

Analyse vibratoire des machines tournantes

Analyse vibratoire

Chapitre 2

Approche intuitive

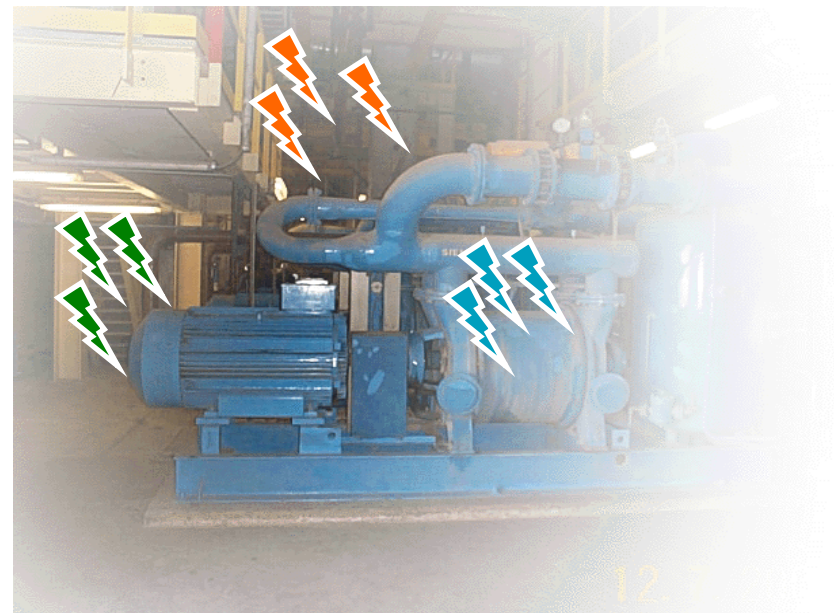
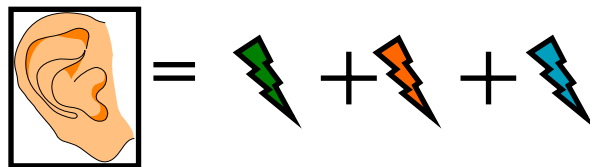
- ▶ Perception subjective des phénomènes
A proximité d'une machine :
 - ◆ On peut entendre le **bruit** et sentir les **vibrations** de la machine.
 - ◆ Ces deux indicateurs peuvent fournir des indications sur un changement de comportement de la machine.
 - ◆ La quantification et la qualification des vibrations sont des moyens privilégiés pour la maintenance conditionnelle.



Approche intuitive : le bruit

- Bruit rayonné par une machine

Le bruit rayonné dans l'air par une machine résulte de l'action de plusieurs sources :



Approche intuitive : le bruit

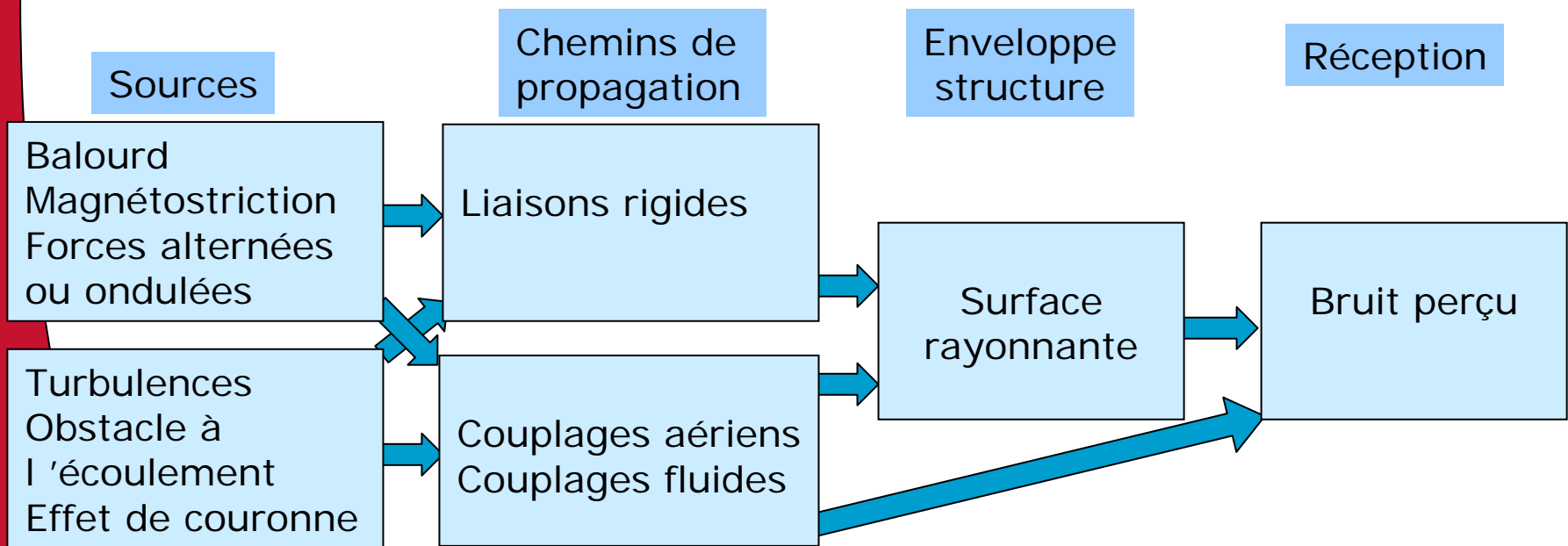
► Origine du bruit rayonné par une machine

Le bruit rayonné dans l'air par une machine résulte de l'action de plusieurs sources que l'on peut répartir en 2 groupes :

- ◆ Celui des machines ou parties de machines comportant des parties en vibration dont l'énergie est transmise à l'enveloppe extérieure par des liaisons rigides ou par un fluide.
- ◆ Celui des machines ou parties de machines agissant sans intermédiaire sur le milieu environnant en lui transférant de l'énergie directement sous forme de rayonnement acoustique.

Approche intuitive : le bruit

► Les sources de bruit

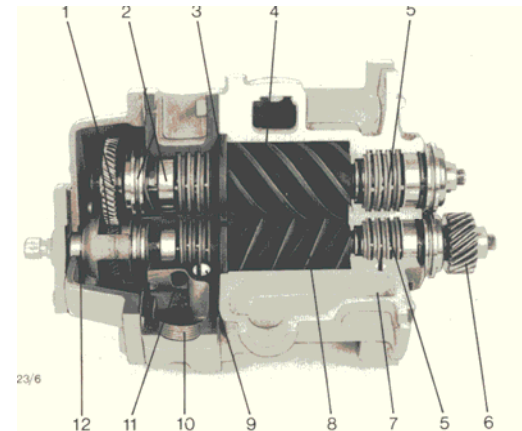


Approche intuitive : le bruit

► Notion **d'amplitude** et de **fréquence**

L'analyse des différentes sources sonores peut être faite :

- ◆ Par l'amplitude : Des sons les plus faibles au plus forts
- ◆ Par la fréquence : Des sons les plus graves aux plus aigus.



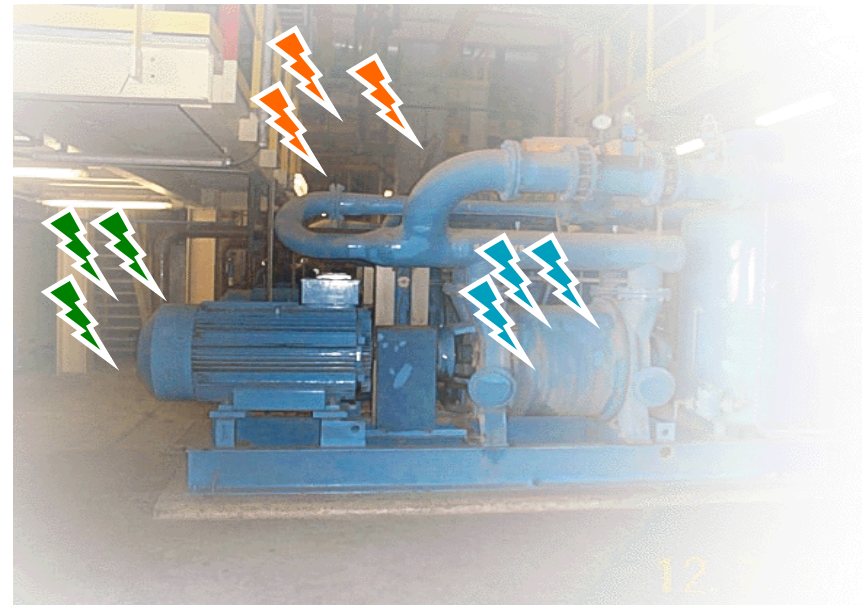
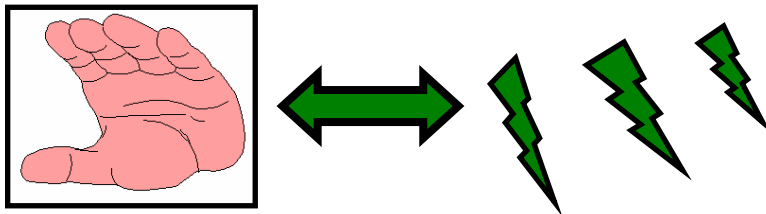
► Une analogie peut être faite avec un orchestre. La musique et la somme de diverses amplitudes et fréquences :

