

# Bruits et vibrations dans les machines tournantes

P. Granjon

[pierre.granjon@grenoble-inp.fr](mailto:pierre.granjon@grenoble-inp.fr)



septembre 2014

# Les machines tournantes ...

... sont des **systèmes électromécaniques**.

## Fonction principale

conversion d'énergie



## Entrées - sorties

	entrée	sortie
générateur	mécanique	électrique
moteur	électrique	mécanique

# Les machines tournantes ...

... sont des **générateurs de perturbations**.

## Perturbations électromagnétiques

- conduites : courant, tension
  - qualité de l'énergie électrique
  - compatibilité électromagnétique
- rayonnées : champ magnétique
  - compatibilité électromagnétique

## Perturbations mécaniques

- conduites : vibrations mécaniques
- rayonnées : vibrations acoustiques
  - **pollution vibroacoustique**

# Plan

- 1 Contexte
- 2 Perturbations mécaniques dans les machines tournantes
- 3 Méthodes d'analyse des perturbations mécaniques

# Plan

## 1 Contexte

## 2 Perturbations mécaniques dans les machines tournantes

- Quelles perturbations ?
- Quelles origines ?
- Quelles conséquences ?
- Démonstration

## 3 Méthodes d'analyse des perturbations mécaniques

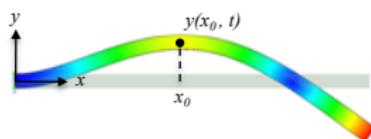
- Panorama
- Analyse spectrale
- Étude de cas

## Vibrations mécaniques

## Définition

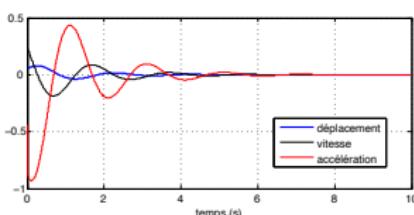
Une vibration mécanique est un **mouvement** des particules d'un système matériel élastique autour d'une position d'équilibre

Exemple : vibrations mécaniques d'une poutre



Les vibrations mécaniques dépendent :

- de la position & direction de mesure
  - du temps



Les vibrations sont représentées par :

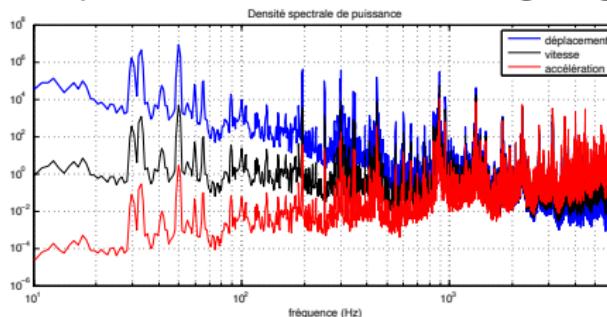
- un déplacement (m)
  - une vitesse ( $\text{m.s}^{-1}$ )
  - une accélération ( $\text{m.s}^{-2}$  ou g)

# Vibrations mécaniques

## Que mesurer ?

	déplacement	vitesse	accélération
temps	$m(t)$	$v(t) = \frac{dm(t)}{dt}$	$\gamma(t) = \frac{d^2 m(t)}{dt^2}$
fréquence	$M(f)$	$(2\pi f) \times M(f)$	$(2\pi f)^2 \times M(f)$

Exemple : vibrations d'un train d'engrenage



L'accélération est souvent mesurée car :

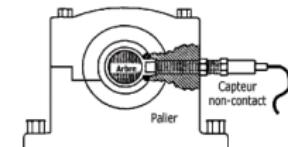
- c'est une image directe des forces subies par la structure :  $F = M\gamma$
  - elle porte de l'info sur une bande fréquentielle très large
  - les capteurs (accéléromètres) sont précis et peu onéreux

## Vibrations mécaniques

## Capteurs industriels de déplacement et de vitesse

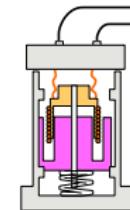
## Capteurs de déplacement inductifs

- principe : courants de Foucault
  - gammes :  $10^{-7}$  à  $10^{-2}$  m, 0 à  $10^2$  Hz
  - turbines hydrauliques, turbomachines, paliers



