

Analyse vibratoire des machines tournantes

Origine des Vibrations

1. Les sources d'excitation

Introduction

Les sources d'excitation vibratoires dans les machines tournantes peuvent être classées en différentes catégories :

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

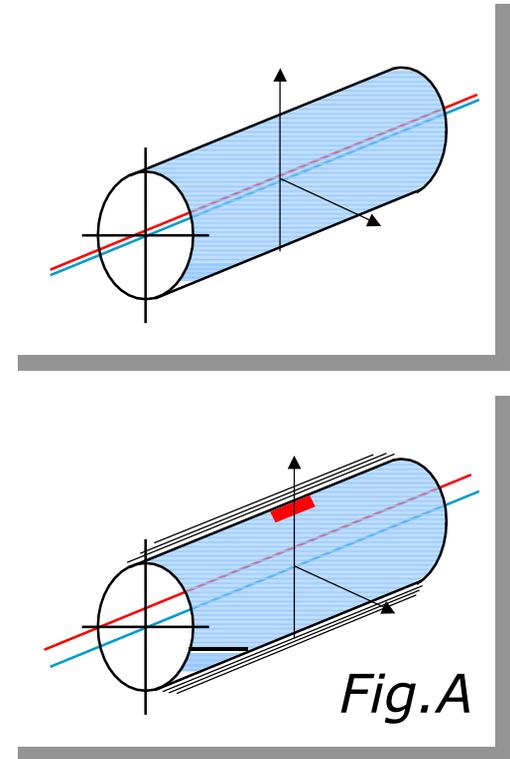
Les phénomènes à l'origine des vibrations dépendent de la constitution de la machine et de ses paramètres de fonctionnement. Les plus courants sont présentés dans ce chapitre ainsi que leurs manifestations typologiques afin de permettre leur identification et leur suivi dans le cadre d'un programme de maintenance conditionnelle.

2. Le Balourd

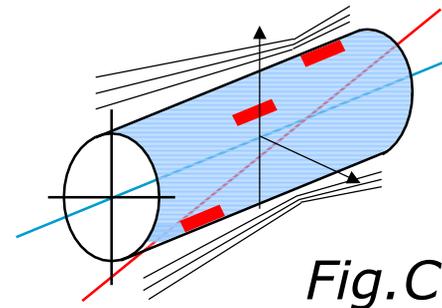
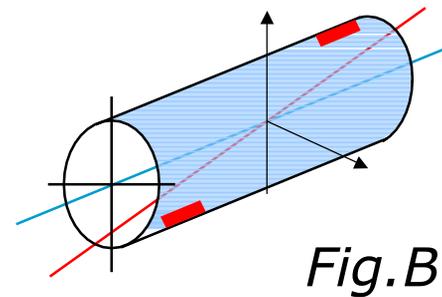
■ Le balourd mécanique : Définitions

Le phénomène de balourd mécanique est lié à une répartition non homogène de la masse autour de l'axe de rotation : L'axe d'inertie de l'arbre n'est pas confondu avec l'axe de rotation. Différents types de balourd peuvent être identifiés :

- ✓ **Balourd statique** : L'axe d'inertie de l'arbre est parallèle à l'axe de rotation (fig A).



- Le balourd mécanique : Définitions
 - ✓ **Balourd de couple** : L'axe d'inertie n'est plus colinéaire à l'axe de rotation, les deux axes formant un angle (fig B).
 - ✓ **Balourd dynamique** : Il s'agit d'une combinaison des deux premiers et correspond au cas le plus courant (fig.C).



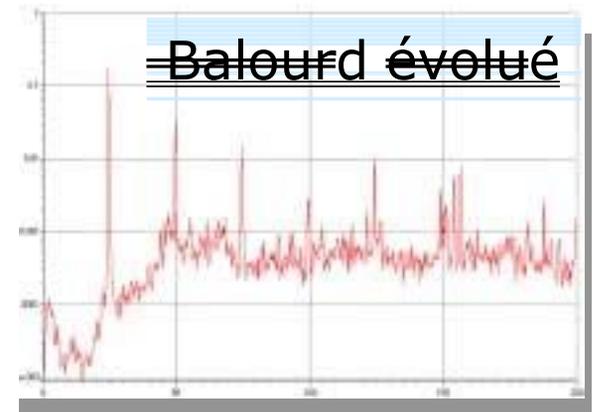
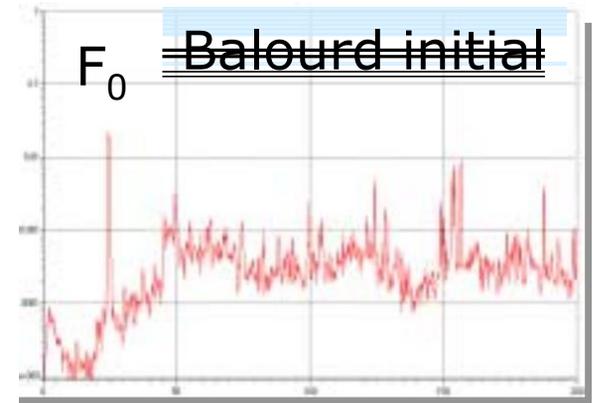
■ Typologie du balourd

Le balourd se manifeste par une énergie vibratoire localisée :

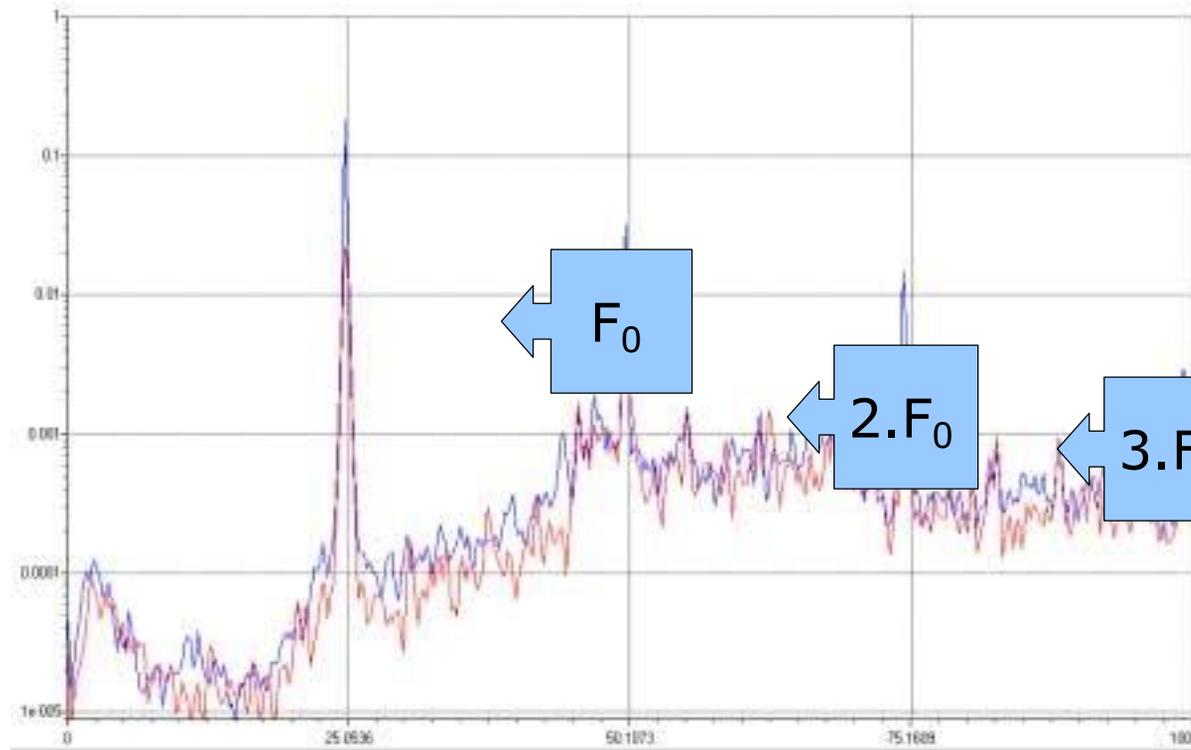
- ✓ A la fréquence de rotation F_0
- ✓ Aux fréquences des harmoniques $2F_0, 3F_0, \dots$

Il existe toujours un balourd résiduel sur une machine tournante.

L'évolution du balourd se manifeste par une augmentation de la raie à F_0 et des harmoniques $2F_0, 3F_0, \dots$



- Typologie du balourd : Spectres superposés



Typologie du balourd : Ambiguïtés de diagnostic

D'autres phénomènes sont susceptibles de générer de l'énergie à la fréquence de rotation F_0 sans pour autant être liés à un déséquilibre de masse :

- ✓ Jeux de paliers trop importants
- ✓ Chocs périodiques à la rotation (problème de fixation)
- ✓ Défaut rotorique sur un moteur asynchrone (barres, anneau)
- ✓ Déformation d'un rotor (effet thermique)
- ✓ Résonance de structure

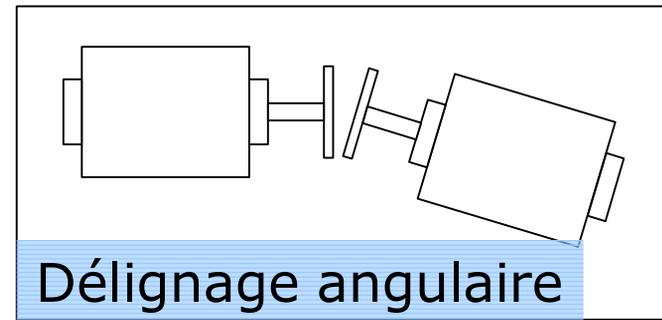
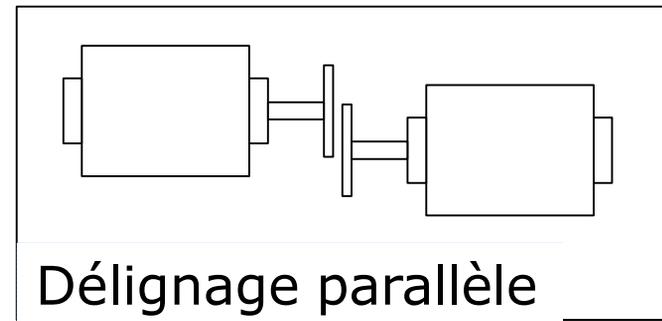
Les problèmes vibratoires engendrés par ce type de défaut ne seront donc pas corrigés par l'équilibrage de la machine.

3. Le Délignage

■ Le délignage ou défaut de lignage

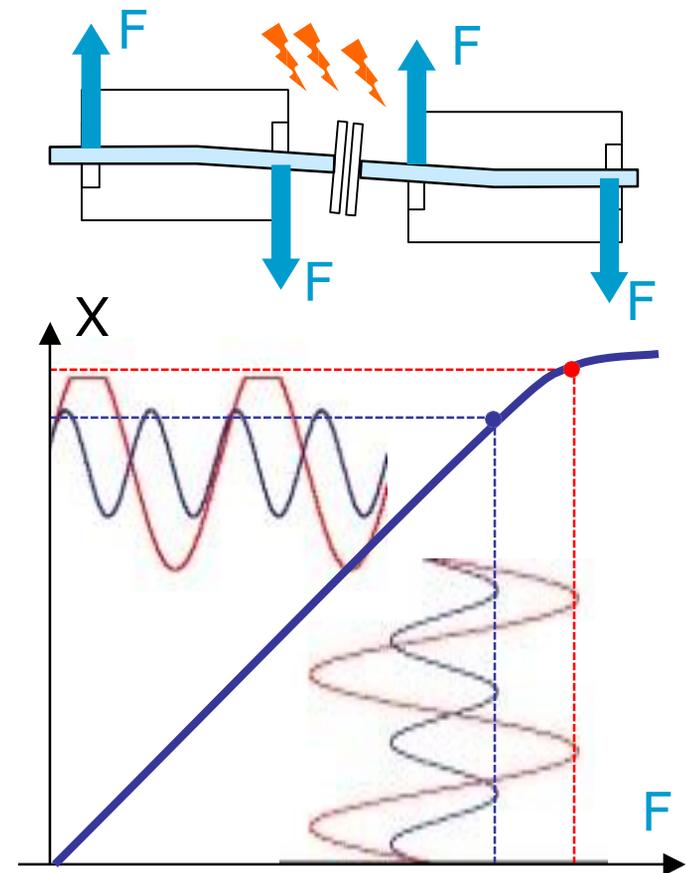
Le défaut de lignage est dû à la non coïncidence des axes de rotation de 2 machines accouplées. Selon les positions géométriques des deux axes, on distingue 3 types de délignage :

