Vibrations mécaniques - partie 3

Partie 1
systèmes discrets

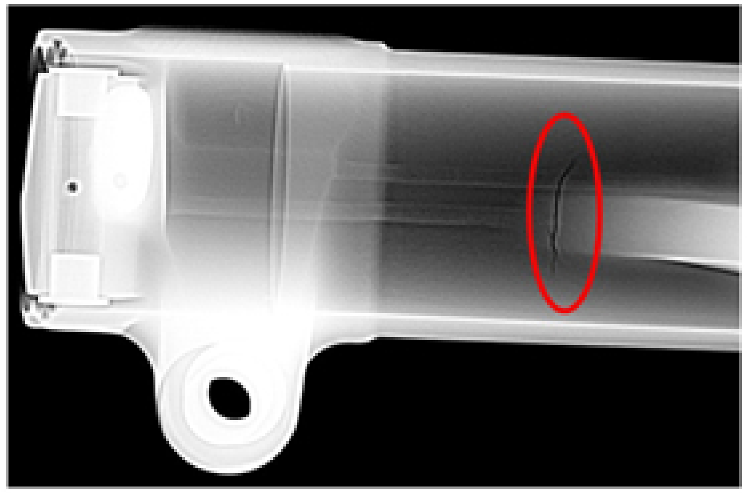
Partie 2
systèmes continus

Partie 3
analyse vibratoire

- Considérations générales
- Principaux défauts constatés
- Corrections et prévention…

Toutes les structures sont concernées

Si elle peut trouver une utilité, toute vibration généralement non contrôlée est un phénomène indésirable qui augmente le bruit ou cause des défaillances mécaniques dont le taux fini par augmenter fatalement avec le temps (usure, fatigue…). Les réparations sont souvent coûteuses.



Fissure sur train d'atterrissage

Il faut ajouter les effets sur le corps humain et la santé qui imposent des actions dans l'entreprise :

- → actions organisationnelles du travail,
- → actions médicales, suivi…

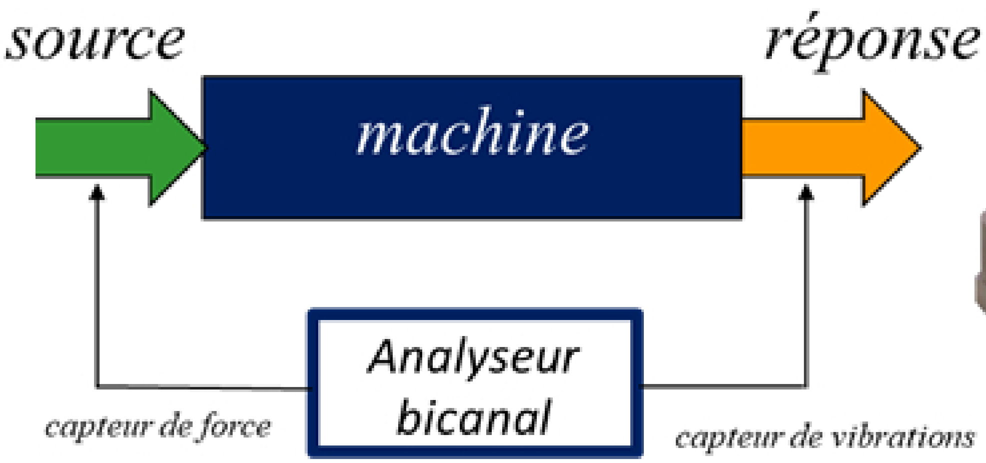
Marteau burineur

La combinaison de l'intensité et de la durée des vibrations caractérise le risque…

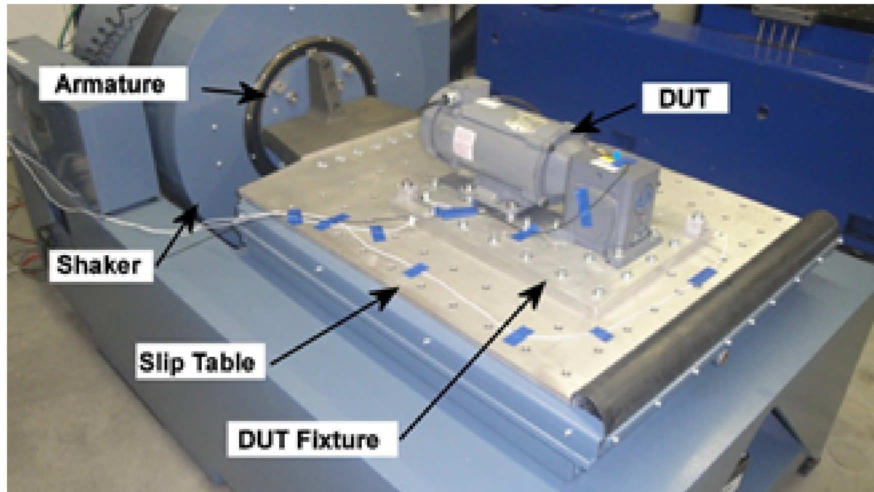
3 approches

Essais de caractérisation

Test in situ



Test sur banc d'essai



**DUT : device under test*

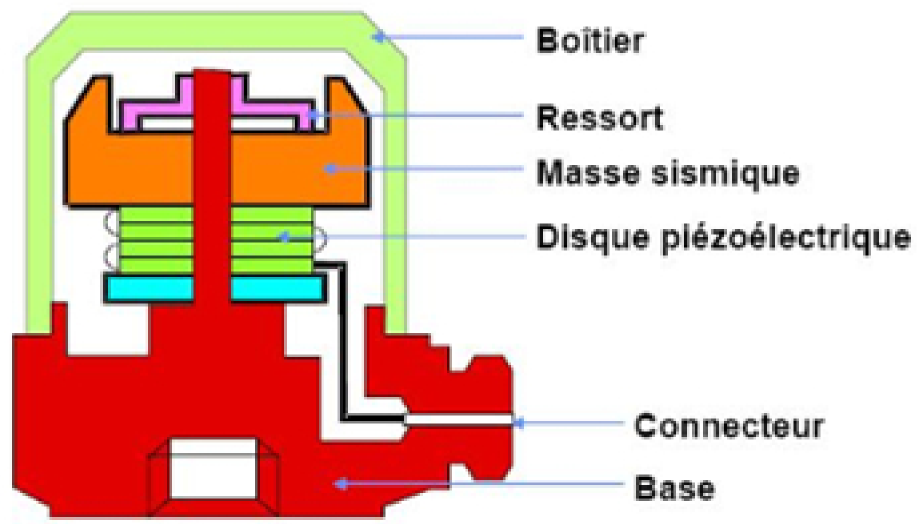
Surveillance et diagnostic

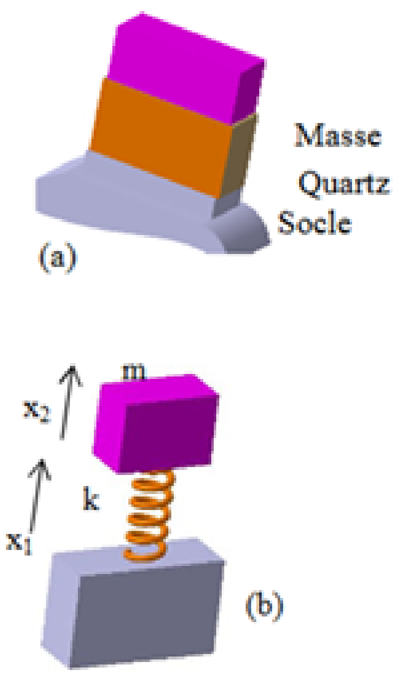
Signature vibratoire Machine à t0 ⟺ *Signature vibratoire machine à t+Δt*

