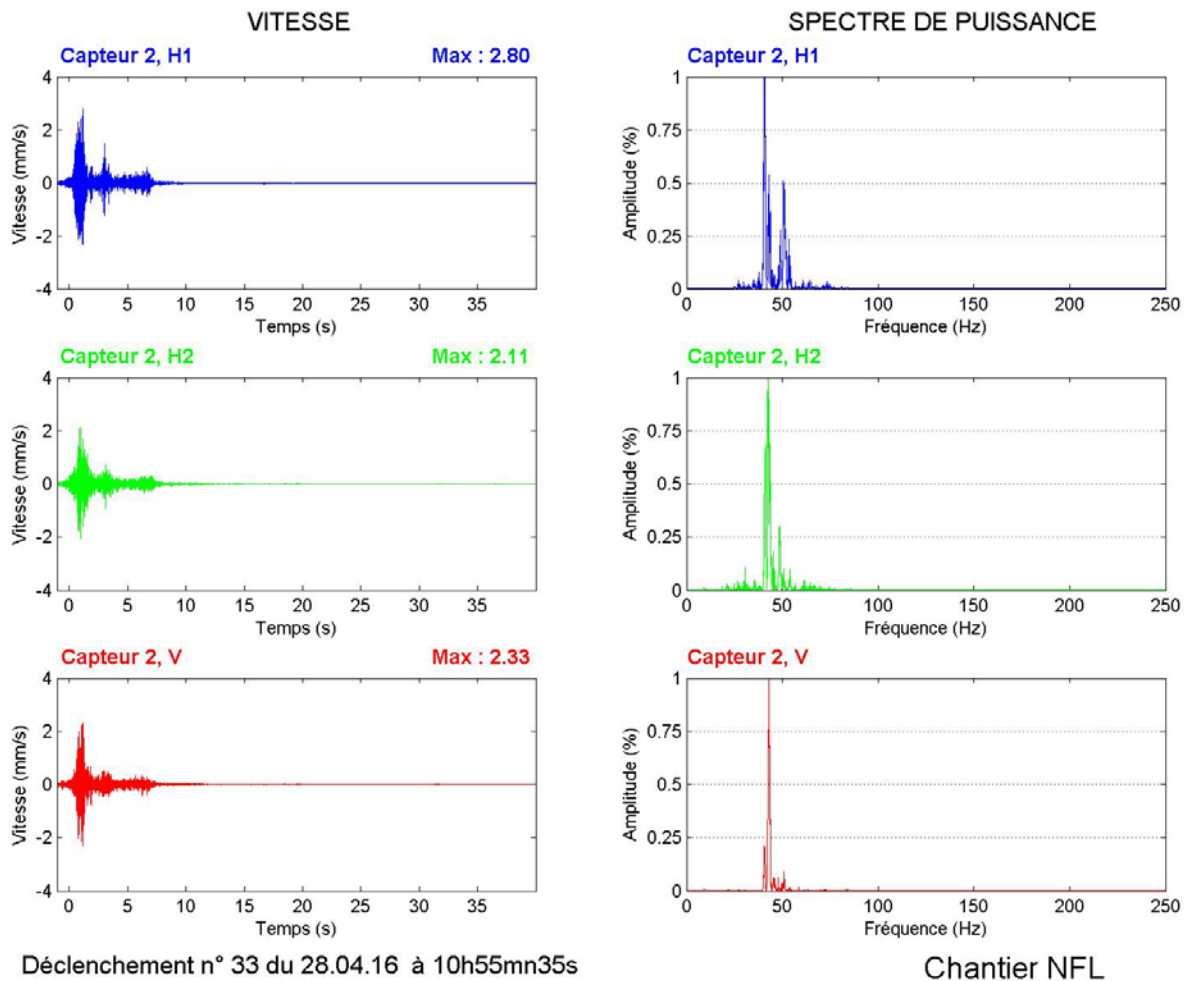


Figure 26: Maximum des vibrations pour le site de Saint Fons Grenay

Pour le signal représenté, le spectre des fréquences est très étroit, la majorité du signal étant compris autour de 50Hz. Ainsi, même si les amplitudes brutes mesurées restent importantes en comparaison avec les deux sites précédents, ces dernières décroissent rapidement après application des filtrages basse fréquence. Ainsi, les vitesses mesurées sont encore largement en-deçà des seuils de vulnérabilité du bâti

