

# ***Analyse vibratoire des machines tournantes***

***Origine des Vibrations***

***Chapitre 3***

# 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)

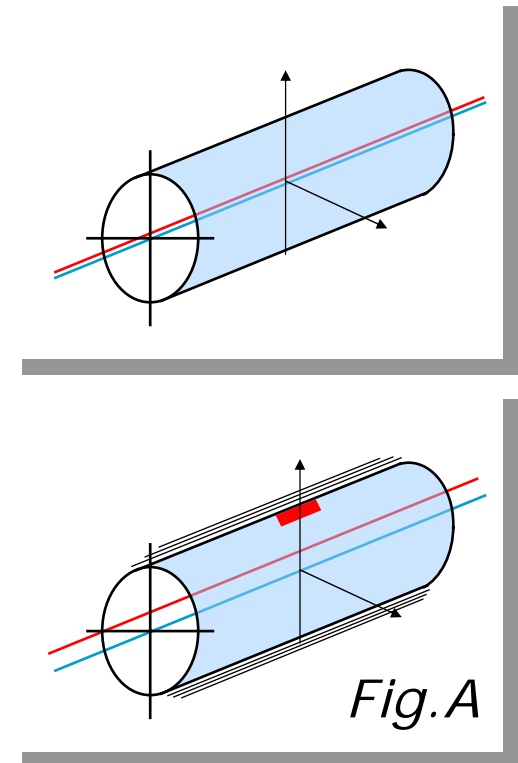
Les phénomènes à l'origine des vibrations dépendent de la constitution de la machine et de ses paramètres de fonctionnement. Les plus courants sont présentés dans ce chapitre ainsi que leurs manifestations typologiques afin de permettre leur identification et leur suivi dans le cadre d'un programme de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

## Le Balourd

### ► Le balourd mécanique : Définitions

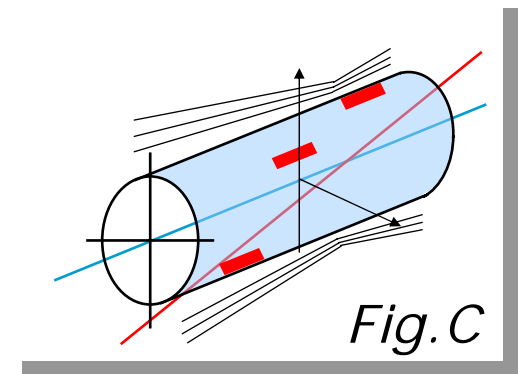
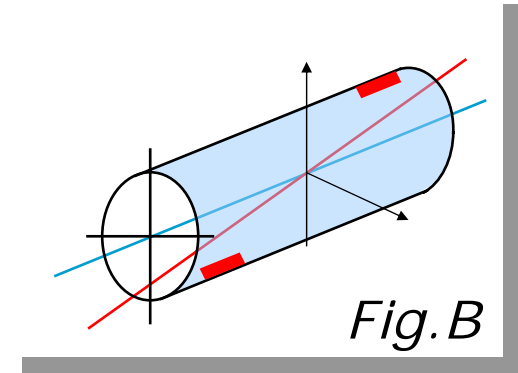
Le phénomène de balourd mécanique est lié à une répartition non homogène de la masse autour de l'axe de rotation : L'axe d'inertie de l'arbre n'est pas confondu avec l'axe de rotation. Différents types de balourd peuvent être identifiés :

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



## Le Balourd

- ▶ 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).



## Le Balourd

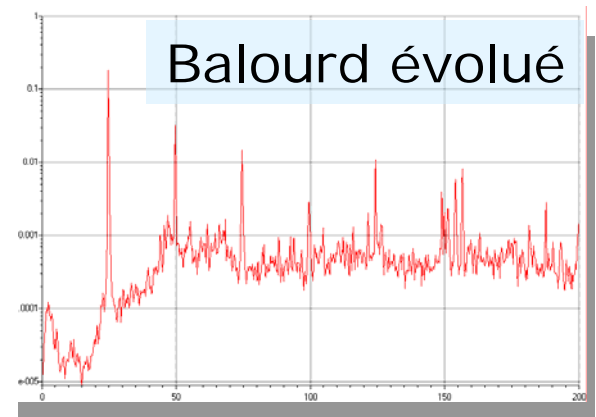
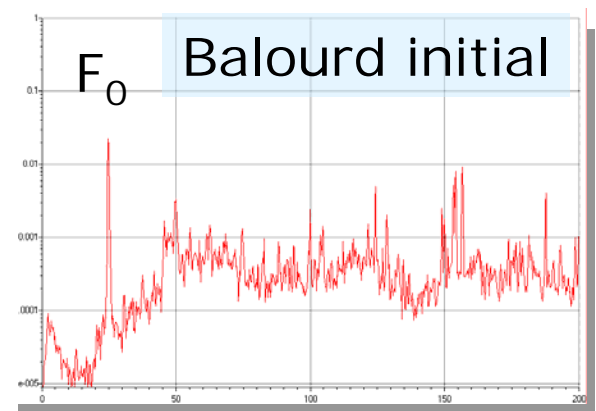
### ► Typologie du balourd

Le balourd se manifeste par une énergie vibratoire localisée :

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

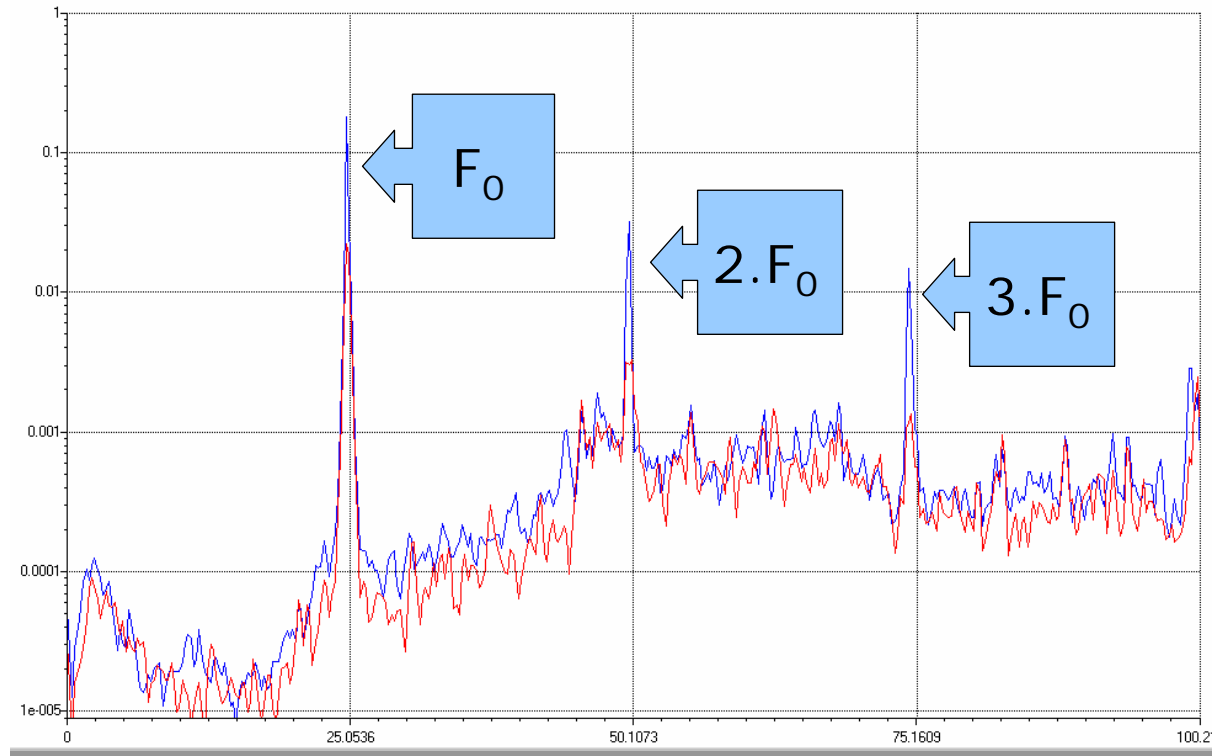
Il existe toujours un balourd résiduel sur une machine tournante.

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



## Le Balourd

- Typologie du balourd : Spectres superposés



## Le Balourd

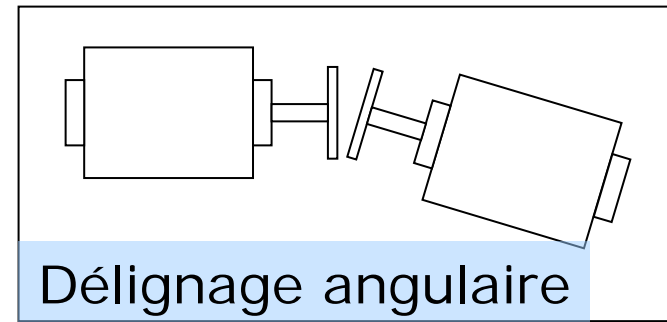
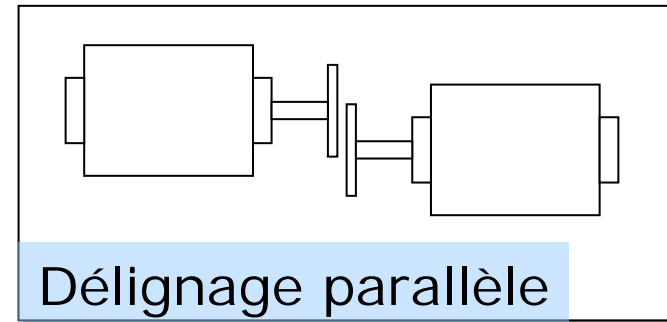
- ▶ Typologie du balourd : Ambiguïtés de diagnostic  
D'autres phénomènes sont susceptibles de générer de l'énergie à la fréquence de rotation  $F_0$  sans pour autant être liés à un déséquilibre de masse :
- ◆ Jeux de paliers trop importants
- ◆ Chocs périodiques à la rotation (problème de fixation)
- ◆ 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.

## 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 :

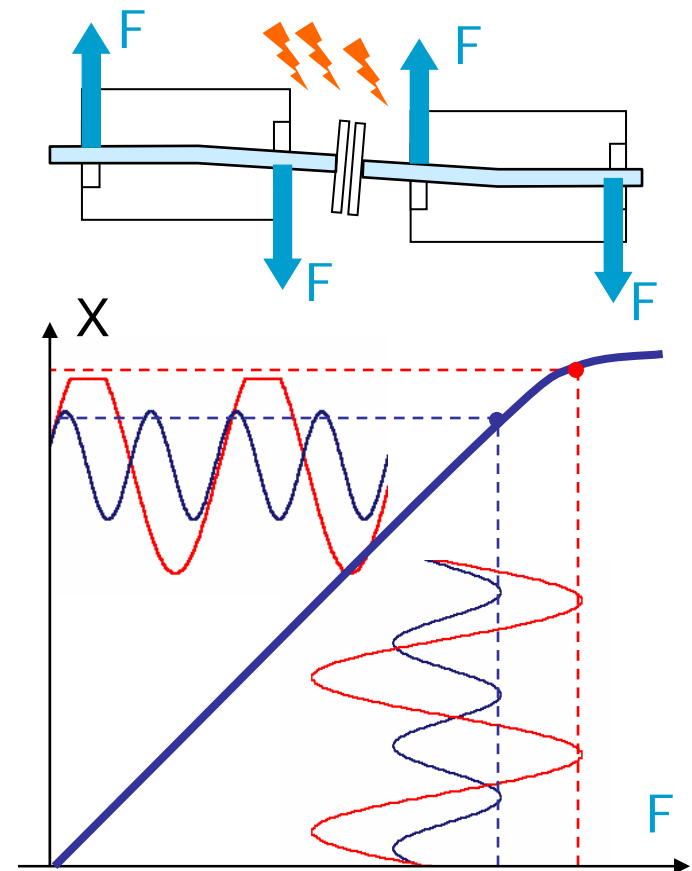
- ◆ **Délignage parallèle** : Défaut de concentricité des deux arbres
- ◆ **Délignage angulaire** : Défaut de parallélisme des deux arbres
- ◆ **Délignage angulaire et parallèle** : Combinaison des deux précédents





## Le Délignage

- ▶ 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.

