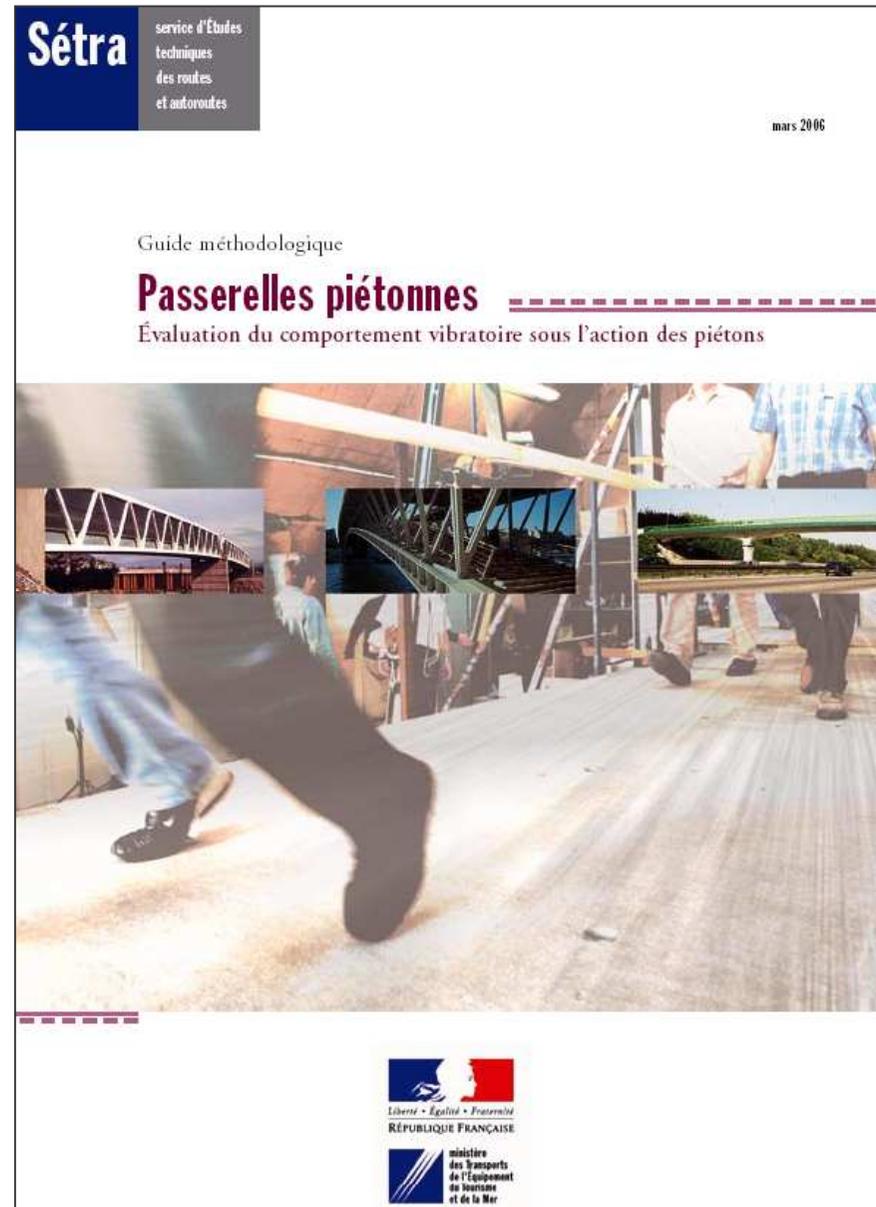


## Guide méthodologique



# Guide « Comportement dynamique des passerelles » Problématique, méthodologie et exemple d'application



Rencontre CTOA / DOA de CETE

Judi 5 Octobre 2006

# Sommaire

1. Problématique

2. Genèse du guide

3. Méthodologie : classe de la passerelle, seuil de confort et charge piétonne

4. Amélioration du comportement dynamique

5. Exemple d'application

# 1. Problématique

Événement : 2 exemples célèbres l'un à Paris (Passerelle de Solférino) l'autre à Londres (Passerelle du Millenium), toutes deux fermées juste après leur inauguration, ont relancé les préoccupations sur les vibrations des passerelles piétonnes. Dans les deux cas, ce sont des mouvements horizontaux qui ont été ressentis.

État de l'art : quelques règlements (dont les Eurocodes) évoquent le phénomène de l'effet des piétons sur une passerelle et des vibrations engendrées.

Groupe de Travail SETRA – AFGC pour établir un guide et des recommandations, basé sur des essais grandeur nature sur la passerelle de Solférino, et en laboratoire au LREP.

