

**EXEMPLE D'APPLICATION DU GUIDE SETRA/AFGC  
CACUL DYNAMIQUE D'UNE PASSERELLE :  
PASSERELLE DU MOULIN**

*Arnaud Lemaire : Dpt Construction Métallique, service Etudes – CTICM  
Pascal Charles : Directeur Technique à la Direction des Grands Ouvrages - SETRA*

# SOMMAIRE

1. INTRODUCTION .....	4
2. DESCRIPTION SOMMAIRE DE L'OUVRAGE .....	5
2.1. Tablier.....	6
2.2. Revêtement du platelage.....	6
2.3. Appuis.....	6
3. DEFINITION DE LA NOTION DE CONFORT APPLIQUEE AUX PASSERELLES PIETONNES.....	7
4. CHARGE PIETONNE .....	8
4.1. La fonction « pas » .....	8
4.2. La fonction temporelle de la marche $F(t)$ .....	9
4.3. Foule de piétons .....	10
4.4. Synchronisation forcée d'une foule de piétons .....	10
5. RESUME DE LA METHODOLOGIE .....	11
6. CAHIER DES CHARGES .....	12
6.1. Etape 1 : Détermination de la classe de la passerelle .....	12
6.2. Etape 2 : Choix du niveau de confort.....	13
7. ETUDE DYNAMIQUE .....	13
7.1. Etape préliminaire : Détermination des caractéristiques modales de l'ouvrage.....	14
7.2. Etape 3 : Détermination de la nécessité de mener ou non un calcul avec des cas de charges dynamiques.....	16
7.3. Etape 4 : Application et calcul avec les cas de charges dynamiques .....	18
7.3.1. Cas 1 : Foule répartie dense et peu dense .....	20
7.3.2. Cas 3 : Foule répartie de piétons (effet de la seconde harmonique).....	20
8. RESULTATS ET VERIFICATIONS .....	21
8.1. Etape 5 : Vérifications préliminaires associées au niveau de confort .....	21
8.2. Etape 6 : Vérifications de type E.L.S. spécifiques au comportement dynamique .....	23
8.3. Etape 6 : Vérifications de type E.L.U. spécifiques au comportement dynamique .....	25
9. CONCLUSION .....	27
9.1. Conclusion sur les charges dynamiques appliquées .....	27
9.2. Conclusion sur les vérifications et les résultats obtenus.....	28
10. BIBLIOGRAPHIE .....	28

# 1. INTRODUCTION

Les passerelles piétonnes subissent au cours de leur durée de vie des vibrations mécaniques induites par l'action du vent, la marche de piétons, le passage d'un groupe de coureurs etc. Ces vibrations qui sont la plupart du temps non préjudiciables pour la structure des passerelles peuvent devenir plus ou moins gênantes voire inconfortables pour l'utilisateur.

Le but est donc multiple puisqu'il s'agit à la fois de concevoir des passerelles capables de supporter sans dommage les conditions d'utilisation définies par le Maître d'ouvrage et de vérifier par des calculs et/ou des essais grandeur nature leur comportement réel ou théorique, tout en respectant l'aspect architectural de l'ouvrage. Or très souvent les passerelles sont très élancées et très légères et peuvent devenir par conséquent très sensibles aux vibrations.

Malheureusement les réglementations actuelles françaises et européennes présentent des lacunes ou occultent complètement ce phénomène vibratoire. Ainsi pour répondre aux besoins des concepteurs et des bureaux d'études, le groupe de travail SETRA/AFGC a réalisé un guide méthodologique qui traite de l'évaluation du comportement vibratoire des passerelles piétonnes [1]. Ce guide est paru en mars 2006 et aborde notamment les points suivants :

- les phénomènes dynamiques propres aux passerelles piétonnes ;
- une méthodologie d'analyse dynamique des passerelles ;
- une présentation des méthodes de calcul pratique des fréquences et modes propres, ainsi que la réponse au chargement ;
- des recommandations pour l'élaboration des pièces écrites d'études et de travaux.

Les effets dynamiques dus à l'action du vent sont traités dans un autre document AFGC « Aérodynamique des ponts souples ».

L'objectif de cette note technique est de mettre en application la méthodologie sur une passerelle possédant une géométrie suffisamment simple et régulière afin de comprendre et d'apprécier la ou les difficultés de mise en œuvre de la méthode. L'exemple d'application retenue est la passerelle du Moulin située à Chelles en région parisienne (cf. Revue Construction Métallique n°4/2002 [2]). Cette nouvelle passerelle a remplacé une passerelle ancienne qui avait subi le choc d'une barge.

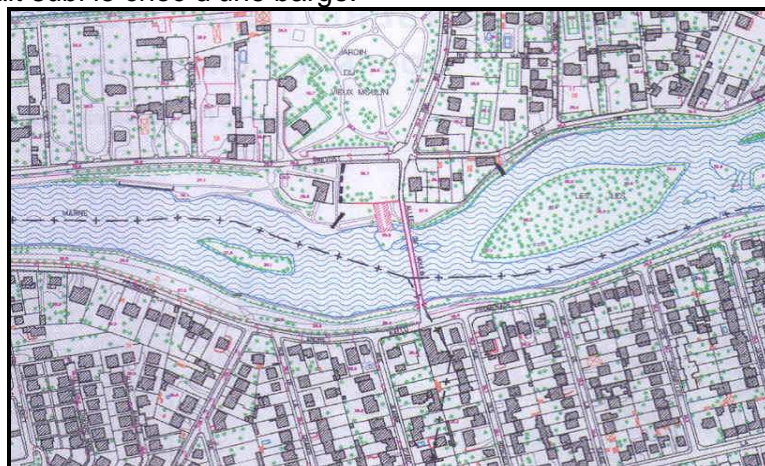


Figure n°1 : Plan de situation

## 2. DESCRIPTION SOMMAIRE DE L'OUVRAGE

L'ouvrage est constitué de 3 travées de longueurs respectives 32.4 m (travée de rive), 40 m (travée centrale) et 33.9 m (travée de rive). La passerelle totalise une longueur de 106.3 m avec une largeur constante de 3.48 m.

	
<p>Vue d'ensemble</p>	<p>Platelage en bois et dalle centrale en béton</p>
	
<p>Vue sous le platelage des PRS et des conduites</p>	<p>Vue du tablier constitué de PRS avant sa mise en place</p>
	
<p>Vue d'un caisson d'appui sur une des piles existantes et traverses HEA 200</p>	<p>Vue d'un grain d'appui sur la culée</p>

Tableau n°1 : Planche photographique de présentation de l'ouvrage

## 2.1. Tablier

Le tablier est composé de quatre poutres principales en profilé reconstitué soudé (PRS) à inertie variable sur les travées de rive et à inertie constante sur la travée centrale (sections n°2 et 3). Deux longerons en PRS (section n°1) à inertie constante de part et d'autre des sections n°2 et n°3 sont disposés sur toute la longueur de l'ouvrage.

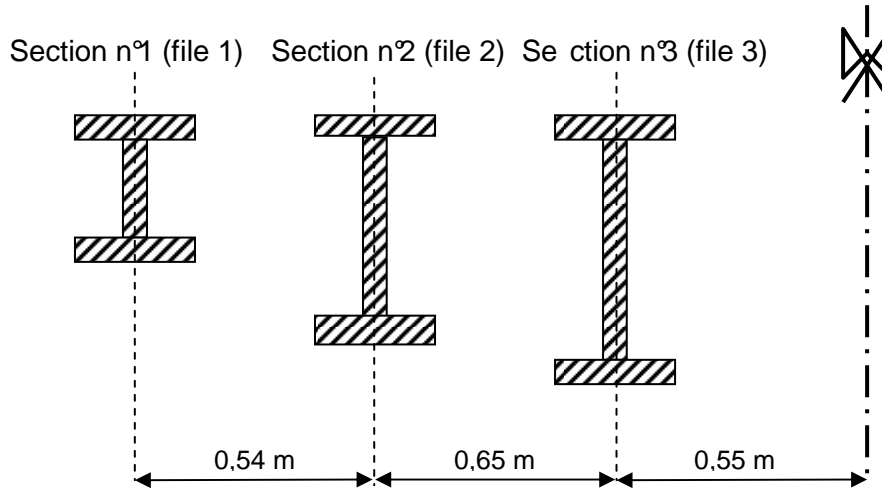


Figure n°2 : Demi-coupe transversale

Note : Toutes les sections sont symétriques.

Section n° (estimée)		Travées de rive	Travée centrale
1	âme	220x15	220x15
	semelles	300x25	300x25
2	âme	450x15	750x15
	semelles	300x25	300x25
3	âme	450x15	1150x15
	semelles	300x25	300x25

Tableau n°2 : Caractéristiques géométriques estimées des sections en PRS

Toutes ces poutres en PRS sont reliées entre elles par des traverses en HEA 200 espacées de 2,205 m. L'ensemble est contreventé par des tubes  $\varnothing 60,3 \times 2$ . Au droit de chaque appui des piles, les traverses en HEA sont remplacées par des poutres en caisson 800x600x15.

## 2.2. Revêtement du platelage

Le platelage est composé en partie centrale d'une dalle en béton (ép. 120 mm) de 1 m de large et d'un platelage en bois (ép. 35 à 40 mm) de part et d'autre de la dalle en béton. La dalle béton ne travaille pas en dalle collaborante.

## 2.3. Appuis

L'appui côté rive droite est réalisé par une articulation (translations  $T_x$ ,  $T_y$  et  $T_z$  bloquées), côté rive gauche l'appui est glissant (translations  $T_x$  et  $T_z$  bloquées). Les appuis glissants sur les piles sont réalisés par des appuis néoprène (les translations  $T_x$  et  $T_z$  sont supposées bloquées).

Note : Les blocages des appuis sont exprimés dans le repère général (cf. figure n°3).

