

TP1

ANALYSE DES VIBRATIONS DES MACHINES TOURNANTES (FALCON)



Prof. Smail ZAKI & Prof. Mohamed ABOUSSALEH

Année Universitaire : 2022-2023

Attention : Deux rapports identiques auront une note égale à 0.

Remarque Importante

Le rapport à rendre doit :

- Être clair et rédigé selon les normes de rédactions de rapport (page de garde, titre, table des matières, résumé, introduction, objectifs,, conclusions et recommandations).
 - Contenir les explications des objectifs visés par le TP.
 - Contenir les résultats et analyses.
 - Respect la chronologie fournie à la fin de ce fascicule.
-

L'objectif de ce travail pratique est de :

- Comprendre les bases de la MPC en utilisant l'analyse vibratoire des machines tournantes,
 - Prévoir les démarches pratiques à mettre en œuvre pour les applications industrielles,
 - Identifier les méthodes, normes et procédures nécessaires,
 - Utiliser un appareillage spécifique et réaliser l'analyse vibratoire des machines tournante.
-

I Introduction

1. Maintenance conditionnelle

a. Définition générale de la maintenance :

Maintenir c'est assurer la disponibilité de l'outil de production au coût optimal.

b. Les différents types de maintenances

- **Maintenance curative (après un arrêt ou une casse) :** Nécessite une équipe d'entretien surdimensionnée. Ne permet pas de maîtriser la disponibilité des équipements.
- **Maintenance systématique (selon un échéancier préétabli) :** Engendre le remplacement prématuré de composants. Ne permet pas de prendre en compte l'évolution réelle de leur état.
- **Maintenance conditionnelle :** Maintenance préventive subordonnée au franchissement d'un seuil prédéterminé d'un paramètre significatif de l'état de dégradation du bien.

- **Maintenance prévisionnelle** : Maintenance préventive subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs de la dégradation du bien, permettant de retarder et planifier les interventions.

2. Principe de la maintenance conditionnelle

Elle est basée sur la détection précoce d'un défaut et du suivi de son évolution. Ceci permet donc de programmer une intervention d'entretien le plus tard possible et uniquement quand cela devient indispensable.

Le succès grandissant de la maintenance conditionnelle des machines tournantes vient du fait qu'il existe des techniques efficaces d'identification de défaut et que les développements des capteurs, systèmes d'acquisition de données et des systèmes informatisés de traitement de ces données / mesures, permettent d'obtenir en temps réel et en langage clair des diagnostics, des alarmes, des pronostics.

Ceci permet donc d'identifier de façon très précise ce qu'il faut faire et le programmer en perturbant au minimum la fabrication.

Cette réduction des temps d'arrêt augmente donc la rentabilité des installations tout en diminuant les frais de maintenance.

3. Les avantages de la maintenance conditionnelle

- Diminution des arrêts de production ;
- Diminution du nombre d'arrêts de production intempestifs (la disponibilité des équipements) ;
- Suppression des arrêts systématiques
- Limitation de la gravité des dégradations (↑ coûts de réparations, amélioration de la sécurité)
- Programmation des réparations
- Approvisionnement des pièces de rechange en fonction des besoins réels (↓ coûts de stockage)
- Planification des interventions (↑ l'organisation des intervenants, ↓ coûts de maintenance, motivation du personnel par valorisation des tâches de maintenance)
- Interventions plus ciblées (localisation préalable des pannes, ↑ la qualité des réparations)

II Analyse vibratoire des machines tournantes

1. Principes de l'analyse vibratoire

Le fonctionnement de tout dispositif comportant au moins une pièce en mouvement s'accompagne de bruits et vibrations.

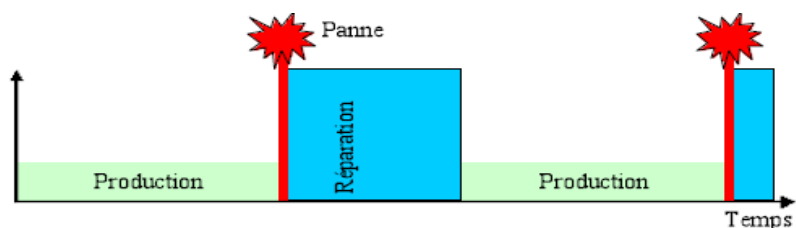
Ces vibrations sont caractéristiques de l'état du dispositif et constituent ce qu'on appelle sa signature vibratoire. Le prélèvement et le traitement de tout ou partie de cette signature permet de connaître rapidement l'état du dispositif et de suivre son évolution dans le temps sans effectuer le démontage. Toute machine comporte des pièces en mouvement qui exercent des efforts sur sa structure et engendrent des déformations. Ces déformations varient au rythme du mouvement et se traduisent par des déplacements de la surface de la structure par rapport à elle-même (déplacements absolues) qui constituent les vibrations.