## Passerelle Solferino inaugurée le 15/12/1999



## Passerelle Solferino

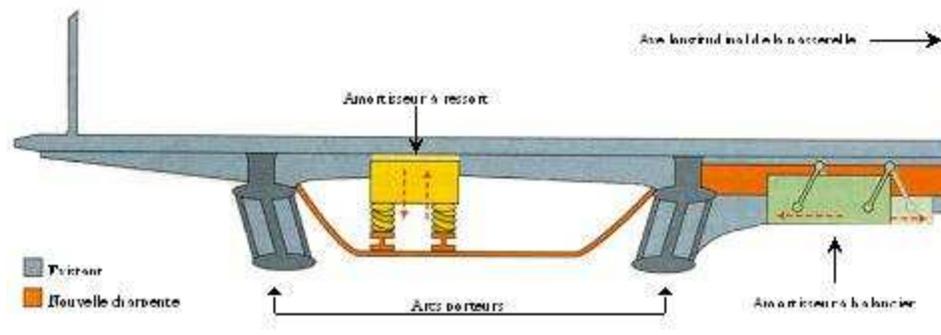


**Vibrations sous sollicitations piétonnières**

$f_h : 0,81 \text{ Hz}$        $f_v : 1,66 \text{ Hz}$

(  $f_v : 2,263 \text{ Hz}$  Travée de rive)

## Passerelle Solferino amortisseurs dynamiques accordés



## Passerelle du Millenium inaugurée le 10/06/2000



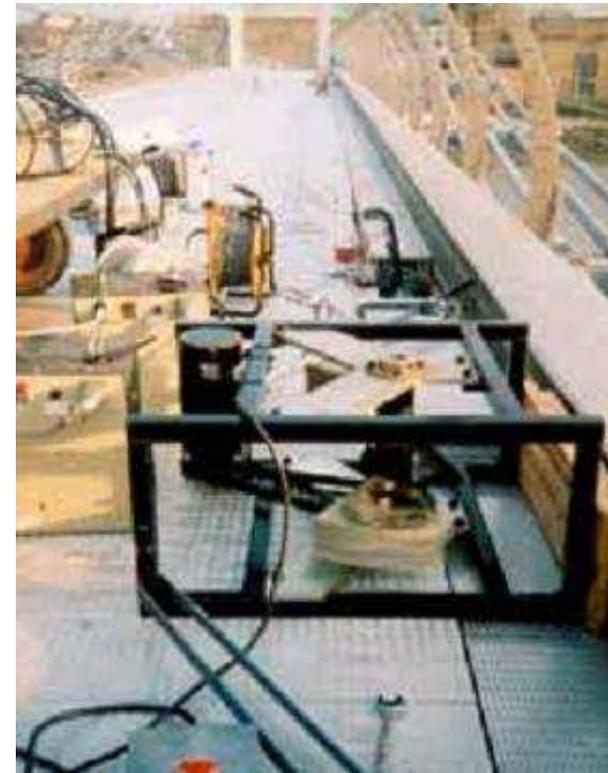
## Passerelle du Millenium



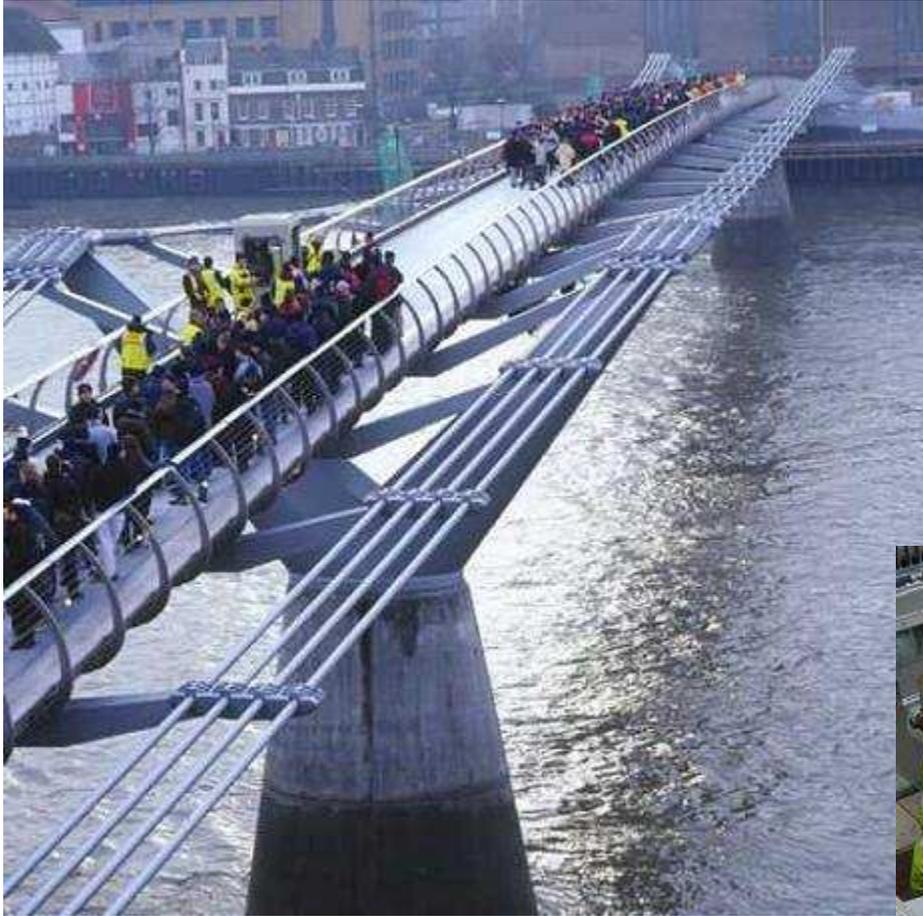
Inauguration entre 80000 et 100000 personnes ont emprunté la passerelle

