

AMTECH STRUCTURES

Adresse : 20 rue de Rambervillers 75 012 Paris
Site web : www.amtech-structures.fr

Tél. : +33 (0)1.81.76.00.42
Port. : +33 (0)6.80.36.21.82

SIRET : 892 364 613 00018
Courriel : contact@amtech-structures.fr

NOTE DE CALCUL DYNAMIQUE « PASSERELLE NORD » VÉRIFICATION DU CONFORT DES PIÉTONS

<u>Maitre d'ouvrage :</u>	Université de Paris 8
<u>N° d'affaire :</u>	BE-AMTECH-22-0127
<u>Adresse chantier :</u>	Université de Paris 8 – Saint-Denis
<u>Date d'émission :</u>	05 mai 2023



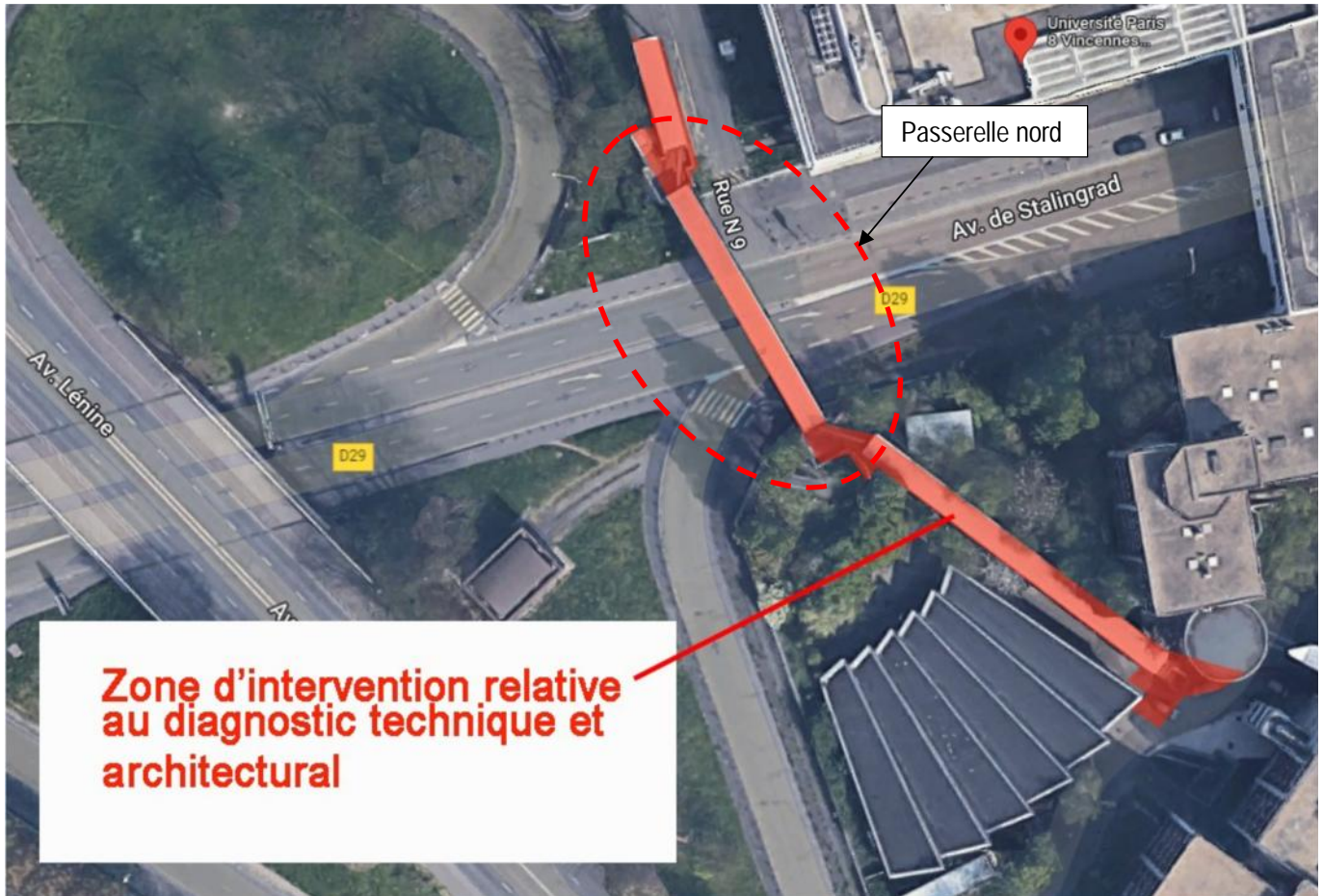
TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION.....	3
2	MATÉRIAUX – RÈGLEMENTS	4
2.1	MATÉRIAUX	4
2.2	RÈGLEMENTS ET DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE	4
3	MÉTHODOLOGIE.....	5
4	CLASSIFICATION DE LA PASSERELLE ET CRITÈRES DE CONFORT	6
5	MODES PROPRES	7
5.1	MODES PROPRES À VIDE.....	7
5.2	MODES PROPRES CHARGÉE.....	12
6	SYNTHÈSE DE L'ANALYSE MODALE	17
6.1	RISQUE DE MISE EN RÉSONANCE ET MODES À ÉTUDIER	18
7	CLASSIFICATION DES PLAGES DE FRÉQUENCE / CAS DE CHARGE DYNAMIQUE.....	18
8	CALCUL DE L'ACCÉLÉRATION.....	20
8.1	AMORTISSEMENT	20
8.2	DÉFINITION DE LA CHARGE DYNAMIQUE.....	20
8.3	SYNTHÈSE DE PARAMÈTRES DE L'ANALYSE « FRF »	22
9	CONCLUSION ET PROPOSITIONS DE STRATÉGIES DE RENFORCEMENT	22

1 INTRODUCTION

La présente note a pour objet l'étude dynamique vibratoire de la passerelle nord et la vérification du critère de confort pour les piétons selon le guide AFGC - SETRA : Passerelle piétonnes – Évaluation du comportement vibratoire sous l'action des piétons.

La partie concernée par cette note est la passerelle NORD :



2 MATÉRIAUX – RÈGLEMENTS

2.1 MATÉRIAUX

On utilise le matériau suivant :

Acier au carbone de nuance S235 avec les propriétés suivantes :

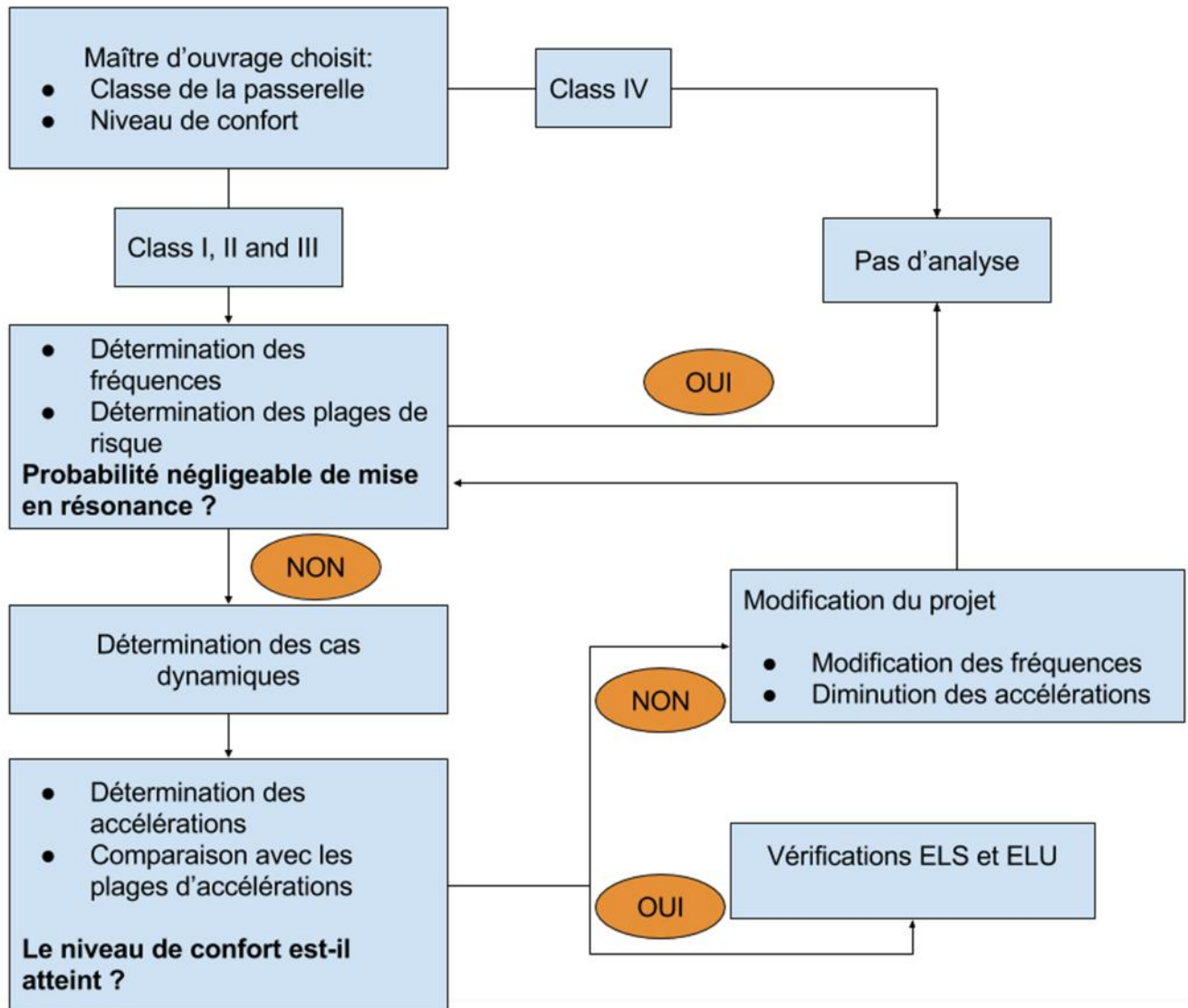
- | | |
|--|--|
| - Limite élastique : | $f_y = 235 \text{ MPa}$ |
| - Limite de rupture : | $f_u = 360 \text{ MPa}$ |
| - Module d'Young : | $E = 210\,000 \text{ MPa}$ |
| - Module de cisaillement : | $G = 81\,000 \text{ MPa}$ |
| - Coefficient de dilatation thermique linéaire : | $\alpha = 10^{-5} \text{ m par } ^\circ\text{C}$ |

2.2 RÈGLEMENTS ET DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE

- Eurocode 0 : « Bases de calcul des structures » et annexes nationale française.
- Eurocode 1 : « Actions sur les structures » et annexes nationale française.
- Eurocode 2 : « Calcul des structures en béton » et annexes nationale française.
- Eurocode 3 : « Calcul des structures en acier » et annexes nationale française.
- Eurocode 6 : « Calcul des structures en maçonnerie » et annexes nationale française.
- Guide AFGC-SETRA : Passerelles piétonnes – Évaluation du comportement vibratoire des passerelles sous l'action des piétons.
- Sondages et relevé fournis par EGV BAT :
 - Relevé des sections reçu le 15/02/2023 ;
 - Reportages photographiques des sondages réalisés sur la passerelle extérieur reçu le 24/02/2023.

3 MÉTHODOLOGIE

Notre étude sera menée en suivant la méthodologie suivante :



4 CLASSIFICATION DE LA PASSERELLE ET CRITÈRES DE CONFORT

Pour faire une étude dynamique selon le guide AFGC-SETRA, la maîtrise d'ouvrage nous a transmis les choix suivants :

1. Détermination de la classe de la passerelle:

Le maître d'ouvrage est responsable de ce choix.

Quatre classes sont disponibles:

- I. Classe I (trafic très dense) : Passerelles reliant des zones à fortes concentrations de piétons (gares ou stations de métro à proximité par exemple) ou fréquemment traversées par des foules denses (zones touristiques).
- II. Classe II (trafic dense) : Passerelles urbaines reliant des zones peuplées soumises à un trafic important et pouvant être parfois chargées sur toute leur surface.
- III. Classe III (trafic normal) : Passerelles normalement utilisées, pouvant parfois être traversée par des groupes importants mais sans jamais être chargées sur toute leur surface.
- IV. Classe IV (trafic faible) : Passerelles très peu utilisées reliant des zones faiblement peuplées.

