

COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES PASSERELLES SOUS LE PASSAGE DES PIÉTONS – RECHERCHES RÉCENTES

Wasoodev HOORPAH

M.I.O. Bureau d'études

Pascal CHARLES

Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA)

1. INTRODUCTION

Le guide SETRA/AFGC pour la prise en compte du comportement vibratoire des passerelles piétonnes a été élaboré sur la base des connaissances scientifiques et techniques actuelles acquises en France, notamment grâce à deux campagnes d'essais réalisées d'une part sur une passerelle réelle (passerelle de Solferino) et d'autre part sur un modèle réduit de passerelle en laboratoire, ainsi qu'à l'étranger. La réglementation française ne donne aucune indication au sujet des phénomènes dynamiques et vibratoires des passerelles, et les règles européennes présentent des insuffisances sur certains aspects particuliers mis en évidence sur des ouvrages récents.

La fermeture de deux passerelles piétonnes situées en plein centre de Paris et Londres, très rapidement après leur inauguration du fait des oscillations transversales gênantes en présence de foules, a conduit à des études plus poussées de leur comportement sous l'action des piétons. Ces études ont nécessité la mise en œuvre d'essais in situ, et ont confirmé l'existence d'un phénomène qui s'était déjà manifesté auparavant mais qui est resté assez peu connu du milieu scientifique et technique. Ce phénomène appelé "synchronisation forcée", "lock-in" en anglais, est à l'origine de la vibration transversale à fortes amplitudes de ces passerelles.

Il est apparu utile de publier un guide faisant la synthèse des problèmes dynamiques pouvant se poser aux passerelles, avec comme ambition de fournir aux concepteurs et projeteurs les informations et les moyens pour éviter la reproduction d'incidents du même type.

Ce guide s'applique aux passerelles pour des utilisations normales vis-à-vis du critère de confort, et pour des cas de vandalisme vis-à-vis de la résistance. Ce guide ne s'applique pas pour garantir le confort dans le cas de manifestations exceptionnelles sur les passerelles : marathon, manifestation, bal, défilé militaire, inauguration, etc.. De tels événements sont peu recommandés sur des passerelles, et si on souhaite tout de même les prendre en compte, il convient de définir des cas de charges au cas par cas représentant l'événement que l'on souhaite reproduire.

Le comportement dynamique des passerelles sous les effets du vent n'est pas traité dans ce guide. Il convient de se référer au document AFGC "Aérodynamique des ponts souples".

La méthodologie d'analyse dynamique est fonction de la classe de la passerelle qui dépend du niveau de trafic. Cela signifie que les passerelles en site urbain ne sont pas traitées de la même manière que les passerelles en rase campagne.

Le rôle du Maître d'Ouvrage est important, car c'est lui qui choisit le critère de confort pour la passerelle, et cela influe sur la conception de la structure. Pour un confort maximal on ne tolérera aucune vibration sur la passerelle, la structure sera alors, soit peu élancée donc éventuellement peu esthétique, soit élancée mais équipée d'amortisseurs donc plus chère et compliquée à entretenir. Pour un confort minimal on pourra autoriser des vibrations modérées et maîtrisées sur la passerelle, la structure sera plus élancée donc en général plus esthétique, et elle pourra aussi être équipée d'amortisseurs.

2. DYNAMIQUE DES STRUCTURES ET PASSERELLES PIÉTONNES

Les charges statiques sont par définition des charges constantes ou très peu variables dans le temps (quasi-statiques). A l'inverse, les charges dynamiques, fonction du temps, peuvent être classées dans quatre catégories :

- les charges harmoniques ou purement sinusoïdales,
- les charges périodiques qui se répètent à l'identique à des intervalles réguliers de temps appelés périodes,
- les charges aléatoires qui varient de façon arbitraire à la fois en durée, en intensité, en direction...
- les charges d'impulsion qui caractérisent les charges de très brèves durées.

L'action des piétons est une action variable dans le temps et qui peut être classée dans la catégorie de charges périodiques. Une des caractéristiques principales de l'action dynamique des piétons est sa faible intensité. Appliquée à des structures très rigides et massives cette action aurait peu de chance de les faire vibrer de manière sensible. Cependant les évolutions à la fois esthétiques, techniques et technologiques qui conduisent à une recherche de structures de plus en plus élancées, de plus en plus souples font que les passerelles piétonnes, n'échappant pas à cette tendance générale, sont à l'heure actuelle conçues et réalisées avec une sensibilité bien plus grande vis à vis des déformations. En conséquence elles nécessitent un traitement dynamique plus approfondi dans beaucoup de cas.

L'étude de l'oscillateur simple permet de mettre en évidence le rôle des différents paramètres structuraux intervenant dans le comportement dynamique des passerelles.