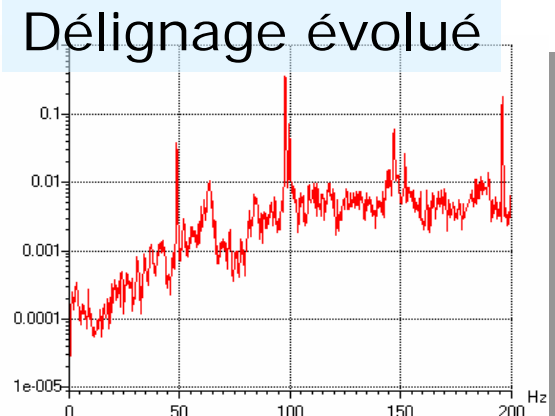
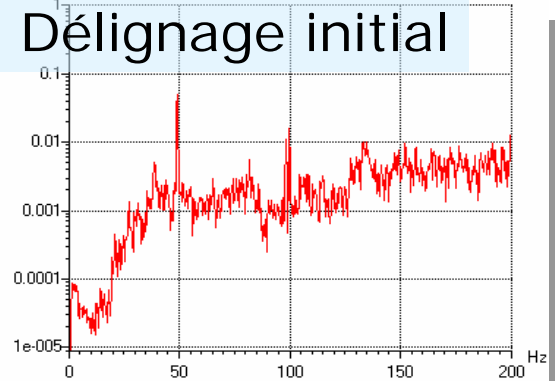


## Le Délignage

► Typologie du délignage

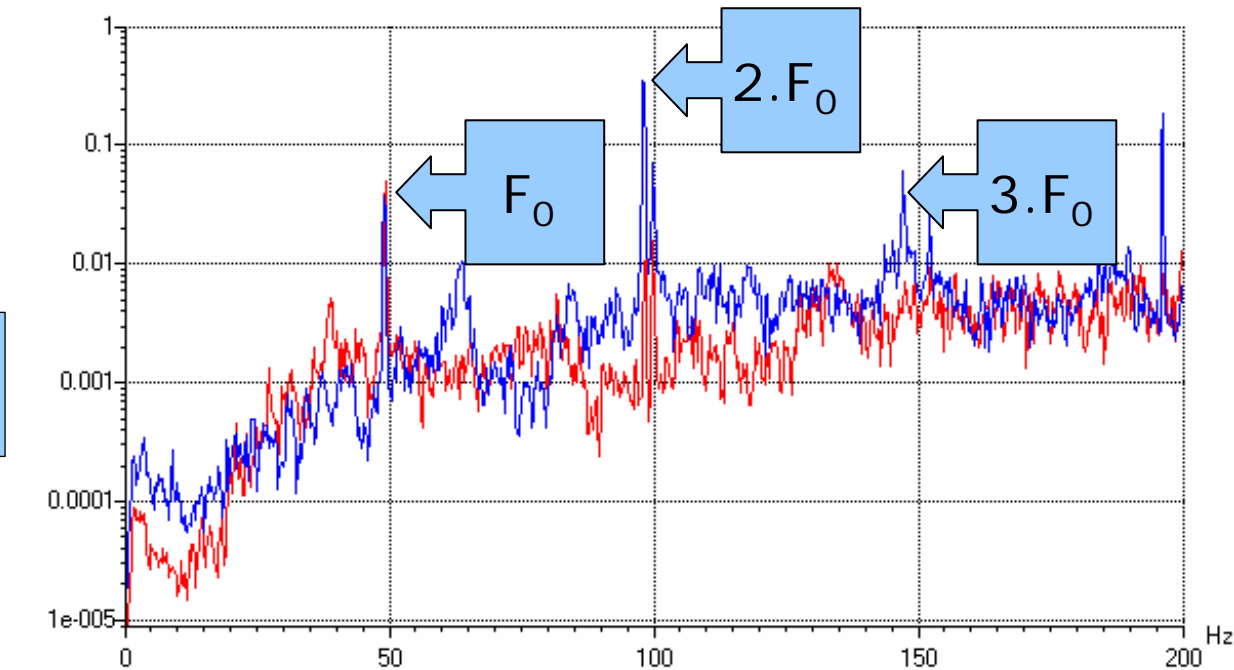
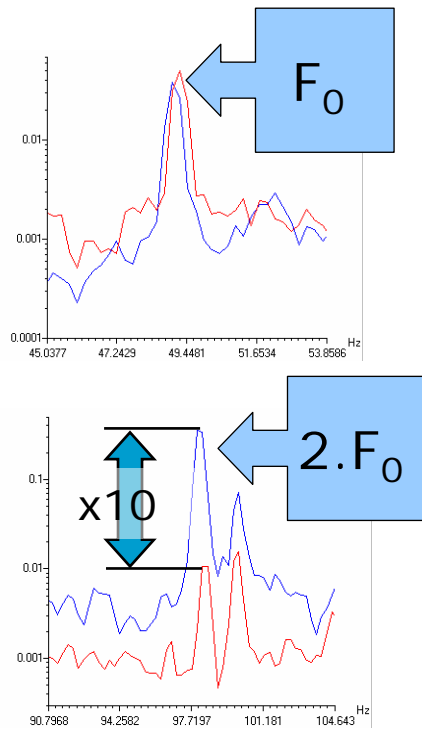
Il se manifeste par une énergie vibratoire localisée à  $2.F_0$ ,  $3.F_0$  ou  $4.F_0$  dans toutes les directions de mesurages.

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



## Le Délignage

- Typologie du délignage : Spectres superposés



## Le Délignage

- ▶ 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

## 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,...)

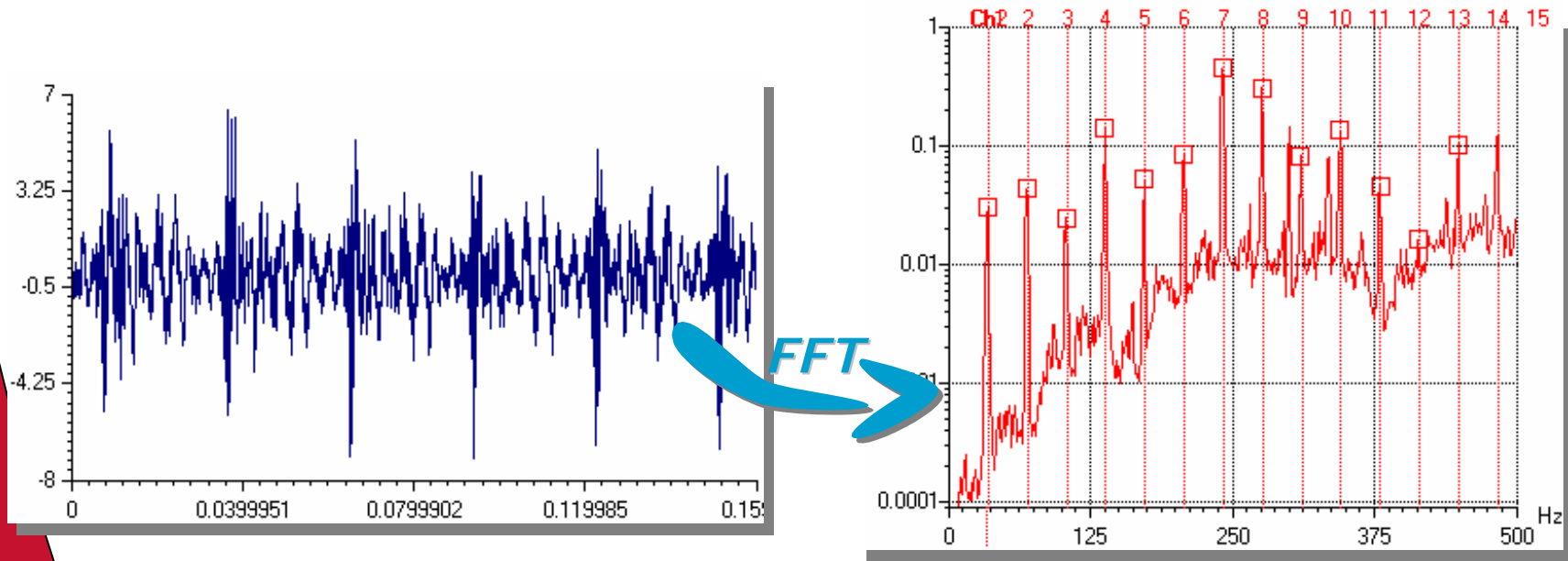
#### ◆ Origine des chocs périodiques internes

- Dégradation de roulement
- Dégradation d'engrènements
- Jeux excessifs

## Les chocs périodiques

► Typologie des chocs périodiques

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



### Les chocs périodiques

► 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.

## Les phénomènes magnétiques

► Introduction : Les différents types de moteurs électriques

◆ Moteur électrique à courant continu

Utilisé dans les applications à vitesse variable, en régulation, en positionnement. Son coût est élevé pour des puissances importantes.

◆ Moteur électriques à courant alternatif

● Moteur synchrone

Utilisé dans les applications où la synchronisation rigoureuse de plusieurs moteurs est nécessaire ainsi que dans les applications à vitesse variable de fortes puissances ( $\geq 1\text{MW}$ ).



## Les phénomènes magnétiques

► Introduction : Les différents types de moteurs électriques

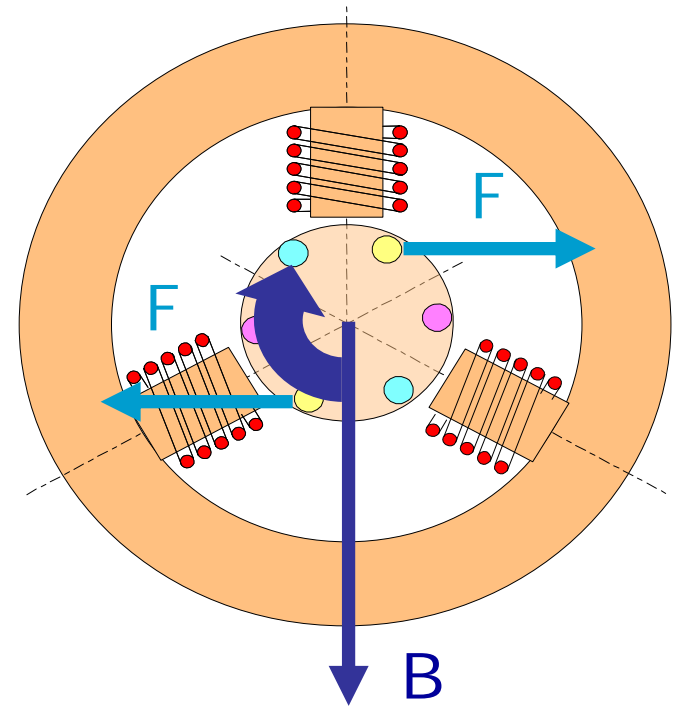
- **Moteur asynchrone** (ou moteur à induction)

Utilisé à l'origine dans les applications à vitesse fixe. On distingue :

- **Le moteur à cage** : C'est le plus économique et donc le plus couramment utilisé : Ce chapitre lui est donc particulièrement consacré.
- **Le moteur à bagues** (rotor bobiné) : Plus complexe, il coûte plus cher à l'achat et à l'entretien. Il est notamment utilisé dans le cas de conditions de démarrage sévères : *Forte inertie, couple élevé, courant d'appel réduit sur le réseau.*

## Les phénomènes magnétiques

- ▶ Le moteur asynchrone : Principe de fonctionnement
  - ◆ Les enroulements statoriques créent un champ magnétique tournant.
  - ◆ Ce champ magnétique induit des courants dans le rotor en court-circuit.
  - ◆ Ces courants interagissent avec le champ tournant pour créer des forces électromagnétiques provoquant la rotation du rotor.



## Les phénomènes magnétiques

### ► Le moteur asynchrone : Rappels et définitions

Soient les notations suivantes :

- $F_A$  Fréquence d'alimentation
- $F_S$  Fréquence du champ tournant
- $F_R$  Fréquence de rotation rotor
- $p$  Nombre de paires de pôles
- $g$  Glissement
- $F_g$  Fréquence de glissement
- $R$  Nombre d'encoches rotor
- $F_E$  Fréquences principales d'encoches

$$F_S = \frac{F_A}{p}$$

$$g = \frac{F_S - F_R}{F_S}$$

$$F_g = \Delta F = F_S - F_R$$

$$F_{\text{enc}} = q_1 \cdot R \cdot F_R \pm q_2 \cdot 2 \cdot F_A$$

$$q_1 = 1, 2, 3, \dots \quad q_2 = 0, 1, 2, \dots$$

## 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 :
  - ◆ Causée par des variations de courant :
    - Au niveau du stator : Enroulement, alimentation (défaut stationnaire)
    - Au niveau du rotor : Barres, anneau (défaut tournant)
  - ◆ Causée 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)

## Les phénomènes magnétiques

- ▶ Le moteur asynchrone : Les défauts stationnaires  
On peut donc classer les défauts magnétiques en deux familles :

- ◆ **Les défauts stationnaires**

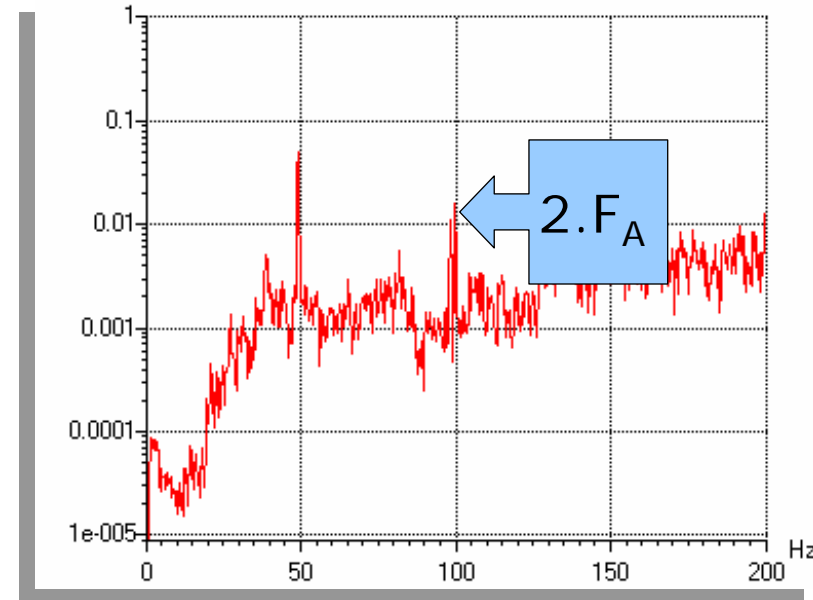
(liés au stator)