Avec des groupes importants  $\approx 2$  piétons / m<sup>2</sup>

## Fréquences d'oscillations observées



0,48 Hz  
0,78 Hz  
0,95 Hz  
1,05 Hz



**Passerelle du Millenium  
essais de foule**

**... et installation des  
amortisseurs visqueux**



Coût de l'opération : 5 M£

Coût de passerelle de 18M£

## 2. Genèse du Guide

- *Une prise en compte basée sur la **notion de risque** (trafic élevé ? personnes à risque ? fréquences propres +/- proches de la fréquence des piétons ?)*
- *De ce fait, le rôle du MOA est fort : il doit raisonnablement choisir son **niveau de trafic** et son **confort attendu** : trop laxiste, il s'expose à des désagréments lors d'inaugurations ou de phénomènes avec foule dense, trop sévère, il limite les possibilités architecturales et/ou augmente significativement le coût de l'ouvrage.*
- *Chargements issus d'analyses statistiques de foules aléatoires mais prise en compte d'une valeur caractéristique et non moyenne → ne pas surestimer le trafic attendu...*
- *Prise en compte des résultats d'essais Passerelle Solferino et Modèle réduit de passerelle au LREP. Critère conservatif relativement sévère pour éviter les phénomènes d'accrochage fréquentiel du fait de vibrations latérales.*

### 3. Méthodologie pour le calcul des passerelles

- Choix de la **classe** de la passerelle → MOA
- Choix d'un **niveau de confort** à adopter → MOA
- Calcul des **fréquences** si nécessaire, et détermination de la nécessité ou non de calculer les accélérations
- Pour chacun des **modes propres**, si le calcul des accélérations est nécessaire (sinon comportement dynamique validé) :
  - Définition des cas de charge à prendre en compte
  - Définition des amortissements à prendre en compte
  - Calcul des accélérations
  - Vérification par rapport aux niveaux de confort ou aux seuils d'accrochage
  - Modifications éventuelles (structurelles ou amortisseurs)
  - Réalisation d'épreuves ou d'essais si nécessaire

## Classe de la passerelle

- **Classe IV : 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 autoroute ou une voie rapide).
- **Classe III : passerelle normalement utilisée**, pouvant parfois être traversée par des groupes importants, sans jamais être chargée sur toute sa surface.
- **Classe II : passerelle urbaine reliant des zones peuplées**, soumise à un trafic important et pouvant être parfois chargée sur toute sa surface.
- **Classe I : 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.

## Seuils de confort

**Vert** → confort « bon » : Si la passerelle est stratégique et que l'on veut proscrire tout phénomène d'inconfort. Confort maximum : les accélérations subies par la structure sont pratiquement imperceptibles par les usagers.

**Rose** → confort « moyen » : Cas courants les accélérations subies par la structure sont simplement perceptibles par les usagers.

**Jaune** → confort « médiocre » : dans des configurations de chargement peu fréquentes, les accélérations subies par la structure sont ressenties par les usagers, sans pour autant devenir intolérables. Si l'on veut laisser libre cours à l'architecte et que de toute façon, il n'y aura jamais beaucoup de monde.