Maintenance prédictive, identification des causes

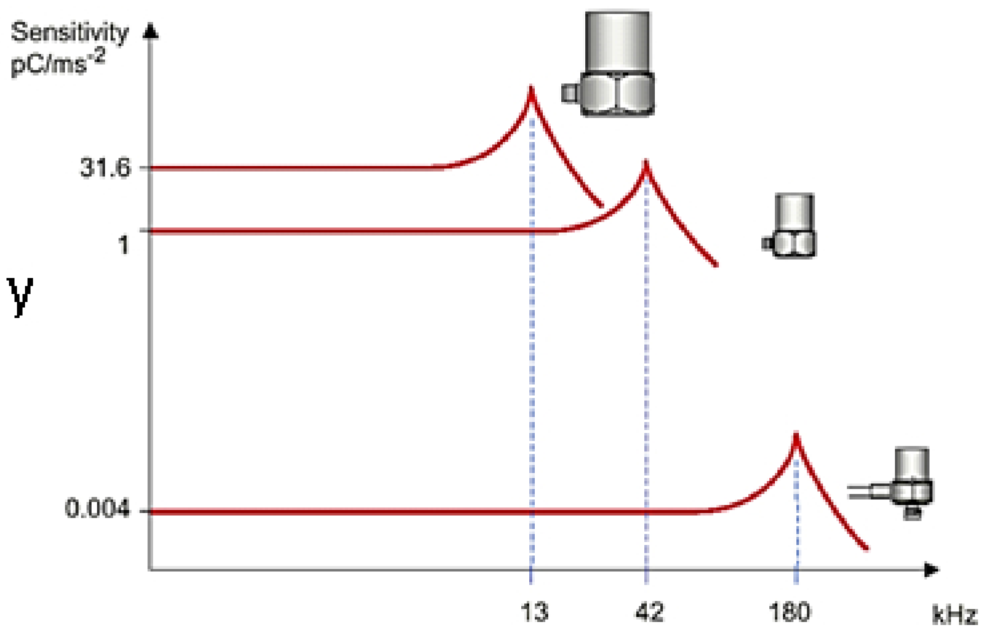
L'accéléromètre piezo.

C'est LE capteur utilisé en analyse vibratoire.



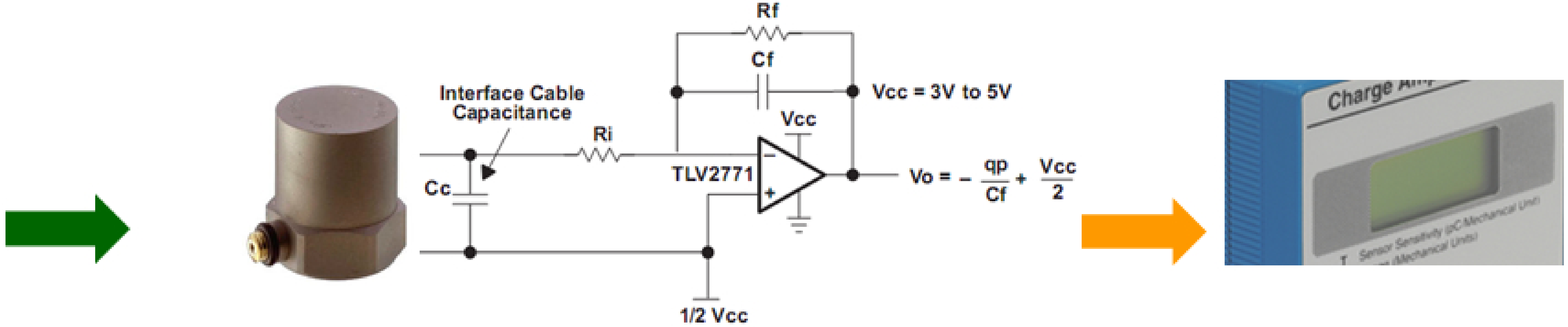


- Utilisable sur de grandes gammes fréquentielles
- Excellente linéarité
- Pas d'alimentation externe
- Aucun élément mobile, donc robuste y compris face à la température
- Extrêmement compact et d'un grand rapport qualité/prix
- Ne passe pas la composante statique



Conditionnement du signal

Pour être exploitables ou numérisés les signaux issus des capteurs doivent être conditionnés et exempts de bruit. Les conditionneurs de charge proposent une conversion charge/tension proportionnelle.



Coulomb [C = A.s]

Volt [V]

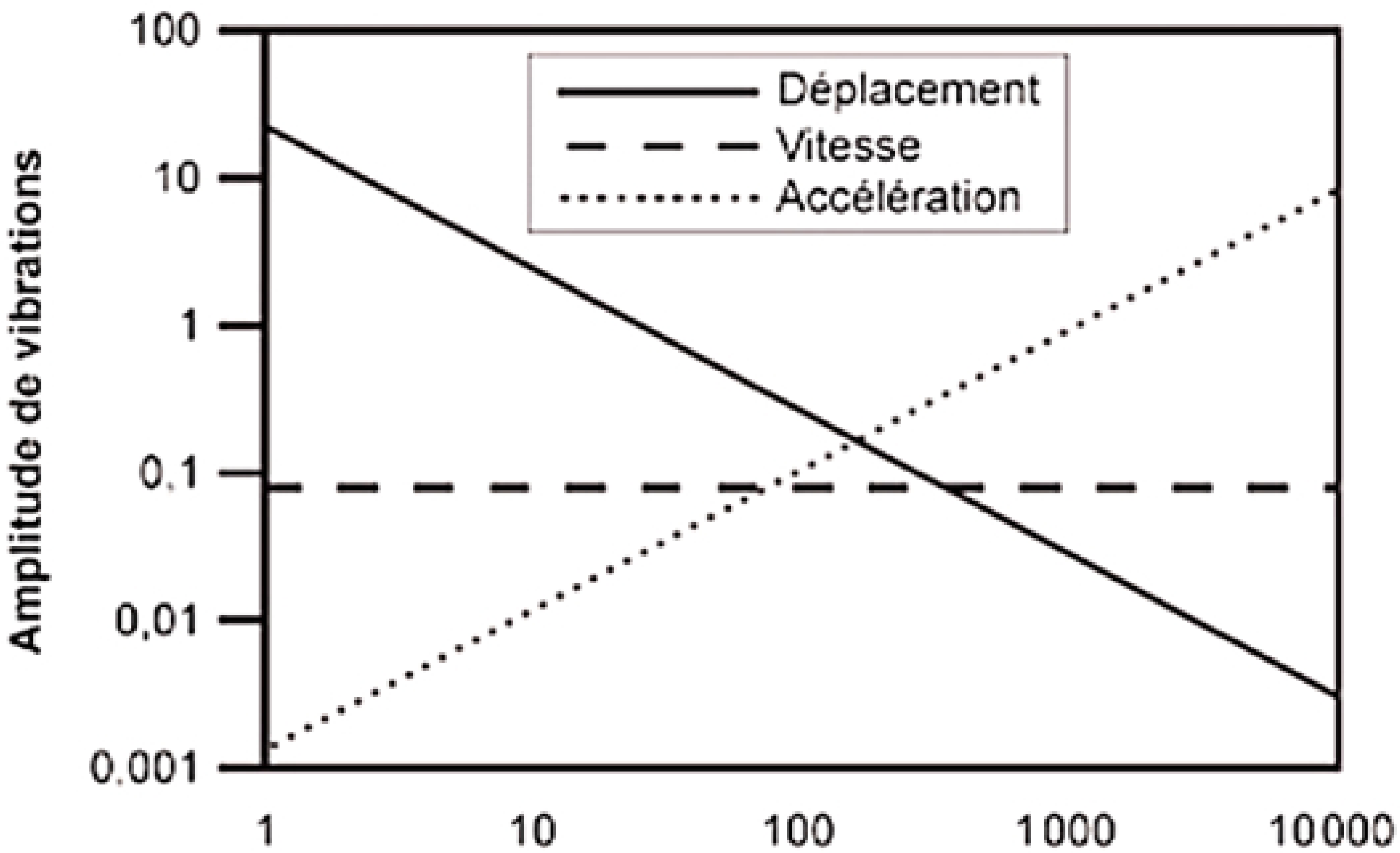
Des gains d'amplification et d'atténuation sont aussi disponibles.
Des intégrations simples et doubles permettent également d'obtenir en sortie les signaux de vitesse ou de déplacement.

