

Introduction aux vibrations

Hivross

Human Induced Vibration of Steel Structures

Vue d'ensemble

- Les bases
 - Equation du mouvement
 - Fréquence propre
 - Masse modale
 - Amortissement
- Vibrations d'origine humaine
- L'objectif du contrôle
- Essai dynamique

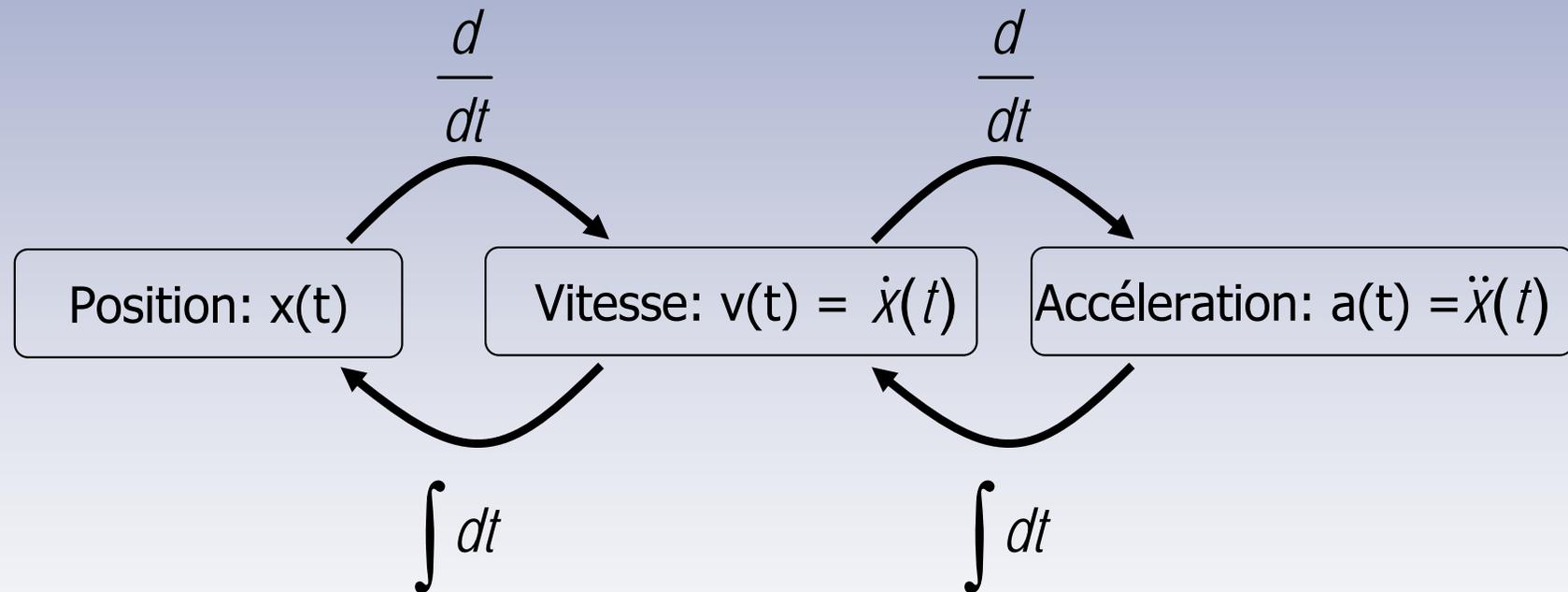
Vue d'ensemble

Hivon

Bases



Dynamique = position de la masse en fonction du temps

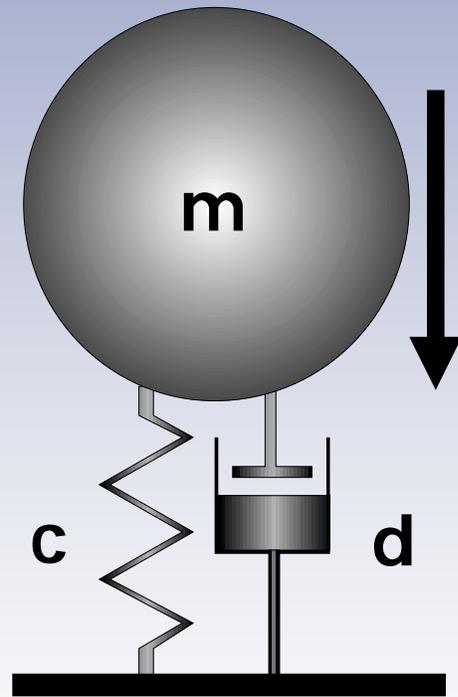


Bases

Hivon

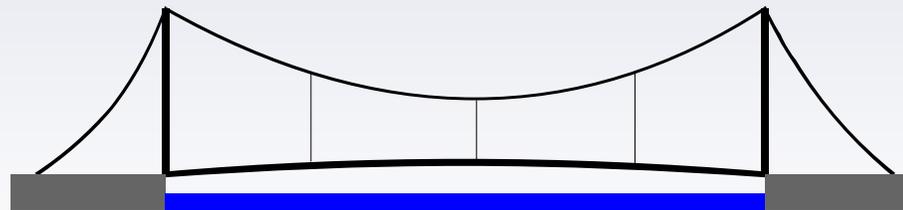
Equation du mouvement

Systeme à un degré de liberté (oscillateur simple)



$$\ddot{x}(t) / \dot{x}(t) / x(t) / F(t)$$

$$\underbrace{m \ddot{x}(t) + c \dot{x}(t) + k x(t)}_{\text{Internal}} = \underbrace{F(t)}_{\text{External}}$$



Bases

Hivon

Equation du mouvement



Equation différentielle d'un système oscillant librement :

$$\underbrace{m \ddot{x}(t) + c \dot{x}(t) + k x(t)}_{\text{Interne}} = \underbrace{0}_{\text{Externe}}$$

$$x(t) = A \sin(\omega_0 t)$$

$$\ddot{x}(t) + \frac{c}{m} \dot{x}(t) + \frac{k}{m} x(t) = 0$$

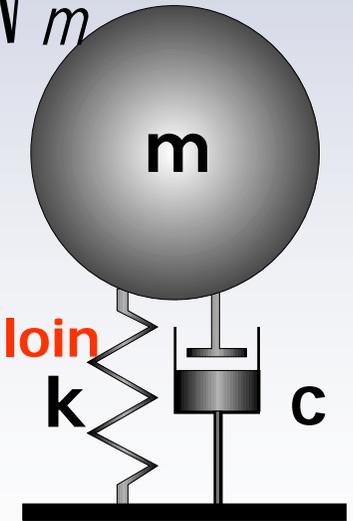
$$\delta = \frac{c}{2m}; \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$\ddot{x}(t) + 2 \delta \dot{x}(t) + \omega_0^2 x(t) = 0$$

$$D = \xi = \frac{\delta}{\omega_0}$$

$$\ddot{x}(t) + 2 D \omega_0 \dot{x}(t) + \omega_0^2 x(t) = 0$$

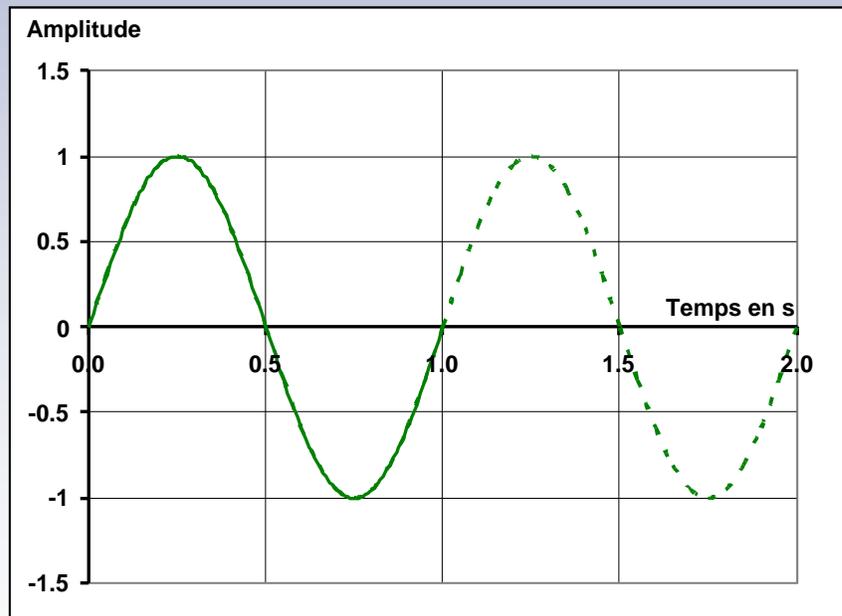
**Amortissement:
Expliquation plus loin**