- ✓ **Délignage parallèle** : Défaut de concentricité des deux arbres
- ✓ **Délignage angulaire** : Défaut de parallélisme des deux arbres
- ✓ **Délignage angulaire et parallèle** : Combinaison des deux précédents



- Les conséquences du délignage

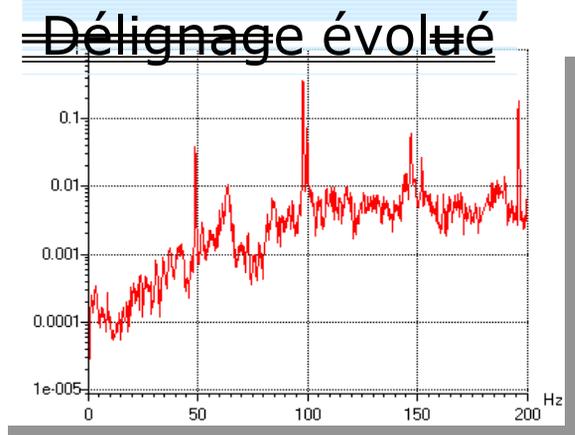
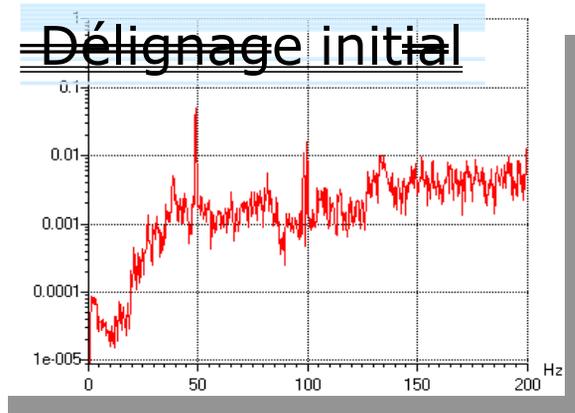
Le défaut de lignage crée des contraintes internes au niveau des arbres et des paliers des machines accouplées. La contrainte exercée au niveau du palier génère une non-linéarité de raideur de ce dernier. Le déplacement occasionné par la force excitatrice s'en trouve écrêté, entraînant l'apparition de composantes harmoniques de la fréquence de rotation.



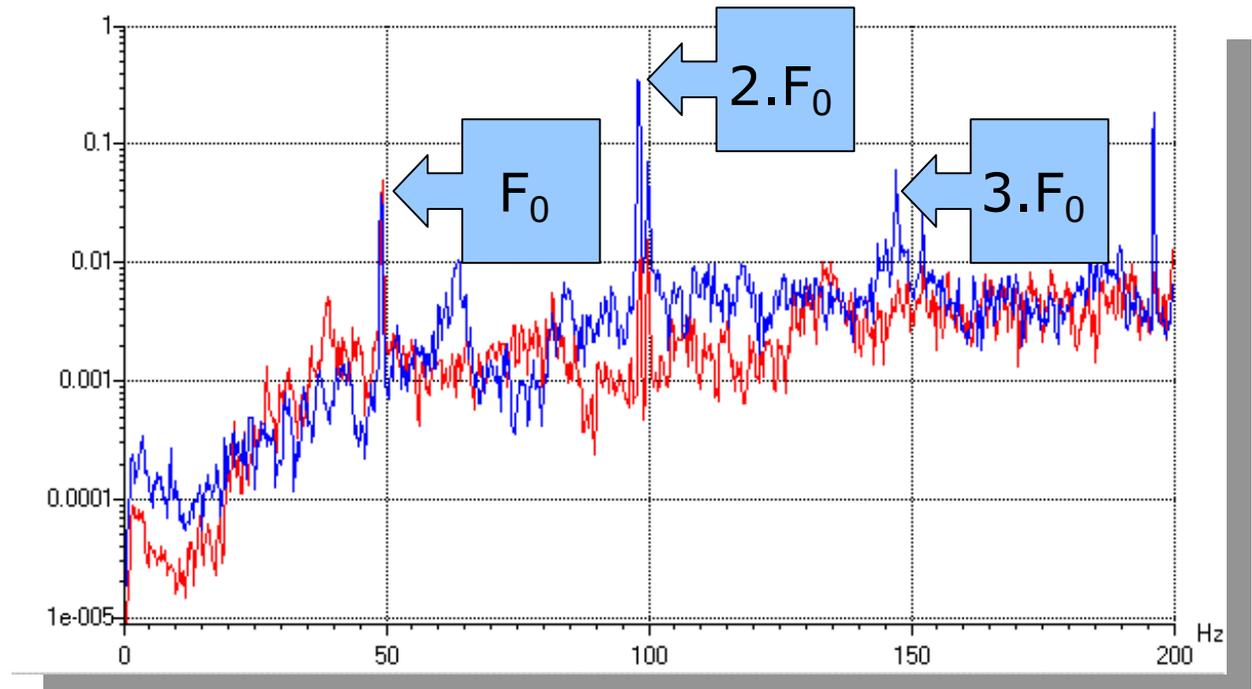
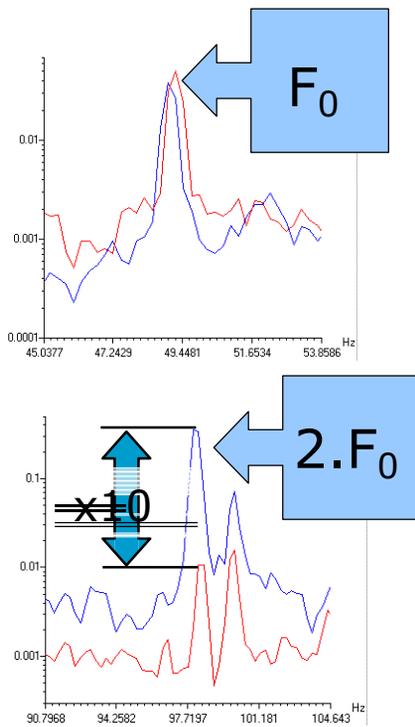
■ Typologie du délignage

Il se manifeste par une énergie vibratoire localisée à $2.F_0$, $3.F_0$ ou $4.F_0$ dans toutes les directions de mesurages.

L'évolution du défaut de lignage entraîne l'augmentation des raies caractéristiques.



■ Typologie du délignage : Spectres superposés



Origines du délignage et ambiguïtés de diagnostic

Le défaut de lignage peut n'apparaître qu'en fonctionnement, sous l'effet de la charge. Les causes peuvent être :

- ✓ Déformation du stator
- ✓ Efforts dissymétriques sur le rotor
- ✓ Calage du rotor (machine à paliers lisses)
- ✓ Déformation de la structure porteuse
- ✓ Blocage d'accouplement

D'autres phénomènes peuvent donner lieu à des manifestations vibratoires similaires :

- ✓ Balourd important
- ✓ Chocs périodiques à la fréquence de rotation

4. Les chocs périodiques

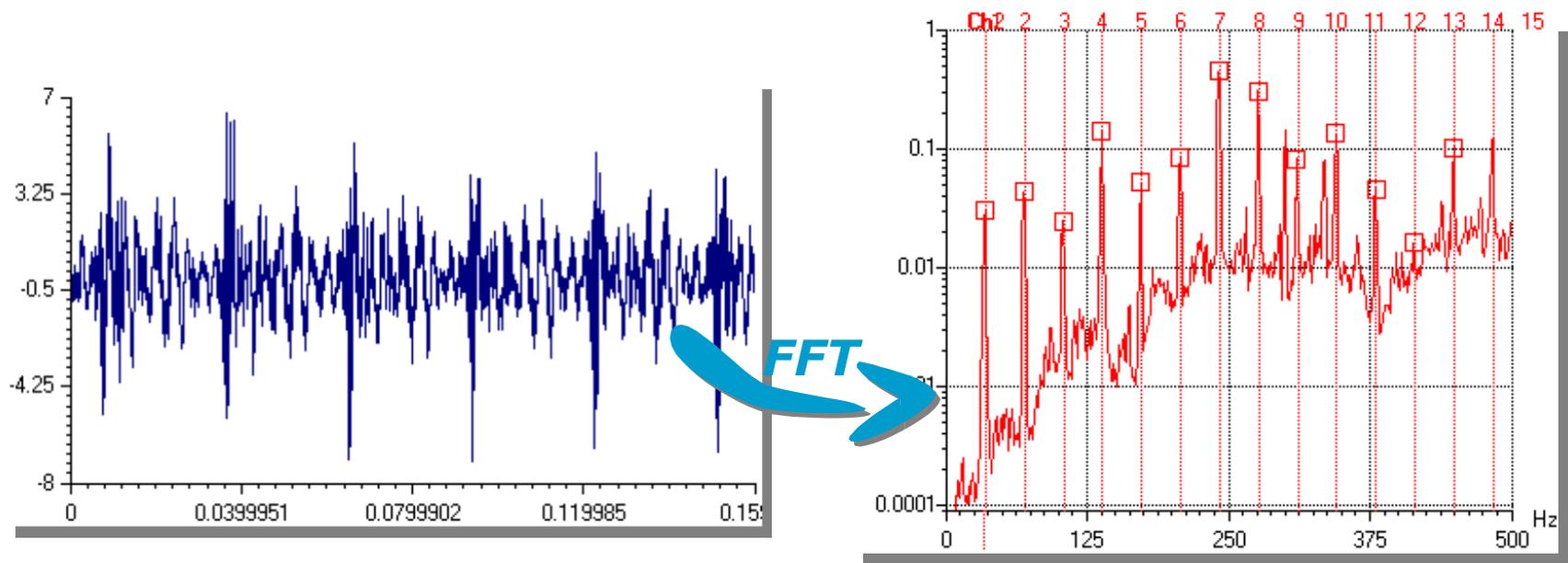
■ Chocs périodiques (chocs à la rotation)

Les chocs périodiques peuvent être internes ou externes à la machine :

- ✓ Origine des chocs périodiques externes :
 - Défaut de fixation
 - D'une autre machine (alternative, presse,...)
- ✓ Origine des chocs périodiques internes
 - Dégradation de roulement
 - Dégradation d'engrènements
 - Jeux excessifs

■ Typologie des chocs périodiques

La manifestation spectrale d'un phénomène de chocs périodiques est un **peigne de raies**.



Ambiguïtés de diagnostic

Un peigne de raies peut être généré par des phénomènes autres que les chocs périodiques :

- ✓ Balourd important
- ✓ Fort délignage
- ✓ Phénomènes de modulation
- ✓ Amplification par une résonance

La détermination de l'origine exacte de l'allure du spectre constatée (peigne de raies) est souvent délicate.

5. Les phénomènes magnétiques

Le moteur asynchrone : Origine des défauts vibratoires
Outre les problèmes inhérents aux machines tournantes classiques, on trouve des défauts dus à une perturbation du champ magnétique :

- ✓ Causede par des variations de courant :
 - Au niveau du stator : Enroulement, alimentation (défaut stationnaire)
 - Au niveau du rotor : Barres, anneau (défaut tournant)
- ✓ Causede par une variation d'entrefer stator / rotor
 - Due à un défaut du stator : Excentricité statique d'entrefer (défaut stationnaire)
 - Due à un défaut du rotor : Excentricité dynamique d'entrefer (défaut tournant)

Le moteur asynchrone : Les défauts stationnaires

On peut donc classer les défauts magnétiques en deux familles :

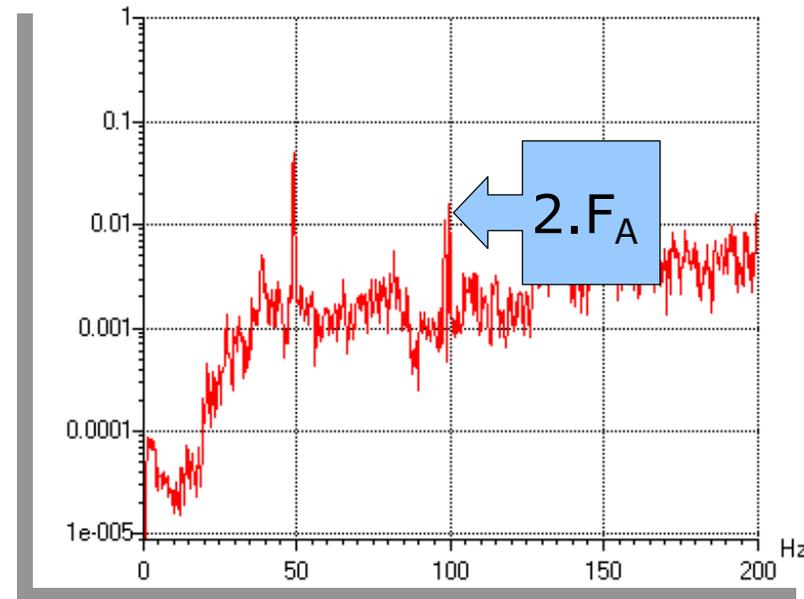
✓ Les défauts stationnaires
(liés au stator)

Dus à une variation de courant

- Déséquilibre de phases
- Spires en court-circuit
- Défaut d'isolement.