	accélération	vitesse	position
module	$X.\omega^2$ →	$X.\omega$ →	X
phase	π	$\pi/2$	0

Des fonctions de pré-filtrage du signal permettent souvent d'optimiser le signal avant enregistrement et/ou analyse.

Conditionnement du signal

Comparaison des amplitudes de vibrations exprimées en termes d'accélération, de vitesse et de déplacement.



Indicateur (Niveau global)	Domaine de surveillance
Déplacement (µm c/c)	Phénomènes lents basses fréquences [2–100 Hz] : balourd, désalignement, instabilités de paliers etc.
Vitesse (mm/s eff)	Moyennes fréquences [1 000 Hz] : balourd, lignage, instabilités de paliers, cavitation, passage d'aubes, engrènement etc.
Accélération (g eff)	Phénomènes très rapides Hautes fréquences [20 000 Hz] : engrenages, roulements, passages d'ailettes, cavitation…)

Les unités les plus utilisées sont celles du déplacement pour les mesures sur les arbres et de la vitesse pour les mesures de vibrations des paliers.

Idéalement, les mesures doivent être prises selon les 3 plans (vertical, horizontal et axial) et sur chaque palier…

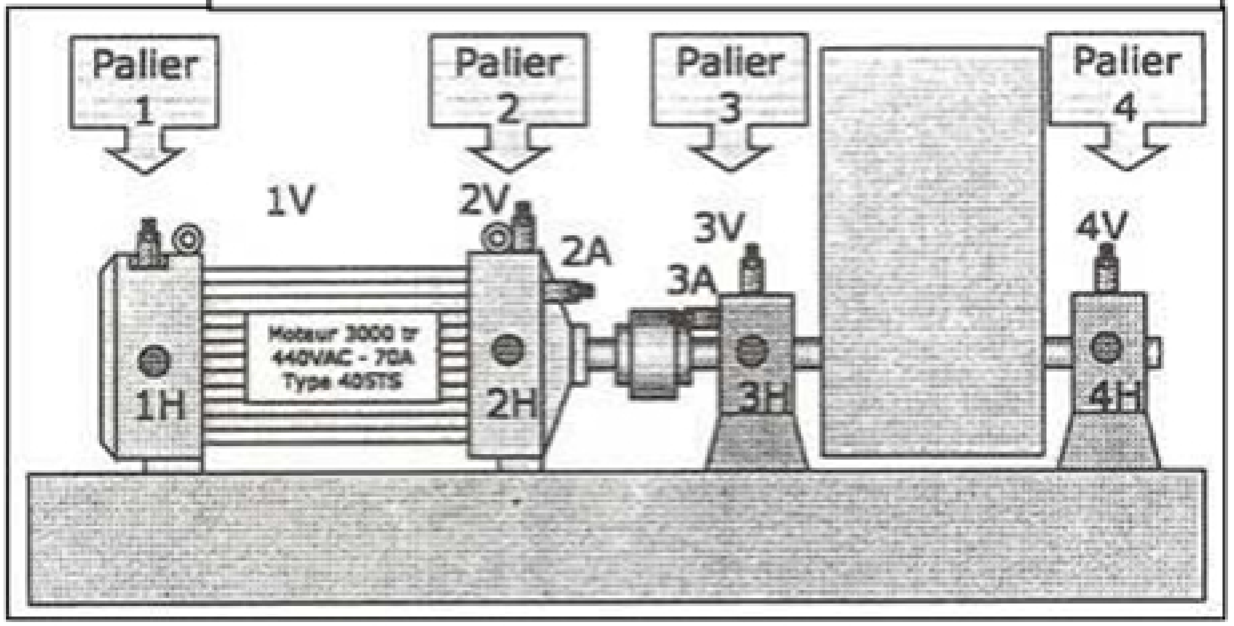
→ Voir annales Examen 2019

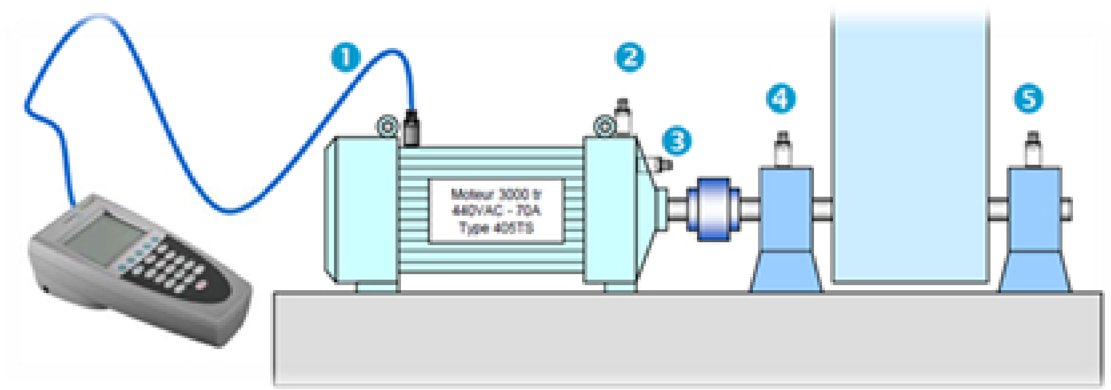
Conditionnement du signal

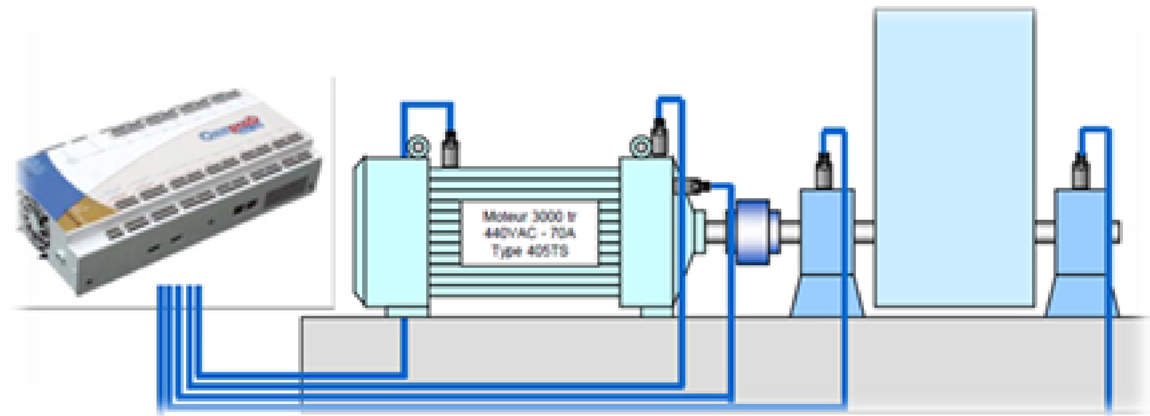
<u>Exemple :</u>
Représentation graphique des directions des points de mesure :