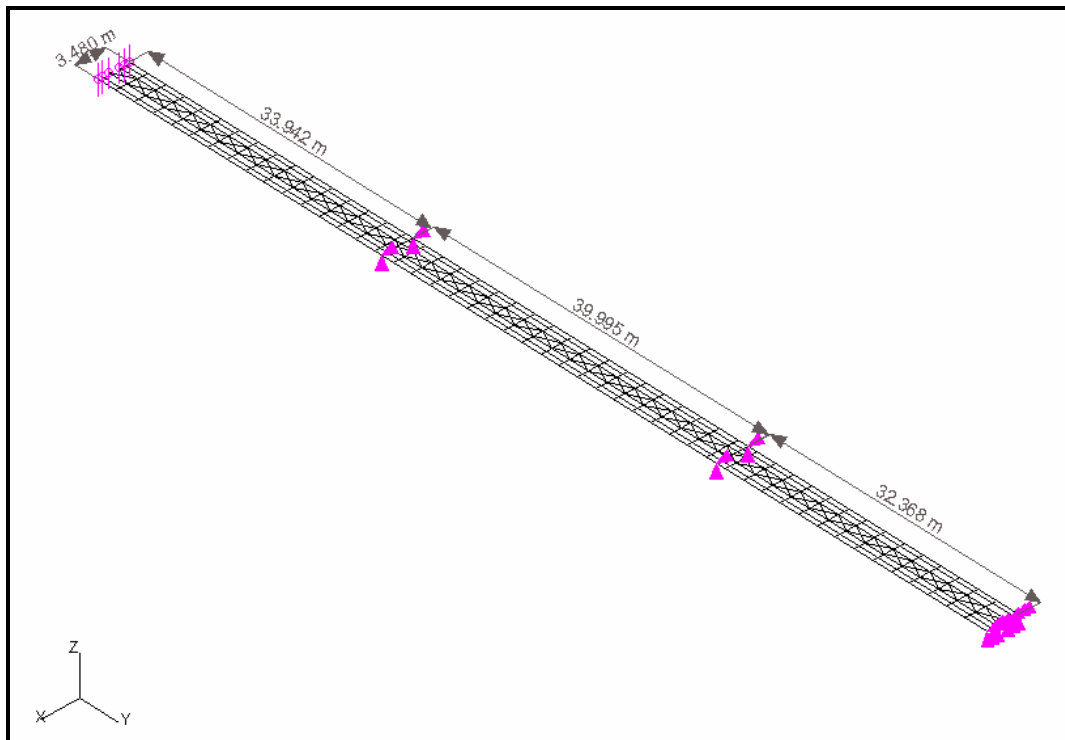


Figure n°3 : Modèle EFFEL général

### 3. DEFINITION DE LA NOTION DE CONFORT APPLIQUEE AUX PASSERELLES PIETONNES

La notion de confort à donner aux passerelles est un paramètre très délicat à apprécier. Cette notion est généralement traduite par un niveau d'accélération exprimé en  $m/s^2$ . Deux critères permettent de déterminer des plages de confort : un critère structurel et un critère physiologique. Dans le cas des passerelles piétonnes, c'est le critère physiologique qui est retenu (le critère structurel n'étant généralement pas dimensionnant pour ce type d'ouvrage). Ce critère est donc très subjectif et difficile à évaluer puisqu'il dépend fortement d'après [3] de nombreux paramètres :

- piéton (âge, sexe) ;
- direction de l'excitation dynamique (par exemple, nous sommes plus sensibles aux vibrations horizontales qu'aux vibrations verticales) ;
- position des piétons (debout, assis, couché) ;
- activité du piéton sur la passerelle (marche, course, arrêt) ;
- fréquence d'occurrence aux vibrations ;
- amortissement de la passerelle.

La notion de confort ne peut donc être **un critère absolu**. Pour évaluer ce critère, le niveau de confort est associé au niveau d'accélération (ou de vitesses ou de déplacements), au temps d'exposition aux vibrations (durée de l'excitation dynamique) et à la fréquence des vibrations (cf. norme ISO 2631 [3]). Le guide AFGC/SETRA retient des critères plus simples, fondés sur le niveau d'accélération.

## 4. CHARGE PIETONNE

D'une manière générale, la marche normale non gênée d'un seul piéton est modélisée par une excitation périodique c'est-à-dire qu'elle se répète à l'identique à des intervalles réguliers de temps. Cette charge peut être représentée comme le produit de deux fonctions, temporelle et spatiale :

$$P(x, t) = \underbrace{F(t)}_{\text{composante temporelle}} \times \underbrace{\delta(x - vt)}_{\text{composante spatiale}}$$

Où  $\delta$  est la fonction de Dirac et  $v$  est la vitesse de déplacement de la charge  $F(t)$ .

### 4.1. La fonction « pas »

L'action d'un seul pied d'un piéton est représentée par la fonction « pas(t) ». Il s'agit d'une fonction temporelle représentant la force d'un seul pied agissant sur le sol pour un intervalle de temps donné (durée de contact avec le sol). Cette fonction dépend de plusieurs paramètres (fréquence du pas, vitesse de la marche, caractéristiques physiologiques, type de chaussures, etc.). Son allure générale est :

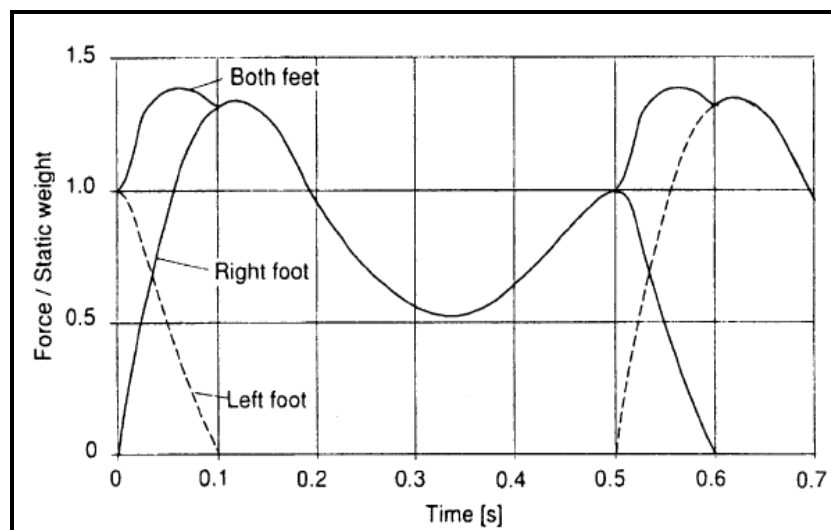


Figure n°4 : Fonction « pas(t) » représentant la force verticale du pied droit (trait continu) agissant sur le sol [4]

Note : Le pas n'agit pas seulement dans la direction verticale mais aussi dans les directions transversale et longitudinale de la marche avec des fréquences et des amplitudes différentes.

## 4.2. La fonction temporelle de la marche F(t)

La marche est caractérisée par un **contact continu** sur le sol contrairement à la course où le contact est discontinu. Pour obtenir la fonction temporelle de la marche (F(t)), il faut représenter une série de fonctions « pas(t) » décalées dans le temps afin de reproduire les pas droit et gauche de la marche d'un piéton. F(t) est donc la modélisation mathématique d'une série de fonctions « pas ».

Pour cela, F(t) est généralement approchée par une série de Fourier (série de fonctions sinusoïdales) qui s'écrit (cf. figure n°4 - both fe et) :

$$F(t) = G_0 + G_1 \sin(2\pi \times f \times t) + \sum_{i=2}^n G_i \sin(2\pi i \times f \times t - \varphi_i)$$

Où  $G_0$  est le poids moyen d'un piéton ( $G_0 = 700 \text{ N}$ ),  $f$  est la fréquence moyenne de la marche et  $\varphi_i$  le déphasage de la  $i^{\text{ème}}$  fonction harmonique avec la première fonction harmonique.

Trois termes en sinus suffisent habituellement pour décrire correctement cette fonction. Ces termes s'appellent les harmoniques de la fonction. Ils seront différents pour chaque composante (verticale, transversale, longitudinale) de la marche.

Dans les modèles de charge piétonne appliqués aux passerelles, seule la première harmonique est généralement considérée. Les composantes de la charge piétonne pour chaque direction sont :

- Verticalement :  $F_v(t) = G_0 + 0,4 \times G_0 \times \sin(2\pi \times f \times t)$  ;
- Transversalement :  $F_t(t) = 0,05 \times G_0 \times \sin(2\pi \times \frac{f}{2} \times t)$  ;
- Longitudinalement :  $F_l(t) = 0,2 \times G_0 \times \sin(2\pi \times f \times t)$  .

Pour la composante transversale, la fréquence de la marche (f) est divisée par deux, c'est-à-dire que l'excitation transversale produite par la marche sur la passerelle est donc d'un pas sur deux.

Pour certaines passerelles, il peut être nécessaire d'étudier la seconde harmonique de la marche. Il s'agit dans ce cas de regarder l'influence des fréquences supérieures de la marche, celles-ci correspondent donc à des fréquences d'excitation doubles de la fréquence de la marche (f) c'est-à-dire à  $2 \times f$ .

Note : Dans les modèles de charge qui sont proposés par la suite, le premier terme « statique » ( $G_0$ ) de la composante verticale est supprimé car il n'intervient pas dans le calcul des niveaux d'accéléérations produits par la marche des piétons.

De plus, la composante spatiale de la marche n'est plus utilisée dans les modèles de charges piétonnes du guide AFGC/SETRA, car ces modèles ne sont pas censés représenter l'action de chaque piéton pris isolément sur la passerelle mais un ensemble de piétons (une foule) traversant continuellement la passerelle.

### 4.3. Foule de piétons

Jusqu'à encore tout récemment le dimensionnement dynamique des passerelles restait principalement fondé sur le cas du modèle de charge théorique d'un seul piéton, et des règles de cumul de ces différents piétons relativement simplistes (les  $n$  piétons aléatoires sont équivalents en moyenne à  $\sqrt{n}$  piétons). Il est manifeste que ces prescriptions sont très insuffisantes et ne permettent pas notamment de couvrir les principaux problèmes posés par l'utilisation de passerelles en zone urbaine soumises plutôt à une fréquentation de groupes de piétons et de foule plus ou moins dense.

