



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*



PASSERELLE DU GRAND LARGE A DUNKERQUE

Etude du confort vibratoire

05/06/2024



SOMMAIRE

- 1/ La problématique
- 2/ Les essais de chargement dynamique
- 3/ Les tensions dans les haubans
- 4/ Les conclusions et recommandations



La problématique

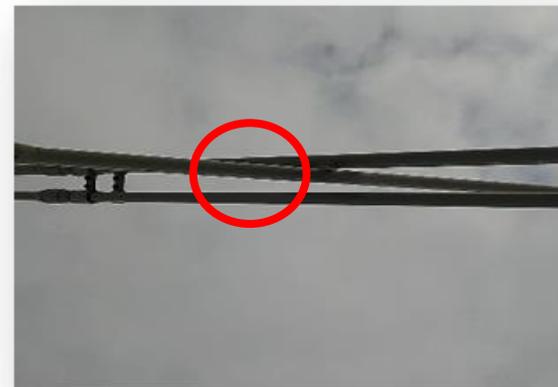




Inquiétude des usagers et du gestionnaire.

⇒ **Fermeture temporaire de la passerelle**

- La passerelle du Grand Large à Dunkerque, est l'une des plus longues de France (300 m).
- La passerelle a été inaugurée en 2015. Elle constitue un lieu de passage fortement fréquenté, avec la présence de la plage de Malo-les-Bains et ses nombreuses activités culturelles/sportives/touristiques en période estivale.
- Il n'a pas été fait état de problème vibratoire depuis l'ouverture de la passerelle du Grand Large, soit depuis quasiment 8 ans.
- **Le 24 juin 2023, pendant le festival « La Bonne Aventure », des mouvements inhabituels ainsi que des bruits « sourds » et répétés ont été constatés par les usagers de la passerelle.**
- Après sa fermeture à la circulation, une inspection visuelle de la passerelle a été menée dans les jours qui ont suivi sans montrer de désordres de la structure. La charge dynamique a été mise en cause. Le mouvement de torsion de la passerelle semble être également responsable du bruit « sourd ». Les haubans se croisent et peuvent effectivement se toucher en cas de forte torsion.
- Les remontés d'inquiétudes des usagers, ont pris de l'ampleur à travers les médias et les réseaux sociaux.



Guide méthodologique SETRA/Cerema de 2006 -Passerelles piétonnes, évaluation du comportement vibratoire sous l'action de piétons-



Accélération	0	0,5	1	2,5
Plage 1	Max			
Plage 2		Moyen		
Plage 3			Min	
Plage 4				

Tableau 2.1 : plages d'accélération (en m/s^2) pour les vibrations verticales

Accélération	0	0,10	0,15	0,3	0,8
Plage 1	Max				
Plage 2			Moyen		
Plage 3				Min	
Plage 4					

Tableau 2.2 : plages d'accélération (en m/s^2) pour les vibrations horizontales - L'accélération est limitée dans tous les cas à $0,10 m/s^2$ pour éviter la synchronisation forcée

Les plages indiquées correspondent aux critères de confort suivants :

[1] : confort maximal

[2] : confort moyen

[3] : confort minimal

[4] : inconfort, niveaux d'accélération inacceptables

Etude en amont (Société Mauer)

- Accélération verticale $> 0,7 m/s^2$
- Accélération horizontale $> 0,2 m/s^2$



Pose de 6 amortisseurs à masse accordée (AMA)



Des essais de chargement dynamique à la réception ont validé la prescription

Type d'amortisseur	Domaine d'utilisation	Avantages	Inconvénients	Type d'amortisseur
Visco-élastiques	Très peu utilisé	Amortit plusieurs modes	Nécessite un montage qui travaille en cisaillement	Visco-élastiques
Visqueux à pot ou à parois	Peu utilisé	Amortit plusieurs modes	Sensible à la température, calcul non linéaire	Visqueux à pot ou à parois
Visqueux à orifices	Peu utilisé	Indépendant de la température, amortit plusieurs modes	Calcul non linéaire	Visqueux à orifices
Dynamiques accordés	Très utilisé	Facile à dimensionner	Masse additionnelle à considérer, amortit un mode donné, nécessite un réglage en fréquence	Dynamiques accordés
Dynamiques accordés fluides	Très peu utilisé		« Innovant », masse additionnelle à considérer, amortir un mode donné, nécessite un réglage en fréquence	Dynamiques accordés fluides

Les amortisseurs dynamiques accordés (ADA) sont constitués d'une masse reliée à la structure par un ressort et par un amortisseur en parallèle. Ils permettent de diminuer dans des proportions importantes les vibrations d'une structure pour un mode de vibration donné.