Palier 1 : mesure en horizontale 1H et en verticale 1V
Palier 2 : mesure en horizontale 2H et en verticale 2V et en axiale 2A
Palier 3 : mesure en horizontale 3H et en verticale 3V et en axiale 3A
Palier 4 : mesure en horizontale 4H et en verticale 4V

Numérotation des paliers :
Machine entraînante ➔ machine entraînée

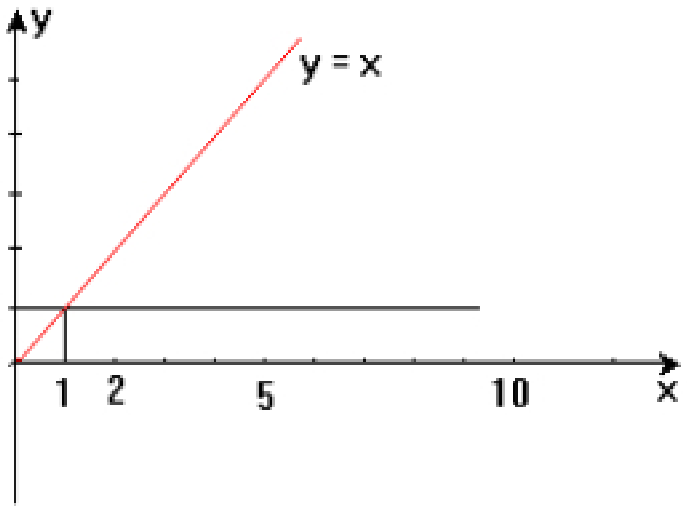


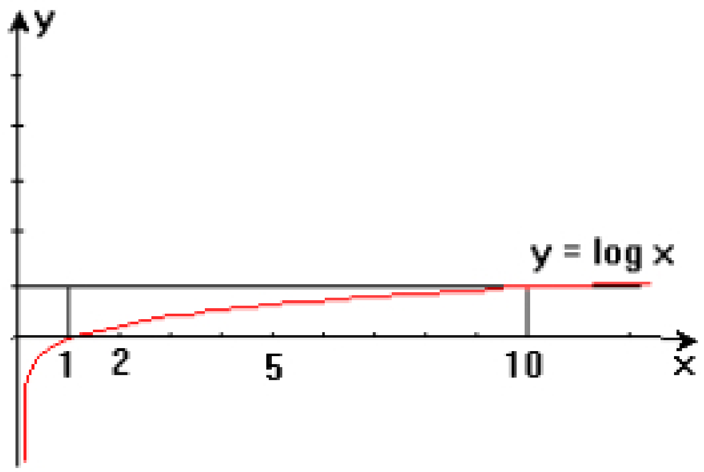




Une échelle appropriée

L'échelle logarithmique concentre les informations de forte amplitude tout en permettant l'observation des composantes de faible niveau sur un même graphe.