- ◆ Le tambour pour les sons graves
- ◆ Le violon pour les sons plus aigus



Approche intuitive : les vibrations

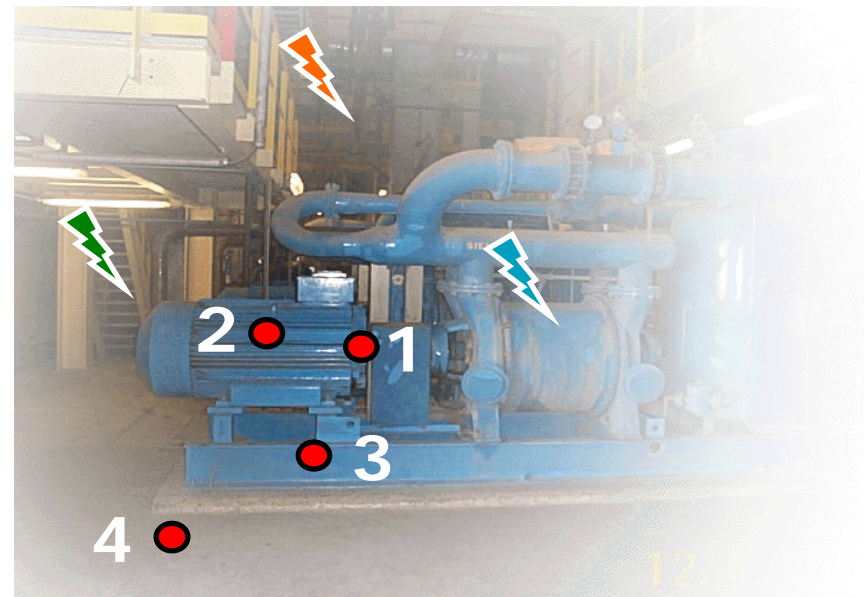
- ▶ Vibrations d'une machine
 - ◆ Les vibrations d'une machine sont souvent perceptibles par simple contact de la main sur la structure.



- ◆ Les vibrations ressenties proviennent des forces internes à la machine.

Approche intuitive : les vibrations

- ▶ Origine des phénomènes
 - ◆ Il est rarement possible de faire la distinction entre les différentes origines des vibrations perçues.
 - ◆ La perception de l'énergie vibratoire est différente selon que la main est placée sur le palier (1), sur la carcasse (2), sur le châssis (3) et sur le sol (4).

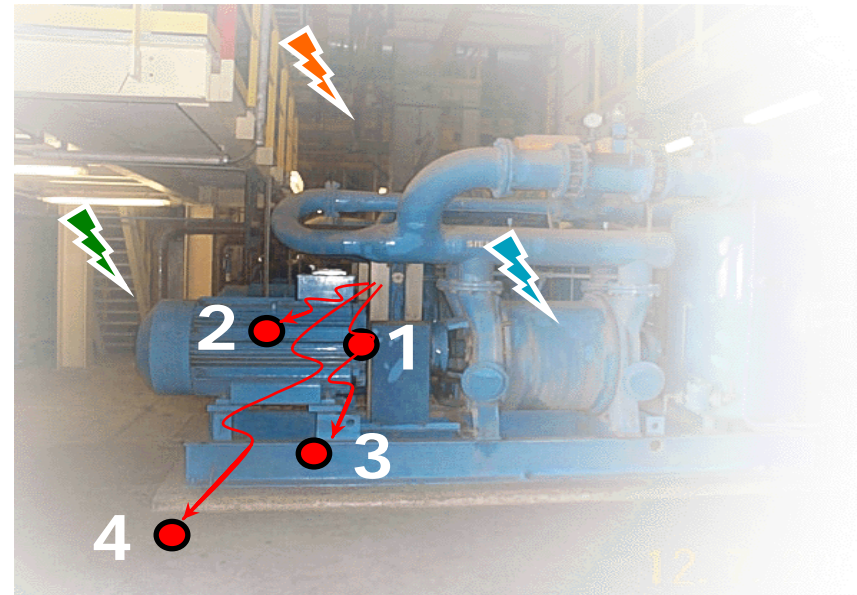


Approche intuitive : les vibrations

► Propagation des vibrations

Les chemins de propagation des vibrations des points 1 à 4 sont différents:

- ◆ (1) est proche de la source d'excitation
- ◆ (4) est éloigné de la source d'excitation



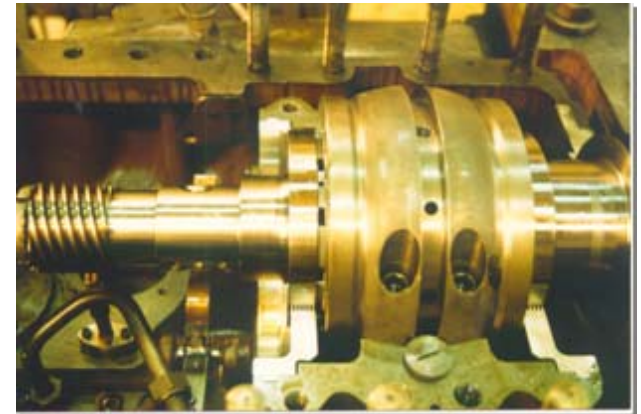
L'excitation interne est identique pour les positions (1) à (4): Pourtant, les niveaux vibratoires relevés sont différents.

Approche intuitive : les vibrations

► Influence de la structure

Pour une excitation donnée (balourd mécanique par exemple), la réponse vibratoire est différente selon le lieu où elle est prélevée :

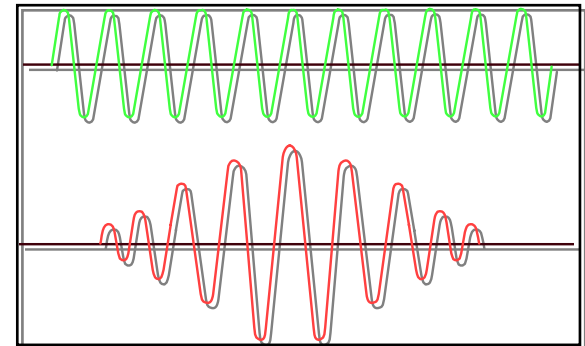
$$\text{Vibration} = \text{Excitation} * \text{Structure}$$



- ➔ Les mesures devront être effectuées aux mêmes endroits pour être comparées.

Approche intuitive : les vibrations

- ▶ En résumé
 - ◆ Les niveaux vibratoires sont de bons indicateurs pour connaître le comportement d'une machine.
 - ◆ Les vibrations sont la résultante des efforts internes à la machine et des effets de la structure.



Notions fondamentales

► Origine des vibrations

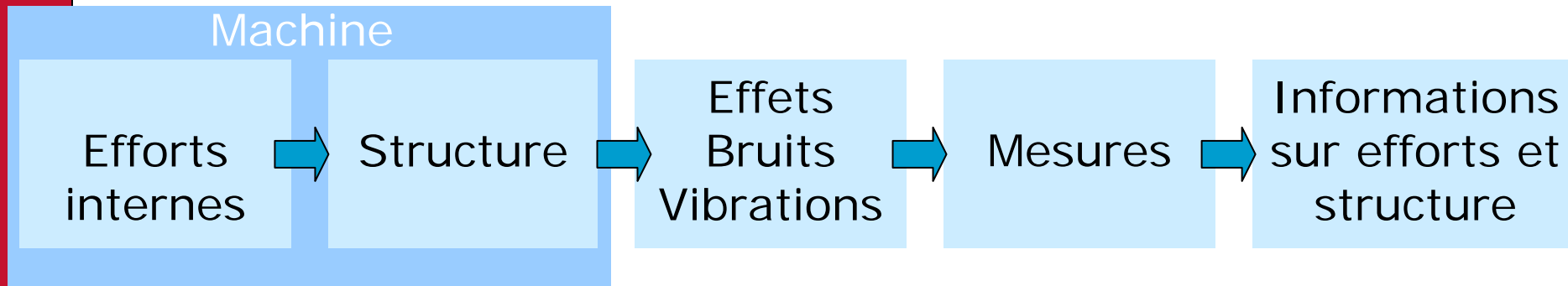
Toute machine en fonctionnement est le siège de forces internes variables dans le temps de différentes natures :

- ◆ Forces impulsionnelles (chocs)
- ◆ Forces transitoires (variations de charge)
- ◆ Forces périodiques (balourd)
- ◆ Forces aléatoires (frottements)

Ces forces sont transmises par les composantes de la machine et induisent des déformations de la surface de la structure (vibrations).