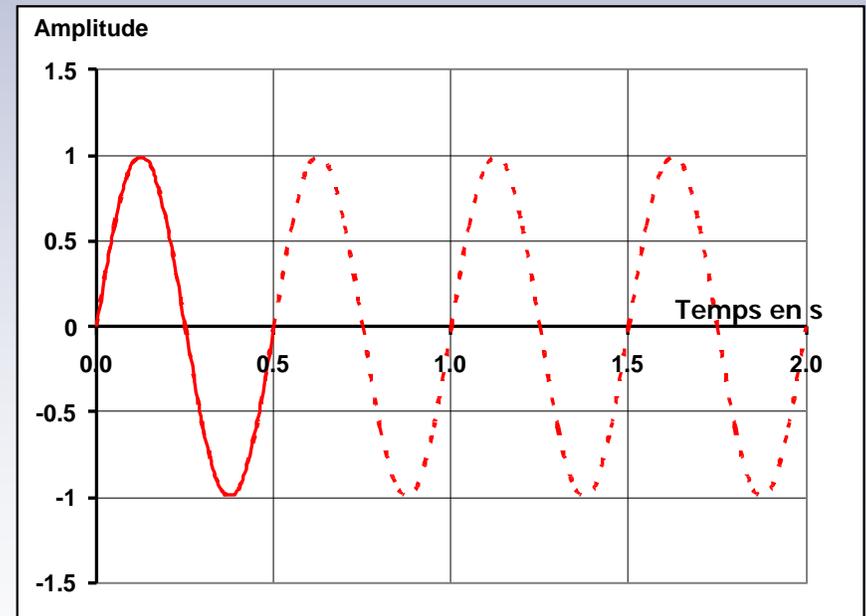
Hivon

Fréquence propre

- Fréquence propre = f en 1/s
- Fréquence angulaire: $\omega_0 = 2 \pi f$ en rad/s
- Vibration harmonique (sinusoïdale) : $x(t) = A \sin(\omega_0 \cdot t)$



Vibration 1 Hz



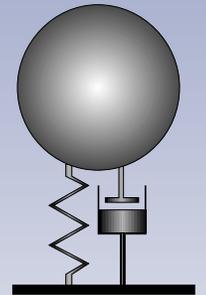
Vibration 2 Hz

Fréquence propre

- Détermination pour un oscillateur simple

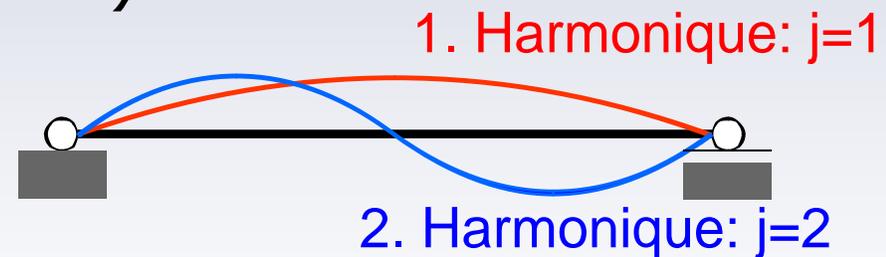
- système non-amorti $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$

- système amorti $\omega_D = \omega_0 \sqrt{1 - D^2} \approx \omega_0$



- Détermination manuelle (poutre)

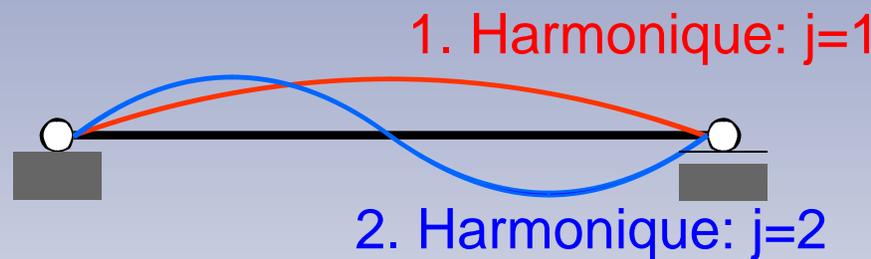
$$\omega_0 = (j \cdot \pi)^2 \sqrt{\frac{EI}{\mu l^4}}$$



- Détermination par ordinateur

Fréquence propre

- Chaque fréquence a son propre mode d'oscillation

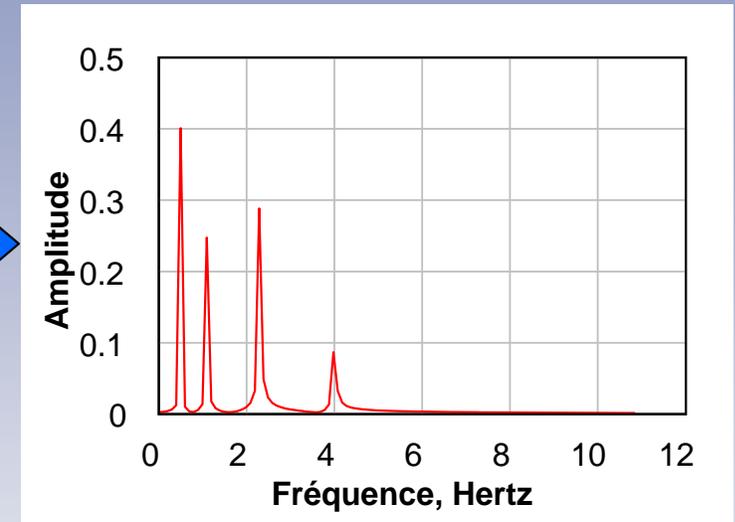
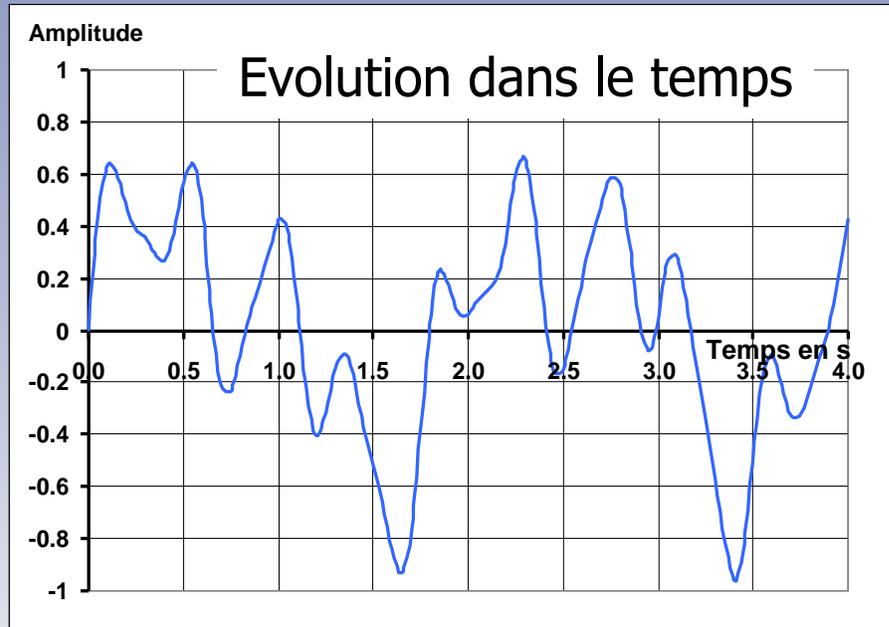