NOTE: les passerelles de classes 4 ne nécessitent pas d'analyse.

2. Choix du niveau de confort

Le maître d'ouvrage est responsable de ce choix.

Trois niveaux sont disponibles:

1. Confort maximum (page 1) : Accélérations subies imperceptibles.
2. Confort moyen (page 2) : Accélérations simplement perceptibles.
3. Confort minimum (page 3) : Accélérations ressenties mais pas intolérables.

Plages d'accélération verticales m.s ²					
Accélérations	0	0,5	1		2,5
Page 1					
Page 2					
Page 3					
Page 4					

Plages d'accélération horizontales m.s ²						
Accélérations	0,00	0,10	0,15		0,30	0,80
Page 1						
Page 2						
Page 3						
Page 4						

Nous pouvons en déduire les critères minimums selon les exigences de la maîtrise d'ouvrage :

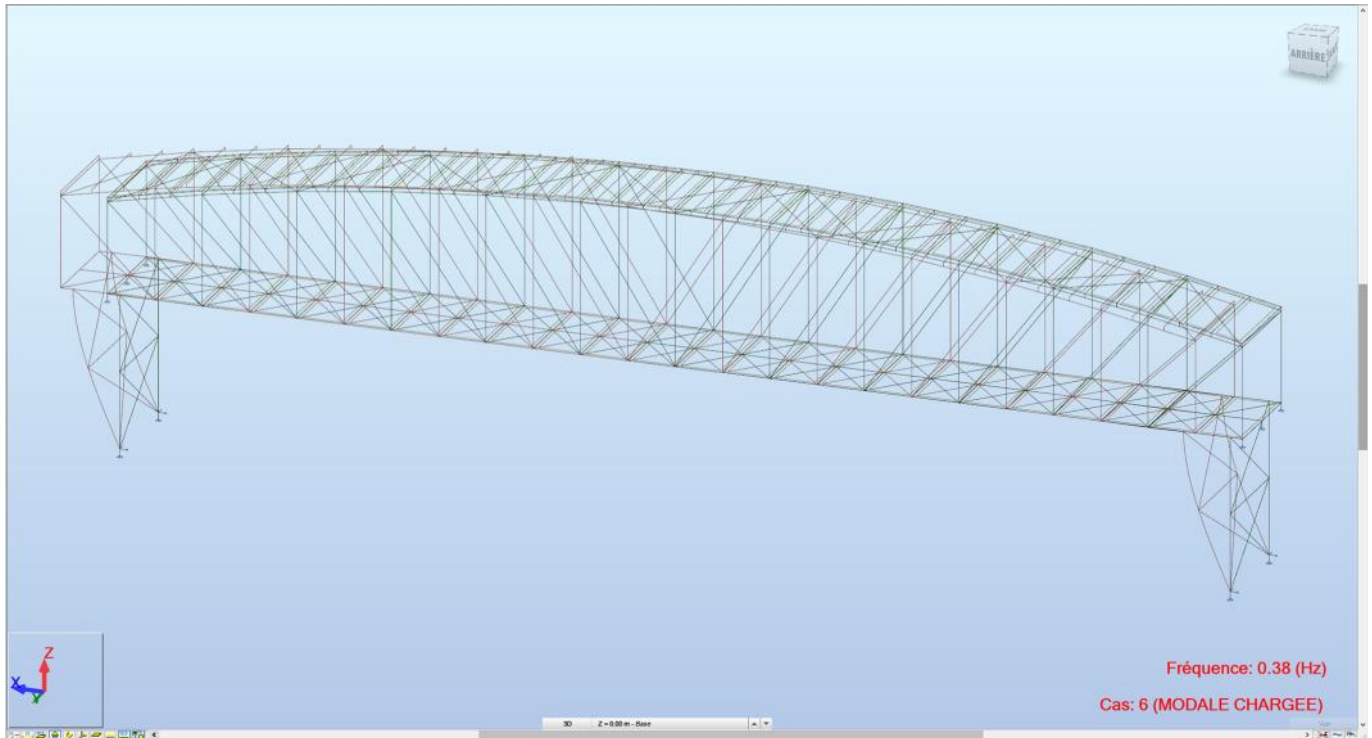
- Niveau de confort vertical : minimum soit 1 à 2.5 m/s²
- Niveau de confort horizontal : 0.1 m/s² - pour éviter le phénomène de synchronisation forcée, le guide AFGC-SETRA préconise de limiter l'accélération horizontale à 0.10 m/s² dans tous les cas.

5 MODES PROPRES

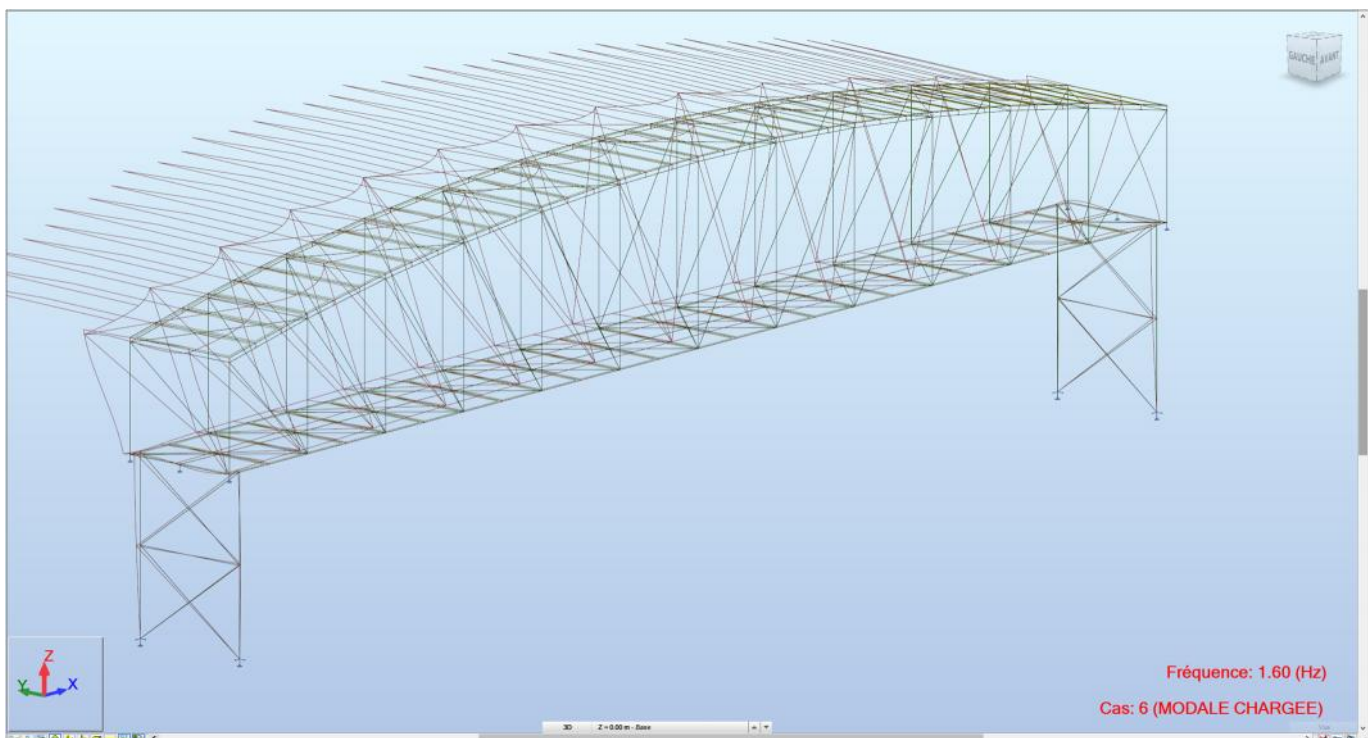
Nous faisons le calcul des fréquences propre pour déterminer la nécessité ou non de faire un calcul dynamique.

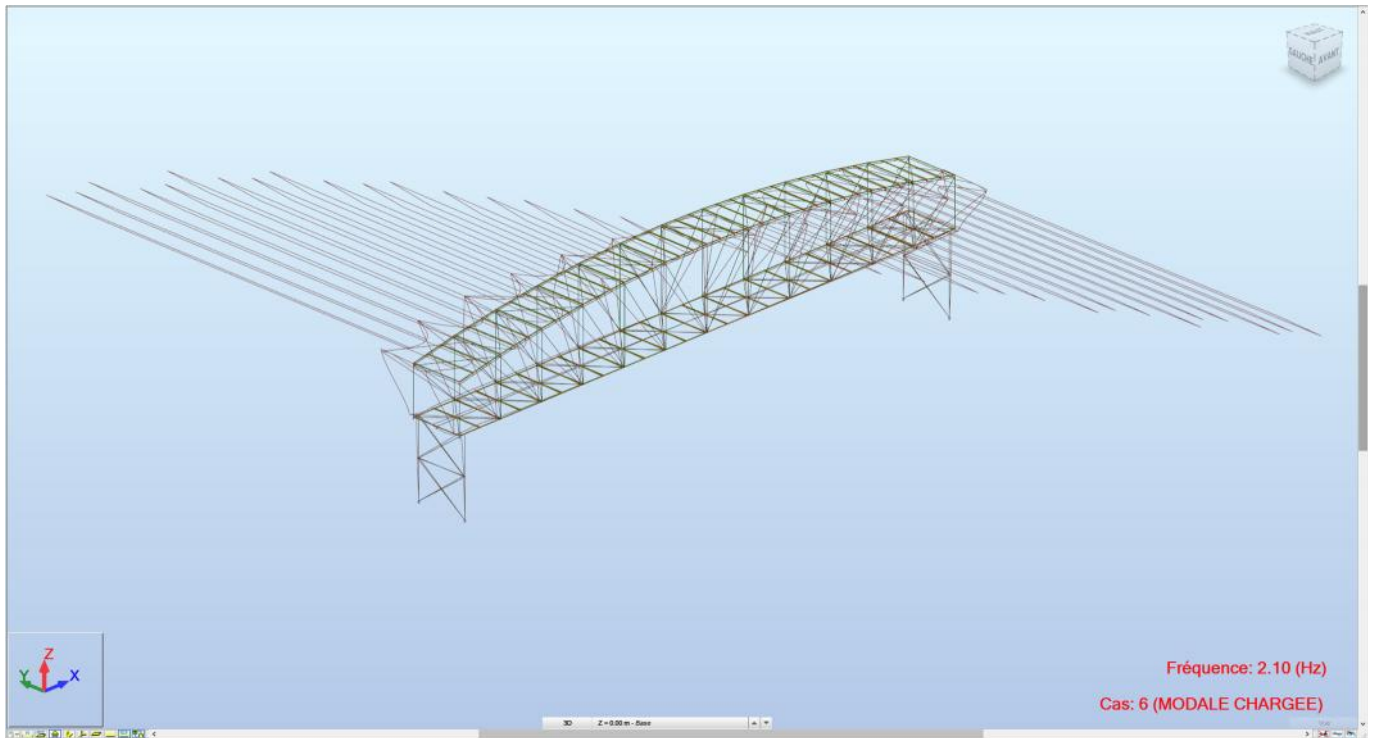
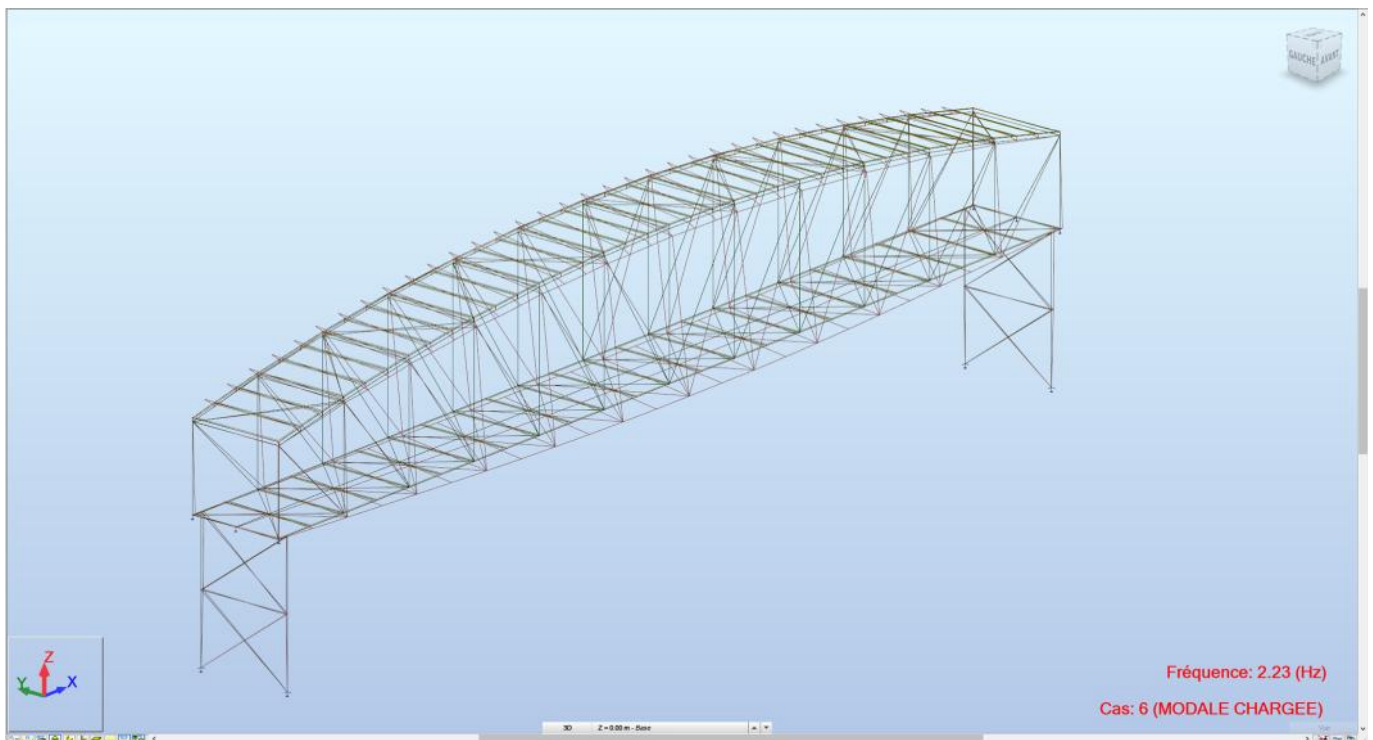
5.1 MODES PROPRES À VIDE