Dans le guide AFGC/SETRA sur le comportement dynamique des passerelles piétonnes, plusieurs cas de charge de foule ont donc été élaborés en utilisant des calculs de probabilités et un traitement statistique pour creuser un peu plus la question d'une foule aléatoire. Le modèle retenu finalement consiste à faire circuler des piétons de fréquences aléatoires (suivant une loi normale) et phases aléatoires sur une passerelle présentant différents modes, et d'évaluer à chaque fois le nombre de piétons équivalents, c'est-à-dire le nombre de piétons qui régulièrement répartis sur la passerelle, tous en phase et à la fréquence propre de la passerelle, produiraient le même effet que les piétons aléatoires. La valeur caractéristique (fractile 95%) de ce **nombre de piétons équivalents** est prise en compte.

Un second modèle de foule très dense (tous les piétons aléatoires sont à la même fréquence) a été établi selon le même principe. Il ressort de ces différents tests que le nombre d'ondes du mode  $n$  n'intervient pas dans la réponse pourvu que le chargement équivalent soit placé de sorte qu'en tout point, la projection de la force sur le mode soit de même signe tout le long de la passerelle. Il apparaît aussi que le nombre de piétons équivalents dépend du taux d'amortissement critique ( $\xi$ ). Cela s'explique simplement en remarquant que plus l'amortissement est grand, plus la largeur du pic de résonance sur la courbe d'amplification est importante, et donc un nombre plus important de piétons va présenter une amplification importante.

### 4.4. Synchronisation forcée d'une foule de piétons

La synchronisation forcée se produit lorsqu'une foule de piétons vient progressivement se caler à une fréquence très proche de celle de la passerelle. Les piétons commencent à marcher en phase et en fréquence sur la fréquence propre transversale de l'ouvrage. Le nombre de piétons « équivalent » augmentent alors considérablement (car l'action d'autres piétons présents sur la passerelle vient s'ajouter à celle des piétons « équivalent ») c'est ce qu'on appelle « **l'accrochage fréquentiel** ».

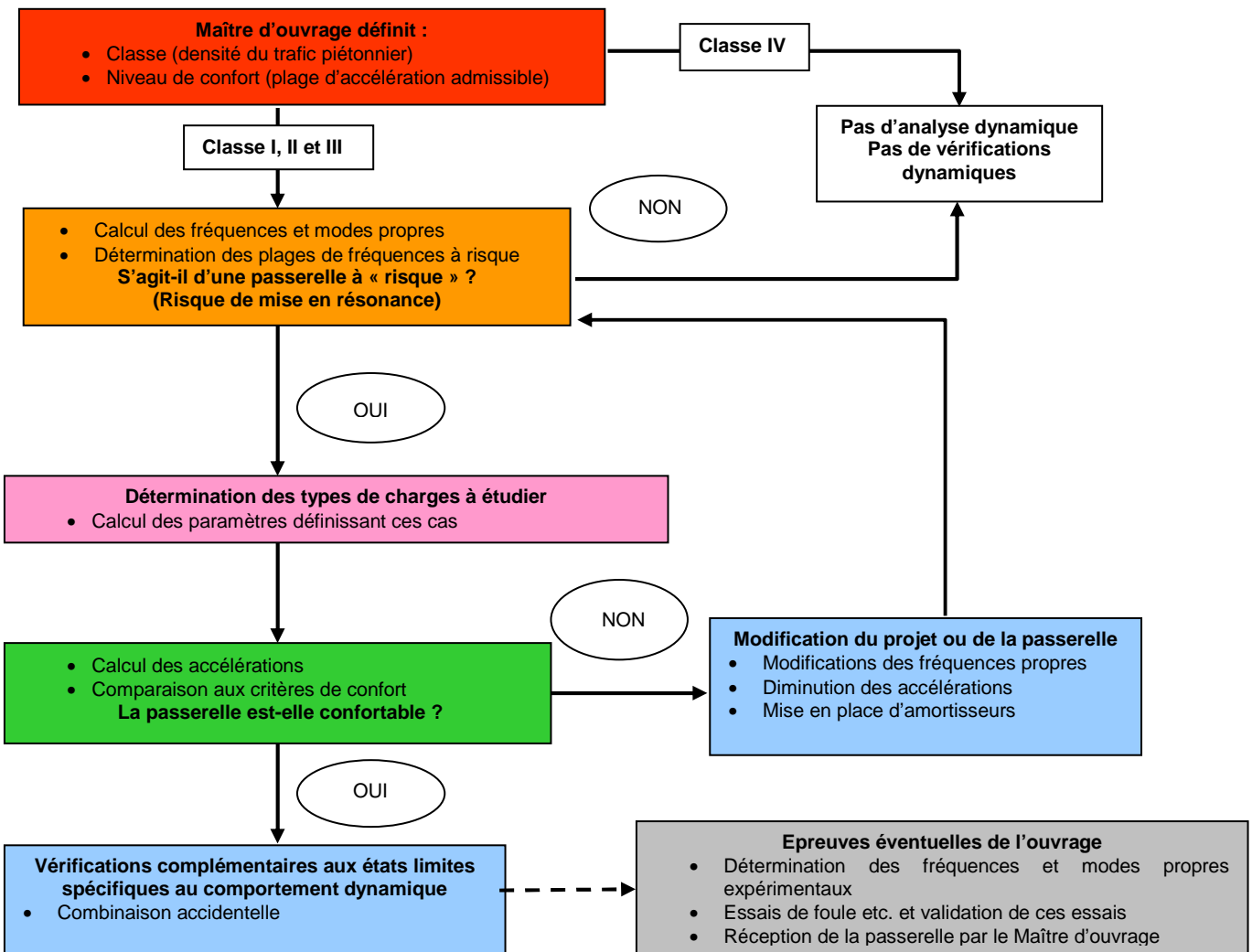
Ce phénomène est apparu notamment sur les modes de vibrations transversales de deux grandes passerelles (Millenium et Solferino). Afin d'éviter tout risque de synchronisation forcée sur les passerelles, le guide AFGC/SETRA préconise de limiter les accélérations transversales à  $0,10 \text{ m/s}^2$  (cf. § 6.2).

## 5. RESUME DE LA METHODOLOGIE

La méthodologie générale d'analyse dynamique du guide AFGC/SETRA à une passerelle se décompose suivant **six grandes étapes** :

- **Etape 1** : Détermination de la classe de la passerelle par évaluation du niveau de trafic ;
- **Etape 2** : Choix du niveau de confort ;
- **Etape 3** : Détermination des fréquences et de la nécessité de mener ou non un calcul dynamique avec des cas de charges dynamiques ;
- **Etape 4** : Calcul avec les cas de charges dynamiques ;
- **Etape 5** : Vérifications préliminaires ;
- **Etape 6** : Vérifications ELS et ELU spécifiques au comportement dynamique ;
- **Etape facultative** : Epreuves éventuelles de l'ouvrage.

Les étapes 1 à 2 sont à la charge du Maître d'ouvrage, les concepteurs et les bureaux d'études sont concernés par les étapes 3 à 6. L'organigramme ci-dessous permet de visualiser la démarche générale :



## 6. CAHIER DES CHARGES

D'après la méthodologie générale du guide AFGC/SETRA, le Maître d'ouvrage doit fixer deux prescriptions au cahier des charges : la classe de la passerelle et le niveau de confort (cf. étapes 1 et 2 du § 5).

### 6.1. Etape 1 : Détermination de la classe de la passerelle

Quatre niveaux de classes sont proposés par le guide :

**Classe I (trafic très dense)** : concerne les passerelles urbaines reliant des zones à forte concentration piétonnière (présence d'une gare ou d'une station de métro à proximité, par exemple) ou fréquemment empruntées par des foules denses (manifestations, touristes ...), soumises à un trafic très important ;

**Classe II (trafic dense)** : concerne les passerelles urbaines reliant des zones peuplées, soumises à un trafic important et pouvant être parfois chargées sur toute leur surface ;

**Classe III (trafic normal)** : concerne les passerelles normalement utilisées, pouvant parfois être traversées par des groupes importants mais sans jamais être chargées sur toute leur surface ;

**Classe IV (trafic faible)** : concerne les passerelles très peu utilisées, construites pour relier des zones très faiblement peuplées ou pour assurer la continuité du cheminement piétonnier dans des zones coupées par une infrastructure de transport (route, rail etc.).

Note : Les passerelles de classe IV échappent à tout calcul de vérification du comportement dynamique.

La passerelle du Moulin relie deux zones urbaines faiblement peuplées (cf. plan de situation – figure n°1). La classe III (trafic normal) doit être retenue. Pour l'intérêt de l'exemple, la passerelle a volontairement été surclassée en classe III (trafic dense). Cependant, il faut bien garder à l'esprit que **le surclassement peut conduire à des modifications importantes du projet initial.**

## 6.2. Étape 2 : Choix du niveau de confort

Le Maître d'ouvrage fixe également le niveau de confort à donner à la passerelle, ce paramètre doit en aucun être un critère absolu (cf. § 3). Trois niveaux de confort associés respectivement à trois plages de confort sont proposés par le guide AFGC/SETRA :

- **Confort maximum (plage 1)** : les accélérations subies par la structure sont pratiquement imperceptibles par les usagers ;
- **Confort moyen (plage 2)** : les accélérations subies par la structure sont simplement perceptibles par les usagers ;
- **Confort minimum (plage 3)** : dans des configurations de chargement peu fréquentes, les accélérations subies par la structure sont ressenties par les usagers, sans pour autant devenir intolérables.