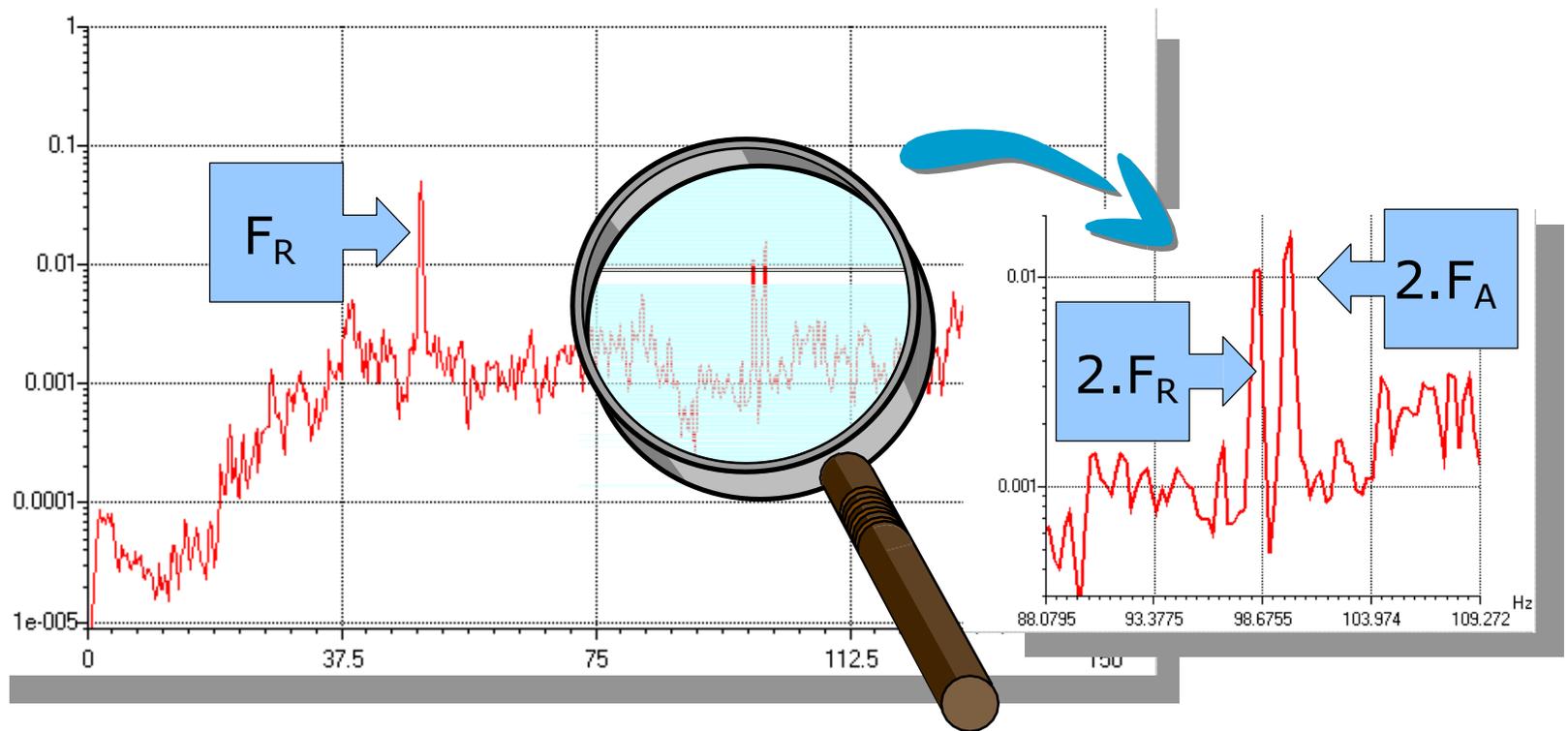
Dus à une variation d'entrefer

- Déformation du stator
- Jeu de paliers excessif



La typologie des défauts stationnaires est une raie à $2.F_A$ (100Hz)

Le moteur asynchrone : Typologie des défauts stationnaires



Le moteur asynchrone : Les défauts stationnaires En pratique, il existe toujours une excentricité statique d'entrefer et la raie à $2.F_A$ est toujours présente, quelque soit l'état de la machine.

Il convient donc de fonder le diagnostic sur l'évolution de l'amplitude de la raie et non pas sur l'existence de cette composante.

Le moteur asynchrone : Les défauts tournants

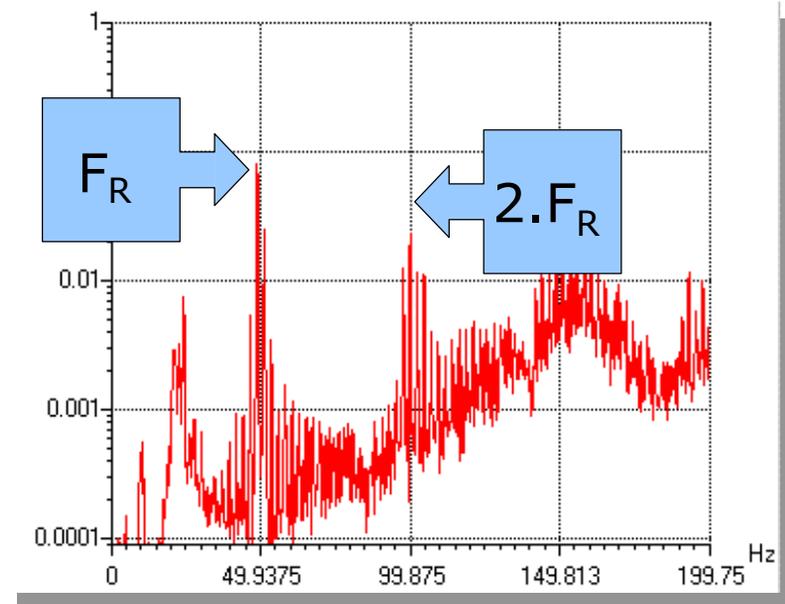
✓ Les défauts tournants (liés au rotor)

Dus à une variation de courant

- Barres rotoriques fissurées ou cassées
- Liaison barre / anneau résistive
- Tôles rotor en court-circuit
- Anneau de court-circuit cassé ou fissuré

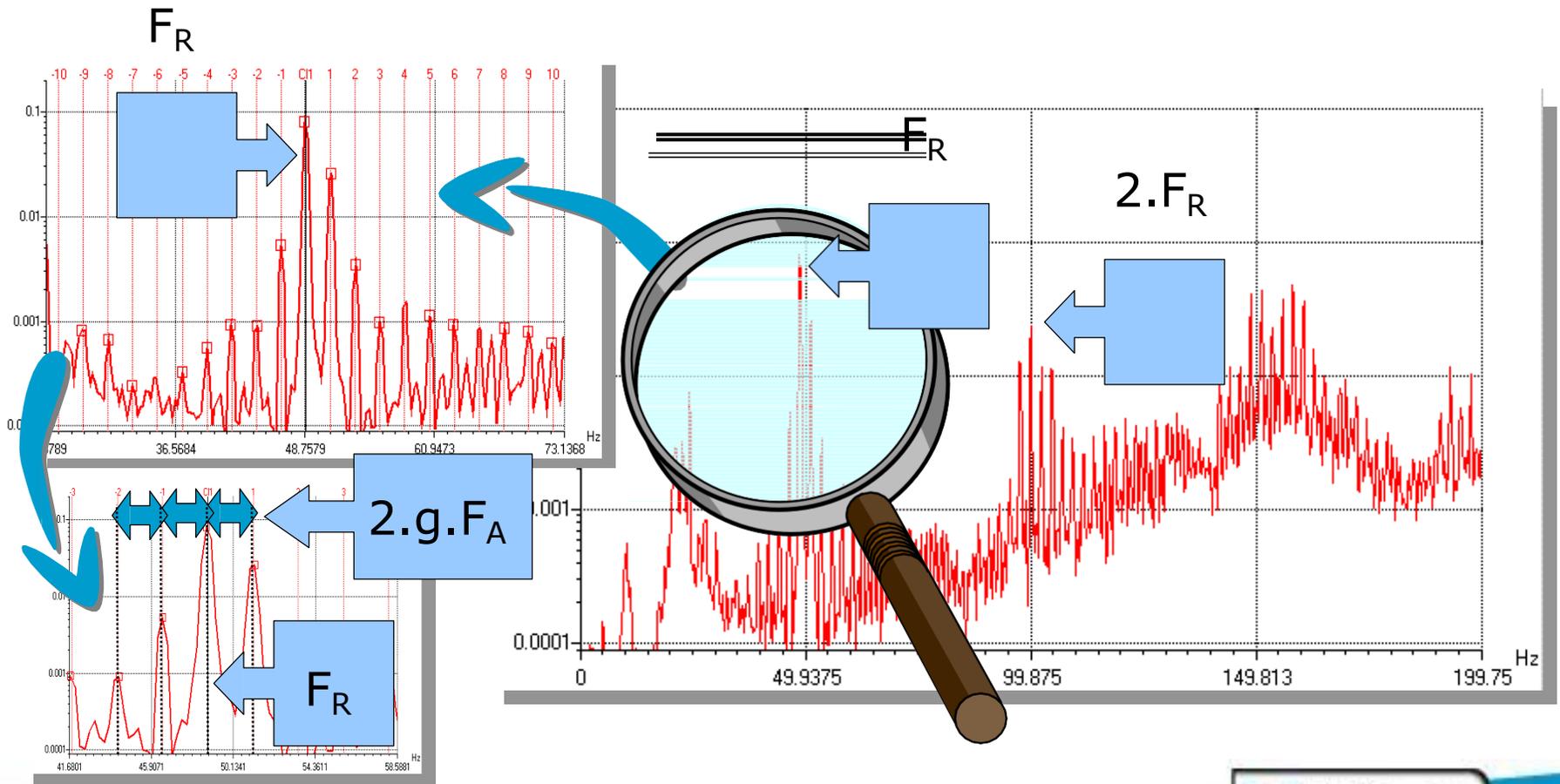
Dus à une variation d'entrefer

- Ovalisation / cintrage du rotor



La typologie des défauts tournants est une modulation d'amplitude ou de fréquence de F_R par $2.g.F_A$

