



Human induced Vibrations of Steel Structures

Vibrations des passerelles piétonnes

Guide de dimensionnement



Table des Matières

1	Introduction	4
2	Définitions	4
3	Procédure de dimensionnement	6
4	Etapes du dimensionnement.....	9
4.1	Etape 1 : Evaluation des fréquences propres	9
4.2	Etape 2 : Vérification de la plage critique de fréquences propres	9
4.3	Etape 3 : Spécification des situations de projet.....	10
4.3.1	Etape 3a : Evaluation des classes de trafic.....	11
4.3.2	Etape 3b : Evaluation des classes de confort.....	13
4.4	Etape 4 : Evaluation de l'amortissement structural.....	13
4.4.1	Modèle d'amortissement	13
4.4.2	Taux d'amortissement pour les chargements de service.....	14
4.4.3	Taux d'amortissement pour les fortes vibrations	14
4.5	Etape 5 : Détermination de l'accélération maximum	15
4.5.1	Modèles de charges harmoniques	16
4.5.2	Méthode par spectres de réponse pour les flots piétonniers	19
4.6	Etape 6 : Vérification des critères pour la synchronisation forcée transversale	21
4.7	Etape 7 : Vérification du niveau de confort.....	22
5	Evaluation des propriétés dynamiques des passerelles piétonnes	22
5.1	Introduction	22
5.2	Mesures de réponse.....	23
5.2.1	Mesures de la réponse ambiante pour l'identification des fréquences propres critiques	23
5.2.2	Mesure brute des taux d'amortissement associés aux fréquences propres critiques	23
5.2.3	Mesure de la réponse induite par un seul piéton	24
5.2.4	Mesure de la réponse induite par un groupe de piétons.....	24
5.2.5	Mesure de la réponse induite par un flot continu de piétons.....	24
5.3	Essais d'identification.....	25
5.3.1	Essais de vibration forcée.....	25
5.3.2	Essais de vibration ambiante	25
5.3.3	Essais de vibration libre	25
5.4	Instrumentation	26
5.4.1	Dispositifs de mesure des réponses	26

5.4.2	Dispositifs d'identification	26
6	Contrôle de la réponse aux vibrations	27
6.1	Introduction	27
6.2	Modification de masse	27
6.3	Modification de fréquence	28
6.4	Modification d'amortissement structural.....	28
6.4.1	Introduction	28
6.4.2	Mesures simples	28
6.4.3	Dispositifs d'amortissement supplémentaires	29
7	Références.....	33

Tableau des symboles fréquemment utilisés

a_{limite}	Limite d'accélération en fonction d'une classe de confort	[m/s ²]
a_{max}	Accélération maximale calculée pour une situation de projet définie	[m/s ²]
B	Largeur	[m]
d	Densité surfacique de piétons	[P/m ²]
f, f_i	Fréquence propre pour le mode considéré	[Hz]
f_s	Fréquence de pas d'un piéton	[Hz]
P	Amplitude de la force exercée par un piéton	[N]
$P \times \cos(2\pi ft)$	Force harmonique due à un piéton	[N]
L	Longueur	[m]
m^*	Masse modale	[kg]
M	Masse	[kg]
n	Nombre de piétons sur la surface chargée S ($n = S \times d$)	[P]
n'	Nombre équivalent de piétons sur la surface chargée S	[P]
$p(t)$	Charge surfacique répartie	[kN/m ²]
S	Aire de la surface chargée	[m ²]
δ	Décrément logarithmique pour l'amortissement	[-]
μ	Densité de masse par unité de longueur	[kg/m]
$\Phi(x)$	Forme de mode	[-]
ψ	Coefficient réducteur prenant en compte la probabilité d'une fréquence de pas égale à celle du mode considéré	[-]
ξ	Taux d'amortissement critique	[-]

1 Introduction

Les vibrations constituent une question de plus en plus importante dans la pratique courante du dimensionnement des passerelles piétonnes. L'apparition de passerelles plus sophistiquées (comme les passerelles haubanées ou les passerelles à ruban tendu) avec des portées plus longues et des matériaux de construction plus efficaces, entraîne la construction de structures légères et l'augmentation du rapport charges d'exploitation / charges permanentes. Cette tendance a fait que de nombreuses passerelles sont devenues plus sensibles aux vibrations sous l'effet de charges dynamiques. Les charges dynamiques les plus courantes agissant sur les passerelles, à part les charges de vent, sont les forces induites par les pas des piétons qui marchent ou qui courent.

Les principes du présent guide ainsi que le document de référence [1] qui l'accompagne ont été élaborés par :

- Christiane Butz et Christoph Heinemeyer du RWTH d'Aix-la-Chapelle, Allemagne,
- Andreas Keil, Mike Schlaich, Arndt Goldack et Stefan Trometer de Schlaich Bergemann und Partner, Allemagne,
- Mladen Lukić, Bruno Chabrolin, Arnaud Lemaire et Pierre-Olivier Martin, du Centre Technique Industriel de la Construction Métallique, France,
- Álvaro Cunha et Elsa Caetano de la Faculdade de Engenharia do Universidade do Porto, Portugal.

Ce guide est basé sur les résultats obtenus dans le cadre du projet de recherche RFS-CR-03019 "Advanced Load Models for Synchronous Pedestrian Excitation and Optimised Design Guidelines for Steel Footbridges" (SYNPEX – en français : « Modèles de charges avancés d'excitation synchronisée des piétons et recommandations pour une conception optimisée ») avec le support financier des Fonds de Recherche du Charbon et de l'Acier (FRCA).

Des détails supplémentaires sur les informations contenues dans ce guide sont donnés dans le document de référence qui comprend également un complément de références.

2 Définitions

Les définitions données ici concernent l'application du présent guide.

Accélération	Quantité désignant le taux de modification de la vitesse en fonction du temps (notée dv / dt ou d^2x / dt^2), en général selon un axe spécifié.
Amplification	Processus d'augmentation de la magnitude d'une quantité variable, sans modification d'aucune autre propriété.
Amortisseur	Dispositif monté dans les structures et destiné à réduire l'amplitude des vibrations par dissipation d'énergie.

Amortissement	<p>L'amortissement désigne tout effet, qu'il soit inhérent à un système ou ajouté dans ce but spécifique, tendant à réduire l'amplitude de la vibration d'un système oscillatoire. L'amortissement est la dissipation d'énergie d'un système vibrant avec le temps ou la distance. Pour les structures, l'amortissement total est composé de :</p> <ul style="list-style-type: none"> • L'amortissement dû au matériau et à la structure • L'amortissement dû aux aménagements et aux finitions • La propagation de l'énergie dans toute la structure
Action dynamique	Action qui provoque des accélérations significatives de la structure ou des éléments structuraux
Masse modale = masse généralisée	<p>Un système à plusieurs degrés de liberté peut être réduit à une combinaison de plusieurs systèmes à un degré de liberté (oscillateurs simples) avec des fréquences propres correspondantes :</p> $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k^*}{m^*}}$ <p>où f = fréquence propre, exprimée en Hz k^* = rigidité modale m^* = masse modale.</p> <p>La masse modale peut donc être interprétée comme étant la masse activée dans une forme de mode spécifique.</p>
Mode de vibration	Forme caractéristique prise par un système vibrant, dans lequel le mouvement de chaque point est une harmonique simple de même fréquence. Plusieurs modes peuvent coexister dans un système à plusieurs degrés de liberté.
Fréquence propre	<p>La fréquence propre est la fréquence de vibration naturelle d'un système. Pour un système à plusieurs degrés de liberté, les fréquences propres sont les fréquences des modes de vibration. Chaque structure possède autant de fréquences propres et de modes de vibration associés que de degrés de liberté. On les classe habituellement selon la quantité d'énergie qui est activée par l'oscillation ; la première fréquence propre est celle correspondant au niveau d'énergie le plus bas et elle est la plus susceptible d'être activée.</p> <p>L'équation donnant la fréquence propre d'un système à un degré de liberté (oscillateur simple) est la suivante :</p>

où K est la rigidité
 M est la masse.

L'évaluation de fréquences propres est décrite dans le chapitre 4.1.

La fréquence f est l'inverse de la période d'oscillation T ($f = 1 / T$).

Résonnance	Un système est en résonnance lorsque toute modification de la fréquence d'une vibration forcée, même faible, provoque une diminution de la réponse du système. Lorsque l'amortissement est faible, la fréquence résonnante est approximativement égale à la fréquence propre du système.
Spectre de réponse	Un spectre de réponse est un tracé de la réponse maximale (déplacement, vitesse ou accélération) d'une série d'oscillateurs à un degré de liberté de fréquence propre variable qui sont mis en mouvement forcé par la vibration. Le tracé résultant peut alors être utilisé pour trouver la réponse d'un système linéaire quelconque, à partir de sa fréquence propre d'oscillation. Le spectre de réponse contient des informations précises sur la répartition de l'énergie de vibration pour diverses fréquences.
Spectre	Description de tout signal dépendant du temps sous forme d'une série de composantes fréquentielles, comportant chacune une amplitude et, le cas échéant, une phase.

