

## L'ANALYSE SPECTRALE

### I. Introduction

Les mesures des niveaux globaux mettent en évidence l'existence d'une anomalie à un stade précoce mais ne permettant pas d'accéder au diagnostic, c'est à dire, d'identifier avec précision la nature de l'anomalie et si possible en préciser la gravité.

L'analyse spectrale repose sur une analyse systématique du signal vibratoire pour rechercher la présence d'images vibratoires de l'ensemble des défauts susceptibles d'affecter l'installation considérée. Cela demande une connaissance des caractéristiques cinématiques des différents organes constitutifs, de leur vitesse de rotation ou mieux encore de leur fréquence de mouvement.

### II. Etude préalable du fonctionnement de l'installation

Avant d'entamer la procédure de diagnostic, il faut une étude permettant :

- une bonne compréhension du fonctionnement de la machine et de ses organes ;
- l'établissement d'une fiche cinématique de la machine : calcul des fréquences de rotation de toutes les lignes d'arbres, des fréquences de défauts de balourds, d'engrènement, de roulements, ... etc.

Un exemple de fiche cinématique est illustré En Annexe 9.

### III. Représentation temporelle du signal vibratoire

La première façon de représentation du signal vibratoire délivré par un capteur, est la représentation en fonction du temps (représentation **temporelle**). Cette représentation est utilisée pour suivre le comportement vibratoire d'une machine en fonction de ces paramètres de fonctionnement (étude de la vibration d'une turbine lors de sa décélération). Ce type de représentation, aisé à exploiter lorsque le signal est simple (vibration sinusoïdale induite par un balourd) [figure 4.1], devient vite inexploitable lorsque le signal a pour origine des sollicitations multiples [figure 4.2].

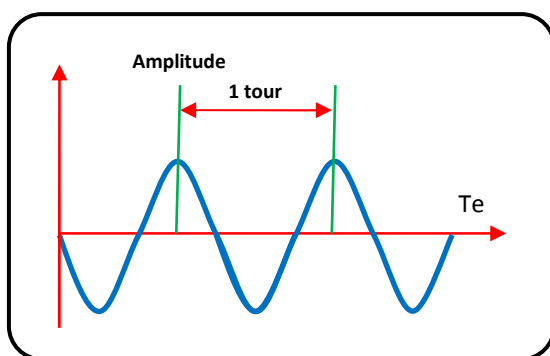


Figure 4.1 : Signal vibratoire sinusoïdal généré par un balourd

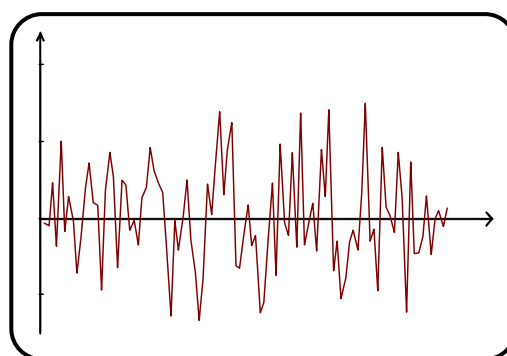


Figure 4.2 : Signal vibratoire complexe

## IV. Représentation spectrale

### 1. Principe

Le deuxième type de représentation est la représentation en fonction de la fréquence dans un diagramme **amplitude–fréquence** appelé **spectre** : représentation **spectrale**. Le signal complexe  $F(t)$  [figure 4.3], difficile à interpréter, est décomposé en une série de composantes sinusoïdales élémentaires définies par leurs amplitudes et leurs fréquences.

L’outil mathématique utilisé est la décomposition en série de Fourier [figure 4.4].