Exemples d'amortisseurs visqueux



Exemples d'ADA (ou AMA)

Les essais de chargement dynamique



Les cas de chargement

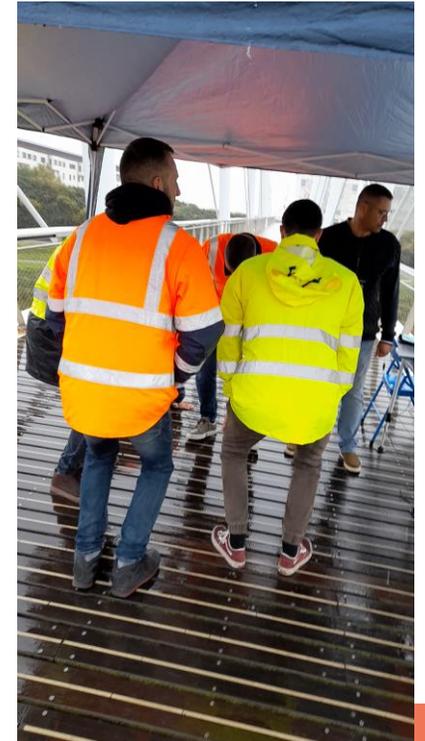
(On est à Dunkerque : mini bande et tambour-major)



Utilisation d'un
tambour-major
métronome pour
maîtriser les
fréquences
recherchées

Essais :

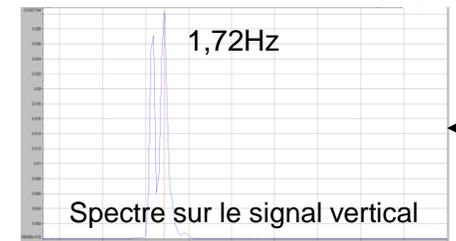
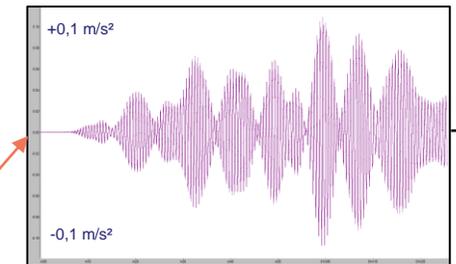
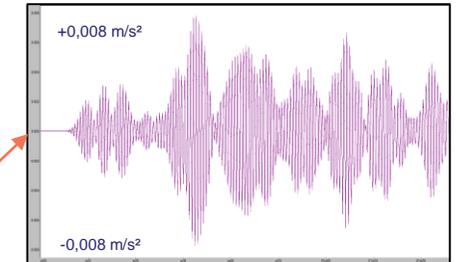
- Marche sur la passerelle
- Vandalisme



Essais : Marche sur la passerelle (3 Aller-retour par essai)

Comparaison avec les essais à la réception de 2015 (mesures à L/2)

Essai n°	Fréquence recherchée (Hz)	Fréquence constatée (Hz) H / V	Nombre de personnes	Fréquences de coupure (Hz)	Accélération horizontale maximale (m/s ²)		Accélération verticale maximale (m/s ²)	
					2015	2023	2015	2023
1	0,71	0,73 / 0,73	5	0,10 et 1,15	0,072	0,031	0,020	0,030
3	1,22	/	5	0,75 et 1,45	0,045	0,007	0,011	0,006
5	1,48	1,48 / 1,58	4	1,25 et 1,65	0,032	0,046	0,047	0,109
7	1,70	1,72 / 1,72	5	1,55 et 2,00	0,009	0,008	0,078	0,102



