



FONDATION D'ENTREPRISE

FEREC

Smartvia® Wireless Sensor

Fondation d'entreprise FEREC

Appel à projets 2018

Des innovations numériques pour la conception, la construction, l'évaluation et la maintenance des infrastructures



Auteurs :

KAMAL BERRADA

EUROVIA MANAGEMENT – CENTRE DE
RECHERCHE

Sommaire

1	Résumé	2
2	Contexte et objectifs du projet	3
3	Utilisation de l'aide de la Ferec dans le projet	4
4	Description des travaux et résultats	5
4.1	Essai en laboratoire	5
4.2	Travaux sur un signal en conditions réelles	10
5	Impact	25
5.1	Apports et retombées pour la collectivité	25
5.2	Mise en évidence du caractère collaboratif et d'intérêt général	25
5.3	Publications et autres éléments de communication auxquels le projet et ses résultats ont donné lieu.....	26
6	Perspectives ouvertes par le projet notamment en matière de recherche collaborative	27

1 Résumé

Le projet SWS (Smartvia® Wireless Sensor) vise à doter la profession d'un objet connecté permettant la remontée en temps réelle de la mesure de la déflexion d'une chaussée. Cette mesure est importante pour le gestionnaire d'infrastructure qui peut ainsi suivre l'évolution du comportement mécanique de sa structure et ainsi programmer avec plus de justesse les travaux de maintenance nécessaires à la prolongation de la durée de vie de la structure.

Les premiers essais en laboratoire sont prometteurs et permettent de démontrer la précision de la mesure de déplacement verticale par l'intermédiaire de ce capteur.

Les prochains essais seront à taille réelle avec l'intégration du capteur dans une structure autoroutière soumis à un trafic.

2 Contexte et objectifs du projet

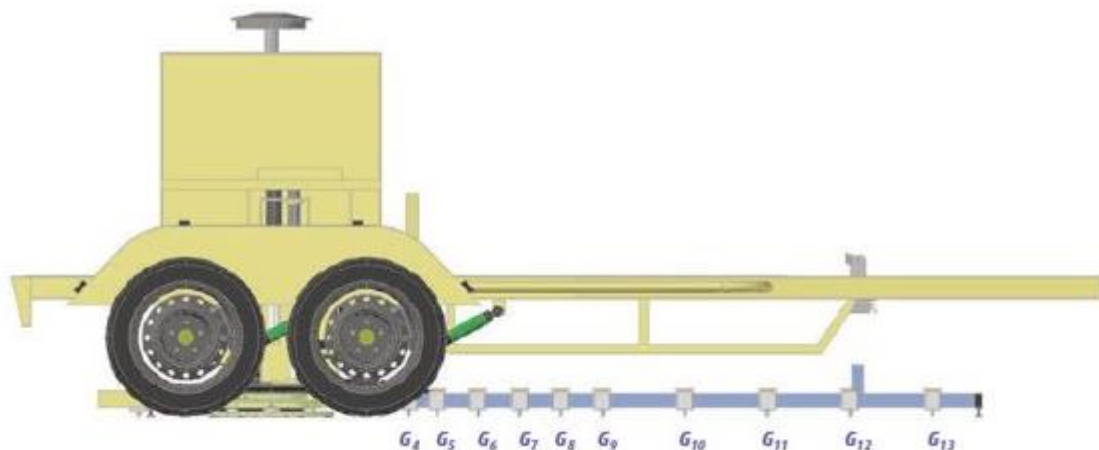
Une structure de chaussée est composée de plusieurs couches d'enrobés. Chacune de ses couches assure des fonctions différentes au sein de la structure. Certaines assurent la résistance mécanique et la reprise des charges. D'autres, en surface, assurent le confort et la sécurité.

Les matériaux qui composent cette structure sont viscoélastiques. C'est-à-dire que leurs propriétés physiques et notamment leur module E dépend à la fois de la fréquence de sollicitation (vitesse du trafic) et de la température. Dans le temps, ces matériaux « fatiguent » et voient leur module diminuer avec le temps. Il est considéré que lorsque le module d'une couche est divisé par deux que celle-ci est en fin de vie.

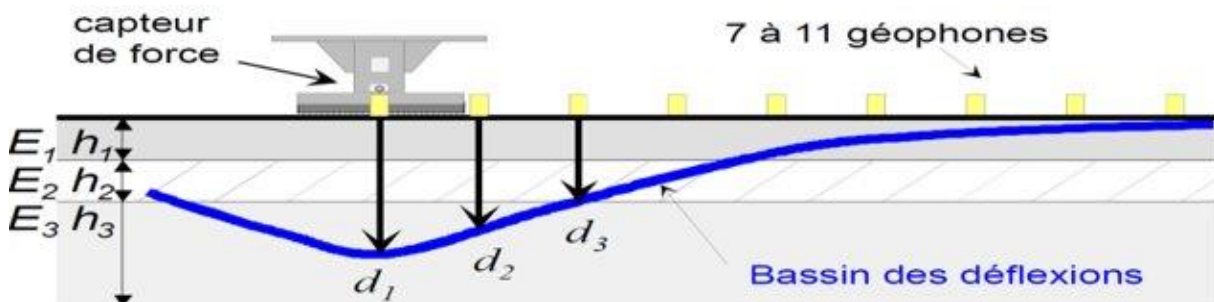
Une structure de chaussée est dimensionnée pour assurer le service pendant plusieurs années. A l'issus, la chaussée est déconstruite avant la construction d'une nouvelle structure.

Le contexte économique d'aujourd'hui vise à prolonger la durée des structures par le moyen de travaux de maintenances plutôt que la reconstruction. Pour cela, il est indispensable de connaître l'état de santé de la structure.

Un des essais couramment employé est le FWD.



L'essai consiste à placer plusieurs géophones comme illustré sur la figure ci-dessus. Après l'application d'une sollicitation, les géophones mesurent un mouvement de la structure.



Ce bassin de déflexions permet au moyen d'un modèle et connaissant le nombre de couches et leurs épaisseurs de déterminer le module de chacune des couches. Connaissant ces modules, il est possible d'estimer la durée de vie résiduelle de la chaussée.

Cet essai coûteux et complexe à mettre en place permet d'obtenir un état de la structure à un instant t.

On s'est proposé dans le cadre de ce projet de concevoir et de réaliser un objet connecté sans fil permettant la mesure en temps réelle et surtout en continu de la déflexion de la structure sous trafic.

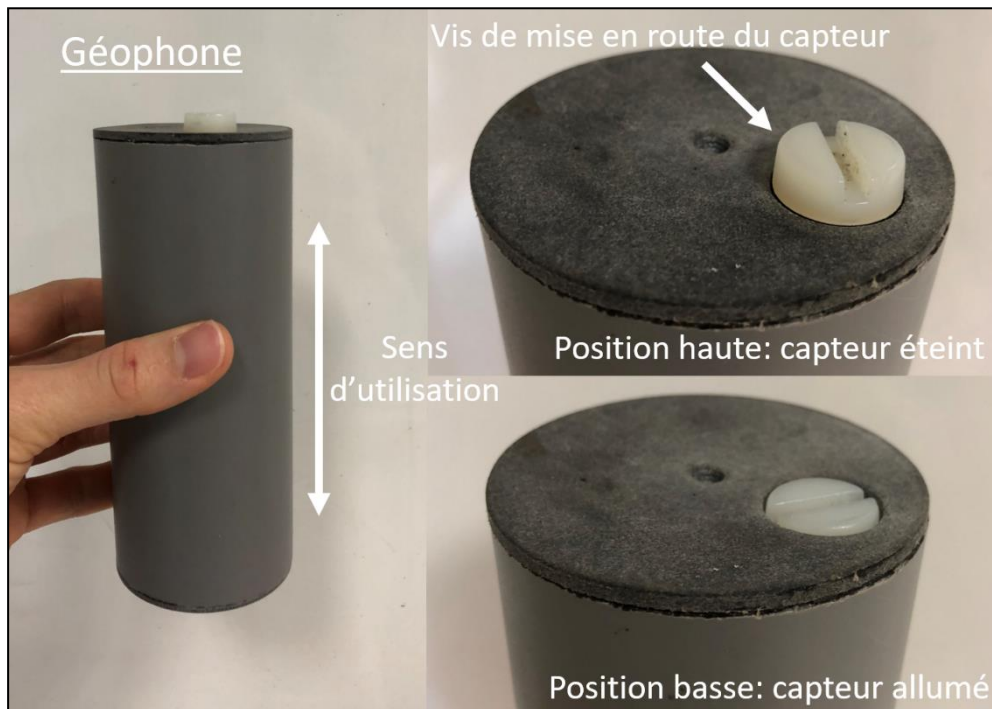
3 Utilisation de l'aide de la Ferec dans le projet

L'aide financière de FEREC a permis de financer une partie de la conception et de la réalisation de trois prototypes. Le premier sera installé en chaussée autoroutière début 2020

4 Description des travaux et résultats

4.1 Essai en laboratoire

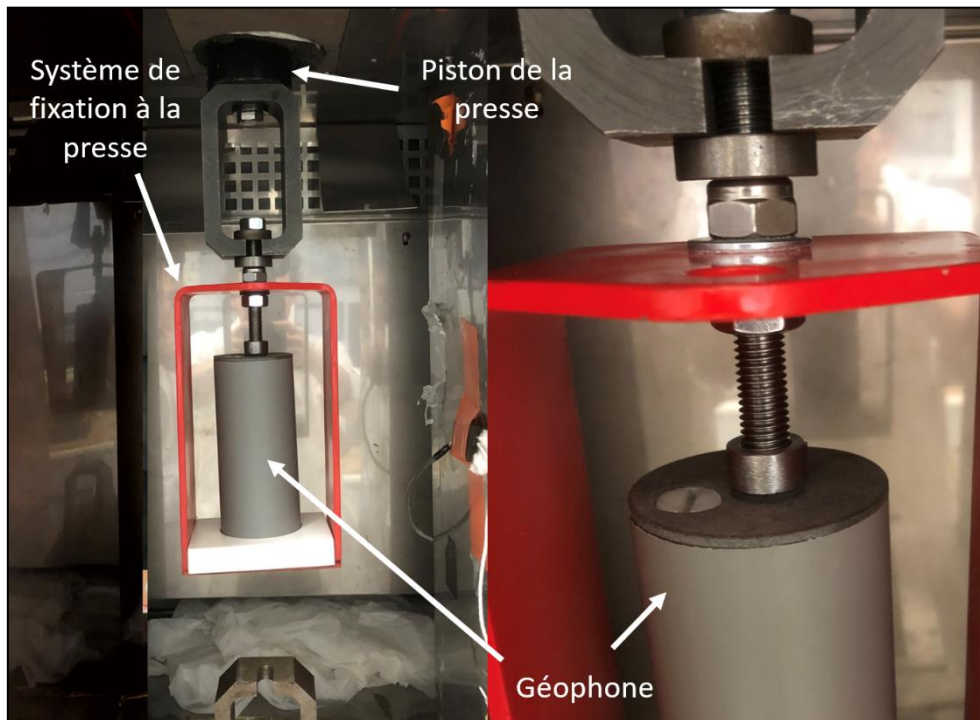
Un premier prototype a été réalisé afin de réaliser des essais en laboratoire.