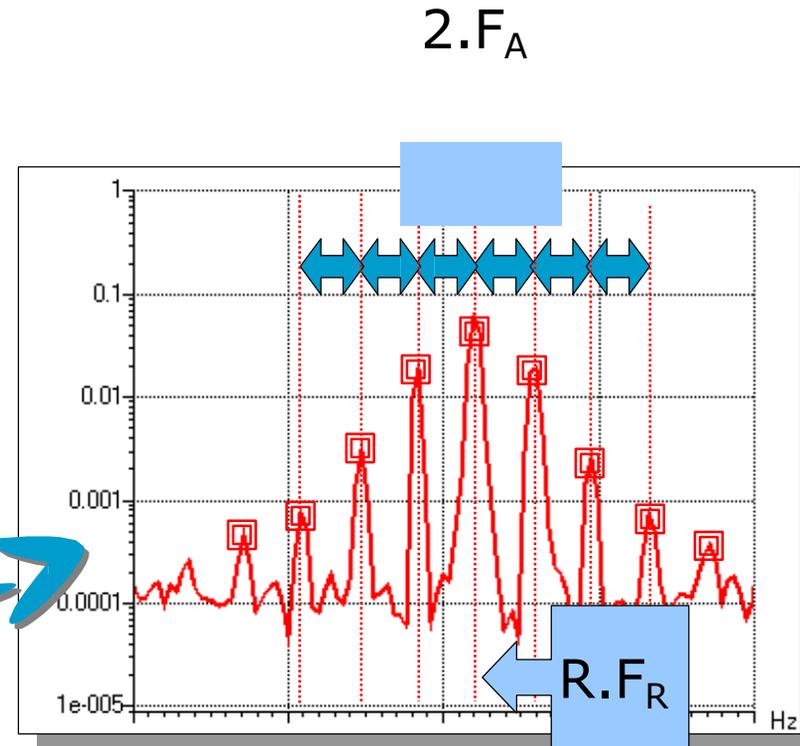
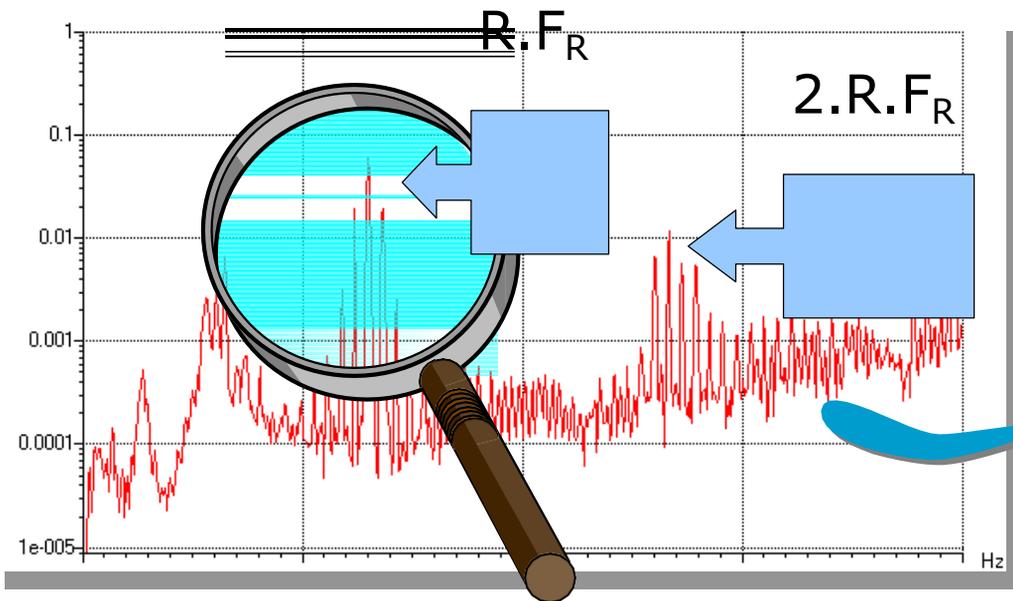
Le moteur asynchrone : Typologie des défauts tournants





Les fréquences principales d'encoches

Les fréquences principales d'encoches correspondent donc à un peigne de raies de modulation écartées de $2.F_A$ autour de $R.F_R$, $2.R.F_R$, $3.R.F_R, \dots$



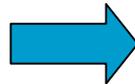
6. Les Engrenages

Généralités

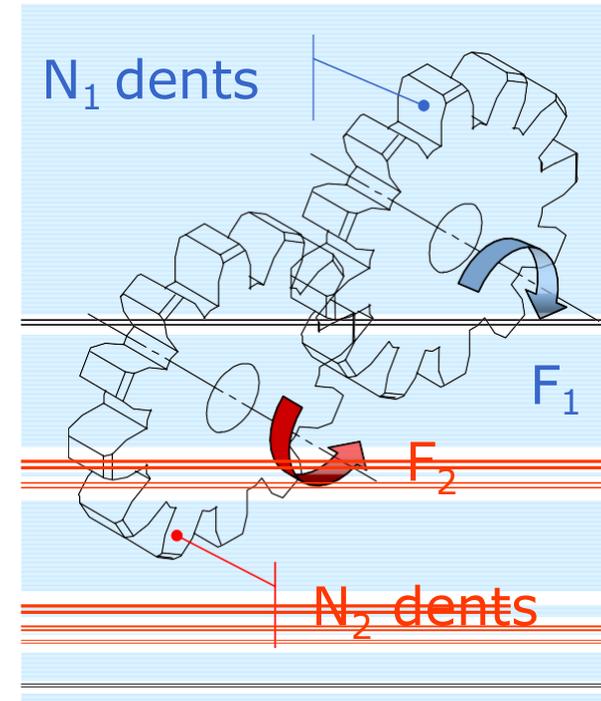
Les engrenages permettent la transmission d'un couple avec ou sans réduction de vitesse.

Le rapport des vitesses des deux arbres est lié au nombre de dents de chacun des pignons en contact :

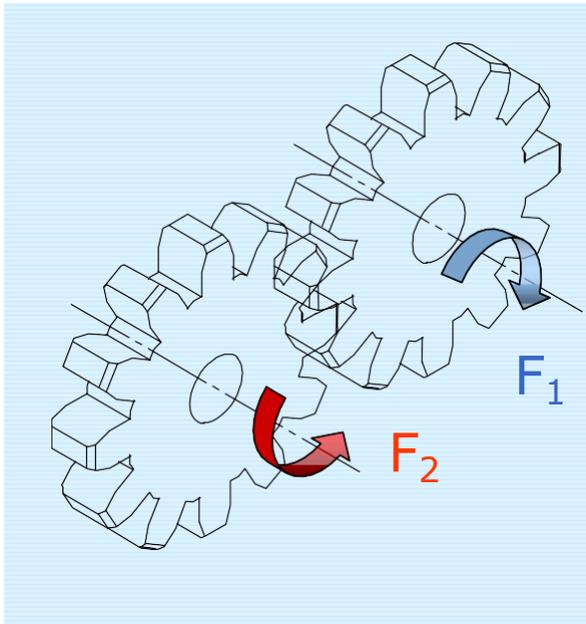
$$N_1 \cdot F_1 = N_2 \cdot F_2$$



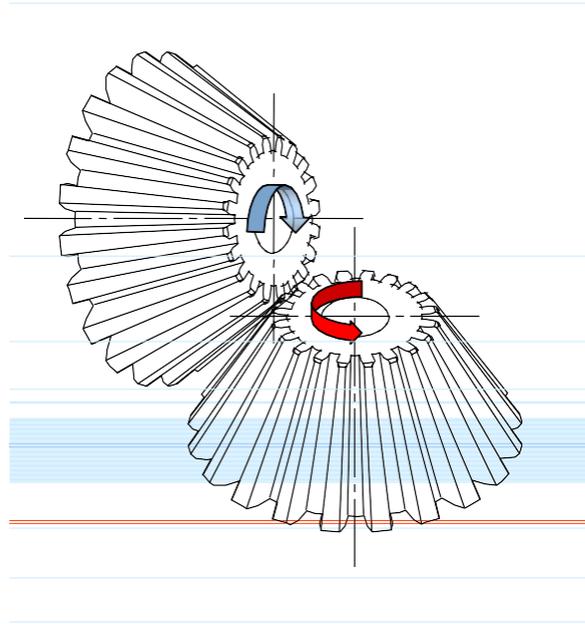
$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{N_1}{N_2}$$



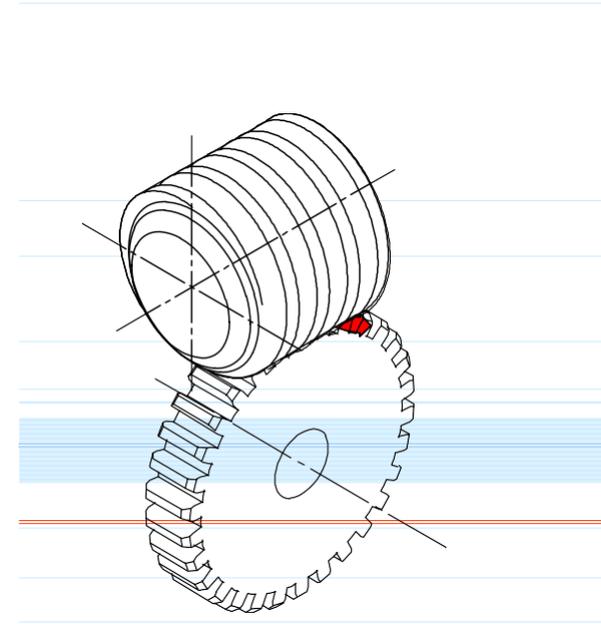
Les différentes classes d'engrenages



Engrenage parallèle



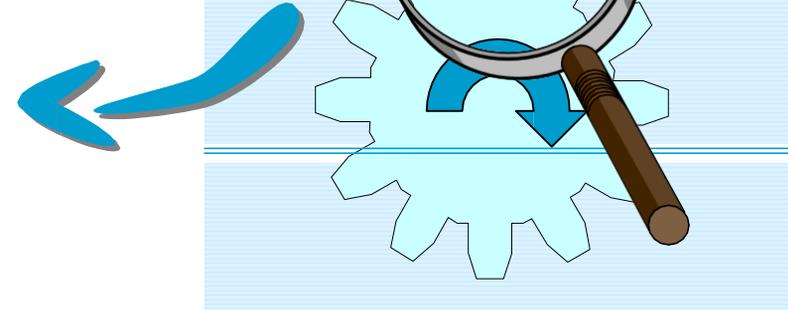
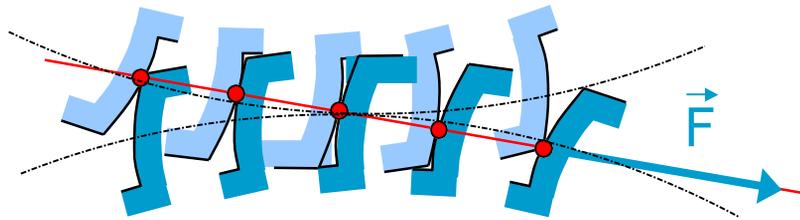
Engrenage
concourant



Engrenage gauche

Principe de l'engrènement

Le profil des dents est déterminé afin de conserver à la poussée une intensité et une direction constantes.



- Les différents types de dentures
- ✓ Les dentures **hélicoïdales** permettent une meilleure continuité de l'entraînement d'une dent à la suivante, mais génèrent une composante axiale sur les arbres.
- ✓ Les **dentures à chevrons** permettent l'élimination de la poussée axiale mais sont plus exigeants en termes de montage.

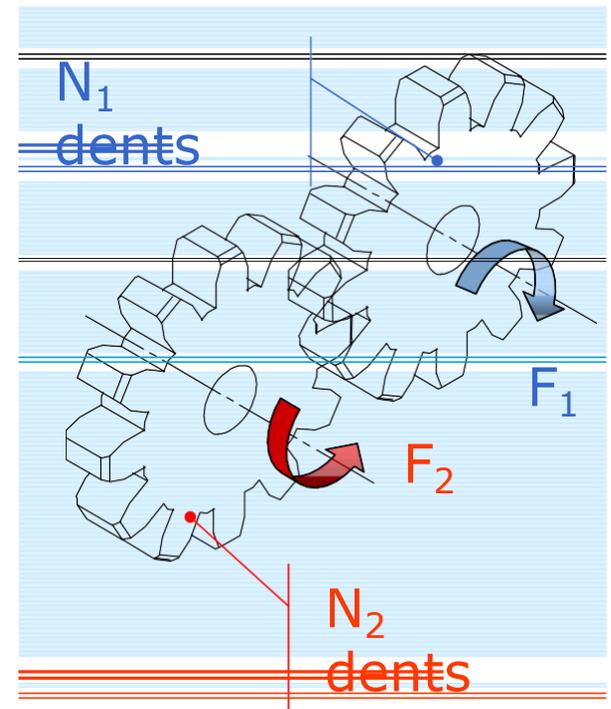


- Fréquence d'engrènement
- ✓ La **fréquence d'engrènement** de denture F_E est égale à :

$$F_E = N_1 \cdot F_1 = N_2 \cdot F_2$$

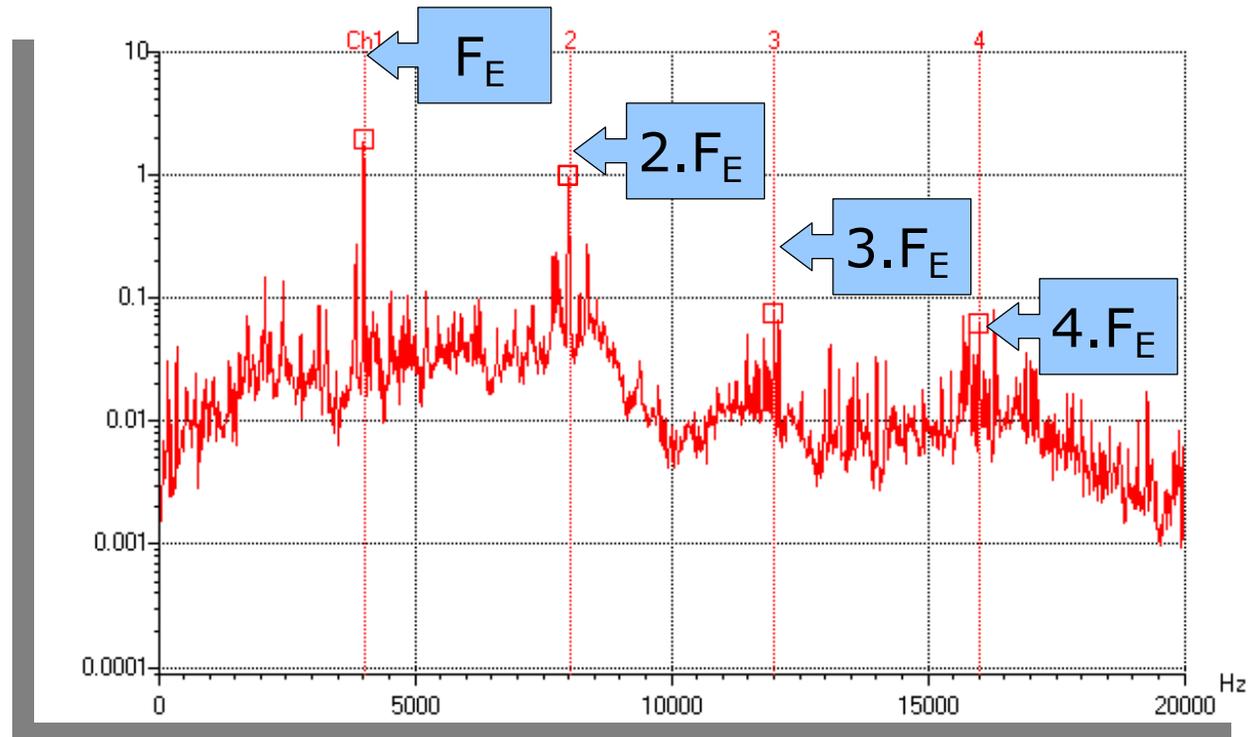
Elle correspond au **rythme d'engagement** des dents.