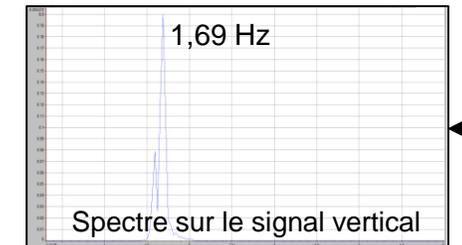
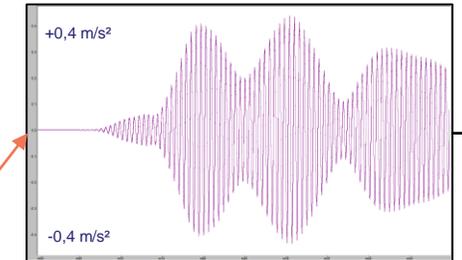
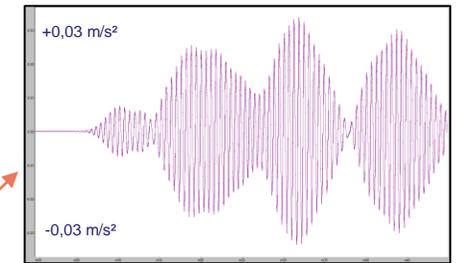
L'essai 3 (jambes tendues au double de la fréquence de 1,22 Hz) : *respect mitigé de la consigne*

Les essais 5 et 7 montrent des amplitudes vibratoires plus importantes qu'en 2015 sur l'axe vertical. Ces amplitudes respectent toutefois la limite de confort de 0.5 m/s²

Essais : Cas de vandalisme (généuflexion au droit du point de mesure)

Comparaison avec les essais de 2015 (mesures à L/2)

Identifia tion Essai (Rapport Maurer)	Fréquence recherchée (Hz)	Fréquence constatée (Hz) H / V	Nombre de personnes	Fréquences de coupure (Hz)	Accélération horizontale maximale (m/s ²)		Accélération verticale maximale (m/s ²)	
					2015	2023	2015	2023
2	0,71	0,69 / 0,72	4	0,10 et 1,15	0,014	0,011	0,028	0,038
4	1,22	1,25 et 1,47 / 1,44	5	0,75 et 1,45	0,006	0,010	0,005	0,014
6	1,48	1,47 / 1,47 et 1,56	4	1,25 et 1,65	0,024	0,128	0,250	0,268
8	1,70	1,62 et 1,69 / 1,60 et 1,69	5	1,55 et 2,00	0,010	0,039	0,089	0,512