$$\text{Gain [dB]} = 10 \text{ Log } \frac{\text{Sortie}^2}{\text{Entrée}^2}$$

→

sortie = 2x entrée

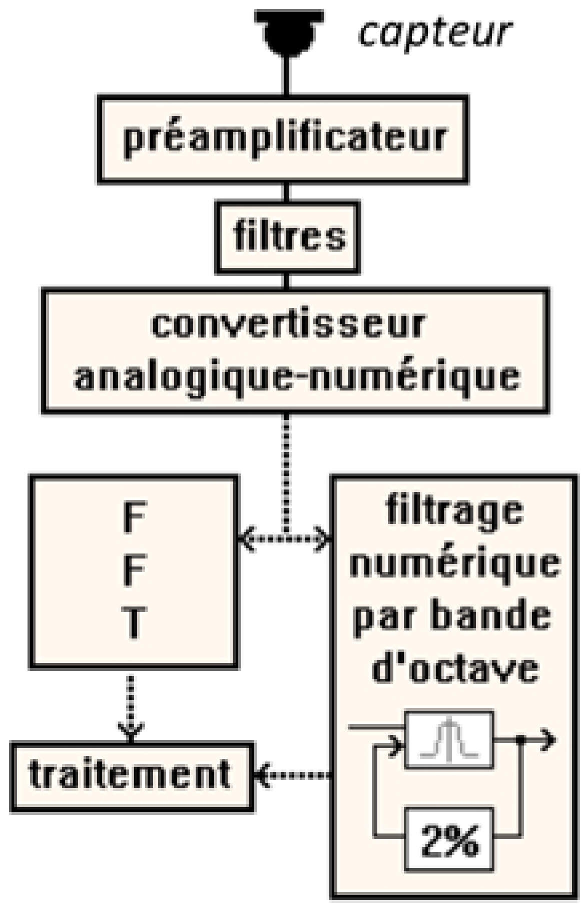
ΔG = 6 dB

= 0 dB

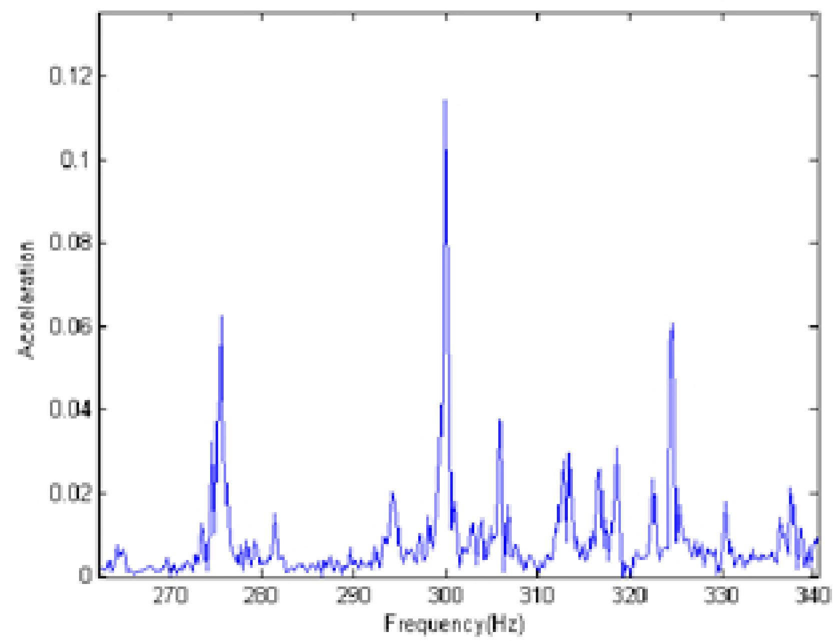
= ??? dB

L'analyseur

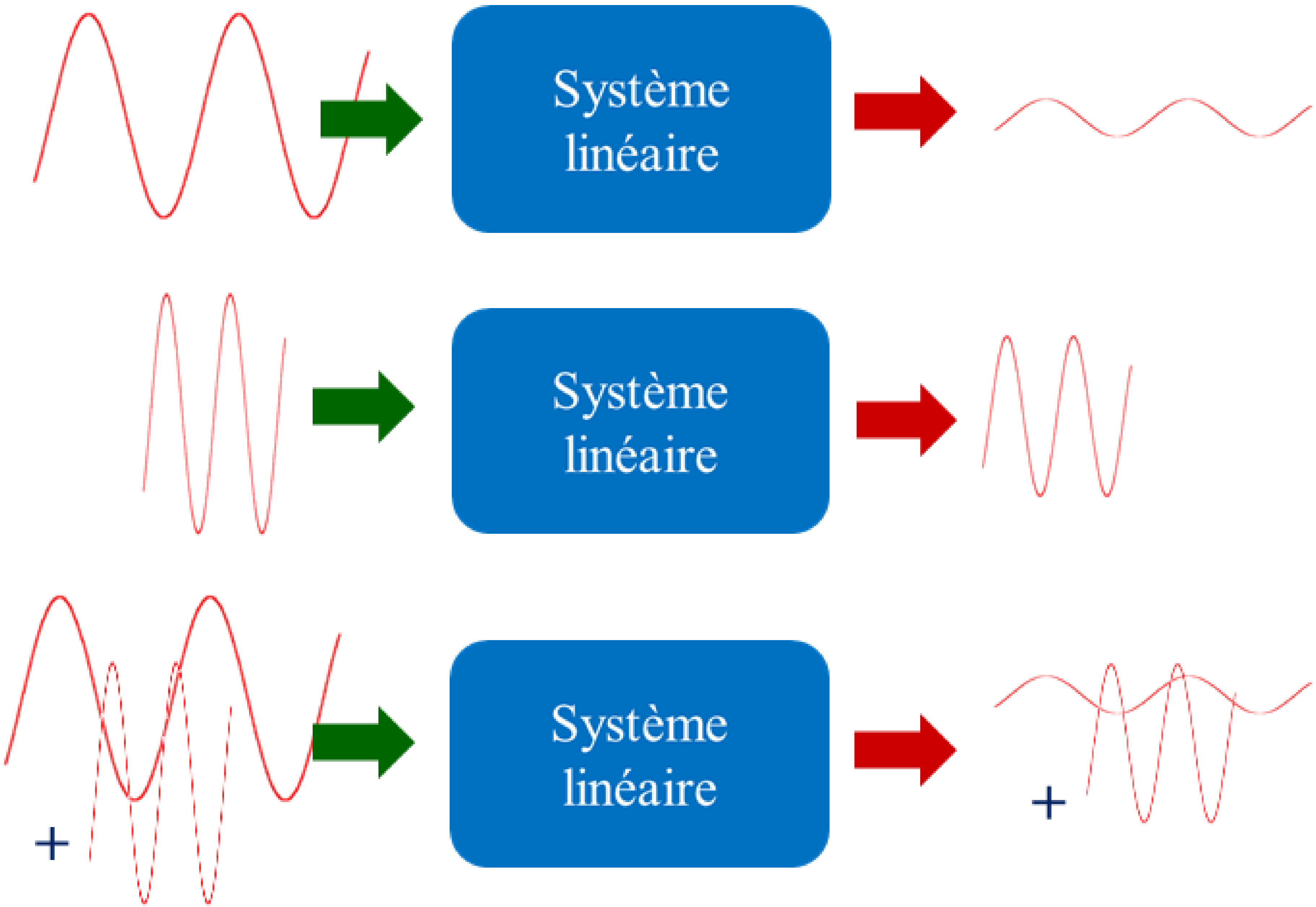
Pour décrire complètement une vibration, il faut spécifier le niveau et la fréquence de chacune de ses composantes. L'analyse spectrale est la technique de détermination de ces valeurs...



Un analyseur numérique comprend toujours un accéléromètre et un amplificateur analogique, mais le signal en sortie de ce dernier est converti sous forme numérique et toutes les opérations d'analyse se font numériquement.
On dispose ainsi d'analyseurs de Fourier, dont les résultats sont comparables à un ensemble de filtres à bande étroite étagés régulièrement en fréquence. Le plus souvent, on applique un algorithme dit Transformée Rapide de Fourier (FFT).



Système linéaire - propriété



La réponse à la somme est la somme des réponses.
Intérêt de savoir décomposer la source en somme d'excitations harmoniques car alors on saura déterminer la réponse…

Série de Fourier

On doit à Fourier une méthode analytique de décomposition d'une vibration périodique en ses composantes :
→ **c'est la série de Fourier (1822).**

Plus généralement, **tout phénomène périodique**, par exemple une vibration, est décomposable en vibrations pures.

Série de Fourier

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_n e^{in\omega t}$$

Coefficient de Fourier

$$c_n = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) e^{-in\omega t} \, dt \, .$$

Série de Fourier

Explication de Cn : si x(t) comporte une composante sinusoïdale de pulsation n.ω représentée par exp(+inωt), alors cette composante peut être figée dans x(t) grâce à la multiplication par exp(-inωt).

→ c'est alors la seule valeur constante à subsister au milieu d'autres valeurs périodiques qui composent aussi x(t).

L'intégration sur la période permet ensuite de ne ressortir que la constante, qui est l'amplitude de la composante sinusoïdale recherchée…

Fige l'amplitude de la composante en n.ω
(bloque la rotation du vecteur)

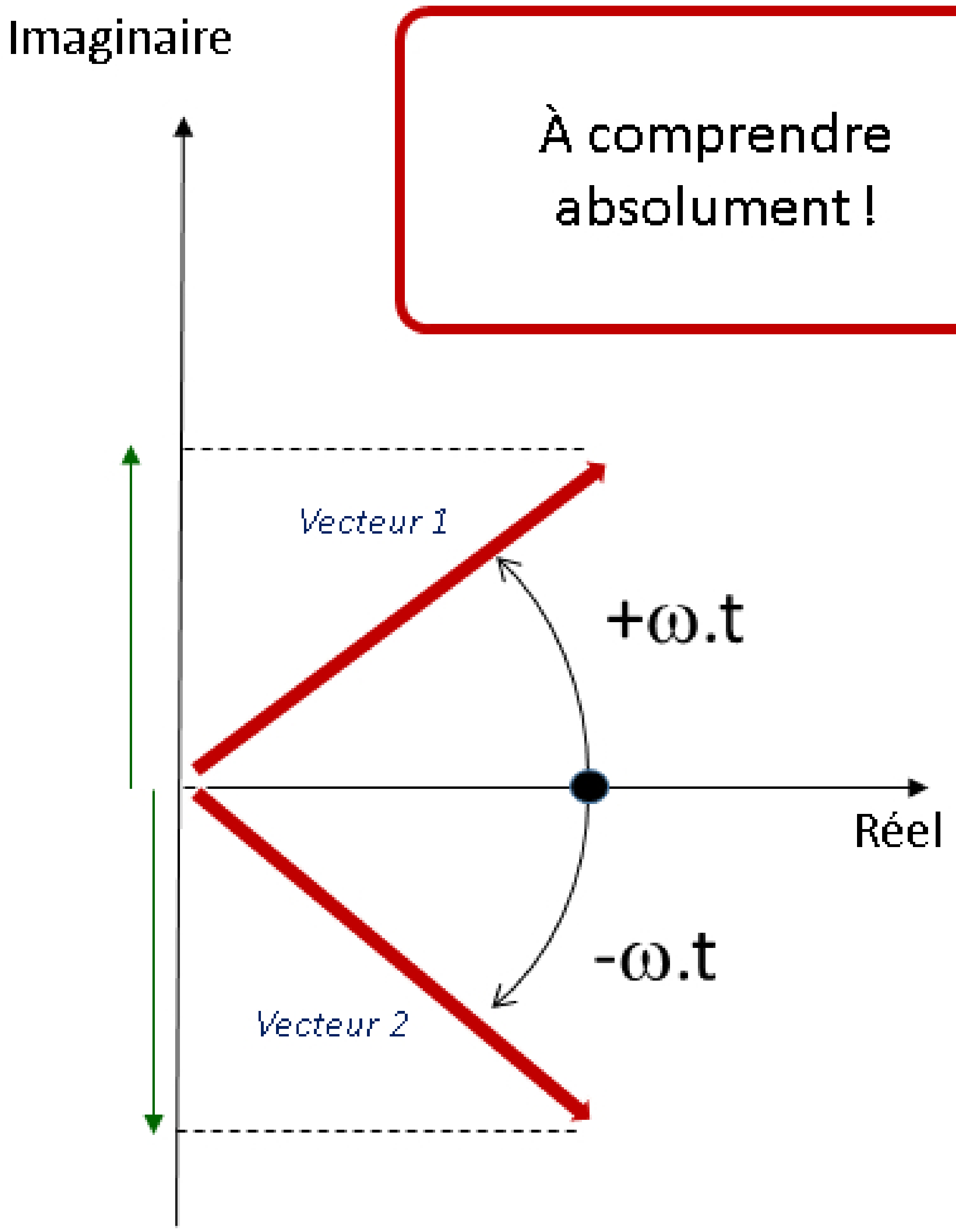
À comprendre absolument !