Notions fondamentales

- ▶ Principes de l'analyse vibratoire des machines tournantes

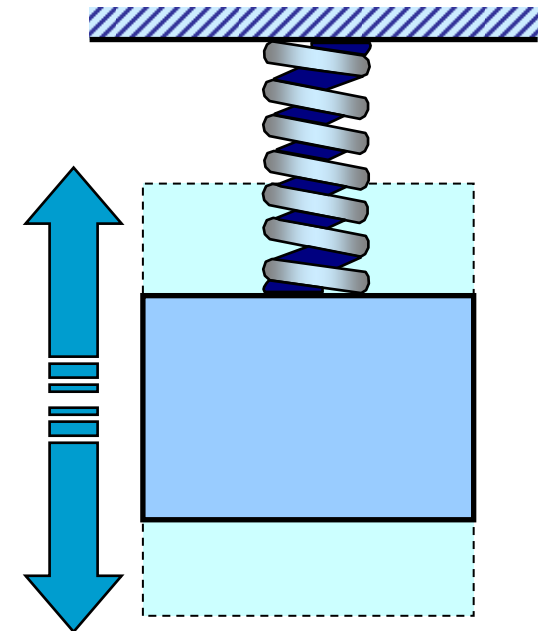


- Balourd
- Délignage
- Roulements
- Engrènements
- Défauts magnétiques
- etc. ...

Les vibrations d'une machine constituent une image indirecte des efforts internes de la machine.

Notions fondamentales

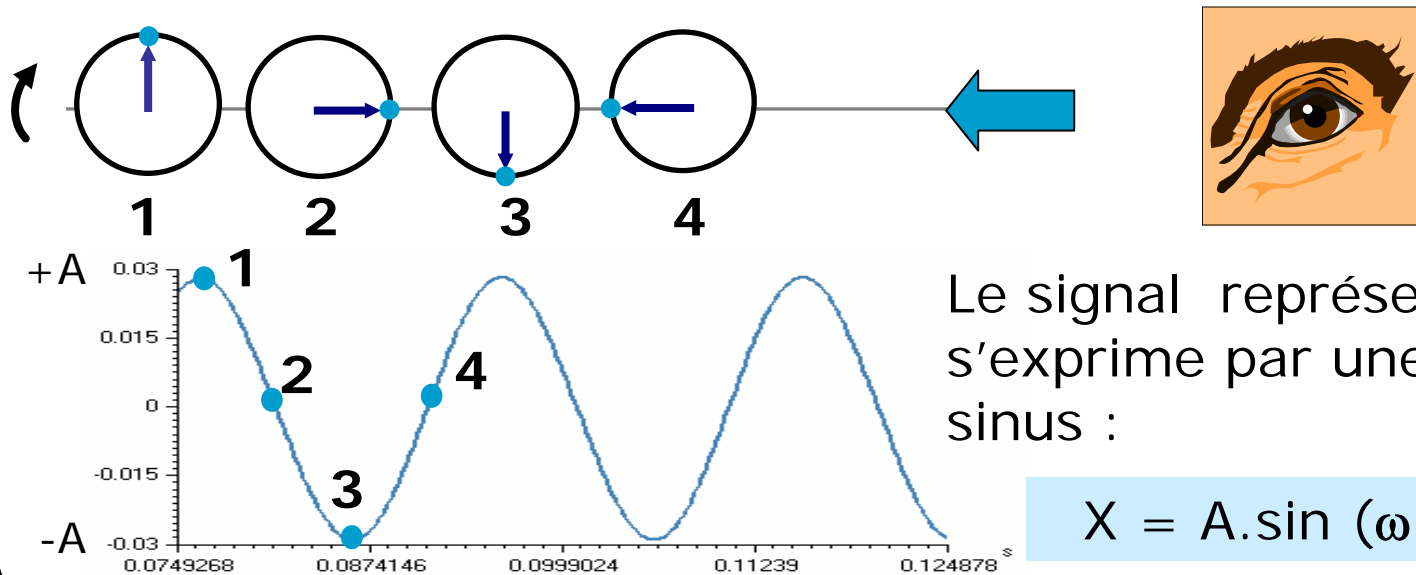
- ▶ Définition d'une vibration *selon la norme NFE 90-001*
 - ◆ Une **vibration** est une variation avec le temps d'une grandeur caractéristique du mouvement ou de la position d'un système mécanique lorsque la grandeur est alternativement plus grande et plus petite qu'une certaine valeur moyenne ou de référence.
 - ◆ Les phénomènes vibratoires sont des phénomènes périodiques ou apériodiques plus ou moins complexes.



Notions fondamentales

► La vibration sinusoidale

L'expression la plus simple est celle du mouvement purement sinusoidal comme celui généré par un balourd simple.



Le signal représenté s'exprime par une fonction sinus :

$$X = A.\sin (\omega.t+\varphi)$$

Notions fondamentales

► L'amplitude A du signal peut être représentée de différentes manières. Trois sont utilisées en analyse vibratoire :

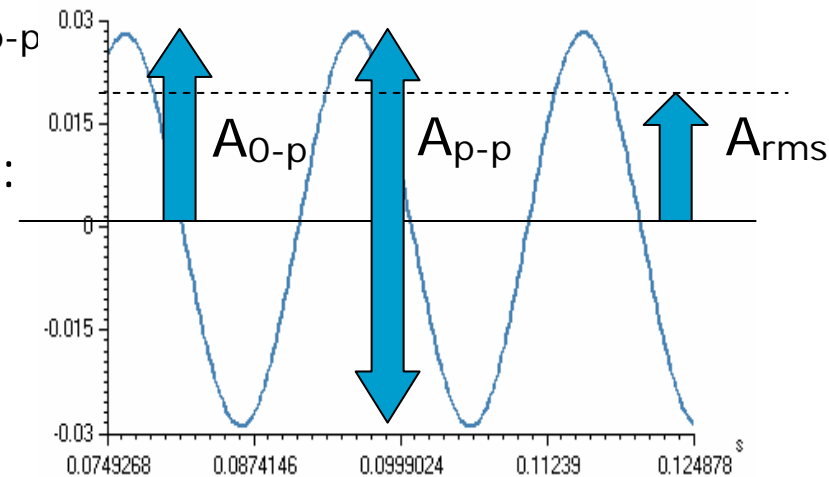
- ◆ L'amplitude crête A_{0-p}
- ◆ L'amplitude crête-à-crête A_{p-p}
- ◆ L'amplitude efficace A_{rms}

Pour un **signal sinusoïdal**, on a :

$$X = A_{0-p} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)$$

$$A_{p-p} = 2 \cdot A_{0-p} \quad \text{et}$$

$$A_{0-p} = \sqrt{2} \cdot A_{rms}$$



L'amplitude renseigne sur l'importance du défaut surveillé

Notions fondamentales

- La fréquence F d'un phénomène est le nombre de répétitions (périodes) de ce phénomène en une seconde.