***Dus à une variation de courant***

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

***Dus à une variation d'entrefer***

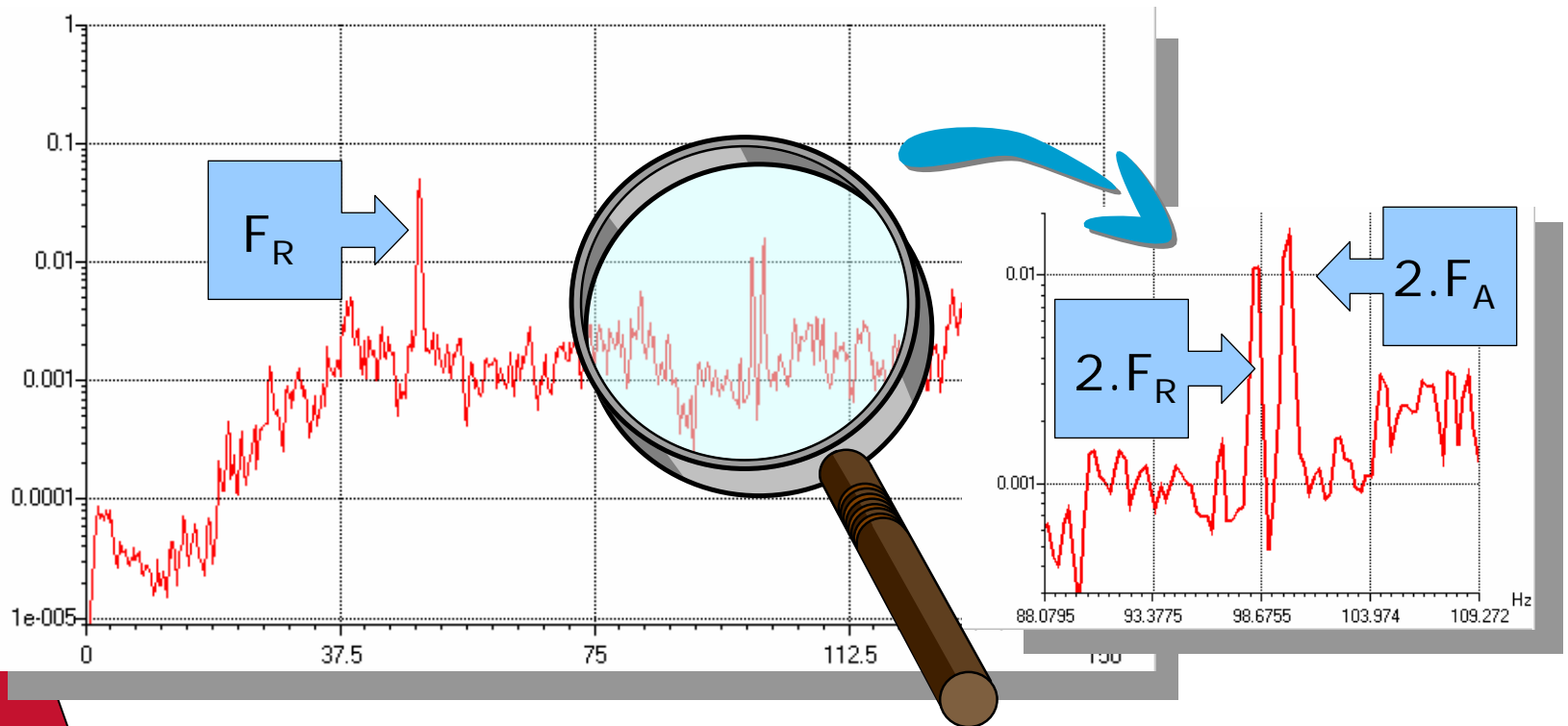
- Déformation du stator
- Jeu de paliers excessif



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

## Les phénomènes magnétiques

- ▶ Le moteur asynchrone : Typologie des défauts stationnaires



### Les phénomènes magnétiques

- ▶ 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.

## Les phénomènes magnétiques

► Le moteur asynchrone : Les défauts tournants

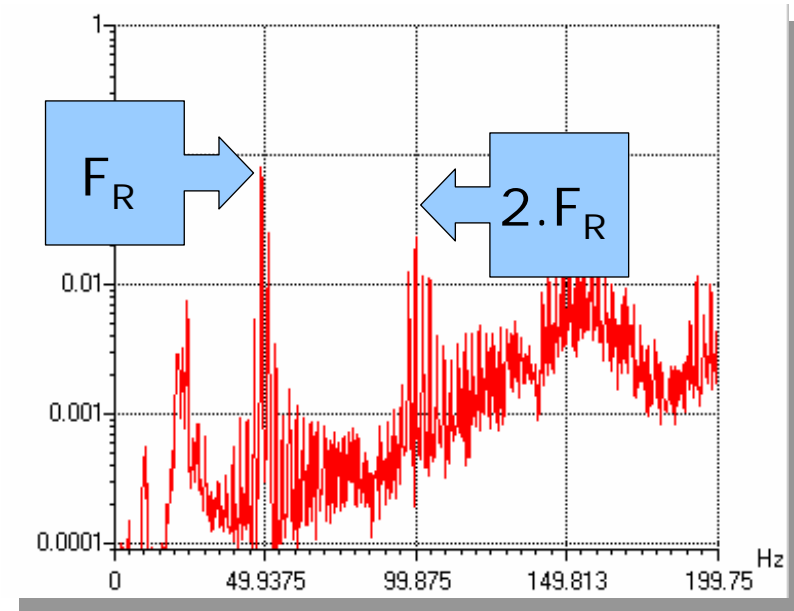
◆ Les défauts tournants (liés au rotor)

***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

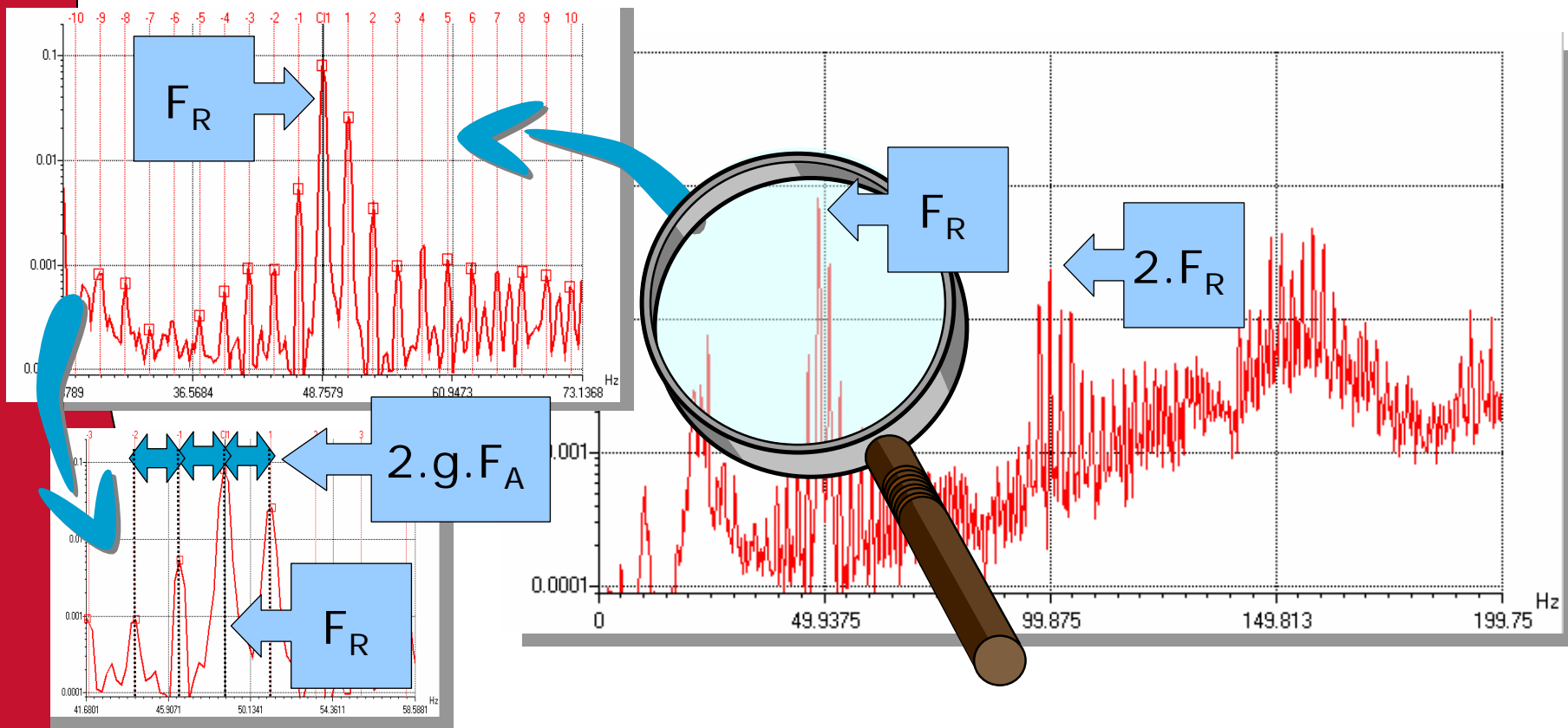


La typologie des défauts tournants est une modulation d'amplitude ou de fréquence de  $F_R$  par  $2.g.F_A$



## Les phénomènes magnétiques

► Le moteur asynchrone : Typologie des défauts tournants



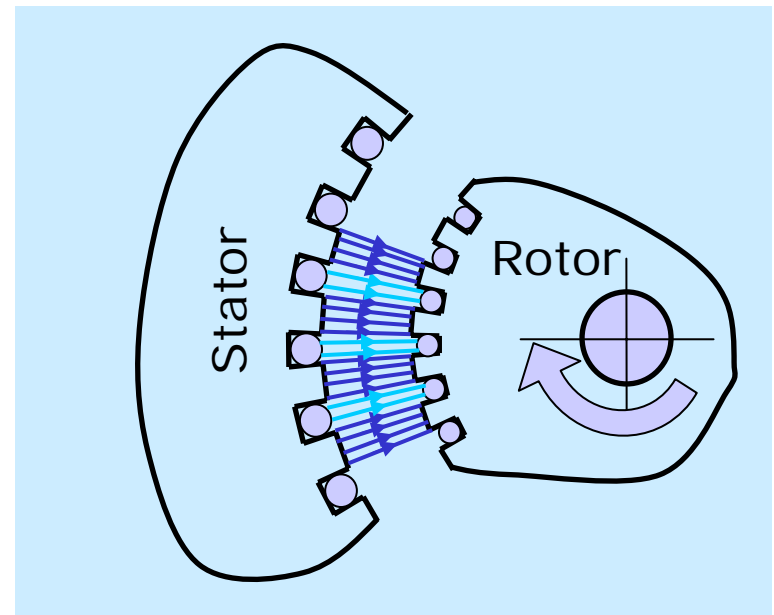
## Les phénomènes magnétiques

- ▶ Le moteur asynchrone : Les fréquences d'encoches

La présence des encoches dans le rotor et le stator du moteur modifie l'entrefer localement, provoquant une variation des forces magnétiques à la fréquence de passage des encoches rotor / stator.

$$F_{\text{enc}} = q_1 \cdot R \cdot F_R \pm q_2 \cdot 2 \cdot F_A$$

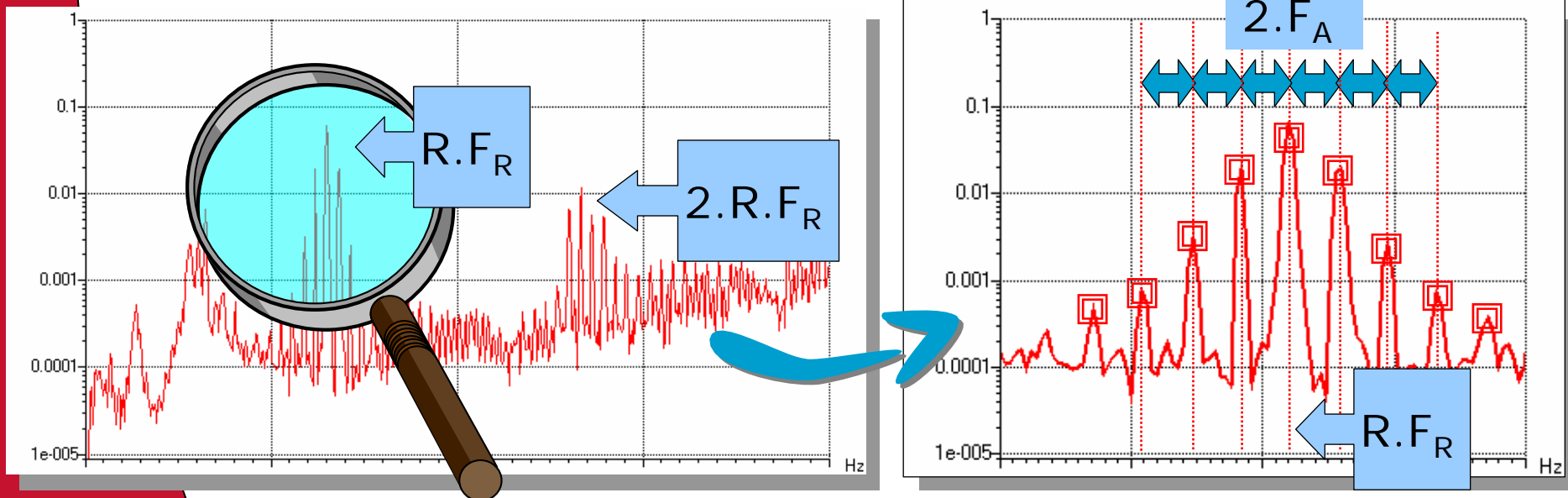
$$q_1 = 1, 2, 3, \dots \quad q_2 = 0, 1, 2, \dots$$



## Les phénomènes magnétiques

- ▶ 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  $R.F_R$ ,  $2.R.F_R$ ,  $3.R.F_R, \dots$