L'amplitude vibratoire de la raie d'engrènement F_E est très dépendante de la charge de la machine puisque l'engrènement assure la transmission du couple.



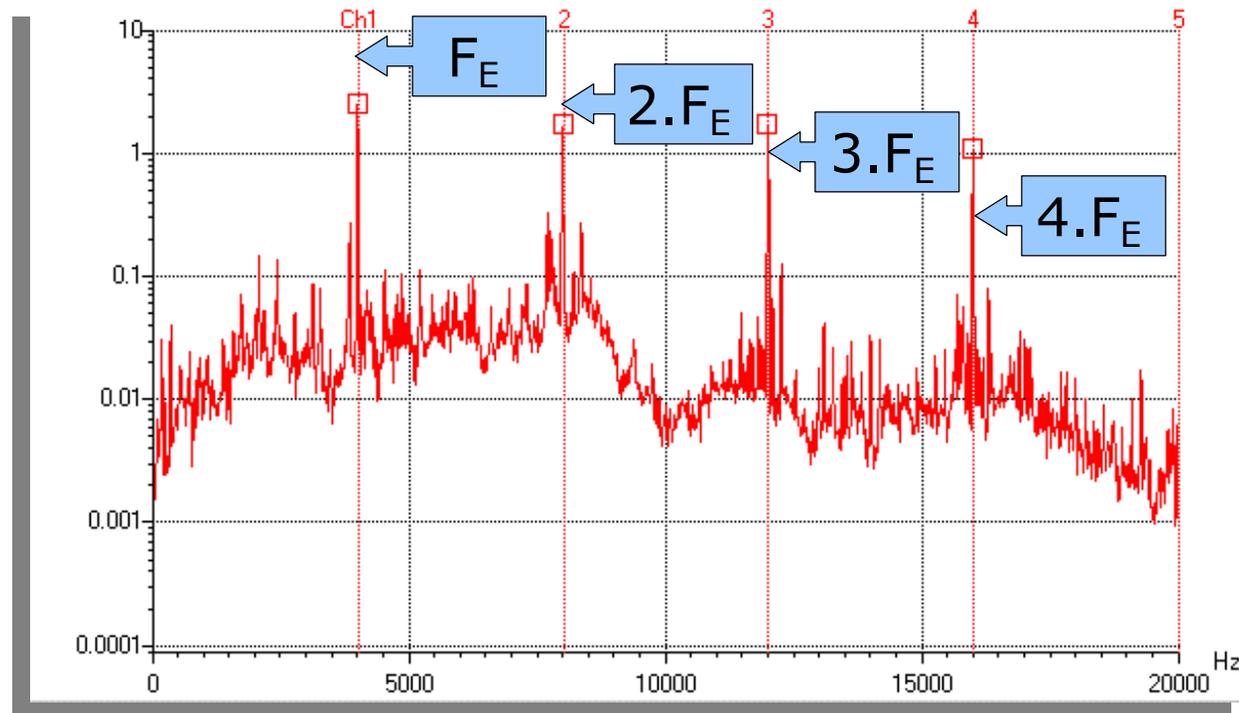
Spectre typologique initial

En l'absence de défaut, on retrouve dans le spectre vibratoire la fréquence d'engrènement F_E et ses harmoniques $2.F_E$, $3.F_E$



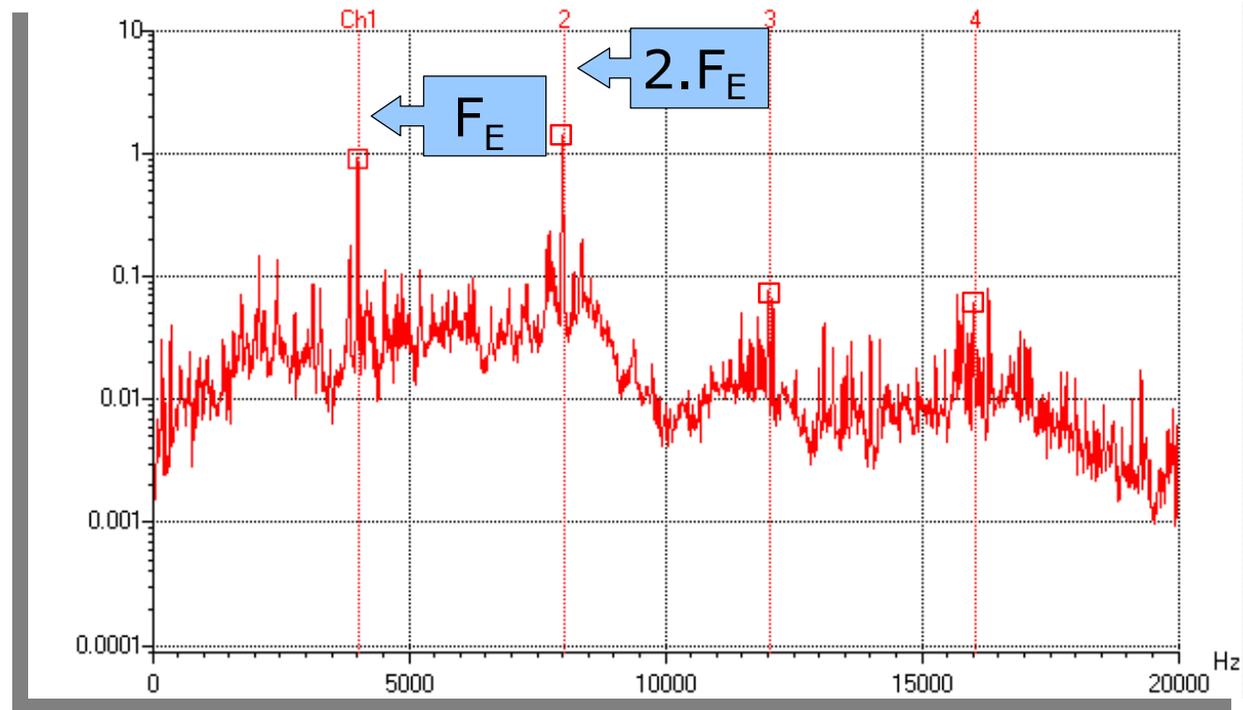
Usure généralisée de la denture

L'usure générale de la denture se traduit par un **matage** du profil des dents. On obtient un **choc périodique « mou »** à la fréquence d'engrènement, qui génère un peigne de raies **d'amplitudes décroissantes**.



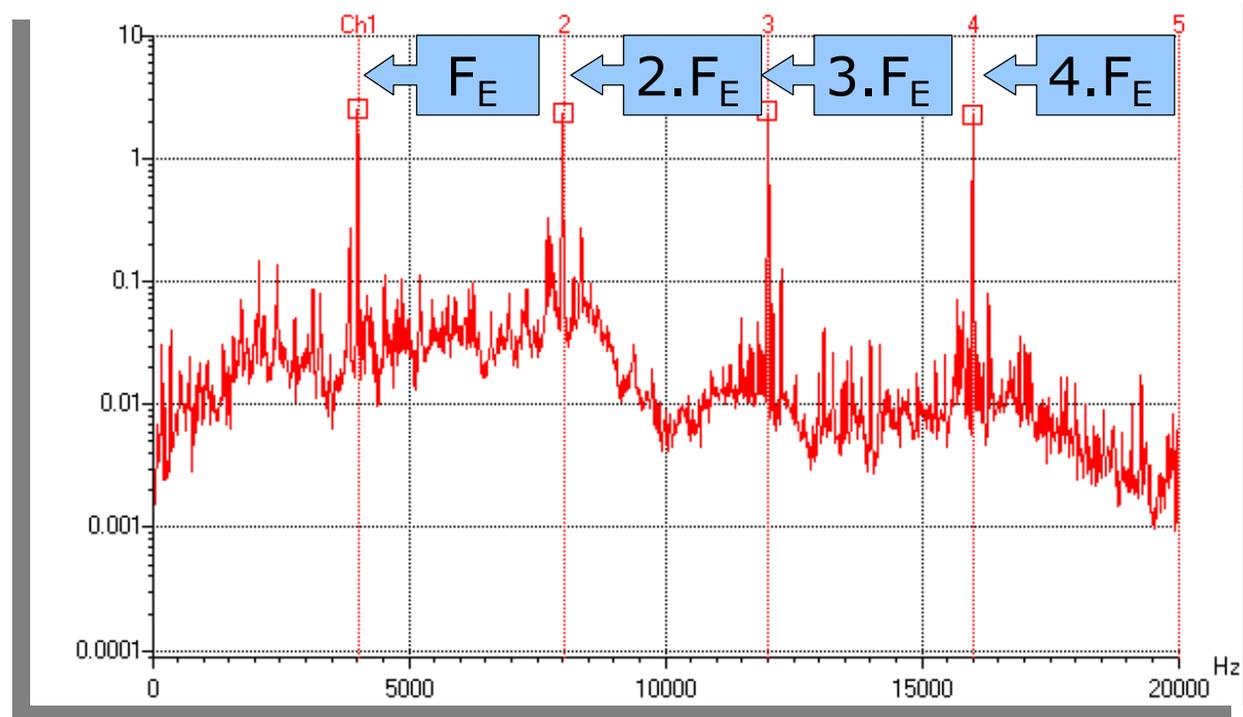
Jeu de denture insuffisant

Si le jeu de fond de denture est insuffisant, il se produit un effort à l'engagement et au déengagement des dents : La raie à $2.F_E$ augmente et devient parfois prépondérante.