Pour les structures des ouvrages, les logiciels actuels permettent d'obtenir les caractéristiques dynamiques réelles et de calculer la réponse aux charges dynamiques.

3. CHARGES PIÉTONNIÈRES

L'action d'un piéton que ce soit pendant la marche ou la course se traduit par une force ponctuelle exercée sur le support, fonction du temps et de la position du piéton. En notant x la position de celui-ci par rapport à l'axe de la passerelle, l'action d'un piéton qui se déplace à une vitesse constante v peut donc être représentée par le produit d'une composante temporelle $F(t)$ et d'une composante spatiale $\delta(x - vt)$, soit :

$$P(x, t) = F(t) \delta(x - vt)$$

δ étant l'opérateur de Dirac.

De nombreux paramètres peuvent aussi affecter et faire varier cette action (démarche, caractéristiques physiologiques et vestimentaires, rugosité du sol...), mais les mesures expérimentales réalisées ont montré qu'elle est du type périodique, caractérisée par le paramètre fondamental qui est la fréquence, c'est-à-dire le nombre de pas à la seconde.

Pour la marche normale (non gênée), la fréquence peut être décrite par une distribution gaussienne de moyenne 2 Hz (ou 1,9 Hz selon des études plus récentes) et d'écart type 0,20 Hz environ (de 0,175 à 0,22 selon les auteurs).

La fonction périodique $F(t)$, peut donc être décomposée en une série de Fourier c'est-à-dire une partie constante augmentée d'une somme infinie de forces harmoniques. La somme de toutes les contributions élémentaires des termes de cette somme redonnent l'effet total de l'action périodique.

$$F(t) = G_0 + G_1 \sin 2\pi f_m t + \sum_{i=2}^n G_i \sin(2\pi i f_m t - \varphi_i) \quad [1]$$

À la fréquence moyenne de 2 Hz ($f_m = 2$ Hz), les valeurs des coefficients de la décomposition de Fourier de $F(t)$ sont les suivantes (en se limitant aux trois premiers termes) :

$$G_1 = 0,4 G_0 ; G_2 = G_3 \approx 0,1 G_0 ;$$

En décomposant la force en trois composantes, à savoir une composante « verticale » et deux composantes horizontales (une dans le sens du déplacement dite « longitudinale » et une perpendiculaire au déplacement dite « transversale »), on peut retenir pour le dimensionnement, en se limitant à la première harmonique dans la pratique, les valeurs suivantes de ces composantes

Composante verticale de l'action d'un piéton:

$$F_v(t) = G_0 + 0,4 G_0 \sin(2\pi f_m t) \quad [2]$$

Composante horizontale transversale de l'action d'un piéton:

$$F_{ht}(t) = 0,05 G_0 \sin\left(2\pi \left(\frac{f_m}{2}\right) t\right) \quad [3]$$

Composante horizontale longitudinale de l'action d'un piéton:

$$F_{hl}(t) = 0,2 G_0 \sin(2\pi f_m t) \quad [4]$$

La valeur moyenne de 700 N peut être prise pour G_0 , poids d'un piéton.

L'effet de la course peut s'étudier à partir des formules précédentes en simulant le contact discontinu.

En ce qui concerne l'effet de la foule, la première méthode consiste à additionner les effets individuels des piétons, chacun ayant une position, une vitesse, une fréquence et une phase bien particulière et a priori différentes des autres. De tels calculs sont complexes à mener. On cherche donc à ramener l'effet de N piétons aléatoires (c'est-à-dire dont les fréquences sont tirées aléatoirement suivant une loi normale centrée autour de la fréquence propre de la passerelle et d'écart type donné, et de phase aléatoire) à l'effet d'un nombre de piétons équivalents plus réduit, mais qui sont tous en phase et à la fréquence propre de la passerelle, ce qui est plus commode pour les calculs numériques.