Mode 1 : Fréquence 0.42 Hz – Déplacement longitudinal

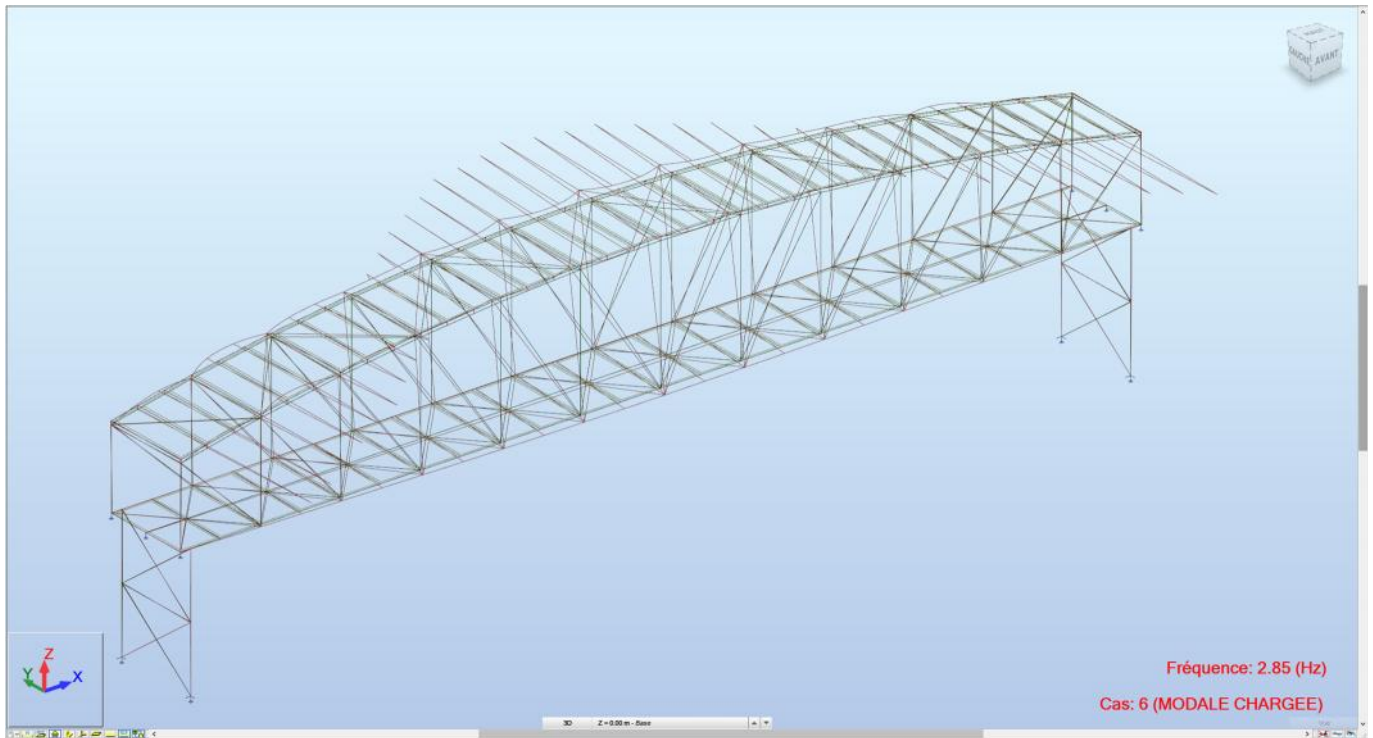


Mode 2 : Fréquence 1.61 Hz – Flexion transversale

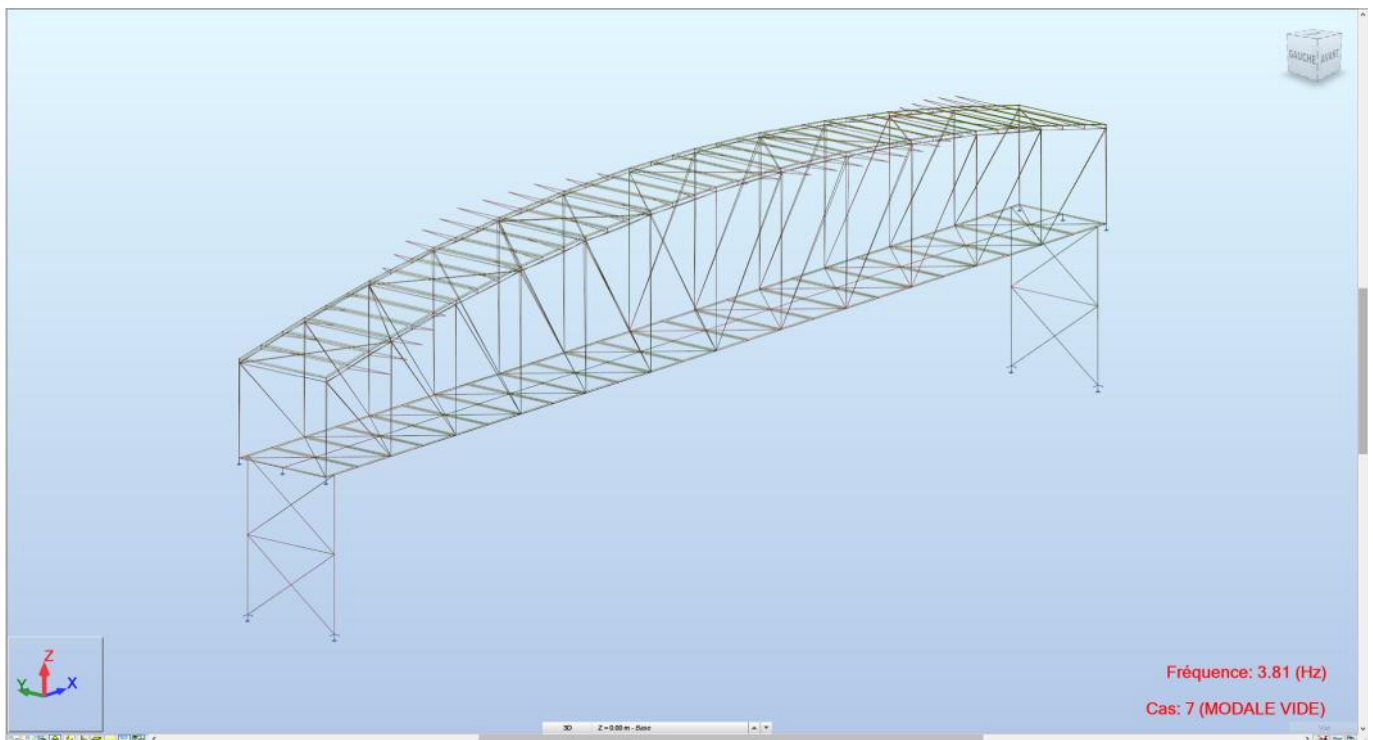


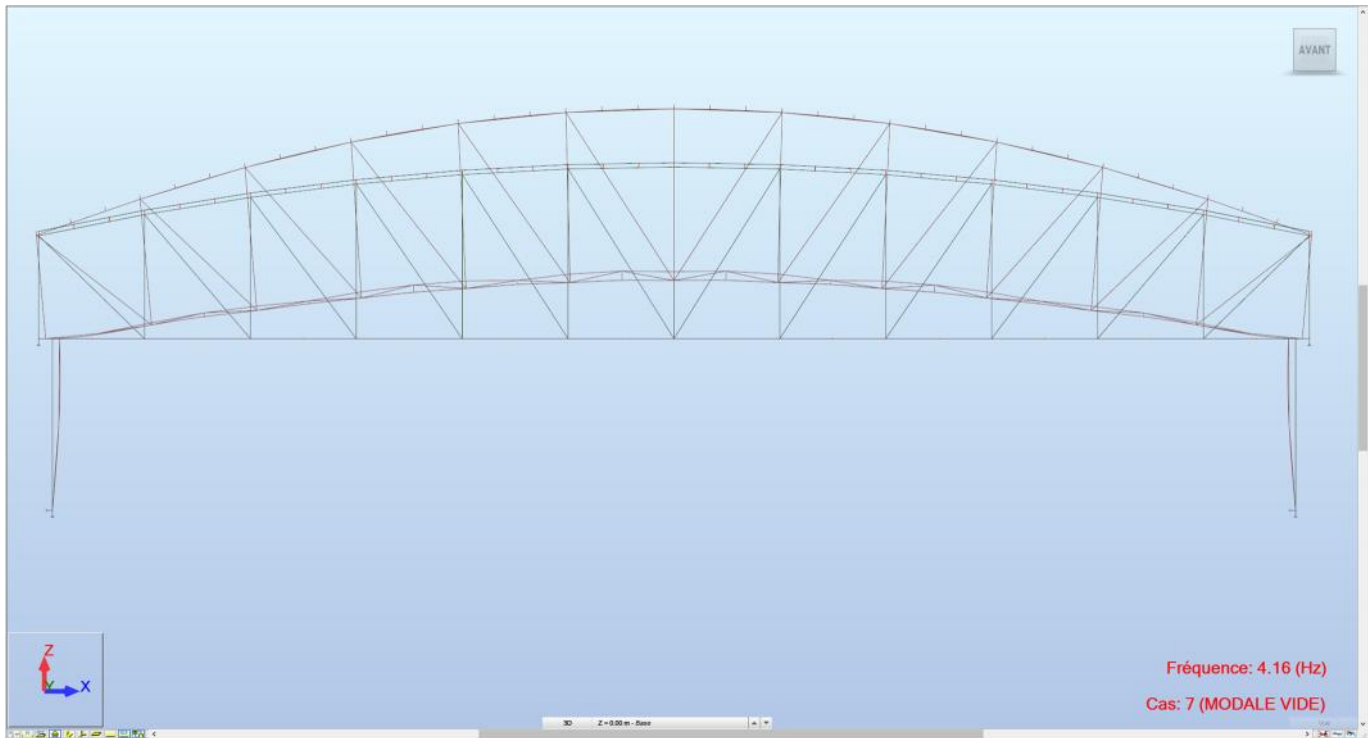
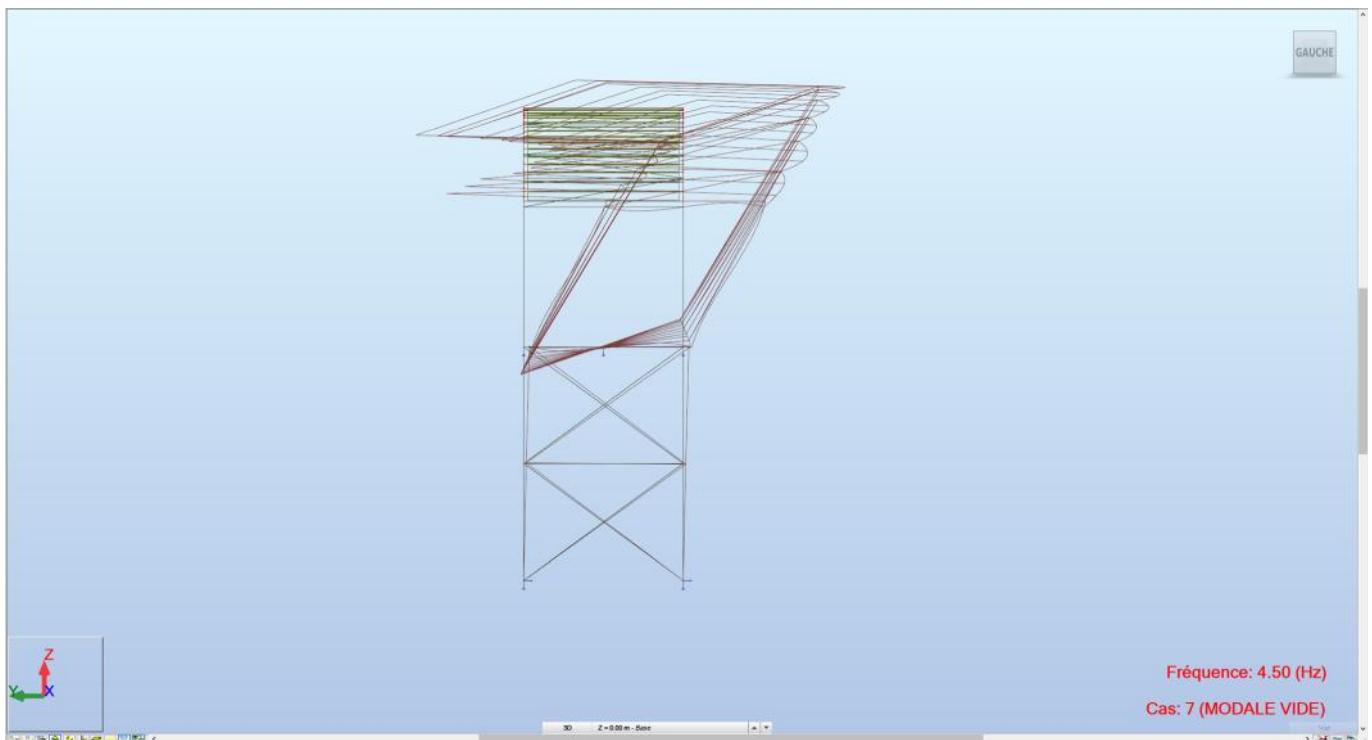