- Il y a autant de fréquences propres et de modes que de degrés de liberté (dynamique)
- Plus la fréquence est basse, plus son énergie est basse
- 1^{ère} fréquence propre \Rightarrow énergie la plus basse \Rightarrow \Rightarrow fréquence la plus probable

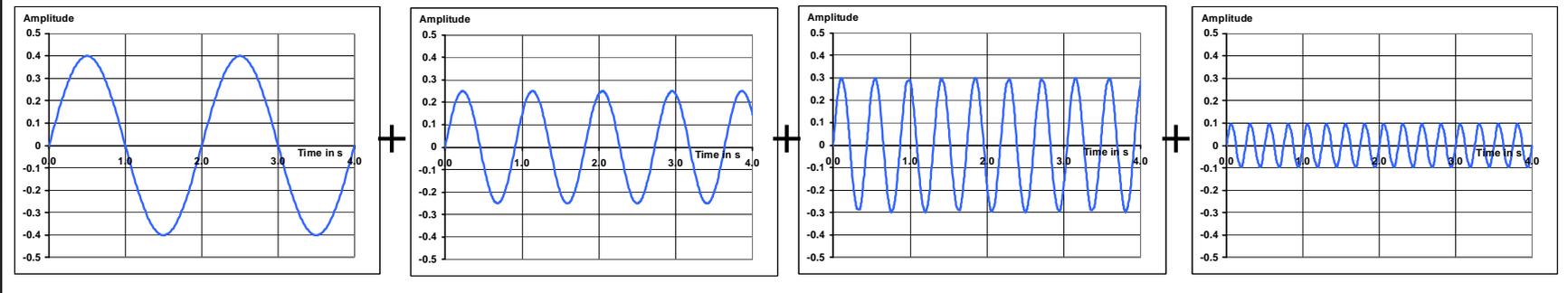
Bases

Hivon

Analyse spectrale

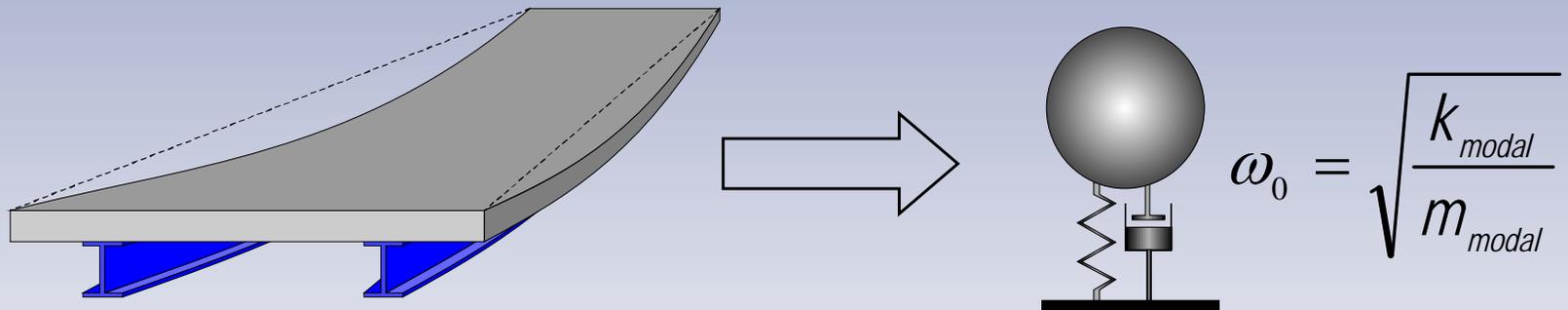


L'évolution dans le temps peut être décrite par un ensemble d'ondes sinusoïdales et leurs amplitudes



Masse modale

- Tous les modes d'un système peuvent être réduit à un oscillateur simple



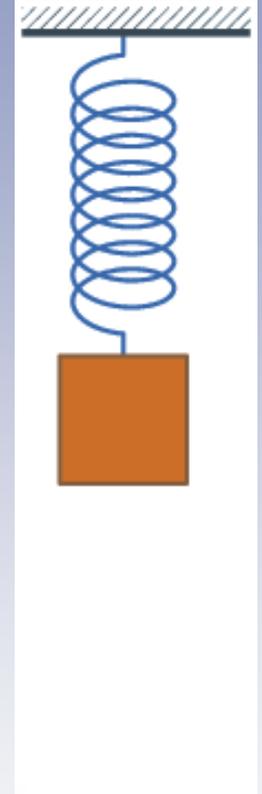
- La fréquence reste inchangée
- La fréquence peut être déterminée grâce aux équations de base utilisant les valeurs "modales"
- Masse modale \approx masse activée

Bases

Hivon

Amortissement

- Effet : Diminution de l'amplitude
- Conversion de l'énergie
 - par frottement
 - par déformation
 - par flux de fluide
 - etc.
- Dépend des
 - matériaux composant la structure
 - assemblages
 - finitions et meubles
 - amplitude des vibrations
 - fréquence
 - etc.