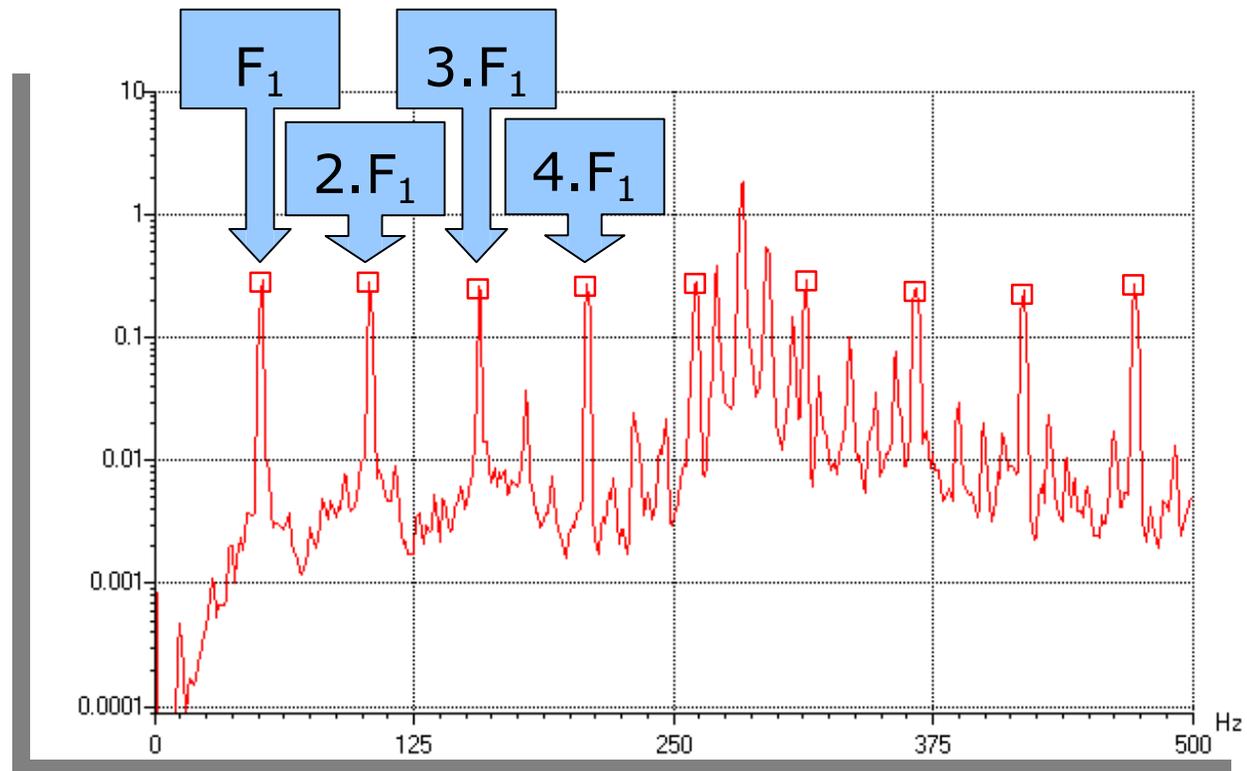
Jeu de denture excessif

Un jeu de fond de denture trop important génère un **choc périodique** « dur » à la fréquence d'engrènement (rattrapage du jeu), qui produit un **peigne de raies d'amplitudes proches**.



Une dent détériorée sur un pignon

Le passage de la dent détériorée provoque un choc « dur » à chaque tour. Le spectre résultant est un peigne de raies harmoniques de la fréquence de rotation F_1 du pignon incriminé.



■ Une dent détériorée sur chaque pignon

Un choc « dur » est généré :

- ✓ A chaque passage de la dent du pignon 1
- ✓ A chaque passage de la dent du pignon 2
- ✓ A chaque rencontre des 2 dents détériorées

Le spectre résultant est composé de :

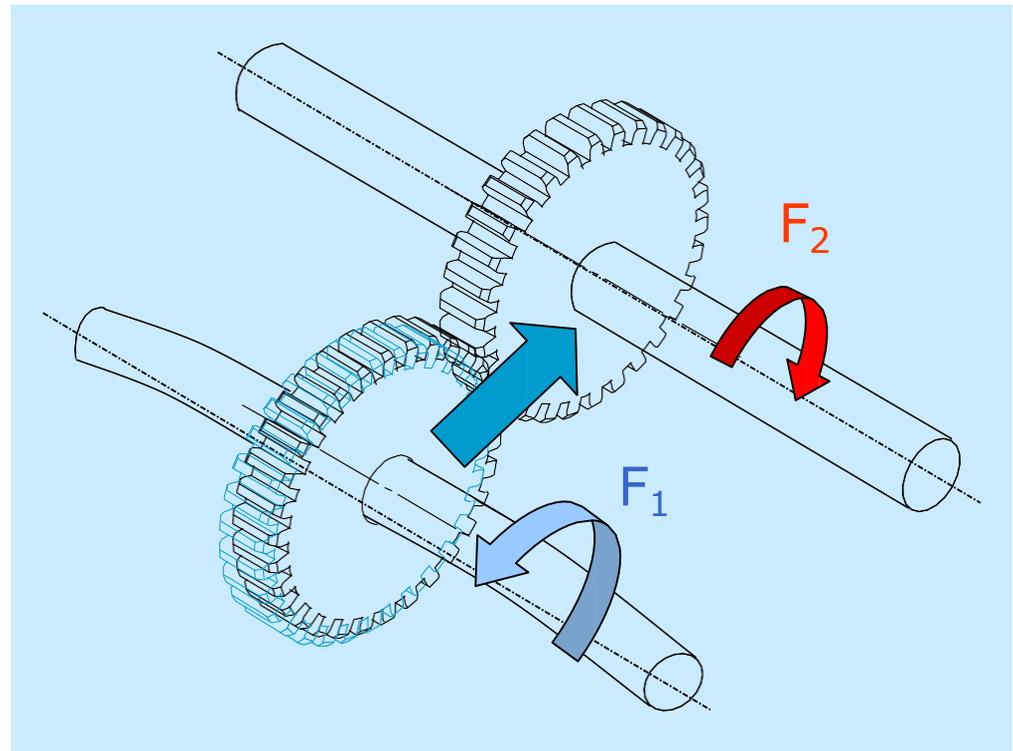
- ✓ Un peigne de raies harmoniques de la fréquence de rotation F_1
- ✓ Un peigne de raies harmoniques de la fréquence de rotation F_2
- ✓ Un peigne de raies harmoniques de la **fréquence de coïncidence F_C** définie par :

$$F_C = \frac{F_E}{N_C} \quad \text{avec } N_C = \text{ppcm de } N_1 \text{ et } N_2$$

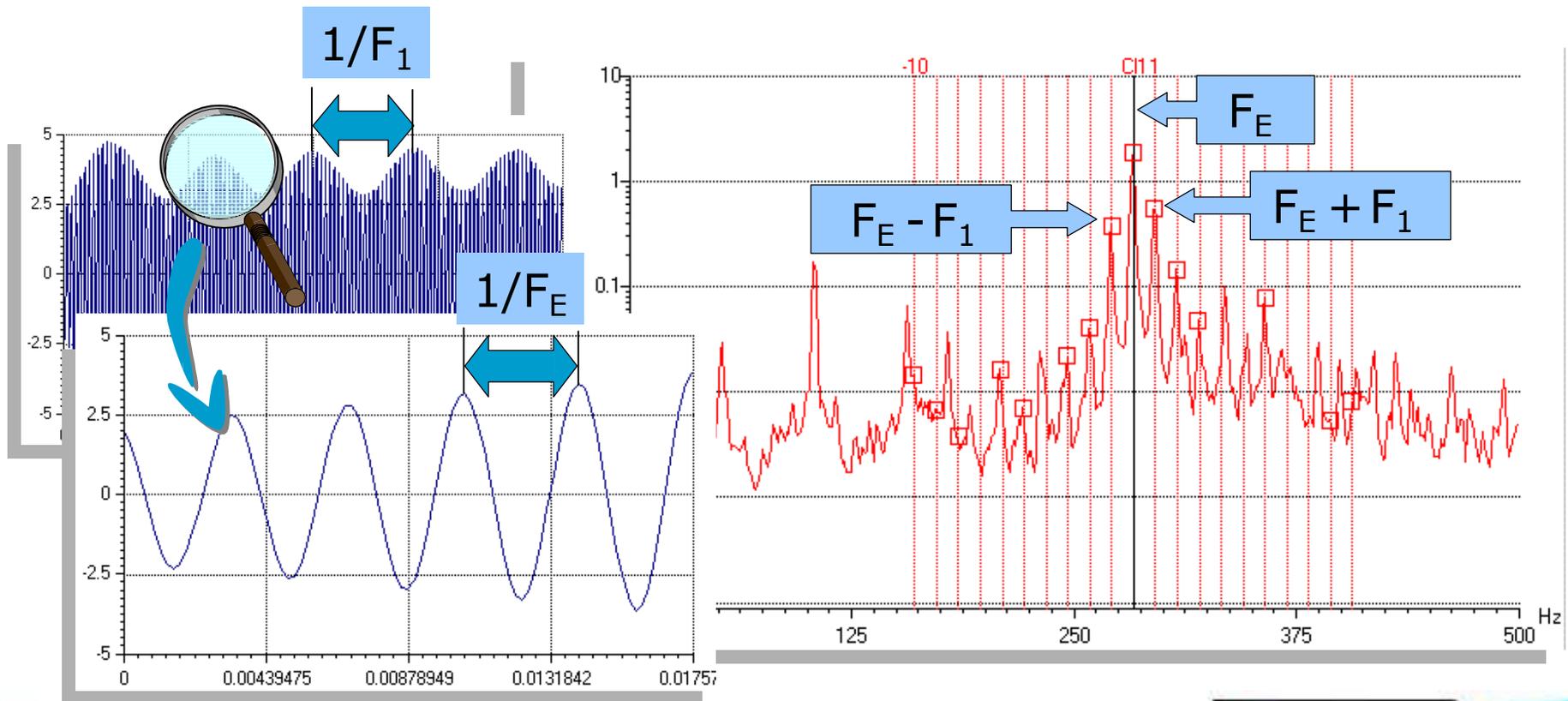
- Arbre support pignon cintré (faux rond)

La pression au niveau de la denture est modulée à la fréquence F_1 de rotation de l'arbre cintré.

Le spectre correspondant présente des bandes latérales autour de F_E espacées de F_1 .



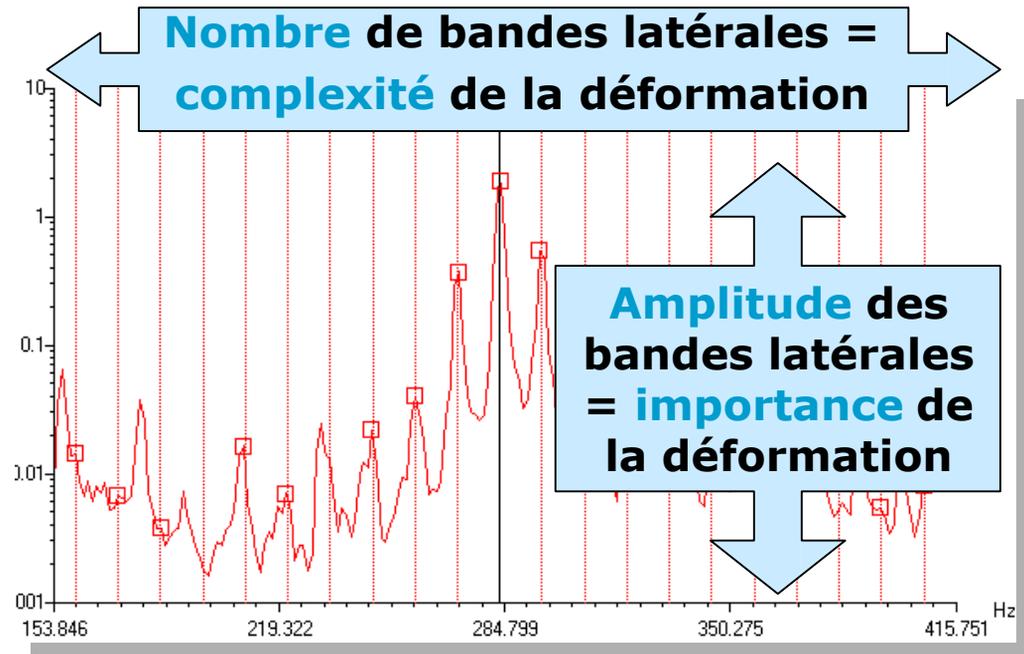
■ Arbre support pignon cintré



- Déformation complexe de l'arbre

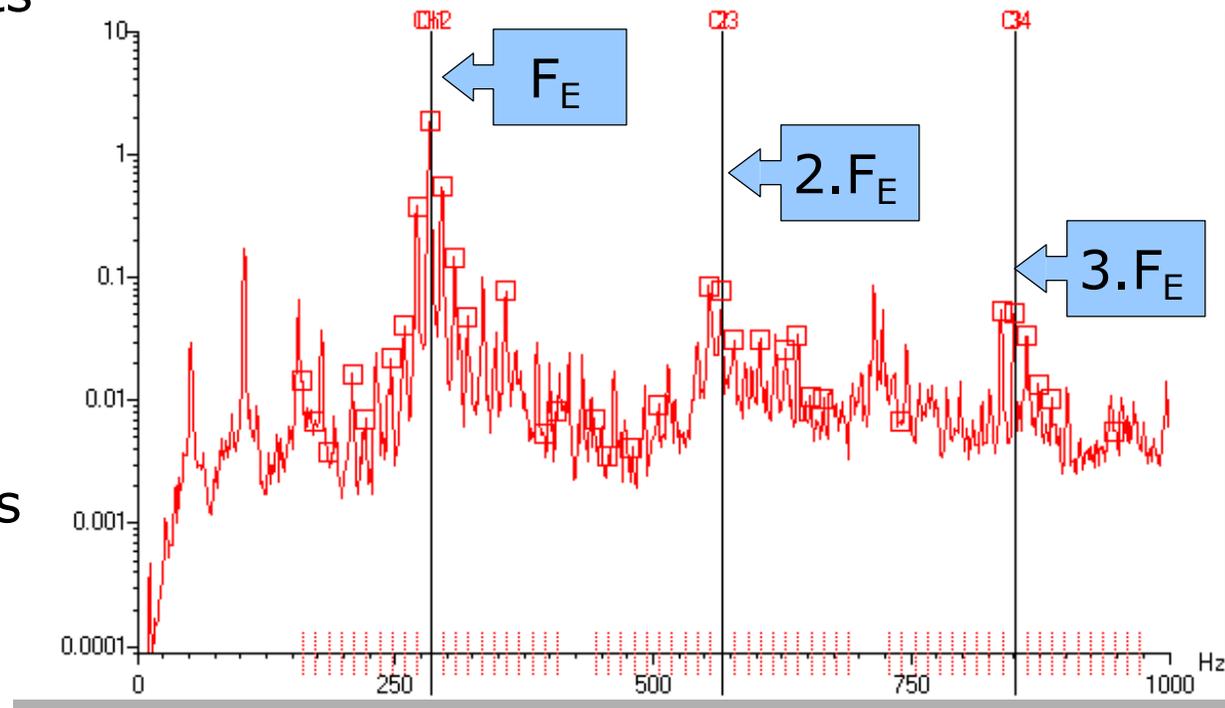
- ✓ Si la déformation de l'arbre est plus **complexe** qu'un simple cintrage, le **nombre** de bandes latérales de modulation augmente.