Accélération	0	0,5	1	2,5
Plage 1				
Plage 2				
Plage 3				
Plage 4				

Tableau n°3 : Plages d'accélération (m/s<sup>2</sup>) associées au niveau de confort (vibrations verticales) [1]

Accélération	0	0,10	0,15	0,3	0,8
Plage 1					
Plage 2					
Plage 3					
Plage 4					

Tableau n°4 : Plages d'accélération (m/s<sup>2</sup>) associées au niveau de confort (vibrations horizontales) [1]

Note : La zone 4 correspond à des niveaux d'accélération inconfortables qui ne peuvent pas être acceptés. Pour les vibrations horizontales, le niveau d'accélération est volontairement limité à 0,10 m/s<sup>2</sup> (quel que soit la plage de confort choisie) afin d'éviter les risques de synchronisation forcée (cf. § 4.4).

Pour la passerelle du Moulin, en classe III, le niveau de confort pourra être maximal. Pour l'exemple en classe II (trafic dense - passerelle surclassée), le niveau de confort moyen (plage 2) a été retenu.

## 7. ETUDE DYNAMIQUE

L'étude dynamique proprement dite concerne les étapes 3 et 4 (cf. § 5). Ces étapes permettront de déterminer le risque de mise en résonance et de définir les cas de charges dynamiques à considérer. Une étape définissant les caractéristiques modales de la passerelle doit être menée au préalable.

## 7.1. Étape préliminaire : Détermination des caractéristiques modales de l'ouvrage

La détermination des caractéristiques modales est faite avec deux hypothèses de masse : passerelle vide et passerelle chargée sur toute sa surface. Les masses considérées pour le calcul sont :

	masse totale (t)	
ossature métallique	127	masse surfacique et linéaire des éléments
raidisseurs, soudure etc. (10% de la masse de l'ossature)	13	$\frac{13}{3.48 \times 106.3} = 35 \text{ kg/m}^2$
platelage béton	40	$\frac{40}{1.1 \times 106.3} = 342 \text{ kg/m}^2$
platelage bois	12	$\frac{12}{(0.65 + 0.54) \times 2 \times 106.3} = 48 \text{ kg/m}^2$
équipements + garde-corps	20	$\frac{20}{2 \times 106.3} = 94 \text{ kg/ml}$
Total	212	

Tableau n°3 : Masses prises en compte pour le calcul

Pour la passerelle chargée, une masse surfacique de  $70 \text{ kg/m}^2$  est appliquée sur toute sa surface (soit une masse additionnelle de 26 t environ). Toutes les fréquences propres calculées seront donc sensiblement plus faibles.

La recherche des modes et fréquences propres est menée à l'aide du logiciel aux éléments finis EFFEL v13.1. De façon générale seuls les modes en dessous de 5 Hz ont une importance, c'est pourquoi seuls les dix premiers modes et fréquences propres sont déterminés.

Mode N°	Fréquence (Hz)		Mode de vibration
	Passerelle vide	Passerelle chargée	
1	1,43	1,35	v
2	1,61	1,53	v (torsion)
3	1,78	1,70	v (torsion)
4	1,96	1,85	v
5	2,14	2,04	v (torsion)
6	2,63	2,48	t
7	2,72	2,57	v
8	3,14	2,96	t
9	3,23	3,05	t
10	5,04	4,80	v (torsion)

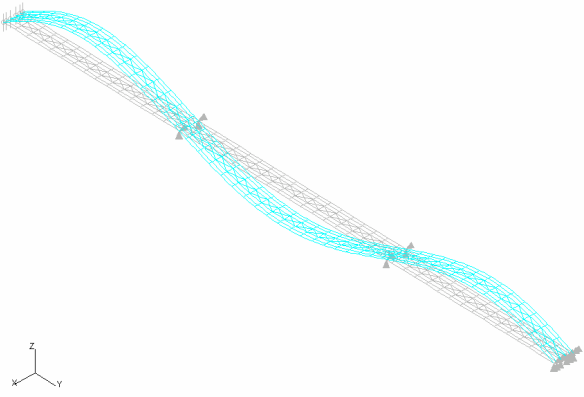
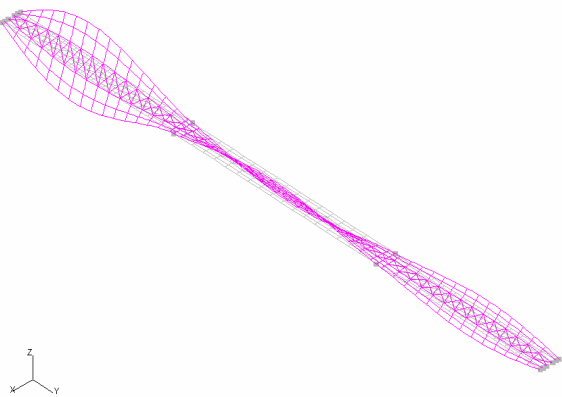
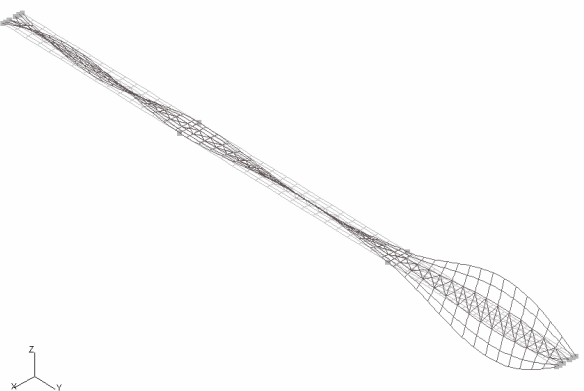
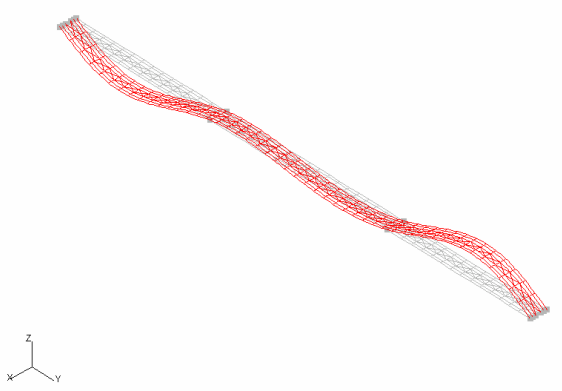
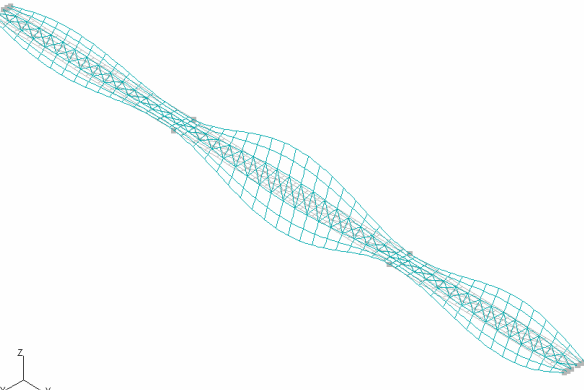
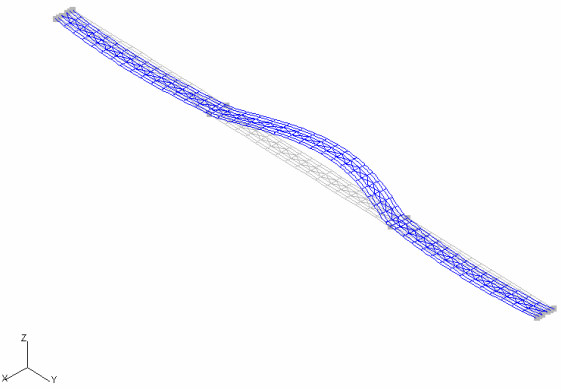
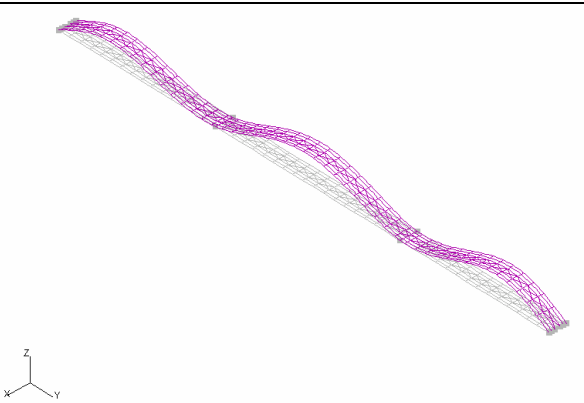
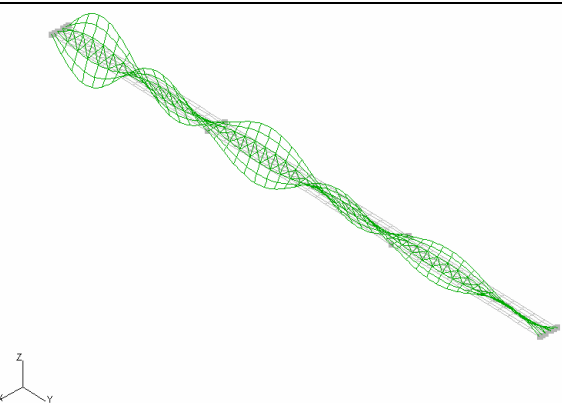
Tableau n°4 : Fréquences propres

v : mode de vibration à dominante verticale

t : mode de vibration à dominante horizontale de type transversale

Note : Le mode de vibration de torsion du tablier est considéré dans notre exemple comme un mode de vibration à dominante verticale car les vibrations horizontales sont quasi-nulles.

Le tableau ci-dessous représente l'allure des déformées modales de la passerelle vide :

	
<p>mode n°1 – 1.43 Hz – flexion verticale</p>	<p>mode n°2 – 1.61 Hz – torsion</p>
	
<p>mode n°3 – 1.78 Hz – torsion</p>	<p>mode n°4 – 1.96 Hz – flexion verticale</p>
	
<p>mode n°5 – 2.14 Hz – torsion</p>	<p>mode n°6 – 2.63 Hz – flexion transversale</p>
	
<p>mode n°7 – 2.72 Hz – flexion verticale</p>	<p>mode n°10 – 5.04 Hz – torsion</p>

Note : Les déformées modales de la passerelle chargée conservent la même allure.