## Capteurs de vitesse inductifs

- principe : loi de Faraday
  - gammes :  $0 \text{ à } 1 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $10 \text{ à } 10^3 \text{ Hz}$



## Vibromètres laser

- principe : réflexion laser (interférométrie, Doppler)
  - gammes déplacement :  $10^{-8}$  à  $10^{-1}$  m, 0 à  $10^4$  Hz
  - gammes vitesse :  $10^{-5}$  à  $1 \text{ m.s}^{-1}$ , 0 à  $10^4$  Hz
  - coût élevé, interventions ponctuelles, besoin de précision



# Vibrations mécaniques

## Accéléromètres industriels

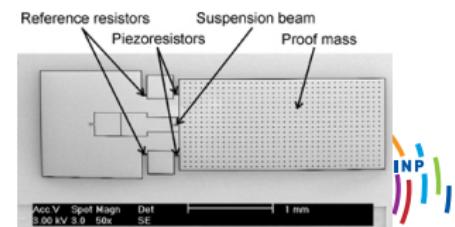
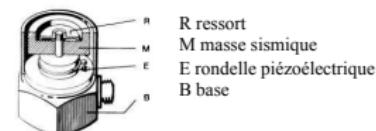
## Principe général : capteurs inertIELS

- embase soumise à une accélération  $\gamma$  à mesurer
  - contre-masse  $M$  résiste à  $\gamma$  par inertie
  - effort résistant  $F = M\gamma$  appliqué à un transducteur

systèmes masse-ressort  $\Rightarrow f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}}$  résonance limitant la bande passante

## Accéléromètres piézoélectriques

- transducteur : céramique piézoélectrique
  - gammes :  $10^{-4}$  à  $10^5$  m.s $^{-2}$ , 1 à  $10^4$  Hz
  - préampli de charges nécessaire



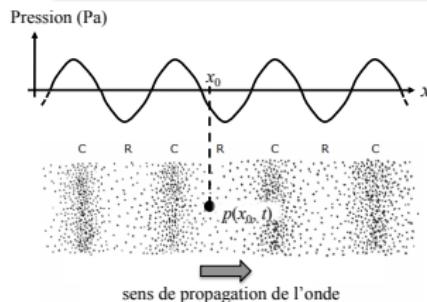
## Accéléromètres piézorésistifs

- transducteur : jauge piézorésistive
  - gammes :  $10^{-8}$  à  $10^3$  m.s $^{-2}$ , 0 à  $10^4$  Hz
  - applications miniatures

# Bruit acoustique

## Définition

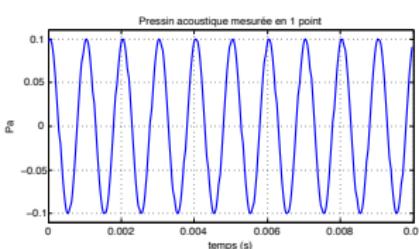
Une vibration acoustique est un **mouvement** des particules d'un fluide élastique autour d'une position d'équilibre



Le son est une onde de pression dépendant :

- de la position de mesure
- du temps

et se propageant dans l'air à  $340 \text{ m.s}^{-1}$



Le son est représenté par une pression (Pa) :

- seuil d'audibilité de  $20 \mu\text{Pa}$
- seuil de douleur de  $20 \text{ Pa}$

Gamme très étendue → décibels (dB)

# Bruit acoustique

Que mesurer ?

Le son mesuré en 1 point peut être caractérisé par :

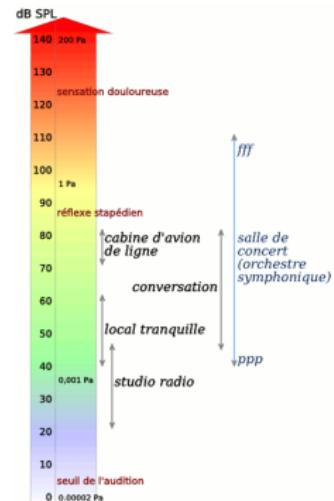
- la pression acoustique  $p(t)$ 
  - son évolution temporelle
  - son contenu fréquentiel (ou spectre)
- le niveau de pression acoustique  $L_p = 10 \log_{10} \left( \frac{p_{\text{eff}}^2}{p_0^2} \right)$

où :

- $p_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p(t)^2 dt}$  est la pression efficace (Pa)
- $p_0 = 20 \times 10^{-6}$  est la pression de référence (Pa)