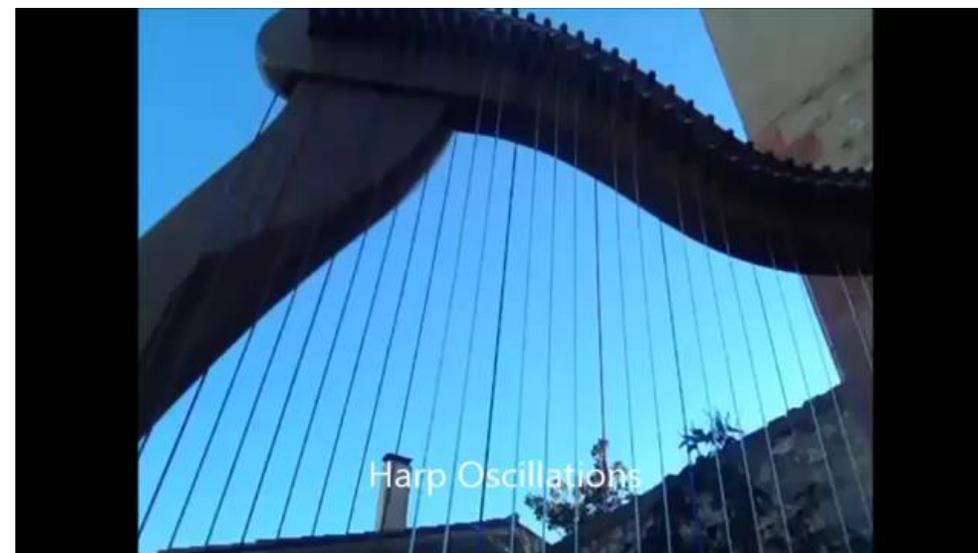
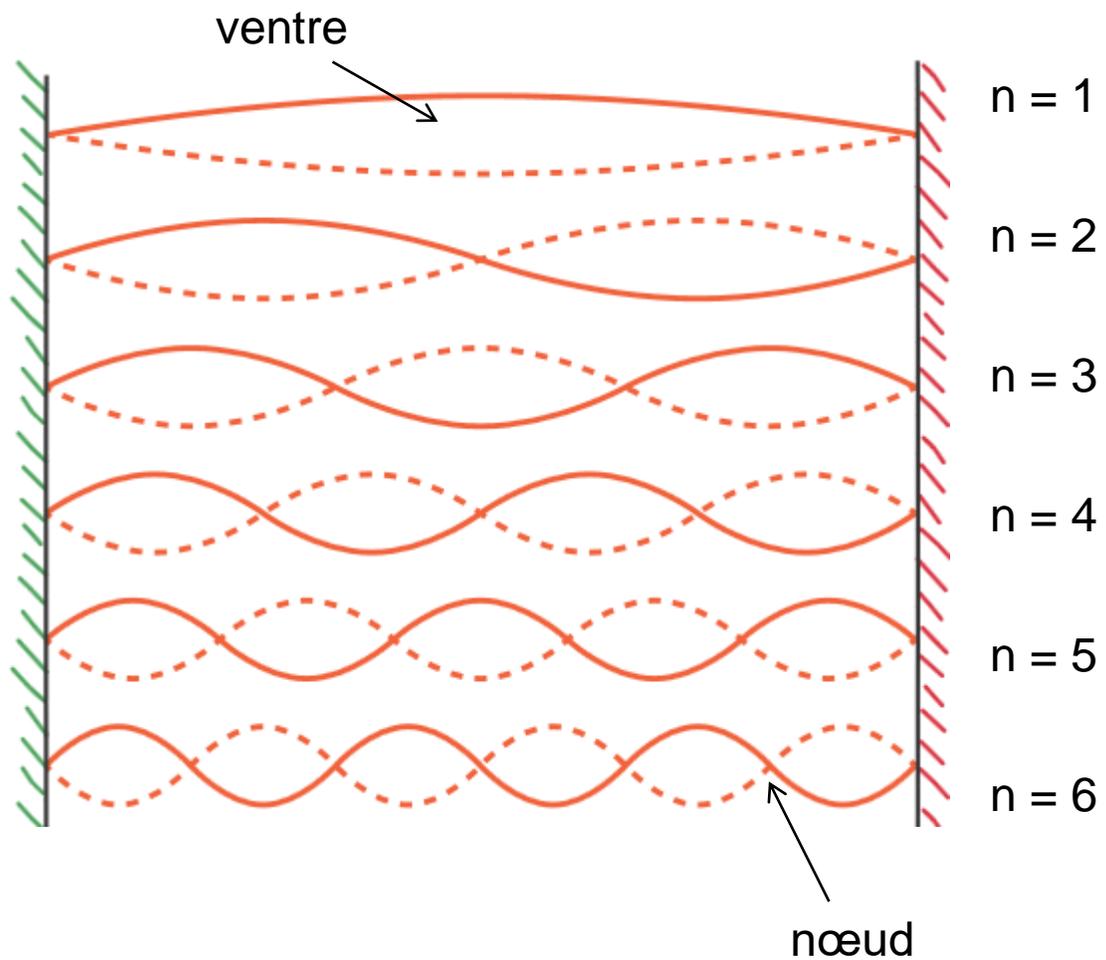
Les mesures de l'essai 8, affichent des niveaux vibratoires (axe vertical) bien supérieurs à ceux mesurés en 2015. Ils dépassent légèrement le seuil de confort de 0,5 m/s² du guide Setra/Cerema. Le coefficient diviseur, avec et sans AMA, étaient de l'ordre de 10 en 2015, il n'est plus que de 2 en 2023.

Bien que les niveaux de vibrations soient supérieurs pour les cas de chargement 4, 6 et 8 ; les AMA horizontaux semblent jouer encore leur rôle en termes de confort, ce qui n'est plus le cas pour les AMA verticaux.