La campagne d'essais consiste à comparer l'amplitude du déplacement mesuré par le géophone à l'amplitude du déplacement qui lui est appliqué. Pour cela on applique un déplacement sinusoïdal au géophone par l'intermédiaire d'une presse MTS (Mechanic Test System) à différentes amplitudes (de 0,05mm à 4,0mm), fréquences (de 1Hz à 20Hz) et températures (-15°C, 20°C et 50°C). Les choix de faire des essais à différentes température se justifie par le fait que les capteurs seront disposés dans la chaussée, celle-ci peut être soumise à des fortes chaleurs en été et des températures négative en hiver, il convient donc de savoir si la température a une influence sur la mesure du capteur. Les différents déplacements imposés sont répertoriés dans le Tableau 5-1 :

Tableau 5-1 : Déplacement sinusoïdaux imposés au géophone

x : 20°C y : -15°C z : 50°C		Fréquence (Hz)							
		1	2	4	5	7,5	10	15	20
Amplitude (mm)	0,05					x	xyz	x	
	0,1	x	x	x	x	x	xyz	x	x
	0,2						xyz		x
	0,25	x			x	x	xyz	x	
	0,3						xyz		x
	0,4						xyz		
	0,5	x	x	x	x		xyz		
	1	x	x		x		xyz		
	1,5				x				
	2	x	x	x	x				
	3	x	x		x				
	4	x							



Le signal délivré par le géophone et affiché sur le logiciel d'acquisition est en bits. Il convient donc de convertir le signal en m.s-1 en utilisant la formule suivante :

$$\text{Signal_m.s-1} = \text{Signal_bits} \times 1/G(f) \times 1/C$$

f est la fréquence du déplacement imposé, le coefficient G(f) est déduit du diagramme de Bode de la fiche technique du géophone et le coefficient C est déduit du convertisseur analogique-numérique. La leurs valeurs sont données pour chacune des fréquences utilisées dans le Tableau 5-2. La fréquence d'acquisition/échantillonnage choisie est de 1kHz afin d'avoir le plus de détail possible.

Tableau 5-2 : Valeurs des coefficients G et C en fonction de la fréquence du signal

Fréquence (Hz)	1	2	4	5	7,5	10	15	20
G(f) (V.s.m-1)	1,45	5,85	20,96	25,74	31	30	29	28.8
C (bits.V-1)	223/3							

L'actionneur utilisé pour imposer le déplacement au géophone est une presse hydraulique MTS commandée en déplacement. Celle-ci est équipé d'une enceinte permettant de soumettre le spécimen à une température voulue.

Le système de maintien du capteur à la presse est conçu spécialement pour cette utilisation. Il s'agit d'un système serrant le capteur en ses deux extrémités. Il permet de le disposer verticalement selon son sens d'utilisation ainsi que d'avoir accès à la vis de mise en route du capteur. L'effort de serrage est appliqué à l'aide d'une vis et un système de blocage par contre-écrou permet de maintenir l'effort de serrage malgré les vibrations imposées au cours du déplacement (voir Annexe).

Le déplacement mesuré par le géophone est obtenu par intégration du signal avec la méthode des trapèzes. On obtient une forme sinusoïdale proche de celle appliquée par la presse. Cependant on peut remarquer que dans tous les cas, la fréquence du déplacement mesuré est légèrement supérieure à celle du déplacement appliqué (période légèrement plus courte).

Une fois tous les signaux obtenus on compare leur amplitude avec celle de leur consigne. Les résultats obtenus à une température de 20°C sont présentés sur la **Figure 5-1: Comparaison entre l'amplitude de déplacement imposée et l'amplitude de déplacement mesurée avec le géophone pour les différentes fréquences**. Pour la majorité des fréquences de déplacement testées, les résultats semblent suivre une droite d'équation $y = x$. En dessous de 0,1 mm d'amplitude de déplacement imposé, la corrélation est très nette pour toutes les fréquences, mais il y a une dispersion des résultats au-dessus de 0,1mm. La dispersion est surtout remarquable pour les signaux

de 4Hz et 5Hz. En effet, il y a le phénomène de saturation déjà identifié dans la partie précédente, qui se manifeste ici par l'apparition d'un palier.

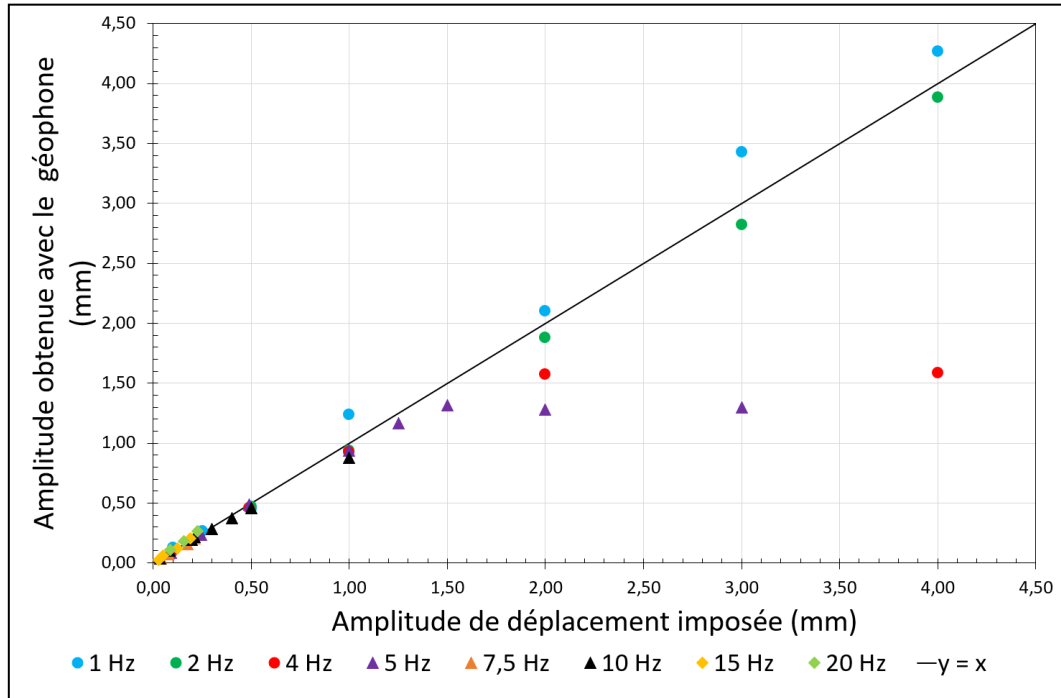


Figure 5-1: Comparaison entre l'amplitude de déplacement imposée et l'amplitude de déplacement mesurée avec le géophone pour les différentes fréquences

La Figure 5-2 : **Comparaison des amplitudes comprises entre 0 et 0,5 mm** Erreur ! Source du renvoi introuvable. présente la comparaison entre l'amplitude de déplacement mesurée et l'amplitude de déplacement réelle pour chacune des fréquences et pour des amplitudes de déplacement réelles inférieures à 0,5 mm. La tendance de tous les points sur cet intervalle est caractérisée par une pente de 0,96 et un R2 de 0,98. La tendance étant très proche de la droite d'équation $y = x$ et étant donné les écarts observés entre les valeurs obtenues avec le géophone et la tendance, on peut alors considérer que la loi $y = x$ s'applique pour ce capteur avec une certaine marge d'erreur (environ +/-0,05 mm) et sur un intervalle compris entre 0 et 0,5 mm. La marge d'erreur engendrée est négligeable étant donnée la précision nécessaire pour ce capteur et le milieu dans lequel il sera utilisé.

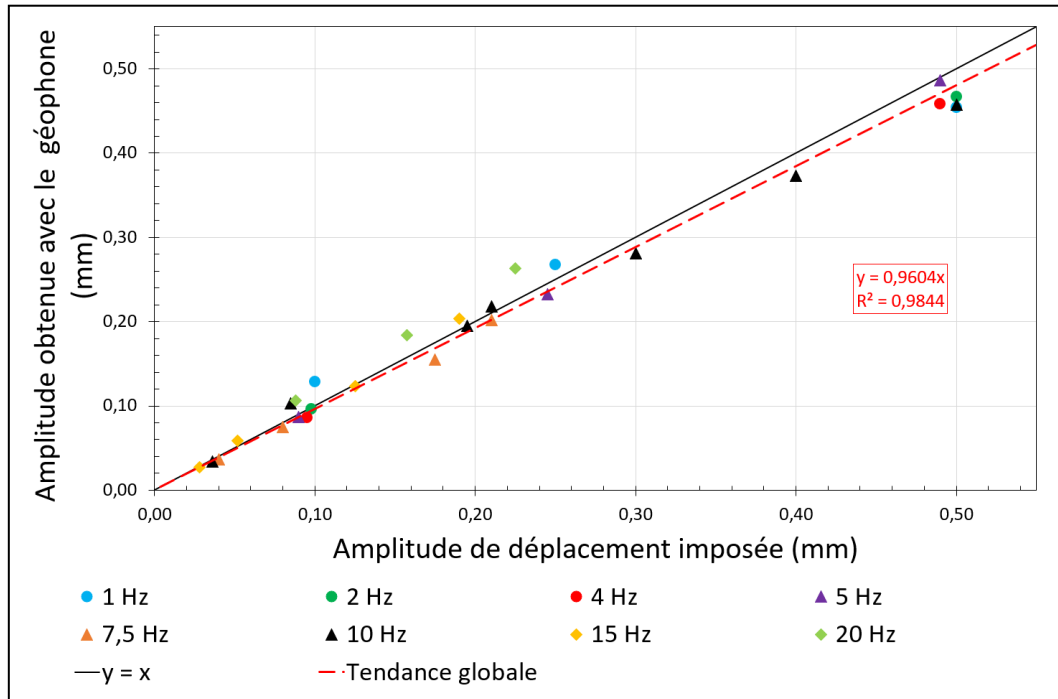


Figure 5-2 : Comparaison des amplitudes comprises entre 0 et 0,5 mm

Le Tableau 5-3 synthétise leurs différentes caractéristiques (pente et R2).