La fréquence s'exprime en Hertz :

1 Hz = 1 cycle par seconde

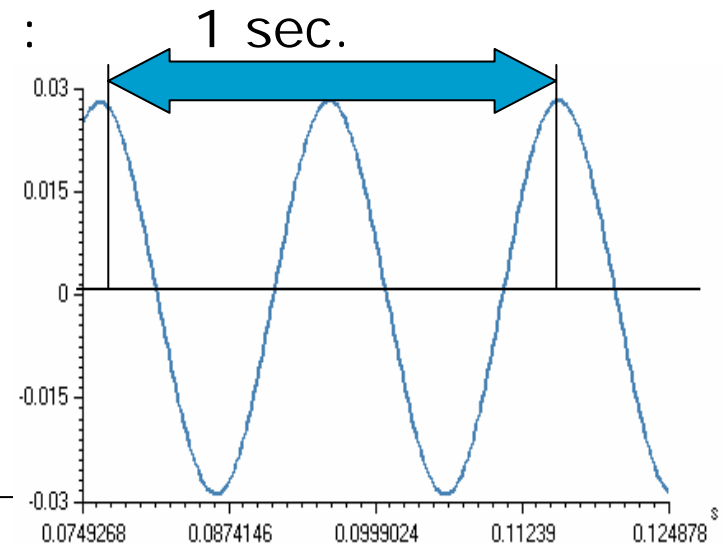
Pour un **signal sinusoïdal**, on a :

$$X = A_{0-p} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot F \quad \omega : \text{pulsation (rad/s)}$$

Exemple : Pour un moteur tournant à 1500 tr/mn, la fréquence de rotation est égale à $1500/60=25$ Hz

La fréquence renseigne sur l'origine du défaut.



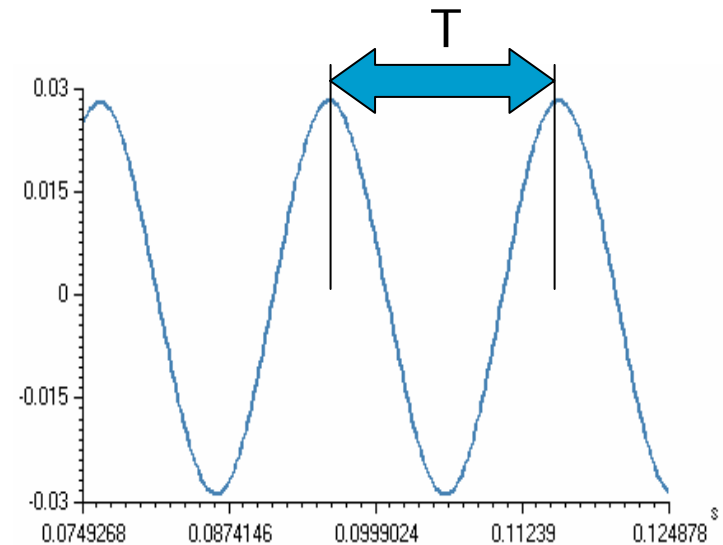
Notions fondamentales

- ▶ La période T d'un phénomène est l'intervalle de temps séparant deux passages successifs à une même position et dans le même sens.

La période s'exprime en secondes (s).

$$T = \frac{1}{F}$$

Dans le cas des machines tournantes, la période correspond souvent à la durée d'un tour d'arbre.



Notions fondamentales

► Les grandeurs utilisées : Introduction

Comme tout mouvement, une vibration peut être étudiée selon trois grandeurs :

- ◆ Le Déplacement
- ◆ La Vitesse
- ◆ L'Accélération

Ces grandeurs physiques sont liées entre elles par des relations mathématiques. Ces relations sont simples dans le cas de signaux purement sinusoidaux.

Le choix de l'une ou de l'autre de ces grandeurs joue un rôle important dans la qualité du diagnostic.

Notions fondamentales

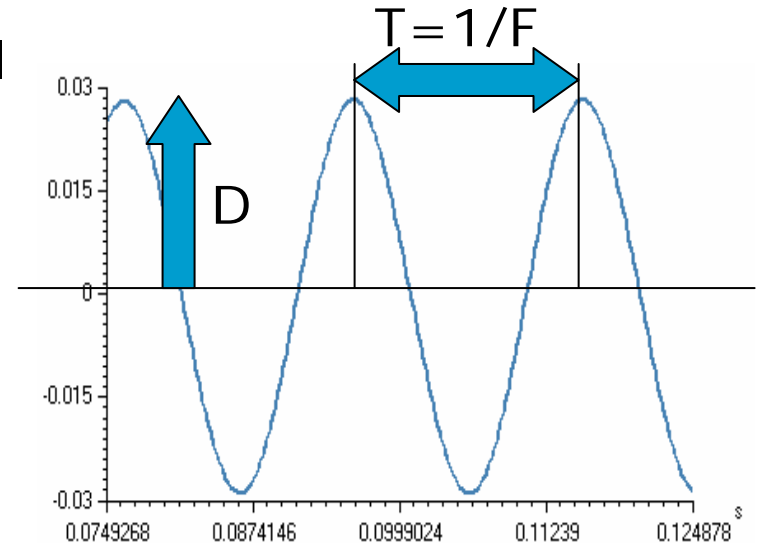
- Les grandeurs utilisées : Le Déplacement

Le **Déplacement** quantifie l'amplitude maximale du signal vibratoire. Historiquement, c'est la grandeur qui fut utilisée en premier car cette mesure était la seule possible avec les moyens de l'époque.

Un signal vibratoire sinusoïdal généré par un balourd simple s'exprimera par la relation :

$$d(t) = D \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot F \cdot t + \varphi)$$

L'unité utilisée pour la mesure des déplacements est le micron (μm)



Notions fondamentales

- Les grandeurs utilisées : La Vitesse

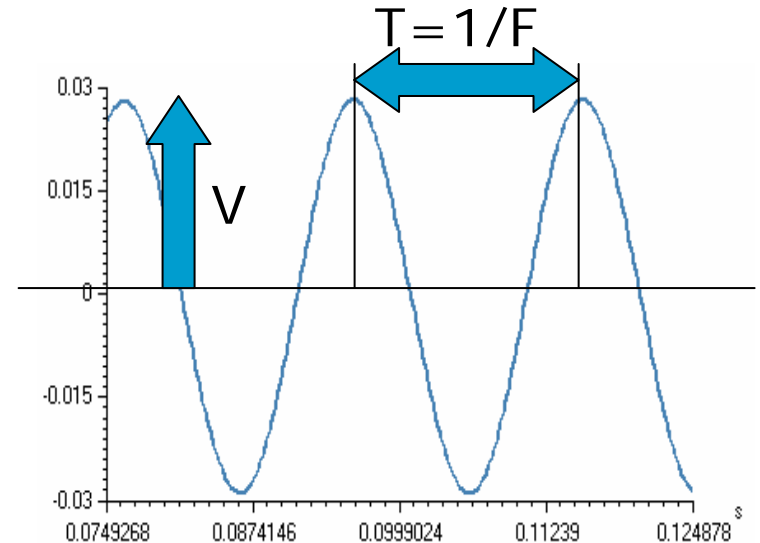
La **Vitesse** d'un mobile correspond à la variation de sa position par unité de temps. Mathématiquement, la vitesse s'exprime comme la dérivée du déplacement par rapport au temps :

$$v(t) = \frac{d[d(t)]}{dt}$$

Un signal vibratoire sinusoïdal généré par un balourd simple s'exprimera par la relation :

$$v(t) = V \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot F \cdot t + \varphi)$$

L'unité utilisée est le mm/s



Notions fondamentales

- Les grandeurs utilisées : L'Accélération

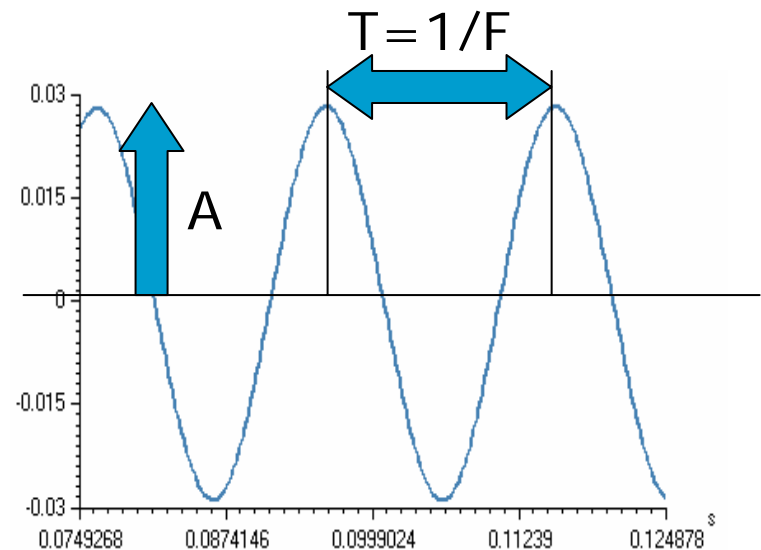
L'Accélération d'un mobile correspond à la variation de sa vitesse par unité de temps. Mathématiquement, l'accélération s'exprime comme la dérivée de la vitesse par rapport au temps

$$a(t) = \frac{d[v(t)]}{dt}$$

Un signal vibratoire sinusoïdal généré par un balourd simple s'exprimera par la relation :

$$a(t) = A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot F \cdot t + \varphi)$$