$$c_n = \underbrace{\frac{1}{T}\int_0^T}_{} x(t) e^{-in\omega t} dt \, .$$

Annule toutes les autres composantes périodiques
(la somme des positions d'un vecteur tournant est nulle)

Série de Fourier

Explication de ∑ :



À comprendre absolument !

Un signal co-sinusoidal est représenté par la somme de deux vecteurs contrarotatifs ce qui a pour effet d'annuler les parties imaginaires qui sont opposées.

$$A\cos(n\omega t) = A/2 \,.\, [\underbrace{\exp(in\omega t)}_{\text{Vecteur 1}} + \underbrace{\exp(-in\omega t)}_{\text{Vecteur 2}}]$$

C'est avec cette représentation que l'introduction de fréquences négatives prend tout son sens…

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_n e^{in\omega t}$$

Au final, x(t) est constitué de la somme de toutes les composantes extraites.

Série de Fourier

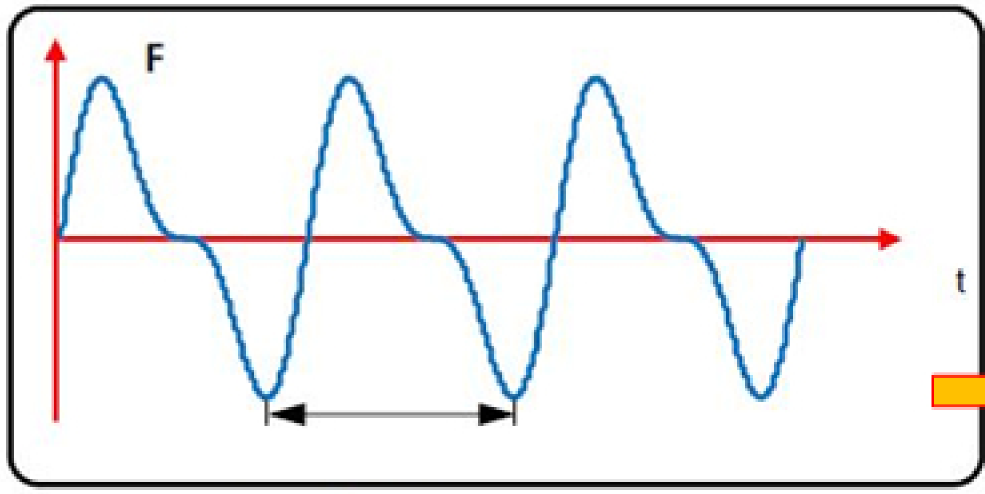


Figure 4.3 : signal périodique complexe

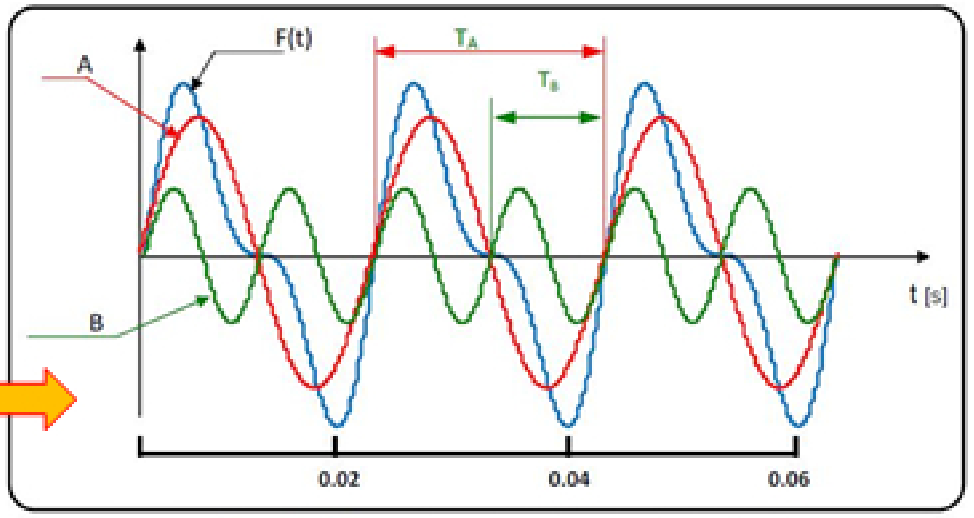


Figure 4.4 : Décomposition en série de Fourier de la fonction F(t)

Le spectre d'un signal périodique est toujours un **spectre de raies** et les différentes raies ne peuvent se trouver qu'aux fréquences nf0. Cette allure particulière du spectre caractérise les signaux périodiques.