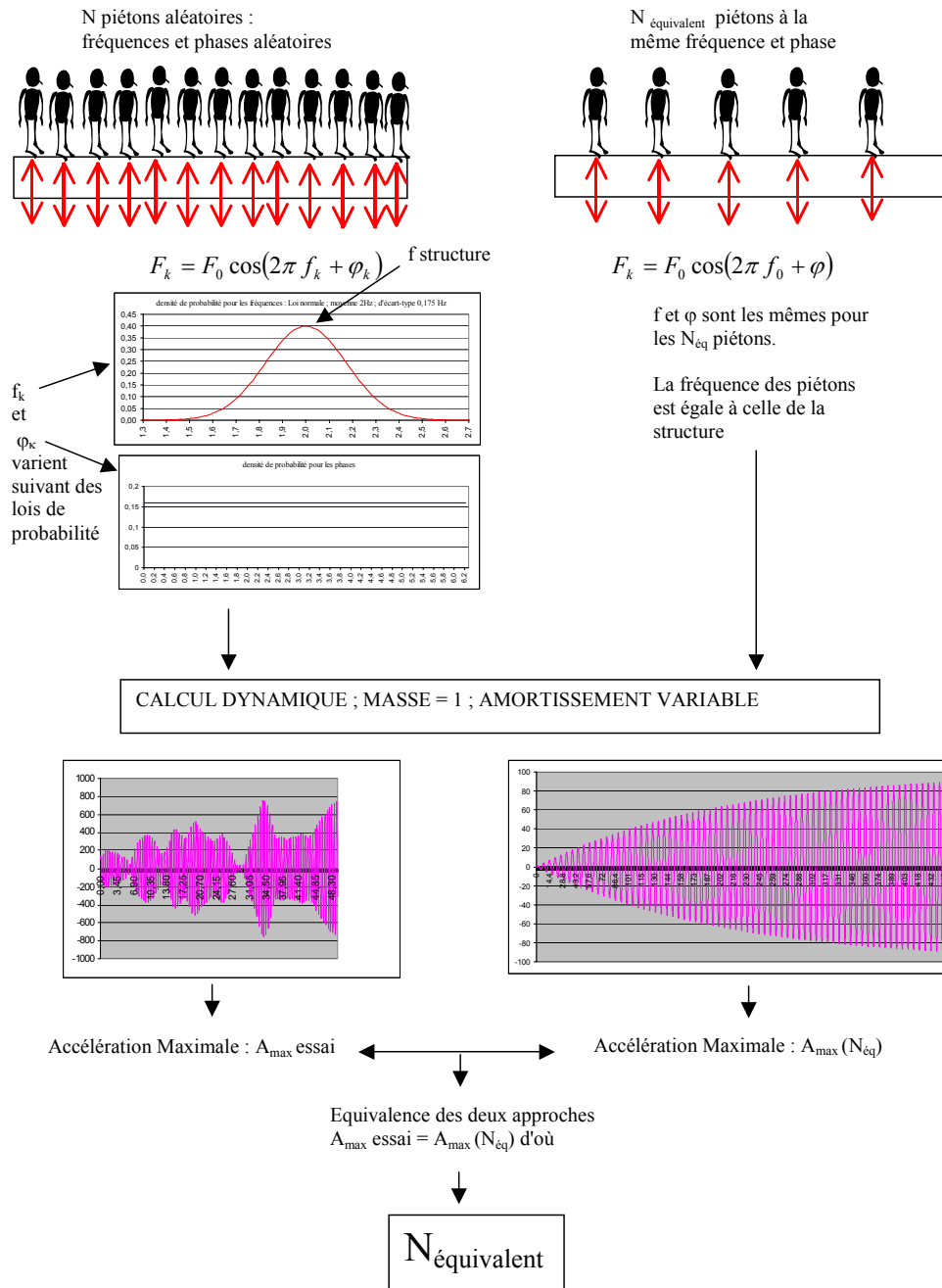
Un grand nombre d'essais statistiques, menés suivant la méthodologie décrite dans la figure ci-dessous, ont montré que la valeur caractéristique de ce nombre de piétons équivalents se situait à environ :

$10\sqrt{\xi N}$ si la foule est peu dense.

$2\sqrt{N}$ si la foule est dense, et que seules les phases sont aléatoires.

N est le nombre de piétons sur l'ouvrage et ξ le taux d'amortissement.

Ces nombres équivalents de piétons ont été déterminés en comparant et en égalisant les effets d'une foule aléatoire et d'une foule plus réduite, mais parfaitement synchronisée.