$L_p$  s'exprime en :

- dB SPL pour « Sound Pressure Level »
- dB(A) pour « pondération A » (perception humaine)



# Bruit acoustique

## Capteurs

Microphones → image électrique de la pression  $p(t)$

Les différents types :

- à condensateur (très sensibles / chers, fragiles)
- à électret (- sensibles / - cher, robustes)
- à électret prépolarisé (amélioration des électrets)



Sonomètre → niveau de pression acoustique  $L_p$

Constitution :

- d'un microphone pour la mesure  $p(t)$
- d'un système d'acquisition numérique
- de moyens de calcul pour le calcul de  $L_p$



# Plan

## 1 Contexte

## 2 Perturbations mécaniques dans les machines tournantes

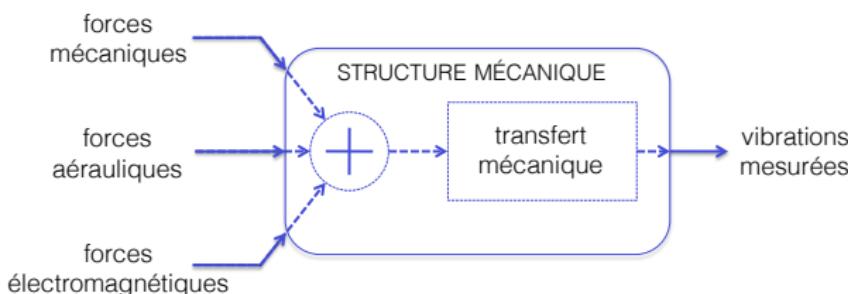
- Quelles perturbations ?
- Quelles origines ?
- Quelles conséquences ?
- Démonstration

## 3 Méthodes d'analyse des perturbations mécaniques

- Panorama
- Analyse spectrale
- Étude de cas

# Origine des vibrations mécaniques

## Généralités



- ① Différents phénomènes physiques engendrent des forces excitatrices :
  - éléments en mouvement → forces d'origine mécanique
  - fluides en mouvement → forces d'origine aéraulique
  - champs magnétiques variables → forces d'origine électromagnétique
- ② Ces forces excitatrices sont appliquées à la structure de la machine
- ③ La structure répond par des vibrations mécaniques
- ④ Ces vibrations se propagent jusqu'au capteur par les transferts solidiens

# Origine des vibrations mécaniques

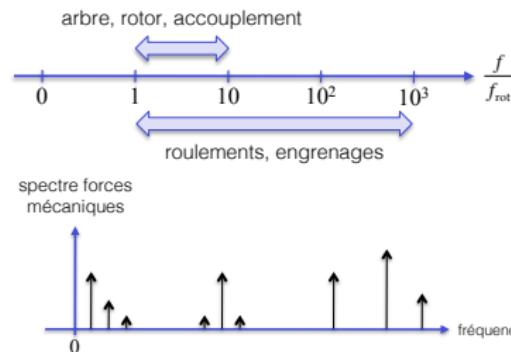
## Forces mécaniques

Elles sont dues aux déplacements de certains éléments de la chaîne cinématique

- ① éléments internes à la machine tournante  
arbre, rotor, roulements
- ② éléments externes à la machine tournante  
accouplements, engrenages, charges mécaniques

La gamme de fréquence impactée  
dépend de l'élément considéré

Les déplacements étant périodiques,  
les forces engendrées sont périodiques  
et leur contenu fréquentiel est  
principalement composé de lignes

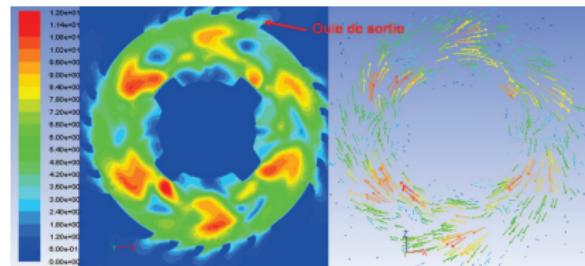


# Origine des vibrations mécaniques

## Forces aérauliques

Elles sont dues aux écoulements d'air dans la machine

Champ des vitesses des écoulements d'air dans une tête de bobine de machine tournante ( $\text{m.s}^{-1}$ )  
 (Jérémie Lutun, Thèse de Doctorat, Grenoble INP, janvier 2012)