**Rouge** → très inconfortable, à proscrire.



## Plages d'accélération

Compilation des différents seuils de confort déterminés dans la littérature

**Accélération**  
**Verticales**  
(m/s<sup>2</sup>)

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

**Accélération**  
**Horizontales**  
(m/s<sup>2</sup>)

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

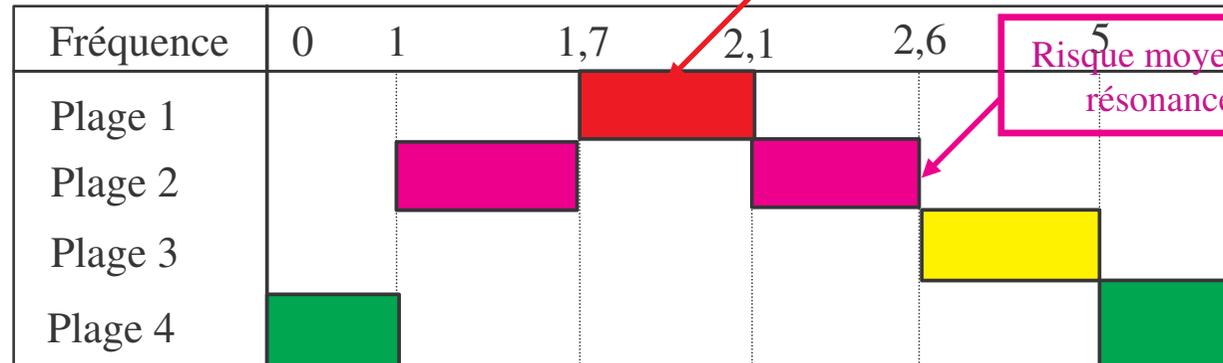
seuil de non accrochage fréquentiel

## Calcul des fréquences pour les classes I, II et III

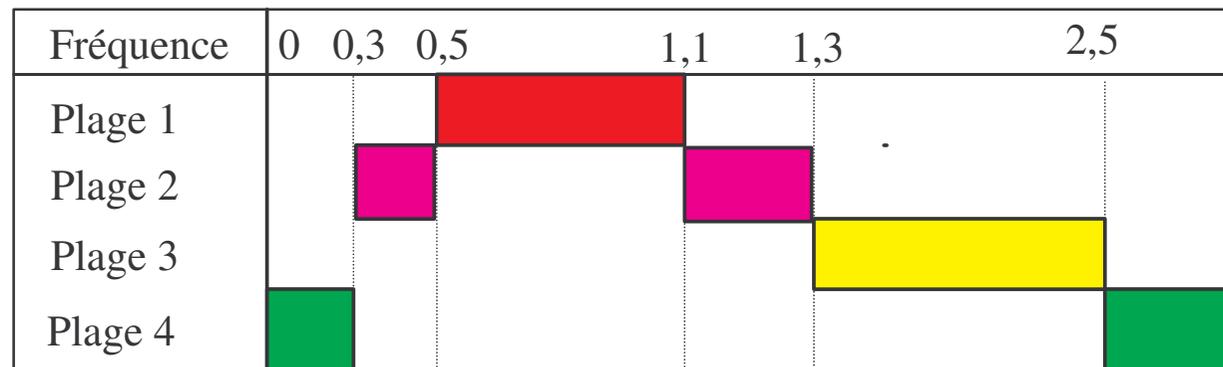
Calcul des fréquences et détermination de la nécessité ou non de réaliser le calcul des accélérations

Tableaux issus d'une analyse bibliographique

**Fréquences Verticales**  
(en Hz)



**Fréquences Horizontales**  
(en Hz)



## Nécessité de faire ou non les calculs d'accélération

Tableau croisé Fréquence / Trafic = Risque → chargement +/- sévère :

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

Risque maxi de résonance

Risque moyen de résonance

cas 1 : Foule peu dense et dense

cas 3 : Complément foule (2° harmonique)

cas 2 : Foule très dense

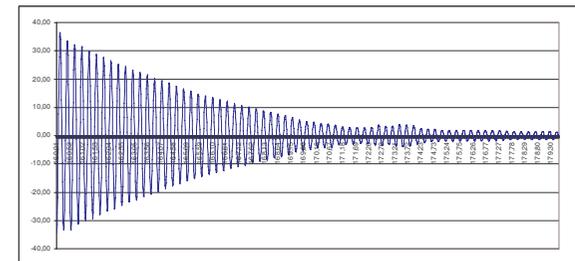
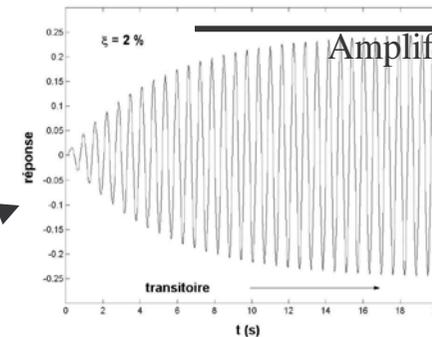
# Le calcul de l'accélération dépend

## Valeurs des amortissement à prendre en compte

Rappel :

l'amortissement plafonne les vibrations

et dissipe +/- vite les vibrations



<b>type</b>	<b>Pourcentage d'Amortissement critique</b>
béton armé	1.30%
béton précontraint	1.00%
mixte	0.60%
acier	0.40%

Correspondent à des amortissements volontairement faibles (à vide)

<< aux amortissements pris en compte pour le comportement sismique...

Structure composée de plusieurs matériaux

$$\xi_{\text{équivalent mode } i} = \frac{\sum_{m \text{ matériau}} (EI)_m \xi_{m,i}}{\sum_{m \text{ matériau}} (EI)_m}$$

# Le calcul de l'accélération dépend

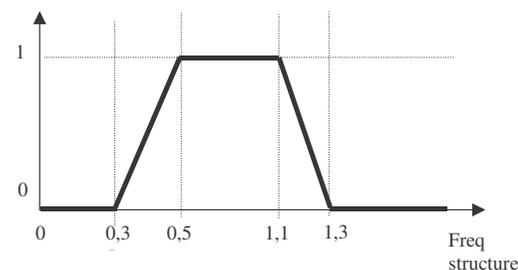
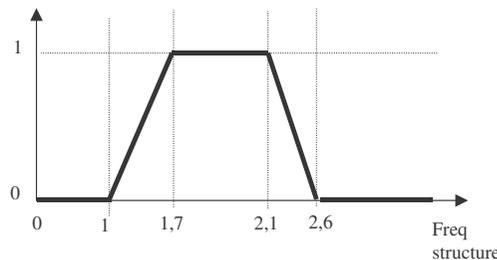
## Cas de charge