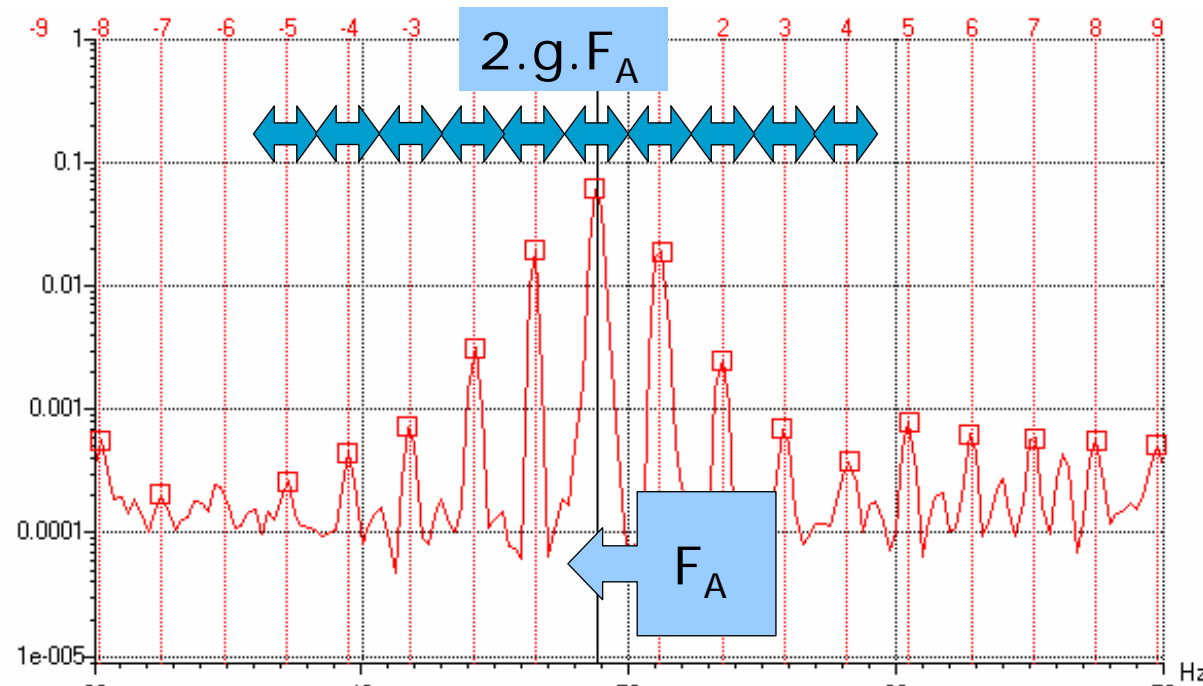
# Les phénomènes magnétiques

- ▶ Analyse du courant statorique : Introduction
  - ◆ L'analyse du courant d'alimentation à l'aide d'une pince ampèremétrique et d'un analyseur FFT permet d'obtenir des éléments supplémentaires de diagnostic.
  - ◆ L'analyse se base sur la recherche de bandes de modulation autour de la fréquence d'alimentation.

## Les phénomènes magnétiques

► Analyse du courant statorique : Défaut rotorique

Une anisotropie électrique du rotor (barre, anneau,...) induit la présence de bandes latérales de modulation espacées de  $2.g.F_A$  autour de la fréquence d'alimentation  $F_A$ .



## Les Engrenages

### ► Généralités

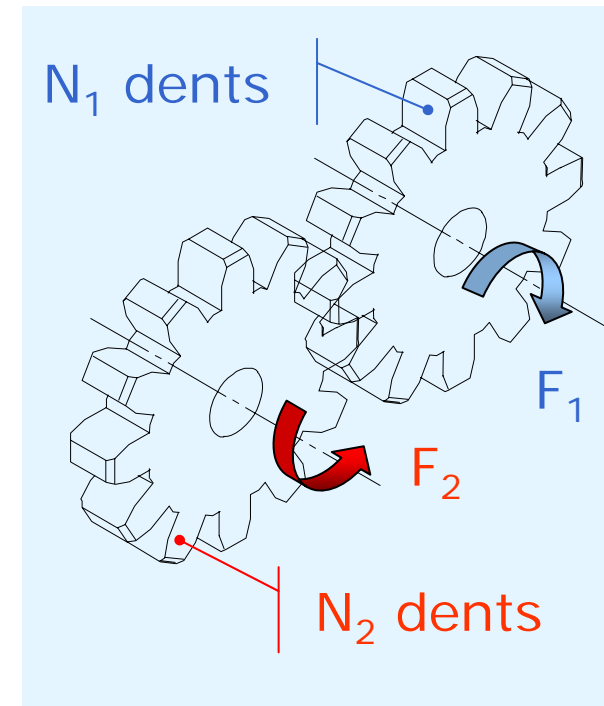
Les engrenages permettent la transmission d'un couple avec ou sans réduction de vitesse.

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

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

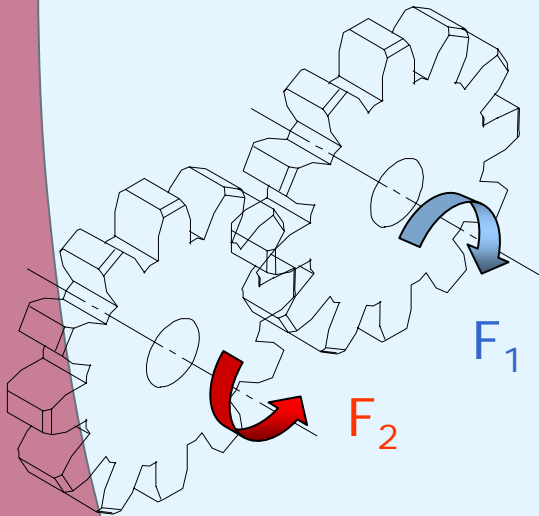


$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

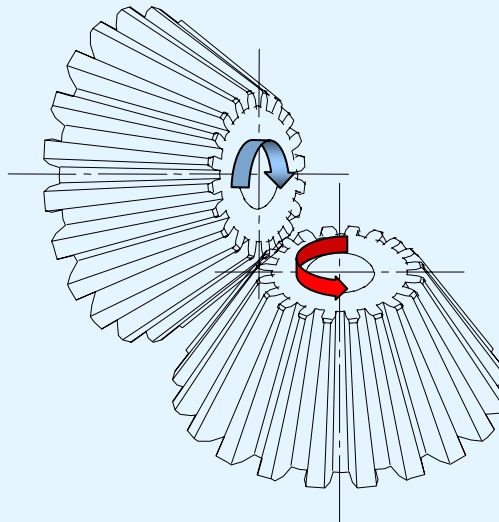


## Les Engrenages

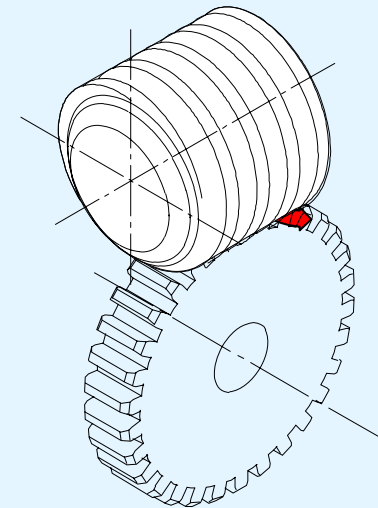
► Les différentes classes d'engrenages



Engrenage parallèle



Engrenage  
concourant

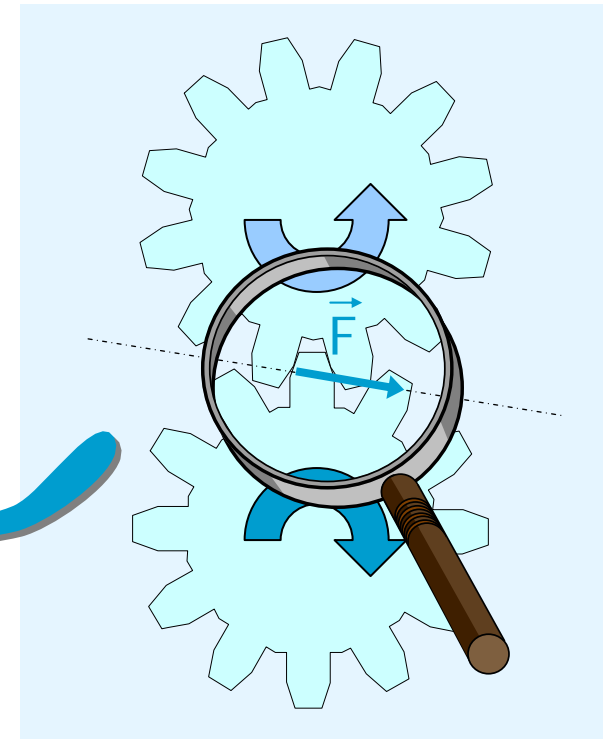
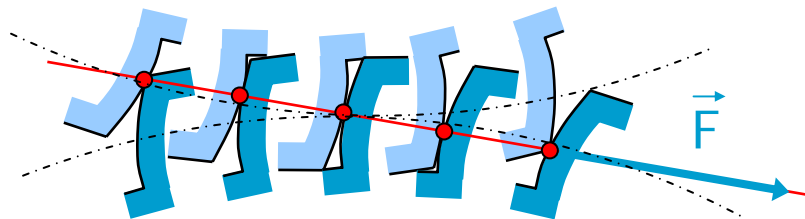


Engrenage gauche

## Les Engrenages

### ► Principe de l'engrènement

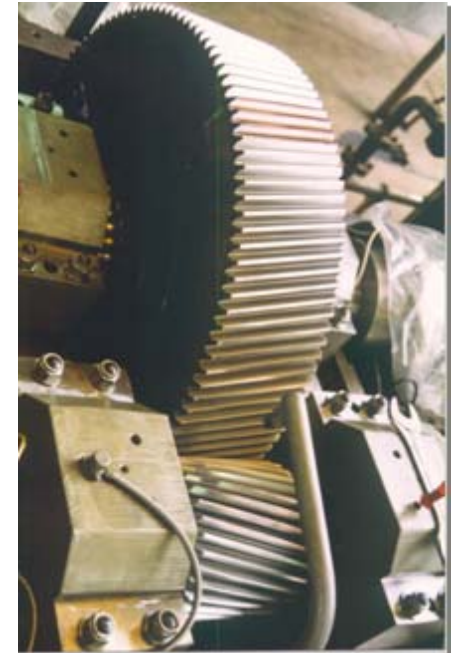
Le profil des dents est déterminé afin de conserver à la poussée une intensité et une direction constantes.





## Les Engrenages

- ▶ 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.