Mode 3 : Fréquence 2.10 Hz – Flexion transversaleMode 4 : Fréquence 2.53 Hz – Flexion transversale

Mode 5 : Fréquence 2.86 Hz – Flexion transversale

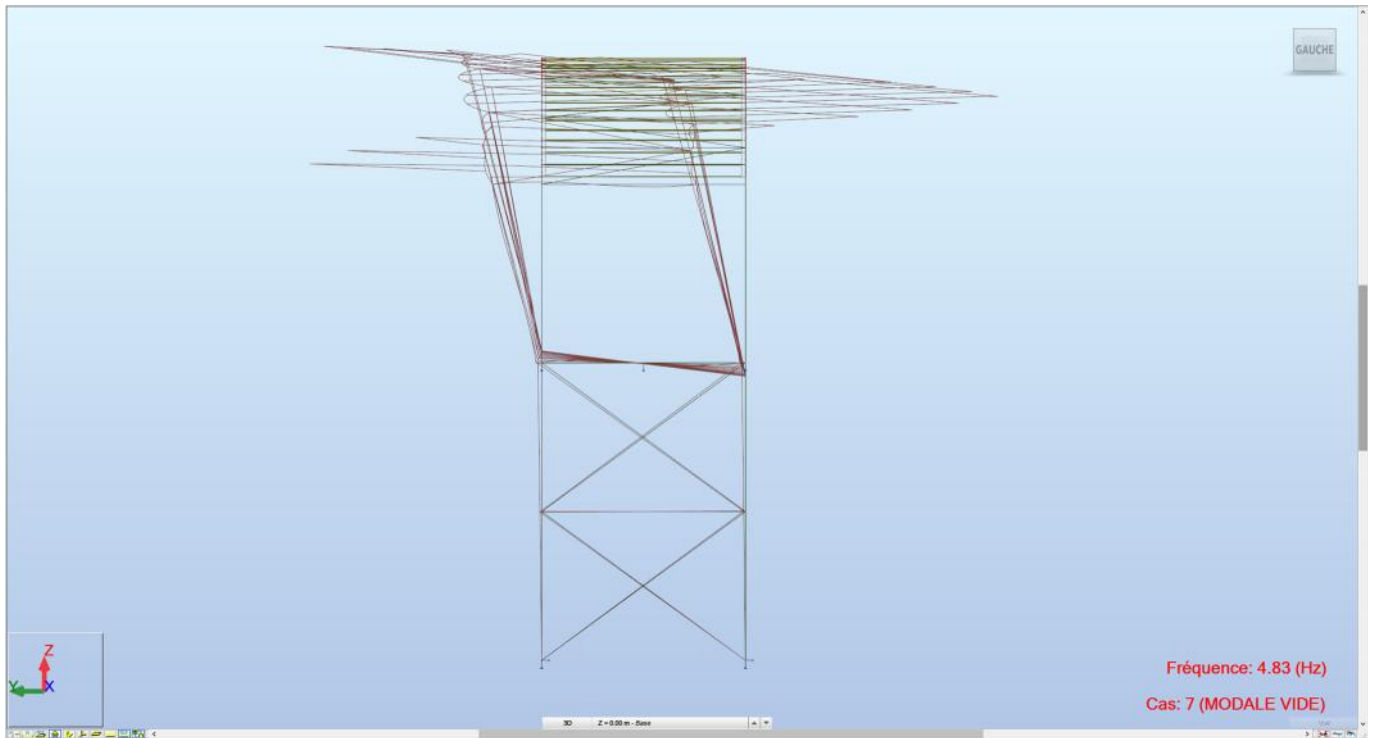


Mode 6 : Fréquence 3.81 Hz – Torsion

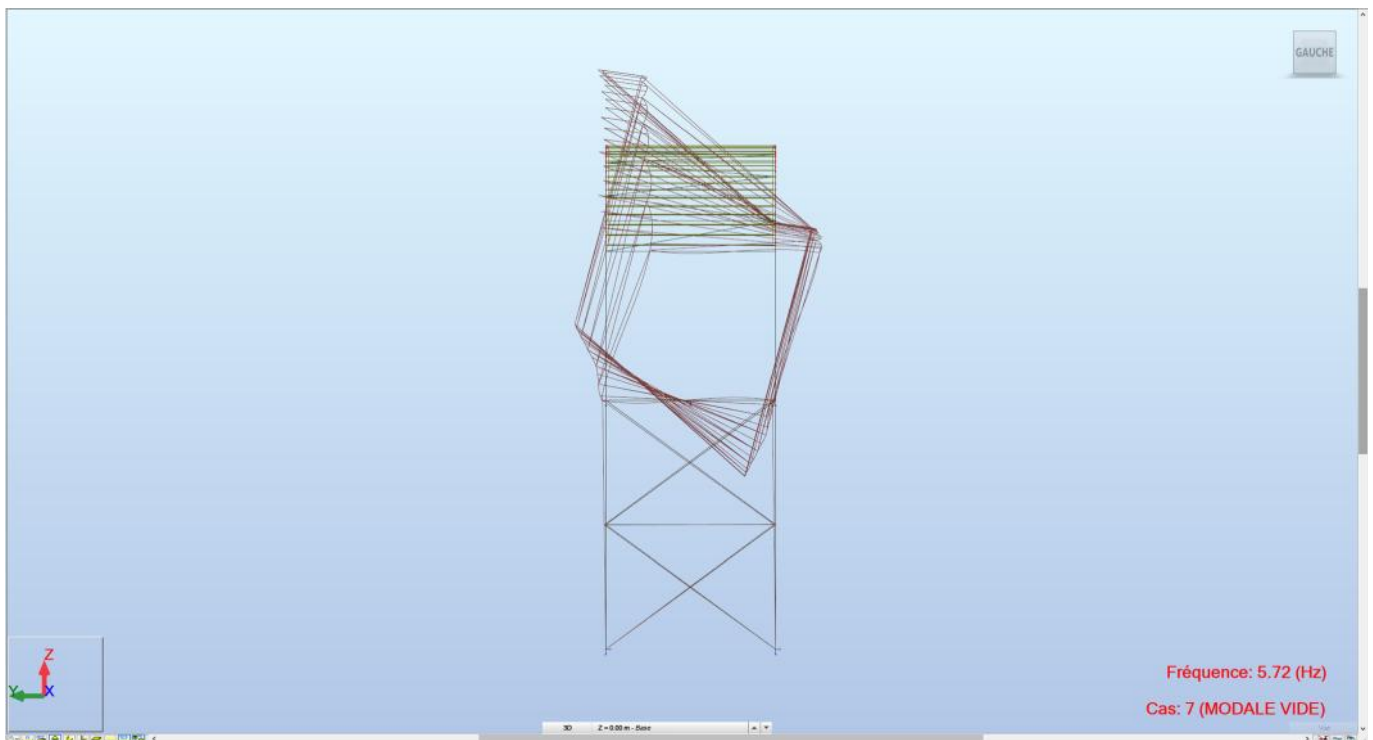


Mode 7 : Fréquence 4.16 Hz – Flexion verticaleMode 8 : Fréquence 4.50 Hz – Torsion