4. SYNCHRONISATION FORCÉE

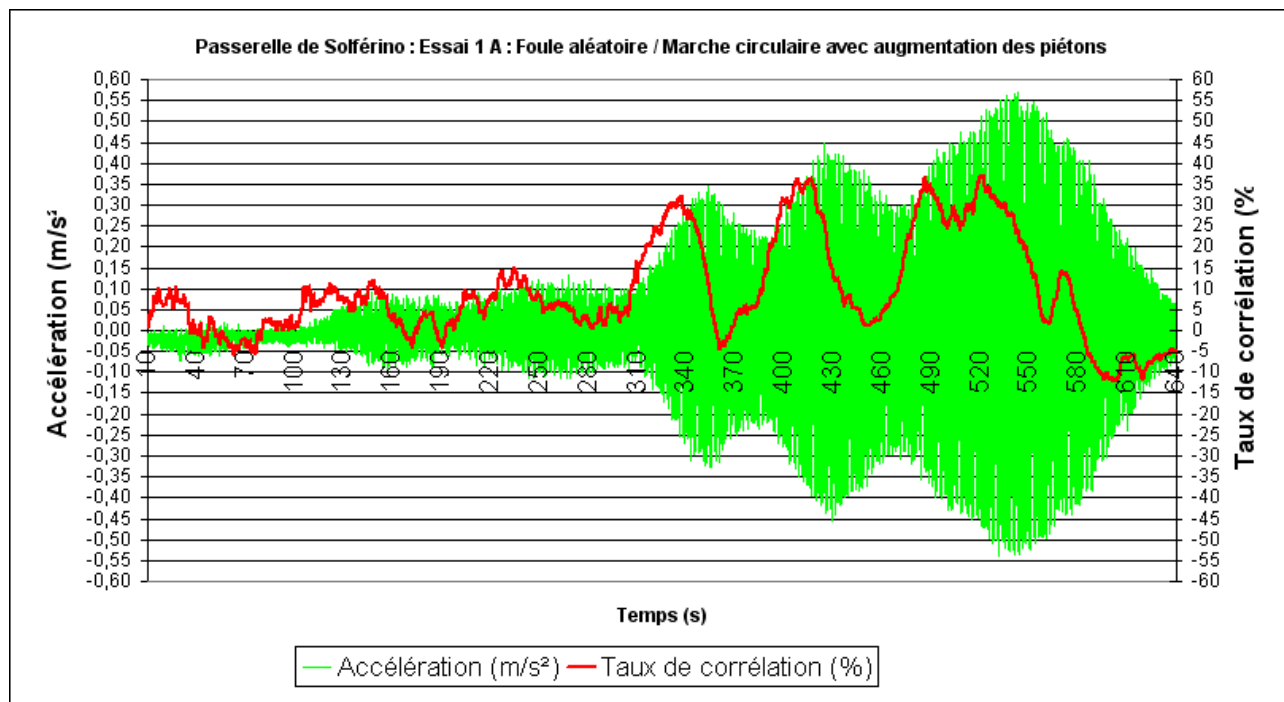
La synchronisation forcée traduit le phénomène par lequel une foule de piétons, dont les fréquences sont distribuées aléatoirement autour d'une valeur moyenne, et dont les déphasages sont aléatoires, vient progressivement se coordonner à une fréquence commune (celle de la passerelle) et à se mettre en phase par rapport aux mouvements de la passerelle.

A ce jour les cas connus de synchronisation forcée d'une foule se sont limités à des passerelles qui se mettent en vibration transversalement. Les deux cas les plus récents et maintenant célèbres sont la passerelle Solferino et la passerelle du Millénium pour lesquelles des essais in situ assez poussés ont été menés.

Afin de mieux quantifier les effets de synchronisation forcée des piétons sous un mouvement latéral, des essais ont été réalisés sur un modèle réduit de passerelle, en recréant les conditions d'une passerelle réelle par analyse dimensionnelle, de conception relativement simple permettant des caractéristiques dynamiques simples (un seul mode horizontal).

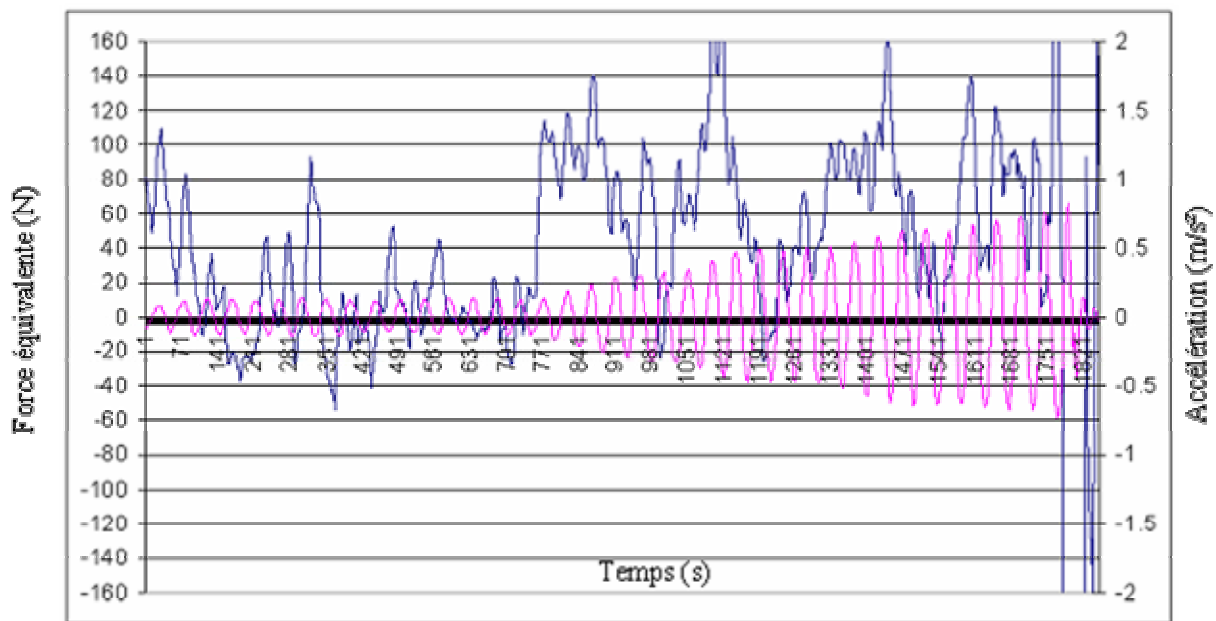
Deux types de comportement sont mis en évidence : le régime aléatoire dans lequel les piétons déterminent eux-mêmes leur fréquence et leur phase indépendamment de l'environnement extérieur, et le régime partiellement synchronisé où une partie des piétons modifient leur pas et se calent à la même fréquence et phase que les mouvements de la passerelle.