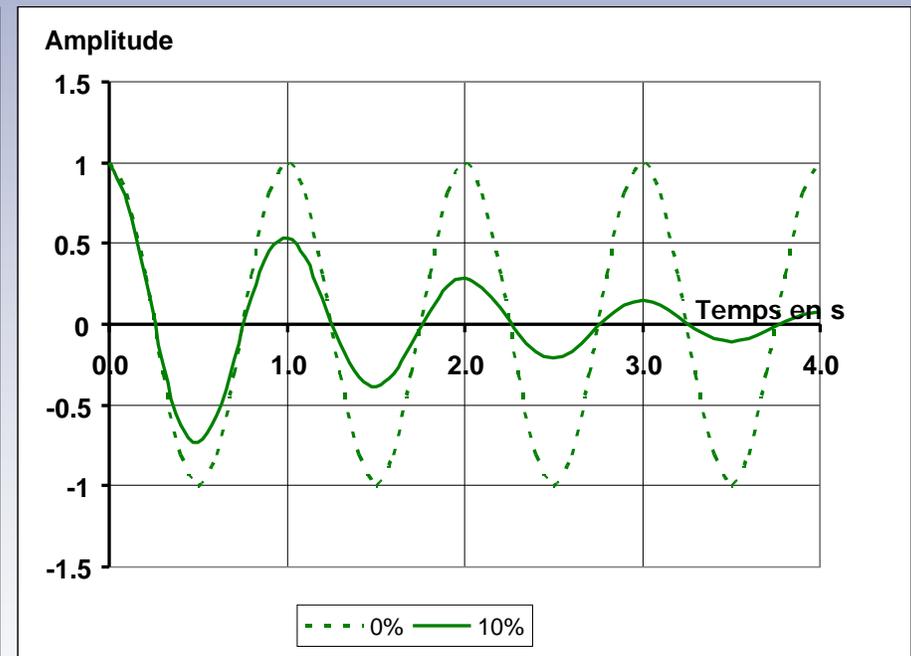
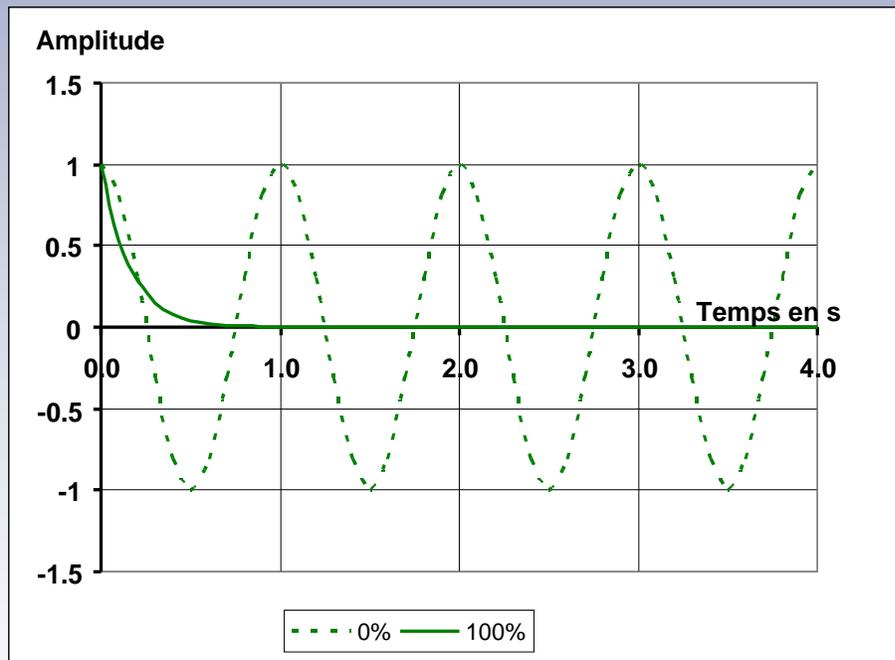
Amortissement

Taux d'amortissement ξ (X_{si})



- 100% Amortissement critique
- 10% Amortissement critique

Bases



Hivon

Spécification de l'amortissement

- coefficient d'amortissement c [Ns/m]
(force d'amortissement $F_D = -c v$)
- décrément logarithmique Λ [-]
(pour la détermination de l'amortissement)
- Taux d'amortissement ξ [-]

– relation à c :
$$\xi = \frac{c}{2m\omega_0} = \frac{c}{2\sqrt{mk}}$$

– relation à Λ :
$$\xi = \frac{\Lambda}{\sqrt{4\pi^2 + \Lambda^2}}$$

Bases

Hivon

Amortissement

Détermination à partir de mesures



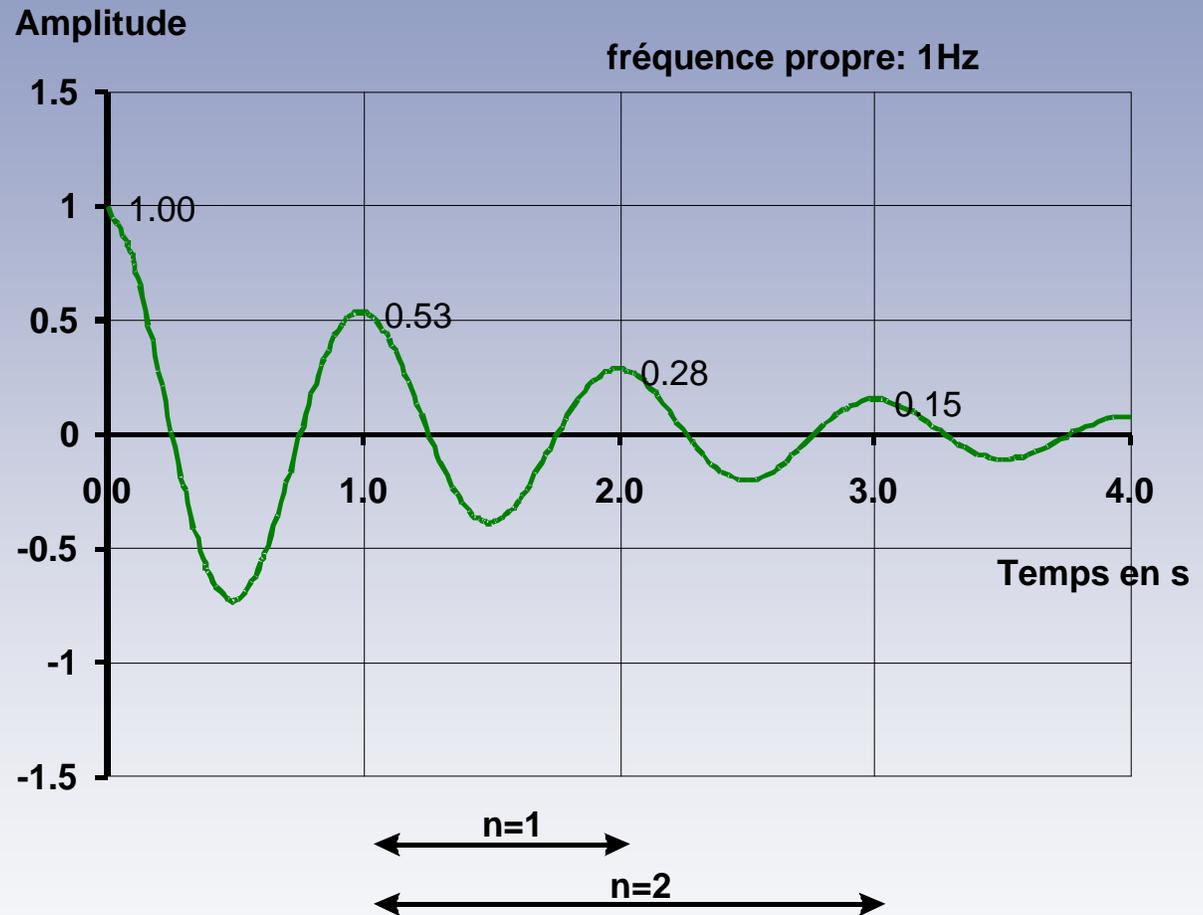
$$\Lambda = \frac{1}{n} \ln \frac{x_0}{x_n}$$

Exemple $n = 1$:

$$\Lambda = \frac{1}{1} \ln \frac{0,53}{0,28} = 0,63$$

Exemple $n = 2$:

$$\Lambda = \frac{1}{2} \ln \frac{0,53}{0,15} = 0,63$$



$$\zeta = \frac{0,63}{\sqrt{4\pi^2 + 0,63^2}} = 0,1$$

Hivon

Vibrations d'origine humaine



Le mouvement humain excite AUSSI les structures !