Une machine idéale ne vibrerait pas car toute l'énergie serait employée pour effectuer le travail. La machine vieillissante, les pièces se déforment et de légers changements dans les propriétés dynamiques apparaissent. Les arbres se désalignent, les paliers et les roulements s'usent, les rotors se déséquilibrent, les jeux augmentent. Tous ces facteurs se traduisent par une augmentation de l'énergie vibratoire et donc d'une baisse de l'énergie efficace.

L'intérêt de signaux prélevés sur des machines tournantes est de pouvoir accéder, par l'intermédiaire de traitements adaptés, à la caractérisation des efforts dynamiques, et particulièrement ceux résultants d'excitations anormales.

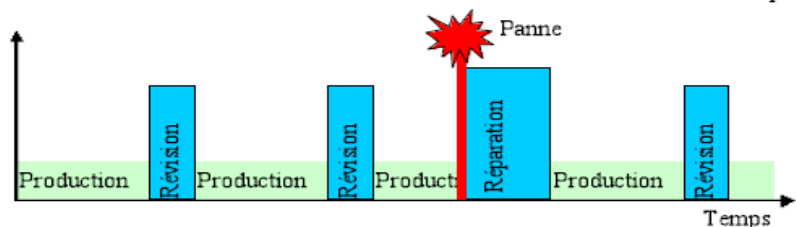
Maintenance Corrective

Réparation après l'incident



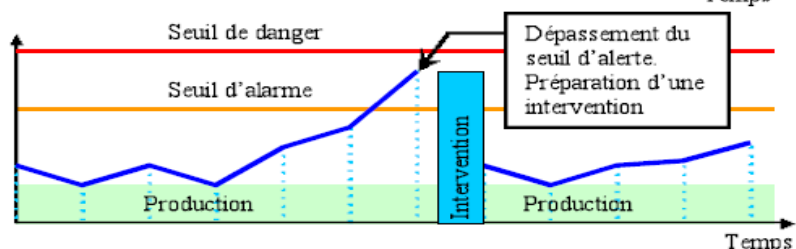
Maintenance Préventive Systématique

Intervention à intervalles réguliers
N' évite pas certains incidents



Maintenance Préventive Conditionnelle

Mesures à intervalles réguliers.
Détection du problème avant la défaillance prévue.