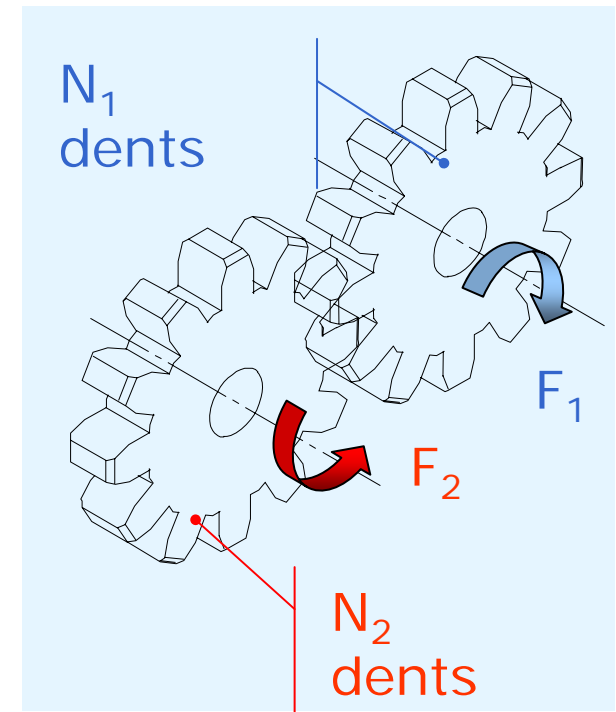
## Les Engrenages

- ▶ 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.*

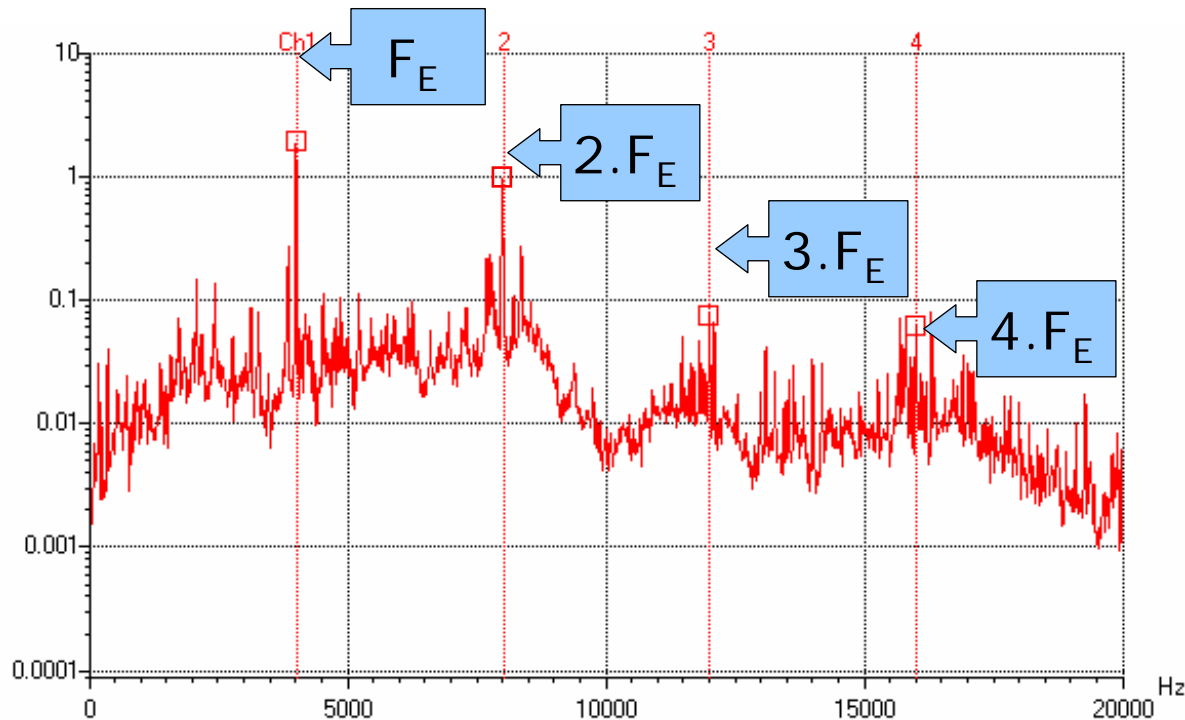


## Les Engrenages

► Spectre typologique initial

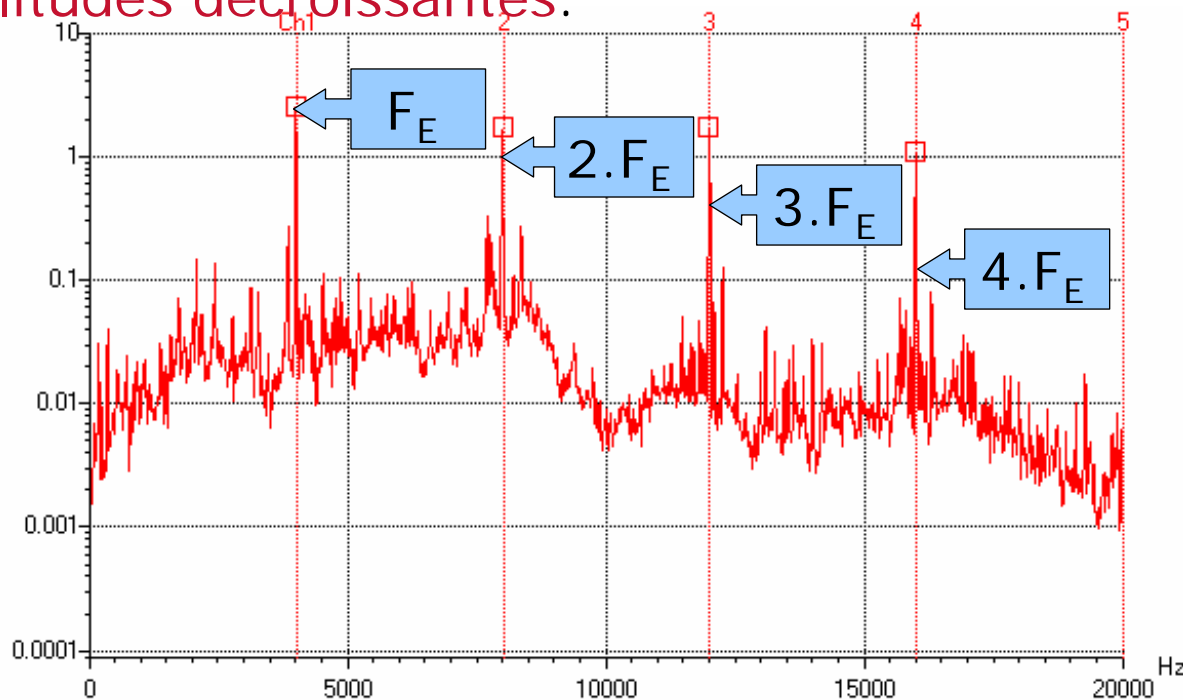
En l'absence de défaut, on retrouve dans le spectre vibratoire la fréquence d'engrènement  $F_E$  et ses harmoniques  $2.F_E$ ,  $3.F_E$ , ..

..



## Les Engrenages

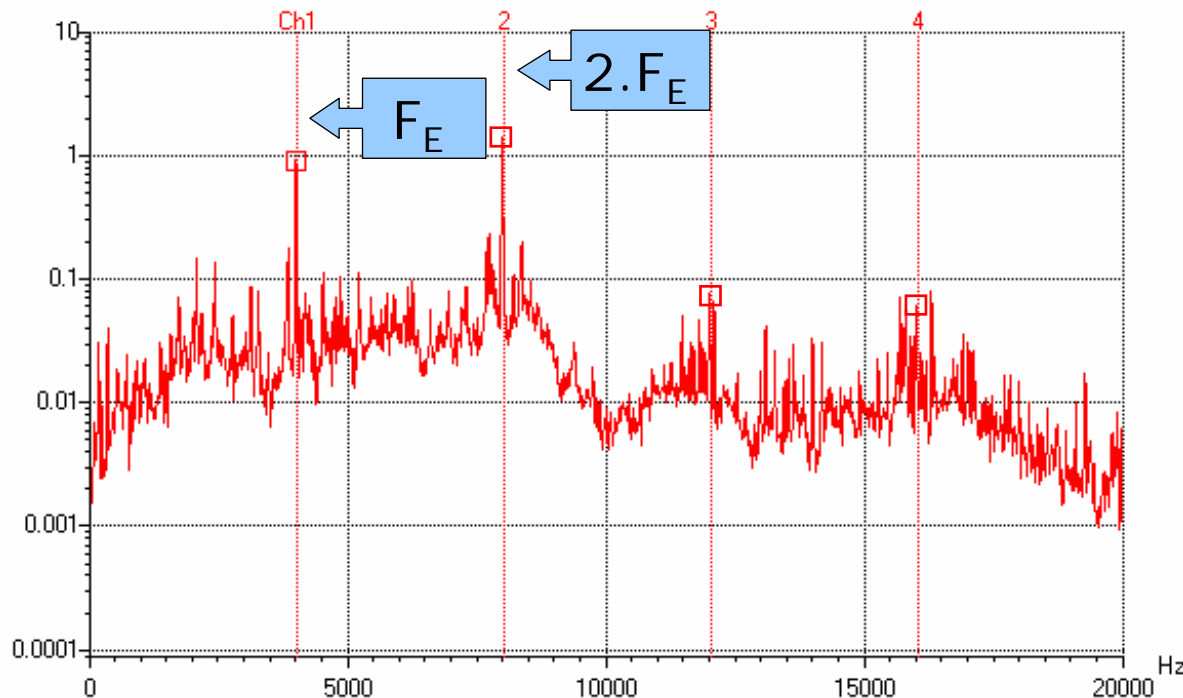
- ▶ Usure généralisée de la denture  
L'usure générale de la denture se traduit par un **matage** du profil des dents. On obtient un **choc périodique « mou »** à la fréquence d'engrènement, qui génère un **peigne de raies d'amplitudes décroissantes**.



## Les Engrenages

### ► Jeu de denture insuffisant

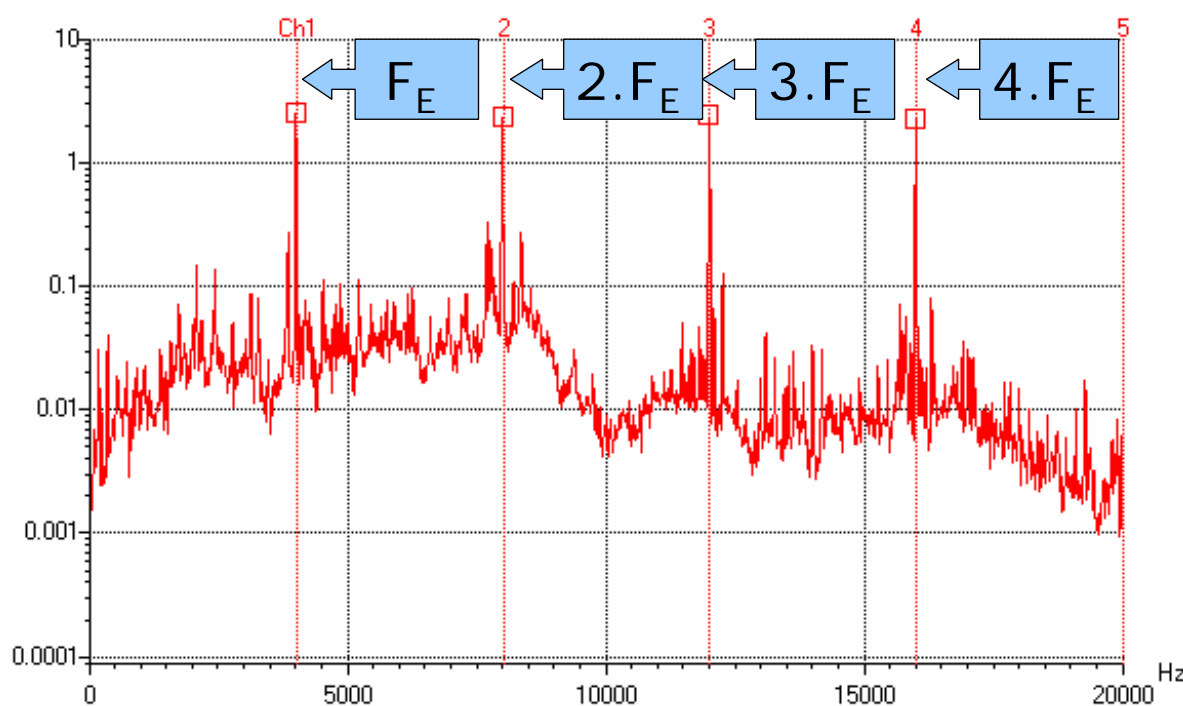
Si le jeu de fond de denture est insuffisant, il se produit un effort à l'engagement et au déengagement des dents : La raie à  $2.F_E$  augmente et devient parfois prépondérante.



## Les Engrenages

### ► Jeu de denture excessif

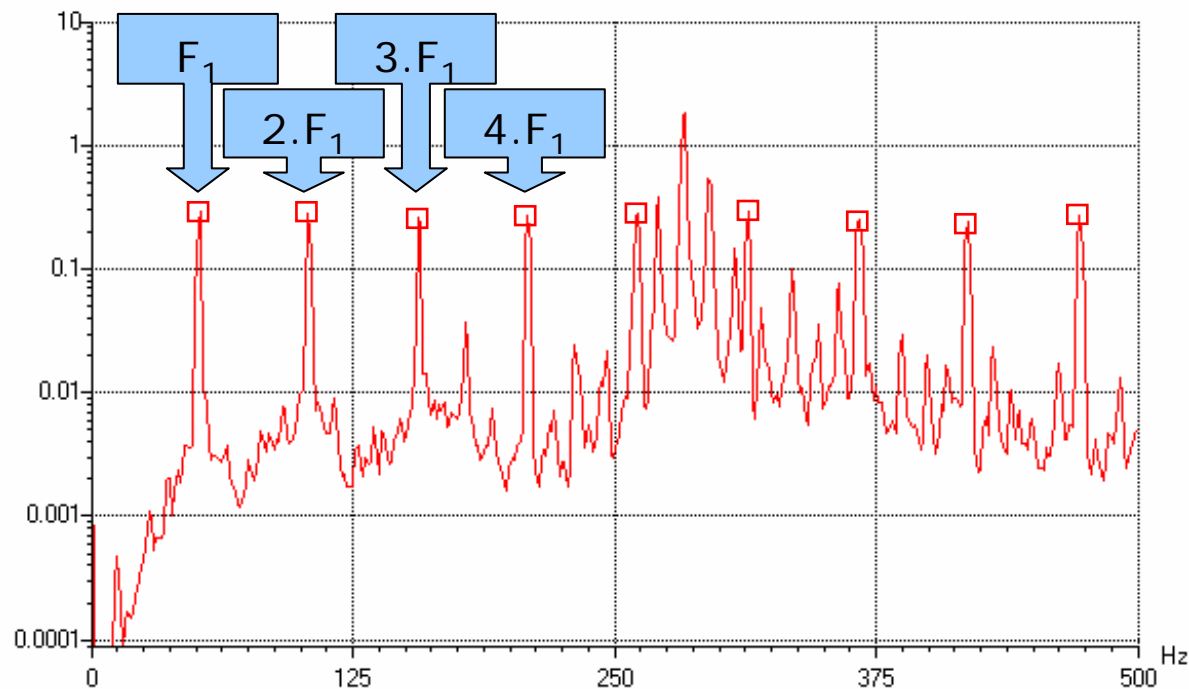
Un jeu de fond de denture trop important génère un **choc périodique « dur »** à la fréquence d'engrènement (rattrapage du jeu), qui produit un peigne de raies d'amplitudes proches.



## Les Engrenages

- 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 à la fréquence de rotation  $F_1$  du pignon incriminé.



## Les Engrenages

- ▶ 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 :

$$F_C = \frac{F_E}{N_C}$$

avec  $N_C = \text{ppcm de } N_1 \text{ et } N_2$

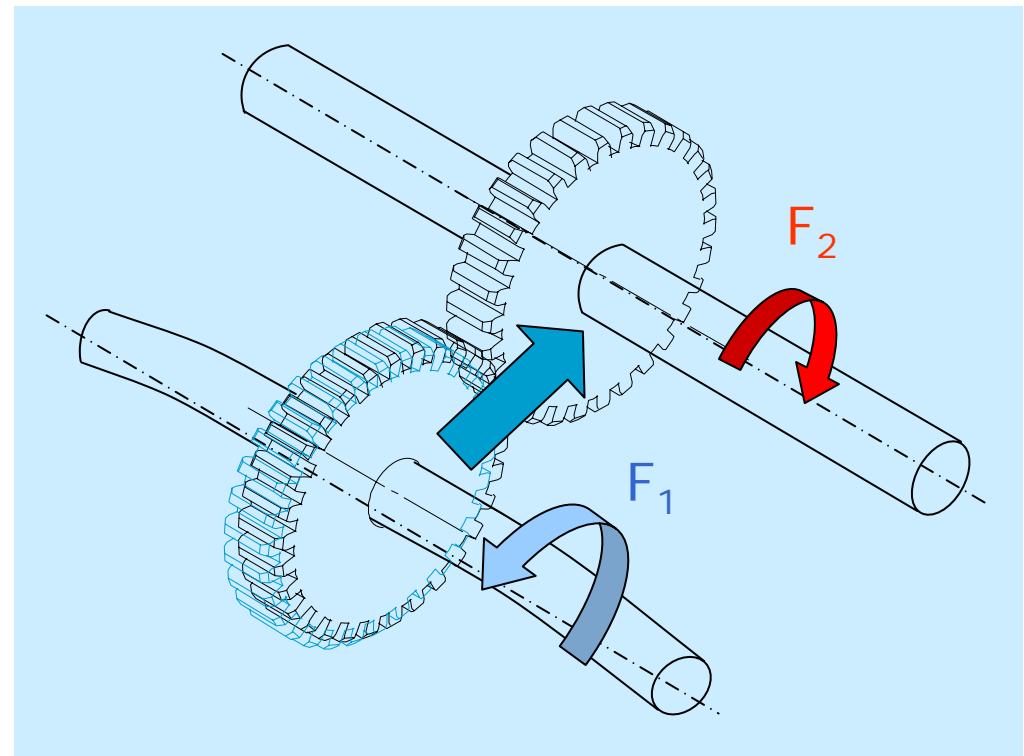


## Les Engrenages

► Arbre support pignon cintré (faux rond)