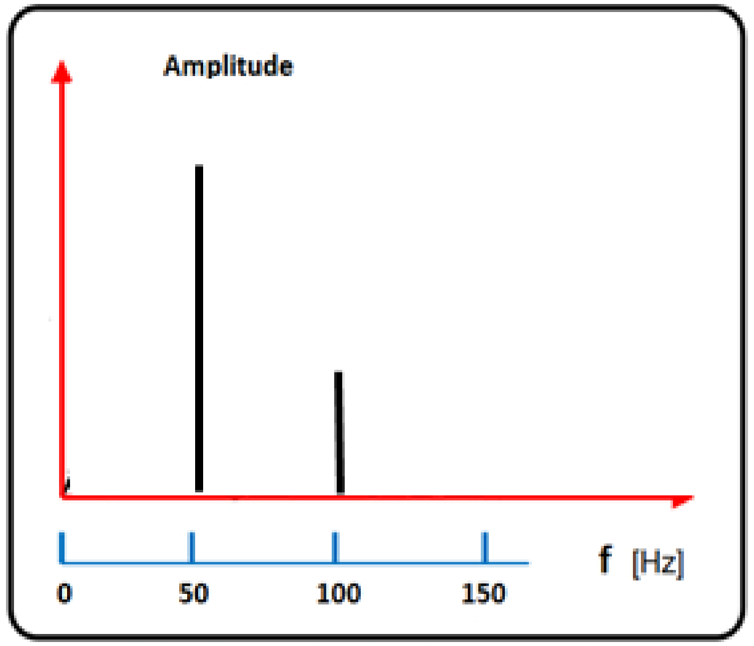
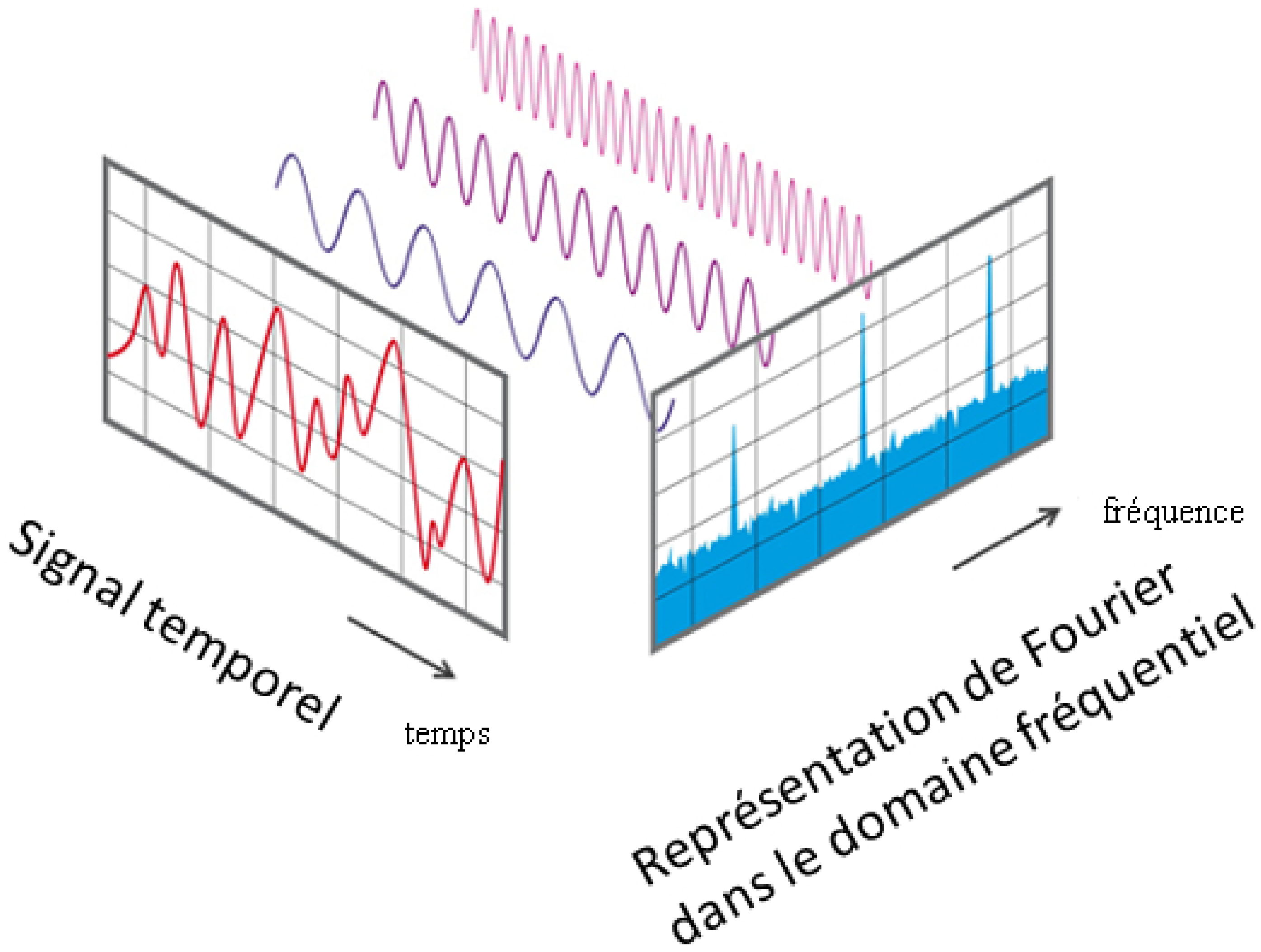
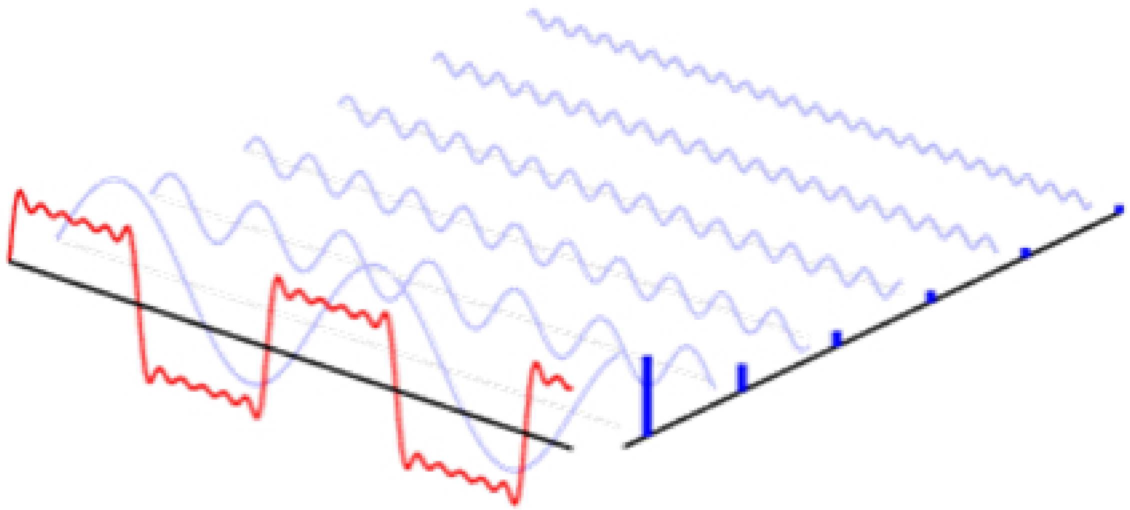


Figure 4.5 : Spectre correspondant à la fonction F (t)