- ✓ Plus la déformation de l'arbre est **importante**, plus les **amplitudes** des bandes latérales sont élevées.



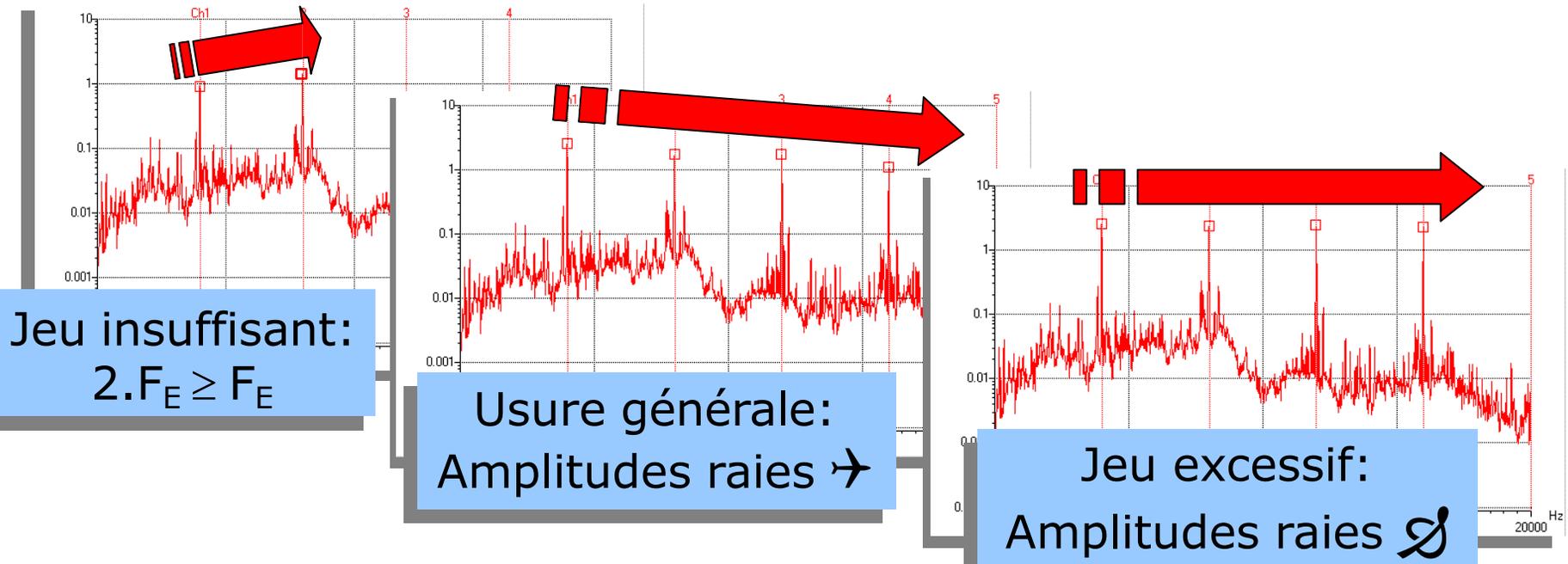
■ Combinaison de défauts

L'addition de différents défauts (denture détériorée et cintrage d'arbre par exemple) est fréquente dans la pratique et conduit à des spectres combinant les typologies des défauts élémentaires correspondants.



■ Ambiguïtés de diagnostic

- ✓ La distinction des différents défauts repose sur la comparaison des amplitudes des composantes du spectre :



■ Ambiguïtés de diagnostic

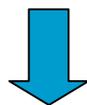
- ✓ La présence de résonances locales de structures peut moduler les amplitudes relatives des différentes composantes et par suite modifier l'allure du spectre correspondant, faussant le diagnostic. Il est donc préférable de s'intéresser aux **évolutions au cours du temps** des amplitudes des raies du spectre.
- ✓ La confusion entre des **bandes latérales** dues à une **modulation** et un **peigne de raies** dû à un **choc** peut également entraîner des erreurs de diagnostic quant à l'origine du phénomène. L'observation du **signal temporel** permet dans ce cas de lever l'indétermination.

8. Les transmissions par courroie

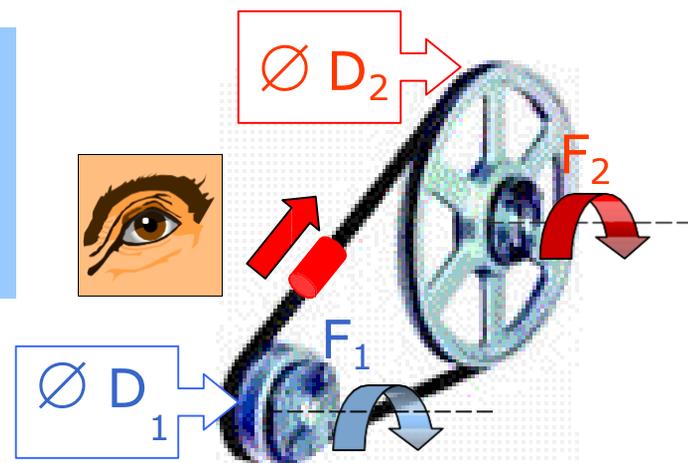
■ Courroies trapézoïdales

✓ Fréquence de passage de la courroie F_p

$$F_p = \frac{\pi \cdot D_1}{\pi \cdot \frac{(D_2 + D_1)}{2} + 2 \cdot E + \frac{(D_2 - D_1)^2}{4 \cdot E}} \cdot F_1$$



$$F_p = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot F_1}{L} = \frac{\pi \cdot D_2 \cdot F_2}{L}$$



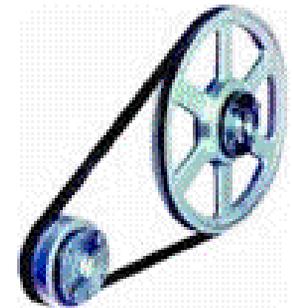
avec

L = longueur courroie

E = entraxe des poulies

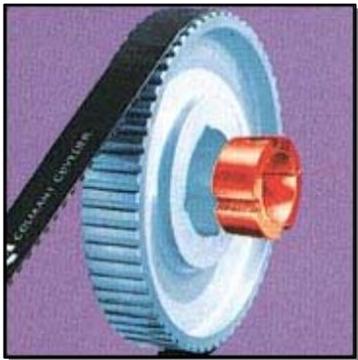
■ Courroies trapézoïdales

- ✓ Le glissement mécanique de la courroie sur la poulie est de l'ordre de 2% à 5%. Si le glissement est plus important, une usure prématurée peut survenir.
- ✓ Un excentrement de poulie peut induire un phénomène vibratoire à la fréquence de rotation.
- ✓ La tension de la courroie est perceptible sur le bruit des paliers équipés de roulements. La quantification du bruit de roulement aide à régler la tension de courroie.
- ✓ La principale cause d'usure de courroie est le délignage entre deux poulies.



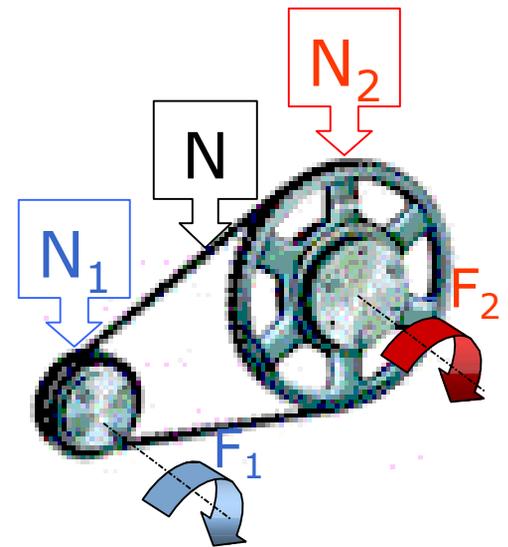
- Courroies crantées

- ✓ Fréquence de passage F_p : Les problèmes de courroies (déformation, point dur, crevasse) génèrent des vibrations à la fréquence de passage :



$$F_p = \frac{F_E}{N} = \frac{N_1 \cdot F_1}{N} = \frac{N_2 \cdot F_2}{N}$$

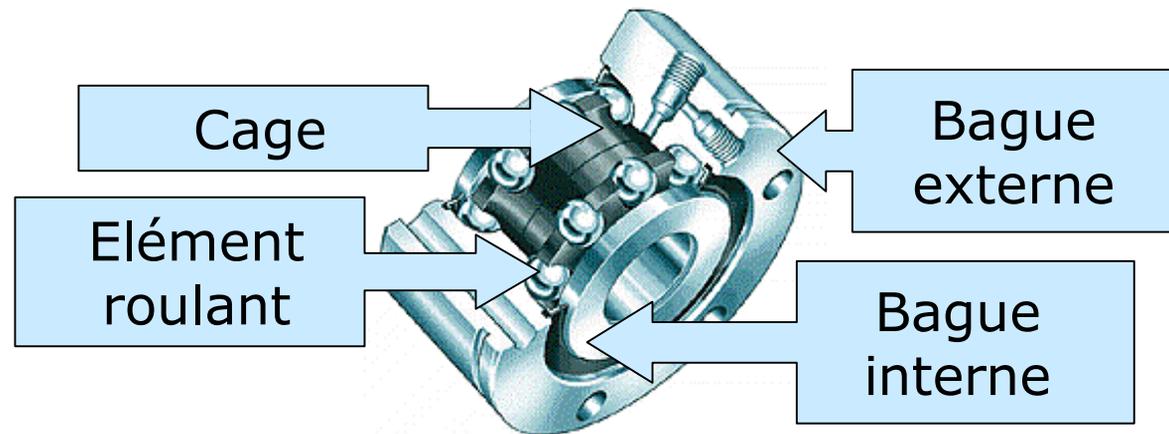
N_1 = Nbre dents poulie 1
 N_2 = Nbre dents poulie 2
 N = Nbre dents courroie



9. Les Roulements

■ Généralités et constitution

Les roulements réalisent le positionnement de l'arbre dans les paliers en assurant la transmission des efforts vers la structure.