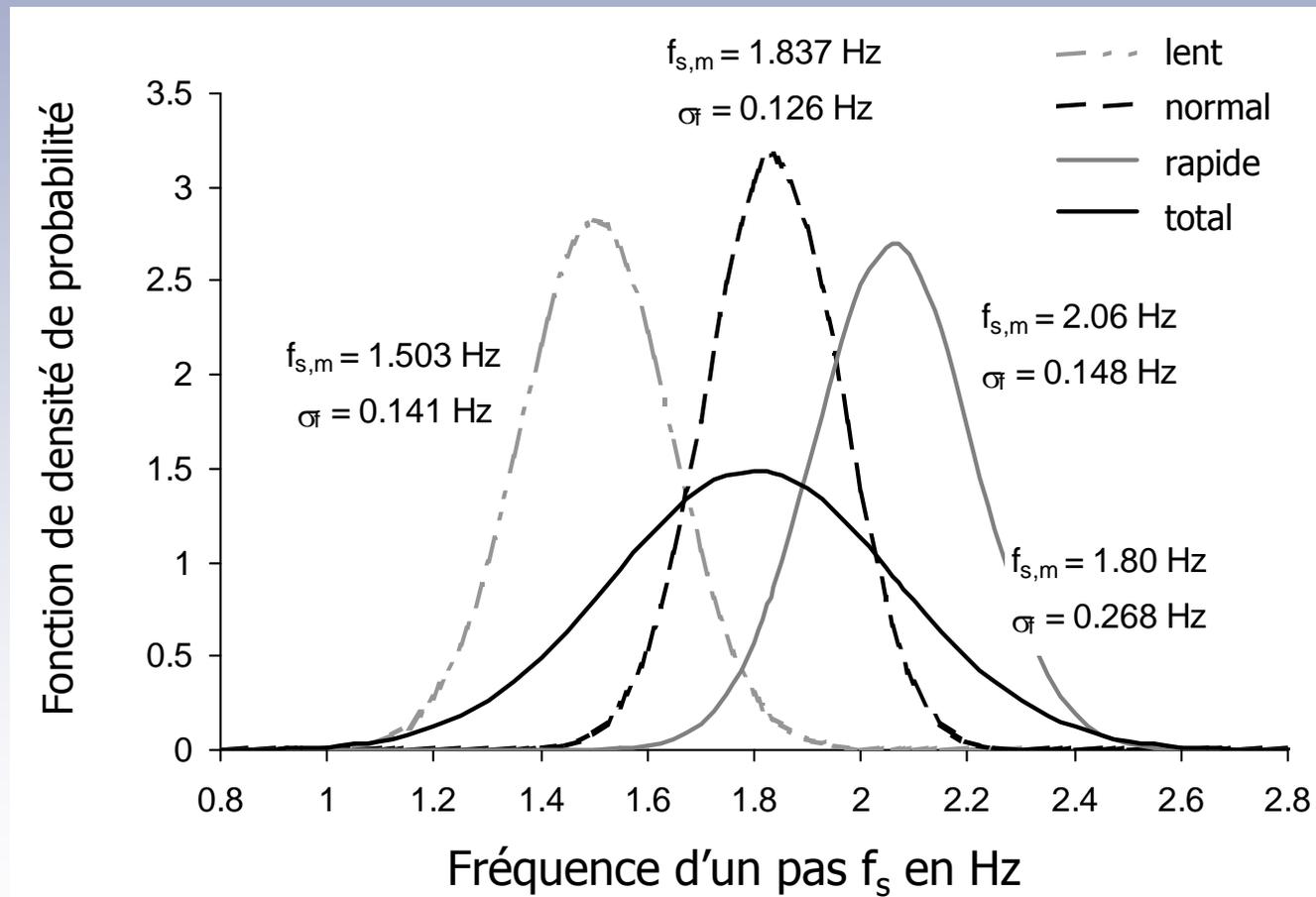


Vibrations d'origine humaine

Fivoss

Fréquence d'un pas

Probabilité de la fréquence d'un pas



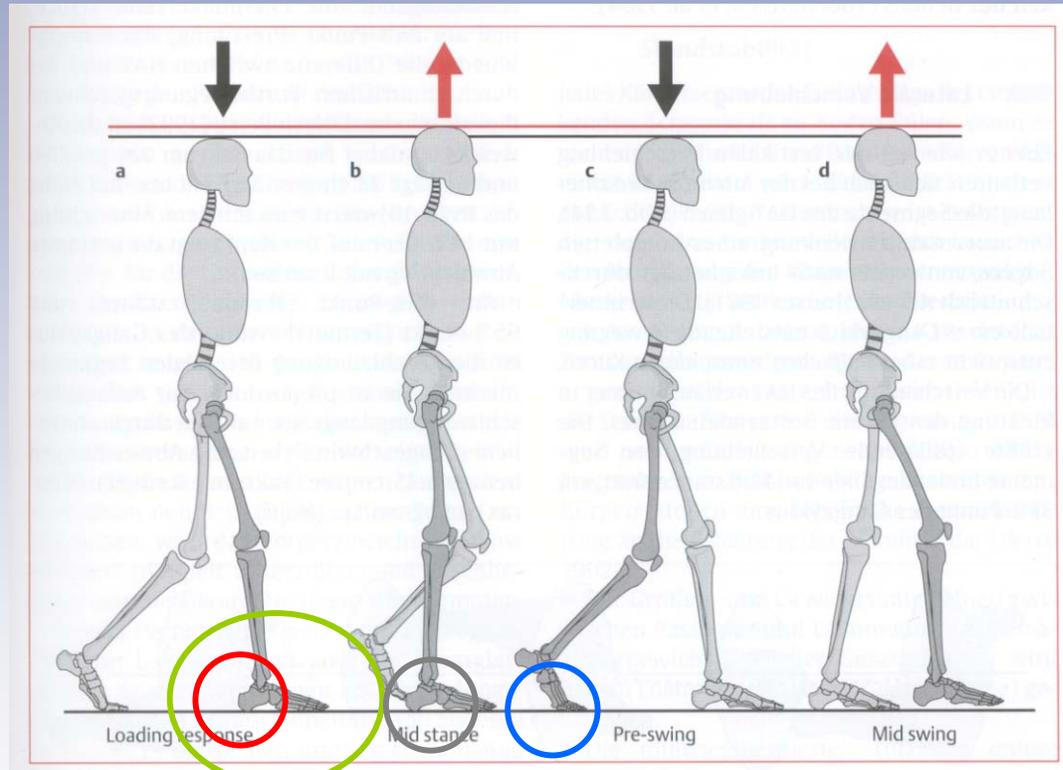
Vibrations d'origine humaine

Hivons

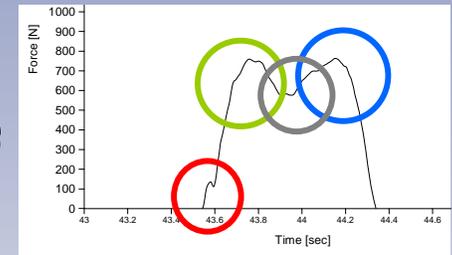
Composante verticale

Force de réaction au sol pour un pied

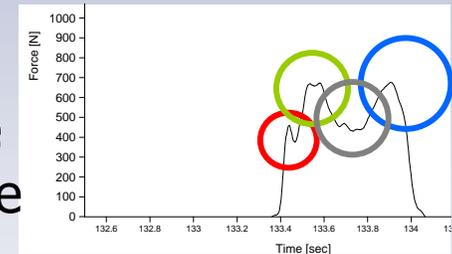
force mesurée de réaction



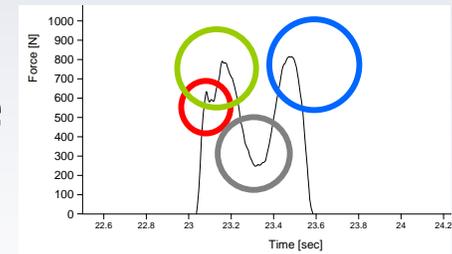
Marche lente



Marche normale



Marche rapide



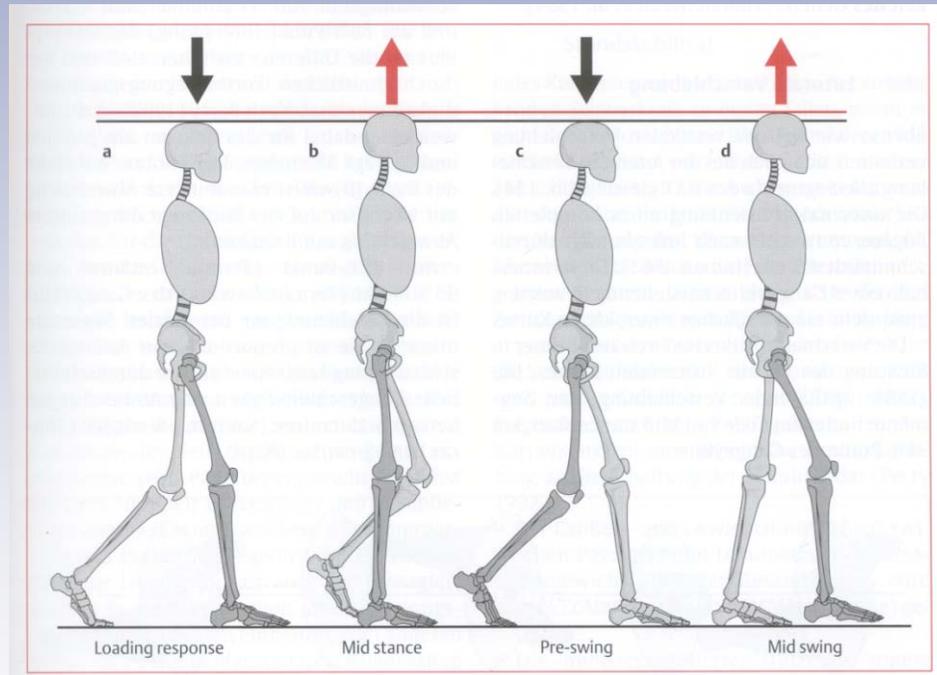
Contact initial Positionnement
Mise en charge Pré-balancement