Le passage du régime aléatoire sur support fixe au régime synchronisé sur support mobile se produit lorsque l'on dépasse un certain seuil, caractérisé par une accélération critique, ou un nombre critique de piéton. On note que la notion de nombre critique de piétons et la notion d'accélération critique peuvent être reliées. L'accélération critique peut s'interpréter comme l'accélération produite par le nombre critique de piétons, encore aléatoires mais qui ne le sont plus après. On retient la valeur de $0,10 \text{ m/s}^2$ comme seuil critique de synchronisation. Les différents essais réalisés mettent en évidence ce phénomène, illustré dans les exemples ci-dessous. Le taux de corrélation, ou taux de synchronisation, cité ci-dessous, représente le pourcentage de piétons à la fréquence propre de la passerelle et en phase avec celle-ci.



Passerelle de Solférino

Le taux de corrélation passe d'une valeur inférieure à 10% (régime aléatoire) à une valeur de 30 à 40% (régime "partiellement synchronisé"), lorsque l'accélération franchit la valeur de $0,10 - 0,15 \text{ m/s}^2$.



Essai réalisé en laboratoire.

Le changement de régime se produit lorsque l'accélération est autour de 0,15m/s².

Les essais sur le modèle réduit ont montré que l'amplitude de la force individuelle du piéton est constante quelle que soit l'amplitude des vibrations. Seule l'augmentation du taux de synchronisation des piétons engendre une augmentation de la force globale de la foule.

5. MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE DYNAMIQUE DES PASSERELLES

La méthodologie proposée doit permettre de limiter les risques de mise en résonance de la structure sous les pas des piétons. Il est toutefois important de rappeler que, même sans être mises en résonance, les passerelles très légères peuvent connaître des phénomènes vibratoires.

À la source de la démarche prévue, le maître d'ouvrage doit définir la classe de la passerelle en fonction du niveau de trafic qu'elle est appelée à supporter ainsi qu'un niveau d'exigence de confort à respecter. Le principe général est défini par l'organigramme. (Fig. 1)

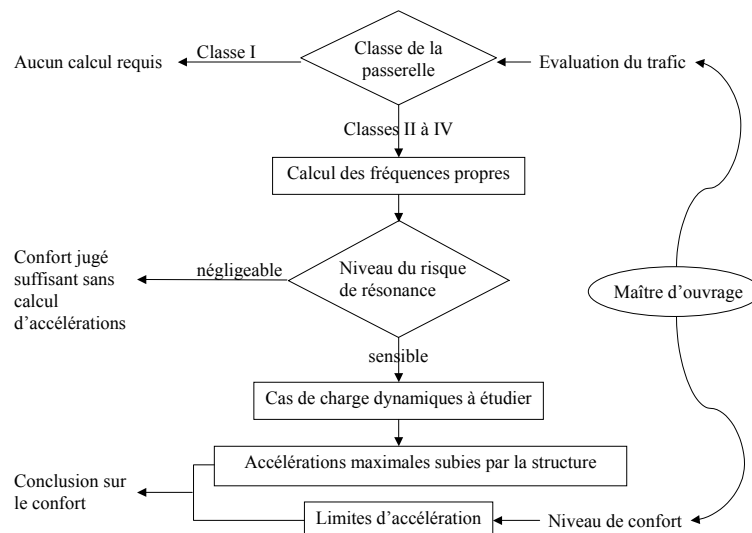


Fig. 1 : Organigramme de la méthodologie

5.1. Étape 1 : Détermination de la classe de la passerelle

La classe de la passerelle permet de situer le niveau de trafic qu'elle supporte :

Classe I : passerelle très peu utilisée, construite 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.).