Cas n°1 : Foule peu dense, pour les passerelles de classe II et III ( $n=d \times S$ )

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

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

Coefficient  $\psi$



Répartition des fréquences suivant une loi de Gauss et répartition aléatoire des phases

Nombre équivalent =

$$10,8 \times \sqrt{\xi / n}$$

Le résultat en accélération doit être inférieur au seuil de confort défini par le MO ou au seuil d'accrochage de 0,10m/s<sup>2</sup> dans le cas de vibrations latérales

## Cas de charge

Cas n°2 : Foule dense : passerelles de classe I uniquement : densité de 1 piéton /m<sup>2</sup>

Direction	Charge par m <sup>2</sup>
Verticale (v)	$1,0 \times (280\text{N}) \times \cos(2\pi f_v t) \times 1,85 (1/n)^{1/2} \times \psi$
Longitudinale (l)	$1,0 \times (140\text{N}) \times \cos(2\pi f_l t) \times 1,85 (1/n)^{1/2} \times \psi$
Transversale (t)	$1,0 \times (35\text{N}) \times \cos(2\pi f_t t) \times 1,85 (1/n)^{1/2} \times \psi$

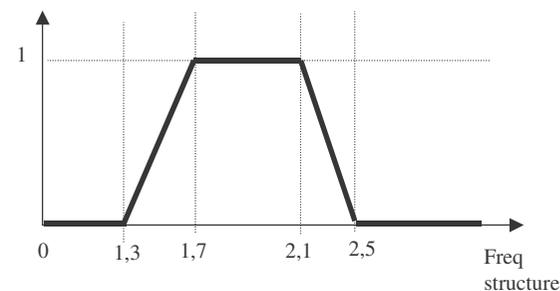
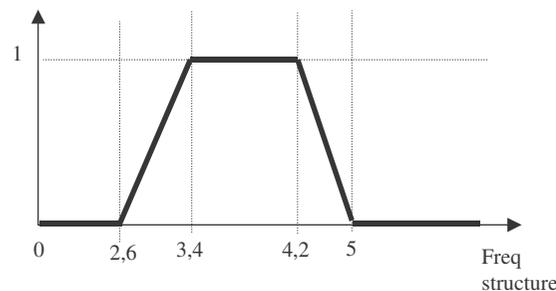
Piétons tous à la fréquence propre, mais phases aléatoires

Nombre équivalent =

$$1,85 \sqrt{n}$$

Cas n°3 : seconde harmonique de la marche des piétons.

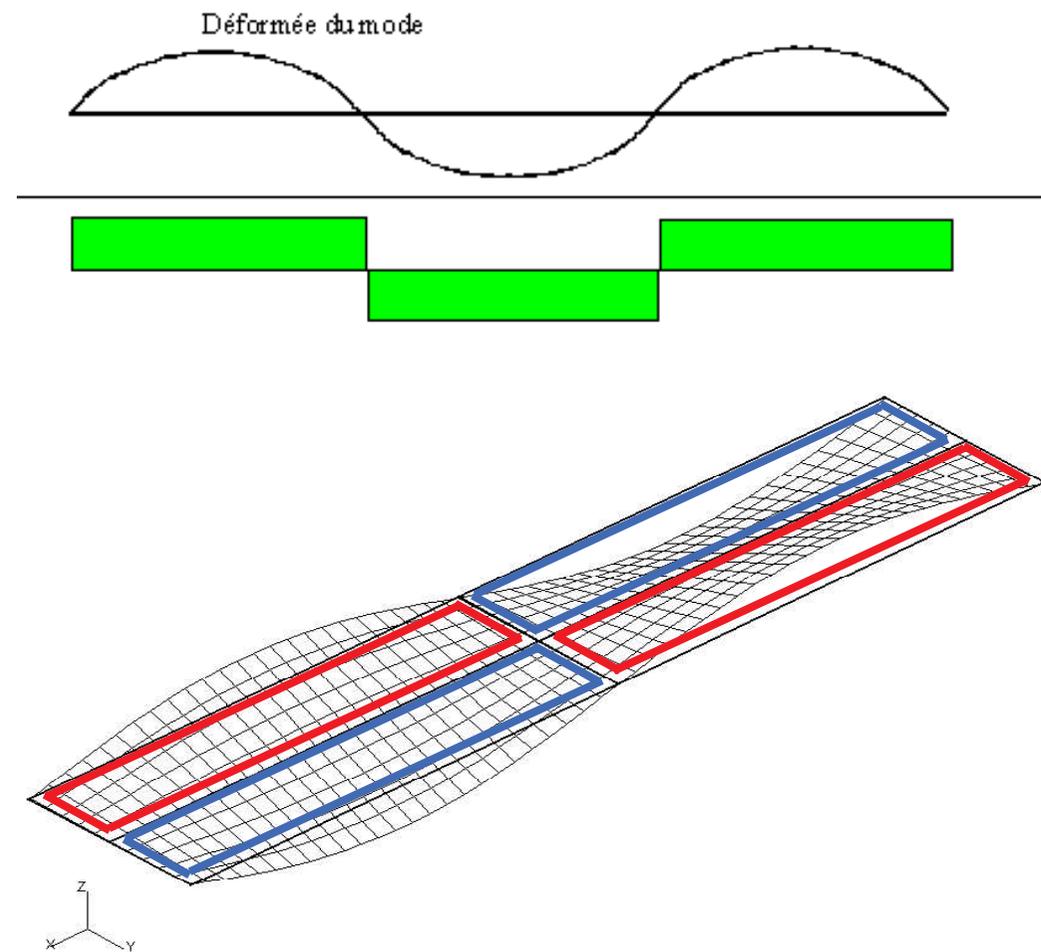
idem cas 1 et 2, mais force / 4 et coefficient  $\psi$  donné ci-après :