Tableau 5-3: Caractéristiques des tendances pour chaque fréquence

Fréquence (Hz)	1	2	4	5	7,5	10	15	20
Coefficient directeur	1,09	0,96	0,92	1,00	0,93	0,94	1,05	1,17
R2	0,996	0,999	1,000	1,000	0,993	0,990	0,995	0,999

On observe des coefficients de détermination R2 supérieurs à 0,99 dans tous les cas étudiés. Cependant il y a une variation de plus de 10% entre les différentes pentes obtenues, mais aucune dépendance claire vis-à-vis de la fréquence ne semble se dégager.

4.1.1 Influence de la température

De la même manière que précédemment, la Figure 5-3 représente l'amplitude du déplacement donnée par le géophone en fonction de l'amplitude du déplacement réelle pour plusieurs déplacements à 10hz et aux trois températures différentes (-15°C, 20°C et 50°C). De la même manière que précédemment

on obtient des R2 supérieurs à 0,99 et des pentes variant entre 0,90 et 0,98. Il n'est pas possible de dégager une quelconque loi impliquant une influence de la température sur les résultats du capteur.

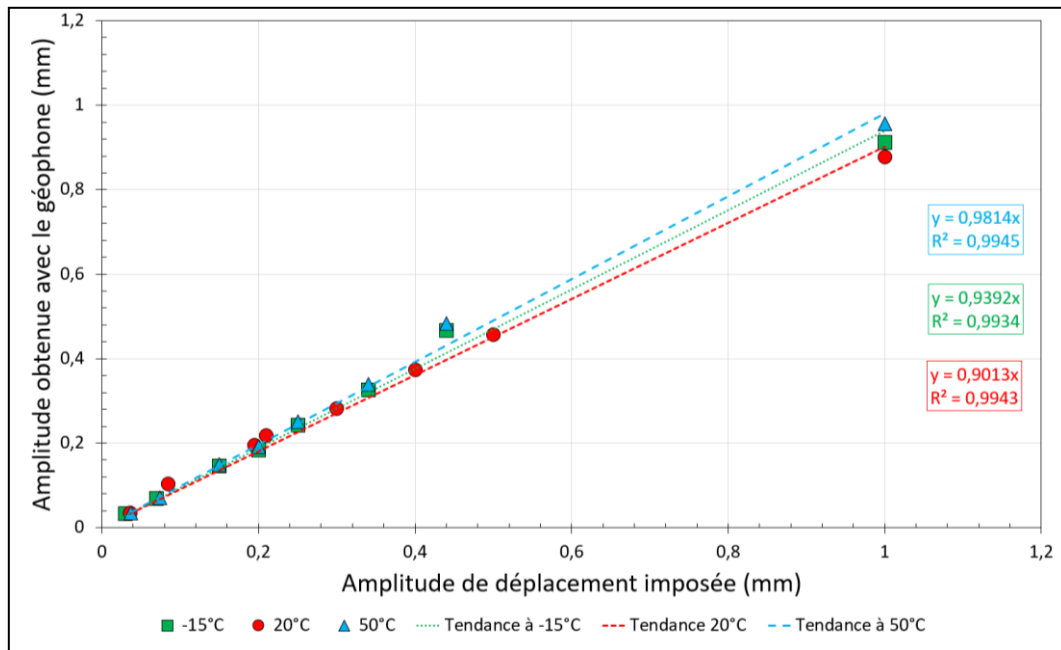


Figure 5-3 : Amplitude livrée par le géophone en fonction de l'amplitude réelle pour différentes températures et une fréquence de 10 Hz

4.2 Travaux sur un signal en conditions réelles

Un prototype du capteur SWS est disposé dans la chaussée afin d'effectuer des mesures de déflexion lors du passage d'un véhicule. Deux passages sont effectués, un à 25 km.h⁻¹ et un à 6 km.h⁻¹. Les résultats et la méthode pour les obtenir sont présentés dans les paragraphes suivants.

Les deux photos ci-dessous décrivent l'intégration du capteur dans la chaussée. Celui est introduit dans le corps de chaussée via un trou de carottage de diamètre 60 mm. Il est ensuite scellé à l'aide d'une résine.



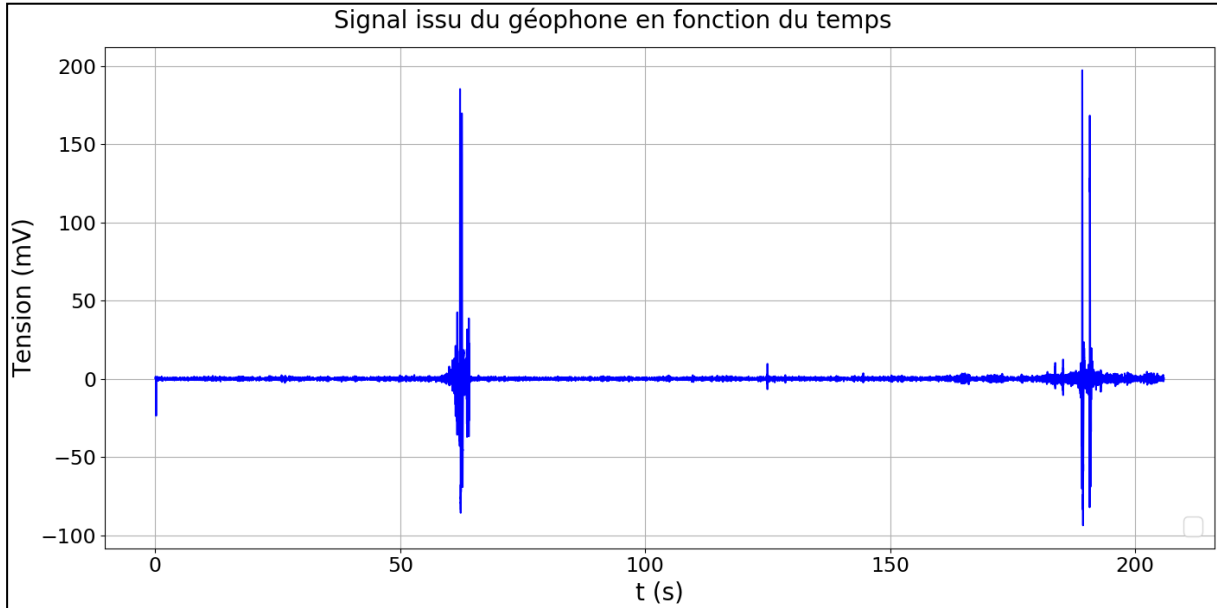
Figure 4 : intégration du capteur dans la chaussée



Figure 5 : Scellement du capteur

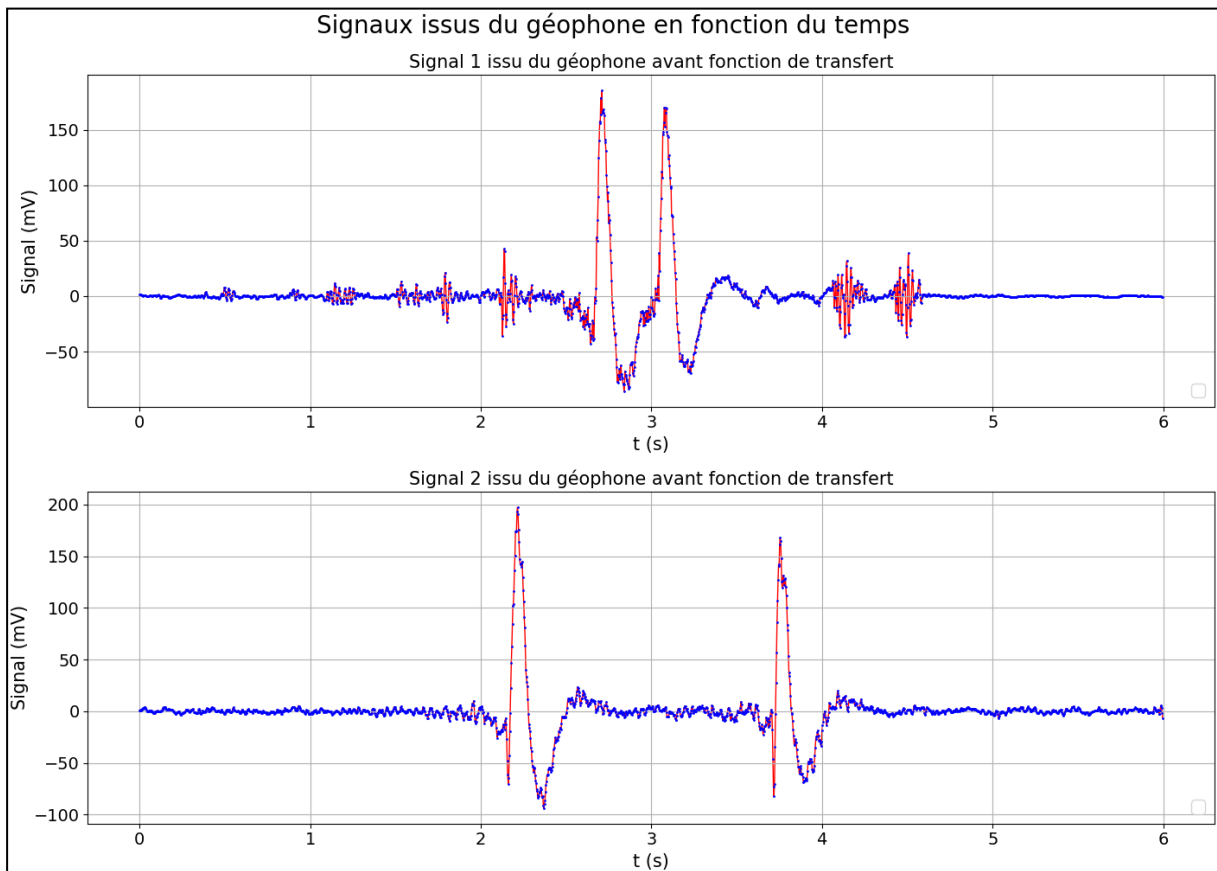
4.2.1 Signal délivré par le capteur

Le signal délivré par le géophone lors des deux passages du véhicule est présenté à la figure suivante. Le capteur délivre un signal en mV, il faudra par la suite lui appliquer un coefficient pour avoir la valeur en mm.s^{-1} .