### Amortissement :

Toutes les structures sont amorties ; il est rappelé que les origines de cet amortissement peuvent être multiples et diverses : frottements, amortissement intrinsèque du ou des matériaux, jeux dans les assemblages boulonnés, etc. Il est donc impossible de trouver une représentation mathématique correcte de cet effet.

L'amortissement introduit dans la suite des calculs est de type structural, il est défini par un taux d'amortissement ( $\xi$ ). Ce paramètre reste néanmoins très délicat à évaluer puisqu'il dépend de l'amplitude du mouvement mais est quasi indépendant de la fréquence.

Deux taux d'amortissement critique seront utilisés pour chaque type vérification E.L.S. et E.L.U. Dans le cas de vérifications des critères de confort vibratoire (E.L.S.) et pour une structure en acier, le taux d'amortissement préconisé est :

- $\xi = 0,4 \%$  (valeur moyenne)

Note : Ce taux est généralement compris entre 0,1% et 2%.

Dans le cas de vérifications de critères de résistance (E.L.U.), le guide AFPS 92 sur la protection parasismique des ponts indique un taux d'amortissement de :

- $\xi = 2 \%$  pour les aciers soudés

## 7.2. Étape 3 : Détermination de la nécessité de mener ou non un calcul avec des cas de charges dynamiques

Les risques de mise en résonance sont définis en quatre plages distinctes :

- **Plage 1** : risque maximal de mise en résonance, quel que soit le type de chargement envisagé (piétons isolés ou foule) ;
- **Plage 2** : risque moyen de mise en résonance ;
- **Plage 3** : risque faible de mise en résonance pour les situations courantes de chargement ;
- **Plage 4** : risque négligeable de mise en résonance.

A chaque fréquence et mode propre calculé précédemment, est associée une plage de fréquences à risque :

Fréquence	0	1	1,7	2	2,1	2,6	5
Plage 1							
Plage 2							
Plage 3							
Plage 4							

Tableau n°5 : Plages de fréquences à risque (Hz) de s vibrations verticales (v) et longitudinales [1]

Il est à noter que la majorité des fréquences de la marche non gênée est située dans la plage de risque maximal.

Fréquence	0	0,3	0,5	0,8	1,1	1,3	2,5	
Plage 1								
Plage 2								
Plage 3								
Plage 4								

Tableau n°6 : Plages de fréquences à risque (Hz) de s vibrations transversales (t) [1]

A partir de la plage à risque et de la classe de la passerelle, le nombre et le type de cas de charges dynamiques à étudier peuvent être déterminés (cf. tableau à double entrée ci-dessous).

Trafic	Classe	Calcul des fréquences propres	Cas de charge à étudier			
			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

Tableau n°7 : Vérifications dynamiques à mener [1]

**cas 1** : foule peu dense et dense de piétons

**cas 3** : complément pour une foule (seconde harmonique)

**cas 2** : foule très dense de piétons

Ainsi pour la passerelle du Moulin en classe II, seules les fréquences propres placées sur les plages de fréquences 1 à 3 présentent un risque de mise en résonance. L'étude se limite donc au cas n°1 et 3 : cas de la foule dense de piétons et complément pour une foule. Il s'agit donc des modes de vibrations verticales n°1 à 7 et n°10 :

Passerelle du Moulin surclassée - Classe II (trafic dense)

Mode N°	Type de vibration	Passerelle vide		Passerelle chargée		Cas de charge à étudier
		Fréquence (Hz)	Plage de fréquence	Fréquence (Hz)	Plage de fréquence	
1	v	1,43	2	1,35	2	1
2	v	1,61	2	1,53	2	1
3	v	1,78	1	1,70	1	1
4	v	1,96	1	1,85	1	1
5	v	2,14	2	2,04	1	1
6	t	2,63	4	2,48	3	3
7	v	2,72	3	2,57	2	1 et 3
8	t	3,14	4	2,96	4	Aucun
9	t	3,23	4	3,05	4	Aucun
10	v	5,04	4	4,80	3	3

Tableau n°8 : Classement des fréquences par plage de risque

### Remarques :

D'une façon générale, cette passerelle semble donc peu sensible aux modes de vibrations transversales pour l'étude en classe II (seul le mode n°6 est concerné lorsque la passerelle est complètement chargée).

La passerelle chargée avec une densité de piétons de  $70 \text{ kg/m}^2$  permet de réduire sensiblement ses fréquences propres (environ 6 %)\* provoquant ainsi un décalage des fréquences propres. Certains modes de vibrations (5, 6, 7 et 10) passent donc d'une plage de fréquences à risque inférieure ou supérieure.

(\*) : Dans le cas de passerelles plus légères, cette réduction serait plus importante à surface égale.

En classe III (trafic normal), seuls les modes n°3, 4 et 5 seraient à étudier. En classe II, les cas de charges dynamiques retenus sont donc :

- **cas 1** : Foule répartie de piétons (foule dense et peu dense) ;
- **cas 3** : Complément pour une foule répartie de piétons (effet de la seconde harmonique).

### **7.3. Étape 4 : Application et calcul avec les cas de charges dynamiques**

Cette étape est consacrée à la description des cas de charges dynamiques et à la manière dont ils sont appliqués dans le modèle de calcul.

La marche de la foule répartie de piétons est définie comme une charge surfacique uniformément répartie et sinusoïdale (excitation harmonique), l'expression générale est :

Direction	Charge sinusoïdale ( $\text{N/m}^2$ )
verticale, longitudinale, transversale	$\frac{G_1}{S} \times \cos(2\pi f \times t) \times \psi \times n'$

Tableau n°9 : Expression générale pour la marche de s piétons

Note : Ces cas de charges dynamiques ne doivent pas être appliqués dans plusieurs directions à la fois, ils sont à considérer séparément.

Plusieurs paramètres interviennent :

- la force ( $G_1$ ) exprimée en newton, il s'agit de la composante dynamique d'un seul piéton (suivant les cas, première ou seconde harmonique de la marche – cf. § 4.2) ;
- la surface totale de la passerelle (S) ;
- la fréquence propre considérée de la passerelle (f – cf. § 7.1) ;
- un coefficient de réduction ( $\psi$ ) ;
- le nombre de piétons « équivalents » ( $n'$ ).

L'intensité de la force ( $G_1$ ) varie suivant la direction du mode de vibration que l'on cherche à exciter ;  $0,4 \times G_0 = 0,4 \times 700 = 280 \text{ N}$  par piéton pour les directions verticales,  $0,05 \times G_0 = 0,05 \times 700 = 35 \text{ N}$  pour les directions transversales.

Le coefficient de réduction ( $\psi$ ) varie entre 0 et 1, il traduit la probabilité de mise en résonance de la passerelle par la foule de piétons. Il est donc fonction de la fréquence propre de la passerelle et de la direction du mode de vibrations.

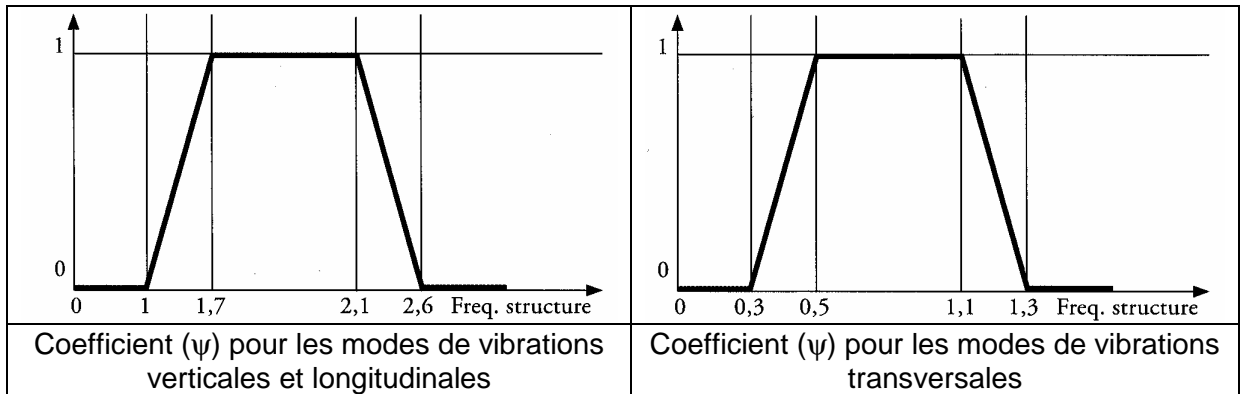


Tableau n°10 : Coefficient de réduction ( $\psi$ ) pour les cas de charges dynamiques n°1 [1]

Nombre équivalent :

Le nombre de piétons « équivalents » est :  $n' = 10,8 \times (\xi \times n)^{1/2}$ , il s'agit en réalité du nombre équivalent de piétons marchant en phase et à la fréquence propre d'un mode considéré de la passerelle par rapport à un nombre total de piétons ( $n$ ) marchant avec une phase et une fréquence aléatoires sur la surface totale de la passerelle ( $S = 370 \text{ m}^2$ ).

Note : Ce nombre devient :  $n' = 1,85 \times (n)^{1/2}$ , pour les passerelles de classe I.

Ce nombre « équivalent » de piétons est donc fonction du taux d'amortissement ( $\xi$ ) et du nombre total de piétons ( $n$ ) qui est défini par :  $n = S \times d$  où  $d$  est la densité de piétons.

La densité de piétons dépend essentiellement du niveau de trafic et par conséquent de la classe de la passerelle. Pour les passerelles de classe II, la densité à prendre en compte est :  $d = 0,8 \text{ piéton / m}^2$  (en classe III,  $d = 0,5 \text{ piéton / m}^2$ ).