Mode 9 : Fréquence 4.83 Hz – Torsion



Mode 10 : Fréquence 5.72 Hz – Torsion

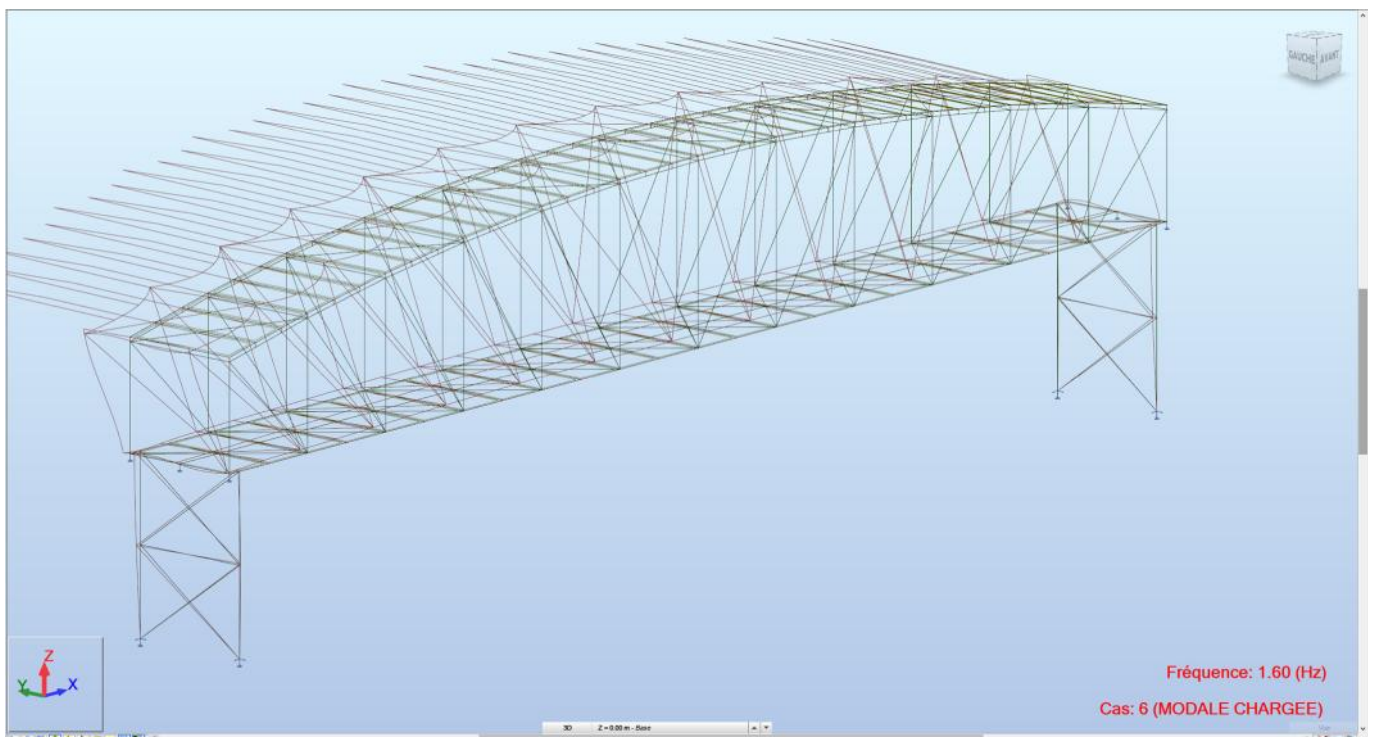


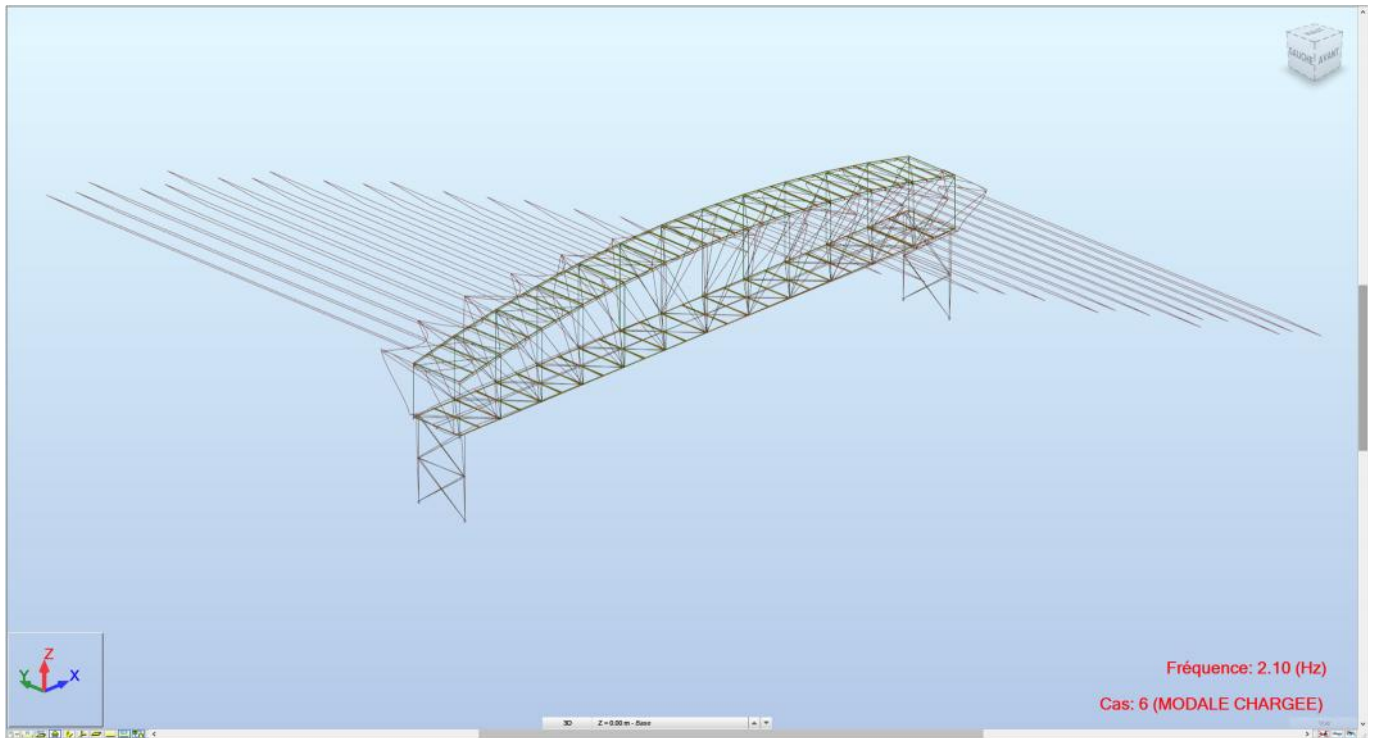
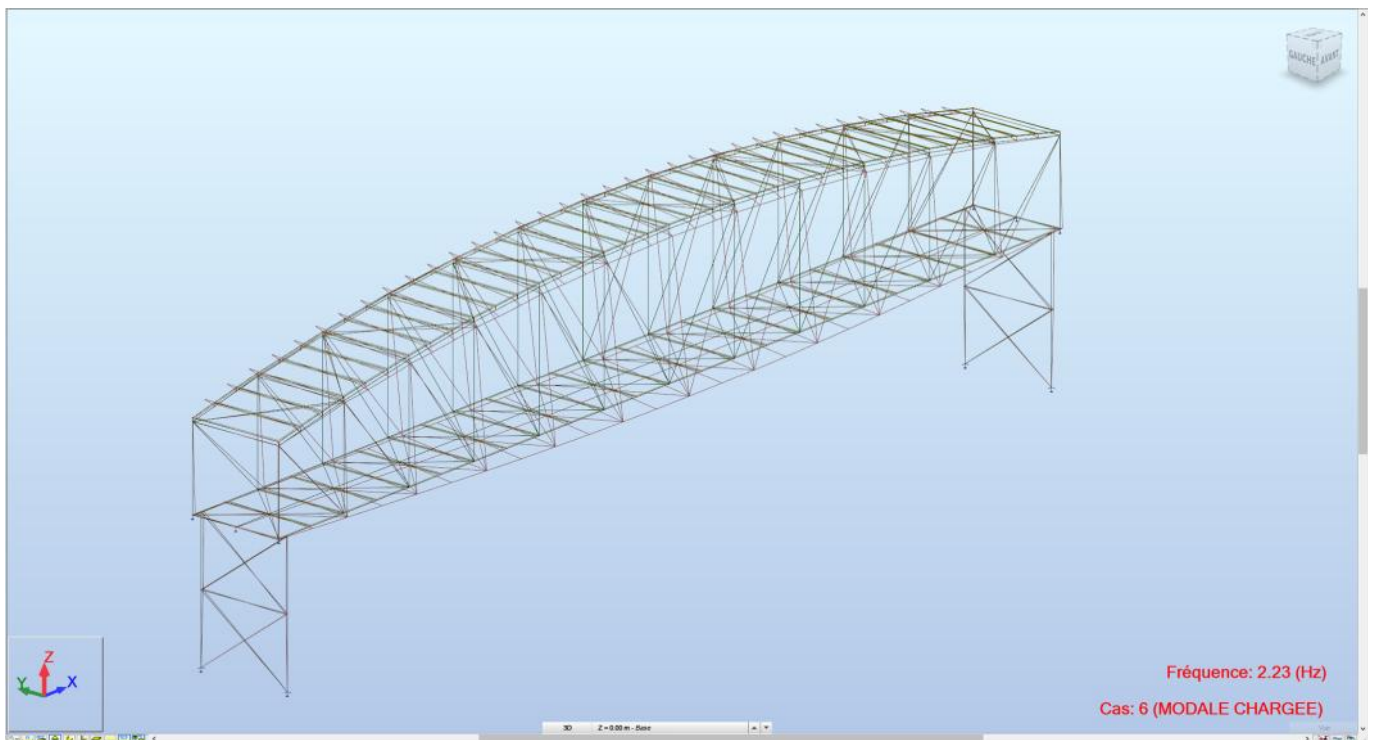
5.2 MODES PROPRES CHARGÉE