Classe II : passerelle normalement utilisée, pouvant parfois être traversée par des groupes importants mais sans jamais être chargée sur toute sa surface.

Classe III : passerelle urbaine reliant des zones peuplées, soumise à un trafic important et pouvant être parfois chargée sur toute sa surface.

Classe IV : passerelle urbaine reliant des zones à forte concentration piétonnière (présence d'une gare ou d'une station de métro à proximité, par exemple) ou fréquemment empruntée par des foules denses (manifestations, touristes ...), soumise à un trafic très important.

Il appartient au maître d'ouvrage de fixer la classe de la passerelle en fonction des indications données ci-dessus et en tenant compte des évolutions possibles du trafic dans le temps. Son choix peut également être influencé par d'autres critères qu'il décide de prendre en compte. Par exemple, un sur-classement pourra être retenu pour augmenter le niveau de prévention des vibrations, face à des enjeux médiatiques forts. Au contraire, un sous-classement sera accepté afin de limiter les coûts de construction ou afin de permettre une plus grande liberté de conception architecturale, étant entendu que le risque lié à un sous classement se limite à la possibilité que parfois, lorsque l'ouvrage est soumis à un chargement dépassant en trafic et en intensité les valeurs courantes, certaines personnes puissent éprouver un sentiment d'inconfort.

Les passerelles placées en classe I sont considérées ne nécessiter aucun calcul de vérification du comportement dynamique. Pour les passerelles très légères, il paraît prudent de retenir au moins la classe II, afin qu'un minimum de contrôle du risque soit effectué. En effet, une passerelle très légère peut présenter de fortes accélérations sans qu'il y ait nécessairement résonance.

5.2. Étape 2 : Choix du niveau de confort

Le Maître d'ouvrage fixe le niveau de confort à donner à la passerelle :

Confort minimum : dans des configurations de chargement peu fréquentes, les accélérations subies par la structure sont ressenties par les usagers, sans pour autant devenir intolérables.

Confort moyen : les accélérations subies par la structure sont simplement perceptibles par les usagers.

Confort maximum : les accélérations subies par la structure sont pratiquement imperceptibles par les usagers.

Les indications ci-dessus ne peuvent constituer des critères absolus : la notion de confort est fortement subjective et une même accélération est ressentie différemment suivant les personnes. Le choix d'un niveau de confort doit normalement être influencé par la population utilisant la passerelle et par l'importance de celle-ci. On peut être plus exigeant pour des utilisateurs plus sensibles (écoliers, personnes âgées ou handicapées), plus tolérant pour des passerelles de faible longueur (durées courtes de transit).

Compte tenu du caractère subjectif de la notion de confort, il a été jugé préférable de raisonner en plages plutôt qu'en seuils. Les tableaux 2 et 3 définissent, respectivement pour les accélérations verticales et pour les accélérations horizontales, 4 plages de valeurs désignées 1, 2, 3 et 4. Les 3 premières correspondent, dans l'ordre croissant, aux niveaux de confort maximal, moyen et minimal, décrits au paragraphe précédent. La plage 4 correspond à des niveaux d'accélération inconfortables qui ne peuvent pas être acceptés

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

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

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

Tableau 3 : Zones d'accélération (en m/s^2) pour les vibrations horizontales

Compte tenu du phénomène d'accrochage fréquentiel décrit plus haut, le second tableau donnant les accélérations de confort dans le cas de mouvements latéraux a peu d'intérêt, puisque l'on cherche à se prémunir de ce phénomène (pour les classes II, III et IV), ce qui revient à limiter les accélérations à $0,10m/s^2$ qui sont confortables. En pratique, on fixera pour le comportement latéral le seuil de confort à ce seuil de synchronisation forcée.

5.3. Étape3 : Détermination des fréquences et de la nécessité de mener ou non un calcul avec cas de charge dynamiques

Pour les passerelles de classes II à IV, il est nécessaire de déterminer les fréquences propres de vibration de la structure. Ces fréquences concernent les vibrations dans les 3 directions : verticale, horizontale transversale et horizontale longitudinale. Elles sont déterminées pour 2 hypothèses de masses : passerelle vide et passerelle chargée sur toute sa surface, à raison d'un piéton de 70 kg par mètre carré.

Les plages dans lesquelles se situent ces fréquences propres permettent d'évaluer le risque de mise en résonance par le trafic piétonnier et d'arrêter, en fonction de ce risque, les cas de charge dynamiques à étudier pour vérifier les critères de confort. On distingue, dans la direction verticale comme dans les directions horizontales, 4 plages de fréquences propres, correspondant à un risque décroissant de mise en résonance (Tableaux 4 et 5):

- **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.