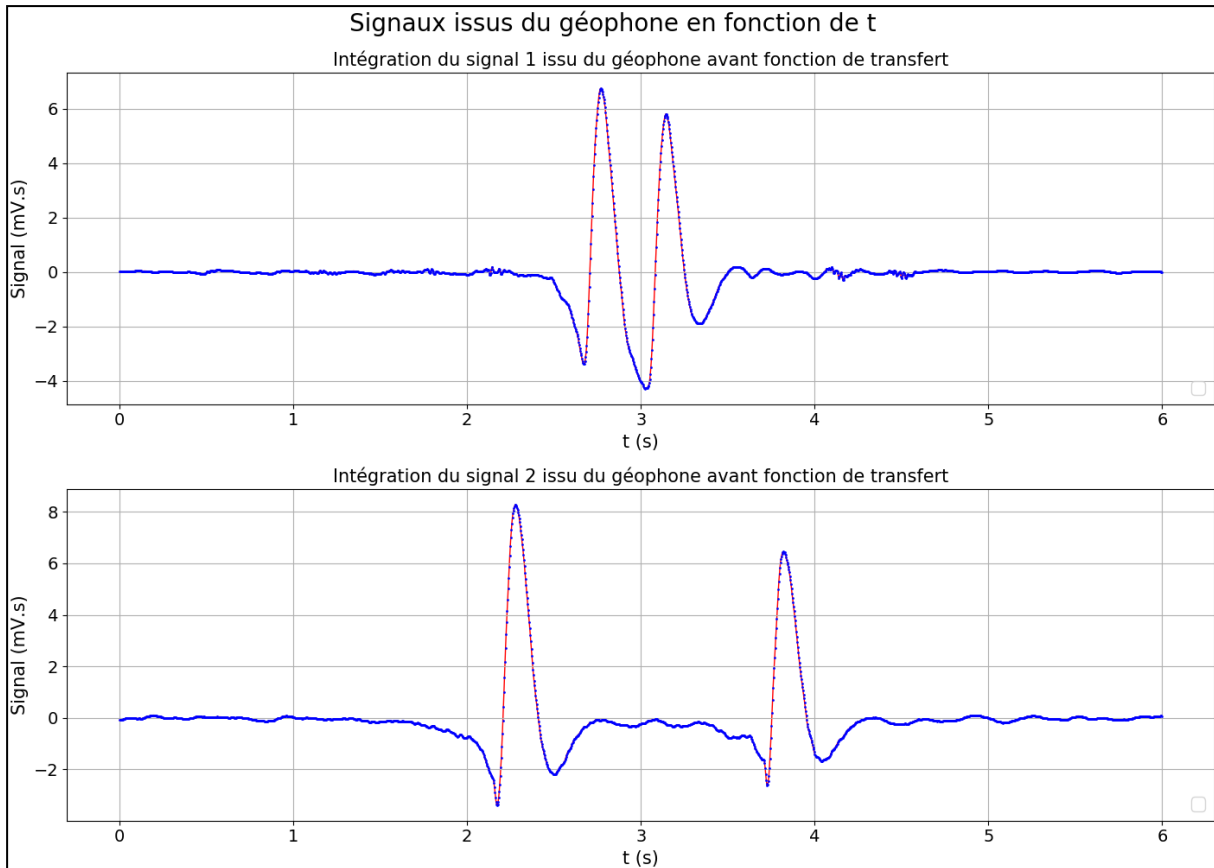


4.2.2 Sélection des signaux d'intérêt

On sélectionne les parties du signal correspondant aux deux passages en effectuant un fenêtrage. Les signaux obtenus sont présentés sur la figure suivante.

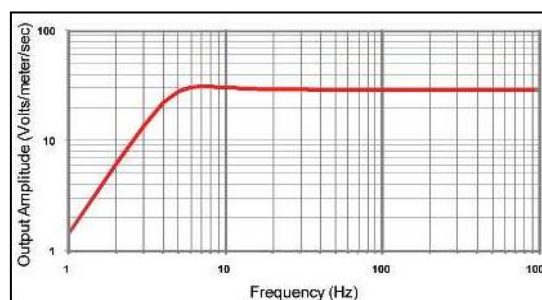


4.2.3 Intégration du signal



4.2.4 Filtrage effectué par le géophone

Le géophone fonctionne comme un filtre passe-haut, il amplifie les hautes fréquences et diminue les basses fréquences. Le gain de la fonction transfert caractéristique du géophone est donné sur la fiche technique et présenté à la figure suivante. Il convient alors de corriger le signal délivré par le géophone avant de pouvoir déterminer la déflexion.

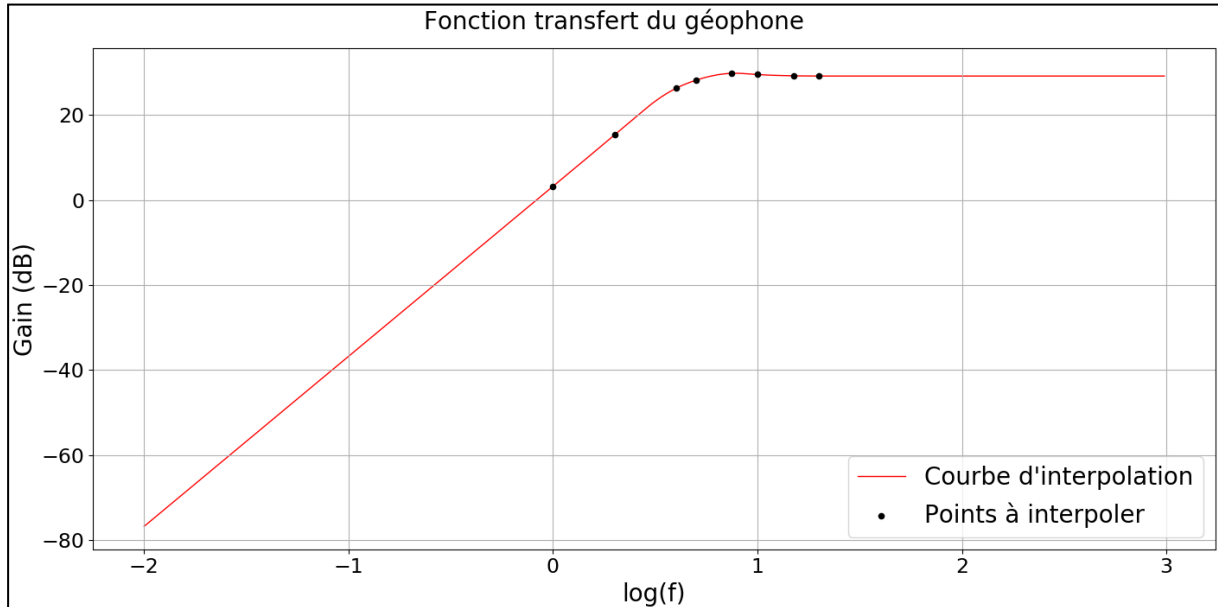


4.2.5 Construction de la fonction de correction du signal

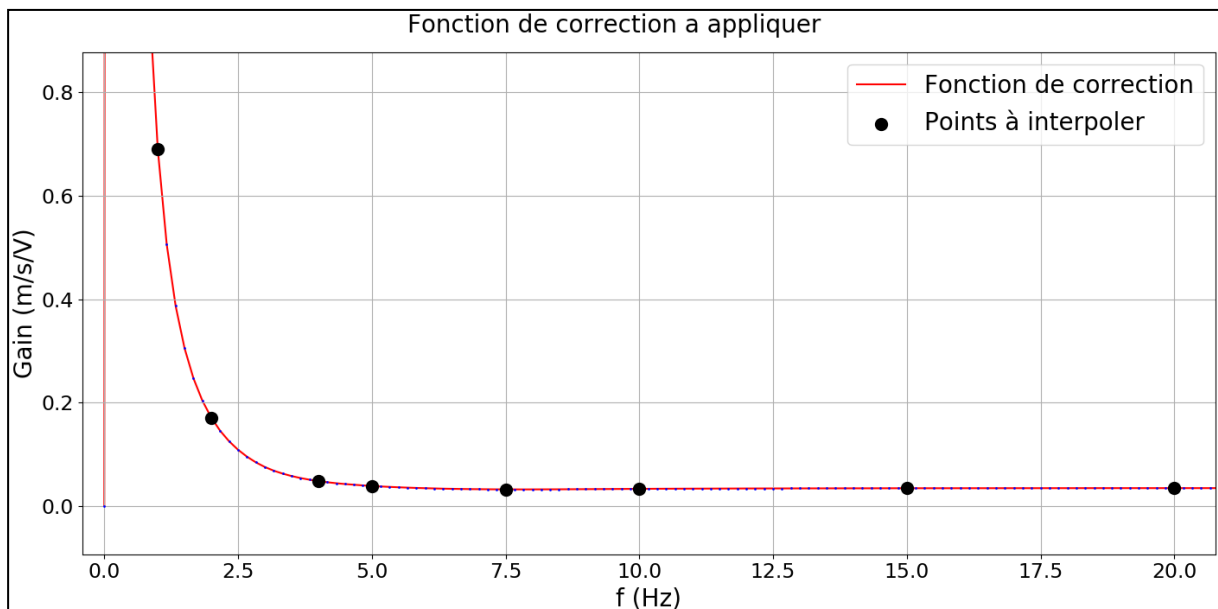
Le géophone fonctionne comme un filtre passe haut du second ordre, donc il faut effectuer à la fois une correction en gain et une correction en phase du signal.

4.2.5.1 Fonction de correction en gain

On reconstruit le diagramme de gain du géophone grâce à des points obtenu avec le diagramme de la fiche technique du géophone. Les points sont interpolés, ce qui permet de déduire le gain appliqué à chaque fréquence. Le diagramme de Bode en gain de la fonction de transfert est présenté à la figure suivante.



De cette fonction transfert on déduit la fonction de correction en gain, cette dernière est présentée à la figure suivante.



Il faut multiplier la transformée de Fourier du signal par la fonction de correction présentée à la figure précédente pour obtenir la transformée de Fourier du signal corrigé en gain.