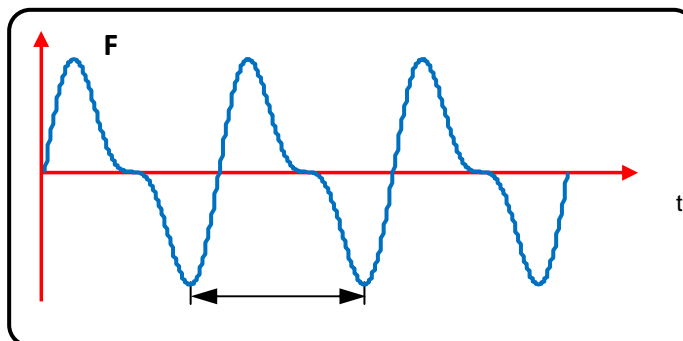


Figure 4.3 : signal périodique complexe

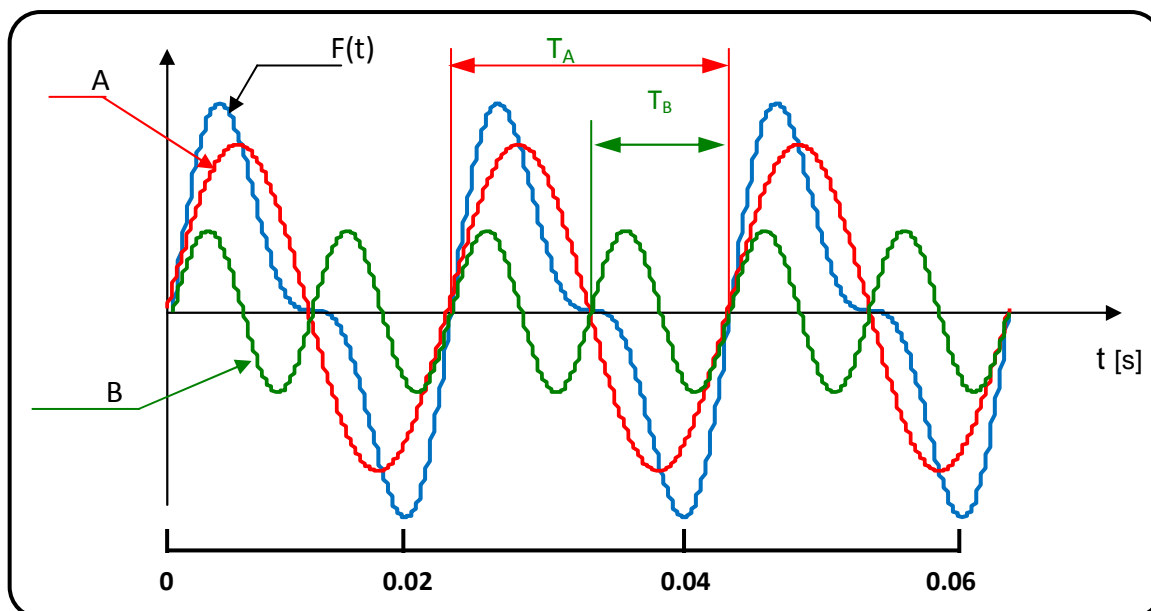


Figure 4.4 : Décomposition en série de Fourier de la fonction  $F(t)$

Si cette décomposition est possible, sa représentation dans le domaine temporel est encore inexploitable. On cherche à le représenter dans un diagramme amplitude–fréquence appelé **spectre** [figure 4.5]. Avec ce type de représentation, chaque composante sinusoïdale est définie par son amplitude et sa fréquence. La représentation spectrale devient ainsi plus claire et exploitable. Les ordinateurs utilisent un algorithme qui permet de réaliser rapidement cette transformation sur des données numériques, c’est la Fast Fourier Transformation (FFT).

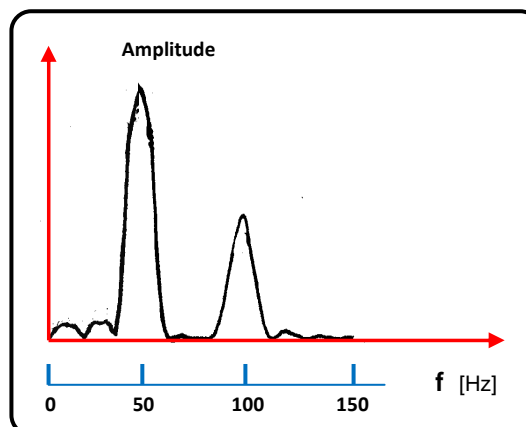


Figure 4.5 : Spectre correspondant à la fonction  $F(t)$

## 2. Généralisation

Les vibrations réelles sont infiniment complexes, constituées d'un grand nombre de composantes d'origines multiples et modulées par un grand nombre de paramètres. Néanmoins, ces vibrations complexes peuvent se ramener à la superposition de composantes élémentaires purement sinusoïdales représentées chacune par leur amplitude  $A_i$  et leur fréquence  $F_i$ . La transformée de Fourier est un des outils utilisés à cet effet. 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 sous une forme appelée FFT (**F**ast **F**ourier **T**ransform). Le spectre final contient l'ensemble des fréquences sinusoïdales (raies discrètes) constituant le signal vibratoire d'origine [figure 4.6].