# Le calcul de l'accélération dépend

## Positionnement des charges

Positionnement des charges à prendre en compte (comportement longitudinal seul)



## Finalemment ...

- Les accélérations calculées sont comparées aux seuils de confort définis indirectement par le maître d'ouvrage

**ça marche ...**

# Ou ça ne marche pas ...

## 4. Amélioration du comportement dynamique

Modifications éventuelles si dépassement des seuils de confort :

Modification des **fréquences propres** : raidissage, modification des conditions de liaisons...

Modification structurelle des **accélérations** : augmentation de la masse, augmentation de la participation des éléments non structurels fortement amortis (platelage béton à connecter par exemple)

**Ajout d'amortisseurs** en derniers recours

Réalisation d'essais dynamique après travaux pour mesurer le coefficient réel d'amortissement, en général supérieur à celui utilisé pour le calcul, et essais de foule pour constater ou non la validation du comportement dynamique

## 5 – Exemple récent

- $L = 24 \text{ m}$
- $b = 2,50 \text{ m}$



# 5 – DCE

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

**Solution DCE : Semelles PRS 2 cm - Dalle BA 12,7 cm**

$$f_n = \frac{n^2 \pi}{2 L^2} \sqrt{\frac{E I}{\rho S}}$$

Calcul dynamique

Foule	peu dense	dense	très dense
<b>classe passerelle</b>	III	II	I
densité "d" foule ( piéton / m²)	0.5	0.8	1
$\rho S$	1 814.73	1 867.23	1 902.23
<b>fréquence</b>	<b>2.23</b>	<b>2.20</b>	<b>2.18</b>
<b>risque de mise en résonance</b>	<b>moyen</b>	<b>moyen</b>	<b>moyen</b>
nb piétons	30	48	59
piétons équivalents en phase	3.72	4.71	14.26

première armonique			
coefficient réducteur $\psi$	0.74	0.80	0.84
Charge variable verticale/m2	13.00	14.21	56.77
<b>accélération</b>	<b>2.85</b>	<b>3.03</b>	<b>11.87</b>
<b>confort</b>	<b>inacceptable</b>	<b>inacceptable</b>	<b>inacceptable</b>
<b>flèche max</b>	<b>1.45E-02</b>	<b>1.59E-02</b>	<b>6.34E-02</b>

# 5 – incidence alourdissement

Semelles PRS 4 cm - Dalle BA 16 cm

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

Calcul dynamique

$$f_n = \frac{n^2 \pi}{2 L^2} \sqrt{\frac{E I}{\rho S}}$$

Foule	peu dense	dense	très dense
<b>classe passerelle</b>	III	II	I
densité "d" foule ( piéton / m²)	0.5	0.8	1
$\rho S$	2 234.93	2 287.43	2 322.43
<b>fréquence</b>	<b>2.65</b>	<b>2.62</b>	<b>2.60</b>
<b>risque de mise en résonance</b>	<b>faible</b>	<b>faible</b>	<b>faible</b>
nb piétons	30	48	59
piétons équivalents en phase	3.72	4.71	14.26