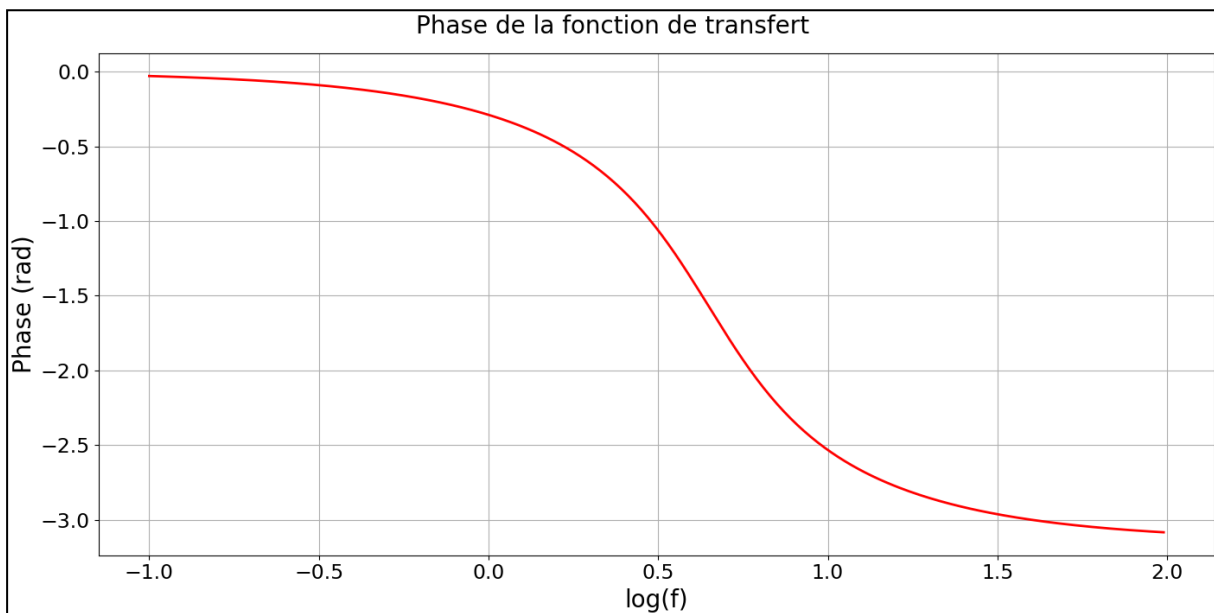
4.2.5.2 Fonction de correction en phase

Pour déduire la fonction de correction en phase du signal il faut d'abord connaître le diagramme de phase du signal. Celui-ci s'obtient en déterminant les coefficients de la formule de la fonction de transfert du géophone présentée ci-dessous.

$$H(f) = \frac{G_0 f^2}{-f^2 + 2jz f_0 f + f_0^2}$$

Avec f la fréquence, G_0 le gain, z le coefficient d'amortissement, f_0 la fréquence propre et j le nombre complexe tel que $j^2 = -1$.

La phase est obtenue en calculant la phase de la fonction transfert $H(f)$. Une fois les coefficients obtenus on peut donc tracer le diagramme de Bode en phase présenté à la figure suivante.



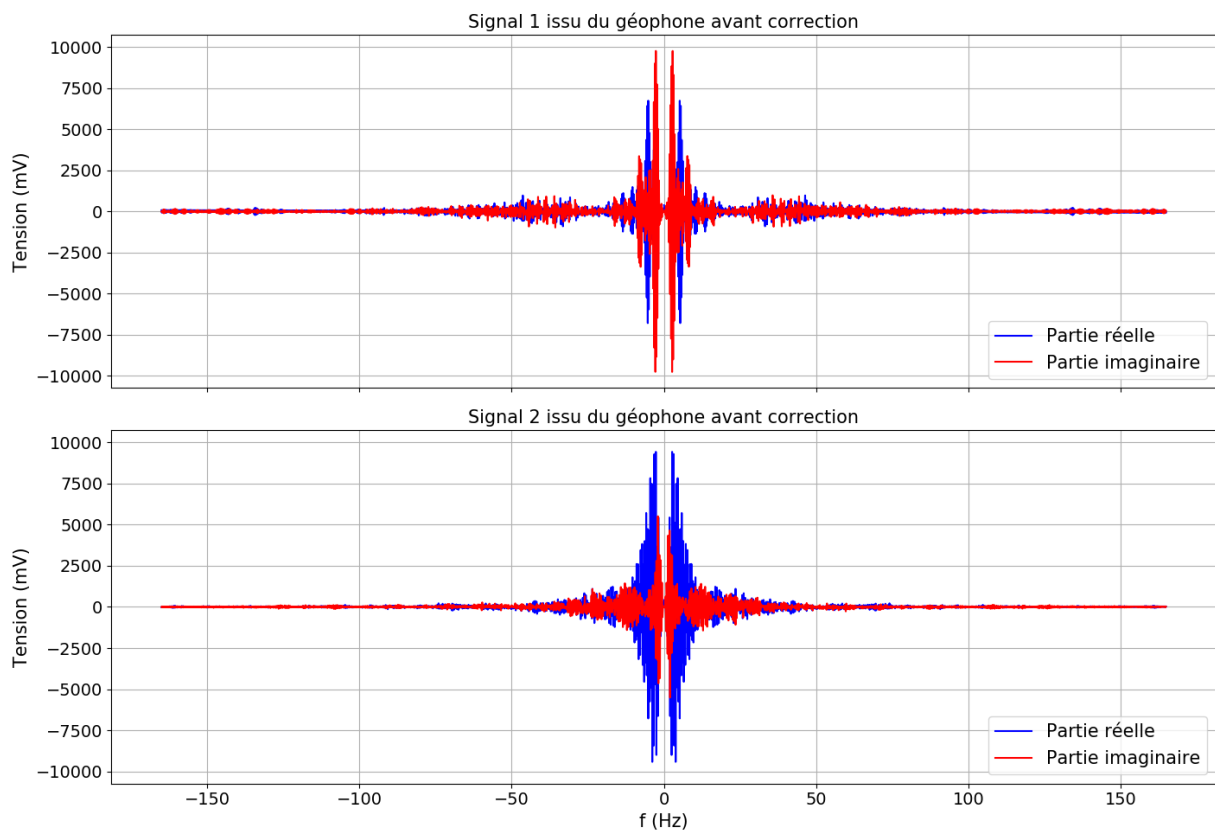
On corrige le signal en phase en multipliant sa transformée de Fourier par $\exp(-j\varphi(f))$ avec $\varphi(f)$ la phase de la fonction transfert en fonction de la fréquence.

4.2.6 Correction du signal du géophone

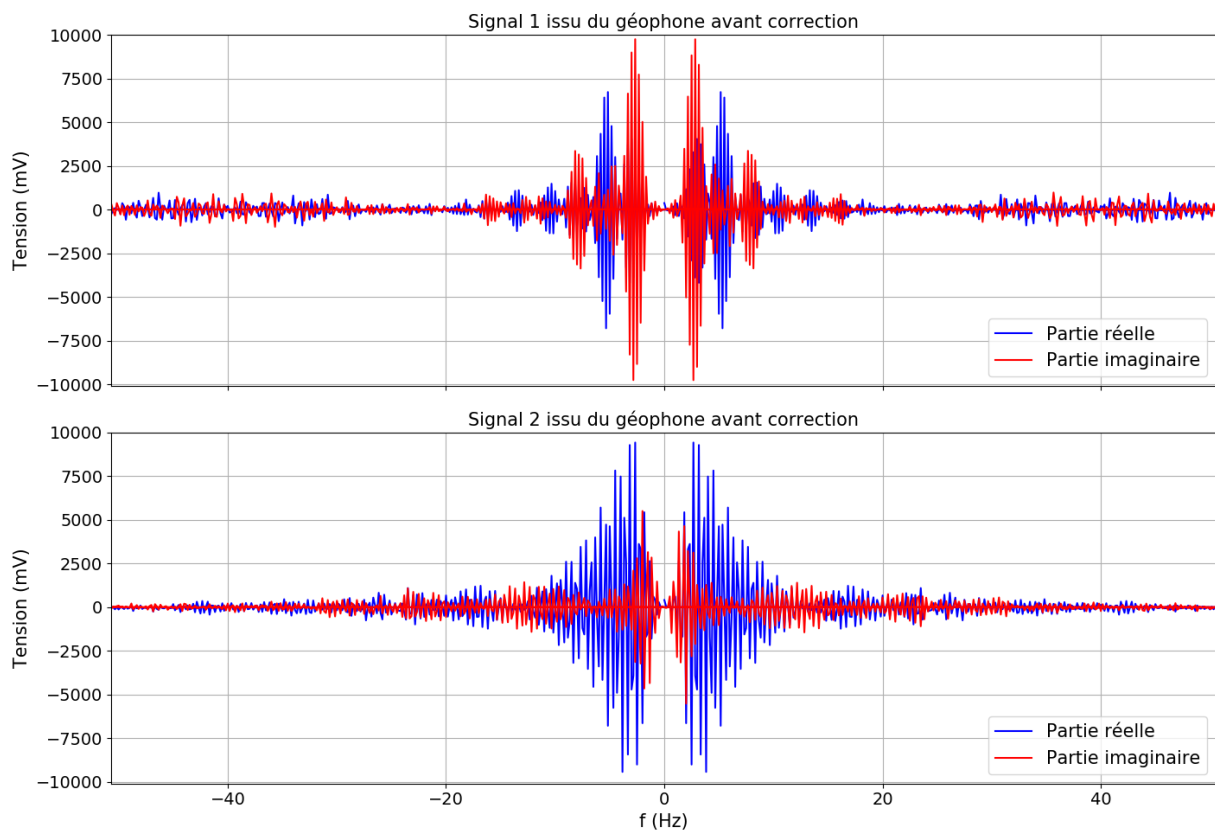
4.2.6.1 Transformée de Fourier du signal

Les transformées de Fourier des signaux issus du géophone sont présentées à la figure suivante.

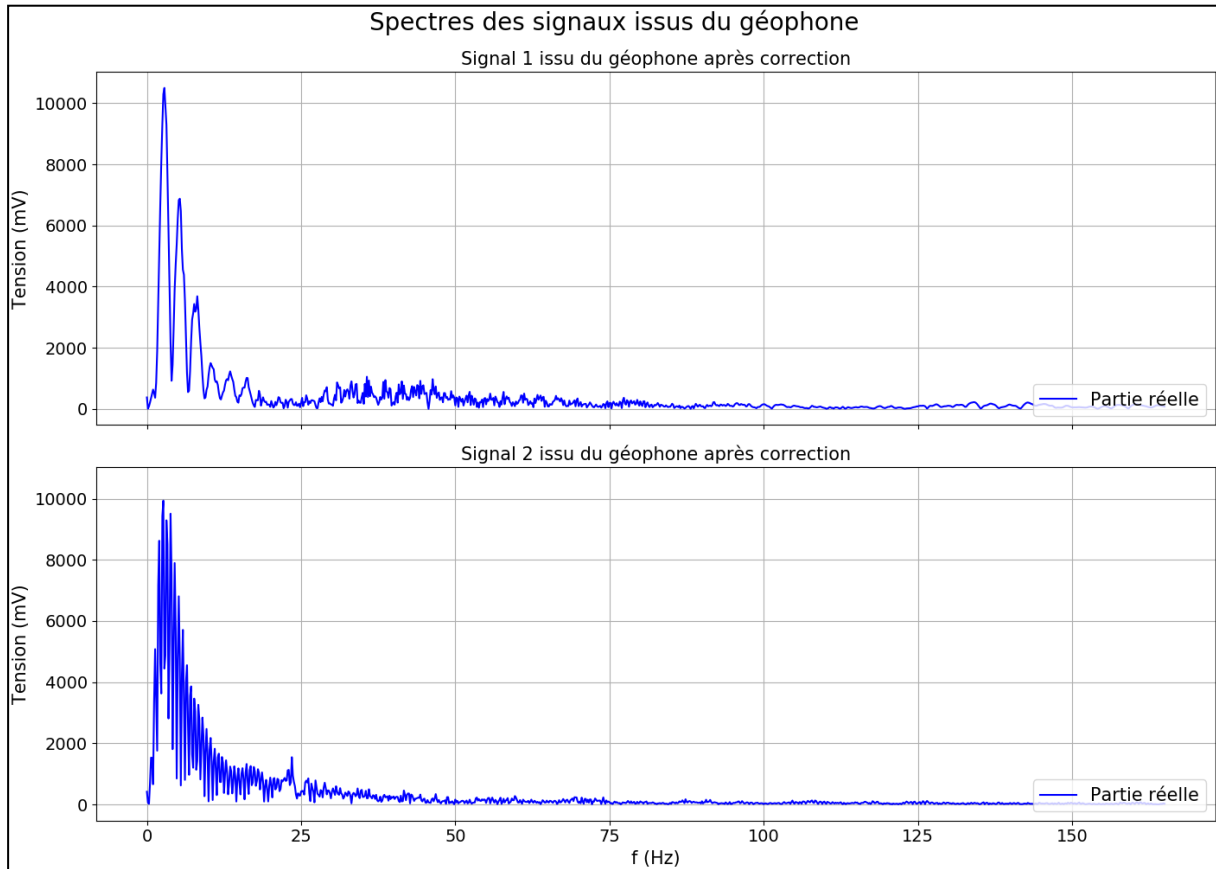
Transformées de Fourier des signaux issus du géophone