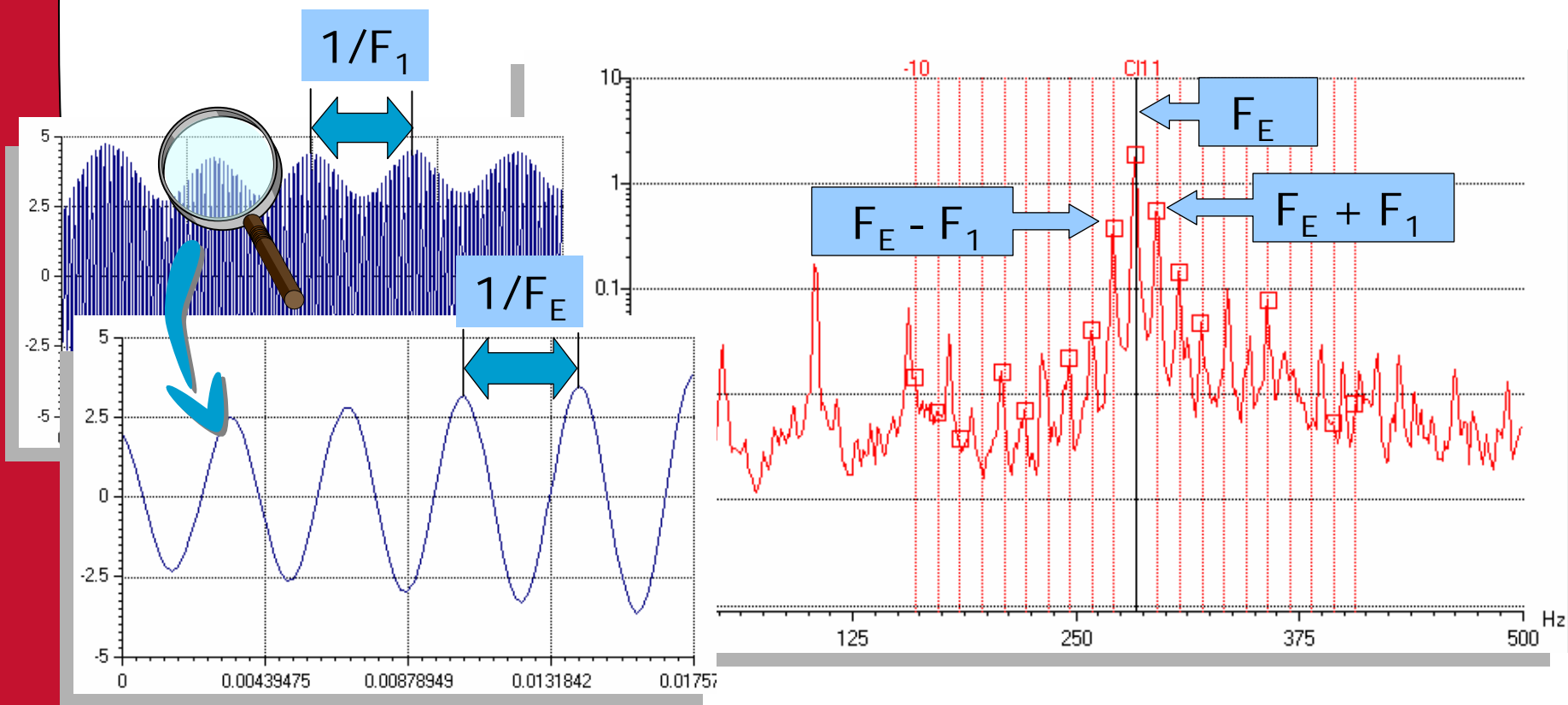
La pression au niveau de la denture est modulée à la fréquence  $F_1$  de rotation de l'arbre cintré.

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



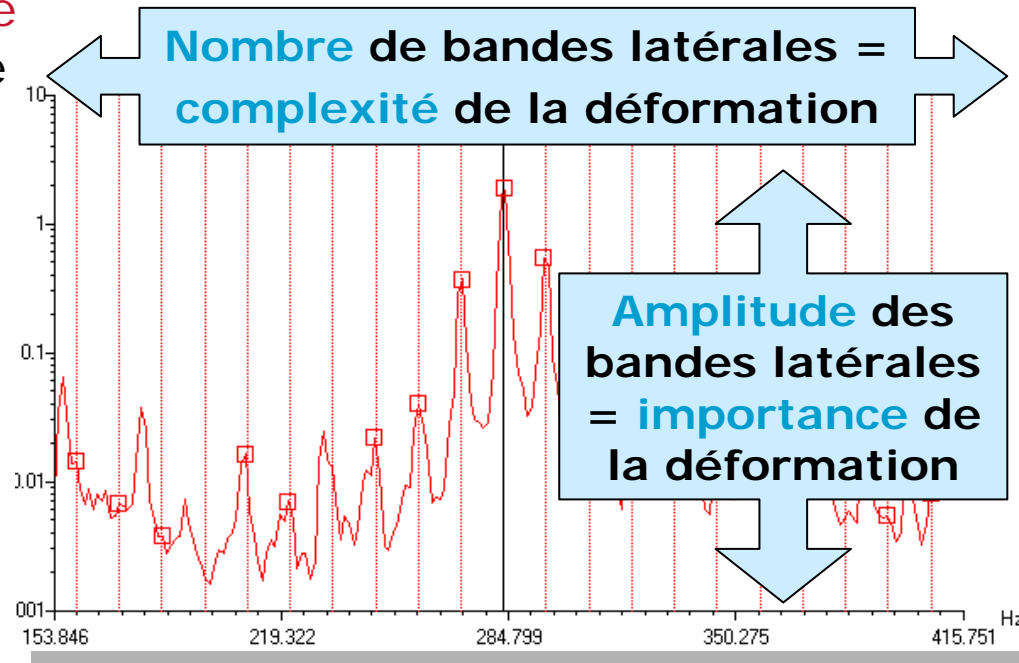
## Les Engrenages

- ▶ Arbre support pignon cintré



## Les Engrenages

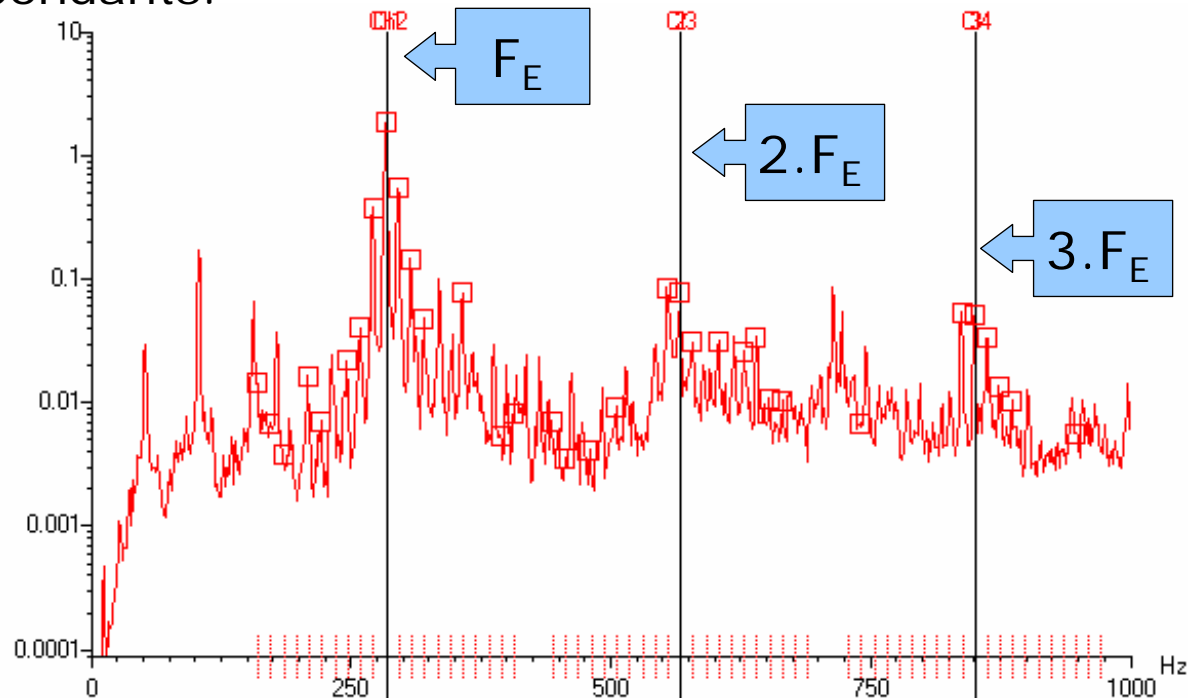
- ▶ Déformation complexe de l'arbre
  - ◆ Si la déformation de l'arbre est plus **complexe** qu'un simple cintrage, le **nombre** de bandes latérales de modulation augmente.
  - ◆ Plus la déformation de l'arbre est **importante**, plus les **amplitudes** des bandes latérales sont élevées.



## Les Engrenages

### ► Combinaison de défauts

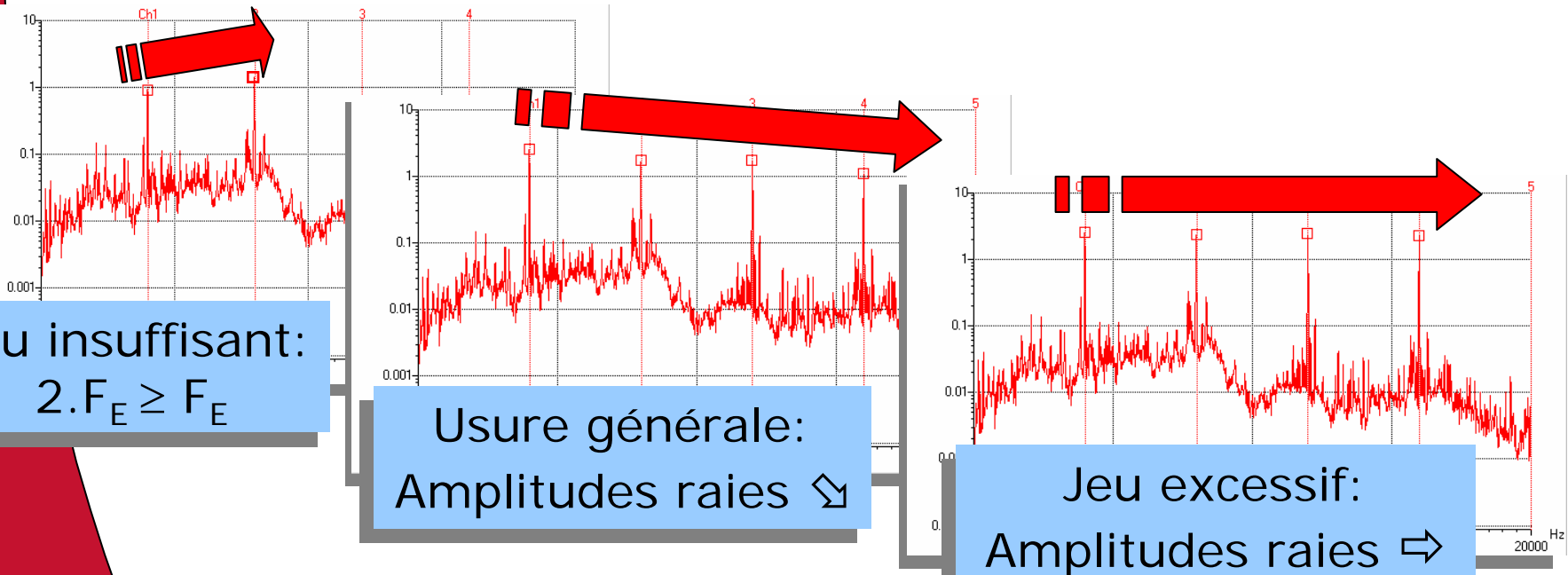
L'addition de différents défauts (denture détériorée et cintrage d'arbre par exemple) est fréquente dans la pratique et conduit à des spectres combinant les typologies des défauts élémentaires correspondants.



## Les Engrenages

► Ambiguïtés de diagnostic

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



## Les Engrenages

- ▶ 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.

## Les transmissions par courroie

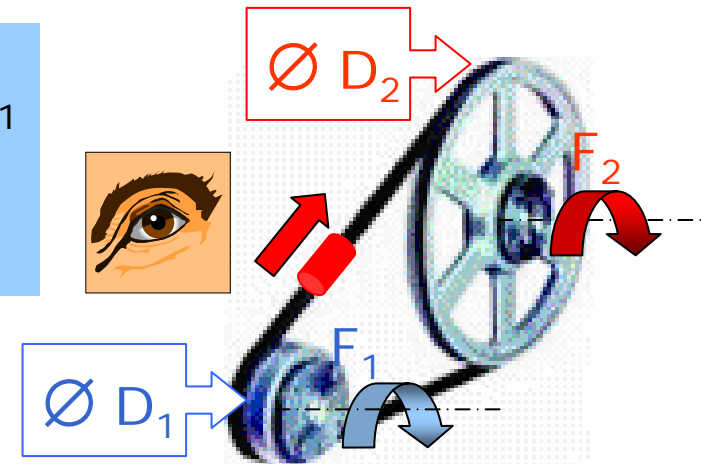
### ▶ Courroies trapézoïdales

#### ◆ Fréquence de passage de la courroie $F_p$

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



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



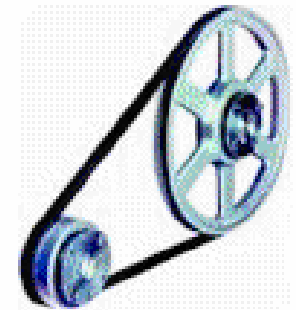
avec

$L$  = longueur courroie

$E$  = entraxe des poulies

### Les transmissions par courroie

- ▶ 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.
  - ◆ Une excentricité de poulie peut induire un phénomène vibratoire à la fréquence de rotation.
  - ◆ La tension de la courroie est perceptible sur les niveaux de bruits 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.