3 Procédure de dimensionnement

Le nombre croissant de problèmes de vibration de passerelles piétonnes rencontrés ces dernières années montre qu'il est nécessaire de ne plus dimensionner les passerelles uniquement aux charges statiques, mais aussi pour le comportement dynamique. Il convient que le dimensionnement prenne en compte le comportement vibratoire de la passerelle sous l'effet du déplacement de piétons. Il est important de noter qu'il n'existe à l'heure actuelle aucune réglementation à ce sujet.

Même si, du point de vue du concepteur, cette absence de réglementation permet une grande liberté et donc une grande variété de structures de passerelles innovantes, il est néanmoins essentiel que la passerelle réponde aux exigences de confort fixées par le client ou le propriétaire. "Est-ce que la passerelle répondra aux critères de confort quand elle vibrera ?" est une question qui joue un rôle important dans le processus de dimensionnement, car les amortisseurs ne sont pas seulement des aménagements supplémentaires, mais peuvent nécessiter une intégration dès le dimensionnement.

Les principes généraux d'une méthodologie de dimensionnement proposée sont donnés dans la Figure 3-1.

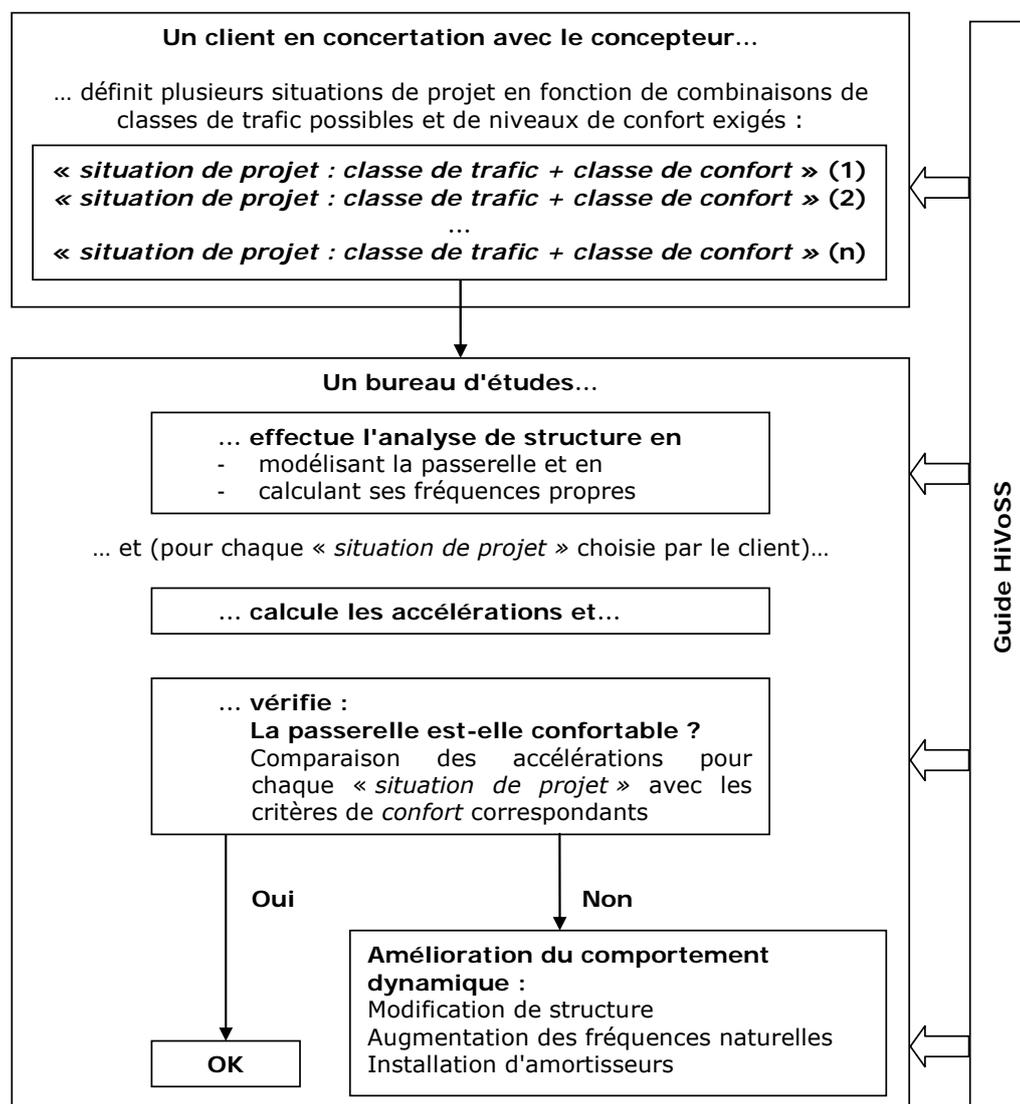


Figure 3-1 : Méthodologie pour le dimensionnement

L'organigramme de la Figure 3-2 montre comment vérifier le comportement dynamique de la passerelle dans la phase de dimensionnement et comment ce guide peut être utilisé. Les différentes étapes mentionnées dans l'organigramme seront traitées dans la section 4.

Des problèmes de sécurité provoqués par des contraintes excessives ou la fatigue peuvent également survenir, et il convient de les prendre également en compte dans le dimensionnement des passerelles ; par contre, ce guide traite uniquement l'aptitude au service réversible, selon la définition des Eurocodes. Des règles de dimensionnement pour les contraintes et la fatigue sont disponibles par ailleurs. Il convient de noter que toutes les vérifications usuelles à l'Etat Limite de Service (ELS) et à l'Etat Limite Ultime (ELU) doivent être effectuées conformément aux normes en vigueur.

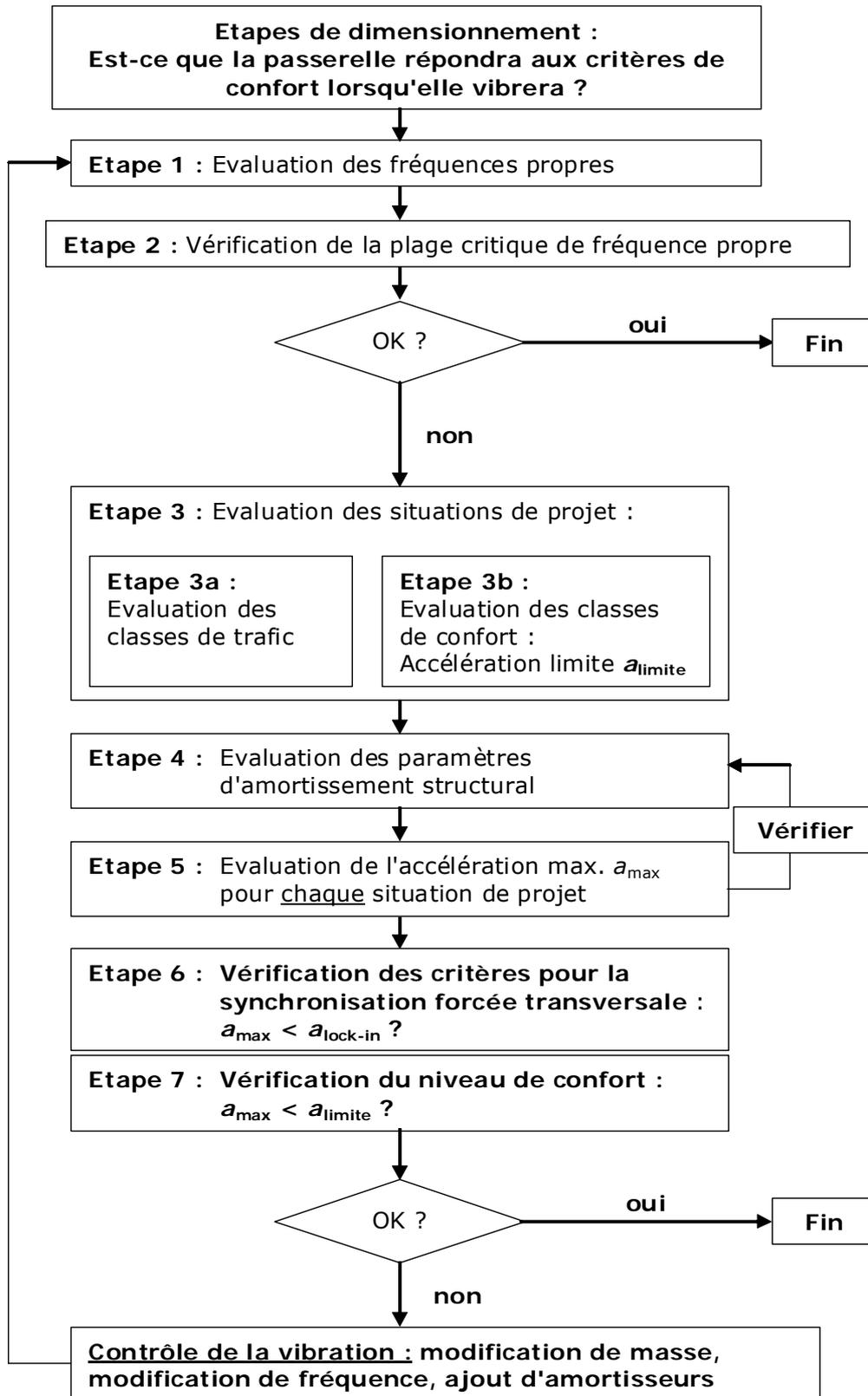


Figure 3-2 : Organigramme montrant l'utilisation de ce guide

4 Etapes du dimensionnement

4.1 Etape 1 : Evaluation des fréquences propres

Il existe plusieurs façons de calculer la fréquence propre d'une passerelle au cours du dimensionnement, en particulier pour la vérification préliminaire de sa vibration, par exemple :

- La méthode des éléments finis
- Les formules manuelles, par exemple pour les poutres, câbles et plaques.