Hivras

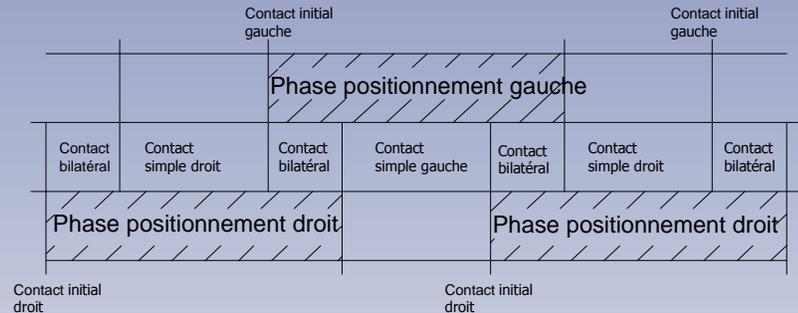
Vibrations d'origine humaine

Composante verticale

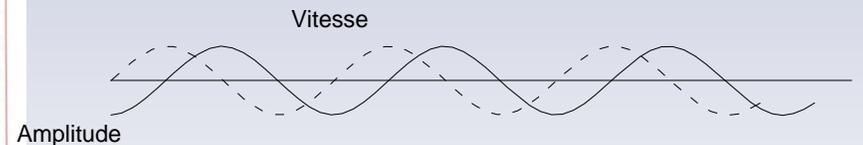
Combinaison des deux pieds



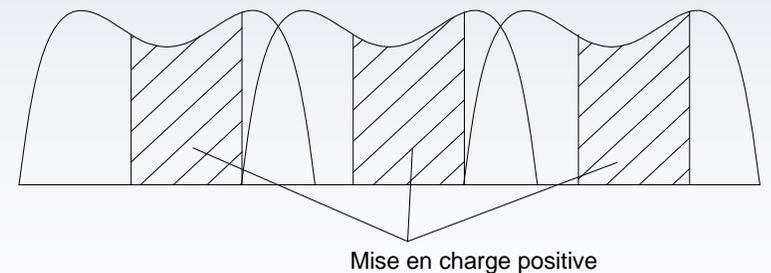
Timing du support simple Et double du pied



Mouvement du centre de gravité de l'humain si synchronisé: mouvement de CoG = vibration des ponts



forces de réaction verticale du sol

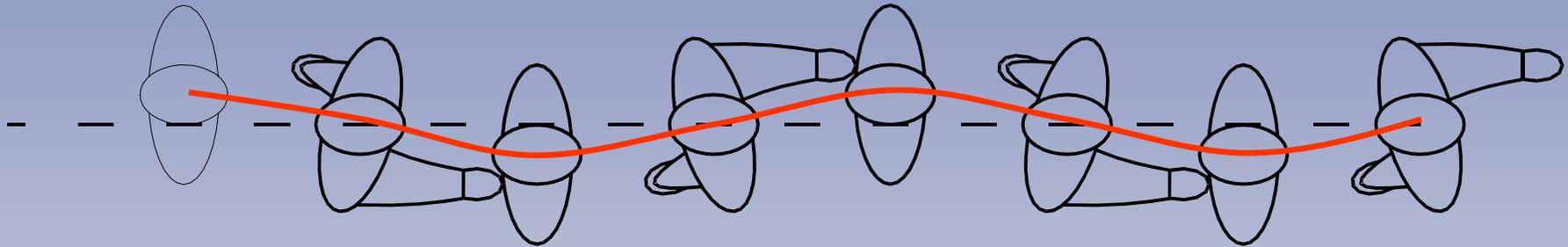


Vibrations d'origine humaine

Hivras

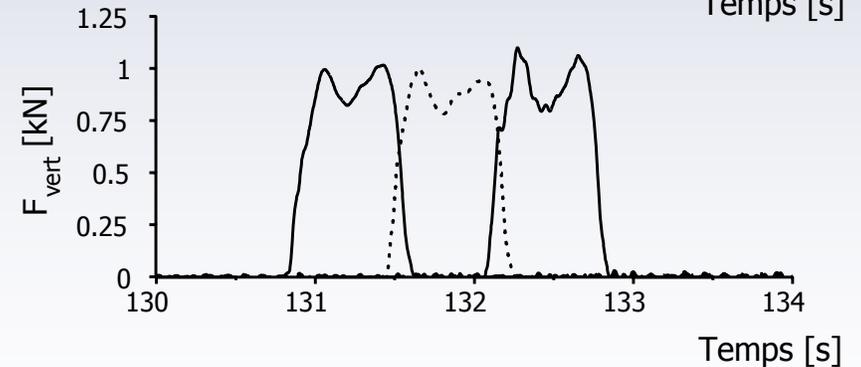
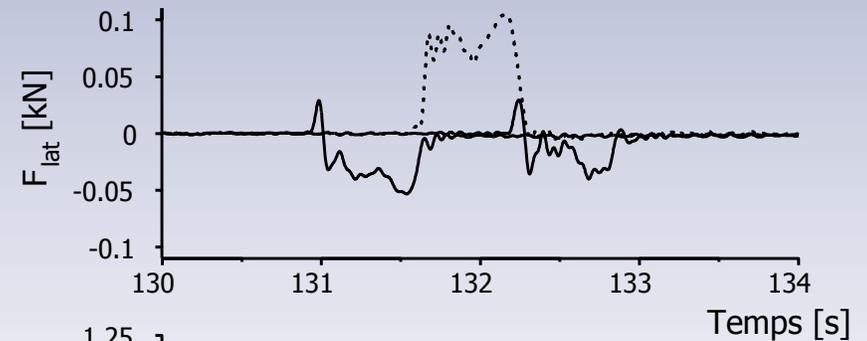
Composante transversale