Les tensions dans les haubans



Choix d'implantation du capteur



Méthode d'essai LPC n°35 et fiche C4-2 UGE-Cerema de 2015

L'objet de la méthode est de déterminer la tension des câbles utilisés dans les ouvrages d'art : précontrainte extérieure, pont à haubans et pont suspendu.

La fréquence de vibration d'un câble est liée à sa tension : assimilation à une corde vibrante (similitude avec une corde de guitare).

- En mode corde : $f_n = \frac{n}{2 * l} \times \sqrt{\frac{T}{\mu}}$ ou encore $T = 4 * l^2 * f^2 * \mu$ (pour $n = 1$)

- En mode barre tendue : $f_n = \frac{n}{2 * l} * \sqrt{\frac{T}{\mu}} * [1 + 2 * R + (4 + \frac{n^2 * \pi^2}{2}) * R^2]$ avec $R = \sqrt{\frac{E * I}{T * l^2}}$

- Avec :
- n, l'ordre du mode de vibration
 - μ, la masse linéique (en kg/m)
 - T, la tension (en Newtons)
 - l, la longueur (en m)
 - f, la fréquence (en m)



Système d'accroche haut et bas (impact sur la longueur libre)

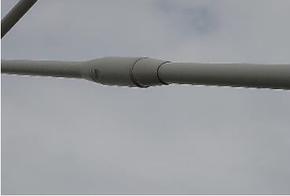
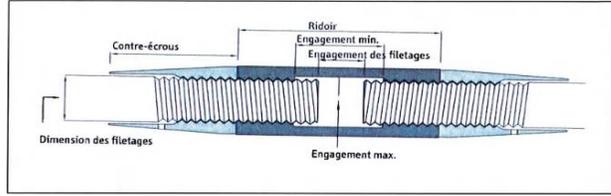
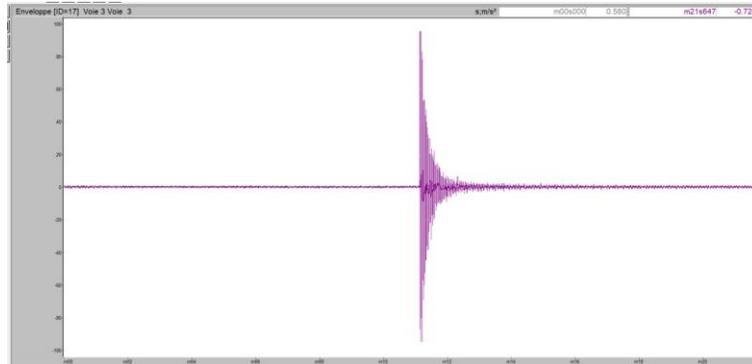


Schéma de principe et photo d'un ridoir de la passerelle (réglage des longueurs de câble)

Recherche des modes de vibration

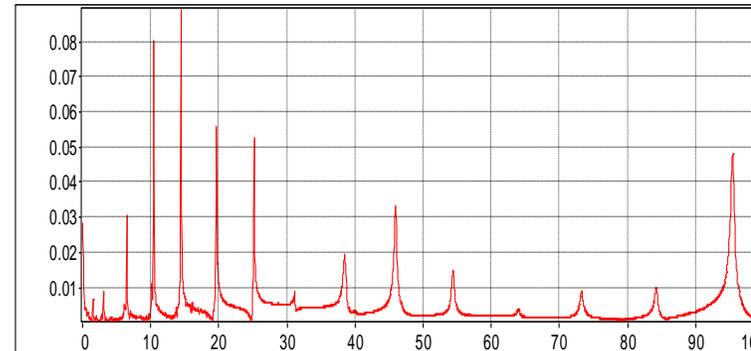
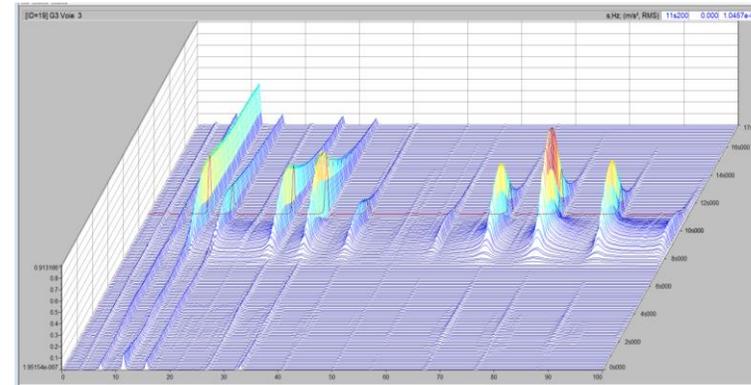
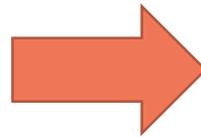
Signal temporel enregistré :