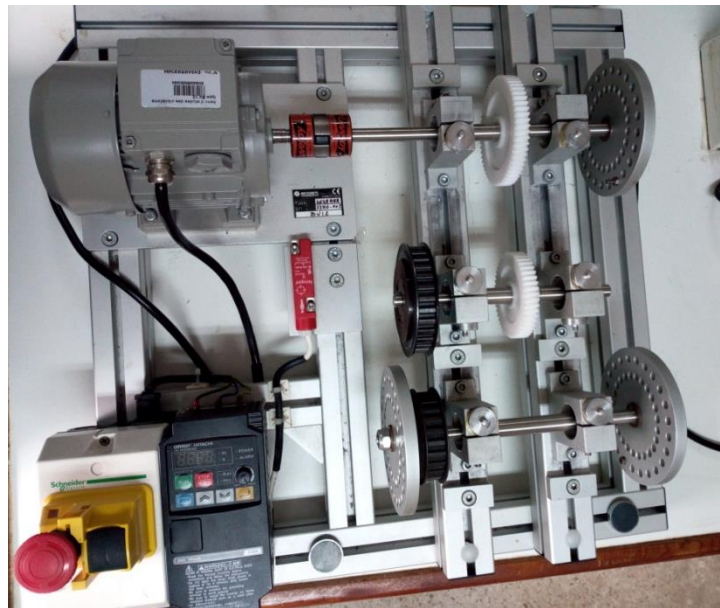


III Présentation de la maquette

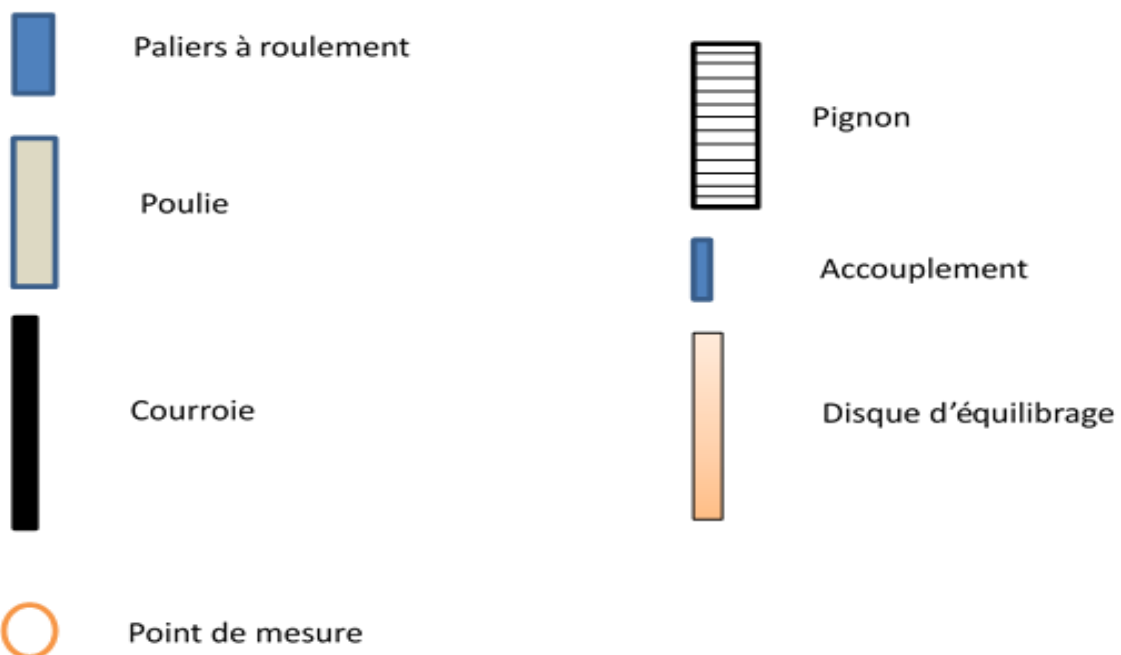
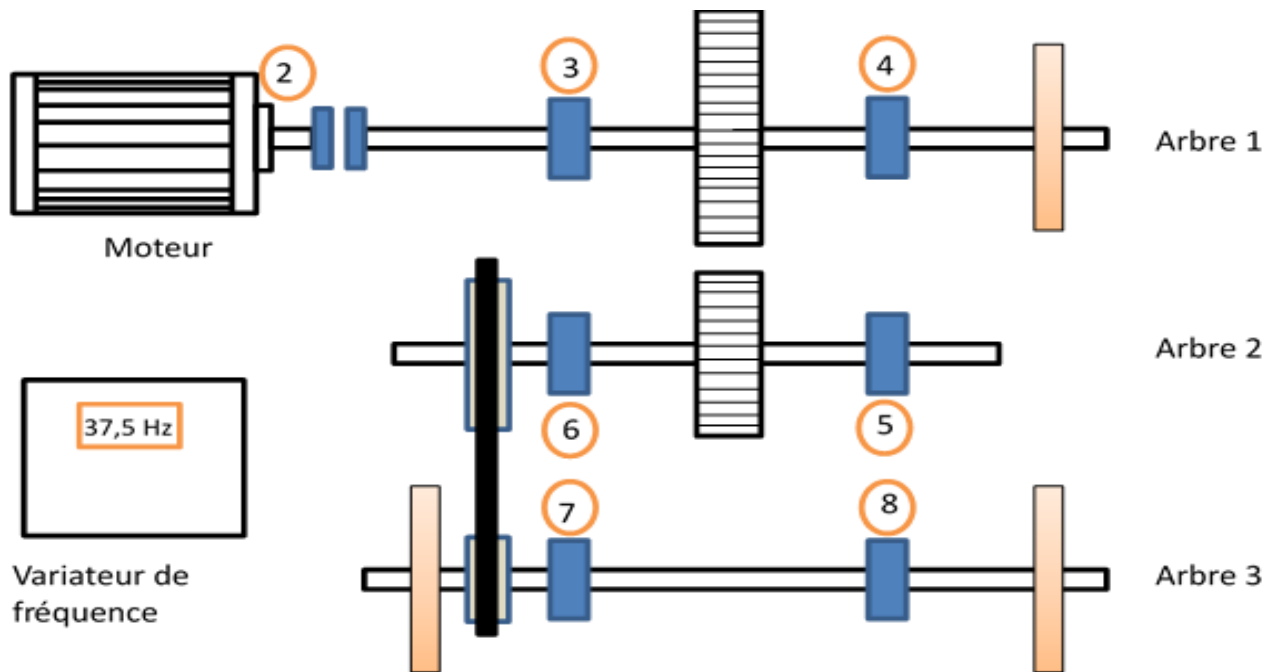
La maquette présente des éléments couramment rencontrés dans la conception de machines tournantes industrielles.