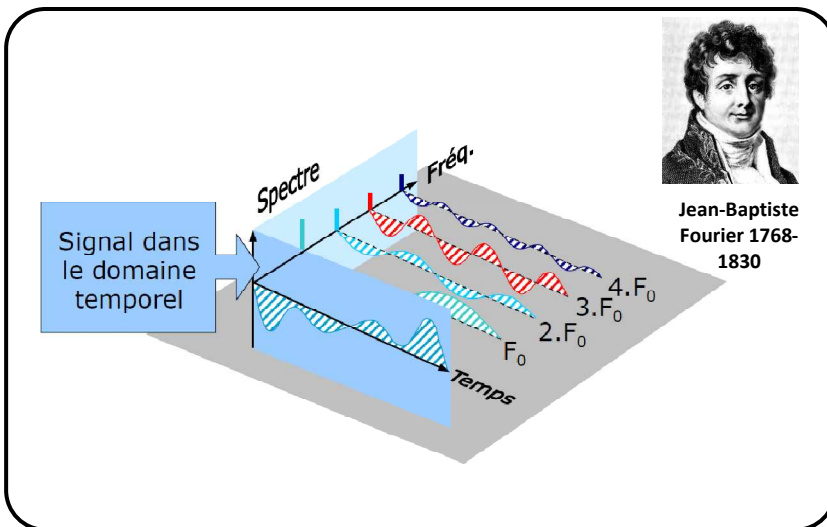


Figure 4.6 : Signal temporel et transformation en

## 3. Définition d'un spectre

Un **spectre** [figure 4.7] est un graphe dans lequel sont représentées les amplitudes et les fréquences de toutes les composantes vibratoires élémentaires induites par le fonctionnement d'une machine. Chaque composante est représentée par un segment vertical appelé **raie** dont l'abscisse représente la fréquence et l'ordonnée, l'amplitude.

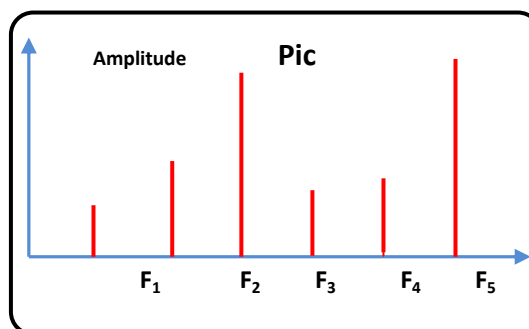


Figure 4.7 : Exemple de spectre

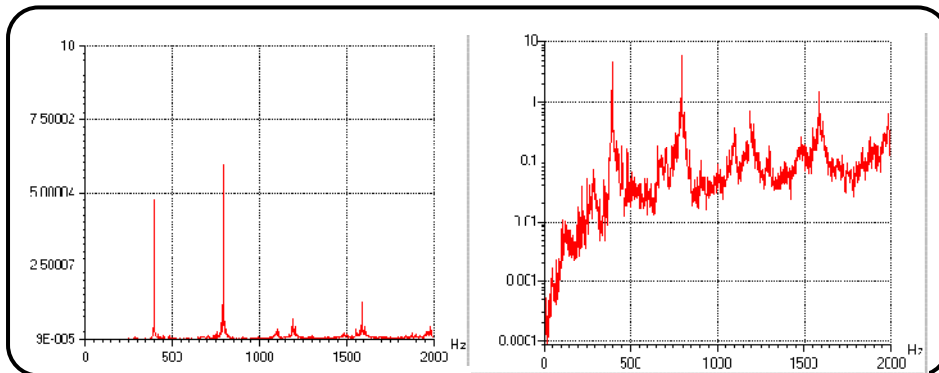
Notons que dans certains cas (raies confondues et dépassant largement du signal, ...) nous ne parlons plus de raie, mais de **pic**.

## 4. Représentation graphique d'un spectre

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 des amplitudes du signal. Ce type de représentation présente l'avantage de favoriser l'affichage des petites amplitudes et est donc recommandé. La figure 4.8 présente un spectre avec deux représentations en échelle linéaire et en échelle logarithmique de l'amplitude d'un signal vibratoire.