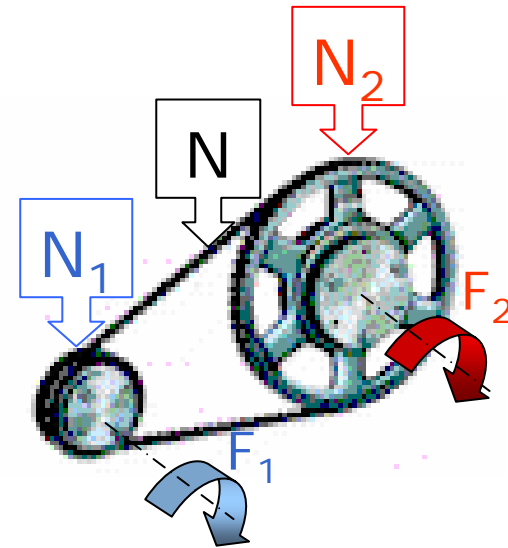
## Les transmissions par courroie

- ▶ Courroies crantées
  - ◆ Fréquence de passage  $F_p$  : Les problèmes de courroies (déformation, point dur, crevasse) génèrent des vibrations à la fréquence de passage :



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

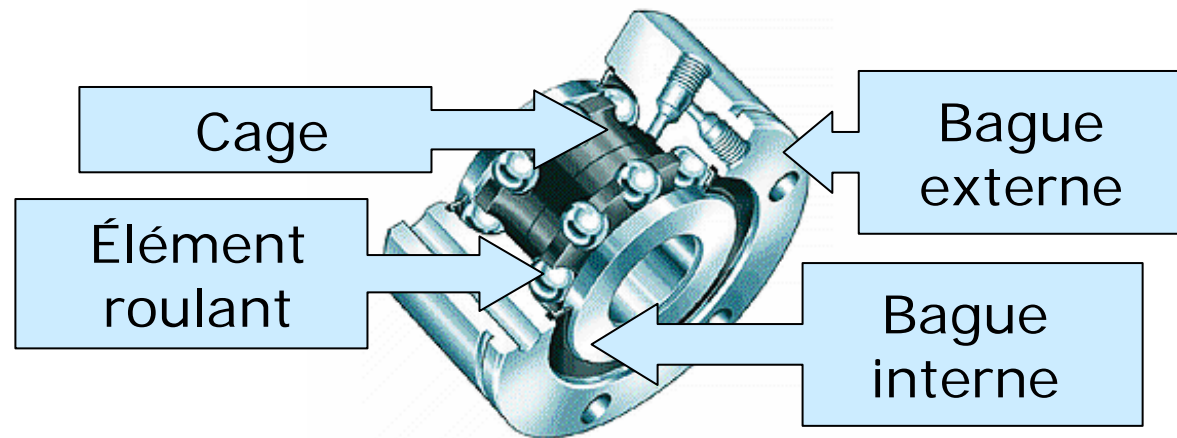
$N_1$  = Nbre dents poulie 1  
 $N_2$  = Nbre dents poulie 2  
 $N$  = Nbre dents courroie



## 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

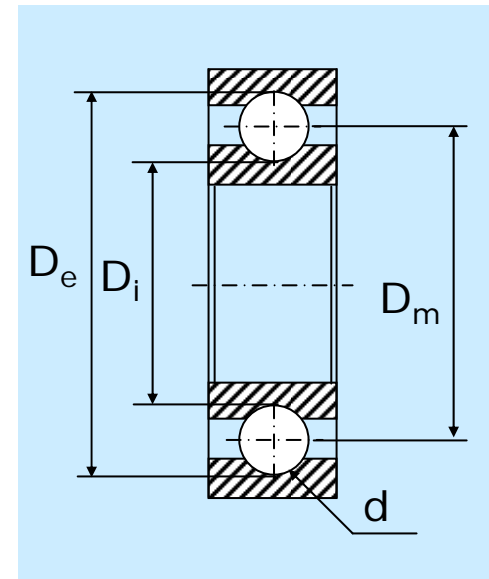
$D_i$  = diamètre du chemin de roulement de la bague interne

$D_m$  = diamètre primitif du roulement

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

$\alpha$  = angle de contact (roulement à contact oblique)

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



## Les Roulements

### ► 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 Roulements

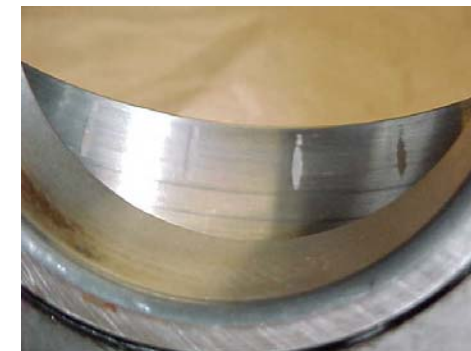
### ► Les dégradations

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 Roulements

### ► Les dégradations localisées

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

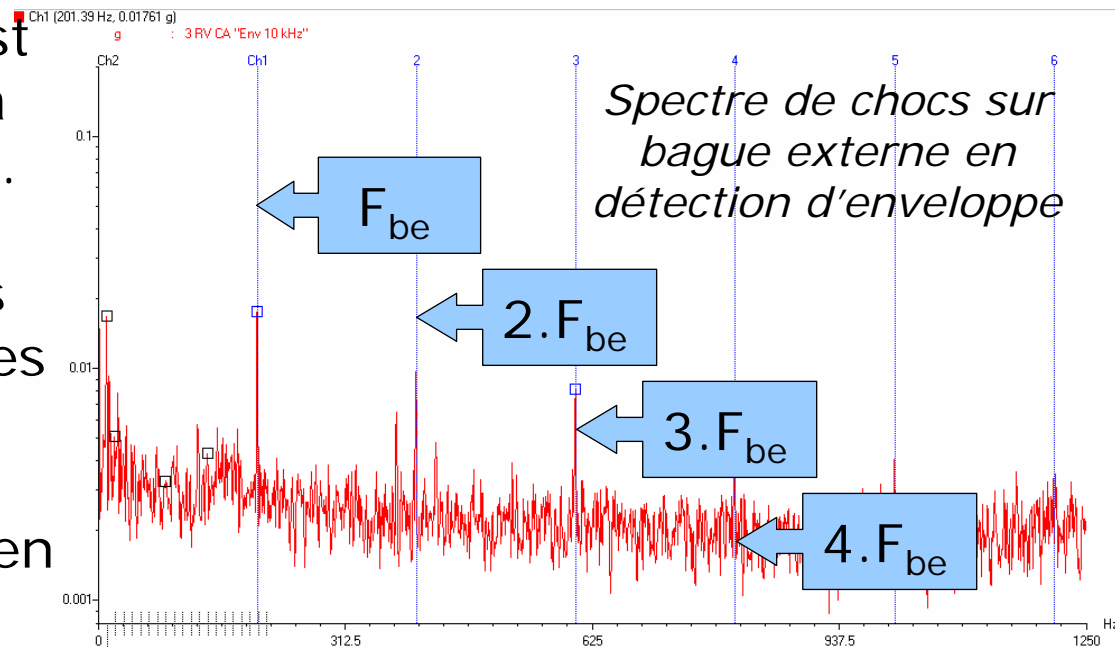
- |                              |   |                 |
|------------------------------|---|-----------------|
| ◆ Défaut sur bague externe   | ⇒ | choc à $F_{BE}$ |
| ◆ Défaut sur bague interne   | ⇒ | choc à $F_{BI}$ |
| ◆ Défaut sur élément roulant | ⇒ | choc à $2.F_B$  |

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

## Les Roulements

### ► 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.

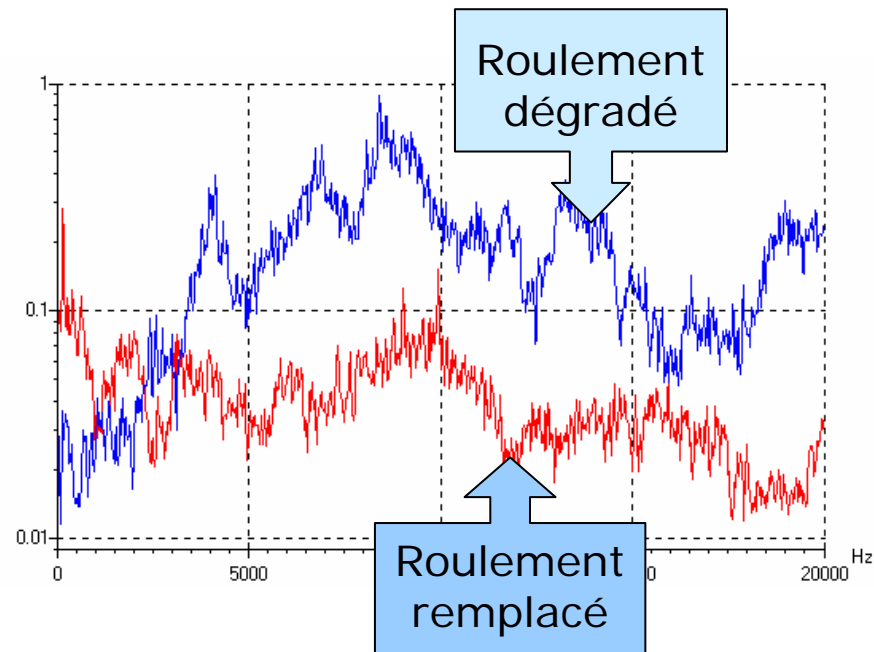


*Remarque : L'analyse du signal temporel peut aussi être pertinente dans ce contexte.*

## Les Roulements

### ► 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.



# Les Roulements

### ► 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

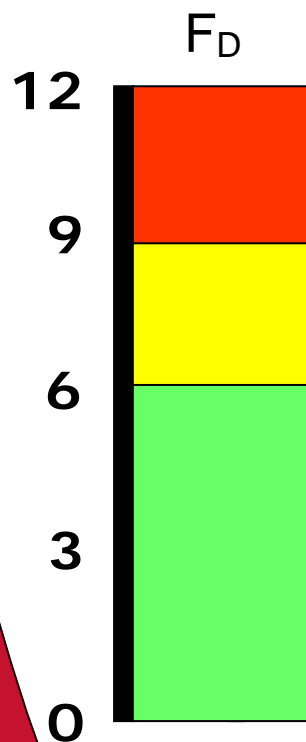
## Les Roulements

► 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					

## Les Roulements

### ► 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.

## Les Roulements

- ▶ 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 Roulements

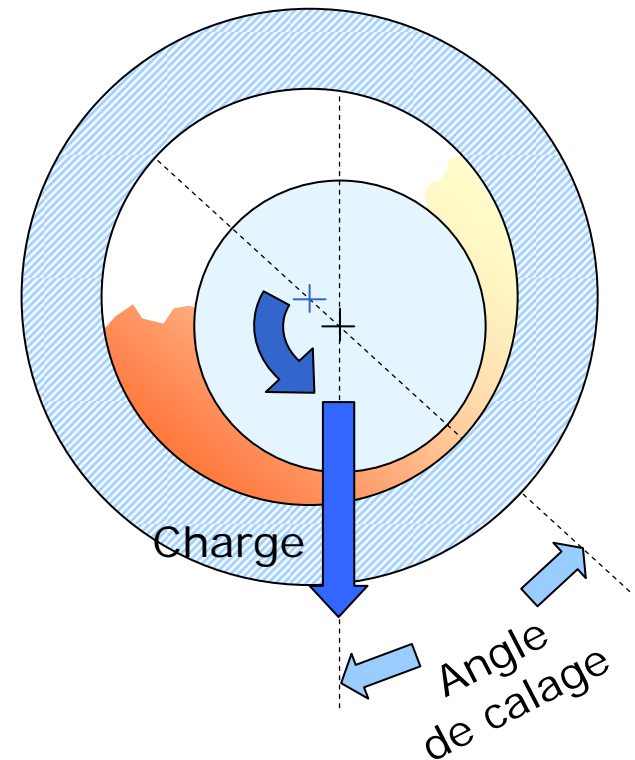
- ▶ Les techniques d'analyse complémentaires  
D'autres méthodes d'analyse sont utilisées dans le diagnostic des défauts de roulements. Elles seront explicitées en détail ultérieurement dans le chapitre consacré aux outils d'analyse spécifiques.  
Parmi les plus utilisées, nous retiendrons :
  - ◆ La Détection d'enveloppe
  - ◆ Le Cepstre
  - ◆ Le Kurtosis

## Les paliers lisses hydrodynamiques

### ► Généralités

Dans un tel palier, l'arbre est en équilibre sur le film d'huile entretenu par la rotation.

La position d'équilibre est définie par **l'angle de calage** qui est l'angle formé par la droite des centres et la direction de la charge de l'arbre dans le palier. L'angle de calage dépend de la technologie du palier et a une forte incidence sur la stabilité de la machine.