	Maximum mesuré	Norme pour des bâtiments très sensibles
Filtré à 100 Hz	2.7 mm/s	9 mm/s
Filtré à 30 Hz	1.09 mm/s	6 mm/s
Filtré à 8Hz	0.13 mm/s	4 mm/s

3.3.4 Modèle de propagation des vibrations

On calcule pour chaque capteur la moyenne (sur tous les trains) des maximums des signaux mesurés bruts :

capteur	C1 (sur façade bâtiment)	C2	C3	C4	C5
Distance à la voie la plus proche	2 m	2 m	7 m	12 m	22 m
Moyenne des maximums bruts	0.8	1.51	1.25	0.30	0.30

Ces valeurs sont reportées sur la vue satellite

Figure 27. Pour rappel, l'échelle de couleur est commune pour les Figure 12, Figure 21 et Figure 27. Cette échelle est la plus adaptée pour représenter la dynamique des données mesurées (entre 0 et 1.23 mm/s), mais elle n'est pas représentative des seuils admissibles (9 mm/s pour un bâtiment très sensible).

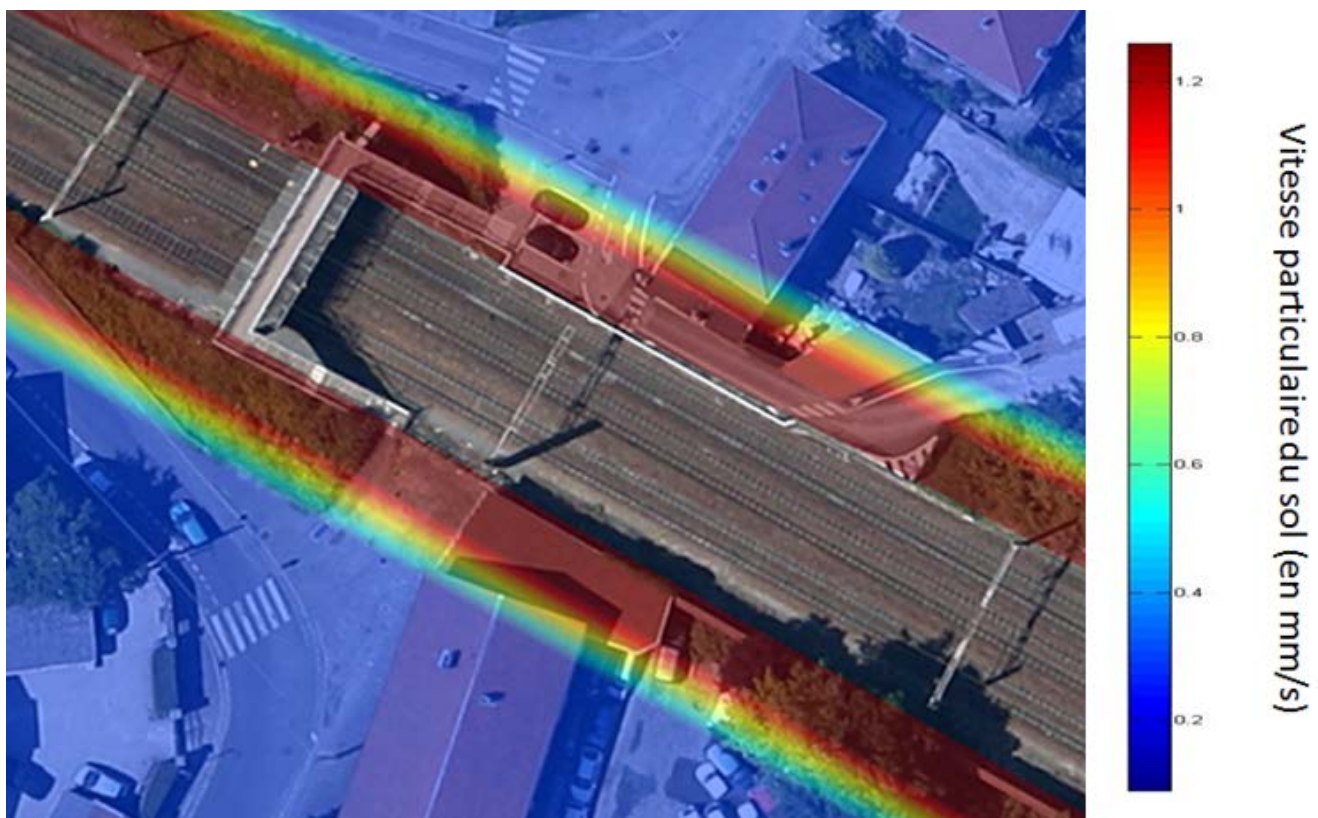


Figure 27: pics de vibrations moyens - site de Saint Fons Grenay

Ces résultats illustrent que :