Il convient de se souvenir que les propriétés des matériaux, la complexité de la structure, le type de revêtement et d'aménagements du tablier, les conditions aux limites et les garde-corps peuvent entraîner des divergences dans les fréquences propres entre les résultats de calculs et les valeurs mesurées sur la structure réelle.

Il est recommandé de prendre en compte la masse des piétons dans le calcul des fréquences propres uniquement lorsque la masse modale des piétons représente plus de 5 % de la masse modale du tablier.

4.2 Etape 2 : Vérification de la plage critique de fréquences propres

Les plages critiques pour les fréquences propres f_i des passerelles soumises à une excitation par des piétons sont les suivantes :

- pour les vibrations verticales et longitudinales :

$$1,25 \text{ Hz} \leq f_i \leq 2,3 \text{ Hz}$$

- pour les vibrations transversales : $0,5 \text{ Hz} \leq f_i \leq 1,2 \text{ Hz}$

Les passerelles dont les fréquences propres pour les vibrations verticales ou longitudinales se situent dans la plage

$$2,5 \text{ Hz} \leq f_i \leq 4,6 \text{ Hz}$$

peuvent être excitées en résonance par la 2^e harmonique de charges de piétons [1]. Dans ce cas, la plage de fréquences critique pour les vibrations verticales et longitudinales s'élargit à :

$$1,25 \text{ Hz} \leq f_i \leq 4,6 \text{ Hz}$$

Les vibrations transversales ne sont pas affectées par la 2^e harmonique de charges de piétons.

Note : une excitation vibratoire verticale par la 2^e harmonique de charges de piétons peut avoir lieu. Jusqu'à présent il n'y a pas eu de cas reportés dans la littérature de vibrations significatives de passerelles dues à la 2^e harmonique de charges de piétons.

4.3 Etape 3 : Spécification des situations de projet

Le dimensionnement d'une passerelle commence par la spécification de plusieurs situations de projet, ensembles de conditions physiques représentant les conditions réelles survenant pendant un certain intervalle de temps. Chaque situation de projet est définie par une classe de trafic prévue (voir section 4.3.1) et un niveau de confort choisi (voir section 4.3.2).

Il existe des situations de projet qui peuvent survenir une seule fois dans la durée de vie d'une passerelle, comme son inauguration, et d'autres qui se produisent quotidiennement, comme le trafic aux heures de pointe. Le Tableau 4-1 donne un aperçu de certaines situations de trafic typiques pouvant se produire sur les passerelles. Le type et la densité de trafic piétonnier attendu, ainsi que les exigences relatives au confort, ont un effet significatif sur l'exigence de comportement dynamique de la passerelle.

Tableau 4-1 : Situations de trafic typiques

	<p>Piétons isolés et groupes réduits</p> <p>Nombre de piétons : 11</p> <p>Taille de groupe : 1-2 P</p> <p>Densité : 0,02 P/m²</p> <p>Note : P = piéton</p>
	<p>Trafic très faible</p> <p>Nombre de piétons : 25</p> <p>Taille de groupe : 1-6 P</p> <p>Densité : 0,1 P/m²</p>
	<p>Trafic faible</p> <p>Ici : trafic d'évènement</p> <p>Nombre de piétons : 60</p> <p>Taille de groupe : 2-4 P</p> <p>Densité : 0,2 P/m²</p>

	<p>Trafic exceptionnellement dense Ici : trafic de cérémonie d'ouverture Densité : $> 1,5 \text{ P/m}^2$</p>
---	--

Pour avoir une appréciation correcte de la réponse dynamique de la passerelle, il est recommandé de spécifier plusieurs situations de projet probables différentes. Un exemple est donné dans le Tableau 4-2.

Tableau 4-2 : Exemple de spécification de situations de projet significatives

Situation de projet	Description	Classe de Trafic (cf. 4.3.1)	Occurrence prévue	Classe de Confort (cf. 4.3.2)
1	Inauguration de la passerelle	TC4	Une fois dans la durée de vie	CL3
2	Trafic d'heures de pointe	TC2	Quotidienne	CL1
3	Promeneurs du week-end	TC1	Hebdomadaire	CL2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

4.3.1 Etape 3a : Evaluation des classes de trafic

Les classes de trafic piétonnier et les densités de flux piétonnier correspondantes sont données dans le Tableau 4-3.

Tableau 4-3 : Classes et densités de trafic piétonnier

Classe de trafic	Densité d (P = piéton)	Description	Caractéristiques
TC 1*)	groupe de 15 P ; $d=15 \text{ P} / (B L)$	Trafic très faible	(B=largeur de tablier ; L=longueur de tablier)

Classe de trafic	Densité d (P = piéton)	Description	Caractéristiques
TC 2	$d = 0,2 P/m^2$	Trafic faible 	Marche libre et confortable Dépassement possible Les piétons isolés peuvent choisir librement leur allure
TC 3	$d = 0,5 P/m^2$	Trafic dense 	Marche libre Le dépassement peut parfois être impossible
TC 4	$d = 1,0 P/m^2$	Trafic très dense 	Liberté de mouvement restreinte Marche gênée Le dépassement n'est plus possible
TC 5	$d = 1,5 P/m^2$	Trafic exceptionnellement dense	Marche désagréable Début de bousculade On ne peut plus choisir son allure

*) Un flux piétonnier équivalent pour la classe de trafic TC1 est calculé en divisant le nombre de piétons par la longueur L et la largeur B du tablier de la passerelle.

Les formations et processions piétonnières, les défilés militaires, ou les excitations intentionnelles (« vandalisme ») ne sont pas pris en compte dans la classification générale de trafic : ces situations nécessitent donc une étude supplémentaire.

4.3.2 Etape 3b : Evaluation des classes de confort

Les critères concernant le confort des piétons sont la plupart du temps représentés sous forme d'une accélération limite pour la passerelle. Ce guide recommande quatre classes de confort qui sont présentées dans le Tableau 4-4.

Tableau 4-4 : Classes de confort définies avec plages d'accélération courantes

Classe de confort	Degré de confort	a_{limite} verticale [m/s ²]	a_{limite} transversale [m/s ²]
CL 1	Maximum	< 0,50	< 0,10
CL 2	Moyen	0,50 – 1,00	0,10 – 0,30
CL 3	Minimum	1,00 – 2,50	0,30 – 0,80
CL 4	Inconfort inacceptable	> 2,50	> 0,80

Noter que les plages d'accélération indiquées ne sont que des critères de confort ; les critères de synchronisation forcée pour les vibrations horizontales sont donnés dans la section 4.6.

4.4 Etape 4 : Evaluation de l'amortissement structural

Le taux d'amortissement présent est très significatif dans l'évaluation de l'amplitude des oscillations induites par les piétons. L'atténuation des vibrations, c'est-à-dire la dissipation d'énergie dans la structure, dépend à la fois de l'amortissement intrinsèque des matériaux de construction, qui est de nature répartie, et de l'effet local des appuis ou autres dispositifs de contrôle. Un amortissement supplémentaire est également assuré par les éléments non structuraux, comme les garde-corps et les revêtements.

En général, le taux d'amortissement dépend du niveau de vibrations, étant donné que des amplitudes de vibration élevées provoquent davantage de frottement entre les éléments structuraux et non structuraux et les appuis.

La coexistence de divers mécanismes de dissipation au sein de la structure fait que l'amortissement est un phénomène complexe dont une caractérisation précise ne peut s'appuyer que sur des mesures relevées après l'achèvement de la construction de la passerelle, y compris l'installation de garde-corps, revêtements et tout type d'aménagement.

En outre, les passerelles souples et légères sont affectées par le vent, qui génère un amortissement aérodynamique, et une augmentation de la vitesse du vent peut entraîner une augmentation de l'amortissement. Cet amortissement supplémentaire peut être pris en compte pour les études des effets du vent, mais pas pour l'évaluation des effets induits par les piétons.

4.4.1 Modèle d'amortissement

Pour le dimensionnement et la modélisation numérique, il est nécessaire de spécifier un modèle et de définir les paramètres correspondants. L'approche



courante utilise l'amortissement viscoélastique, ce qui implique que la génération de forces d'amortissement est proportionnelle au taux de changement des déplacements en fonction du temps (vitesse). L'avantage de ce modèle est qu'il donne des équations d'équilibre dynamique linéaires, dont la solution analytique peut être facilement obtenue. Cependant, il ne donne qu'une approximation de l'amortissement réel d'une structure pour les faibles niveaux d'oscillation.