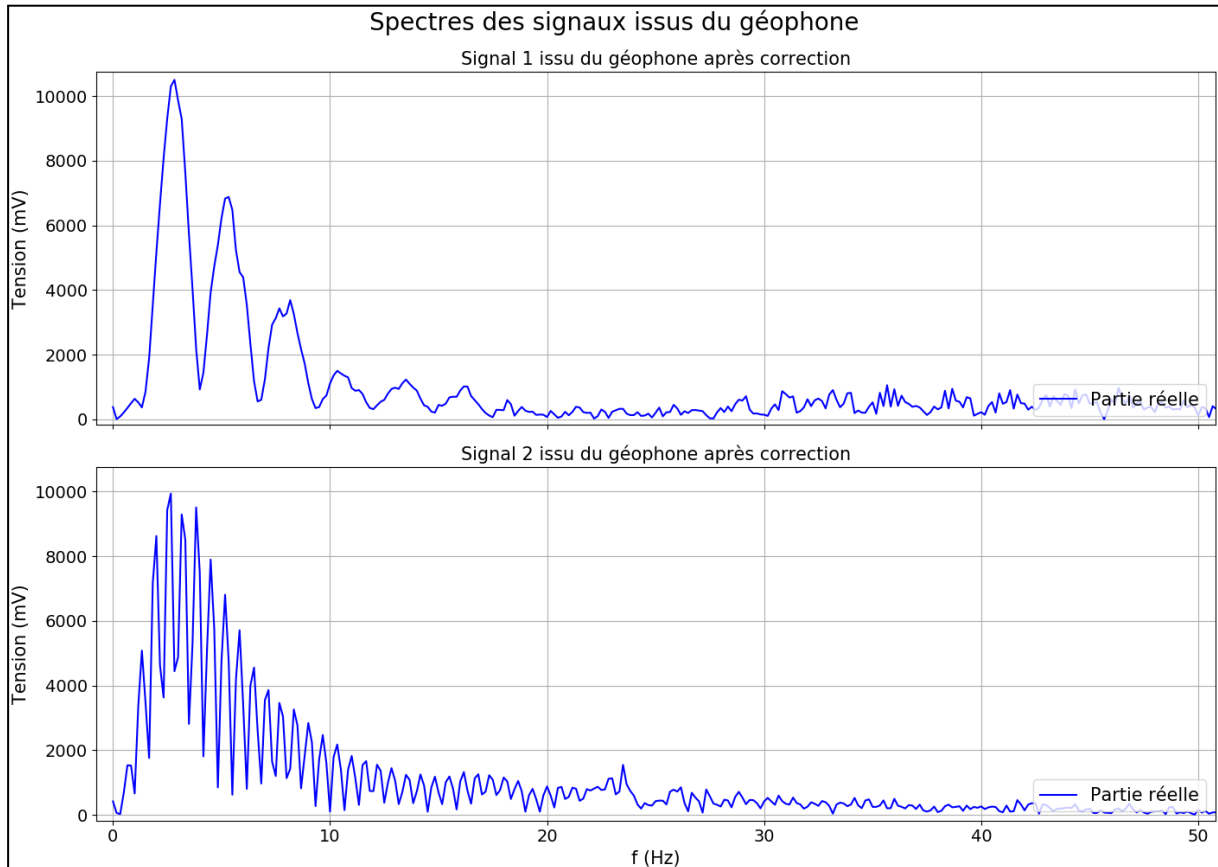


Transformées de Fourier des signaux issus du géophone



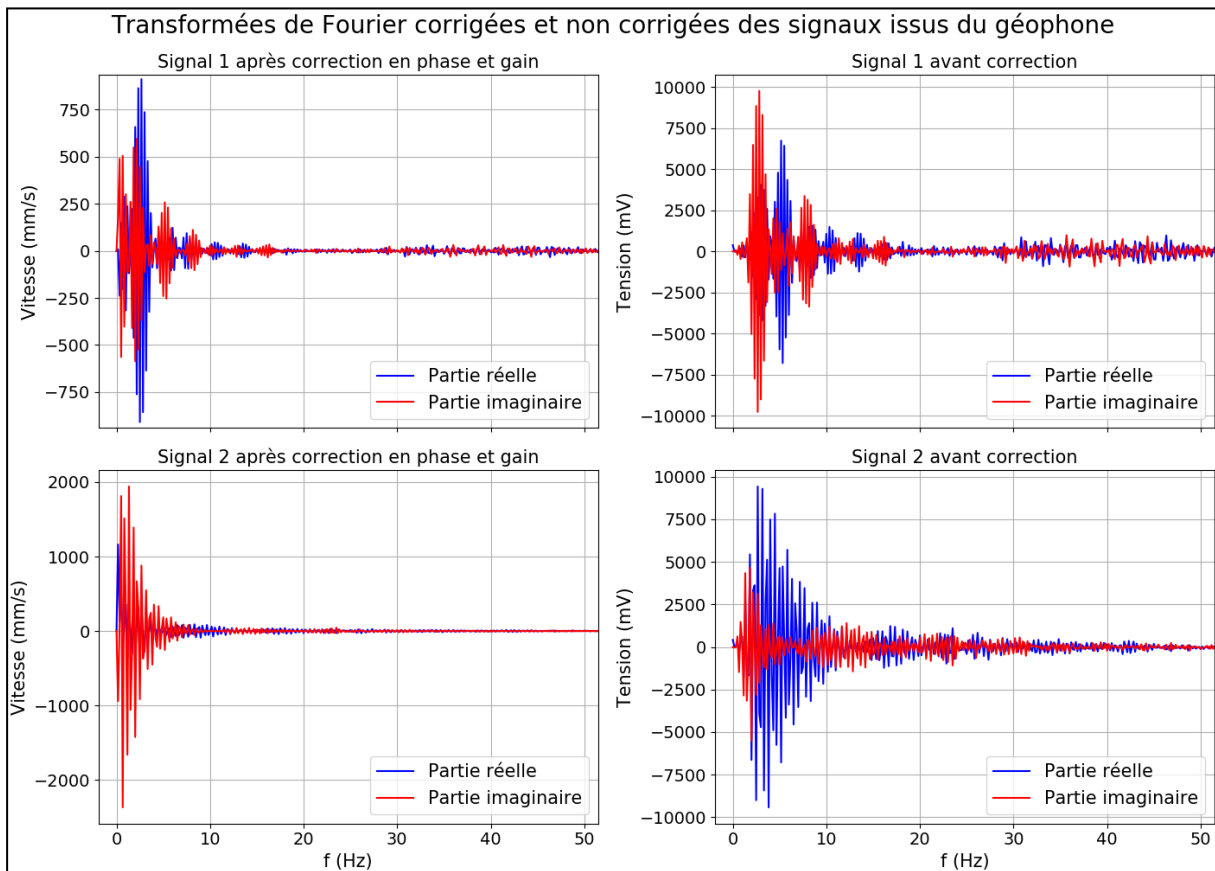
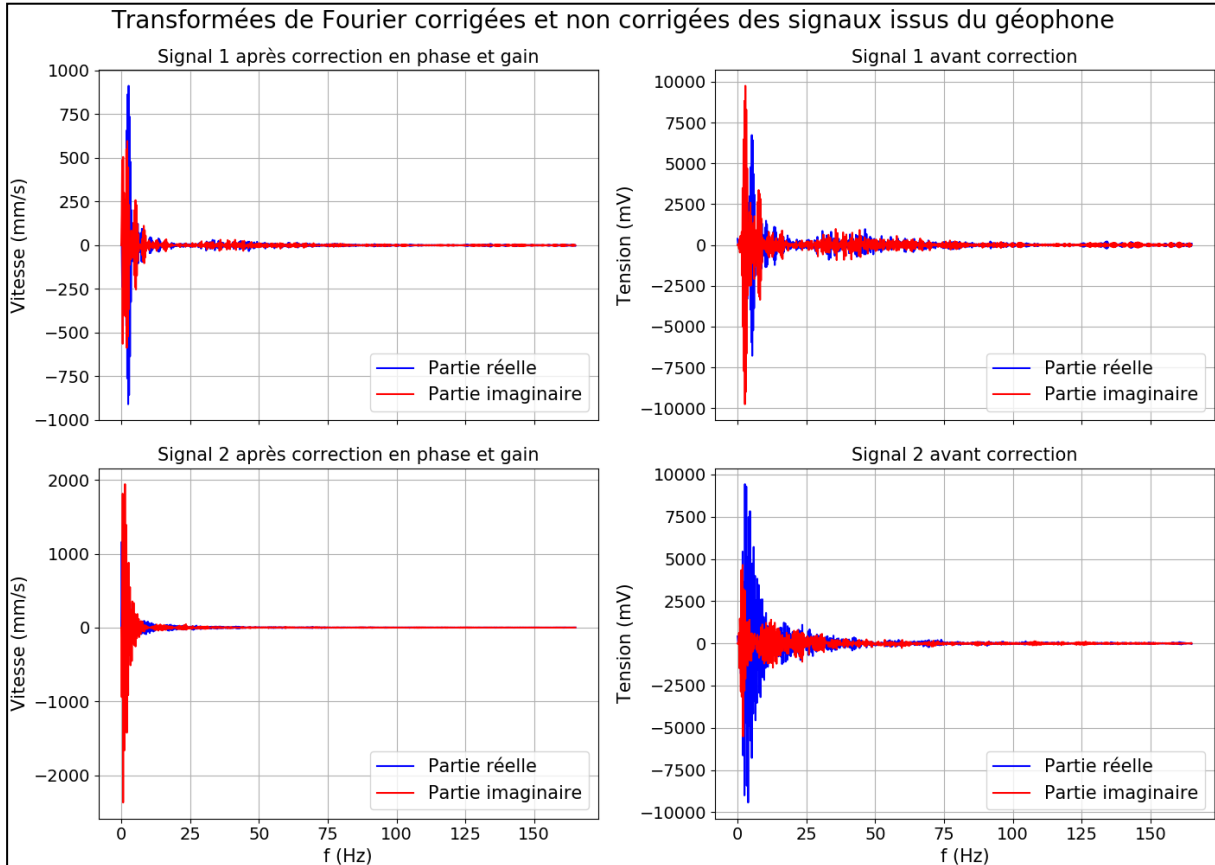
Les spectres des signaux issus du géophone sont présentés à la figure suivante.