Le nombre de piétons « équivalents » pour la passerelle du Moulin est donc :

$$n' = 10,8 \times (0,004 \times 370 \times 0,8)^{1/2} = 11,75$$

Sens du chargement :

Le sens du chargement est fonction de l'allure de la déformée modale considérée. En principe, il varie pour chaque mode propre (cf. figure ci-dessous – mode n°1).

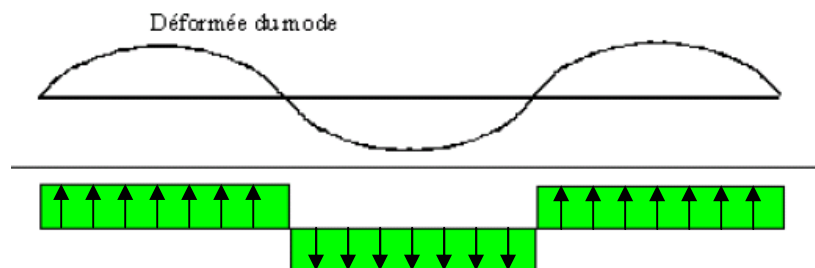


Figure n°5 : Positionnement de la foule de piétons su ivant la déformée modale [1]

Note : Pour les modes de torsion, un chargement en « damier » est adopté.

### 7.3.1. Cas 1 : Foule répartie dense et peu dense

Dans le cas d'une foule dense, l'expression de la marche de la foule s'écrit [1] :

Direction	Charge sinusoïdale (N/m <sup>2</sup> )
verticale	$d \times 280 \times \cos(2\pi f_v t) \times 10,8 \times \left(\frac{\xi}{n}\right)^{1/2} \times \psi_v$
transversale	$d \times 35 \times \cos(2\pi f_t t) \times 10,8 \times \left(\frac{\xi}{n}\right)^{1/2} \times \psi_t$

Ainsi pour la passerelle du Moulin en classe II, le calcul des paramètres de la charge d'excitation sont :

Mode N°	Type de vibration	Fréquence d'excitation (Hz)	Facteur de réduction ( $\psi$ )	Amplitude de l'excitation (N/m <sup>2</sup> )	Fréquence d'excitation (Hz)	Facteur de réduction ( $\psi$ )	Amplitude de l'excitation (N/m <sup>2</sup> )
1	v	1,43	0,61	5,5	1,35	0,50	4,4
2	v	1,61	0,87	7,7	1,53	0,76	6,7
3	v	1,78	1,00	8,9	1,70	1,00	8,9
4	v	1,96	1,00	8,9	1,85	1,00	8,9
5	v	2,14	0,92	8,2	2,04	1,00	8,9
6	t	2,63			2,48		
7	v	2,72			2,57	0,06	0,5

Tableau n°11 : Passerelle du Moulin surclassée - Classe II (trafic dense)

### 7.3.2. Cas 3 : Foule répartie de piétons (effet de la seconde harmonique)

L'effet de la seconde harmonique de la sollicitation de la marche des piétons est à considérer pour le cas de la passerelle chargée (cf. 7.2.) et concerne seulement les deux modes de vibrations n°6 (transversales), n°7 et 10 (verticales). La charge sinusoïdale suivante est appliquée [1] :

Direction	Charge sinusoïdale (N/m <sup>2</sup> )
verticale (v)	$d \times 70 \times \cos(2\pi f_v t) \times 10,8 \times \left(\frac{\xi}{n}\right)^{1/2} \times \psi_v$
transversale (t)	$d \times 7 \times \cos(2\pi f_t t) \times 10,8 \times \left(\frac{\xi}{n}\right)^{1/2} \times \psi_t$

Avec  $d = 0,8$  piéton /  $m^2$ ,  $\xi = 0,4 \%$  et en appliquant les coefficients de réduction suivants :

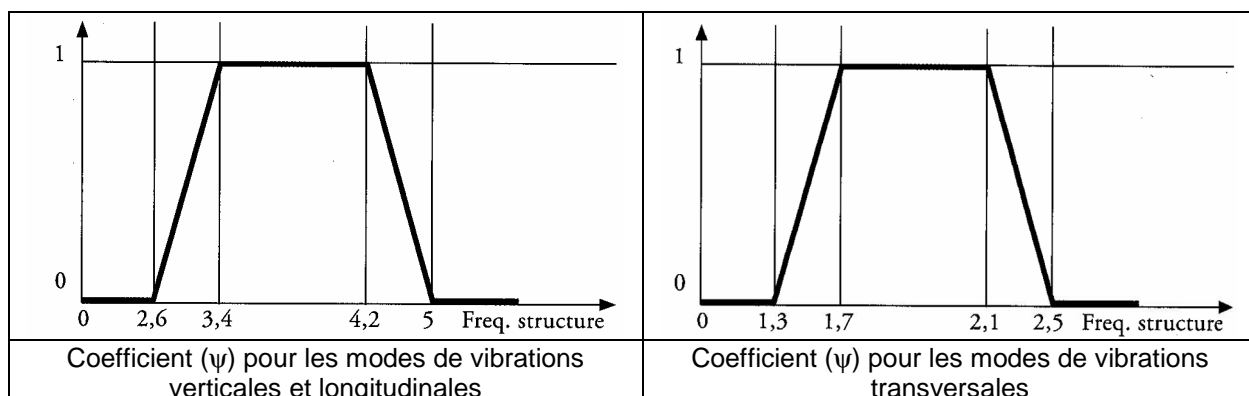


Figure n°6 : Coefficient de réduction [1]

Les paramètres ainsi calculés de la charge sinusoïdale sont donnés dans le tableau suivant :

Mode N°	Type de vibration	Fréquence d'excitation (Hz)	Facteur de réduction ( $\psi$ )	Amplitude de l'excitation ( $N/m^2$ )	Fréquence d'excitation (Hz)	Facteur de réduction ( $\psi$ )	Amplitude de l'excitation ( $N/m^2$ )
6	t	2,63			2,48	0,05	0,1
7	v	2,72	0,15	1,3	2,57		
8	t	3,14			2,96		
9	t	3,23			3,05		
10	v	5,04			4,80	0,25	7,8

Tableau n°12 : Passerelle du Moulin surclassée - Classe II (trafic dense)

## 8. RESULTATS ET VERIFICATIONS

Les vérifications spécifiques au comportement dynamique concernent les étapes 5 et 6 (cf. § 5). Ce chapitre expose également les principaux résultats. Toutes les vérifications doivent être ajoutées aux vérifications réglementaires actuelles (fascicule n°1 notamment).

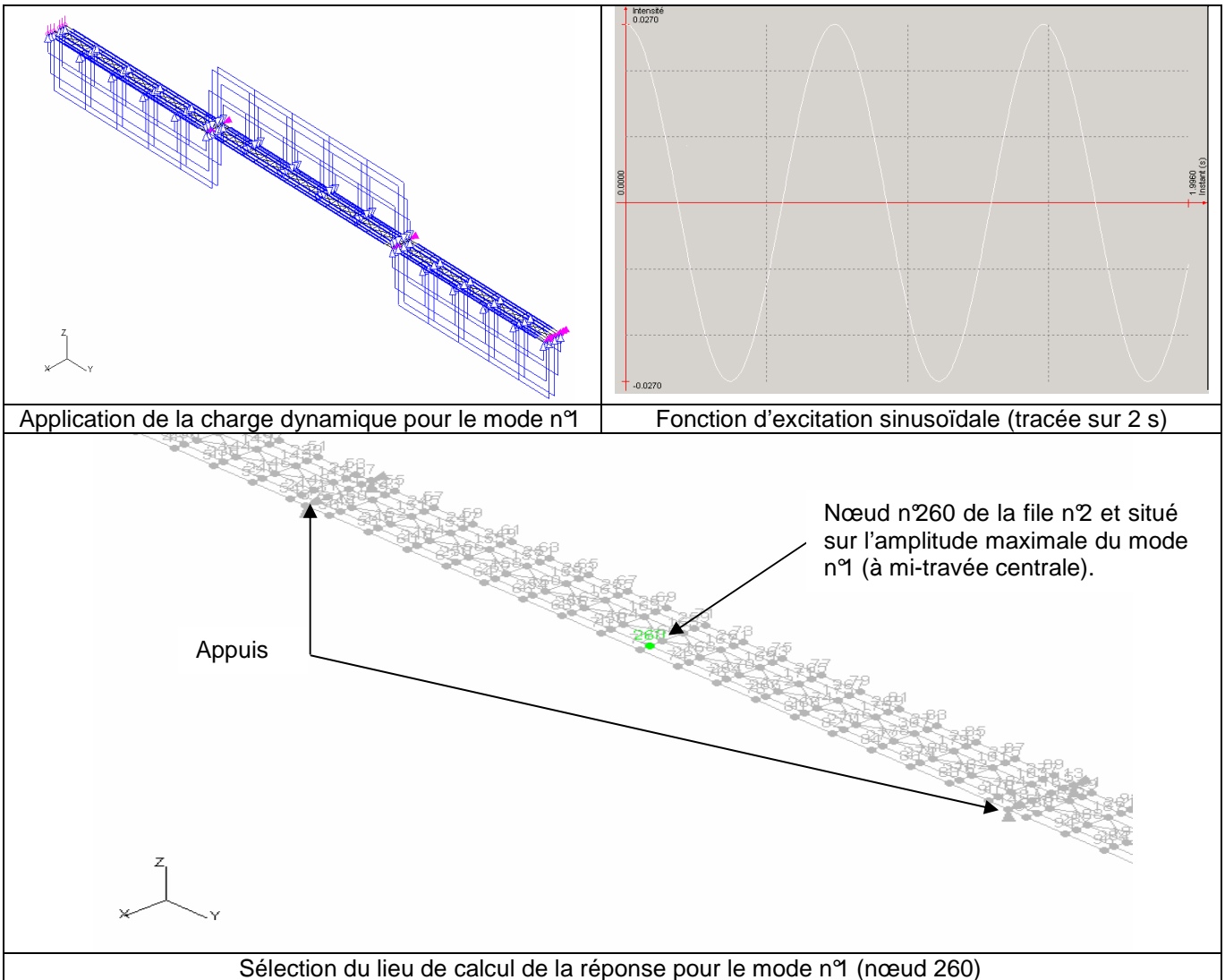
### 8.1. Etape 5 : Vérifications préliminaires associées au niveau de confort