L'unité utilisée est le g



Notions fondamentales

- ▶ Les grandeurs utilisées : Relations entre les grandeurs
 Dans le cas d'une vibration purement sinusoïdale, les valeurs mesurées en Déplacement, Vitesse et Accélération sont liées par des fonctions simples faisant intervenir la fréquence :

$$V = \frac{A}{2 \cdot \pi \cdot F}$$

$$D = \frac{V}{2 \cdot \pi \cdot F}$$

$$D = \frac{A}{4 \cdot \pi^2 \cdot F^2}$$

Avec les unités courantes :

- ⇒ D en μm
- ⇒ V en mm/s
- ⇒ A en g

$$V = 1561 \cdot \frac{A}{F}$$

$$D = 159 \cdot \frac{V}{F}$$

$$D = 248199 \cdot \frac{A}{F^2}$$

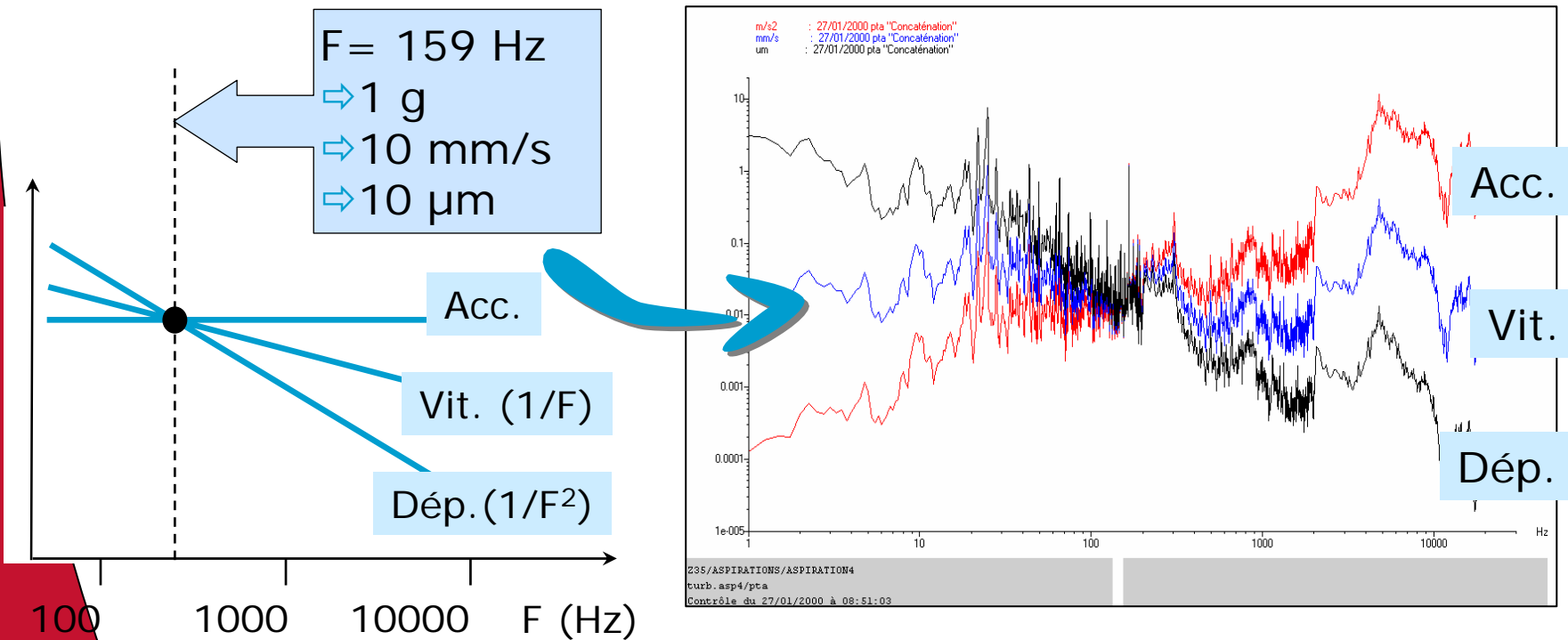
Rappel : Par accord international : $1g = 9.80665 \text{ m/s}^2$

Notions fondamentales

- ▶ Influence de la grandeur utilisée : On constate que :
 - ◆ Le **Déplacement** est inversement proportionnel au carré de la fréquence : Plus la fréquence augmente, plus le Déplacement diminue : Son utilisation est réservée aux **très basses fréquences** : $F \leq 100$ Hz
 - ◆ La **Vitesse** est inversement proportionnelle à la fréquence : Plus la fréquence augmente, plus la Vitesse diminue : Son utilisation est réservée aux **basses fréquences** : $F \leq 1000$ Hz
 - ◆ L'**Accélération**, représentative des forces dynamiques, ne dépend pas de la fréquence : C'est le paramètre privilégié en analyse vibratoire sur **un large domaine de fréquences** : $0 \leq F \leq 20000$ Hz

Notions fondamentales

► Influence de la grandeur utilisée : Illustration



La transformation Temps - Fréquence

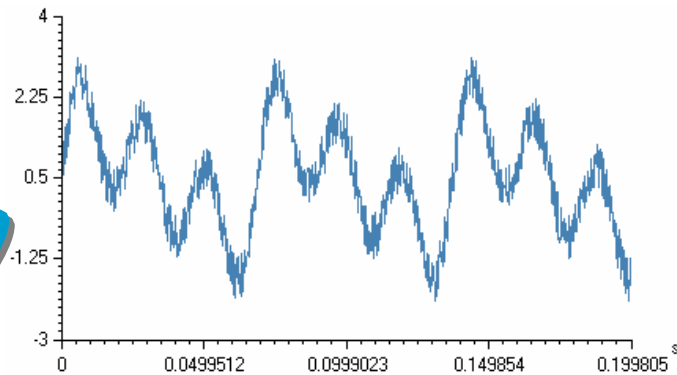
► Introduction

L'ensemble des définitions et principes exposés ci-avant sont basés sur l'hypothèse que le signal est un sinus pur. Dans la pratique, les vibrations réelles sont infiniment plus complexes, constituées d'un grand nombre de composantes d'origines multiples et modulées par un grand nombre de paramètres.

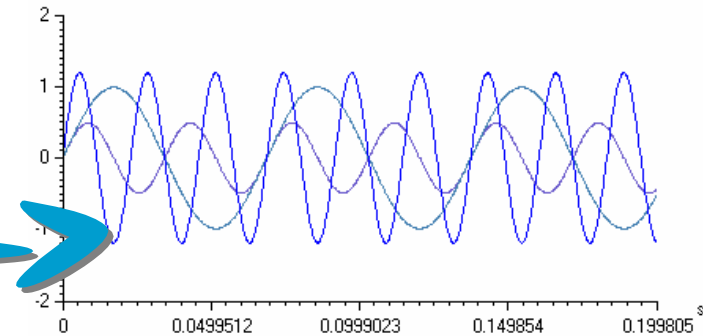
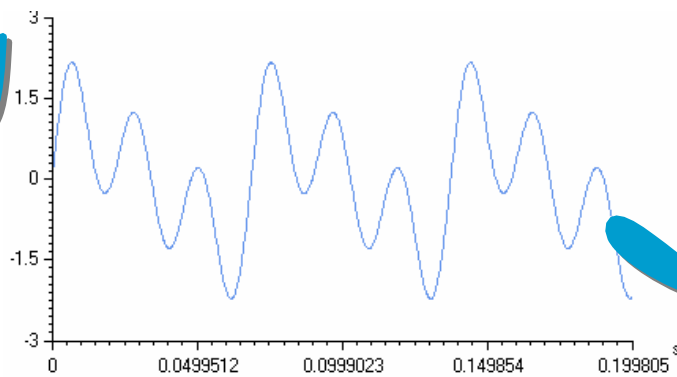
Néanmoins, nous verrons dans la suite que ces vibrations complexes peuvent se ramener à la superposition de composantes élémentaires purement sinusoidales pour lesquelles les principes énoncés sont applicables. La **transformation temps - fréquence** ou **transformée de Fourier** est un des outils utilisés à cet effet.

La transformation Temps - Fréquence

► Vibrations complexes



Le signal vibratoire temporel est composé de signaux périodiques et non périodiques (bruit de fond). Toutes les composantes sont sommées dans le signal résultant.