Mode 1 : Fréquence 0.38 Hz – Déplacement longitudinal

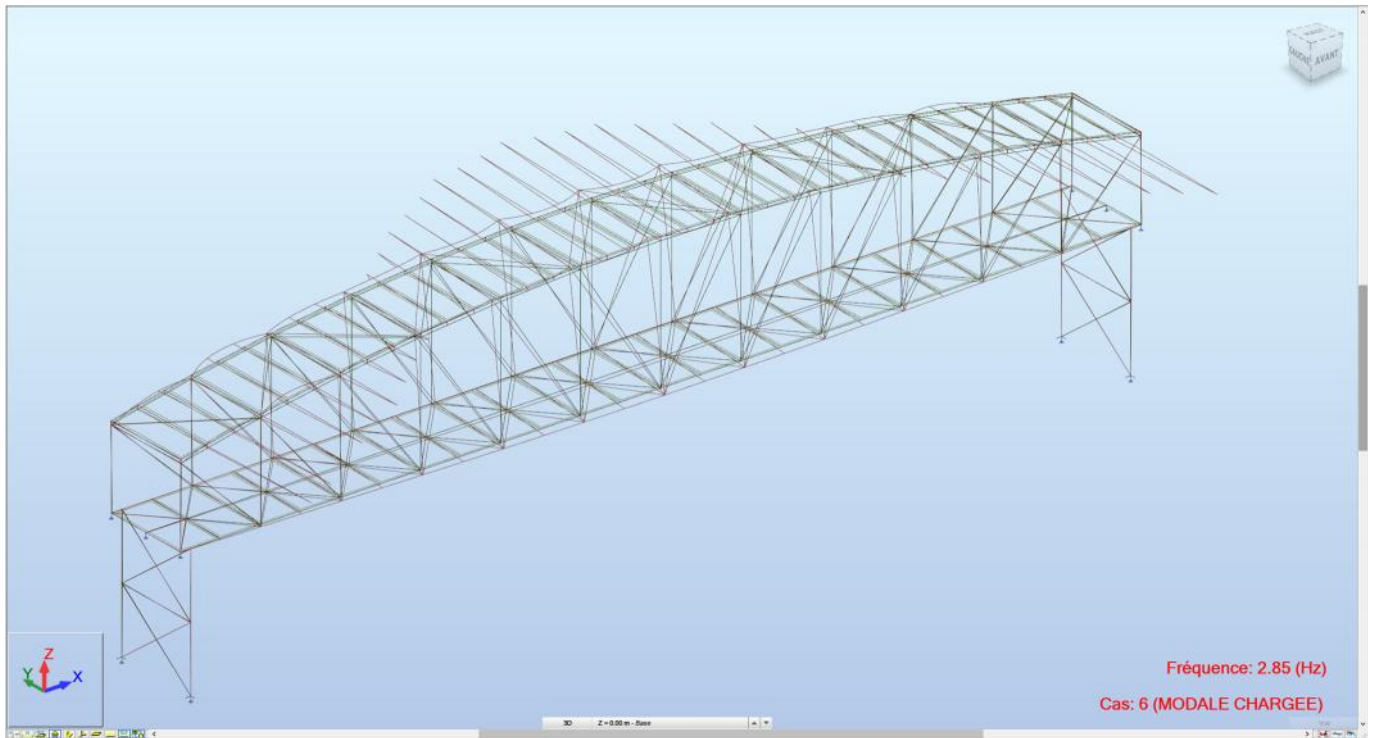


Mode 2 : Fréquence 1.60 Hz – Flexion transversale

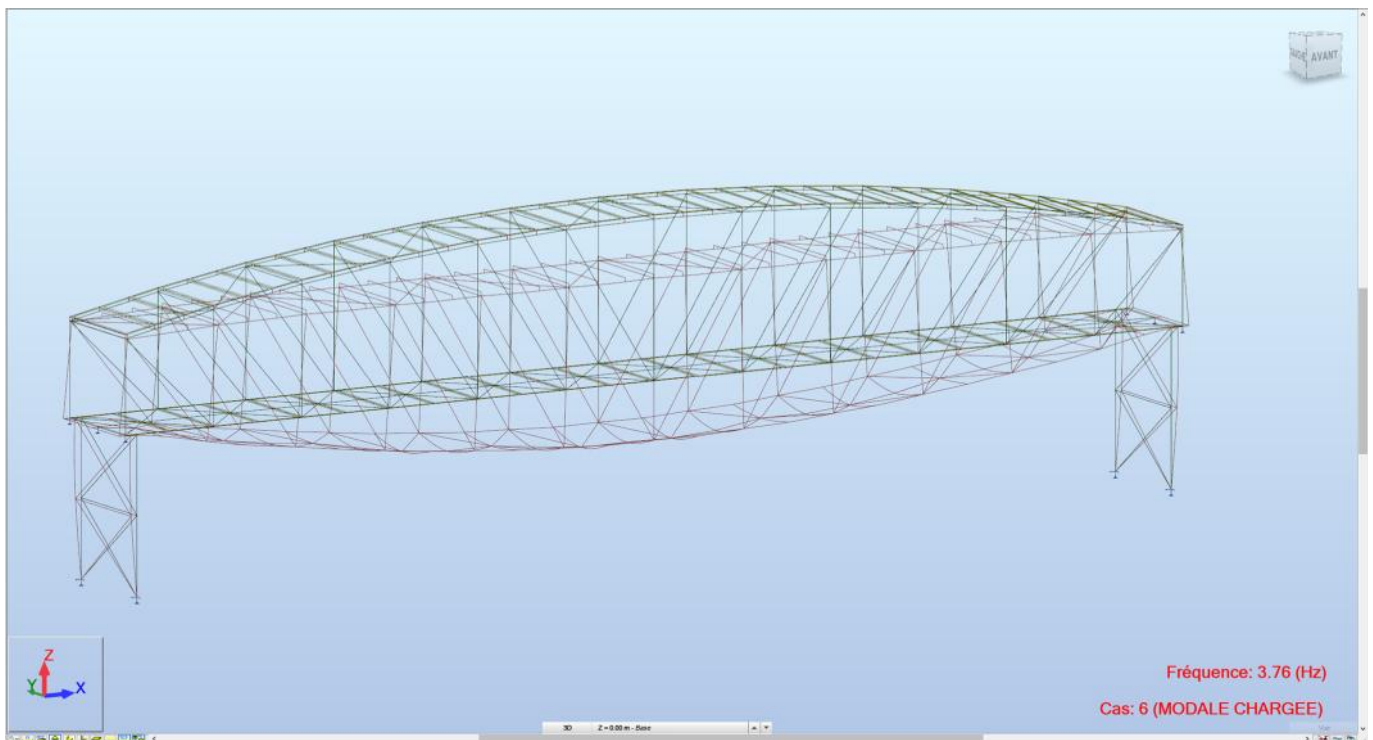


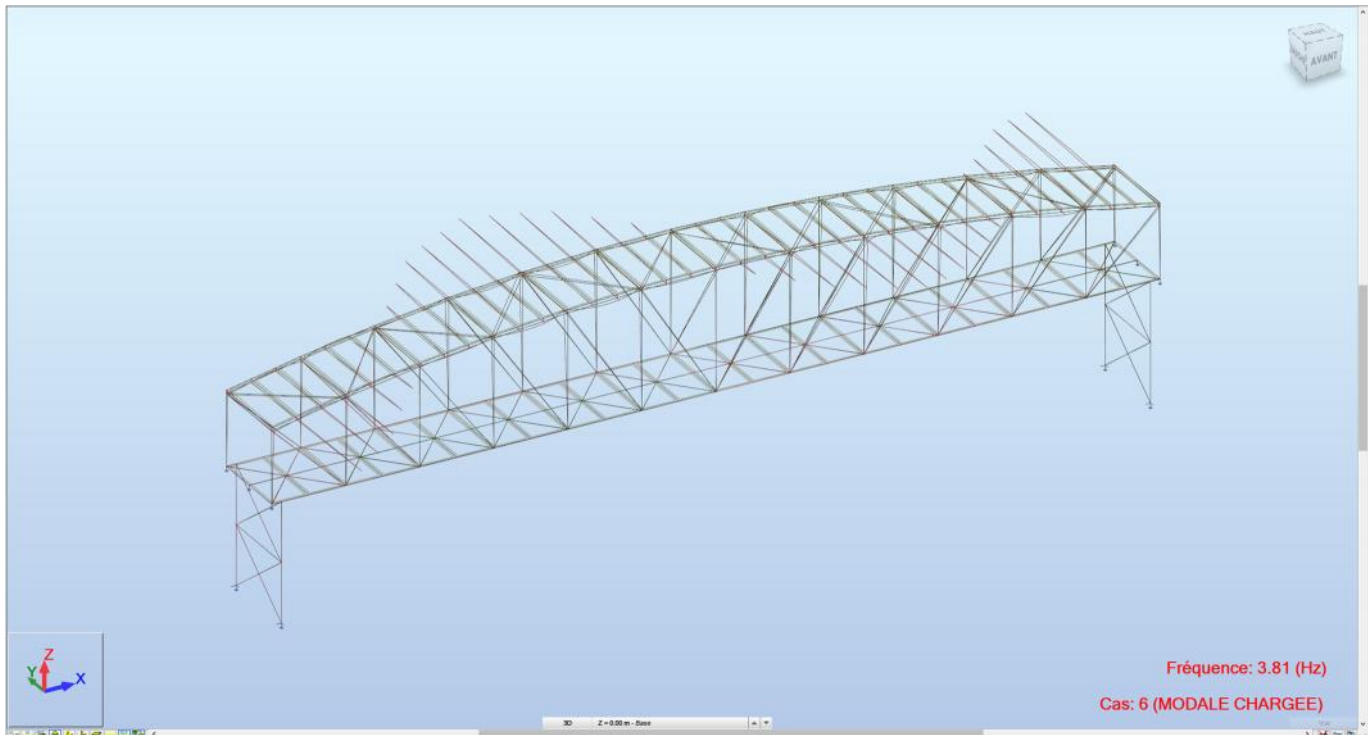
Mode 3 : Fréquence 2.10 Hz – Flexion transversaleMode 4 : Fréquence 2.23 HZ – Flexion transversale