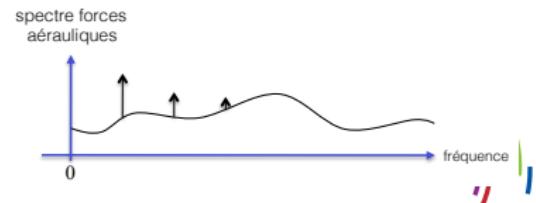


Elles sont de nature composite :

- une partie périodique due aux pâles du ventilateur
- une partie aléatoire large-bande due aux écoulements turbulents

Leur spectre est donc composé à la fois

- d'un ensemble de lignes (partie périodique)
- d'une partie continue (partie aléatoire)



# Origine des vibrations mécaniques

## Forces électromagnétiques

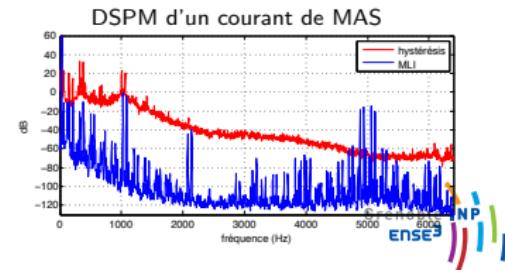
Elles sont principalement dues aux :

- efforts de magnétostriction  
→ le plus souvent négligés
- efforts de Maxwell
  - radiaux entre stator et rotor
  - proportionnels au carré de l'induction dans l'entrefer



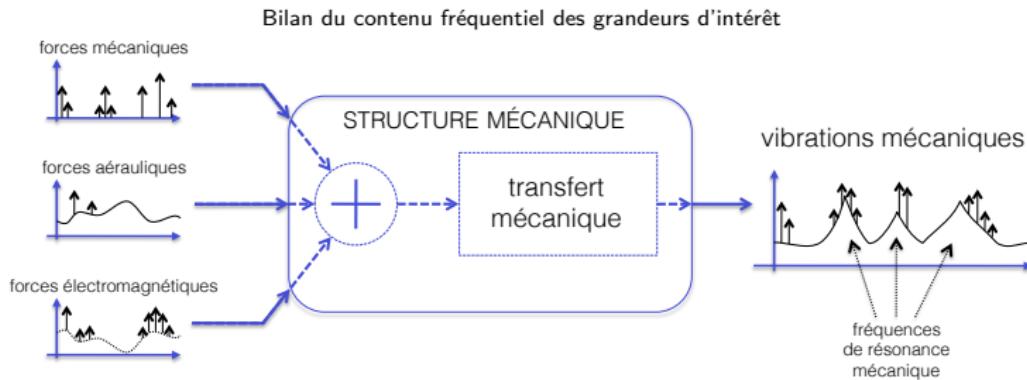
Leur nature et leur contenu fréquentiel dépend donc du type d'implantation choisi pour la commande des convertisseurs de puissance reliés à la machine :

- commutations périodiques ⇒ forces périodiques (cas de la MLI classique)
- commutations aléatoires ⇒ forces aléatoires (cas de l'hystérésis)



# Origine des vibrations mécaniques

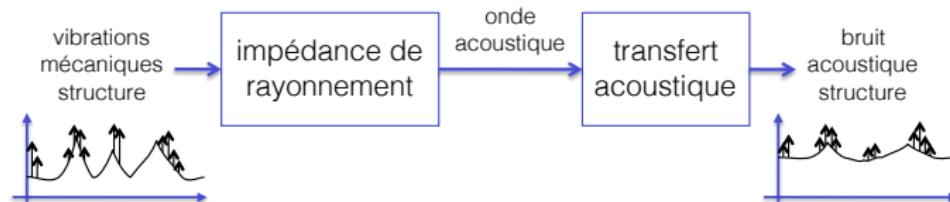
## Bilan



Les vibrations mécaniques sont donc des grandeurs composites constituées :

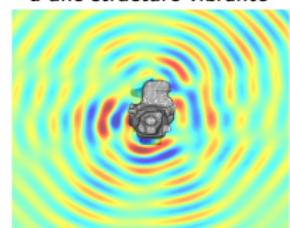
- ① d'une partie aléatoire large-bande
  - due aux forces aérauliques et éventuellement électromagnétiques
  - composée des fréquences de résonance mécanique de la structure
- ② d'une partie périodique
  - due aux 3 forces étudiées précédemment
  - composée d'une multitude de lignes spectrales