Figure 4.8

Représentation en échelle linéaire et en échelle logarithmique de l'amplitude d'un signal vibratoire



L'ordonnée en décibel montre des composantes de rapport d'amplitude très élevé.

$$L \text{ (en dB)} = 10 \log (A/A_0)^2 = 20 \log A/A_0 \quad \text{avec :}$$

- L est la valeur de la variation de la grandeur mesurée (A, V, D).
- A est la valeur de la grandeur mesurée en unité physique ;
- $A_R$  est une valeur de référence dans la même unité, qui peut être fixée conventionnellement par des normes.

Accélération (ISO R1683)	Vitesse vibratoire (ISO R1683)	Déplacement
$A_R=10^{-6} \text{ m.s}^{-2}$	$V_R=10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$	$D_R=10^{-6} \mu\text{m}$

### 5. Exemple

Sur le spectre associé au moto-compresseur de la figure 4.9, nous notons qu'un pic d'amplitude élevée dont la fréquence est de 50 Hz (3 000 tr/mn) correspond à la fréquence de rotation du moteur ou du premier arbre du multiplicateur; une augmentation notable de l'amplitude de cette composante traduirait une anomalie au niveau de cette ligne d'arbres, vraisemblablement un déséquilibre.

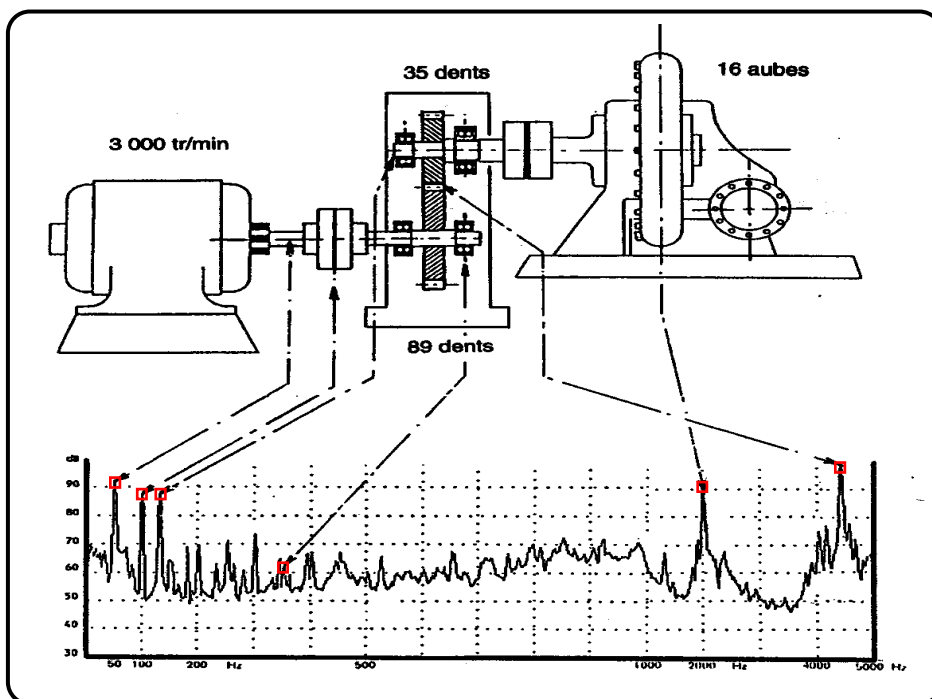


Figure 4.9 : spectre d'un moto-compresseur

De même, un pic à 100 Hz (2 fois la fréquence de rotation) est représentatif de l'état d'alignement de l'arbre du moteur; le pic à 4450 Hz correspond à la fréquence d'engrènement du multiplicateur (fréquence d'engrènement = nombre de dents x fréquence de rotation de l'arbre correspondant, soit  $89 \times 50$ ). L'analyse de cette composante et l'étude de son évolution permettront de statuer sur l'état de ce train d'engrenages.

## V. Transformées de signaux particuliers

### 1. Cas d'un signal sinusoïdal pur

Le spectre relatif à un signal sinusoïdal pur de période  $T$  présente une raie à la fréquence  $F=1/T$  [figure 4.8].