Mode 5 : Fréquence 2.85 HZ – Flexion transversale

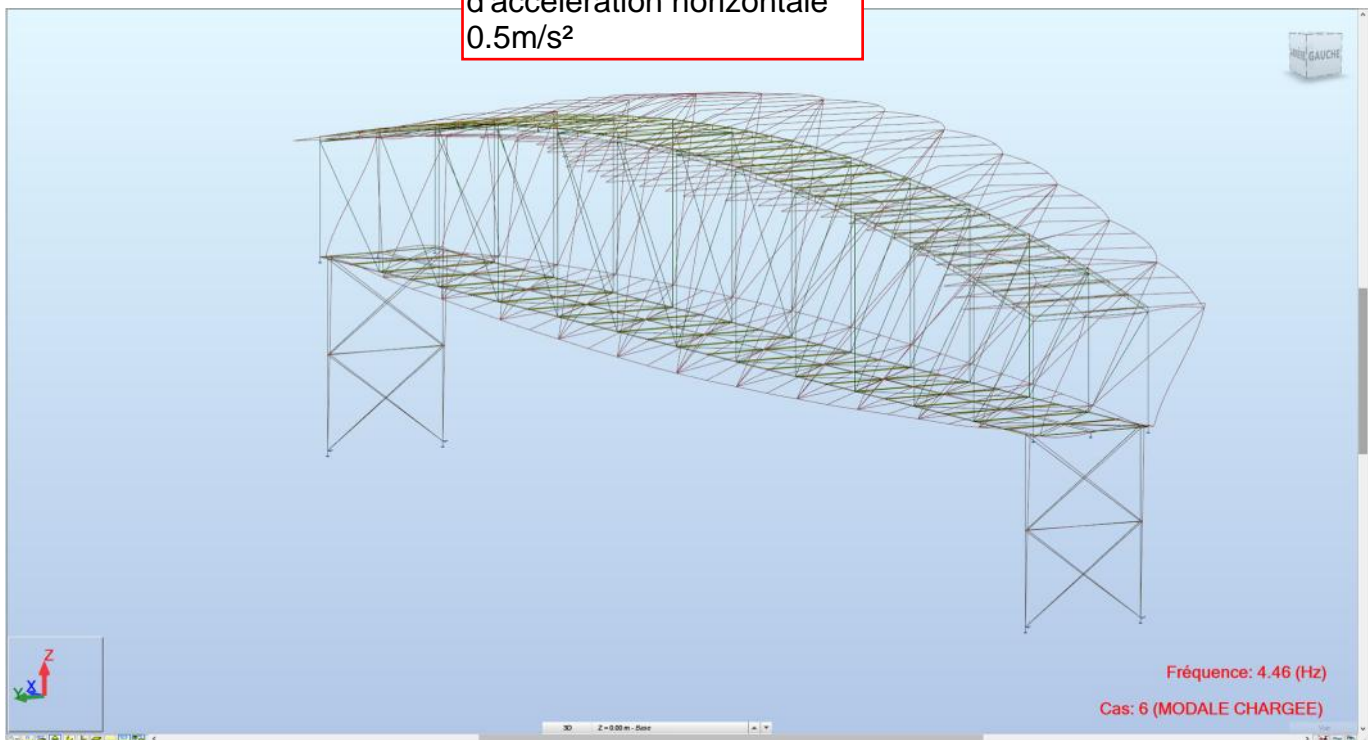


Mode 6 : Fréquence 3.76 HZ – Flexion verticale

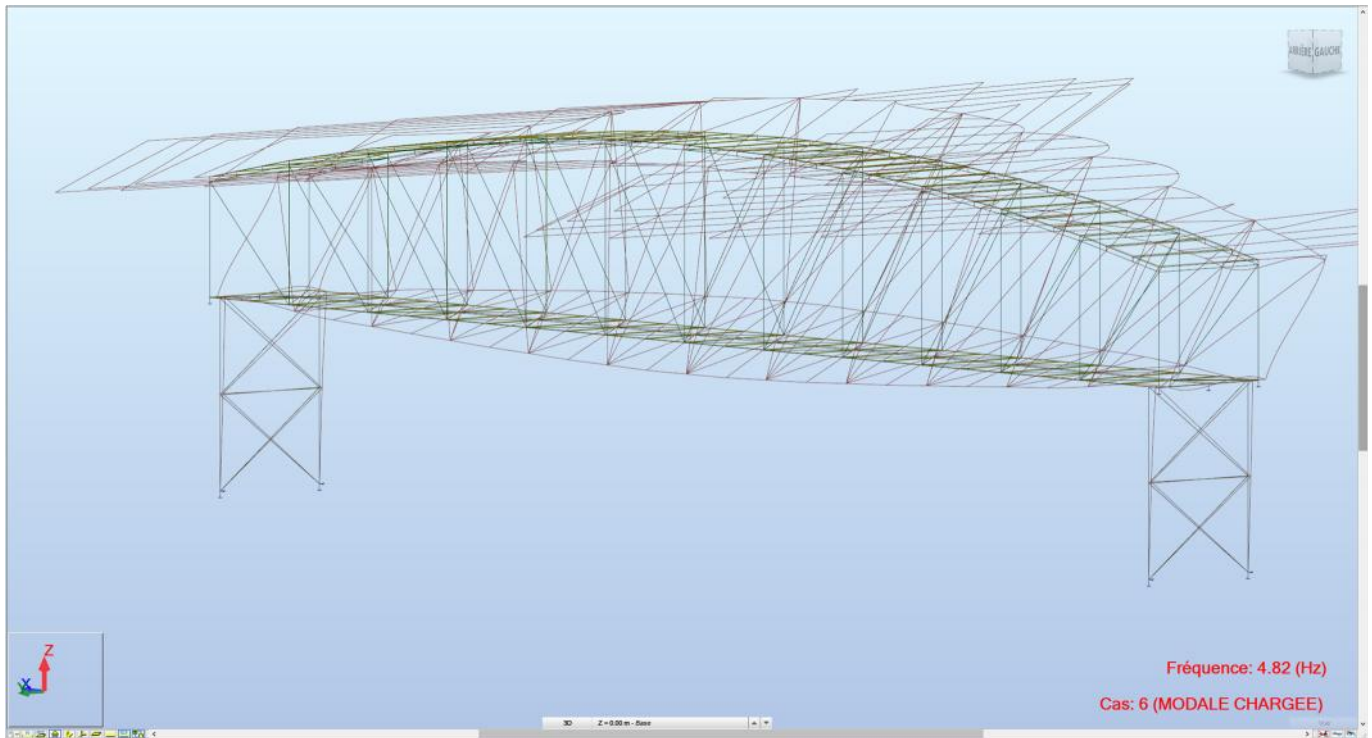


Mode 7 : Fréquence 3.81 HZ – TorsionMode 8 : Fréquence 4.46 HZ – Torsion

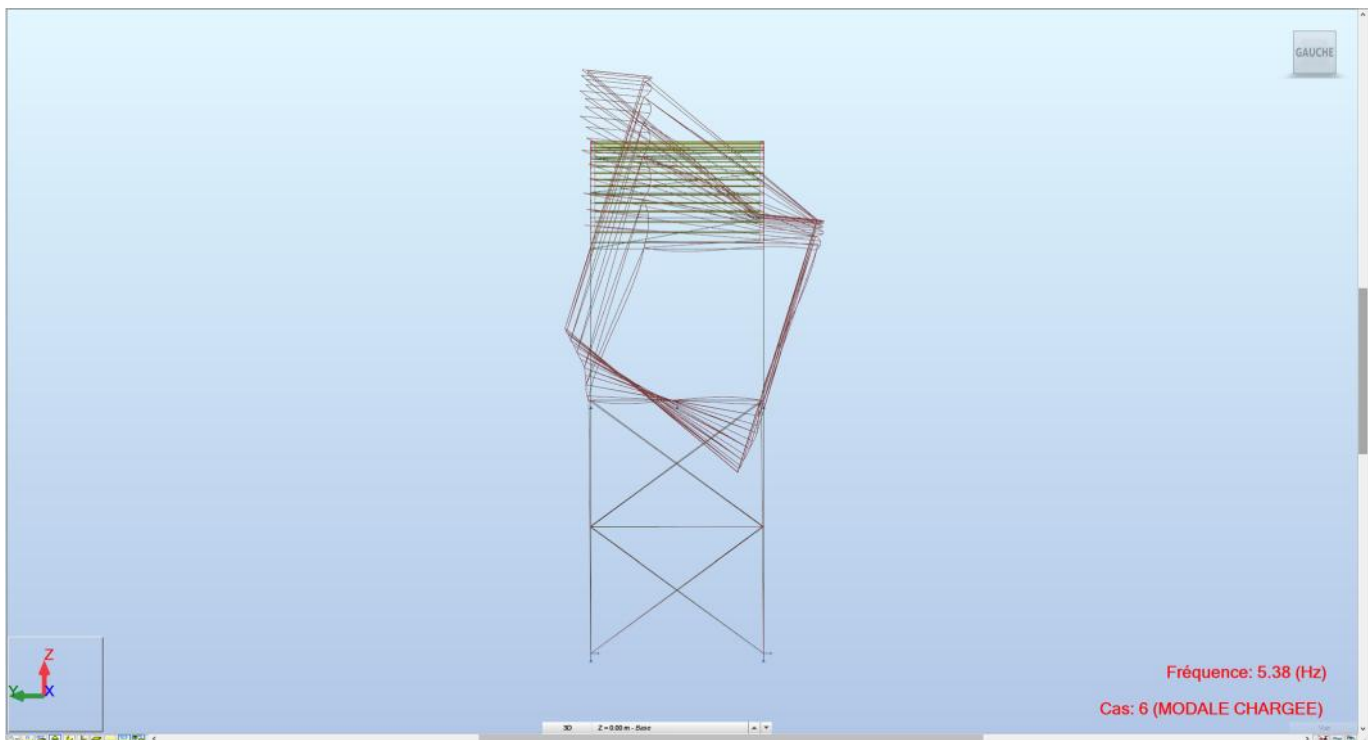
mode avec le plus
d'accélération horizontale
 0.5m/s^2



Mode 9 : Fréquence 4.82 HZ – Torsion



Mode 10 : Fréquence 5.38 HZ – Torsion



6 SYNTHÈSE DE L'ANALYSE MODALE

Pour chacun des 10 modes relevés, on décrit le type de mode qui est associé et la fréquence du mode. On détermine ensuite à quelle plage de fréquence celle-ci appartient en fonction du type de mode. On résume l'ensemble de l'analyse dans le tableau suivant :

Synthèse Passerelle Vide					
Mode	Description du mode	Dominante du mode	Fréquence (Hz)	Plage de la fréquence	Description de la plage de fréquence
1	Déplacement longitudinal	L	0.42	Plage 2	Transversal – Entre 0.3 Hz et 0.5 Hz
2	Flexion transversale	T	1.61	Plage 3	Transversal – Entre 1.3 Hz et 2.5 Hz
3	Flexion transversale	T	2.10	Plage 3	Transversal – Entre 1.3 Hz et 2.5 Hz
4	Flexion transversale	T	2.53	Plage 4	Transversal – 2.5 Hz et plus
5	Flexion transversale	T	2.86	Plage 4	Transversal – 2.5 Hz et plus
6	Torsion	V	3.81	Plage 3	Vertical – Entre 2.6 Hz et 5 Hz
7	Flexion verticale	V	4.16	Plage 3	Vertical – Entre 2.6 Hz et 5 Hz
8	Torsion	V	4.50	Plage 3	Vertical – Entre 2.6 Hz et 5 Hz
9	Torsion	V	4.83	Plage 3	Vertical – Entre 2.6 Hz et 5 Hz
10	Torsion	V	5.72	Plage 4	Vertical – 5 Hz et plus

Synthèse Passerelle Chargée					
Mode	Description du mode	Dominante du mode	Fréquence (Hz)	Plage de la fréquence	Description de la plage de fréquence
1	Déplacement longitudinal	L	0.38	Plage 2	Transversal – Entre 0.3 Hz et 0.5 Hz
2	Flexion transversale	T	1.60	Plage 3	Transversal – Entre 1.3 Hz et 2.5 Hz
3	Flexion transversale	T	2.10	Plage 3	Transversal – Entre 1.3 Hz et 2.5 Hz
4	Flexion transversale	T	2.23	Plage 3	Transversal – Entre 1.3 Hz et 2.5 Hz
5	Flexion transversale	T	2.85	Plage 4	Transversal – 2.5 Hz et plus
6	Torsion	V	3.76	Plage 3	Vertical – Entre 2.6 Hz et 5 Hz
7	Torsion	V	3.81	Plage 3	Vertical – Entre 2.6 Hz et 5 Hz
8	Torsion	V	4.46	Plage 3	Vertical – Entre 2.6 Hz et 5 Hz
9	Torsion	V	4.82	Plage 3	Vertical – Entre 2.6 Hz et 5 Hz
10	Torsion	V	5.38	Plage 4	Vertical – 5 Hz et plus

Dominante du mode (signification) :

- ➔ L – mode de vibration à dominante Longitudinale
- ➔ V – mode de vibration à dominante Verticale
- ➔ T – mode de vibration à dominante Transversale

On rappelle ci-après les plages de fréquence :

Quatre plages de fréquences sont définies. Elles sont utilisées afin de déterminer si une analyse dynamique est nécessaire.

1. Plage 1 (Risque maximal) : Risque maximal de mise en résonance.
2. Plage 2 (Risque moyen) : Risque moyen de mise en résonance.
3. Plage 3 (Risque faible) : Risque faible de mise en résonance.
4. Plage 4 (risque négligeable) : Risque négligeable de mise en résonance.

Plages de fréquences à risques vibration verticales et longitudinales (Hz)							
Fréquences	0	1	1,7	2	2,1	2,6	5
Plage 1							
Plage 2							
Plage 3							
Plage 4							

Plages de fréquences à risques vibration transversales (Hz)							
Fréquences	0	0,3	0,5	0,8	1,1	1,3	2,5
Plage 1							
Plage 2							
Plage 3							
Plage 4							

6.1 RISQUE DE MISE EN RÉSONANCE ET MODES À ÉTUDIER

Concernant le risque de mise en résonance, on étudiera les modes suivants (fréquences qui se situent dans les plages 2 à 3) :

- Passerelle à vide :
 - Modes : 2 à 3 et 6 à 9
- Passerelle chargée :
 - Modes : 2 à 4 et 6 à 9

Les modes 4 et 5 ne sont pas à étudier. En effet, c'est des modes transversaux pour lesquels les fréquences des modes sont situées dans la plage 4 (fréquence d'un mode transversal supérieure à 2.5 Hz).

Les modes 1 et 10 ne sont pas à étudier. C'est des modes verticaux / longitudinaux pour lequel les fréquences des modes sont situées dans la plage 4 (supérieure à 5 Hz).

7 CLASSIFICATION DES PLAGES DE FRÉQUENCE / CAS DE CHARGE DYNAMIQUE

On détermine les cas de charges associés à chaque mode. Ceci permet de vérifier les critères de confort pour chaque mode qui est susceptible d'être actionné par le chargement dynamique piétonnier.

On rappelle la détermination du cas de charge en fonction de la classe de la passerelle et de la plage de fréquence dans laquelle se situent chacun des modes à risque :

A partir de la plage de risque et de la classe de la passerelle, on peut déterminer le nombre et le type de cas de charges dynamiques à considérer:

Trafic	Classe	Détermination des fréquences nécessaires	Cas à considérer			
			Plage à risque			
			1	2	3	4
Faible	IV	Non	Néant	Néant	Néant	Néant
Normal	III	Oui	Cas 1	Néant	Néant	Néant
Dense	II			Cas 1	Cas 3	Néant
Très Dense	I		Cas 2	Cas 2	Cas 3	Néant

Cas 1 : Foule très peu dense et dense de piétons.

Cas 2 : Foule très dense de piétons.