La transformation Temps - Fréquence

► La transformée de Fourier

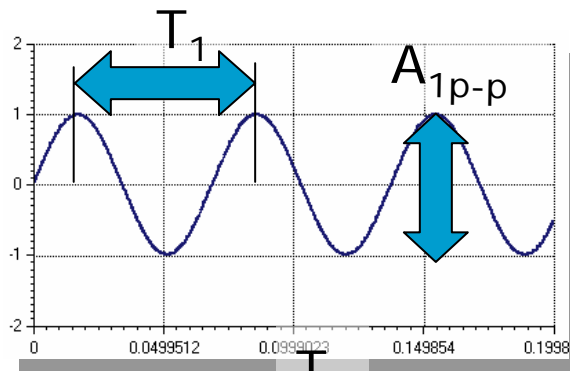
La décomposition d'un signal vibratoire périodique complexe en ses différentes composantes sinusoidales, représentées chacune par leur amplitude A_i et leur fréquence F_i est réalisée par une transformation temps - fréquence appelée **Transformée de Fourier**.

Cette fonction mathématique réalise une transposition du signal de l'espace temporel vers l'espace fréquentiel. La représentation du signal obtenue est appelée un **spectre en fréquences**.

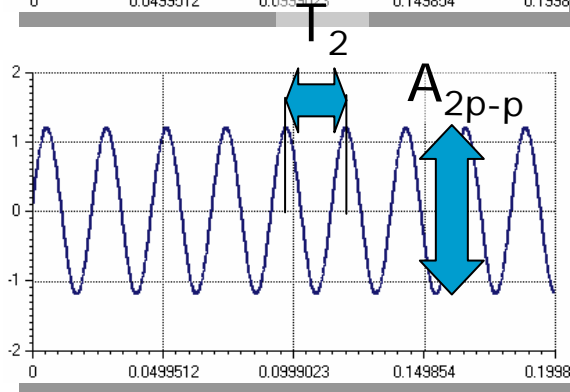
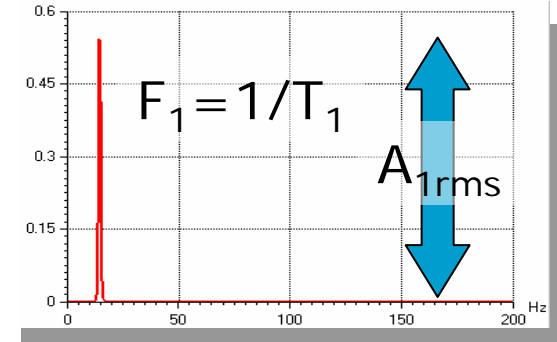
La Transformée de Fourier est implémentée dans les **analyseurs de spectres** modernes sous une forme appelée **FFT** (Fast Fourier Transform).

La transformation Temps - Fréquence

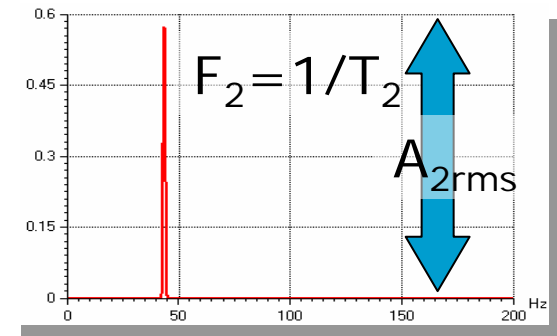
► Cas d'un signal sinusoïdal pur



FFT

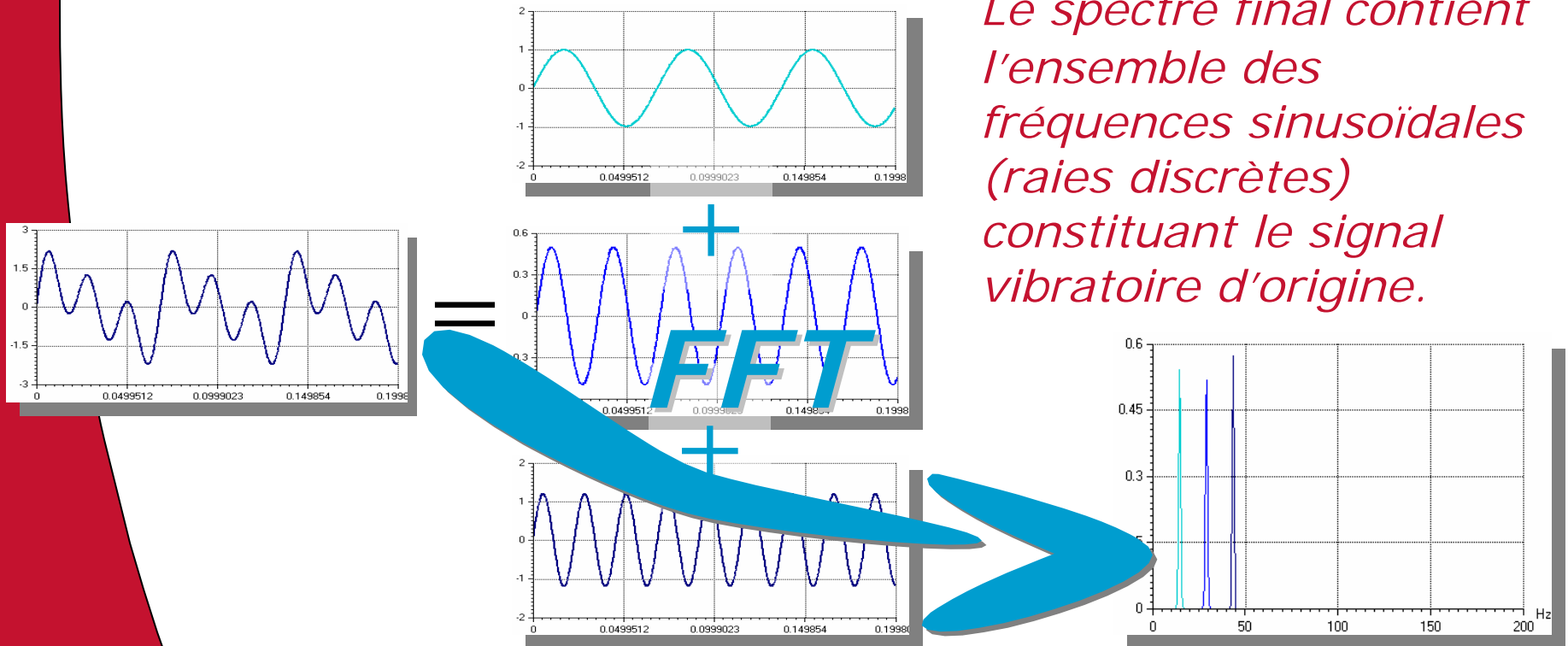


FFT



La transformation Temps - Fréquence

- Cas d'un signal multi-sinusoidal

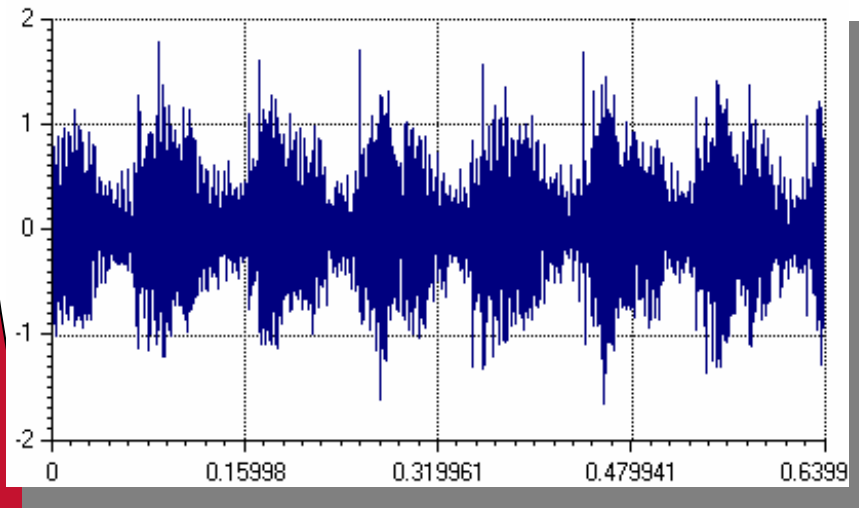


Le spectre final contient l'ensemble des fréquences sinusoïdales (raies discrètes) constituant le signal vibratoire d'origine.