- Les vibrations enregistrées sur ce site sont plus importantes que pour les deux sites précédents. Les passages de trains de fret peuvent expliquer ces résultats
- Les mesures restent en dessous des seuils maximums autorisés pour la vulnérabilité du bâti
- Les vibrations s'atténuent rapidement avec la distance.
- Près de 50% de l'énergie est dissipée lors du transfert sol structure (rapport entre les capteurs C1 et C2).

3.3.5 Modèle de propagation des vibrations – établissement d'une relation empirique

Contrairement aux deux premiers sites où les contraintes liées aux infrastructures existantes (routes) ne nous permettaient pas de positionner les capteurs à intervalles réguliers, les vibrations sur le site de Saint Fons Grenay ont pu être mesurées avec un échantillonnage spatial plus adapté au calcul de lois d'atténuations numériques. De plus, les niveaux de vibrations étant les plus élevés, le calcul de la loi de propagation sera plus robuste.

Ces lois de propagation sont fonction :

- De la nature des formations géotechniques constituant le sol-support de l'infrastructure ferroviaire
- De la nature de la source des vibrations (type de train, vitesse, etc)

Elles obéissent à la formule générale

$$V = K \cdot D^{-\alpha} \quad (1)$$

Où V est la vitesse particulière des vibrations en mm/s, K est le coefficient du site et de la source, D est la distance aux voies en mètres et α la pente d'amortissement des vibrations (amortissement lié au sol). La représentation log-log de l'équation (1) est une droite d'ordonnée à l'origine K et de pente α . Ces lois d'atténuations ont été calculées pour les 11 signaux mesurés sur le site de Saint Fons Grenay et sont représentées Figure 28.