Il s'agit de calculer le niveau d'accélération sur le tablier de la passerelle pour chaque cas de charges dynamiques défini précédemment, ils seront notés par la suite  $Q_{p_{dyn}}$ . Les résultats ainsi obtenus sont comparés à la zone de confort considérée par le Maître d'ouvrage (cf. § 6.2). En surclassant la passerelle (classe II - trafic dense) et en choisissant un niveau de confort moyen, les accélérations calculées doivent satisfaire :

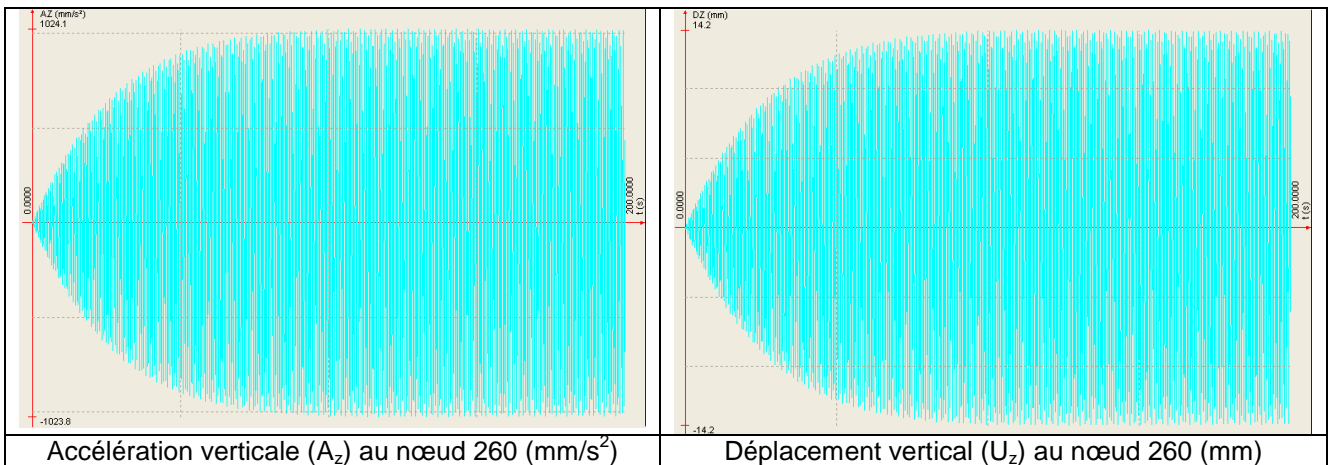
- Accélérations verticales calculées :  $A_z < 1,0 \text{ m/s}^2$
- Accélérations transversales calculées :  $A_x < 0,1 \text{ m/s}^2$

Les résultats en terme d'accélérations sont calculés sur des nœuds du modèle situés sur la file n°2 (PRS intermédiaire – cf. § 2.1) et au niveau de l'amplitude maximale de la déformée modale considérée. Les accélérations sont données dans le repère général.

Exemple de déroulement d'un calcul temporel :



La réponse dynamique au chargement  $Q_{p,dyn}$  associée au mode n°1 de la passerelle vide est tracée ci-dessous :



Figures n°7 : Réponse du nœud 260 (file n°2) tracée sur 200 s

## Résultats :

Les tableaux ci-dessous donnent les principaux résultats des cas de chargement n°1 et n°3.

Mode N°	Type de vibration	Fréquence d'excitation (Hz)	Réponse Az (m/s <sup>2</sup> )
1	v	1,35	1,024
2	v	1,53	0,938
3	v	1,70	1,734
4	v	1,85	2,095
5	v	2,04	0,206
6	t	2,48	
7	v	2,57	0,124

Tableau n°13 : Résultats du cas de chargement n°1

Mode N°	Type de vibration	Fréquence d'excitation (Hz)	Réponse Ax (m/s <sup>2</sup> )	Réponse Az (m/s <sup>2</sup> )
6	t	2,48	0,006	0,000
7	v	2,57		
8	t	2,96		
9	t	3,05		
10	v	4,80	0,000	0,294

Tableau n°14 : Résultats du cas de chargement n°3

En surclassant la passerelle du Moulin, les critères de confort moyen (1,0 m/s<sup>2</sup> pour les accélérations verticales et 0,1 m/s<sup>2</sup> pour les accélérations horizontales) sont respectés pour tous les modes transversaux présentant un risque de mise en résonance. En revanche, seuls les modes verticaux n°3 et n°4 dépassent le critère de confort mais ils restent néanmoins dans la plage de confort minimal (< 2,5 m/s<sup>2</sup>).

De plus, la faible portée des travées conduit à avoir des réponses en accélérations très faibles (0,006 m/s<sup>2</sup>) pour des excitations horizontales ce qui place la passerelle du Moulin en sécurité vis-à-vis des risques de synchronisation forcée.

### 8.2. Etape 6 : Vérifications de type E.L.S. spécifiques au comportement dynamique

La combinaison ci-dessous aux E.L.S. spécifique au comportement dynamique doit être formée :

$$CP + Q_{p_{stat}} + Q_{p_{dyn}}$$

Où CP représente les charges permanentes et  $Q_{p_{stat}}$  la charge statique de piétons associée au cas de charge dynamique ( $Q_{p_{dyn}}$ ). Le chargement  $Q_{p_{stat}}$  correspond aux poids des piétons (1 piéton = 700 N) disposé sur la surface totale de la passerelle. Les effets statiques et dynamiques sont cumulés. Deux critères doivent alors être vérifiés :

- Flèche admissible :  $f < l / 500 = \pm 70$  mm avec  $l = 35$  m.
- Contraintes admissibles :  $\sigma < f_y = 345$  MPa

Exemple :

L'exemple ci-après montre l'allure de la réponse de calcul des contraintes normales dans un élément de la structure porteuse de la passerelle (PRS intermédiaire – file n°2).

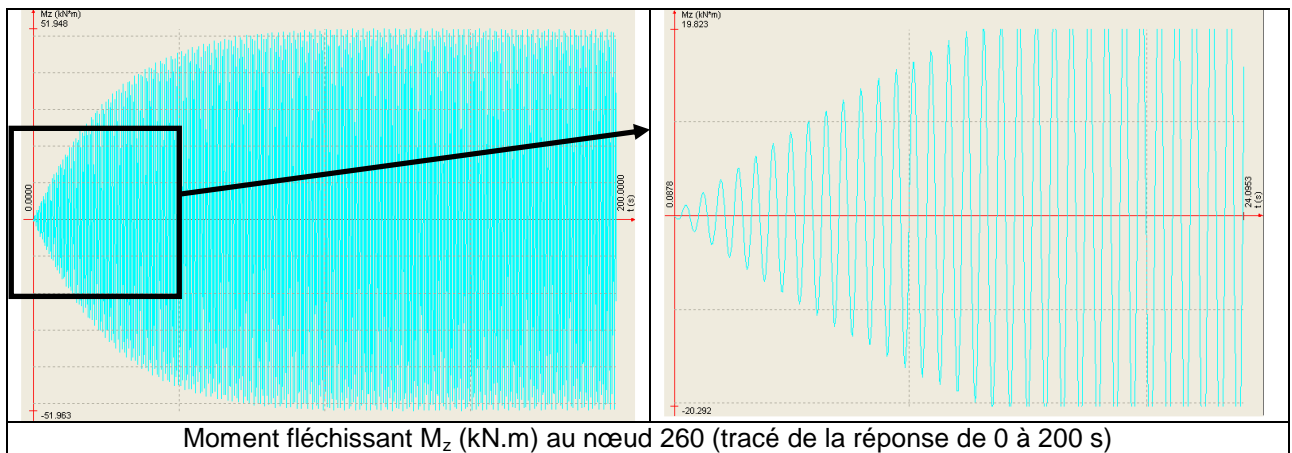


Figure n°8 : Réponse en terme d'effort (moment fléchissant) à une excitation harmonique

Résultats :

Les tableaux ci-dessous sont les principaux résultats de calcul des différents chargements dynamiques appliqués en terme de déplacements et d'état de contraintes normales pour les files n°2 et n°3 :

FILE N°2 (section 2)							
Mode n°	Fréquence (Hz)	$U_z$ (mm) dynamique	$\sigma_{xx}$ (MPa) dynamique	$U_z$ (mm) statique	$\sigma_{xx}$ (MPa) statique	$U_z$ (mm) global	$\sigma_{xx}$ (MPa) global
1	1,35	14	8	23	24	37	32
2	1,53	20	13	53	30	73	43
3	1,70	8	6	53	30	61	36
4	1,85	16	11	53	30	69	41
5	2,04	1	1	23	24	24	25
7	2,57	1	0	23	24	24	24
FILE N°3 (section 3)							
Mode n°	Fréquence (Hz)	$U_z$ (mm) dynamique	$\sigma_{xx}$ (MPa) dynamique	$U_z$ (mm) statique	$\sigma_{xx}$ (MPa) statique	$U_z$ (mm) global	$\sigma_{xx}$ (MPa) global
1	1,35	14	11	23	37	37	48
2	1,53	9	8	53	40	62	48
3	1,70	4	4	53	40	57	44
4	1,85	16	14	53	40	69	54
5	2,04	1	1	23	37	24	38
7	2,57	1	1	23	37	24	38

Tableau n°15 : Résultats aux E.L.S.

Les déplacements et l'état des contraintes normales calculés dans les poutres principales sont donc acceptables.

### 8.3. Etape 6 : Vérifications de type E.L.U. spécifiques au comportement dynamique

Ces vérifications en résistance sont effectuées sous une combinaison de charge dynamique exceptionnelle comme le vandalisme, les manifestations, etc. Pour les vérifications en résistance de la passerelle, le taux d'amortissement ( $\xi$ ) choisi est de 2 % (construction soudée – cf. § 7.1).