# Origine des bruits acoustiques



- 1 Les vibrations mécaniques des parois de la structure génèrent une onde acoustique par rayonnement
- 2 Cette onde se propage dans l'air, de la structure vibrante jusqu'au capteur

Rayonnement acoustique  
d'une structure vibrante

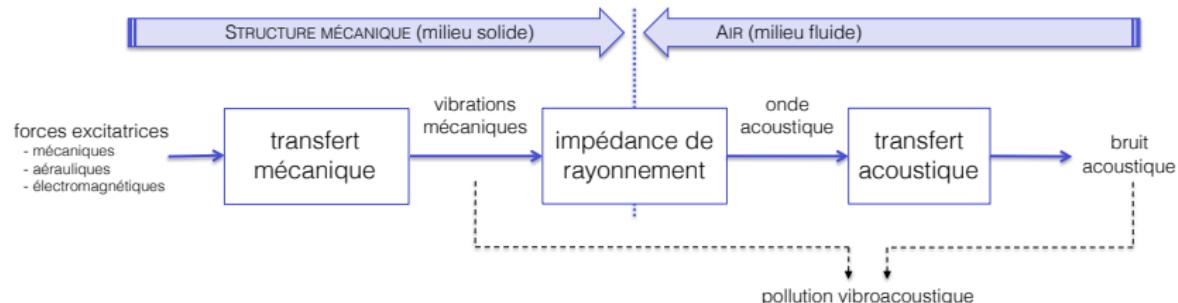


Le bruit acoustique, intimement lié aux vibrations, est donc lui aussi une grandeur composite formée à la fois :

- d'une partie aléatoire large-bande
- d'une partie périodique complexe

# Origine de la pollution vibroacoustique

## Bilan



### Principaux facteurs d'influence de la pollution vibroacoustique

- ① les forces excitatrices  
plus particulièrement leur contenu fréquentiel
- ② les transferts mécaniques et acoustiques  
plus particulièrement leurs fréquences de résonance



S. J. Yang.

*Low-Noise Electrical Motors.*

Oxford University Press, 1981.



P. L. Timar.

*Noise and Vibration of Electrical Machines.*

Elsevier, 1989.



J. F. Gieras et al.

*Noise of Polyphase Electric Motors.*

CRC Press, 2005.

# Plan

## 1 Contexte

## 2 Perturbations mécaniques dans les machines tournantes

- Quelles perturbations ?
- Quelles origines ?
- **Quelles conséquences ?**
- Démonstration

## 3 Méthodes d'analyse des perturbations mécaniques

- Panorama
- Analyse spectrale
- Étude de cas

# Quelles conséquences ?

## Conséquences négatives

### Impact sur la sûreté de fonctionnement du système :

- mise en résonance entretenue → fatigue structurale rapide
- mise en résonance transitoire → moins grave si contrôlé
- instabilité → destruction du système
  - ⇒ éviter concordance entre fréquences d'excitation et résonances

### Impact sur la santé des personnels :

Règlementation donnée par le Code du Travail

- bruit acoustique : directive européenne 2003/10/CE transposée en France par le décret 2006-892
- vibrations mécaniques : directive européenne 2002/44/CE transposée en France par le décret 2005-746
  - ⇒ fixent les niveaux d'exposition max avant protection

# Quelles conséquences ?

Conséquences positives

## Surveillance et diagnostic des machines

Bruits et vibrations générés sont porteurs d'information sur l'état du système  
⇒ vibrations souvent utilisées pour la surveillance des systèmes

Surveillance des parties mécaniques principalement :

- arbres (alignements, balourds, fissures)
- roulements (bagues interne et externe, cage, billes)
- engrenages (écaillage ou fissure de dents)

Bibliographie très fournie :



A. Boulenger, C. Pachaud.

*Analyse vibratoire en maintenance ; surveillance et diagnostic des machines.*

3ème édition, Dunod, 2013.



R. B. Randall.

*Vibration-based condition monitoring.*

John Wiley & sons Ltd, 2011.



H. A. Toliyat.

*Electric Machines : Modeling, Condition Monitoring, and Fault Diagnosis.*

CRC Press, 2012.