L'inclusion de systèmes de contrôle (voir la section 6.4.3) peut conduire à des structures pour lesquelles la matrice d'amortissement n'est plus proportionnelle et l'analyse modale conventionnelle n'est donc plus applicable. Le réglage de l'accord du système d'amortissement et le calcul de la réponse de la structure amortie exigent alors des algorithmes plus puissants, notamment des calculs itératifs basés sur des méthodes d'intégration directe.

4.4.2 Taux d'amortissement pour les chargements de service

En vue du dimensionnement des passerelles pour un niveau de confort, ce qui constitue une condition de service au sens des Eurocodes, le Tableau 4-5 donne des taux d'amortissement minima et moyens recommandés.

Tableau 4-5 : Taux d'amortissement en fonction du matériau de construction pour les conditions de service

Type de construction	ξ Minimum	ξ Moyen
Béton armé	0,80%	1,3%
Béton précontraint	0,50%	1,0%
Mixte (acier-béton)	0,30%	0,60%
Acier	0,20%	0,40%
Bois	1,0%	1,5%
Ruban précontraint	0,70%	1,0%

4.4.3 Taux d'amortissement pour les fortes vibrations

Des charges intentionnelles (« vandalisme ») peuvent produire des niveaux d'oscillation élevés dans les passerelles légères, ce qui peut entraîner des taux d'amortissement supérieurs, comme l'indique le Tableau 4-6.

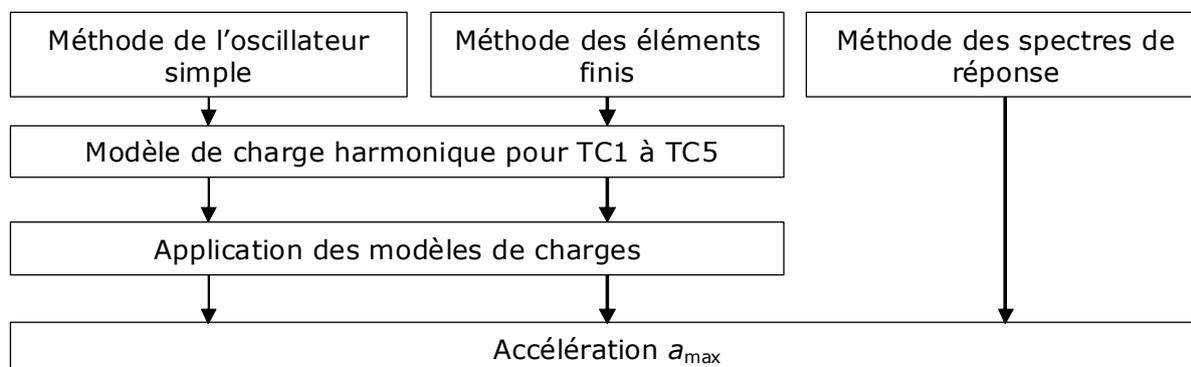
Tableau 4-6 : Taux d'amortissement en fonction du matériau de construction pour les fortes vibrations

Type de construction	Taux d'amortissement ξ
Béton armé	5,0%
Béton précontraint	2,0%
Acier, joints soudés	2,0%
Acier, joints boulonnés	4,0%
Elastomères armés	7,0%

4.5 Etape 5 : Détermination de l'accélération maximum

Une fois qu'une seule ou plusieurs situations de projet (voir section 4.3) sont définies et que les valeurs d'amortissement sont déterminées (voir section 4.4), l'étape suivante consiste à calculer l'accélération maximum a_{\max} pour chaque situation de projet.

Il existe diverses méthodes pour calculer l'accélération de la passerelle ; ce guide de dimensionnement recommande l'utilisation d'une des méthodes indiquées dans la Figure 4-1, qui seront traitées dans les chapitres suivants.

**Figure 4-1 : Diverses méthodes de calcul de l'accélération**

Note : il est important de vérifier si l'accélération calculée au moyen des paramètres d'amortissement présumés pour les faibles ou fortes vibrations (voir section 4.4) correspond à l'accélération sur la structure construite (voir section 5). L'expérience a montré qu'il est très difficile de prévoir l'amortissement structural de la passerelle finie. L'amortissement présente donc toujours une large dispersion et, par conséquent, l'accélération présente également une large dispersion.

4.5.1 Modèles de charges harmoniques

4.5.1.1 Nombre équivalent de piétons pour les flots de piétons

Une fois un modèle numérique de la passerelle développé, les situations de projet et les modèles de charges correspondants choisis et les taux d'amortissement spécifiés, la réponse de la passerelle peut être calculée. Des modèles de charges harmoniques sont nécessaires pour calculer l'accélération lorsqu'on utilise les méthodes par éléments finis ou de l'oscillateur simple (voir section 4.5.1.3). Pour la modélisation d'un flot de piétons composé de n piétons "aléatoires", il convient de déterminer le flot idéalisé équivalent, composé de n' piétons parfaitement synchronisés (voir Figure 4-2). Ces derniers sont synchronisés uniquement entre eux (sans prendre en compte l'influence de la structure vibrante sur leur fréquence de pas). Les deux flots sont supposés provoquer le même effet sur une structure, mais le flot équivalent peut être modélisé comme une charge déterministe.

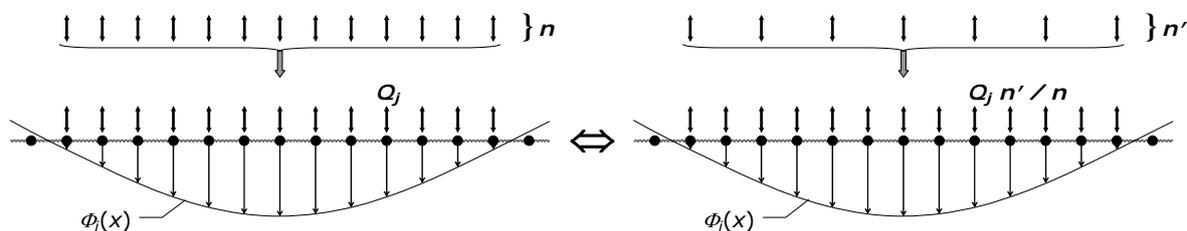


Figure 4-2 : Equivalence des flots

Pour l'évaluation de la réponse par rapport à la charge de groupe ou de flot de piétons, l'application d'une charge harmonique répartie sur la longueur du tablier de la passerelle (simulant un nombre de piétons équivalent sur des emplacements fixes) satisfait presque toutes les exigences pour le dimensionnement pratique des passerelles.

Il est nécessaire de choisir soigneusement la plage de fréquences pour laquelle ce type de calcul a un sens. Le problème de l'influence exercée par la structure sur le comportement des piétons n'est pas pris en compte et cela peut augmenter la réponse.

4.5.1.2 Application des modèles de charges

Dans la procédure de dimensionnement recommandée, des modèles de charges harmoniques sont donnés pour chaque classe de trafic TC1 à TC5 (cf. Tableau 4-3). Il existe deux modèles de charges différents pour calculer la réponse de la passerelle aux flots de piétons selon leur densité :

- Modèle de charges pour TC1 à TC3 (densité $d < 1,0$ P/m²)
- Modèle de charges pour TC4 et TC5 (densité $d \geq 1,0$ P/m²)

Ces deux modèles de charges ont en commun une charge harmonique uniformément répartie $p(t)$ [N/m²] qui représente le flux piétonnier équivalent pour les calculs ultérieurs :

$$p(t) = P \times \cos(2\pi f_s t) \times (n' \times \nu / S) \quad \text{Eq. 4-1}$$

où $P \times \cos(2\pi f_s t)$ est la force harmonique exercée par un piéton,

- P est l'amplitude de la force provoquée par un seul piéton dont la fréquence de pas de marche est f_s ,
- f_s est la fréquence de pas, qui est supposée égale à la fréquence propre de la passerelle considérée,
- n' est le nombre équivalent de piétons sur la surface chargée S ,
- S est l'aire de la surface chargée,
- ψ est le coefficient réducteur prenant en compte la probabilité que la fréquence de pas approche de la fréquence propre considérée.

L'amplitude de la charge d'un piéton unique P , le nombre équivalent de piétons n' (fractile 95 %) et le coefficient réducteur ψ sont définis dans le Tableau 4-7, en considérant l'excitation dans la première harmonique ou la seconde harmonique de la charge piétonnière (voir Section 4.2).

Tableau 4-7 : Paramètres pour le modèle de charges de TC1 à TC5

P [N]		
Verticale 280	Longitudinale 140	Transversale 35
Coefficient réducteur ψ		
Verticale et longitudinale		Transversale

Nombre équivalent n' de piétons sur la surface chargée S pour le modèle de charge :

TC1 à TC3 (densité $d < 1,0$ P/m²) : $n' = 10,8\sqrt{\xi \times n}$ [P]

TC4 et TC5 (densité $d \geq 1,0$ P/m²) : $n' = 1,85\sqrt{n}$ [P]

où ξ est le taux d'amortissement critique et

n est le nombre de piétons sur la surface chargée S ($n = S \times d$).