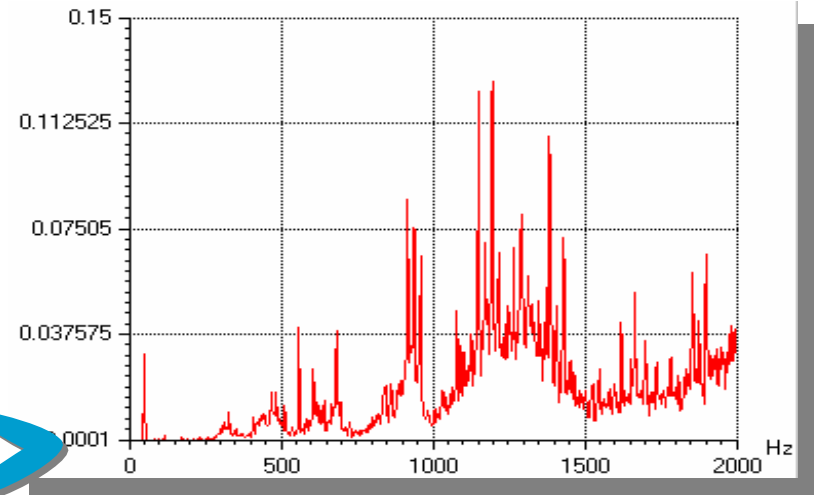
La transformation Temps - Fréquence

► Cas d'un signal réel

Signal temporel

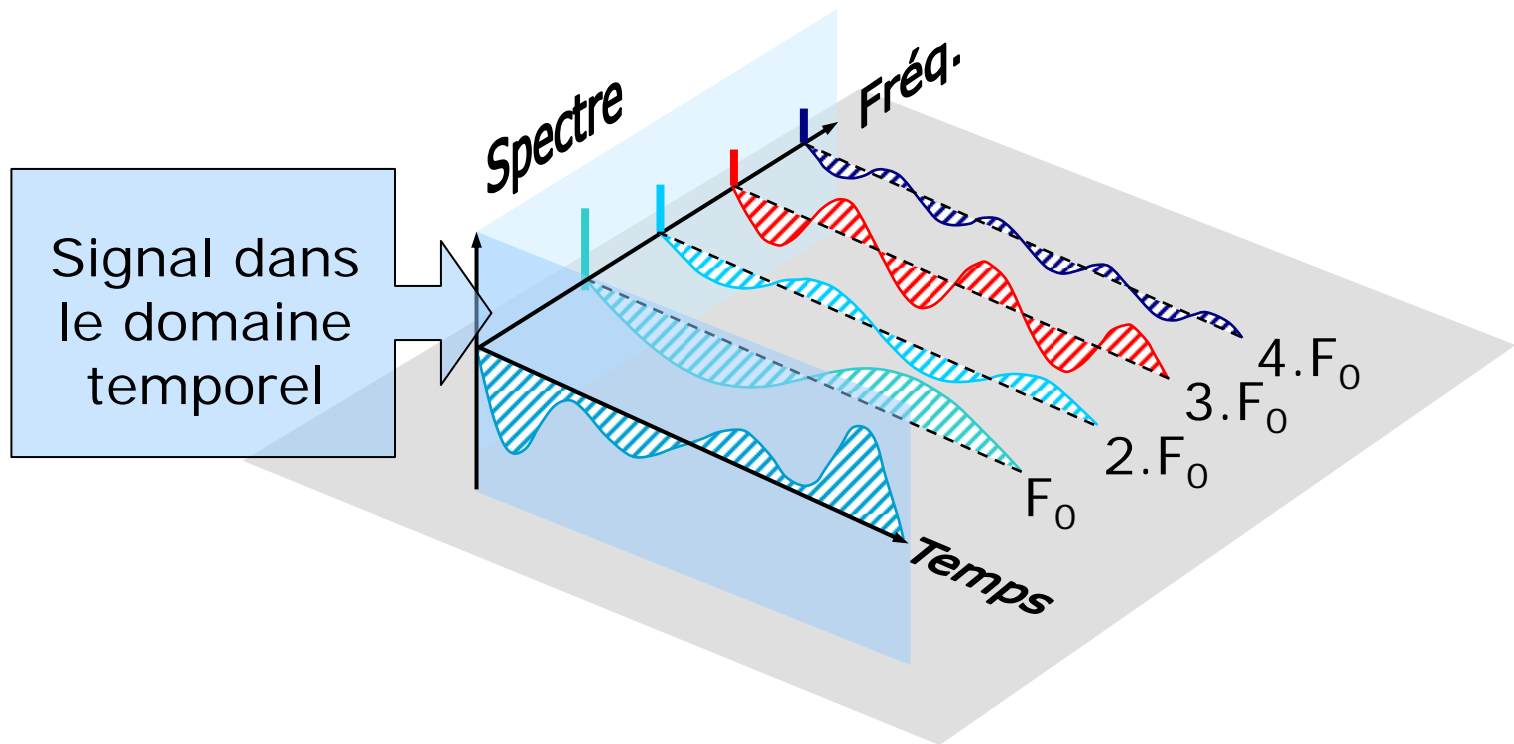


Signal fréquentiel



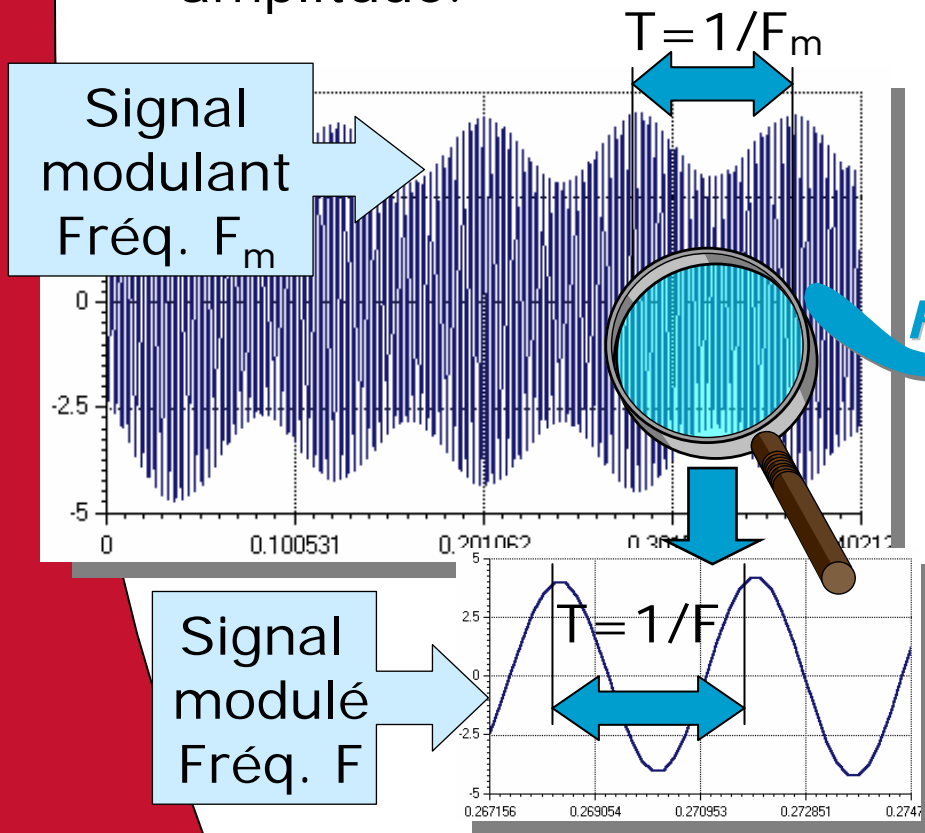
La transformation Temps - Fréquence

- Signification du spectre

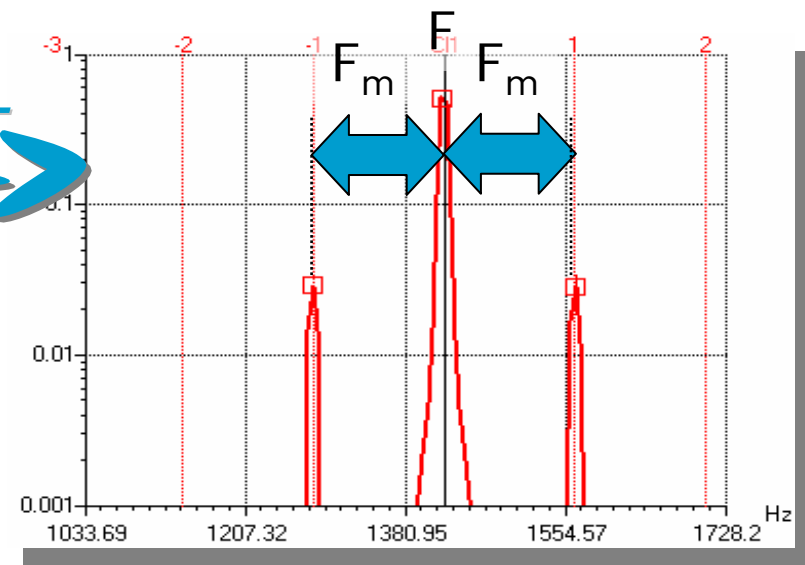


La transformation Temps - Fréquence

- ▶ Transformée de signaux particuliers : Signal modulé en amplitude.