Série de Fourier





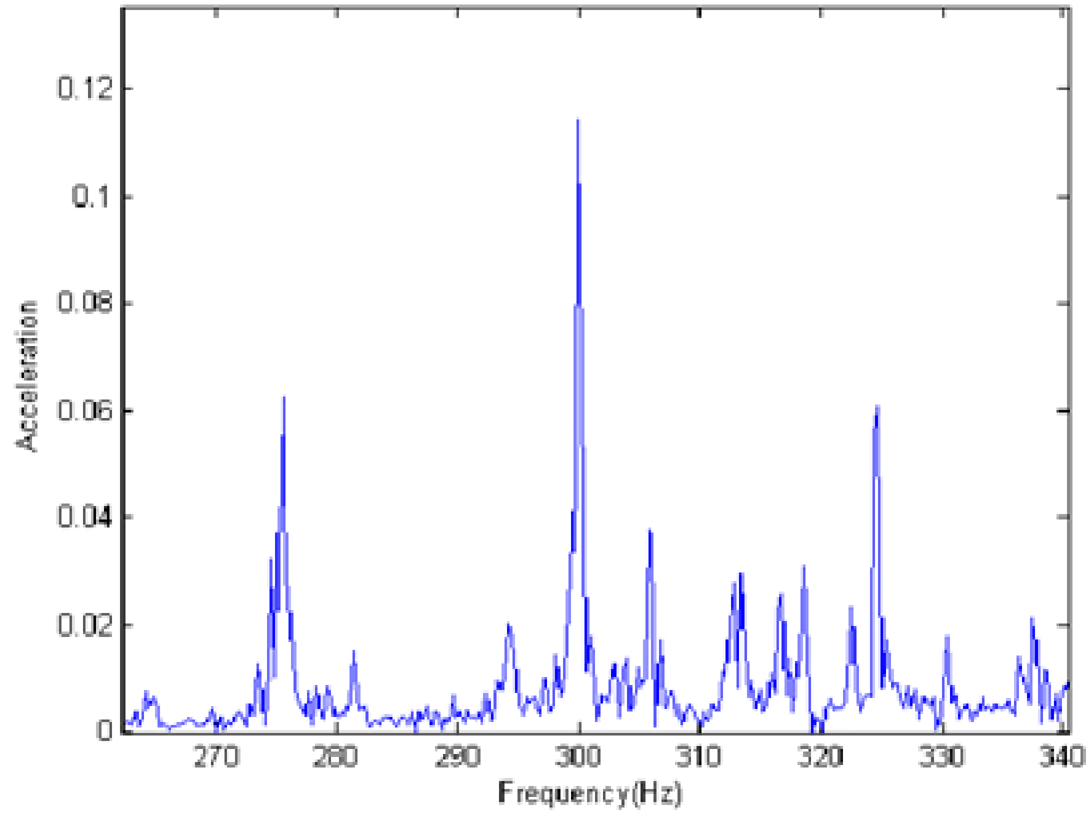
Exemple pour un signal « carré »

Transformée de Fourier

Une vibration non périodique est considérée comme une vibration périodique dont la période devient infiniment grande : T→ +∞ et f → 0 Hz.
Deux harmoniques successifs, multiples de f, sont donc infiniment proches et il faut balayer tout l'espace des réels pour les décrire tous.
La somme discrète $\sum_{-\infty}^{+\infty}$ est notamment remplacée par une somme continue $\int_{-\infty}^{+\infty}$.
C'est la **transformation de Fourier** qui permet ce calcul.
La transformée de Fourier s'impose depuis les années 1970 seulement (puissance de calcul alors suffisante)….

$$X(\omega) = TF[x(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i\omega t}\, dt$$

Le spectre est cette fois-ci **continu puisque deux harmoniques successifs sont infiniment proches…**



Réponse impulsionnelle

Une impulsion très fine possède un spectre très large.

→ Voir TD

À comprendre absolument !

Lorsqu'on applique une telle impulsion à un système mécanique, cela revient donc à lui appliquer un signal d'excitation contenant toutes les fréquences dans une large gamme donnée.

Dans cette plage de fréquence, se trouvent les fréquences de résonance du système, dont la réponse est détectée par l'accéléromètre.

Ainsi tous les instruments de musique à percussion (cloches, xylophones, cymbales…) sont excités par un choc (impulsion très fine) et jouent le rôle d'un filtre à cause de leurs fréquences de vibration propre.

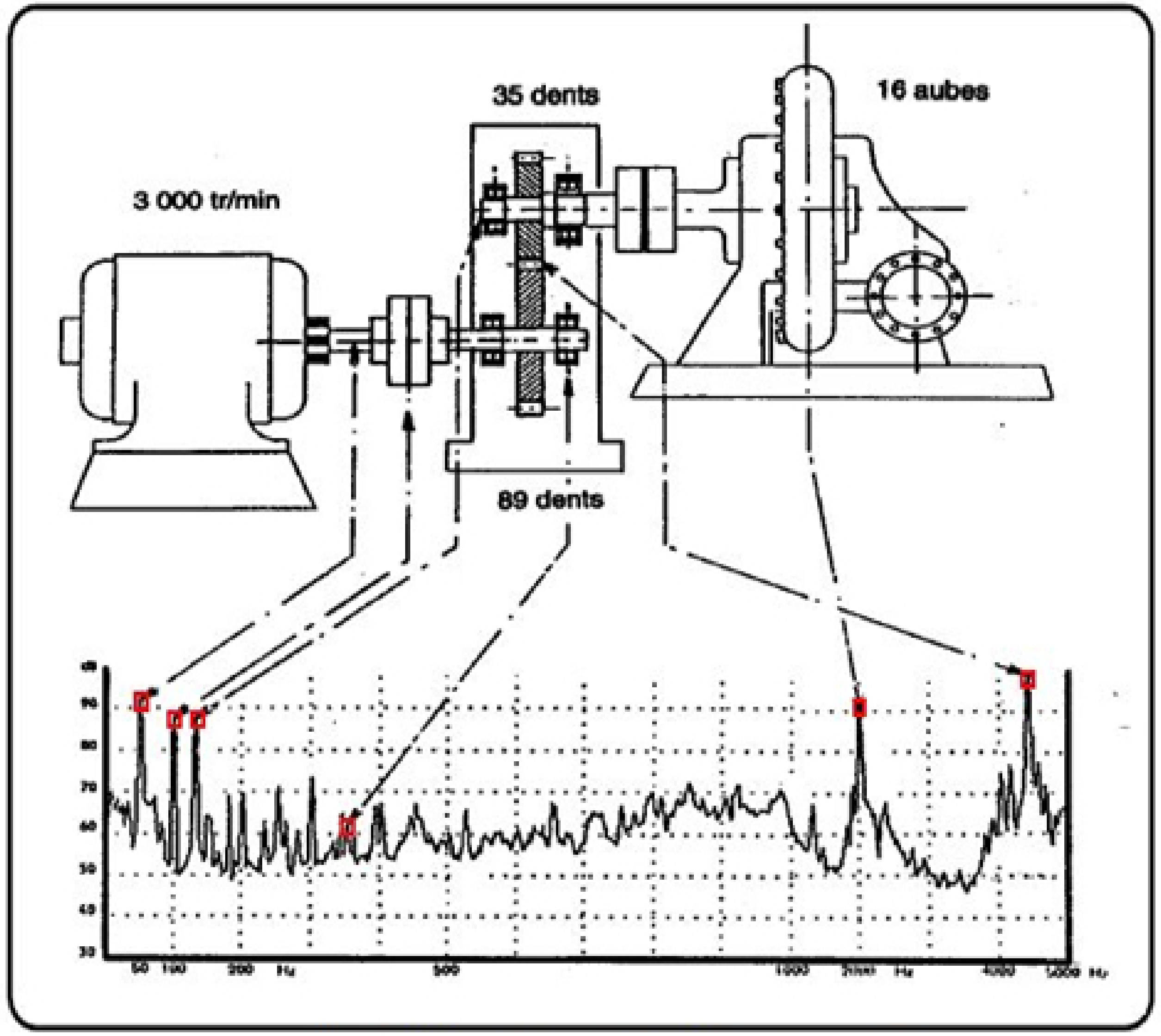
Des vibrations partout !

Les 3 règles du diagnostic vibratoire :

1 - Chaque machine génère une vibration spécifique.

2 - Les fréquences des vibrations sont déterminées par la cinématique de la machine et sa vitesse.

3 – Une mesure vibratoire cumule des informations en provenance de plusieurs composants.



L'analyse spectrale permet de formaliser les signatures des défauts et devient une alliée précieuse dans la maintenance préventive des machines. La vibration n'est plus alors considérée uniquement comme un risque, mais aussi comme un symptôme, une alerte.