Le modèle de charges pour les groupes de piétons (TC1) prend en compte un libre déplacement des piétons. Par conséquent, la synchronisation parmi les membres du groupe est celle d'un flot de faible densité. Dans le cas de flots denses (TC4 et TC5) la marche est gênée, l'avancement du flot ralentit et la synchronisation augmente. Au-delà de la valeur limite supérieure de 1,5 P/m² la

marche des piétons est impossible, de sorte que les effets dynamiques se réduisent de façon significative. Lorsqu'un flot se densifie, la corrélation entre les piétons augmente, mais la charge dynamique tend à diminuer.

Dans la Figure 4-3 une charge harmonique $p(t)$ est appliquée sur la structure pour une forme de mode particulière. La charge agit dans un sens ou dans l'autre selon le signe de la déformée modale.

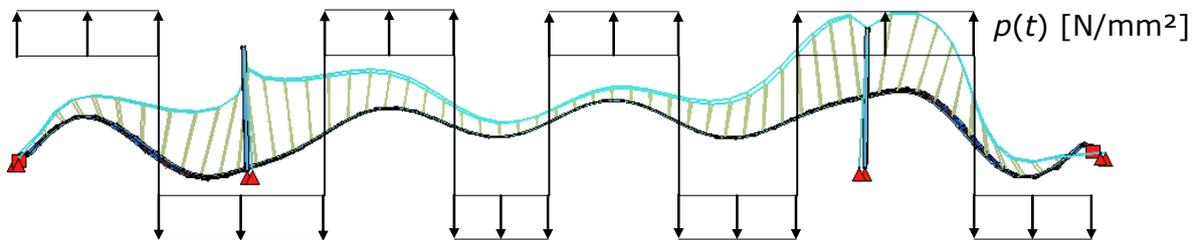


Figure 4-3 : Application d'une charge harmonique en fonction de la forme de mode $\phi(x)$

Les modèles de charges harmoniques ci-dessus décrivent les charges induites par des flots de piétons marchant sur la passerelle. Certaines passerelles peuvent en outre subir l'action de coureurs, ce qui est décrit plus complètement en [1].

4.5.1.3 Méthode de l'oscillateur simple (un degré de liberté)

En général, le comportement dynamique d'une structure peut être évalué par une analyse modale, où une oscillation arbitraire de la structure est décrite par une combinaison linéaire de plusieurs oscillations harmoniques différentes se produisant aux fréquences propres de la structure. La structure peut donc être transformée en plusieurs oscillateurs masse-ressort équivalents différents, présentant chacun un degré de liberté unique. Chaque système à un degré de liberté (oscillateur simple) (voir Figure 4-4) possède une seule fréquence propre et une seule masse, égales à chaque fréquence propre de la structure et à la masse modale associée.

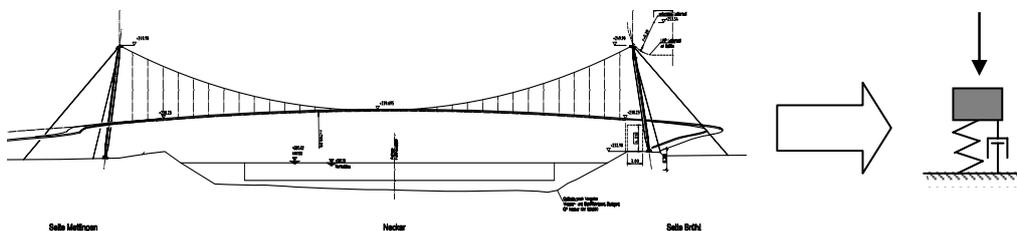


Figure 4-4 : Oscillateur simple équivalent pour une fréquence propre unique / un mode de vibration unique de la structure

L'idée de base est d'utiliser un système à un degré de liberté équivalent pour chaque fréquence propre de la passerelle située dans la plage critique de fréquences propres et de calculer l'accélération maximum associée pour le chargement dynamique adéquat.

L'accélération maximum a_{\max} à la résonance pour le système à un degré de liberté est calculée au moyen de la formule suivante :



$$a_{\max} = \frac{p^* \pi}{m^* \delta} = \frac{p^*}{m^*} \frac{1}{2\xi} \quad \text{Eq. 4-2}$$

où p^* est la force généralisée

m^* est la masse (modale) généralisée

ξ est le taux d'amortissement critique et

δ est le décrément logarithmique de l'amortissement.

4.5.2 Méthode par spectres de réponse pour les flots piétonniers

Au stade du pré-dimensionnement, il n'est pas nécessaire d'appliquer une analyse temporelle dans tous les cas.

L'objectif d'une méthode de dimensionnement spectral est de trouver un moyen simple de décrire le chargement stochastique et la réponse du système, avec un niveau de fiabilité spécifique.

Il est supposé que :

- la fréquence de pas moyenne, $f_{s,m}$, du flux piétonnier coïncide avec la fréquence propre considérée de la passerelle, f_i ,
- la masse de la passerelle est uniformément répartie,
- les formes de mode sont sinusoïdales,
- il n'existe aucun couplage modal,
- le comportement structural est linéaire-élastique.

La réponse du système – "accélération de pic maximum" – a été choisie comme valeur de calcul. Dans la vérification, cette accélération est comparée avec l'accélération tolérable en fonction de la classe de confort à vérifier.

Pour des densités piétonnières différentes, l'accélération caractéristique, qui est le fractile 95^e % de l'accélération maximum, peut être déterminée au moyen des formules et des tableaux donnés ci-dessous.

Cette accélération maximum est définie par le produit d'un facteur de pic $k_{a,d}$ et d'un écart-type d'accélération σ_a :

$$a_{\max,d} = k_{a,d} \sigma_a \quad \text{Eq. 4-3}$$

Note : le facteur de pic $k_{a,d}$ sert à transformer l'écart-type de la réponse σ_a en valeur caractéristique $a_{\max,d}$. Aux états limites de service, la valeur caractéristique est le fractile 95 %, $k_{a,95\%}$.

Les deux coefficients sont dérivés de simulations de Monte Carlo basées sur des simulations numériques par pas de temps de divers flots de piétons sur diverses géométries de passerelles.

Le résultat est une équation empirique donnant la variance de l'accélération :

$$\sigma_a^2 = k_1 \xi^{k_2} \frac{C}{m^*} \frac{\sigma_F^2}{i} \quad \text{Eq. 4-4}$$

$$\text{où } k_1 = a_1 f_i^2 + a_2 f_i + a_3$$

$$k_2 = b_1 f_i^2 + b_2 f_i + b_3$$

$a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$ sont des constantes

f_i est la fréquence propre considérée coïncidant avec la fréquence de pas moyenne du flot de piétons

ξ est le taux d'amortissement critique

C est la constante décrivant le maximum du spectre des charges

$\sigma_F^2 = k_F n$ est la variance du chargement (forces induites par les piétons)

k_F est une constante

$n = d \times L \times B$ nombre de piétons sur la passerelle, avec

d : densité de piétons, L : longueur de passerelle, B : largeur de passerelle

m^*_i est la masse modale du mode i considéré

Les constantes a_1 à a_3 , b_1 à b_3 , C , k_F et $k_{a,95\%}$ sont données dans le Tableau 4-8 pour les accélérations verticales et dans le Tableau 4-9 pour les accélérations transversales.

Tableau 4-8 : Constantes pour les accélérations verticales

d [P/m ²]	k_F	C	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3	$k_{a,95\%}$
≤ 0,5	$1,20 \times 10^{-2}$	2,95	-0,07	0,60	0,075	0,003	-0,040	-1,000	3,92
1,0	$7,00 \times 10^{-3}$	3,70	-0,07	0,56	0,084	0,004	-0,045	-1,000	3,80
1,5	$3,34 \times 10^{-3}$	5,10	-0,08	0,50	0,085	0,005	-0,060	-1,005	3,74

Tableau 4-9 : Constantes pour les accélérations transversales

d [P/m ²]	k_F	C	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3	$k_{a,95\%}$
≤ 0,5	$2,85 \times 10^{-4}$	6,8	-0,08	0,50	0,085	0,005	-0,06	-1,005	3,77
1,0		7,9	-0,08	0,44	0,096	0,007	-0,071	-1,000	3,73
1,5		12,6	-0,07	0,31	0,120	0,009	-0,094	-1,020	3,63

Une autre solution possible, pour obtenir une estimation simplifiée de la masse modale qui est, pour un trafic de piétons donné, nécessaire pour assurer une limite de confort donnée a_{limite} , consiste à utiliser l'expression suivante, dérivée qui est valable pour $f_{s,m} = f_i$:

$$m_j^* \geq \frac{\sqrt{n} (k_1 \xi^{k_2} + 1,65 k_3 \xi^{k_4})}{a_{\text{limite}}}$$

avec : m^*_i masse modale pour le mode i considéré
 n nombre de piétons sur la passerelle
 ξ taux d'amortissement critique
 k_1 à k_4 constantes (voir Tableau 4-10 pour les modes de flexion verticale et de torsion, et le Tableau 4-11 pour les modes de flexion transversale)

Tableau 4-10 : Constantes pour la masse modale verticale nécessaire

d [P/m ²]	k_1	k_2	k_3	k_4
≤ 0,5	0,7603	0,468	0,050	0,675
1,0	0,5700		0,040	
1,5	0,4000		0,035	

Tableau 4-11 : Constantes pour la masse modale transversale nécessaire

d [P/m ²]	k_1	k_2	k_3	k_4
≤ 0,5	0,1205	0,45	0,012	0,6405
1,0				
1,5				

Cette méthode de dimensionnement a été élaborée au moyen de modèles de ponts à poutres. Si le comportement structural d'une passerelle est sensiblement différent de celui d'un pont à poutres, l'application de la méthode spectrale peut être remise en cause.