# Plan

## 1 Contexte

## 2 Perturbations mécaniques dans les machines tournantes

- Quelles perturbations ?
- Quelles origines ?
- Quelles conséquences ?
- Démonstration

## 3 Méthodes d'analyse des perturbations mécaniques

- Panorama
- Analyse spectrale
- Étude de cas

# Démonstration

⇒ BANC EXPÉRIMENTAL

# Plan

1

## Contexte

2

## Perturbations mécaniques dans les machines tournantes

- Quelles perturbations ?
- Quelles origines ?
- Quelles conséquences ?
- Démonstration

3

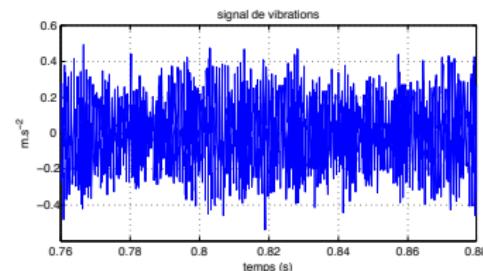
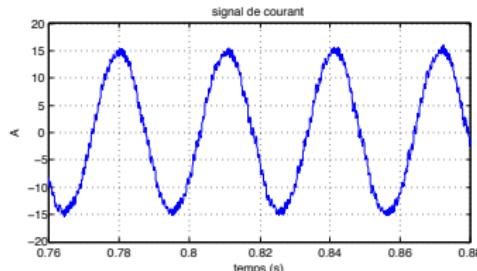
## Méthodes d'analyse des perturbations mécaniques

- Panorama
- Analyse spectrale
- Étude de cas

## Les méthodes d'analyse courantes

### Domaine temporel

## Utilisation de l'allure temporelle du signal



Grandeur importante car fournit des informations globales :

- forme : simple / complexe
  - durée : transitoire / permanent
  - quantité : faible / forte
  - nature : déterministe / aléatoire

Peut être suffisant pour des signaux très simples, mais très vite limité pour des signaux complexes

# Les méthodes d'analyse courantes

Domaine temporel

## Utilisation d'indicateurs scalaires

Permet de cibler une information particulière

	notation	définition	information
valeur moyenne	$x_{\text{moy}}$	$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)$	composante continue
valeur efficace	$x_{\text{eff}}$	$\lim_{N \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x^2(n)}$	quantité de signal
facteur de crête	$C_x$	$\frac{x_{\text{max}}}{x_{\text{eff}}}$	forme du signal

souvent calculés localement, sur des fenêtres glissantes de taille  $N$  finie

Ces méthodes conduisent à des informations très partielles



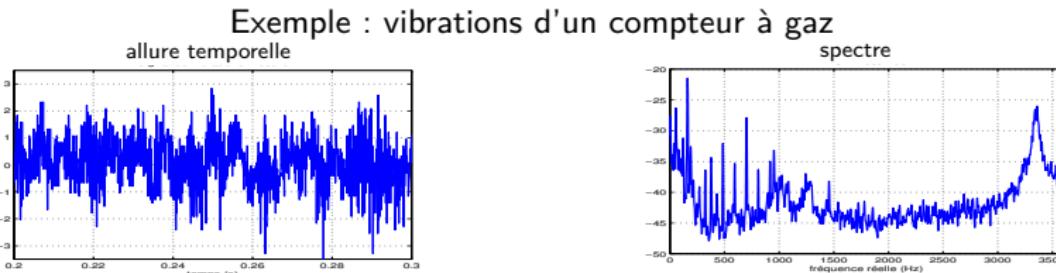
changement de domaine

# Les méthodes d'analyse courantes

## Domaine fréquentiel

### Analyse spectrale

- objectif : obtenir le contenu fréquentiel des signaux
- information : quantité de signal en fonction de la bande de fréquence
- grandeur caractéristique : le *spectre* du signal



Quelques précautions :

- la définition mathématique du spectre dépend de la nature du signal
- le signal doit être stationnaire ( $\Rightarrow$  contenu fréquentiel invariant dans le temps)