Cas 3 : Complément pour une foule (seconde harmonique)

On obtient ainsi les cas de charges suivants pour l'ensemble des modes à étudier :

Synthèse Passerelle Vide					
Mode	Description du mode	Dominante du mode	Fréquence (Hz)	Plage de la fréquence	Cas de charge à étudier
1	Déplacement longitudinal	L	0.42	Plage 4	
2	Flexion transversale	T	1.61	Plage 3	Cas 3
3	Flexion transversale	T	2.10	Plage 3	Cas 3
4	Flexion transversale	T	2.53	Plage 4	
5	Flexion transversale	T	2.86	Plage 4	
6	Torsion	V	3.81	Plage 3	Cas 3
7	Flexion verticale	V	4.16	Plage 3	Cas 3
8	Torsion	V	4.50	Plage 3	Cas 3
9	Torsion	V	4.83	Plage 3	Cas 3
10	Torsion	V	5.72	Plage 4	

Synthèse Passerelle Chargée					
Mode	Description du mode	Dominante du mode	Fréquence (Hz)	Plage de la fréquence	Cas de charge à étudier
1	Déplacement longitudinal	L	0.38	Plage 4	
2	Flexion transversale	T	1.60	Plage 3	Cas 3
3	Flexion transversale	T	2.10	Plage 3	Cas 3
4	Flexion transversale	T	2.23	Plage 3	Cas 3
5	Flexion transversale	T	2.85	Plage 4	
6	Torsion	V	3.76	Plage 3	Cas 3
7	Torsion	V	3.81	Plage 3	Cas 3
8	Torsion	V	4.46	Plage 3	Cas 3
9	Torsion	V	4.82	Plage 3	Cas 3
10	Torsion	V	5.38	Plage 4	

pas de modes dans le plage 1 => si la passerelle est recalifiée en classe III "normal", il n'y a pas de vérifications supplémentaire à effectuer, le comportement de la passerelle est jugé satisfaisant.

8 CALCUL DE L'ACCÉLÉRATION

8.1 AMORTISSEMENT

L'amortissement structurel dans ce calcul est caractérisé par le pourcentage d'amortissement critique moyen : 0.4% pour un tablier métallique.

8.2 DÉFINITION DE LA CHARGE DYNAMIQUE

Selon la classe de la passerelle (classe II – trafic dense) et les plages dans lesquelles se situent les fréquences propres, il y a lieu d'effectuer un calcul dynamique de la structure pour un ensemble de 3 cas de charge qui sont définis dans le tableau suivant :

Trafic	Classe	Cas de charge à retenir pour le contrôle des accélérations		
		Plage où se situe la fréquence propre		
		1	2	3
Peu dense	III	Cas 1	Néant	Néant
Dense	II	Cas 1	Cas 1	Cas 3
Très dense	I	Cas 2	Cas 2	Cas 3

Pour une passerelle de classe II (trafic dense), le calcul dynamique est à mener dans toutes les plages de fréquence. Nous devons donc étudier les cas de charges 1 et 3 :

Cas 1 : Foule peu dense et dense :

La charge dynamique en fonction du temps est calculée par les formules suivantes :

Direction	Charge par m ²
Verticale (v)	$d \times (280 \text{ N}) \times \cos(2\pi f_v t) \times 10,8 \times (\xi / N)^{1/2} \times \psi$
Longitudinale (l)	$d \times (140 \text{ N}) \times \cos(2\pi f_l t) \times 10,8 \times (\xi / N)^{1/2} \times \psi$
Transversale (t)	$d \times (35 \text{ N}) \times \cos(2\pi f_t t) \times 10,8 \times (\xi / N)^{1/2} \times \psi$

Avec :

Le « N » signifie l'unité Newton

Classe	Densité d de la foule
III	0,5 piéton/m ²
II	0,8 piéton/m ²

- ξ : Amortissement = 0.4 % (Tablier métallique) ;
- d : densité des piétons = 0.8 piéton / m² (classe II) ;
- N : nombre de piéton ($N = S \times d = 134 \times 0.8 = 107.2$) ;
- S : surface totale de la passerelle = $3.6 \times 37.14 = 134 \text{ m}^2$;
- ψ : Coefficient réducteur (fonction de la fréquence du mode).

Cas 3 : Effet de la 2^{ème} harmonique de la foule

La charge dynamique en fonction du temps est calculée par les formules suivantes :

Direction	Charge par m ²
Verticale (v)	$d \times \mathbf{70\ N} \times \cos(2\pi f_v t) \times 10,8 \times (\xi / N)^{1/2} \times \psi$
Longitudinale (l)	$d \times \mathbf{35\ N} \times \cos(2\pi f_l t) \times 10,8 \times (\xi / N)^{1/2} \times \psi$
Transversale (t)	$d \times \mathbf{7\ N} \times \cos(2\pi f_t t) \times 10,8 \times (\xi / N)^{1/2} \times \psi$

Le « N » signifie l'unité Newton

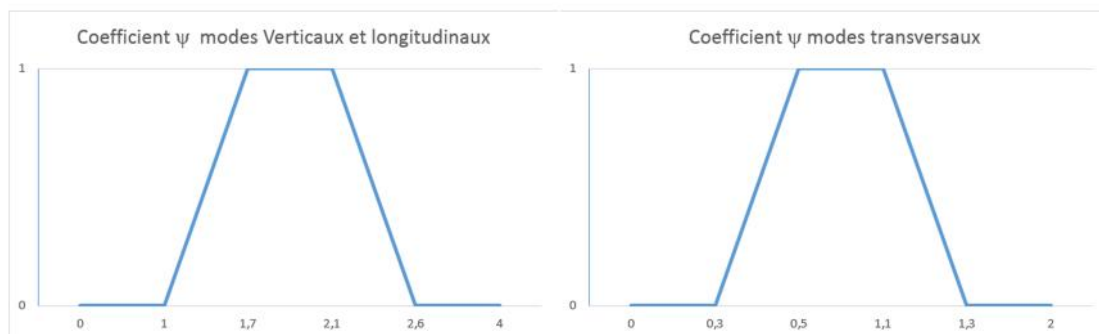
Avec :

Classe	Densité d de la foule
III	0,5 piéton/m ²
II	0,8 piéton/m ²

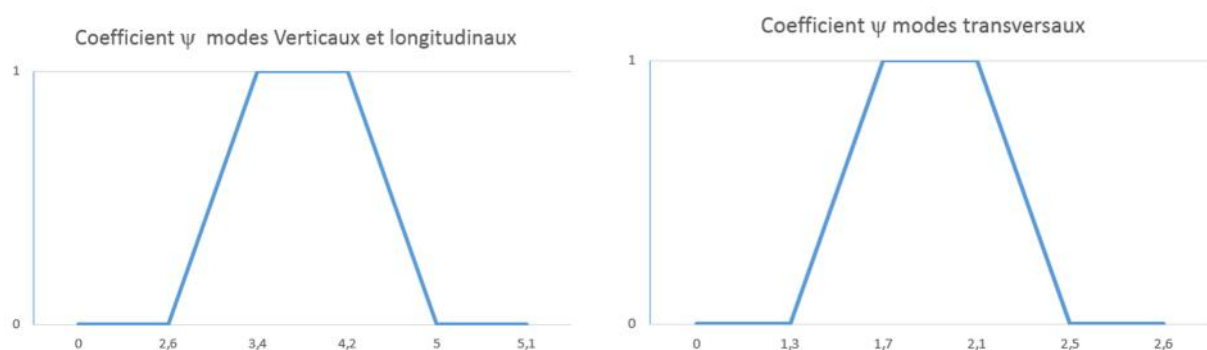
- ξ : Amortissement = 0.4 % (Tablier métallique) ;
- d : densité des piétons = 0.8 piéton / m² (classe II) ;
- N : nombre de piéton ($N = S \times d = 134 \times 0.8 = 107.2$) ;
- S : surface totale de la passerelle = $3.6 \times 37.14 = 134\text{ m}^2$;
- ψ : Coefficient réducteur (fonction de la fréquence du mode).

Définition du coefficient ψ en fonction des plages de fréquence :

Plage 1 et 2 :



Plage 3 :



8.3 SYNTHÈSE DE PARAMÈTRES DE L'ANALYSE « FRF »

Pour vérifier le confort dynamique de la passerelle, nous ferons une analyse FRF (analyse harmonique dans le domaine des fréquences). Le tableau suivant résume l'ensemble des paramètres pour l'analyse FRF :

Mode	Fréquence (Hz)	Dominante du mode	ψ	Densité des piétons (d)	Surface de la passerelle (S - m²)	n (piéton équivalent)	γ (Amortissement)	Amplitude de l'excitation (N/m²)
1	0.38	L	0	0.8	134	107.2	0.004	
2	1.6	T	0.75	0.8	134	107.2	0.004	0.28
3	2.1	T	1	0.8	134	107.2	0.004	0.37
4	2.23	T	0.675	0.8	134	107.2	0.004	0.25
5	2.85	T	0	0.8	134	107.2	0.004	
6	3.76	V	1	0.8	134	107.2	0.004	3.69
7	3.81	V	1	0.8	134	107.2	0.004	3.69
8	4.46	V	0.675	0.8	134	107.2	0.004	2.49
9	4.82	V	0.225	0.8	134	107.2	0.004	0.83
10	5.38	V	0	0.8	134	107.2	0.004	

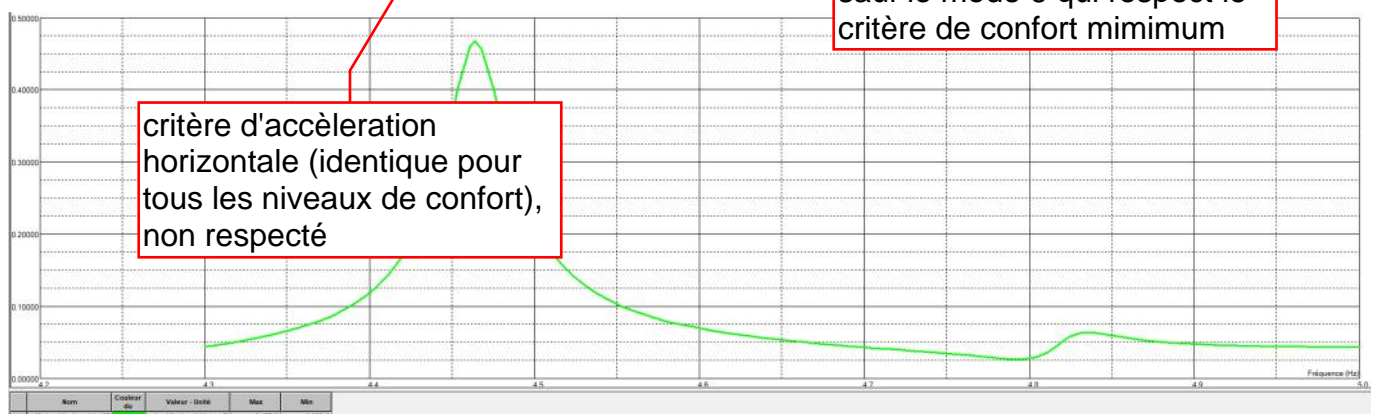
Les cellules en jaune indiquent des modes non analysés avec un coefficient de réduction égale à 0.

9 CONCLUSION ET PROPOSITIONS DE STRATÉGIES DE RENFORCEMENT

On présente les résultats de l'analyse dynamique (type – FRF « analyse harmonique dans le domaine des fréquences ») :

Mode	Fréquence (Hz)	Dominante du mode	Accélération horizontale (m/s²)	Critère accélération hor. (m/s²)	Accélération Verticale (m/s²)	Critère accélération vert. (m/s²)	Conclusion
1	0.38	L					
2	1.6	T	0.03	0.1	0.0004	2.5	OK
3	2.1	T	0.007	0.1	0.00002	2.5	OK
4	2.23	T	0.12001	0.1	0.03282	2.5	NOK
5	2.85	T					
6	3.76	V	0.168	0.1	1.65	2.5	NOK
7	3.81	V	0.01	0.1	0.00003	2.5	OK
8	4.46	V	0.5	0.1	0.1	2.5	NOK
9	4.82	V	0.07	0.1	0.01	2.5	OK
10	5.38	V					

Le diagramme de l'analyse FRF du mode 8 montre une accélération horizontale importante de synchronisation forcée :



Les calculs dynamiques montrent que le confort minimum n'est pas assuré concernant les vibrations horizontales des modes 2, 4, 8 et 9. La valeur admissible de l'accélération horizontale est limitée à 0.1 m/s² afin d'éviter la synchronisation forcée.

Nous pouvons suggérer à la maîtrise d'ouvrage de mettre en place des amortisseurs dynamique accordé (ADA) pour réduire les accélérations horizontales à un niveau acceptable. D'autres stratégies être envisagées tel qu'une augmentation de la rigidité de la structure, etc.

Nota : L'émission du présent rapport met fin à la mission qui nous a été confiée sur cette opération.