4.6 Etape 6 : Vérification des critères pour la synchronisation forcée transversale

Le seuil de nombre de piétons pour la synchronisation forcée transversale, c'est-à-dire le nombre de piétons N_L pouvant entraîner une disparition de l'amortissement global produisant une réponse brusquement amplifiée, peut être défini comme :

$$N_L = \frac{8 \pi \xi m^* f}{k} \quad \text{Eq. 4-5}$$

où ξ est le taux d'amortissement critique

m^* est la masse modale

f est la fréquence propre

k est une constante (300 Ns/m environ dans la plage 0,5-1,0 Hz).

Une autre approche consiste à définir le seuil d'amplitude d'accélération pour lequel le phénomène de synchronisation forcée apparaît :

$$a_{\text{lock-in}} = 0,1 \text{ à } 0,15 \text{ m/s}^2 \quad \text{Eq. 4-6}$$

Les expérimentations récentes ont montré l'adéquation de ces deux formules pour décrire le seuil de déclenchement de la synchronisation forcée.

Note : il n'a pas été observé sur des passerelles des flots de piétons se synchronisant avec les vibrations verticales.

4.7 Etape 7 : Vérification du niveau de confort

Selon la méthodologie de vérification du dimensionnement décrite dans la Figure 3-2, la réponse calculée pour les situations de projet spécifiées et les modèles de charge correspondants doit être comparée avec les limites de confort spécifiées données dans le Tableau 4.4. Un dépassement de ces limites implique la nécessité de mesures propres à améliorer le comportement dynamique de la passerelle. Ces mesures comprennent :

- la modification de masse
- la modification de fréquence
- la modification de l'amortissement structural
- l'ajout de l'amortissement

Pour une passerelle déjà construite, l'approche la plus simple est basée sur l'augmentation de l'amortissement structural, ce qui peut être réalisé soit par la mise en œuvre de dispositifs de contrôle supplémentaires, soit en agissant sur les éléments non structuraux, comme les garde-corps et les revêtements (voir chapitre 6).

5 Evaluation des propriétés dynamiques des passerelles piétonnes

5.1 Introduction

La caractérisation expérimentale du comportement dynamique d'une passerelle peut constituer une composante importante du projet et peut être effectuée avec deux niveaux de complexité différents :

- **Niveau 1**- Identification des paramètres structuraux, dans le but d'étalonner des modèles numériques et de régler des dispositifs de contrôle. Les fréquences propres, les modes de vibration et les coefficients d'amortissement sont les paramètres intéressants dans ce cas ;
- **Niveau 2**- Mesure de la réponse dynamique de la passerelle sous l'effet d'excitation humaine en vue de l'évaluation des critères de confort et/ou de la corrélation avec la réponse calculée.

L'adoption de l'une des stratégies ci-dessus dépend des caractéristiques de la structure et des objectifs de l'étude.

Les essais de **Niveau 2** peuvent être caractérisés comme des essais courants qui doivent normalement être réalisés à la fin de la construction de toute passerelle piétonne susceptible de vibrer à l'excès, fournissant des informations importantes pour le dimensionnement et les vérifications. A partir des résultats de ces essais, le propriétaire de la passerelle peut décider de mettre ou non en

œuvre des mesures de contrôle. Il convient de noter que le recours à des essais pour la vérification de la classe de confort d'une passerelle spécifique exige la réalisation de mesures pour tous les phénomènes de vibration et toutes les situations de projet pris en compte dans l'élaboration de modèles de charges de calcul, et implique l'obtention de valeurs caractéristiques de la réponse.

Les essais de **Niveau 1** sont exigés lorsqu'il est clair que le comportement dynamique de la passerelle dépasse les limites d'acceptabilité et que des mesures de contrôle sont nécessaires. Une conception appropriée de dispositifs de contrôle exige une connaissance précise des paramètres structuraux, notamment des fréquences propres et des modes de vibration.

Le présent chapitre constitue un guide général pour les essais et l'analyse des données concernant les passerelles piétonnes.

5.2 Mesures de réponse

La réalisation d'essais de **Niveau 2** doit normalement prendre en compte les éléments suivants :

1. Identification des fréquences propres critiques ;
2. Identification des taux d'amortissement ;
3. Mesure de la réponse induite par un seul piéton ;
4. Mesure de la réponse induite par un groupe réduit de piétons ;
5. Mesure de la réponse induite par un flot continu de piétons.

La vérification des limites d'acceptabilité de la vibration pour une passerelle piétonne particulière doit normalement être basée sur les résultats de ces essais, en prenant en compte l'utilisation particulière de la passerelle.

5.2.1 Mesures de la réponse ambiante pour l'identification des fréquences propres critiques

Les essais doivent de préférence être réalisés sur une passerelle fermée au trafic piétonnier. En supposant qu'une analyse dynamique préliminaire de la passerelle donnant une estimation des fréquences propres et des modes de vibration a été effectuée, les sections mesurées doivent correspondre aux sections présentant la réponse modale maximum pour les fréquences critiques estimées.

5.2.2 Mesure brute des taux d'amortissement associés aux fréquences propres critiques

Des estimations brutes des taux d'amortissement associés aux fréquences propres critiques peuvent être obtenues au moyen d'un simple essai de vibration libre dans lequel un piéton saute / plie les genoux / bondit sur un emplacement fixe selon une fréquence particulière, en essayant d'induire une réponse résonnante de la passerelle pour le mode de vibration correspondant. Après quelques cycles d'excitation, l'action du piéton est subitement interrompue et la réponse de vibration libre est enregistrée. Ce processus doit normalement être répété un certain nombre de fois, afin d'obtenir des estimations moyennes du coefficient d'amortissement en fonction de l'amplitude de l'oscillation.

5.2.3 Mesure de la réponse induite par un seul piéton

Les essais décrits ci-dessus fournissent une actualisation des fréquences propres critiques prédites. La réponse de la passerelle est à présent mesurée aux emplacements appropriés (présentant le déplacement modal maximum pour chaque fréquence critique), en prenant en compte le déplacement d'un seul piéton sur la passerelle. Il convient d'explorer plusieurs types de déplacement, en fonction des fréquences intéressantes :

- marche, pour les fréquences propres critiques inférieures à 2,5 Hz ;
- marche ou course, pour les fréquences propres critiques entre 2 Hz et 3 Hz ;
- course, pour les fréquences propres critiques supérieures à 3 Hz.

A partir des caractéristiques aléatoires d'excitation, un certain nombre d'essais doit normalement être réalisé pour chaque combinaison de fréquence et de déplacement, 5 environ en général. Il convient d'utiliser un métronome pour s'assurer que l'on utilise le rythme de marche correct. L'accélération maximum et le déplacement dynamique (qui peut aussi être déduit de l'accélération) de la passerelle doivent normalement être enregistrés pour chaque série relevée, et la réponse maximum induite par un seul piéton peut être prise égale au maximum des réponses aux pics obtenues dans les différents essais. Il convient de noter le poids du piéton. Dans le cas où la passerelle présente une pente, la réponse doit normalement être enregistrée alors que le piéton se déplace en descendant la pente.

5.2.4 Mesure de la réponse induite par un groupe de piétons

Il convient de mesurer la réponse dans deux situations :

- marche / course d'un groupe se comportant normalement, et
- marche / course du groupe dans l'intention d'induire une réponse forte (« vandalisme »).

Dans la mesure du possible, le groupe doit comporter 10 piétons si la largeur de la passerelle n'excède pas 2,5 m et 15 piétons pour les largeurs supérieures. La réponse doit être mesurée comme indiqué à la section 5.2.3 pour la traversée d'un piéton unique. La réponse associée au groupe synchronisé doit être relevée, ici encore en utilisant un métronome afin d'obtenir la synchronisation à une fréquence particulière.

Etant donné qu'il est vraisemblable que la présence de personnes sur le tablier entraîne une augmentation des taux d'amortissement et que, pour des amplitudes de vibration élevées ces taux augmentent, il est suggéré d'effectuer des mesures de la réponse libre après excitation en résonance de la passerelle par le groupe sautant sur place.