Les Roulements

■ Fréquences cinématiques des roulements

d = diamètre des éléments roulants

Z = nombre d 'éléments roulants

D_e = diamètre du chemin de roulement de la bague externe

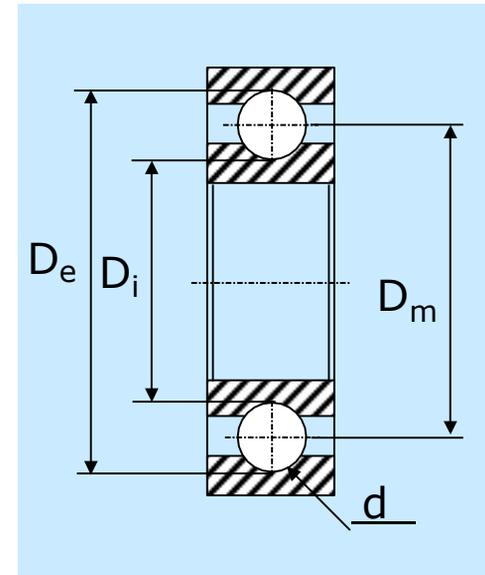
D_i = diamètre du chemin de roulement de la bague interne

D_m = diamètre primitif du roulement

$$D_m = \frac{D_e + D_i}{2}$$

α = angle de contact (roulement à contact oblique)

F_0 = fréquence de rotation de l 'arbre (la bague externe est supposée fixe)



■ Fréquences cinématiques des roulements

- ✓ Fréquence de rotation de la cage

$$F_C = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{d}{D_m} \cdot \cos \alpha\right) \cdot F_0$$

- ✓ Fréquence de rotation des éléments roulants

$$F_B = \frac{1}{2} \cdot \frac{D_m}{d} \cdot \left(1 - \frac{d^2}{D_m^2} \cdot \cos^2 \alpha\right) \cdot F_0$$

- ✓ Fréquence de défaut bague externe

$$F_{BE} = \frac{Z}{2} \cdot \left(1 - \frac{d}{D_m} \cdot \cos \alpha\right) \cdot F_0$$

- ✓ Fréquence de défaut bague interne

$$F_{BI} = \frac{Z}{2} \cdot \left(1 + \frac{d}{D_m} \cdot \cos \alpha\right) \cdot F_0$$

Remarque : Quelque soit le roulement, $F_{be} + F_{bi} = Z \cdot F_0$

■ Les dégradations

Les causes de dégradation de roulements sont nombreuses :

- ✓ Usure normale
- ✓ Charge
- ✓ Défaut de graissage
- ✓ Défaut de montage
- ✓ Agents extérieurs, ...

La dégradation d'un roulement se traduit généralement par un **écaillage** des surfaces en contact (bagues et éléments roulants) qui s'étend et évolue dans le temps. La dégradation peut être **localisée** ou **généralisée**.



■ Les dégradations localisées

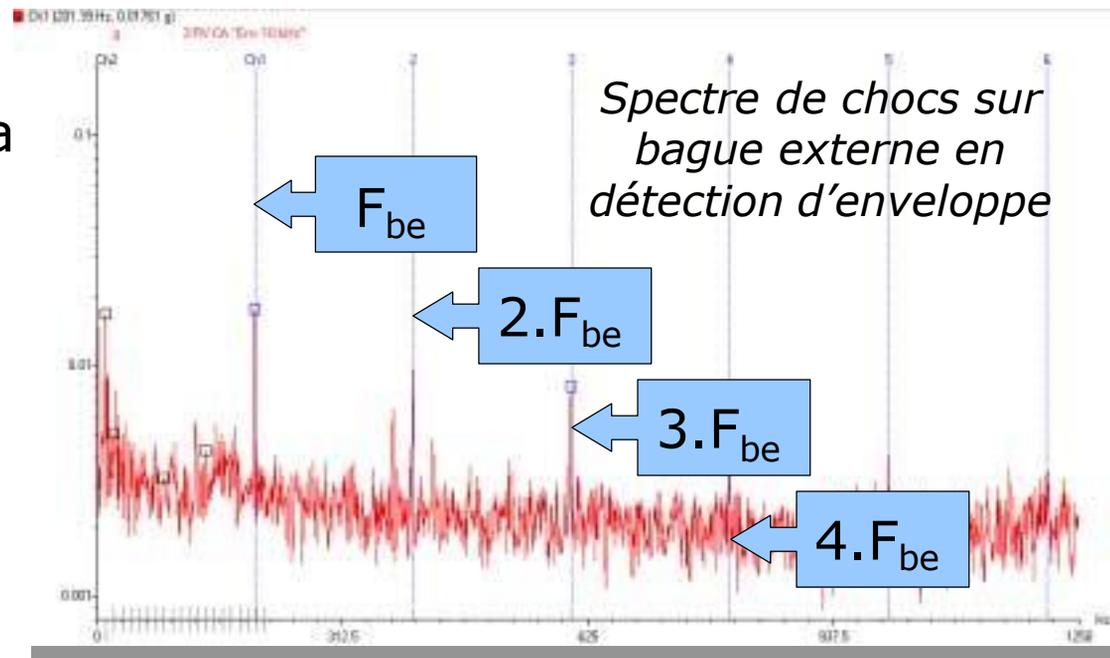
Un défaut localisé sur un des éléments se manifestera par un choc dur à la fréquence de contact de la détérioration :

- | | | |
|------------------------------|---|-----------------|
| ✓ Défaut sur bague externe |  | choc à F_{BE} |
| ✓ Défaut sur bague interne |  | choc à F_{BI} |
| ✓ Défaut sur élément roulant |  | choc à $2.F_B$ |

Remarque : Le défaut de bague interne (tournante) est souvent modulé par la fréquence de rotation.

■ Les dégradations localisées

Le spectre associé est un spectre de raies à la fréquence du choc. L'amplitude du choc étant faible, les raies ne seront discernables qu'autour des résonances de structure ou au moyen d'outils spécifiques.

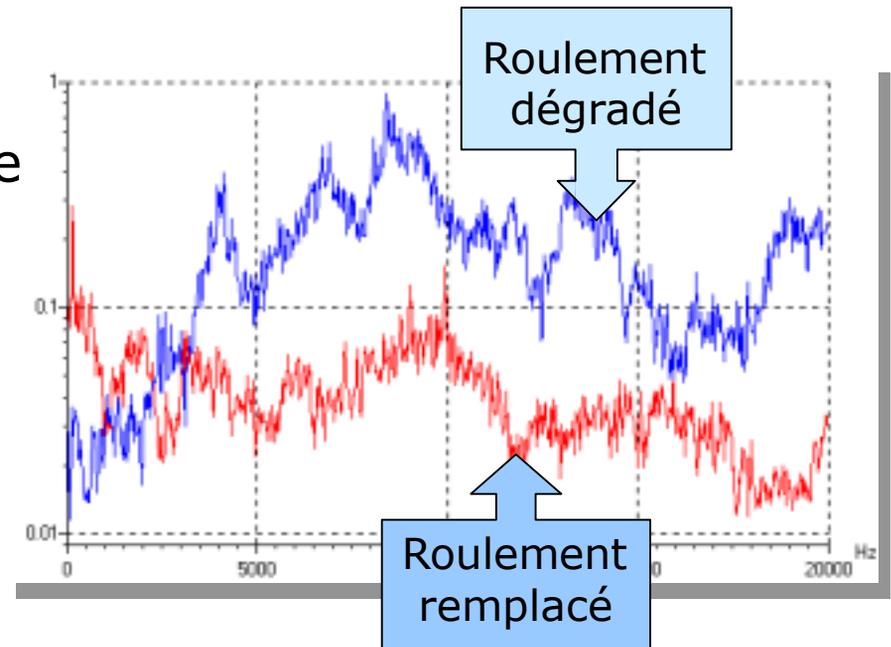


Remarque : L'analyse du signal temporel peut aussi être pertinente dans ce contexte.

■ Les dégradations généralisées

L'écaillage augmente lorsque la dégradation du roulement évolue pour gagner l'ensemble des éléments en contact. Cette évolution anarchique entraîne l'apparition de nombreux chocs durs qui excitent les fréquences de résonances (hautes) du roulement.

Le spectre associé présente un « dôme » dont l'aire (représentative de l'énergie) augmente avec la dégradation.



■ Le Facteur de Défaut Roulement

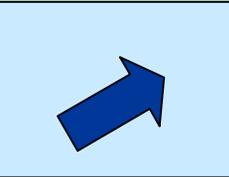
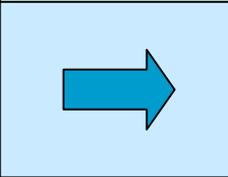
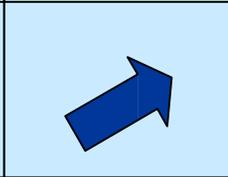
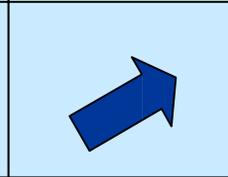
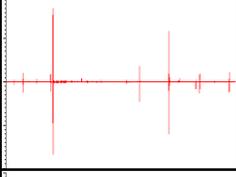
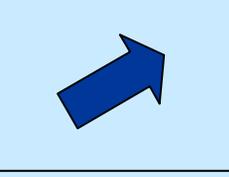
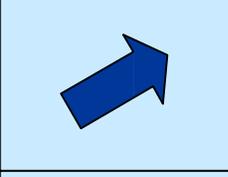
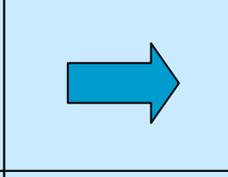
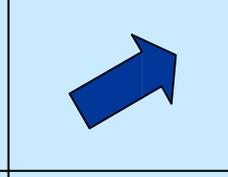
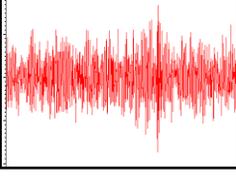
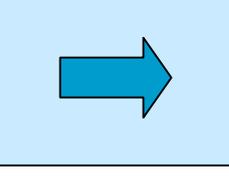
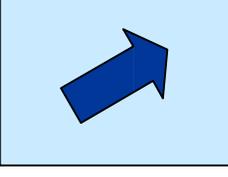
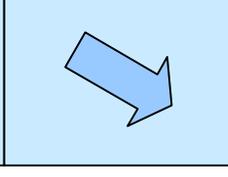
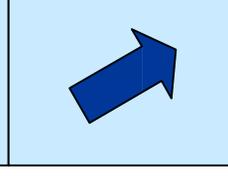
Le **Facteur de Défaut Roulement** est un traitement spécifique du signal temporel adapté à la surveillance des roulements :

$$F_D = a.F_C + b.A_{RMS} \quad \text{Avec :} \quad F_C = \frac{A_C}{A_{RMS}} \quad \text{Facteur de crête}$$

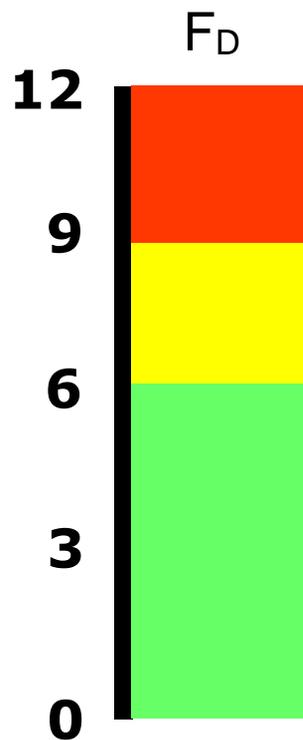
Combinant les indicateurs Facteur de Crête (F_C) et Valeur efficace (A_{RMS}), il présente les avantages suivants :

- ✓ Facteur absolu
- ✓ Détection précoce
- ✓ Peu sensible aux conditions de fonctionnement
- ✓ Valeur croissante sur les 3 phases de la dégradation
- ✓ Utilisation simple et adaptée au diagnostic automatique

■ Le Facteur de Défaut Roulement : Evolution de l'indicateur

Etape dégradation	Aspect signal	Valeur Crête	Valeur RMS	Facteur Crête	Facteur Défaut
Début Ecaillage					
Dévelopmt Ecaillage					
Extension Ecaillage					

■ Le Facteur de Défaut Roulement : Utilisation



Pour les machines de 600 à 6000 RPM les niveaux d'alarme recommandés sont :

- Alerte à 6
- Danger à 9

Remarques :

- Ces niveaux d'alarme donnent une surveillance correcte qui peut être optimisée avec l'expérience.
- En dehors des limites 600 - 6000 RPM, le FD peut aussi être utilisé. Les seuils vont alors dépendre de la configuration machine.

■ Le Facteur de Défaut Roulement et le défaut de graissage
L'augmentation du niveau du Facteur de Défaut peut être liée à un défaut de graissage du roulement.

Aussi, en l'absence d'historique d'évolution, on procédera à **un test de graissage du roulement** : Le Facteur de Défaut chute généralement de manière importante de façon instantanée.

- ✓ Si le niveau du F.D reste stable à cette valeur dans les heures qui suivent l'opération, il s'agit sans doute d'un **problème de graissage**.
- ✓ Dans le cas contraire, il s'agit vraisemblablement d'une **usure** du roulement.

■ Les techniques d'analyse complémentaires

D'autres méthodes d'analyse sont utilisées dans le diagnostic des défauts de roulements. Elles seront explicitées en détail ultérieurement dans le chapitre consacré aux outils d'analyse spécifiques.

Parmi les plus utilisées, nous retiendrons :

- ✓ La Détection d'enveloppe
- ✓ Le Cepstre
- ✓ Le Kurtosis