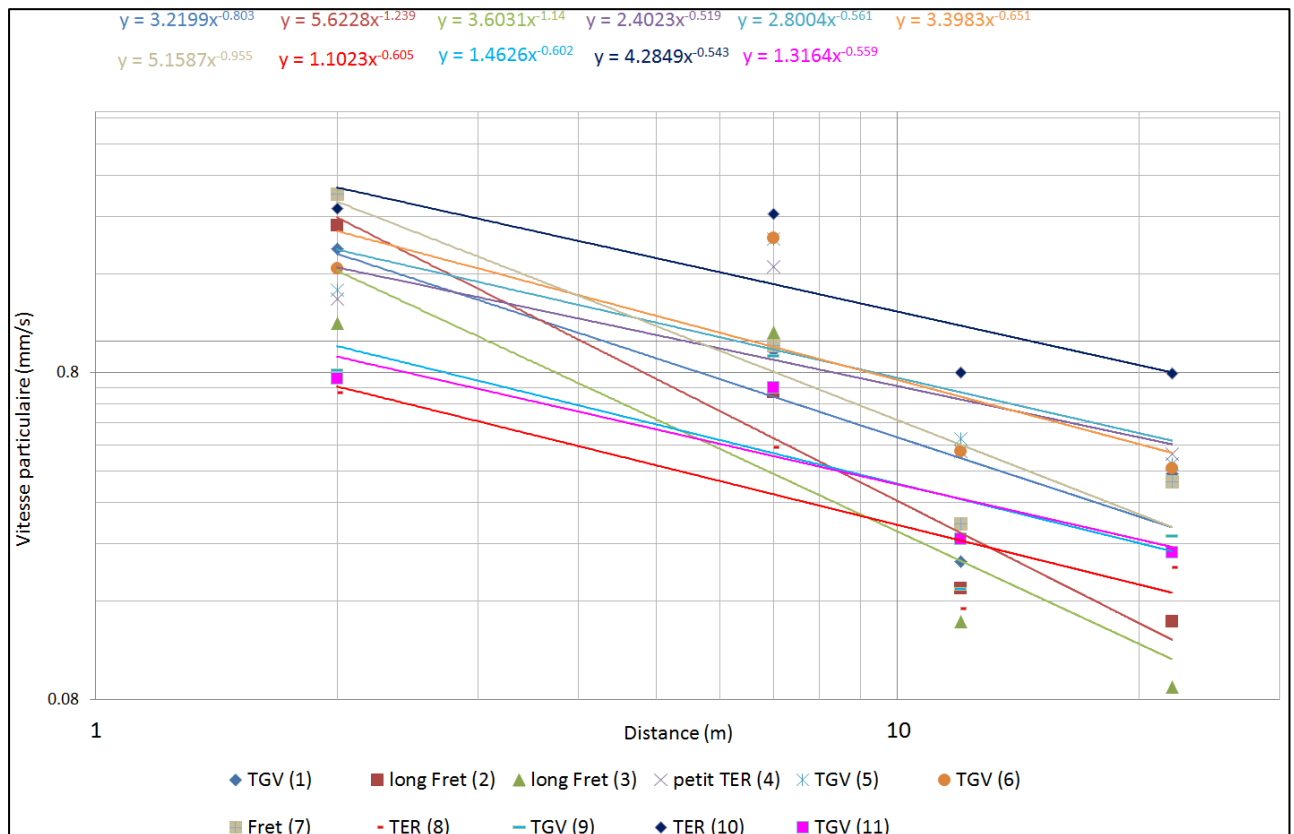


Figure 28 : lois de propagation pour le site de Saint Fons Grenay

On remarque que si le coefficient K varie selon le train, les coefficients α restent du même ordre et les droites calculées sont pratiquement parallèles. Seuls les trains 2 et 3 (long fret), présentent des pentes différentes : il s'agit en réalité du même train de fret, circulant très lentement, dont le passage a été enregistré sur deux signaux différents. De manière générale, les trains de fret génèrent de fortes vibrations à proximité des voies (K élevé) mais s'atténuent plus rapidement avec la distance (α très négatif). Sur ce site d'étude, la moyenne des coefficients α calculés est de -0.744 . Cela signifie qu'à une distance de 10m des voies, 80% de l'amplitude initiale des vibrations est absorbée par le terrain.

3.3.6 Impact du projet sur les vibrations

A la lumière de ces conclusions, nous n'avons pas de préconisations particulières à formuler concernant la mitigation des vibrations en cas de travaux d'élargissement des voies. Pour ce site, où les vibrations mesurées au sol sont les plus fortes, les niveaux restent très en dessous des seuils. En effet, Pour le capteur fixé sur le bâtiment à 2 mètres des voies les vibrations sont de l'ordre du millimètre par seconde (le seuil le plus restrictif est fixé à 9 mm/s). Pour le capteur le plus proche, situé au sol à deux mètres des voies, les vibrations mesurées n'excèdent pas 1.5 mm/s (Figure 29). De fait, bien qu'un rapprochement des voies induira inéluctablement une augmentation des vibrations, les résultats de l'étude nous permettent d'affirmer que les niveaux mesurés resteront inférieurs aux seuils définis par la norme.