5.2.5 Mesure de la réponse induite par un flot continu de piétons

La mesure de la réponse induite par un flot continu de piétons est également intéressante pour la détermination de la réponse de la passerelle dans différentes conditions d'utilisation. Cette mesure doit en particulier être effectuée pour les passerelles qui montrent clairement un comportement vibratoire marqué,

notamment une tendance aux effets de synchronisation. Les procédures de mesure sont identiques à celles adoptées pour les essais avec piéton unique et avec groupe décrits dans les sections 5.2.3 et 5.2.4.

5.3 Essais d'identification

L'identification des paramètres modaux, c'est-à-dire les fréquences propres, modes de vibration et coefficients d'amortissement, d'une structure est réalisée au moyen des essais de **Niveau 1** décrits ci-dessus. Il est possible d'appliquer une technique d'analyse modale conventionnelle basée sur des essais de vibration forcée ou, comme autre possibilité, l'identification peut être effectuée sur la base d'essais de vibration libre ou ambiante. Les paramètres fondamentaux des essais sont établis pour les deux cas dans les sections suivantes.

5.3.1 Essais de vibration forcée

Les essais de vibration forcée constituent la base des techniques d'analyse modale traditionnelle et donnent les résultats les plus précis, étant donné qu'ils s'appuient sur des entrées et des sorties contrôlées. Ceci est particulièrement vrai pour les estimations de coefficient d'amortissement, où la qualité est grandement affectée par les incertitudes de mesure. La technique d'identification à appliquer dépend du type d'excitation utilisé. Cependant, il existe un risque que l'énergie d'entrée, associée aux fréquences propres basses, soit très faible et que le rapport signal/bruit soit donc très bas.

Les dispositifs utilisés pour ces essais,

- marteau à impact et
- vibreur,

sont décrits dans la section 5.4.2.1.

5.3.2 Essais de vibration ambiante

Les essais de vibration ambiante utilisent les charges ambiantes courantes agissant sur la structure comme charges d'entrée, en supposant que leur contenu de fréquence est à peu près constant dans la plage de fréquence intéressante. Bien que cette hypothèse ne soit pas nécessairement vérifiée, les essais de vibration ambiante tendent à devenir une solution extrêmement attrayante pour l'identification des paramètres modaux dans les structures de génie civil, étant donné le nombre limité de ressources nécessaires, et la haute précision des capteurs actuellement disponibles. L'utilisation de ces techniques peut donner lieu à des erreurs significatives dans la détermination des coefficients d'amortissement estimés.

5.3.3 Essais de vibration libre

Les essais de vibration libre consistent à enregistrer la réponse structurale associée au relâchement soudain d'un câble tendu ou autre dispositif provoquant une déviation initiale à partir de la position d'équilibre de la structure. Ces essais sont relativement peu onéreux lorsqu'ils sont réalisés en fin de construction de la passerelle, et ils fournissent des estimations précises des taux d'amortissement



des modes excités. Ils constituent une alternative aux essais de vibration forcée, et ils sont susceptibles de fournir des estimations modales de meilleure qualité que celles obtenues par les essais de vibration ambiante.

Pour l'identification de l'amortissement, les mesures doivent normalement être effectuées avec des vitesses de vent inférieures à 2-5 m/s.

5.4 Instrumentation

5.4.1 Dispositifs de mesure des réponses

Les limites d'acceptabilité pour le confort piétonnier sont en général définies en termes d'accélération, et la quantité de réponse habituellement mesurée est donc l'accélération.

Les accéléromètres sont des capteurs qui produisent des signaux électriques proportionnels à l'accélération dans une bande de fréquence particulière, et qui peuvent être basés sur différents principes de fonctionnement. Pour la plupart des passerelles piétonnières, la plage de fréquences intéressante se situe entre 0,5 et 20 Hz. Par conséquent, les spécifications courantes pour les accéléromètres sont les suivantes :

- Plage de fréquence (avec une linéarité de 5%) : 0,1 – 50 Hz ;
- Sensibilité minimum : 10 mV/g
- Plage : $\pm 0,5 g$

5.4.2 Dispositifs d'identification

5.4.2.1 Dispositifs à vibrations forcées

Pour les essais de vibration forcée des passerelles piétonnes, les dispositifs excitateurs possibles sont un marteau à impact (voir Figure 5-1) ou un vibreur (voir Figure 5-2).



Figure 5-1 : Marteau à impact pour les applications de génie civil



Figure 5-2 : Vibreur électromagnétique pour les applications de génie civil. Montage vertical

Note : il est fait référence à ces dispositifs dans le document de référence [1].

5.4.2.2 Dispositifs de capteurs de valeurs excitatrices

La mesure des charges d'entrée induites par les piétons marchant isolément ou en groupes constitue un point important dans les essais de passerelles piétonnières.

L'évaluation directe de la charge concentrée appliquée par un piéton peut être effectuée en équipant une plateforme de marche avec des plaques de mesure. Pour la marche d'un groupe, il est également important de mesurer le degré de synchronisation des piétons, ce qui peut être évalué au moyen d'enregistrements vidéo et de traitement d'images.

6 Contrôle de la réponse aux vibrations

6.1 Introduction

Selon la méthodologie de vérification du dimensionnement décrite dans la section 3, la réponse calculée pour les modèles de charges spécifiés doit être comparée avec les limites de confort. Le non respect de ces limites ou des critères de synchronisation forcée implique la nécessité de mettre en œuvre des mesures améliorant le comportement dynamique de la passerelle. Ces mesures comprennent la modification de masse, de fréquence ou d'amortissement structural.

6.2 Modification de masse

Pour les passerelles très légères, l'utilisation de dalles de tablier en béton peut améliorer la réponse dynamique aux charges piétonnières par augmentation de la masse modale. Cette approche est particulièrement pertinente pour les structures caténaïres (structures à ruban tendu).

6.3 Modification de fréquence

Traditionnellement, on modifie la rigidité structurale pour augmenter la fréquence afin qu'elle sorte de la plage critique, tant pour la vibration verticale que transversale. La fréquence est proportionnelle à la racine carrée du rapport existant entre la rigidité et la masse, et des modifications structurales significatives sont donc en général nécessaires pour augmenter suffisamment la fréquence. Dans le dimensionnement de passerelles modernes, où l'objectif est de construire des structures légères et élégantes, ces modifications ne sont en général pas pratiquement réalisables après achèvement de la construction, mais elles peuvent être envisagées au stade du dimensionnement.

6.4 Modification d'amortissement structural

6.4.1 Introduction

L'augmentation de l'amortissement structural constitue une autre mesure possible pour réduire les effets dynamiques des piétons agissant sur une passerelle. Pour une passerelle existante, l'approche la plus simple est basée sur l'augmentation de l'amortissement structural, qui peut être réalisée soit en agissant sur des éléments particuliers au sein de la structure, soit en mettant en œuvre des dispositifs d'amortissement externes.

L'utilisation de dispositifs d'amortissement externes pour absorber un excès de vibrations structurales peut constituer une solution efficace en termes de fiabilité et de coût. Ces dispositifs peuvent être basés sur des techniques de contrôle actif, semi-actif ou passif. Si l'on considère des aspects comme le coût, les exigences de maintenance et l'expérience pratique, l'option habituelle est celle de dispositifs passifs, qui comprennent les amortisseurs visqueux, les amortisseurs dynamiques accordés (TMD), les amortisseurs à pendule, les amortisseurs dynamiques accordés fluides à colonne (TLCD) ou les amortisseurs dynamiques accordés fluides (TLD). Les plus fréquemment utilisés sont les amortisseurs visqueux et les amortisseurs dynamiques accordés.

6.4.2 Mesures simples

Les garde-corps sont en général considérés comme des éléments non structuraux dont la géométrie et les caractéristiques sont spécifiées en fonction de considérations architecturales. Il a été toutefois observé que ces éléments peuvent contribuer à raidir et à amortir la passerelle, en particulier dans le cas de structures très élancées. L'utilisation de barrières en grillage métallique, par exemple, s'est avérée contribuer à une augmentation significative de l'amortissement de la passerelle, en raison du frottement généré entre les fils pendant les vibrations. Il n'est cependant pas possible de quantifier l'augmentation de l'amortissement, car il dépend fortement de l'amplitude des vibrations.

De même, l'utilisation d'élastomères dans les appuis et le revêtement peut contribuer à l'augmentation de l'amortissement de la passerelle, mais il ne faut pas oublier que les propriétés des élastomères se dégradent avec le temps et qu'une maintenance régulière sera nécessaire.

Le choix d'assemblages boulonnés au lieu d'assemblages soudés constitue une autre mesure pouvant contribuer à l'augmentation globale de l'amortissement en raison du frottement développé dans la transmission des charges entre éléments.

6.4.3 Dispositifs d'amortissement supplémentaires

Le Tableau 6-1 donne quelques exemples de structures où des systèmes d'amortissement ont été mis en œuvre, en indiquant les caractéristiques de ces mesures et l'effet global sur le comportement dynamique.