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

Tableau 4 : Plages de fréquences (Hz) des vibrations verticales et longitudinales

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

Tableau 5 : Plages de fréquences (Hz) des vibrations horizontales transversales

Suivant la classe de la passerelle et les plages dans lesquelles se situent ses fréquences propres, il y a lieu d'effectuer un calcul dynamique de la structure, pour tout ou partie d'un ensemble de 4 cas de charge :

- Cas 1 : foule peu dense et dense de piétons
- Cas 2 : foule très dense de piétons
- Cas 3 : petit groupe de coureurs
- Cas 4 : complément pour une foule répartie de piétons

Le tableau 6 définit précisément les calculs à mener dans chaque cas.

Trafic	Classe	Calcul des fréquences	Cas de charge à retenir pour le contrôle des accélérations				
Faible	I	non	plages où se situe la fréquence propre				classe
			1	2	3	4	
Normal	II	oui	1	réert	réert	réert	II
Dense	III			1 3 en option	4 3 en option	réert	III
Très dense	IV			2 et 3	2 et 3	3 et 4	IV

cas 1 : Foule peu dense et dense
cas 2 : Foule très dense

cas 3 : Groupe de coureurs
cas 4 : Complément foule (2^e harmonique)

Tableau 6 : Vérifications à mener

5.4. Étape 4 : Calcul avec les cas de charge dynamiques

Lorsque l'étape précédente conclut à la nécessité de mener des calculs dynamiques, ceux-ci doivent permettre :

- la vérification en service, sous les cas de charge dynamiques définis ci-après, des critères de confort définis ci avant et correspondant au niveau requis par le Maître d'Ouvrage,
- les vérifications classiques de types E.L.S. et E.L.U. avec les cas de charge dynamiques.

Les cas de charge dynamiques suivants ont été élaborés pour représenter, de manière simplifiée et pratiquement utilisable, les effets des piétons sur la passerelle. Ils sont construits pour chaque mode propre dont la fréquence a été repérée dans une plage à risque. Chacun de ces chargements est constitué d'une force globale, répartie sur l'ouvrage et sinusoïdale, dont l'amplitude est donnée ci-dessous, et dont la fréquence est égale à chacune des fréquences propres de la passerelle repérée dans la plage à risque. On s'intéresse à l'effet maximal de cette force, obtenu à la résonance au bout d'un temps suffisamment long.

Cas 1 : Foule peu dense et dense

Ce cas n'est à considérer que pour les passerelles de classe II et III. La densité d de la foule de piétons à envisager est fonction de la classe de la passerelle : 0,5 en Classe II et 1 en Classe III.

Cette foule est considérée comme uniformément répartie sur la surface de la passerelle. L'action est à appliquer verticalement, latéralement et longitudinalement. Le signe de l'amplitude de la force du piéton doit être le même que le signe de la déformée modale.

Le nombre de piétons équivalents, c'est-à-dire le nombre de piétons étant tous à la même fréquence et en phase produirait les mêmes effets que des piétons aléatoires, en fréquence et en phases est : $10 \times (\xi \times n)^{1/2}$.

La charge que l'on prend en compte (force verticale sinusoïdale d'amplitude 280 N par piéton, force latérale sinusoïdale d'amplitude 35N) est affectée d'un coefficient réducteur Ψ .

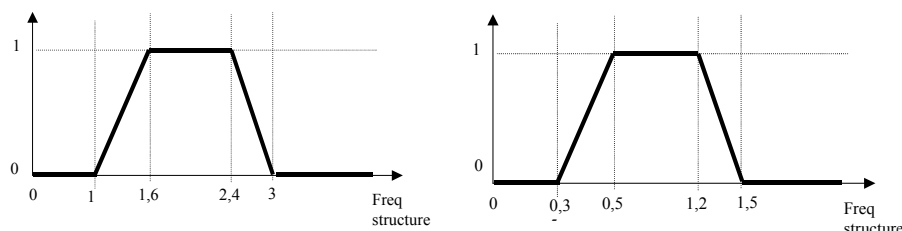


Figure 2 : Facteur Ψ pour les vibrations verticales et longitudinales à gauche, et pour les vibrations latérales à droite

Cas 2 : Foule très dense :

Ce cas de charge n'est à prendre en compte que pour les passerelles de classe IV.

La densité de la foule de piétons à envisager est fixée à 1,5 piétons par m². Cette foule est considérée comme uniformément répartie. On considère que les piétons sont tous à la même fréquence et présentent des phases aléatoires. Dans ce cas, le nombre de piétons tous en phases équivalent au nombre de piétons présentant des phases aléatoires (n) est de $2 \sqrt{n}$.