# Les paliers lisses hydrodynamiques

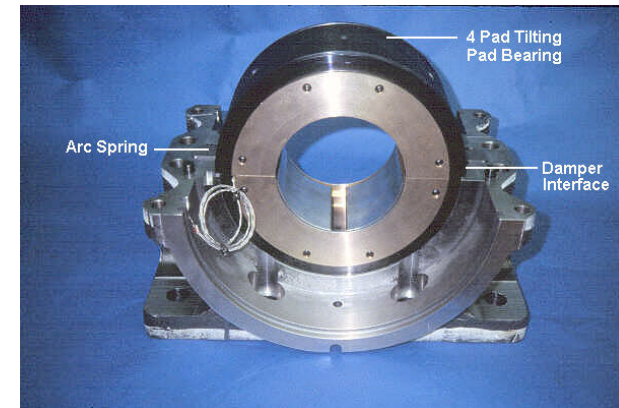
### ► Instabilités de paliers

Des **instabilités** de l'arbre dans le palier peuvent apparaître sous l'effet de variations de certains paramètres tels que :

- ◆ Charge appliquée au rotor
- ◆ Vitesse de rotation
- ◆ Viscosité de l'huile

L'instabilité se manifeste par une vibration auto-entretenu qui entraîne une **précession** du rotor, avec une période différente de la période de rotation, dont la fréquence est :

$0.23F_0 < F_{\text{instabilité}} < 0.63F_0$  selon la technologie du palier.



### Les paliers lisses hydrodynamiques

► Fouettement et tournoiement

Il existe deux types d'instabilités :

◆ Le tournoiement d'huile (Oil Whirl)

Instabilité dont la fréquence varie avec la fréquence de rotation du rotor.

◆ Le fouettement d'huile (Oil Whip)

Instabilité dont la fréquence coïncide avec la vitesse critique correspondant à la première pulsation propre du rotor (rotor en état flexible).

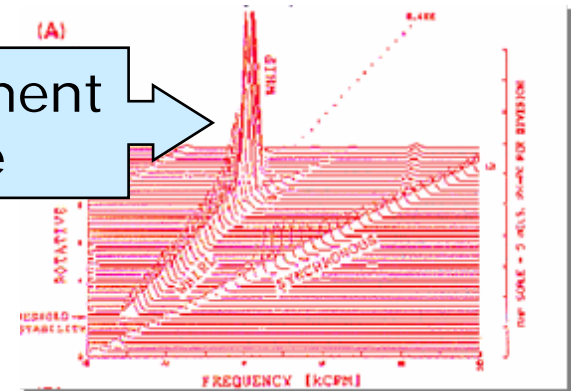


## Les paliers lisses hydrodynamiques

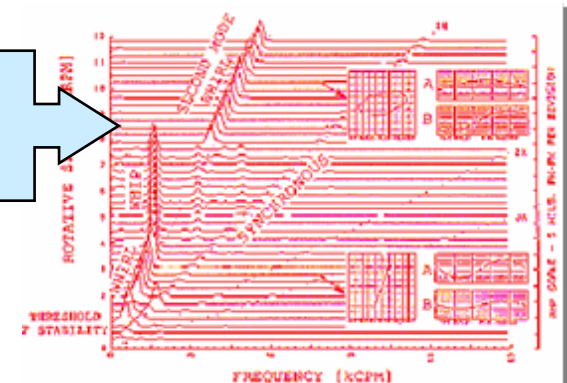
- ▶ Origine des instabilités  
Les instabilités de paliers peuvent apparaître au cours des phases transitoires des machines tournant à vitesse élevée (turbines).

Elles peuvent être observées sur des acquisitions spectrales **en cascade**.

Tournoiement d'huile



Fouettement d'huile



# Phénomènes particuliers aux turbomachines

### ► Les turbomachines : Généralités

Une **turbomachine** est un équipement dont le rôle est d'assurer un échange d'énergie mécanique entre un débit permanent de fluide et un rotor tournant autour de son axe.

On distingue :

#### ◆ Les turbomachines génératrices ou de compression

- ⇒ Pompes
- ⇒ Ventilateurs
- ⇒ Soufflantes
- ⇒ Compresseurs

#### ◆ Les turbomachines réceptrices ou de détente

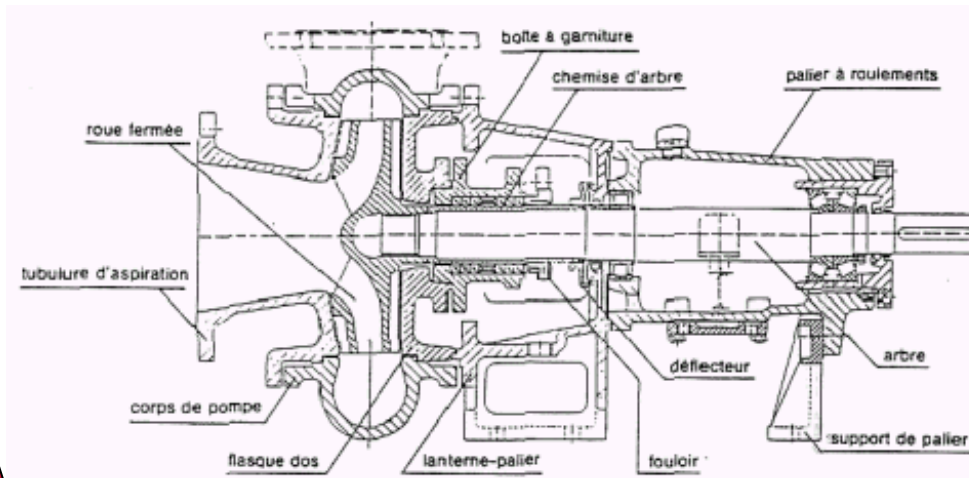
- ⇒ Turbines

# Phénomènes particuliers aux turbomachines

### ► Cas de la pompe centrifuge

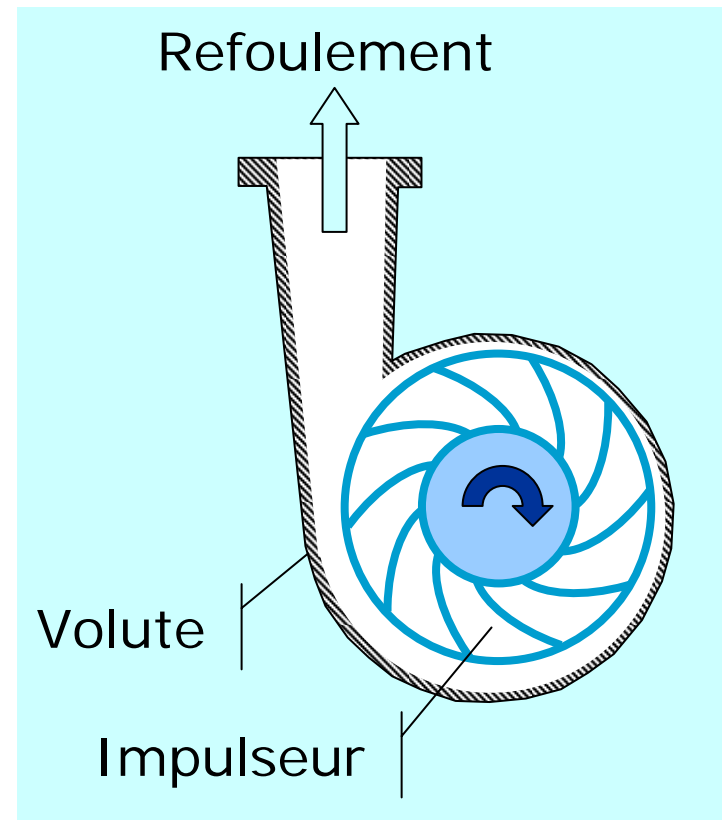
Les **pompes centrifuges** sont très répandues dans l'industrie en raison de leur très large domaine d'application.

#### ◆ Constitution mécanique



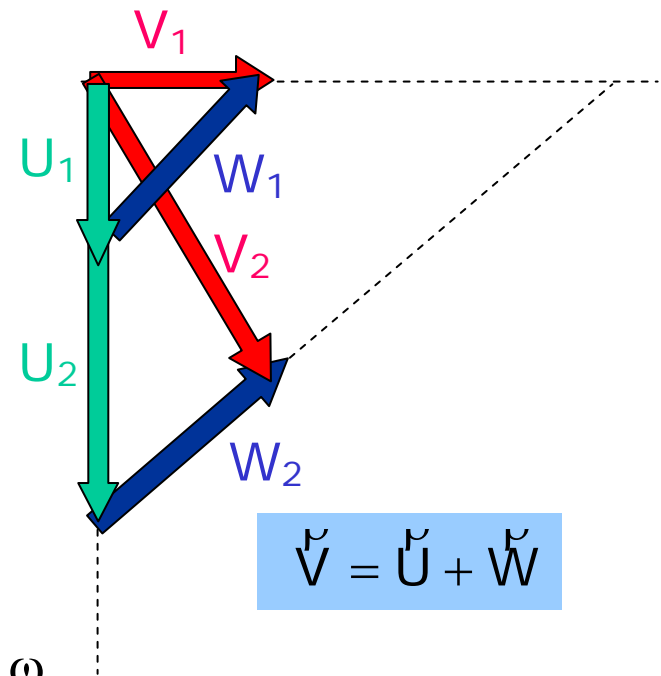
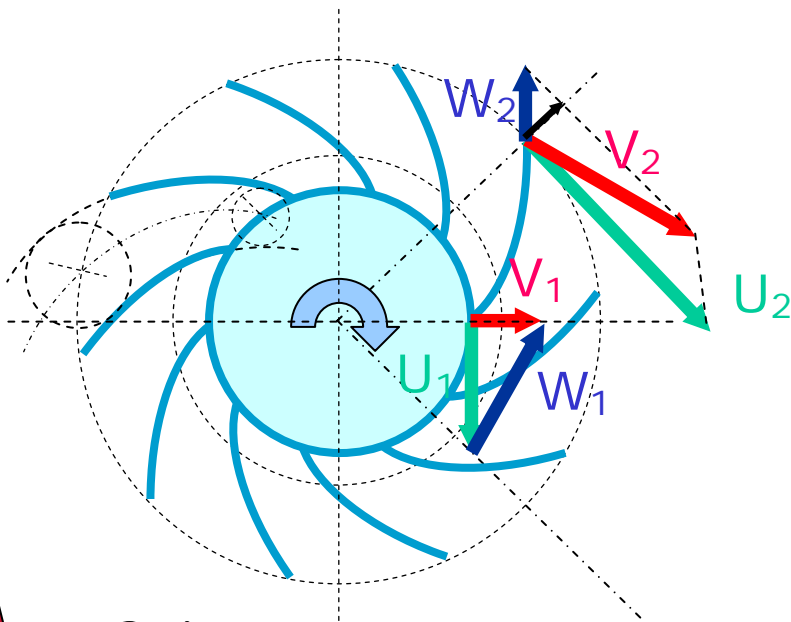
## Phénomènes particuliers aux turbomachines

- ▶ Principe de fonctionnement  
Le fluide pompé entre dans la **roue** ou **impulseur**, qui lui apporte de l'énergie en vitesse et en pression.  
A la sortie de l'impulseur, la **volute** canalise le fluide en réduisant sa vitesse d'écoulement, transformant en pression l'énergie cinétique acquise. Certains modèles sont équipés d'un **diffuseur** à ailettes fixes. Ceci permet d'équilibrer la pression autour de la roue.



## Phénomènes particuliers aux turbomachines

- ▶ Principe de fonctionnement : Triangle des vitesses



Soient :

$V_i$  vitesse absolue d'écoulement

$U_i$  vitesse d'entraînement :  $U = r \cdot \omega$

$W_i$  vitesse relative

$$\vec{V} = \vec{U} + \vec{W}$$

## Phénomènes particuliers aux turbomachines

- ▶ Phénomènes cinématiques : Le **passage d'aubes**

Soient :  $F_0$  la fréquence de rotation de la roue,

$N_1$  le nombre d'aubes de la roue

$N_2$  le nombre d'ailettes fixes du diffuseur

Les fréquences suivantes sont susceptibles d'apparaître :

⇒  $N_1.F_0$

⇒  $N_2.F_0$

⇒  $N_1.N_2.F_0$

et leurs harmoniques

Le suivi de toutes ces fréquences présente peu d'intérêt mais permet d'interpréter le spectre.

**Toutes les turbomachines sont susceptibles de présenter des phénomènes analogues (turbine, compresseur,...)**

## Phénomènes particuliers aux turbomachines

► Phénomènes non cinématiques : **Les turbulences**

Les turbulences d'écoulement des fluides produisent des variations de vitesse locales du fluide transporté.

Lorsque la vitesse d'un liquide augmente, sa pression diminue. Les variations de vitesse d'écoulement dues aux turbulences créent des variations de pression aléatoires qui excitent les structures et les tuyauteries.

Il en résulte une image vibratoire dont l'aspect est un bruit large bande, analogue à celui produit par la dégradation d'un roulement.

## Phénomènes particuliers aux turbomachines

► Phénomènes non cinématiques : **La cavitation**

La **cavitation** est provoquée par la vaporisation partielle du liquide véhiculé à l'intérieur de la pompe. Cette vaporisation intervient lorsque la pression statique supportée par le fluide devient inférieure à sa **tension de vapeur**.

Lors de la vaporisation, des bulles de gaz se forment au sein du liquide et sont transportées avec lui. Sous l'action du gradient de pression, elles implosent dès que la pression locale redevient supérieure à la tension de vapeur.

Les ondes de choc produites occasionnent des arrachements de matière, principalement au niveau des aubes de la roue et notamment sur les faces en dépression.



## Phénomènes particuliers aux turbomachines

► Phénomènes non cinématiques : **La cavitation**

La cavitation produit un bruit caractéristique de « cailloux roulés » ou de grenailage et provoque une excitation vibratoire des modes de résonance de la pompe et des tuyauteries proches.

Il en résulte une image vibratoire large bande analogue à celle résultant du phénomène de turbulences.

Il est à noter que la bande d'énergie à surveiller pourra être déterminée par comparaison des spectres avec et sans cavitation. : Le phénomène est en effet facile à reproduire en réduisant la pression à l'aspiration par action sur les vannes de sectionnement en amont de la pompe.