Elle permet de simuler la plupart des défauts classiques rencontrés sur les machines (balourd, lignage, roulements, engrènement.)

Il est cependant à noter que les niveaux observés ne sont pas forcément représentatifs de la réalité industrielle.



Le schéma ci-après présente les différents constitutifs de ce banc d'essai :



Pignon arbre 1	Pignon arbre 2	Poulie arbre 2	Poulie arbre 3	Courroie
Z1= 60 dents	Z2= 48 dents	P2= 30 crans	P3=24 crans	C1= 63 crans

IV GENERALITES

Les différentes manipulations seront réalisées en jouant sur la position des paliers.

Les butées en aluminium ne doivent pas être déplacées, car elles servent de référence.

IV.1 Etat initial :

Cet état correspond à une machine correctement réglée.

Ces réglages peuvent être à tous moments retrouvés en utilisant la cale de réglage. On dispose alors cette dernière entre les butées et les paliers.

IV.2 Spectres présentés et mesures éditées :

Pour la plupart des défauts mis en œuvre, un ensemble de spectres et un rapport de mesures sont édités avant et après génération du défaut, afin de mettre en évidence l'évolution des paramètres et des signatures spectrales associés au défaut.

Remarques : en raison de la sensibilité de la vibration à de nombreux facteurs, les valeurs obtenues peuvent changer de manière significative.

IV.3 Fréquence cinématiques : (A calculer suivant la valeur de F_0)

Arbre	Paramètres	Fréquence
1 Moteur	Balourd	F_0
	Lignage	$2xF_0, 3xF_0$ Avec $\text{Amp}(2xF_0, 3xF_0) > \text{Amp}(1x F_0)$
	Engrènement	$FG=60 \times F_0=48 \times F_1$ $2xFG=120 \times F_0$
2	Balourd	$F_1=60/48 F_0 = 1.25 F_0$
	Lignage	$2 \times F_1=2.5 \times F_0$ $3 \times F_1=3.75 \times F_0$ Avec $\text{Amp}(2xF_1, 3xF_1) > \text{Amp}(F_1)$
	Engrènement	$FG=60 \times F_0=48 \times F_1$ $2xFG=120 \times F_0$
3	Balourd	$F_2= 30/24 F_1 = 1.25 F_1=1,5625xF_0$
	Lignage	$2xF_2=3.125xF_0$ $3xF_2=4.6875xF_0$ Avec $\text{Amp}(2xF_2, 3xF_2) > \text{Amp}(F_2)$
	Courroie	F_P (Fréquence de passage de la courroie) $F_P=24/63xF_2=0.38xF_2=0.48xF_1=0.59xF_0$
	Balourd	Défaut localisé sur la bague extérieure $F_3=3.05xF_2=4.77xF_0$

IV.4 Méthodologie :

a. Organisation de la base de données associée au banc d'essai :

Chaque défaut est associé à une machine, les différentes machines sont identiques au niveau du synoptique, représentant le banc d'essai.

Elles diffèrent par les points de mesure et les paramètres associés : Localisation des points de mesure, gamme spectrales, bandes fines, seuils d'alarme...