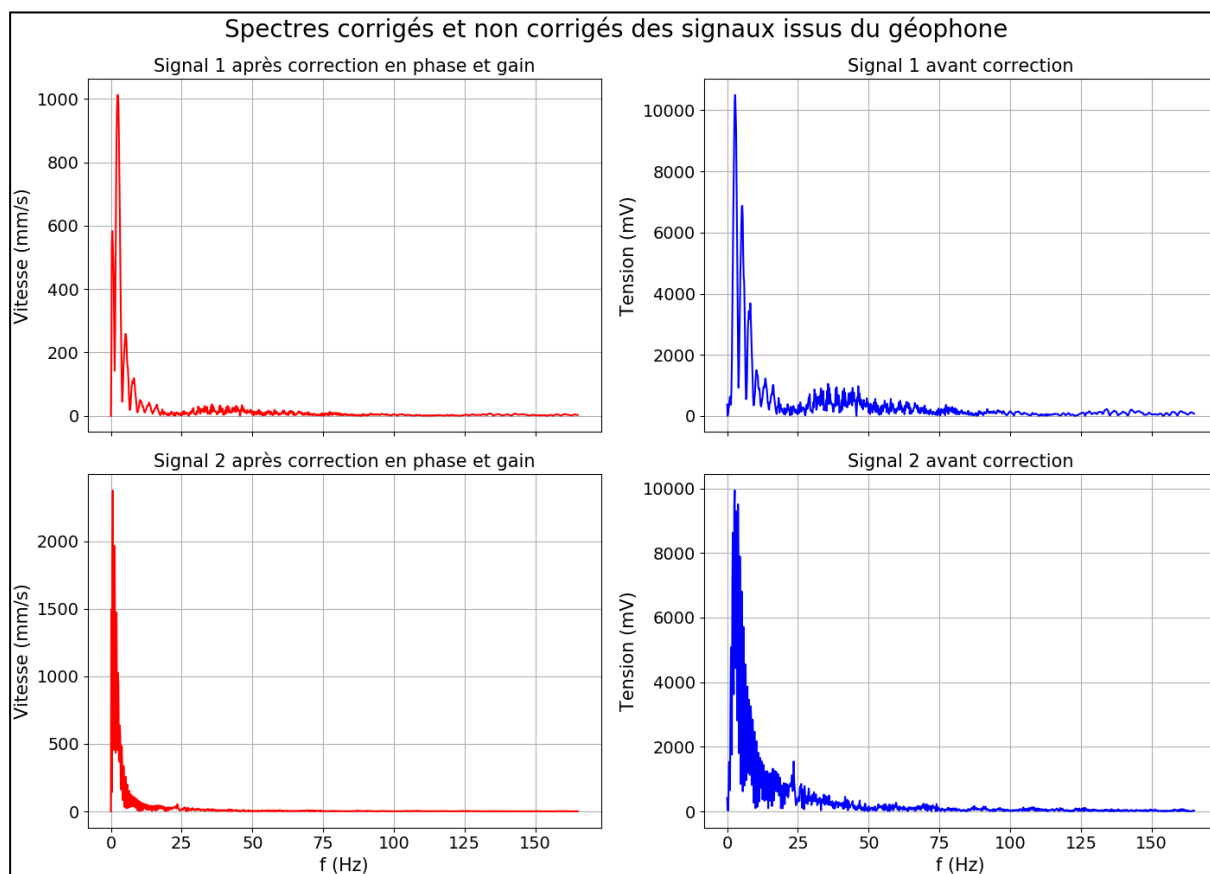


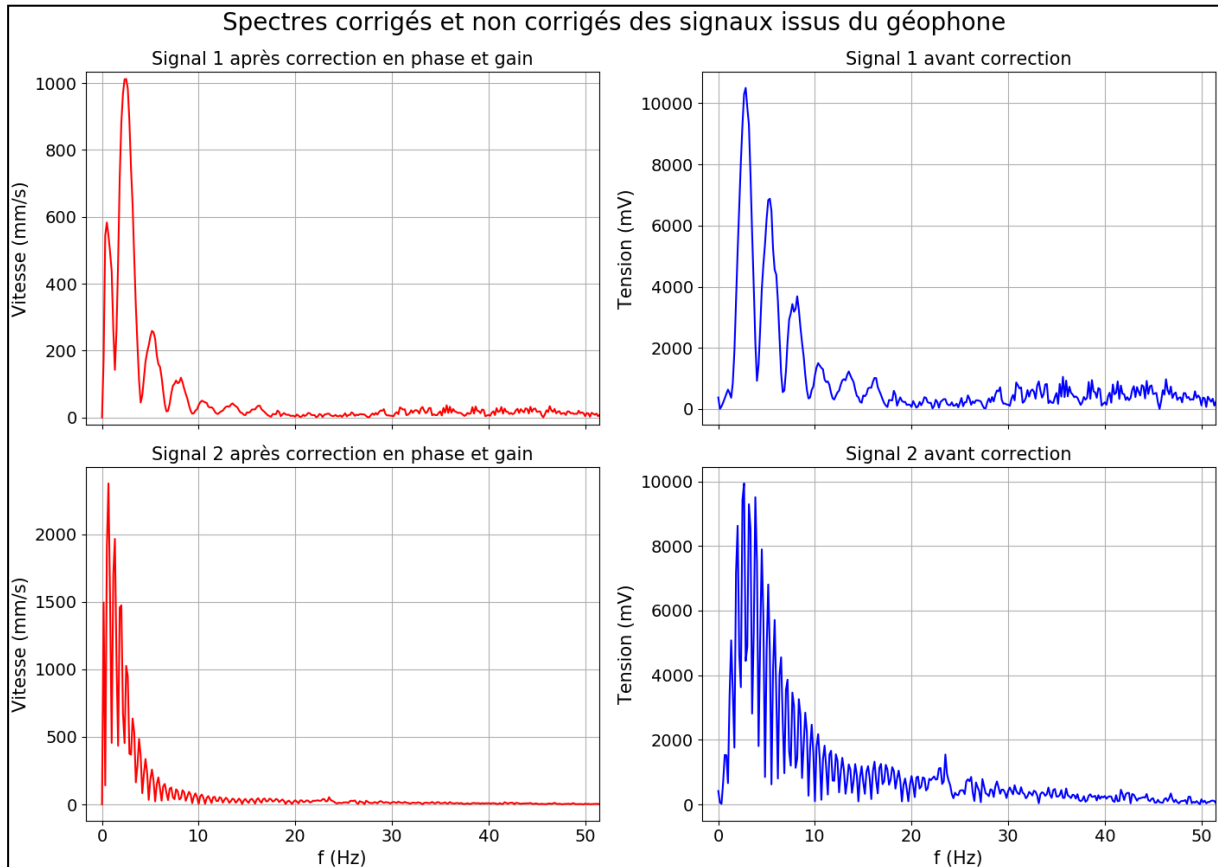
4.2.6.2 Correction des transformées de Fourier

En multipliant les transformées de Fourier des signaux par les fonctions de correction en phase et en gain on obtient les transformées de Fourier présentées sur les figures suivantes.



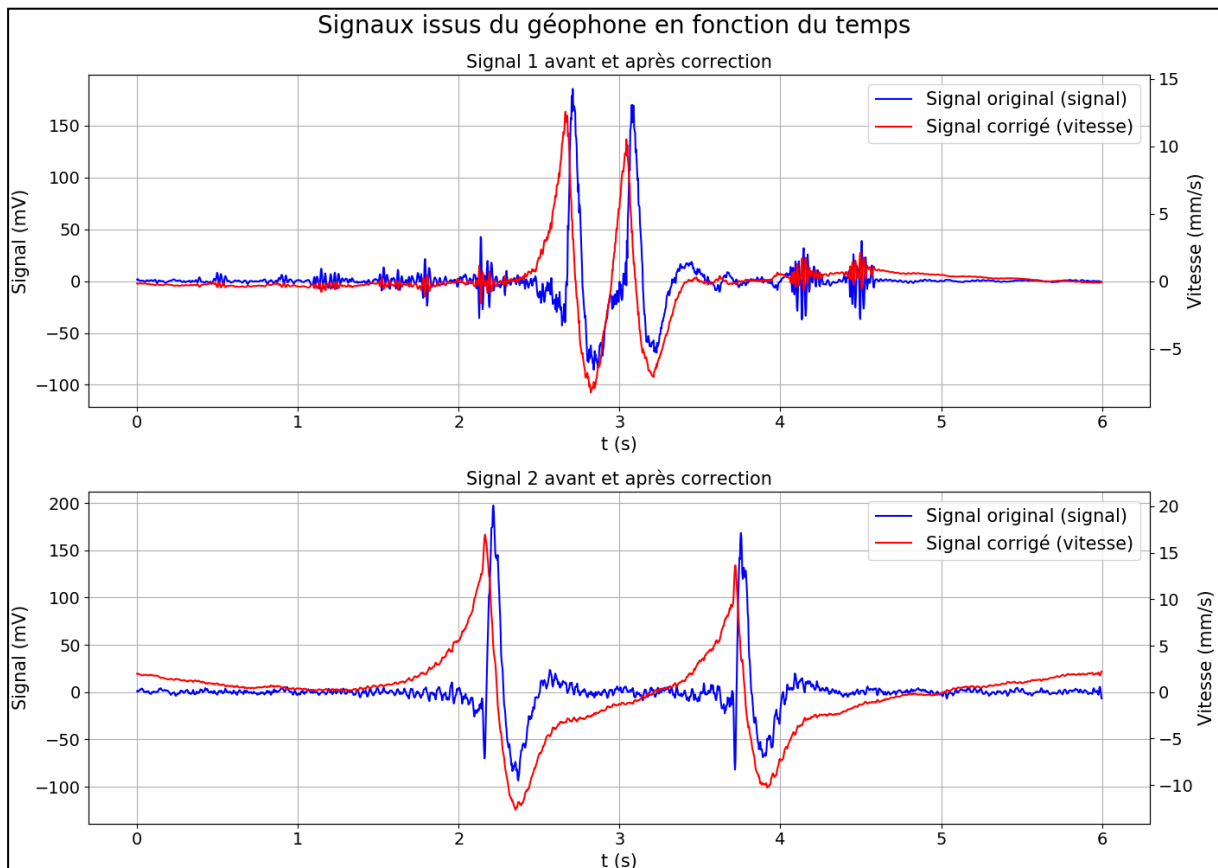
Les spectres sont présentés à sur les figures suivantes.