# Les méthodes d'analyse courantes

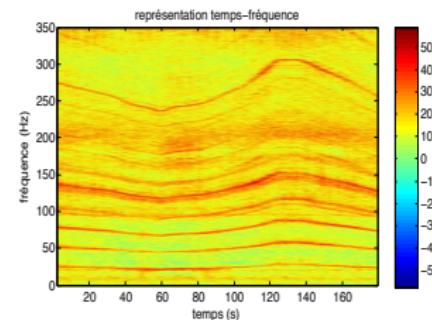
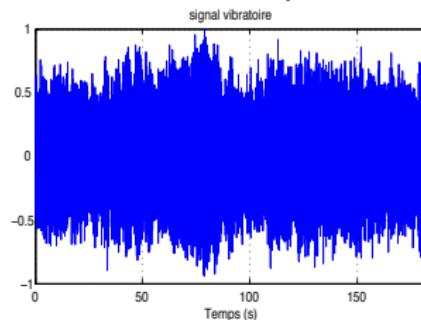
## Domaine fréquentiel

### Analyse temps-fréquence

Adaptée aux signaux non-stationnaires ( $\Rightarrow$  contenu fréquentiel évolue dans le temps)

- objectif : suivre l'évolution temporelle du contenu fréquentiel des signaux
- information : quantité de signal à chaque fréquence et à chaque instant
- grandeur caractéristique : la *représentation temps-fréquence* du signal

Exemple : vibrations d'un roulement d'éolienne



Méthodes les plus courantes :

- spectrogramme, transformée de Wigner-Ville, ...
- modèle autorégressif, ...

# Les méthodes d'analyse courantes

D'autres domaines ...

Il existe une multitude d'autres approches en traitement du signal :

- analyse cepstrale  $\Leftrightarrow$  détection de motifs périodiques dans les spectres
- démodulation  $\Leftrightarrow$  variations d'amplitude et/ou de fréquence des composantes
- cyclostationnarité  $\Leftrightarrow$  variations périodiques de signaux aléatoires
- ondelettes  $\Leftrightarrow$  analyse multirésolution
- décomposition modale empirique (EMD)  $\Leftrightarrow$  décomposition auto-adaptative
- ...

Ces méthodes avancées sont utilisées pour

- des analyses physiques poussées
- des tâches de surveillance, de diagnostic, de pronostic
- ...

# Plan

1

## Contexte

2

## Perturbations mécaniques dans les machines tournantes

- Quelles perturbations ?
- Quelles origines ?
- Quelles conséquences ?
- Démonstration

3

## Méthodes d'analyse des perturbations mécaniques

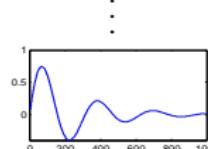
- Panorama
- Analyse spectrale
- Étude de cas

# L'analyse spectrale

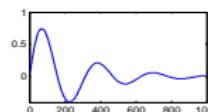
## Nature des signaux

Les signaux à analyser sont déterministes ou aléatoires, comment trancher ?  
→ en comparant le résultat d'expériences identiques

réalisation  $k$



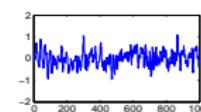
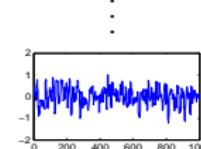
réalisation  $k + 1$



résultats identiques



signal déterministe



résultats différents



signal aléatoire

⇒ Les signaux expérimentaux comportent toujours une partie aléatoire

En pratique, l'hypothèse aléatoire est donc inévitable

# L'analyse spectrale

## Signaux aléatoires

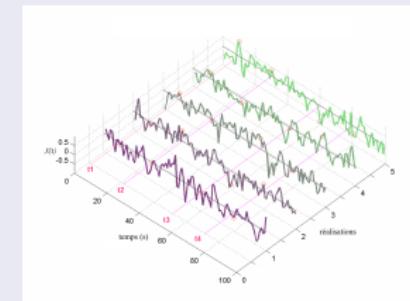
### Définition

- un signal aléatoire  $\mathfrak{X}(t)$  est défini par l'ensemble infini de ses réalisations
- ces réalisations sont différentes les unes des autres
- ces réalisations vérifient des propriétés communes : les *propriétés d'ensemble*

par exemple :

moyenne	$E[\mathfrak{X}(t)]$	composante continue
puissance moyenne	$E[\mathfrak{X}(t)^2]$	quantité de signal

où  $E[\cdot]$  est l'opérateur espérance mathématique ou moyenne statistique



### Caractérisation

Un signal aléatoire est caractérisé par ses propriétés d'ensemble

# L'analyse spectrale

Que veut-on estimer ?