- Mesures en accélération (faible encombrement de l'accéléromètre)
- Dirac avec un marteau
- Choc dans le plan de l'axe de mesure



Evolution temporelle

Le capteur n'a pas été déplacé, limitant la recherche des modes de vibrations (questions de temps, d'accès et de coûts)



*Traitement du signal (passe-bande) /
visualisation du spectre temps/fréquence et
du spectre en bandes fines*

Exploitations (comparaisons du mode calcul corde / barre et tension initiale en kN)

Modèle de calcul « barre encastrée tendue » si non linéarité des 7 premiers modes de vibration

Faible
longueur du
hauban N9

Hauban	T en kN (mode corde)	T en kN (mode barre)	T en kN (modèle de base)
S10	638	455	710
S9	649	480	746
N10	646	480	708
N8	565	405	641
N9	740	550	336
S8	404	235	400
N11	535	370	488
S11	512	367	535

Hauban	T en kN (mode corde)	T en kN (mode barre)	T en kN (modèle de base)
S4	551	417	545
N4	542	423	548
S2	558	458	647
S16	542	450	608
N2	601	510	699
N16	585	500	634

Interprétations

Les limites de l'évaluation :

- Impossibilité d'implanter l'accéléromètre à $L/2$,
- Détermination de la linéarité des 7 premiers modes de vibrations (incertitudes sur l'évaluation des tensions plus importantes),
- Choix du mode de calcul corde ou barre tendue,
- Longueurs libres en mouvement (non accès aux ancrages en partie haute),
- Liaisonnement des barres pour les haubans les plus longs.

Les mesures montrent une bonne cohérence des tensions estimées par le **modèle corde** par rapport au tensions retrouvées dans les documents fournis par la Communauté Urbaine de Dunkerque (**Tension modèle de base**).

Les mesures du Cerema donnent des valeurs comprises entre 404 kN et 649 kN à comparer aux tensions du modèle de base comprises entre 336 et 746 kN. Les écarts restent inférieurs à 15%.

La répartition des tensions ne montre pas de déséquilibres sérieux.

Conclusions et recommandations



Essais de chargements dynamiques :

Efficacité moindre des AMA (attention pour 2015 : méconnaissance du matériel de mesures utilisé, de la source d'excitation de la passerelle et des conditions météorologiques)

Ces baisses de performance des AMA se retrouvent principalement pour le sens vertical

Les essais de vandalisme à 1,70 Hz, affichent des niveaux vibratoires (axe vertical) bien supérieurs à ceux mesurés en 2015. Ils dépassent très légèrement le seuil de confort de 0,5 m/s² repris du guide Setra/Cerema.

Tensions des barres de haubans :

Les mesures montrent une bonne cohérence des tensions estimées. Les écarts restent inférieurs à 15%. La répartition des tensions ne montre pas de déséquilibres sérieux (hors cas du hauban N9).

Recommandations :

Le Cerema a recommandé (en accord avec son service OA) de :

« vérifier les AMA et de procéder à leur nettoyage. Suite à ce contrôle, il conviendra de re-tester ces amortisseurs voire de procéder à un suivi dans le temps.

De plus, la mise en place généralisée d'écarteurs en téflon entre les barres de haubans, permettrait d'éviter les chocs entre les barres lors des conditions météorologiques défavorables et de rassurer les usagers en n'entendant plus ces bruits alarmants. »



Un suivi des vibrations par monitoring est envisagé (service OA du Cerema).



Merci de votre attention

Philippe Dunez

@ : philippe.dunez@cerema.fr

tel : 07 77 34 24 16