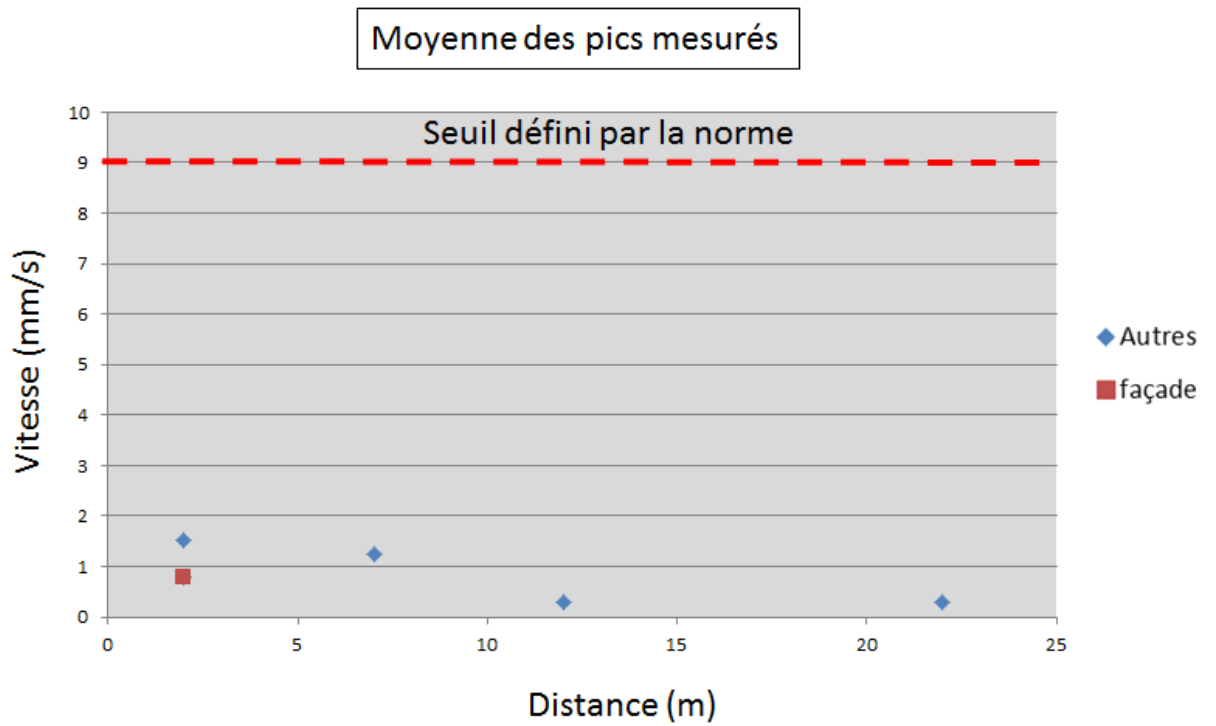


Figure 29: propagation des vibrations avec la distance, valeurs mesurées brutes

4 Conclusions sur l'impact du projet

L'utilisation de capteurs disposés en profils a permis de calculer des modèles de propagation et des lois d'atténuation des vibrations en fonction de la distance. Les mesures réalisées sur ces trois sites test montrent que le sol atténue rapidement les vibrations. Cependant, on peut hiérarchiser les trois sites étudiés en fonction de l'importance des vibrations mesurées:

1. Saint Fons Grenay,
2. Clinique du Parc,
3. Boulevard des Tchécoslovaques.

Le passage de lents trains de fret peut expliquer les vibrations mesurées sur le site de Saint Fons Grenay (effet de résonance quand les vibrations perdurent dans le temps). Les faibles vibrations mesurées sur le site du boulevard des Tchécoslovaques sont probablement dues à la configuration des voies en tranchée.

Le cas de la clinique du Parc est intéressant car il s'agit d'un point sensible, donc les normes en termes de vibrations sont plus restrictives. **Sur La pile du viaduc supportant la voie ferrée est soumise des vibrations maximales de 5.5 mm/s ont été mesurées, alors que la norme tolère des vitesses allant jusqu'à 9 mm/s.** En pied de pile, les vibrations chutent à 2 mm/s. Pour la clinique, actuellement située à une vingtaine de mètres des voies, les vibrations mesurées sont imperceptibles (0.05 mm/s). De plus, l'analyse fréquentielle des signaux a montré que ces derniers étaient essentiellement haute fréquence et que leur amplitude décroissait rapidement après application d'un filtre passe-bas à 30 Hz. D'un point de vue vibration, la clinique ne sera pas impactée par un rapprochement des voies.

Pour le site de Saint Fons Grenay, là où les plus fortes vibrations ont été enregistrées, à 2 mètres des voies, les vitesses particulières du sol restent largement en dessous des vitesses maximales admises pour la vulnérabilité du bâti (**1.5 mm/s mesuré pour un seuil à 9 mm/s** en prenant l'hypothèse la plus défavorable, à savoir un seuil pour des constructions très sensibles). De plus, le calcul des pertes énergétiques lors du transfert des vibrations entre le sol et la structure a montré que 50% de l'amplitude des vibrations était dissipée. L'atténuation intrinsèque des terrains géotechniques intervient aussi très largement dans l'atténuation des vibrations puisque les modèles calculés ont montré que 80% de l'énergie était atténuée à 10 mètres des voies. De fait, bien qu'un rapprochement des voies induira inéluctablement une augmentation des vibrations, les résultats de l'étude nous permettent d'affirmer que les niveaux mesurés resteront inférieurs aux seuils définis par la norme.