Vibrations d'origine humaine



Valeurs mesurées (3 pas)

- forces transversales
- forces verticales



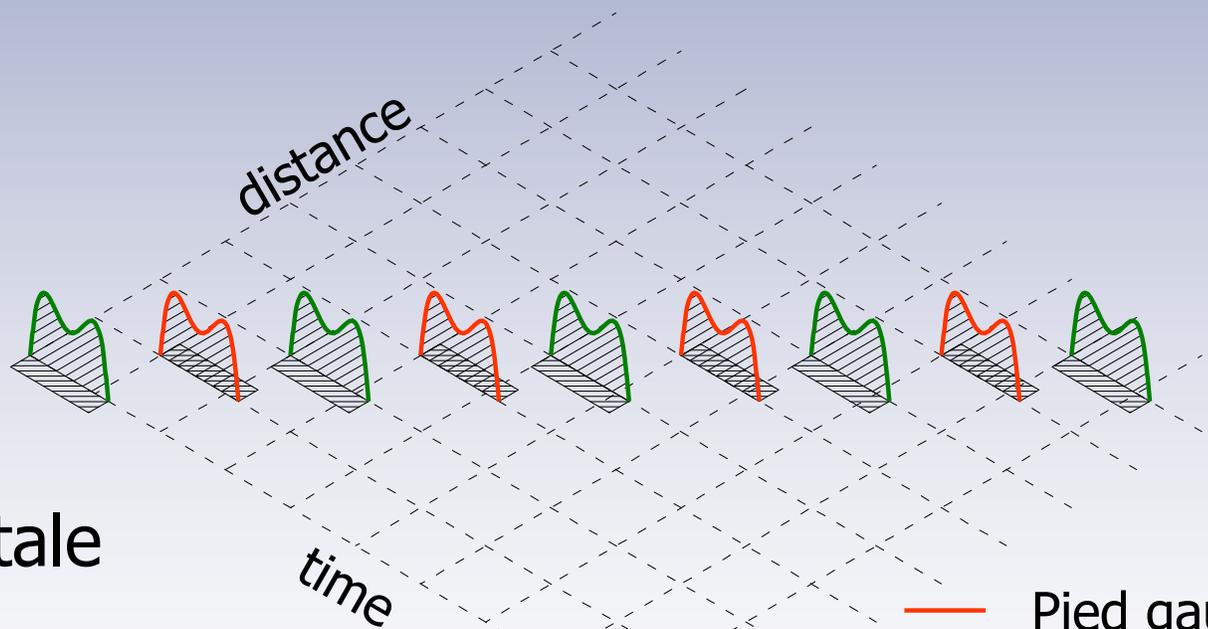
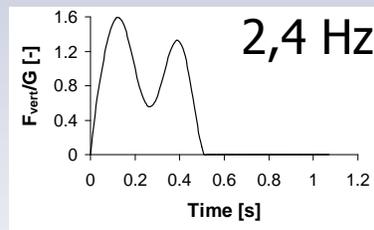
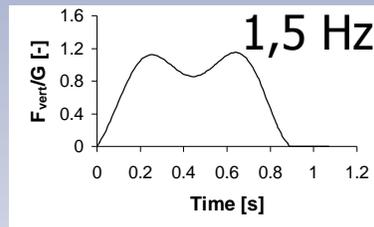
Application des charges

en analyse de pas de temps



- Charge verticale (coefficients voir le rapport **VoF**)

$$F(t)/G = K_1 \cdot t + K_2 \cdot t^2 + K_3 \cdot t^3 + K_4 \cdot t^4 + K_5 \cdot t^5 + K_6 \cdot t^6 + K_7 \cdot t^7 + K_8 \cdot t^8$$



- Charge horizontale

- constante
- dépend de la synchronisation et de l'accélération

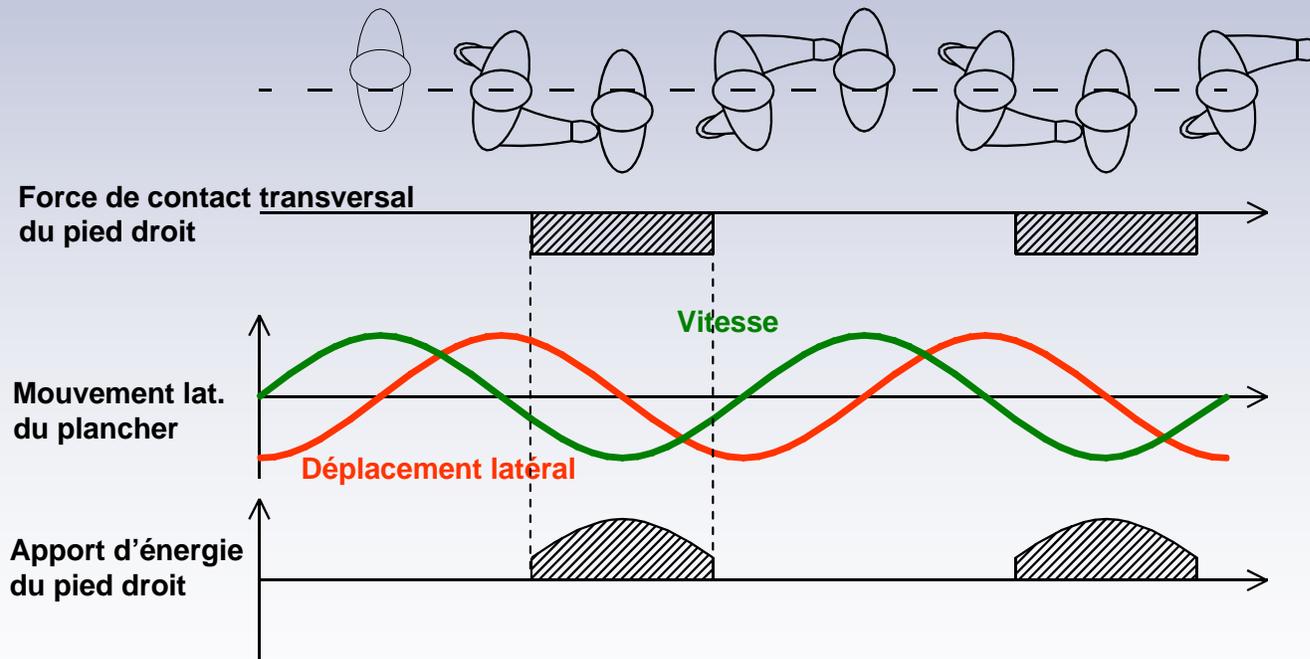
— Pied gauche
— Pied droit

Hivras

Synchronisation

- Négligeable pour les planchers
- Négligeable pour les vibrations verticales
- Non négligeable pour les vibrations transversales

Vibrations d'origine humaine



Hivras

L'objectif du dimensionnement



- Pour les deux types de structure, l'objectif est le **confort**.
- La perception des vibrations est individuelle et dépend de :
 - L'âge et l'état de santé des personnes
 - La situation individuelle lors des vibrations
 - La posture de la personne (assise, debout, allongée)
 - L'attente de la vibration (attente, surprise)
 - La direction de la vibration (horizontale, verticale)
 - L'amplitude de la vibration (accélération)
 - La fréquence de la vibration
 - La durée et la répétition de la vibration
 - etc.
- Les exigences de confort pour les ponts et pour les planchers sont différentes.
- Classification du confort dans les deux cas.