Tableau 6-1 : Passerelles où des systèmes d'amortissement ont été mis en œuvre

Passerelle	Nombre de travées / longueur [m]	Type	Fréquences contrôlées [Hz]	Sens de vibration dominant	Type de système d'amortissement mis en œuvre	Effet du système d'amortissement sur le comportement global
T-Bridge, Japon	2 / 45+134	Haubané, poutre-caisson continue	0,93	Trans.	600 TLD à l'intérieur de la poutre-caisson, rapport de masse de 0,7 % de la masse modale de la poutre (mode de vibration transversal)	Déplacement transversal de la poutre réduit d'environ 8,3 mm à 2,9 mm-
Millennium Bridge, Londres	3 / 108+144+80	Ruban tendu	0,8 (princ.) 0,5 1,0	Trans.	Amortisseurs visqueux et ADA pour contrôler les mouvements horizontaux. ADA verticaux pour contrôler l'oscillation verticale, fréquences entre 1,2 et 2,0 Hz	Vibrations devenues imperceptibles pour les utilisateurs
Passerelle Forchheim Allemagne	1 / 117,5	Haubané	1,0 à 3,0	Vertical	1 ADA	
Passerelle Solférino, Paris	Centrale, 106	Arche	0,81 1,94 2,22	Transv. Vertical Vertical	1 ADA transversal avec masse de 15 000 kg et 2 ADA verticaux avec masses de 10 000 kg et 7 600 kg	Augmentation de l'amortissement structural de 0,4% à 3,5 % (transversal), et de 0,5% à 3 % et 2 % (vertical)
Passerelle Pedro e Inês, Coimbra	Centrale, 110	Poutre-arche de faible hauteur	0,85 1,74 ; 1,80 ; 2,34 ; 2,74 ; 3,07 ; 3,17	Trans. Vertical	1 ADA transversal avec 14 800 kg et 6 ADA verticaux	Augmentation de l'amortissement transversal de 0,5 à 4 % et de l'amortissement vertical de 0,3 - 2,2 % à 3 - 6 %

Note : de plus amples détails sur les dispositifs décrits ci-dessous sont présentés dans le document de référence [1].

6.4.3.1 Amortisseurs visqueux

Les amortisseurs visqueux (voir Figure 6-1) sont des dispositifs utilisés pour dissiper les vibrations par déformation d'un fluide visqueux ou d'un matériau solide.

L'un des dispositifs les plus courants consiste en un piston enfermé dans un cylindre, qui provoque la déformation et l'écoulement d'un fluide ainsi que la production de chaleur. La force libérée par ces dispositifs dépend de la viscosité du fluide et elle est proportionnelle à la vitesse relative des deux extrémités. L'efficacité d'un amortisseur visqueux dépend donc de la possibilité d'installation de l'amortisseur entre des points de la structure possédant une vitesse relative significative. Dans certaines configurations, le mouvement du piston induit le mouvement du fluide au travers d'ouvertures calibrées, et dans ce cas la dissipation se produit par variation du volume du fluide. Ce type d'amortisseur est moins dépendant de la température que le premier type, qui s'appuie essentiellement sur la viscosité du fluide.

Les amortisseurs visqueux élastiques constituent une catégorie différente d'amortisseurs qui dissipent l'énergie par déformation de cisaillement d'un matériau solide, normalement un polymère.



Figure 6-1 : Exemple d'amortisseurs visqueux installés

6.4.3.2 Amortisseurs dynamiques accordés

Les amortisseurs dynamiques accordés (ADA ; TMD : Tuned Mass Damper, en anglais) sont composés de masses concentrées reliées à une structure par l'intermédiaire de certains éléments, ressorts et amortisseurs. Ces dispositifs sont conçus de sorte à séparer la fréquence critique en deux nouvelles fréquences (une inférieure et une supérieure à la fréquence initiale), et le mouvement relatif entre la structure et l'ADA permet la dissipation d'énergie. Etant donné que la masse structurale est beaucoup plus élevée que celle de l'ADA, le mouvement de l'ADA présente en général des déplacements importants par rapport au mouvement de la structure.

La Figure 6-2 montre deux exemples d'ADA, un vertical et un horizontal, installés sur des passerelles.



Figure 6-2 : Exemples de TMD installés

6.4.3.3 Amortisseurs à pendule

Les amortisseurs à pendule (voir Figure 6-3) représentent un type spécifique d'amortisseurs à masse accordée, et sont utilisés pour supprimer les vibrations horizontales. La principale différence avec un amortisseur dynamique accordé est qu'ils n'utilisent pas de ressort, sauf dans le cas où les fréquences à supprimer sont supérieures à 1 Hz. La masse est suspendue par des éléments de treillis, ce qui réduit les forces de frottement par rapport à un support horizontal normal.

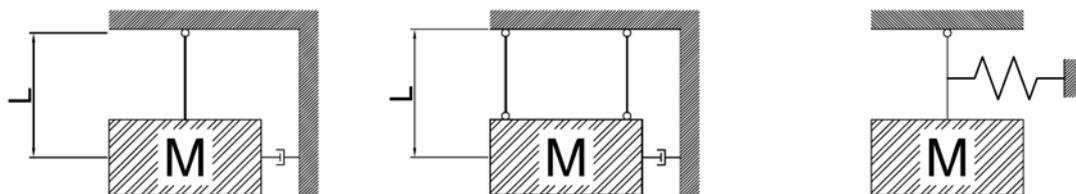


Figure 6-3 : Exemple de systèmes à pendule

6.4.3.4 Amortisseurs dynamiques accordés fluides à colonne

Un amortisseur dynamique accordé fluide à colonne (TLCD : Tuned Liquid Column Damper, en anglais) est composé d'un tube en U (voir Figure 6-4), rempli de liquide (habituellement de l'eau), dont les propriétés sont accordées de telle sorte que les forces exercées à la base du dispositif, provoquées par le mouvement du liquide, contrebalancent le mouvement horizontal de son support. Ce principe est donc identique à celui d'un ADA. Cependant, il présente plusieurs avantages par rapport à d'autres types de dispositifs d'amortissement, comme une facilité d'accord de fréquence et d'amortissement, une simplicité d'installation et de construction, et des coûts de maintenance pratiquement nuls.

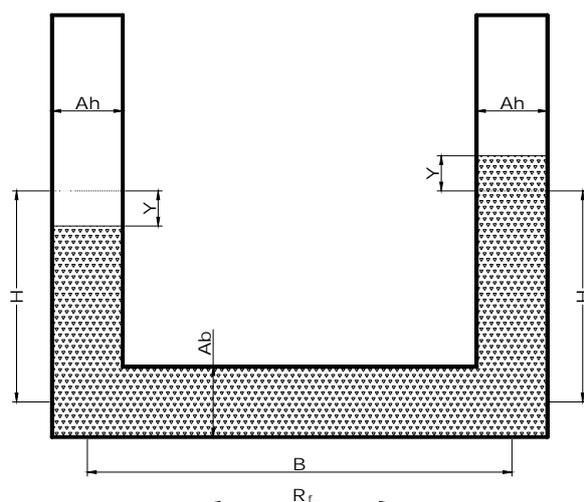


Figure 6-4 : Schéma d'un amortisseur dynamique accordé fluide à colonne

L'amortissement optimum de l'amortisseur dynamique accordé fluide à colonne devrait normalement être identique à celui de l'ADA analogue. Ce type d'amortisseur présente un amortissement intrinsèque dû à la turbulence du fluide et, en insérant une valve de contrôle ou une plaque munie d'un orifice dans le tube horizontal, on peut améliorer encore son amortissement. Cependant, il n'existe aucune littérature spécifique donnant des informations sur la quantification de l'amortissement de ces amortisseurs, cette valeur doit donc toujours être obtenue par des essais effectués sur des prototypes.

6.4.3.5 Amortisseurs à liquide accordés

Les amortisseurs à liquide accordés (TLD : Tuned Liquid Damper, en anglais) sont des dispositifs de contrôle passifs composés de réservoirs rigides remplis de liquide (voir Figure 6-5) destinés à supprimer les vibrations horizontales des structures. Leurs avantages, comme un faible coût, un seuil de déclenchement quasi nul, une facilité de réglage de la fréquence propre et une installation facile sur des structures existantes, sont à l'origine d'un intérêt croissant pour ces dispositifs. Cependant, le mouvement du fluide peut être fortement non linéaire, car les vagues peuvent se briser en cas de vibration de forte amplitude.

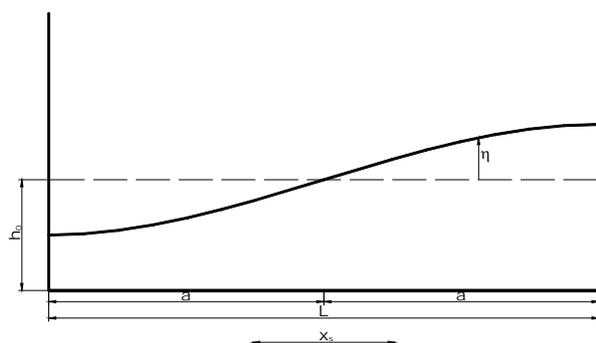


Figure 6-5 : Schéma d'un amortisseur à liquide accordé

7 Références

- [1] HiVoSS (Human induced Vibrations of Steel Structures – Vibrations des Structures en Acier induites par l'activité Humaine) : *Contrôle vibratoire des passerelles piétonnes – Document de référence*, novembre 2008.