# 5 – incidence allégement

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

## Platelage bois

Calcul dynamique

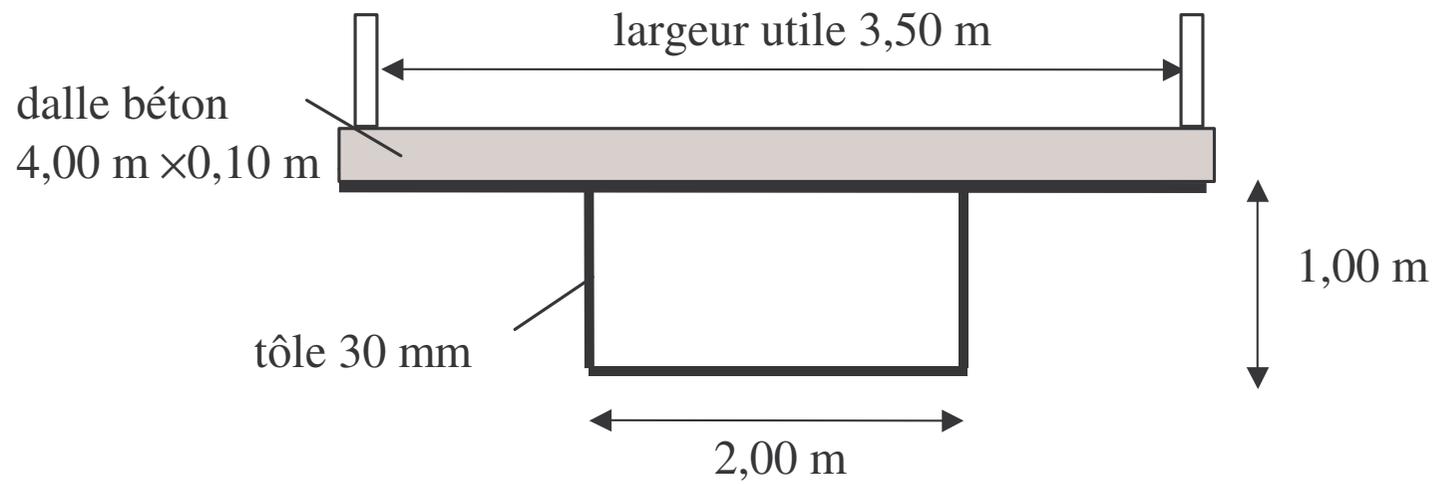
$$f_n = \frac{n^2 \pi}{2 L^2} \sqrt{\frac{E I}{\rho S}}$$

	foule	peu dense	dense	très dense
classe passerelle		III	II	I
densité "d" foule ( piéton / m²)		0.5	0.8	1
$\rho S$		760.68	815.28	851.68
fréquence (Hz)		3.31	3.20	3.13
<b>risque de mise en résonance</b>		<b>faible</b>	<b>faible</b>	<b>faible</b>
nombre de piétons		29.90	47.84	59.80
piétons équivalents en phase		3.73	4.72	14.31



## Exemple d'application

Coupe transversale :



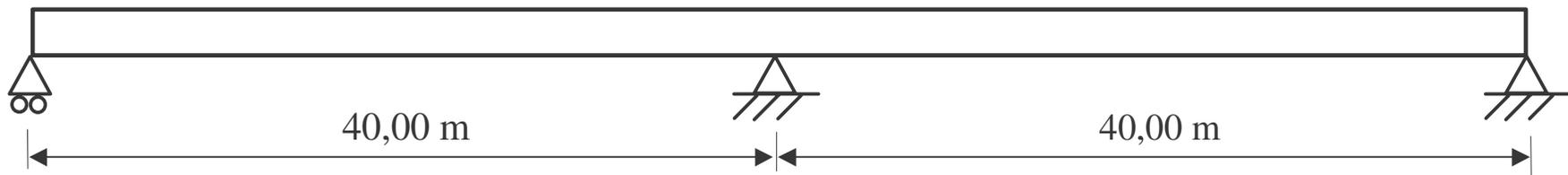
## 5. Exemple d'application

Passerelle à 2 travées de 40m en caisson métallique avec platelage béton participant.