Hivon

Essai dynamique

- L'essai dynamique est nécessaire
 - en cas de doute
 - lorsque les amortisseurs doivent être installés
- Le but de l'essai est
 - détermination des propriétés dynamiques de la structure
 - fréquence propre
 - mode
 - amortissement
 - détermination du confort
- Les procédures d'essai dépendent de l'objectif recherché
- La valeur mesurée est l'accélération

Essai dynamique

Hivon

Accéléromètres

Spécifications :

- Gamme de fréquence 0,1 Hz 50 Hz pour les ponts
1,0 Hz200 Hz pour les planchers
- Sensitivité min. 19 mV/G
- Plage d'accélération $\pm 0,5$ g

Essai dynamique



Piézoélectrique

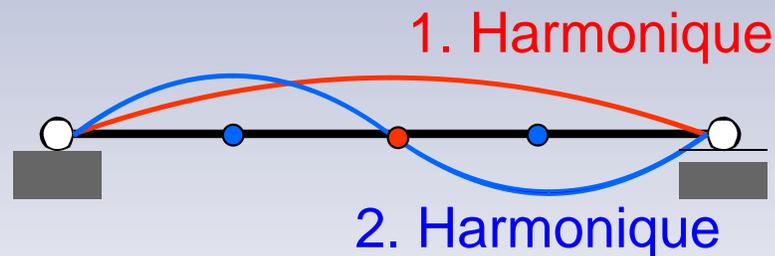


Capacitive

Hivon

Emplacement des accéléromètres

- Pré-calcul recommandé
- L'emplacement dépend des modes étudiés



- Recommandation : Utilisation de plusieurs accéléromètres

Types d'essai

Essai dynamique

Essais d'identification

- détermination des propriétés dynamiques de la structure
 - fréquences propres
 - modes
 - amortissement
- essais de vibration ambiante
- essais de vibration forcée
- essais de vibration libre

Essais de performance

- détermination du confort
- essai d'identification à effectuer au préalable
- essai de marche sous condition d'utilisation

Essai de vibration ambiante



Essai dynamique

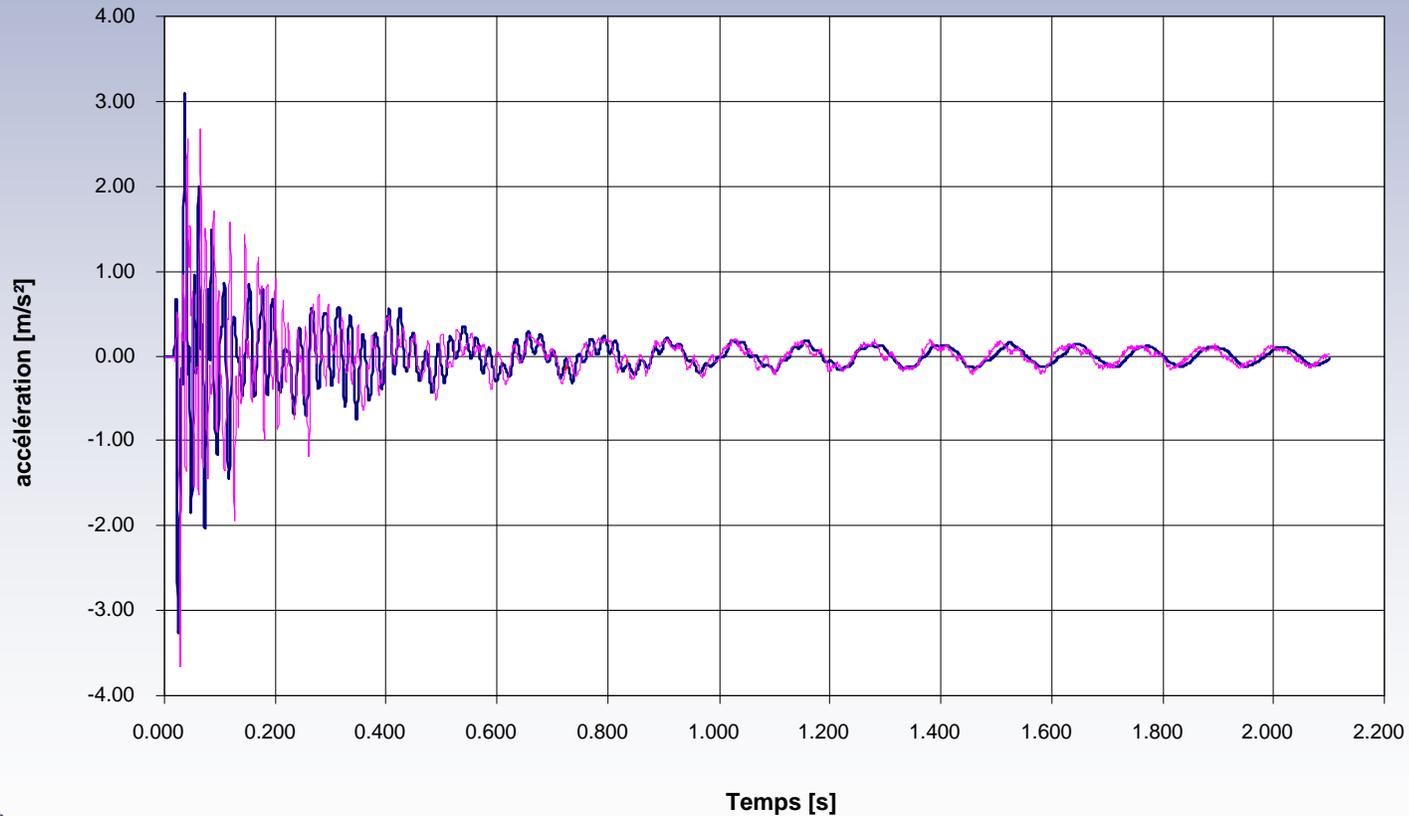
- Une structure est en mouvement perpétuel du fait des conditions ambiantes
- La structure répond aux conditions ambiantes en oscillant dans ses modes propres
- Vibrations ambiantes sont très faibles \Rightarrow Utilisations d'accéléromètres très sensibles

Hivon

Test de vibration libre



- Impulsion courte
- Vibration libre jusqu'à la stabilisation du système



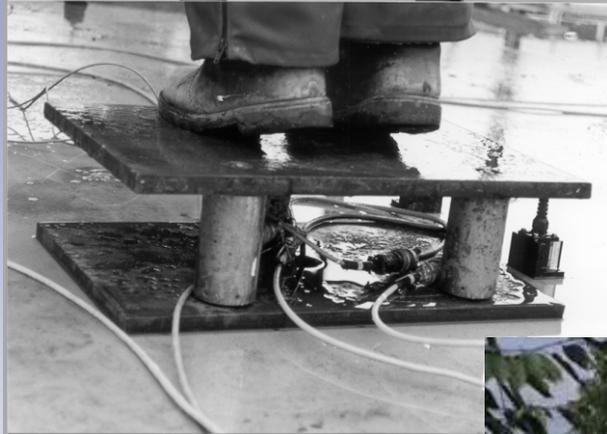
Essai dynamique

Hivon

Les types d'impulsions

Essai dynamique

Excitation par les talons



sur planchers

Marteau calibré



sur planchers et ponts



Sauts importants sur les ponts

Test de performance

- La structure est testée sous condition normale d'utilisation
- La charge escomptée doit être appliquée
 - nombre escomptée de personnes
 - dans la manière escomptée de mouvement



Essai dynamique

Hivon

Questions & Réponses

Hivross

Human Induced Vibration of Steel Structures