4.2.6.3 Transformée de Fourier inverse

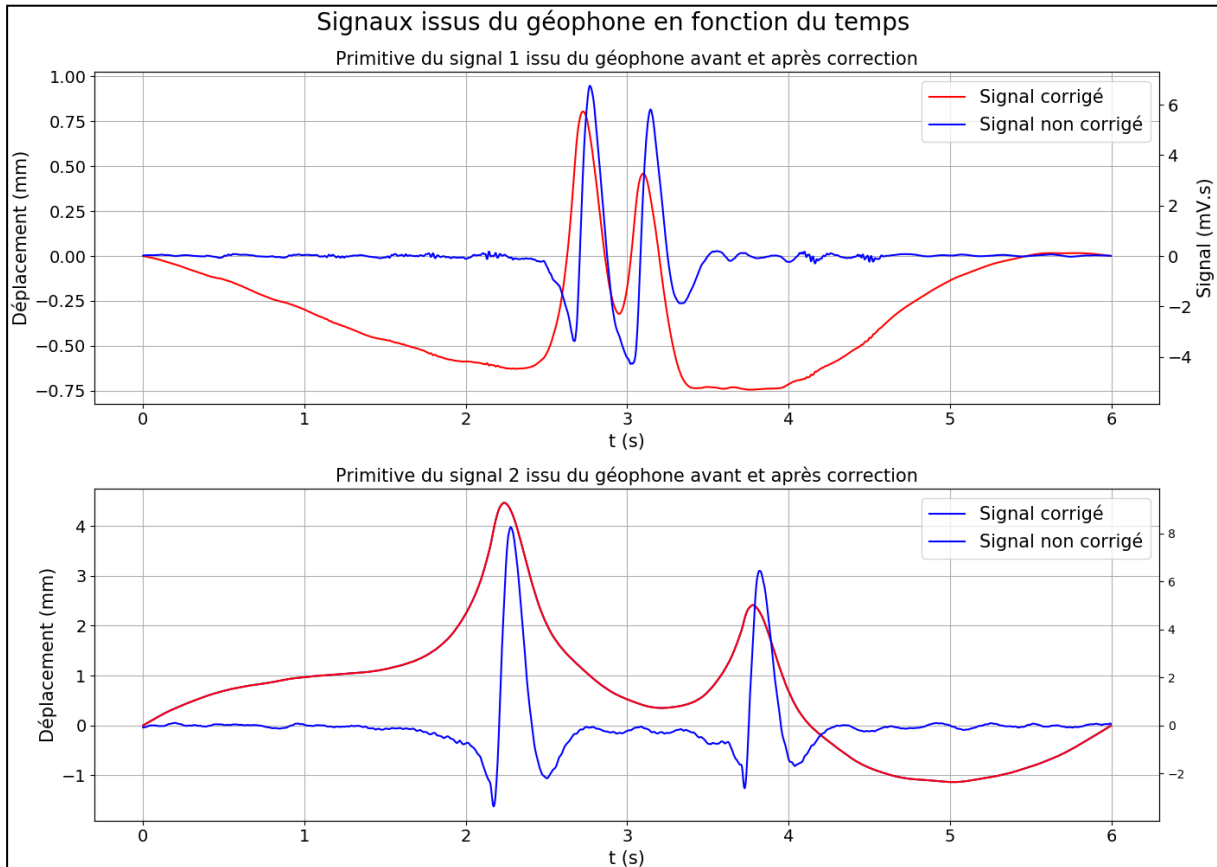
Une fois les corrections effectuées, les signaux corrigés sont obtenus en effectuant la transformée inverse des transformées de Fourier corrigées. Les signaux obtenus sont présentés à la figure suivante.



On remarque l'apparition de perturbations de très basse fréquence

4.2.6.4 Obtention du déplacement

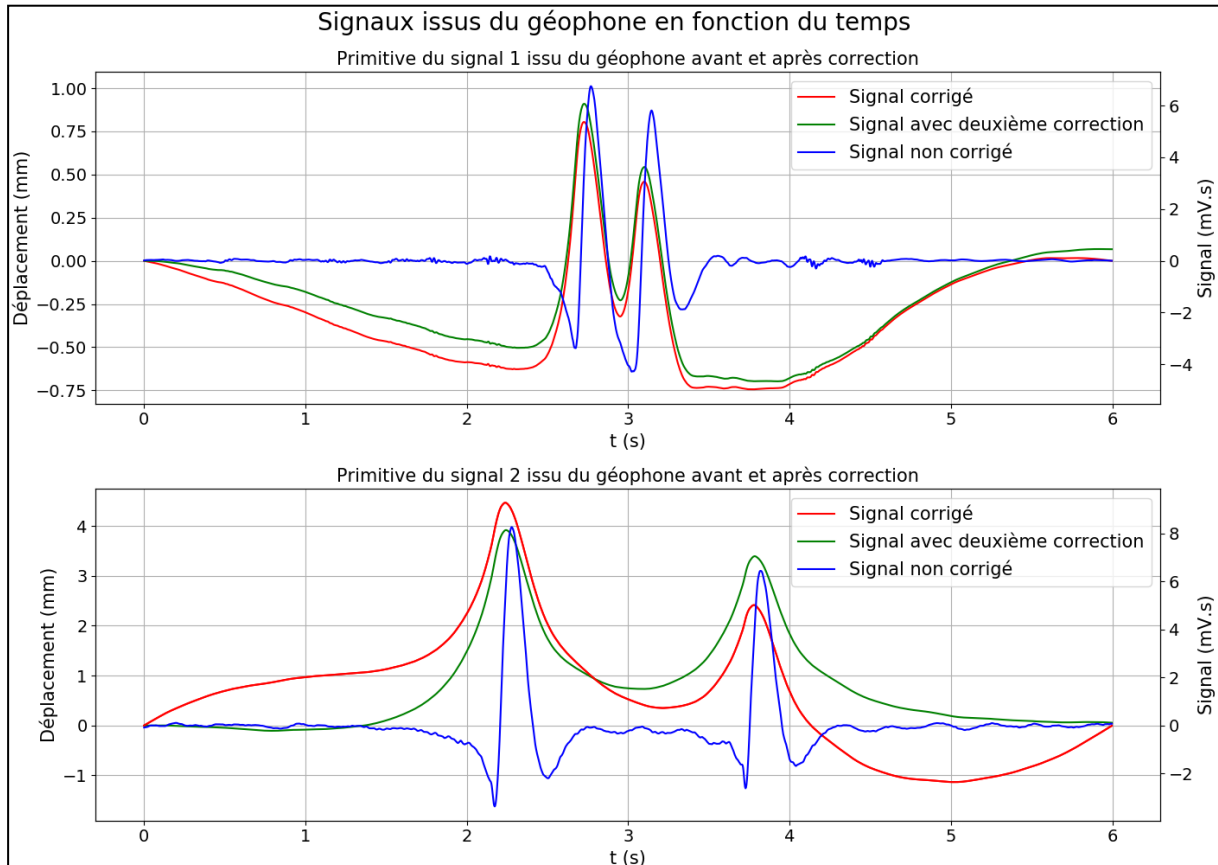
Le déplacement est obtenu en effectuant la primitive du signal corrigé. Les déplacements obtenus sont présentés à la figure suivante.



On remarque qu'il y a amplification des perturbations de basse fréquence lors de l'intégration. On peut tenter de corriger ces signaux et supprimer ces perturbations de deux manières :

- En utilisant une fréquence de coupure sur la fonction de correction et en considérant la fonction de correction comme étant nulle en dessous de cette fréquence de coupure.
- En passant par la dérivée du signal corrigé, supprimant la tendance de ce nouveau signal puis en effectuant une double intégration pour retrouver le déplacement.

Les signaux présentés sur la figure précédente sont obtenus avec une fréquence de coupure de 0 Hz. En appliquant la deuxième méthode de correction (en passant par l'accélération) on obtient les figures suivantes.



On observe que le signal après la deuxième correction décrit bien le phénomène de déflexion. Les prochaines étapes seront de calibrer le capteur en réalisant parallèlement une mesure au déflectomètre. Ces opérations seront réalisées directement sur site dans la suite du projet.

5 Impact

5.1 Apports et retombées pour la collectivité

La collectivité sera en mesure de se procurer un capteur tout en permettant le suivi de la durée de vie résiduelle du patrimoine routier. Ceci permettra de mieux anticiper les besoins de maintenance pour prolonger au maximum la durée de vie des chaussées tout en assurant un service de qualité.

5.2 Mise en évidence du caractère collaboratif et d'intérêt général

Le produit pourra être acheté et installé par l'ensemble des acteurs de la profession pour un meilleur suivi du comportement mécanique des structures de chaussée. Il pourra notamment servir d'instrumentation dans le cadre de suivi de structure innovante.

5.3 Publications et autres éléments de communication auxquels le projet et ses résultats ont donné lieu

Le produit a été présenté au congrès « SMARTI ETN – AUTOMATED TRANSPORT INFRASTRUCTURES » à Grenade le 30 septembre 2019

6 Perspectives ouvertes par le projet notamment en matière de recherche collaborative

Les perspectives ouvertes par le projet sont de permettre à la profession de disposer d'un outil permettant la connaissance de l'évolution des modules en fonction des différentes températures et états hydriques de la chaussée. En termes de recherche collaborative, cela peut être un outil dans le cadre de projet nationaux tel que DVDC (durée de vie des chaussées) pour mieux comprendre les différents phénomènes qui mènent à la ruine des matériaux de chaussée.

La prochaine étape de ce projet est de réaliser des essais en conditions réelles sous trafic à la fois pour valider la durabilité mais aussi la précision de la mesure in situ.

Pour ce faire nous sommes à la recherche de gestionnaires d'infrastructures souhaitant faire part à une expérimentation pour la mise en place des premiers prototypes.