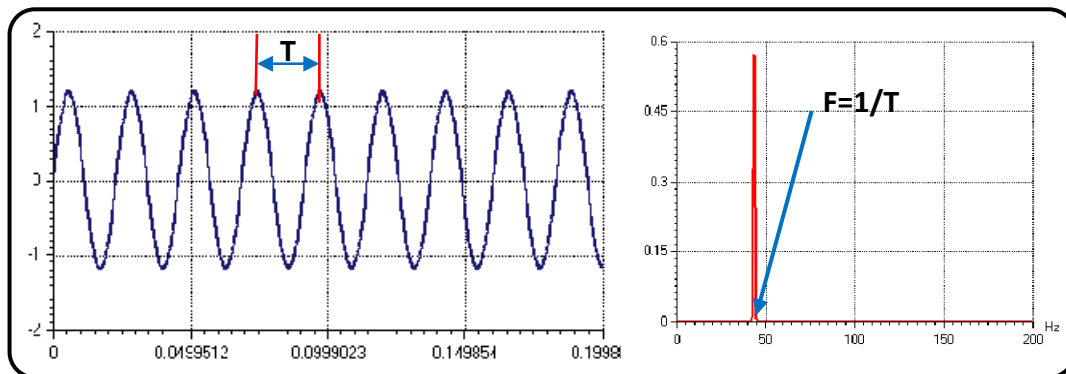


Figure 4.8 : Signal sinusoïdal pur et spectre correspondant

### 2. Spectre de chocs périodiques

Le spectre relatif à un choc périodique présente un peigne de raies à la fréquence du choc [figure 4.9].

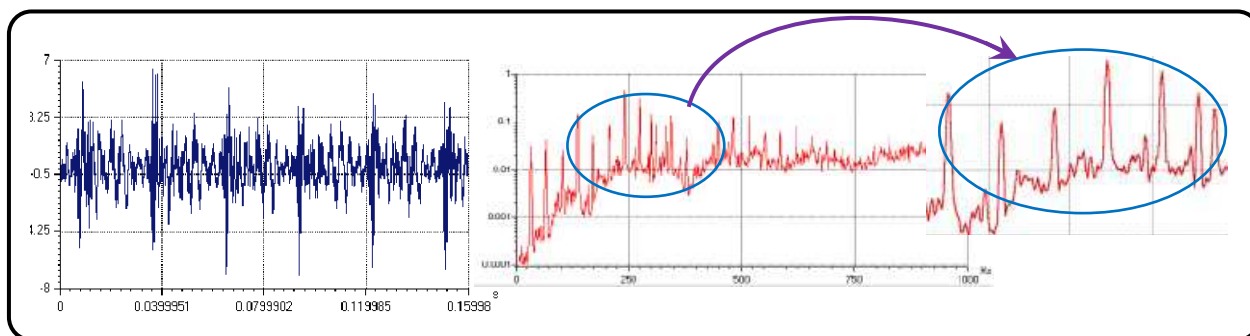


Figure 4.9 : Signal de type choc et spectre correspondant

### 3. Signal modulé en amplitude.

Sur les machines tournantes bien de défauts se traduisent par une modulation de l'amplitude du signal vibratoire (engrènement, roulements etc...). Le spectre présente un pic à la fréquence modulée (porteuse) avec des raies latérales espacées de la fréquence de modulation [figure 4.9].