La combinaison accidentelle suivante doit être formée :

$$CP + Q_{p_{a,stat}} + Q_{p_{a,dyn}}$$

Où CP représente les charges permanentes et  $Q_{p_{a,stat}}$  est un chargement accidentel statique associé à son chargement dynamique accidentel  $Q_{p_{a,dyn}}$ . Ces charges sont définies ci-dessous :

- $Q_{p_{a,stat}}$  : la charge statique associée a pour valeur  $700 \text{ N/m}^2$  et est appliquée sur la surface totale de la passerelle ;
- $Q_{p_{a,dyn}}$  est une charge piétonne dynamique accidentelle qui décrit une situation de service exceptionnelle. L'excitation s'écrit de la manière suivante :

Direction	Charge sinusoïdale ( $\text{N/m}^2$ )	Modes à retenir
verticale (v)	$d \times 280 \times \cos(2\pi f_v t)$	tous jusqu'à 5 Hz
transversale (t)	$d \times 35 \times \cos(2\pi f_t t)$	tous jusqu'à 2.5 Hz

Tableau n°16 : Cas de charge dynamique accidentelle

Note : Ces cas de charges dynamiques ne sont pas appliqués simultanément.

#### Remarque :

Quelle que soit la classe de la passerelle, les excitations dynamiques sont semblables au cas de charge n°1 (cas de la foule peu dense et dense) avec quelques différences importantes :

- la densité (d) de la foule est prise à  $1 \text{ piéton/m}^2$  ;
- le nombre « équivalent » de piétons ( $n'$ ) est égal au nombre de piétons sur la surface totale (S) :  $n' = n = S \times d$  ;
- le coefficient de coïncidence ( $\psi$ ) de mise en résonance avec la passerelle est pris égal à l'unité :  $\psi = 1$ .

Tous les piétons positionnés sur la surface de la passerelle sont donc supposés parfaitement synchronisés en phase et en fréquence.

Le tableau suivant fournit les modes de vibrations à prendre en compte pour le cas accidentel de la passerelle chargée (70 kg/m<sup>2</sup>) :

Mode N°	Fréquence (Hz)	Type de vibration	Cas de charge à retenir
1	1,35	v	Oui
2	1,53	v	Oui
3	1,70	v	Oui
4	1,85	v	Oui
5	2,04	v	Oui
6	2,48	t	Oui
7	2,57	v	Oui
8	2,96	t	Non
9	3,05	t	Non
10	4,80	v	Oui

Tableau n°16 : Vérification sous chargement dynamique accidentelle à mener

Les vérifications en résistance portent sur les critères suivants (cf. titre V du fascicule 61) :

- $\sigma < f_y = 345$  MPa pour les contraintes normales ;
- $\tau < 0.6 \times f_y = 207$  MPa pour les contraintes tangentes.

Les effets du chargement dynamique sont cumulés au chargement statique appliqué sur la surface de la passerelle (S) par 700 N/m<sup>2</sup>. Les réponses en terme de contraintes dans la structure sont donnés pour les files n°2 et n°3 :

FILE N°2 (section 2)				
Mode n°	Fréquence (Hz)	$\sigma_{xx}$ (MPa) dynamique	$\sigma_{xx}$ (MPa) statique	$\sigma_{xx}$ (MPa) global
1	1,35	103	24	127
2	1,53	106	30	136
3	1,70	26	30	56
4	1,85	58	30	88
5	2,04	9	24	33
6	2,48	1	0	1
7	2,57	47	24	71
10	4,80	8	11	19
FILE N°3 (section 3)				
Mode n°	Fréquence (Hz)	$\sigma_{xx}$ (MPa) dynamique	$\sigma_{xx}$ (MPa) statique	$\sigma_{xx}$ (MPa) global
1	1,35	154	37	191
2	1,53	64	40	104
3	1,70	16	40	56
4	1,85	76	40	116
5	2,04	6	37	43
6	2,48	1	0	1
7	2,57	76	37	113
10	4,80	5	19	24

Tableau n°17 : Résultats aux E.L.U.

En cas d'excitation intentionnelle, l'état des contraintes calculé dans les files n°2 et n°3 des PRS sont très acceptables. Le taux de travail calculé dans les sections est au maximum de 56% (file n°3 - mode n°1) du taux de travail admissible, la résistance de la structure est donc assurée quel que soit le mode de vibration de la passerelle.

#### Remarque :

Les contraintes normales sont parfois plus importantes sur les appuis sous le chargement statique accidentel ( $Q_{p,stat}$ ). En revanche, les sollicitations apportées par les charges dynamiques accidentelles sur les appuis restent très faibles, ce qui semble assez normal dans le sens où les appuis constituent à chaque fois un « nœud de vibration ».

## 9. CONCLUSION

### Quelques mots sur les choix du Maître d'ouvrage...

Le Maître d'ouvrage doit donc définir un niveau de classe de passerelle qui sera déterminé en fonction de la situation géographique actuelle et de son évolution future. Le niveau de confort est plus délicat à choisir, car il peut être pris beaucoup plus subjectivement selon des choix économiques, politiques, etc. Ce dernier critère ne doit pas être choisi par défaut de manière trop sévère (comme c'est le cas dans cet exemple) car il peut conduire à des modifications importantes du projet initial.

### **9.1. Conclusion sur les charges dynamiques appliquées**

Une analyse modale est réalisée au préalable et permet de définir :

- les fréquences propres à risque ;
- les cas de charges dynamiques à étudier (cas n°1, 2 et 3) ;

### Les modèles de charges dynamiques...

Les charges piétonnes dynamiques sont des excitations harmoniques et surfaciques. Elles sont définies par :

- une densité de foule de piétons plus ou moins importante selon le classement de la passerelle ;
- les fréquences propres d'une passerelle vide et chargée ;
- un nombre « équivalent » de piétons ( $n'$ ) marchant en phase et en fréquence ;
- un facteur de réduction ( $\psi$ ) lié à la probabilité de mise en résonance de la passerelle par les piétons.

La détermination, l'application de ces chargements et le traitement temporel ne posent à priori pas de problème du point de vue de l'introduction des modèles de charges dans les logiciels courants d'analyse de structure.

### Quelques mots sur la synchronisation forcée...

Ce cas n'a pas été abordé dans cet exemple de calcul car d'après les calculs menés (cf. § 7.2), la passerelle du Moulin n'est pas sensible au phénomène de synchronisation forcée puisque ses fréquences propres transversales sont bien au-delà de la plage à risque élevé comprise entre 0,5 Hz et 1,1 Hz. Le premier mode de vibration transversale est le mode n°6 (cf. § 7.1) situé à 2,63 Hz pour la passerelle vide et 2,48 Hz pour la passerelle chargée. Ce mode est d'ailleurs le seul à être sensible (très faiblement) à l'action de la seconde harmonique de la marche seulement.

Dans le cas où les fréquences propres auraient été situées dans la plage de fréquences à risque élevé pour les vibrations transversales, le cas de charge dynamique à appliquer (cas n°1) serait le suivant :

Direction	Charge sinusoïdale (N/m <sup>2</sup> )
transversale (t)	$d \times 35 \times \cos(2\pi f_t t) \times 10,8 \times \left(\frac{\xi}{n}\right)^{1/2} \times \psi_t$

## 9.2. Conclusion sur les vérifications et les résultats obtenus

### Vérifications aux E.L.S. :

Les déplacements ( $u_{zglob}$ ) et les contraintes normales ( $\sigma_{glob}$ ) cumulés sont vérifiés. Le taux de travail dans les sections est au plus de 16%, il semble donc peu probable que le critère de résistance aux E.L.S. soit dimensionnant pour les passerelles métalliques. Mais il se peut que le critère de déformation soit parfois plus contraignant. Il est rappelé que la passerelle du Moulin a été vérifiée selon les règlements actuels en vigueur (titre V du fascicule 61) et certainement dimensionnée par sa déformée sous le chargement statique seul de piétons défini par la charge  $a_1(l)$  (cf. titre II du fascicule 61).

### Vérifications aux E.L.U. :

Il s'agit d'une combinaison accidentelle, les critères de confort ne peuvent plus être assurés. Le calcul aux E.L.U a montré que l'effet du chargement dynamique accidentel ne parvenait pas à remettre en cause la résistance de l'ouvrage puisque le taux de travail dans les sections est au maximum de 56% contre 61% (210 MPa) avec la combinaison de charge réglementaire (titre II et V du fascicule 61 -  $a_1(l) = 377 \text{ daN/m}^2$ ).

En revanche, les accélérations obtenues (14 m/s<sup>2</sup> pour le mode n°1) sont très importantes puisqu'elles excèdent largement les valeurs limites (fixées à g verticalement et 0,3g horizontalement) où l'équilibre des piétons n'est plus assuré. Au-delà des ces valeurs, l'entretien de l'excitation et donc son amplification dynamique ne seront plus possibles, les sollicitations seront donc plafonnées. Toutefois et même avec ces niveaux d'accélération, la résistance de la passerelle est vérifiée. Ce cas de charge n'en reste pas moins intéressant puisqu'il définit un cas de charge accidentel qui peut devenir dimensionnant aux E.L.U. de résistance.

## 10. BIBLIOGRAPHIE

[1] *Passerelles piétonnes – Evaluation du comportement vibratoire sous l'action des piétons*, Guide méthodologique du SETRA ; mars 2006

[2] *Reconstruction de la passerelle du Moulin à Chelles* – A. Garcia-Diego, F. Petruscu, M. Perrier - Revue de la construction métallique n°4 - 2002

[3] *Estimation de l'exposition des individus à des vibrations globales du corps – Partie 1 : Spécifications générales* – Norme ISO 2631/1, 1985

[4] *Vibrations in structures induced by man and machines*, H. Bachmann, W. Amman, IABSE – Structural Engineering Documents, 1987