## Définition théorique

Le contenu fréquentiel d'un signal aléatoire stationnaire  $\mathfrak{X}(t)$  est donné par :

$$S_{\mathfrak{X}}(f) = \mathbb{E} \left[ \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{|X_T(f)|^2}{T} \right]$$

- $S_{\mathfrak{X}}(f)$  est la *densité spectrale de puissance moyenne* (DSPM) de  $\mathfrak{X}(t)$
- $X_T(f) = \int_{(T)} \mathfrak{X}(t) e^{-j2\pi ft} dt$  est la transformée de Fourier de  $\mathfrak{X}(t)$  sur  $T$
- la DSPM est une des propriétés d'ensemble du signal aléatoire

## Interprétation physique

DSPM    =    densité spectrale de puissance moyenne  
               =    répartition dans le domaine fréquentiel de la quantité de signal

La DSPM donne accès à la quantité de signal dans une bande de fréquence  $B$

$$P_{\mathfrak{X}}^B = \int_{(B)} S_{\mathfrak{X}}(f) df$$

# L'analyse spectrale

## Estimateur

### Les grandes familles d'estimateurs

#### Les méthodes non-paramétriques

- basées sur estimateurs déduits empiriquement des expressions théoriques des grandeurs à estimer
- les plus anciennes (depuis années 40)
- pas forcément optimales, mais universelles

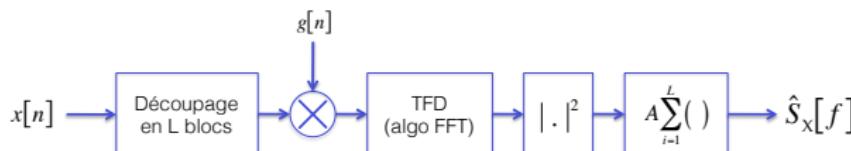
#### Les méthodes paramétriques

- basées sur estimateurs déduits théoriquement d'un modèle paramétrique du signal à analyser
- les plus récentes (depuis années 80)
- optimales si modèle valide, mais non universelles

# L'analyse spectrale

## Estimateur

### Le périodogramme de Welch



- découpage du signal en  $L$  blocs → création artificielle de  $L$  réalisations du signal
- pour chacun des blocs
  - application d'une fenêtre de pondération  $g[n]$  → apodisation
  - ajout de 0 en fin de bloc → augmentation du nombre de points en fréquence
  - Transformée de Fourier Discrète sur  $N_{\text{FFT}}$  points → passage en fréquence
  - calcul du module carré → estimation de la quantité de signal en  $f$
- moyennage des  $L$  résultats → diminution de la dispersion

Méthode non-paramétrique très répandue car simple / efficace / temps-réel

# L'analyse spectrale

## Estimateur

### Le périodogramme de Welch

$$\widehat{S}_{\tilde{x}}[f] = A \sum_{i=1}^L \left| \tilde{X}_i[f] \right|^2$$

$$\tilde{X}_i[f] = \text{TFD} \{ g[n - (i-1)D]x[n] \}$$

### DSPM théorique

$$S_x(f) = E \left[ \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{|X_T(f)|^2}{T} \right]$$

$$X_T(f) = \text{TF} \{ x(t) \} \text{ sur } T$$

### Paramètres de l'estimateur

- $N$  : durée d'un bloc → pouvoir de résolution, dispersion
- $D$  : décalage entre blocs,  $\approx \frac{N}{4}$  → diminuer la dispersion
- $N_{FFT} = pN$  :  $p \approx 8$  ou  $16$  → résolution fréquentielle
- $g[n]$  : fenêtre de pondération → pouvoir de résolution / fuites d'énergie
- $A$  : facteur de normalisation → mesure de DSP

### Performances de l'estimateur

- erreur moyenne (biais)  $\approx 0$  pour spectres à variations lentes
- dispersion (variance) inversement proportionnelle au nombre de blocs

# Plan

1

## Contexte

2

## Perturbations mécaniques dans les machines tournantes

- Quelles perturbations ?
- Quelles origines ?
- Quelles conséquences ?
- Démonstration

3

## Méthodes d'analyse des perturbations mécaniques

- Panorama
- Analyse spectrale
- Étude de cas

# Étude de cas

Pollution vibroacoustique d'un système d'entraînement électromécanique

⇒ SALLE INFORMATIQUE