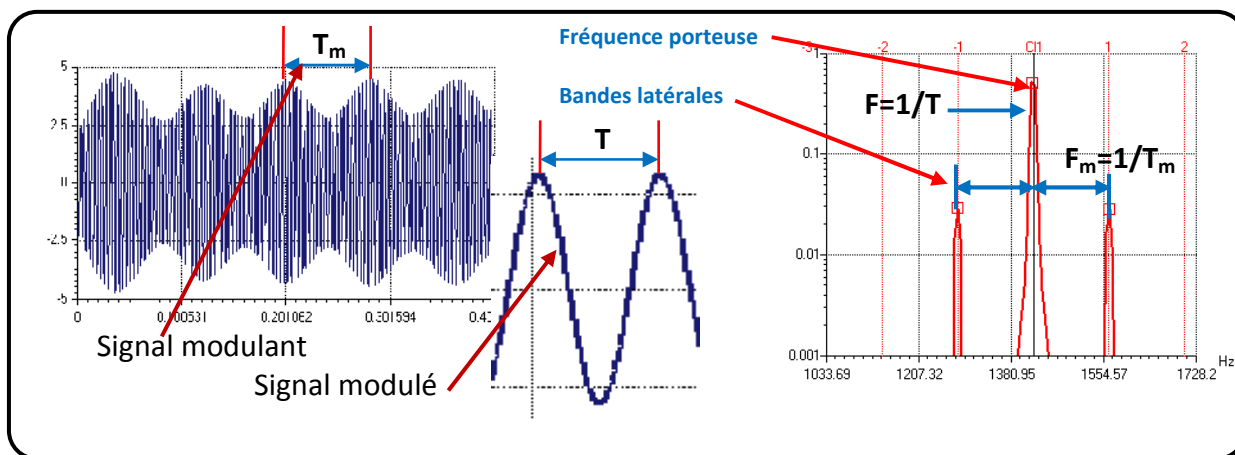


Figure 4.10 : Spectre correspondant à une modulation d'amplitude

## VI. Le cepstre

Le Cepstre est un outil mathématique qui permet la mise en évidence des périodicités dans un spectre en fréquence. Il résulte de la transformée de Fourier inverse d'un spectre de puissance. Le cepstre associe à une famille de raies harmoniques ou un ensemble de bandes latérales une raie unique dans sa représentation graphique. Il est utilisé pour le diagnostic des phénomènes de de chocs périodiques (desserrages, défauts de dentures, écaillage de roulements) et des phénomènes modulation en fréquence ou en amplitude. La figure 4.11 montre le spectre d'un choc du à une usure d'accouplement et le cepstre correspondant.

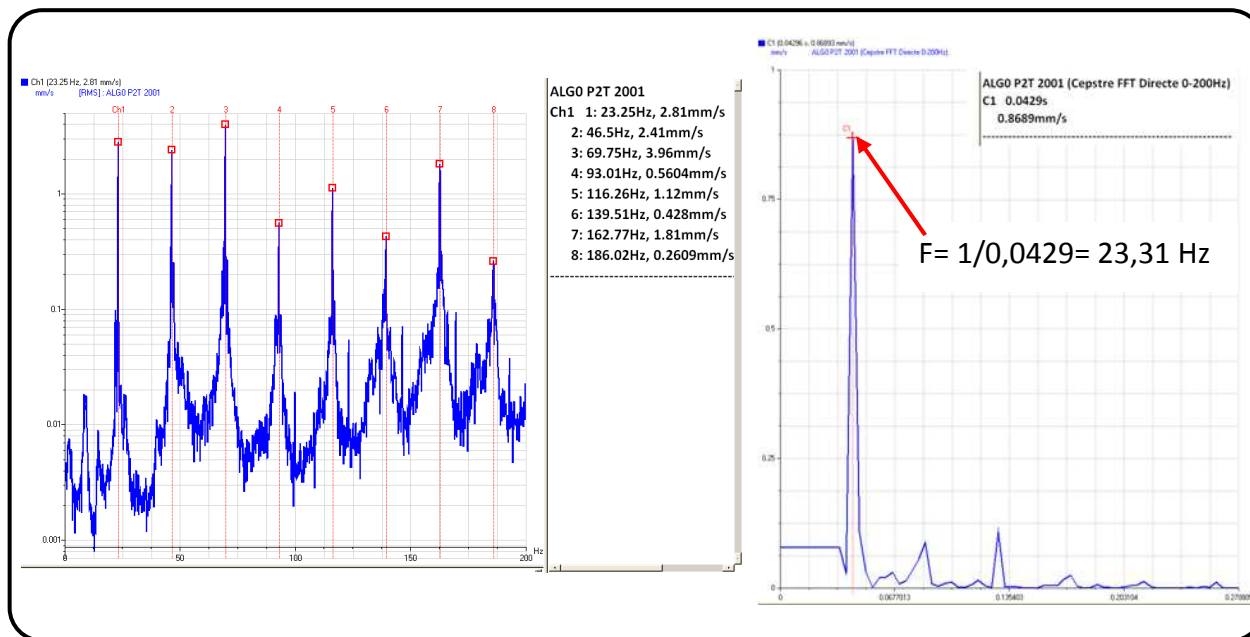


Figure 4.11 : spectre d'un choc du à une usure d'accouplement et le cepstre correspondant.