On étudie successivement les classes III, II et I

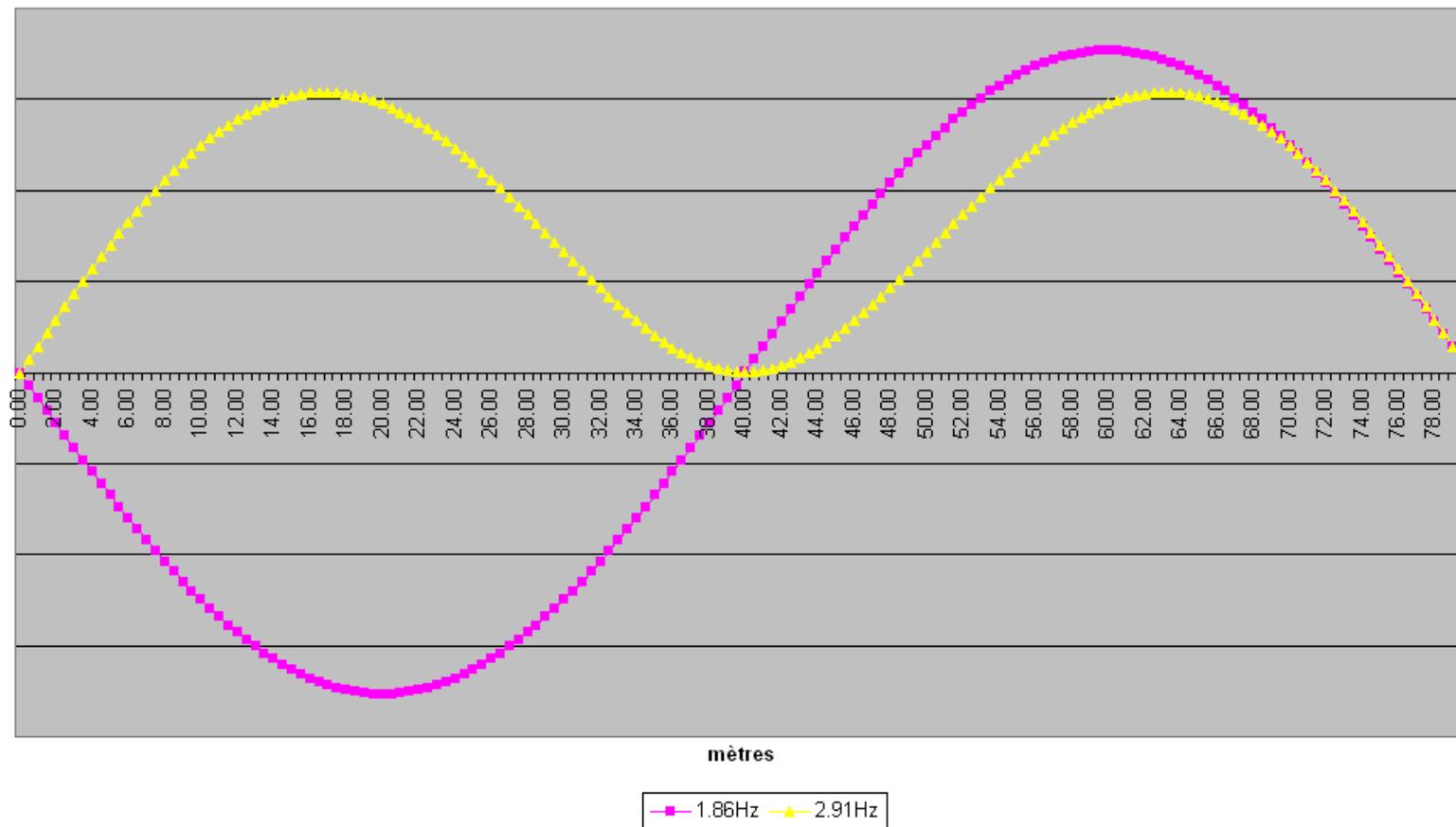
Confort moyen ( $< 1 \text{ m/s}^2$ ), amortissement 0,6% si dalle béton participante

Coupe Longitudinale :



## Exemple d'application (calcul des fréquences)

Modes propres et fréquences basses pour 1 piéton /m<sup>2</sup> :



## Exemple d'application (calcul des fréquences)

Pour le mode 1 les fréquences hautes et basses sont égales à :

1,94 Hz à vide et 1,86 Hz pour 1 piéton / m<sup>2</sup>

se situent dans la plage 1 → Nécessité de faire le calcul pour les classes III, II, I

Pour le mode 2 les fréquences hautes et basses sont égales à :

3,04 Hz à vide et 2,92 Hz pour 1 piéton / m<sup>2</sup>

se situent dans la plage 3 → Nécessité de faire le calcul pour les classes II et I

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

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

cas 1 : Foule peu dense et dense      cas 3 : Complément foule (2<sup>e</sup> harmonique)  
cas 2 : Foule très dense

## Exemple d'application (calcul des accélérations)

Classe III : Mode 2 validé automatiquement

Mode 1 donne une accélération de  $1,16\text{m/s}^2 > 1\text{m/s}^2$

Classe II : Mode 2 donne une accélération de  $0,36\text{ m/s}^2$  OK

Mode 1 donne une accélération de  $1,43\text{m/s}^2 > 1\text{m/s}^2$

Classe I : Mode 2 donne une accélération de  $0,87\text{ m/s}^2$  OK

Mode 1 donne une accélération de  $3,48\text{m/s}^2 \gg 1\text{m/s}^2$

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

## Exemple d'application (modification structurelle)

On redimensionne la passerelle :

Hauteur passe de 1m à 1m40 → les fréquences augmentent

Pour le mode 1 les fréquences hautes et basses sont égales à :

2,57 Hz à vide et 2,47 Hz pour 1 piéton / m<sup>2</sup>

se situent dans la plage 2 → Nécessité de faire le calcul pour les classes II, I

Pour le mode 2 les fréquences hautes et basses sont égales à :

4,02 Hz à vide et 3,83 Hz pour 1 piéton / m<sup>2</sup>

se situent dans la plage 3 → Nécessité de faire le calcul pour les classes II et I

Mode 1 en classe II donne une accélération de 0,32m/s<sup>2</sup> OK

Mode 1 en classe I donne une accélération de 0,85m/s<sup>2</sup> OK

Conclusions précédentes sur la seconde harmonique inchangées