Cas 3 : Groupe de coureurs

On considère un groupe de 3 coureurs parfaitement synchronisés en phase et en fréquence sur la vibration propre de la passerelle, se déplaçant longitudinalement à la vitesse de 3 m/s. Ils exercent une force verticale sinusoïdale prise égale à 1250 N.

Le coefficient réducteur ψ , tenant compte de l'incertitude sur la coïncidence entre la fréquence de sollicitation par le groupe et la fréquence propre de la structure, est défini par la figure 3 en fonction de la fréquence propre du mode considéré :

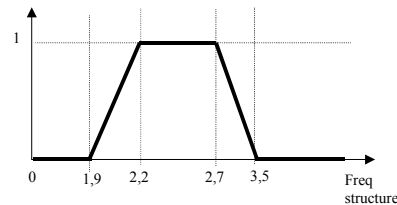


Figure 3 : Facteur ψ pour les vibrations verticales

Cas 4 : Effet de la 2^e harmonique de la foule

Ce cas est similaire aux cas 1 et 2, mais en considérant la 2^e harmonique de la sollicitation de la marche des piétons, située en moyenne au double de la fréquence de la première harmonique. En complément des conditions d'application définies au tableau 6, ce cas n'est à envisager que pour des fréquences propres supérieures à 3 Hz dans les directions verticales et longitudinale, et supérieures à 1,5 Hz pour la direction transversale. L'amplitude de l'action sinusoïdale est le quart de celle de la première harmonique.

5.5. Étape 5 : Modification du projet ou de la passerelle

Si les calculs précédents n'apportent pas les justifications suffisantes, le projet est à reprendre s'il s'agit d'une passerelle neuve, ou des dispositions sont à prendre en compte s'il s'agit d'une passerelle existante (mise en place ou non d'amortisseurs).

La modification des fréquences propres est la façon la plus saine de résoudre les problèmes vibratoires d'une structure. Néanmoins, pour modifier sensiblement les fréquences propres d'une structure, il faut bien souvent effectuer des modifications structurelles très importantes de façon à augmenter la raideur de la structure.

Si l'on ne parvient pas à augmenter suffisamment les fréquences, ou si cette augmentation conduit à une conception qui remet en cause l'existence même du projet, ou encore s'il s'agit d'un ouvrage ancien sur lequel on ne peut pas faire de modifications conséquentes, il faut essayer de diminuer les accélérations (sans jouer directement sur l'amortissement). Pour cela, on peut augmenter la masse de la structure en utilisant un platelage « lourd » (enrobé, béton ou autre). Un autre moyen de réduire les accélérations est d'utiliser des matériaux naturellement amortissant.

En dernier recours, si les solutions précédentes ne fonctionnent pas, on peut prévoir la mise en place de systèmes amortisseurs, qui sont le plus souvent des amortisseurs dynamiquement accordés (ce sont les plus simples à mettre en place : les amortisseurs visqueux nécessitent souvent la construction de dispositifs complexes recréant des déplacements différentiels importants, pour un bon fonctionnement).

6. CONCLUSION

L'état de lieu des connaissances sur les phénomènes dynamiques se produisant sur les passerelles piétonnes dans le cadre du groupe de travail Sétra/AFGC a mis en évidence des lacunes dans la conception des ouvrages actuels. Les recherches menées en France et dans d'autres pays ont permis de répondre en partie à ces manques avec des recommandations qui pourront être mises en pratique assez facilement. Néanmoins, les phénomènes étant largement de l'ordre psychologique et subjectif, des recherches complémentaires viendront sans doute compléter nos connaissances sur le sujet.

7. BIBLIOGRAPHIE

1. *Vibrations Problem in Structures* - Hugo Bachmann et divers auteurs- Birkhäuser Verlag - 1994.
2. *Vibration admissible pour passerelles piétonnes et cyclables* - BS 5400 : Annexe C
3. *CEB Practical guidelines - B.I. 209* - août 1991
4. *Human Tolerance levels for bridge vibrations* – D. R. Leonard -1966
5. *Dynamic design of footbridges*, Y. Matsumoto, T. Nishioka, H. Shiojiri, K. Matsuzaki, IABSE Proceedings, P-17/78.- 1978
6. *Bulletin Ouvrages Métalliques* - OTUA - N° 1 –2 -3
7. *The Millenium bridge, London: problems and solutions*: P.Dallard & als - The Structural Engineer - Vol 79 N° 8 - 17 April 2001
8. *Proceedings du séminaire FOOTBRIDGE 2002*, OTUA