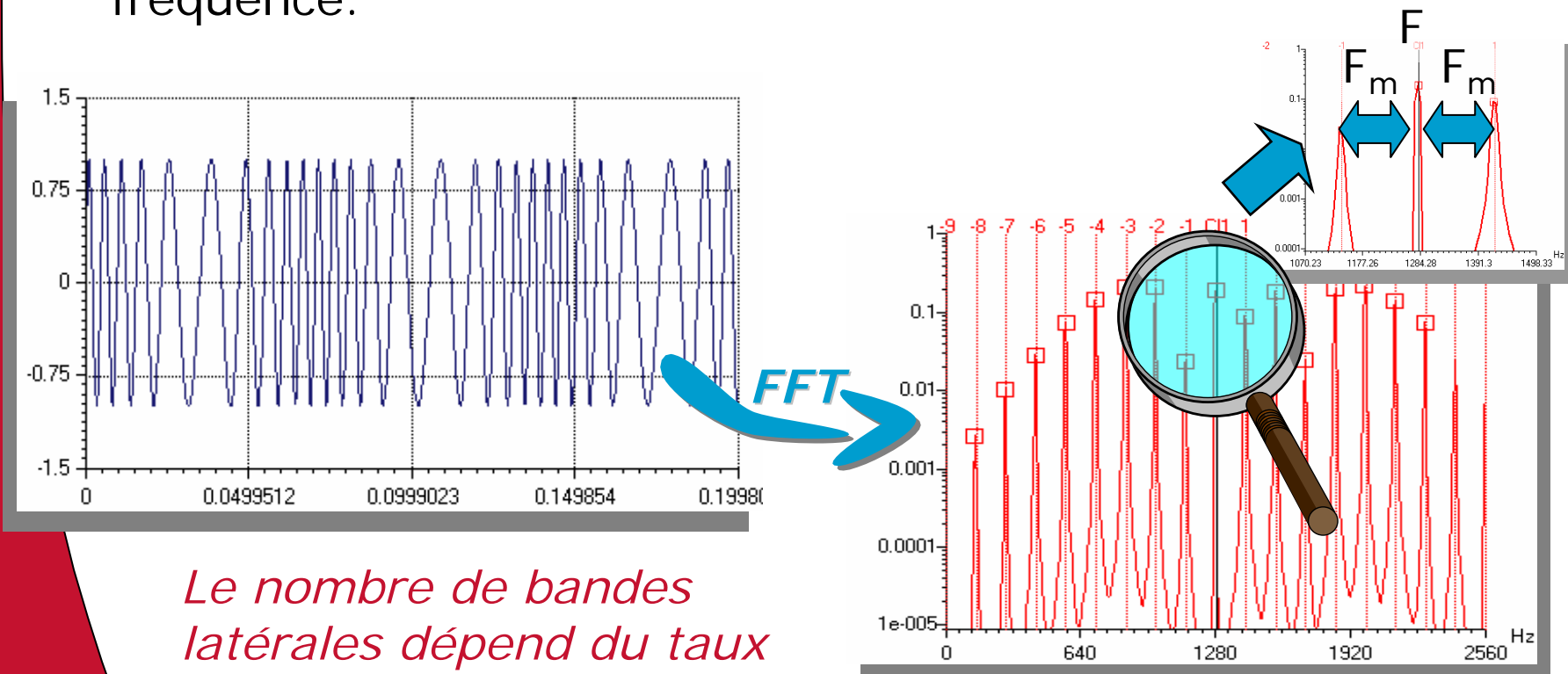


Le nombre de bandes latérales dépend de la forme du signal de modulation



La transformation Temps - Fréquence

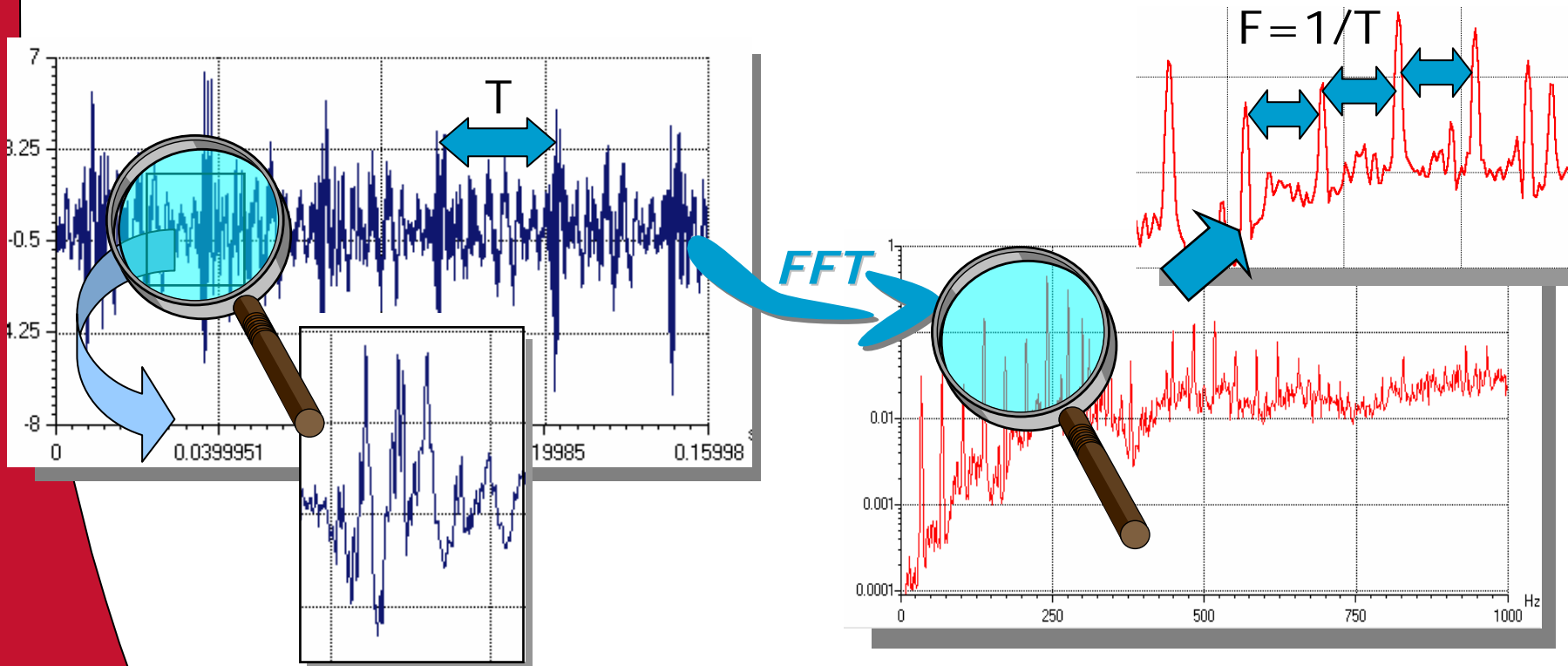
- ▶ Transformée de signaux particuliers : Signal modulé en fréquence.



Le nombre de bandes latérales dépend du taux de modulation

La transformation Temps - Fréquence

- ▶ Transformée de signaux particuliers : Chocs périodiques



La transformation Temps - Fréquence

- ▶ Les échelles linéaires et logarithmiques : Introduction
Les spectres issus de signaux vibratoires réels sont très riches en raison du grand nombre de sources vibratoires présentes dans une machine.
Par suite, les informations intéressantes dans le spectre ne correspondent pas forcément aux fréquences présentant des maxima d'amplitude : Des raies spectrales d'amplitude faibles au regard des autres peuvent être d'un intérêt de premier plan pour le diagnostic. Afin de pouvoir les visualiser, on utilise pour la représentation des spectres en fréquences une **échelle logarithmique** selon l'axe Oy des amplitudes du signal : Ce type de représentation présente l'avantage de favoriser l'affichage des petites amplitudes et est donc recommandé.

La transformation Temps - Fréquence

- ▶ Les échelles linéaires et logarithmiques : Illustration