Liste de machines :

- **Banc** → Mesure sur tous les paliers du banc
- **Balourd** → Etude du comportement du balourd
- **Lignage** → Etude du comportement du lignage
- **Engrènement** → Etude du comportement de la transmission par courroie
- **Courroie** → Etude du défaut roulement

b. Collecte des données :

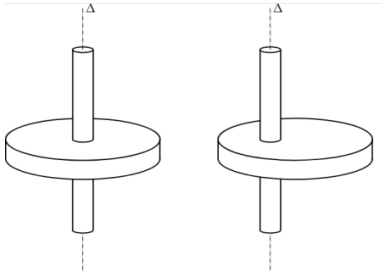
Les mesures sont réalisées selon le schéma classique adopté par nombre de sites industriels en matière de maintenance préventive par analyse vibratoire.

Les points de mesure et les paramètres associés sont définis dans des rondes programmées dans le logiciel.

Les rondes sont chargées dans le collecteur.

Les mesures sont alors réalisées selon la ronde définie, puis déchargées dans le PC afin d'alimenter la base de données associée.

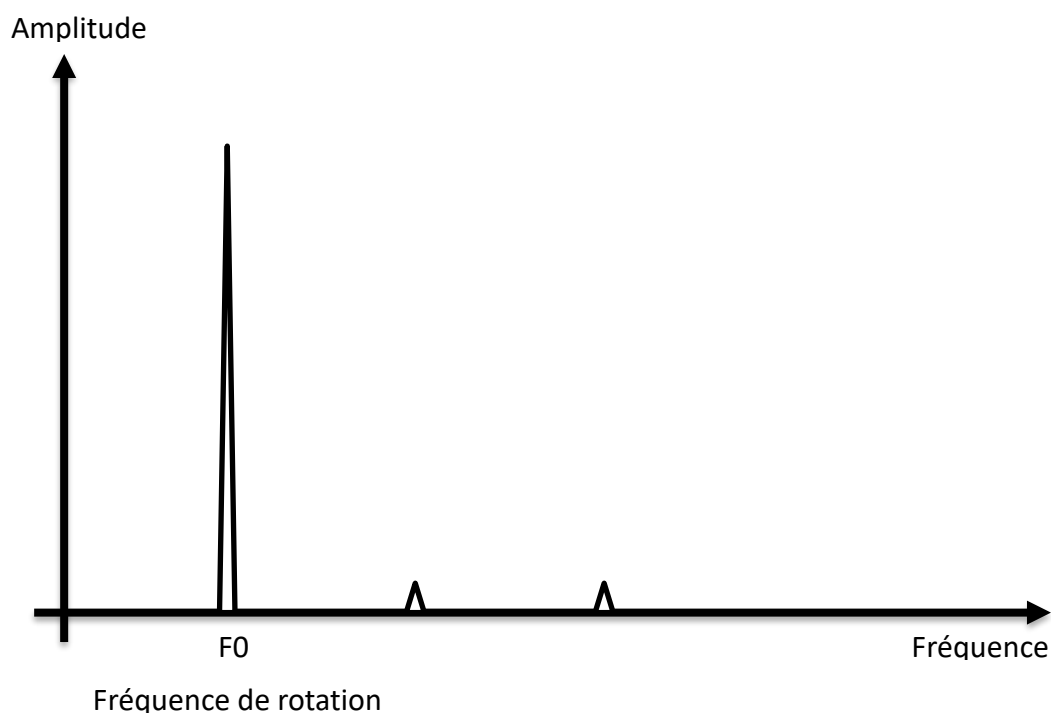
V BALOURD

Définition	Types
<p>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.</p> 	<p>Balourd statique</p> <p>L'axe d'inertie de l'arbre est parallèle à l'axe de rotation</p>
	<p>Balourd de couple</p> <p>L'axe d'inertie n'est plus collinaire à l'axe de rotation, les deux axes forment un angle</p>
	<p>Balourd dynamique</p> <p>La combinaison entre balourd statique et balourd de couple, et correspond au cas le plus courant</p>

Le balourd se manifeste par une énergie vibratoire localisée :

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

Typologie :



V.1 Mesure du balourd initial sur machine équilibré :

V.1.1 Mise en œuvre :

- ✓ Dégager l'arbre 1 afin que seul celui-ci soit entraîné par le moteur 1
- ✓ Régler le variateur de fréquence sur 50 et mettre en marche le moteur.

V.1.2 Mesure :

- ✓ Effectuer les mesures sur les différents points de la ronde « **Balourd1** »

V.2 Mesure du balourd initial sur avec Balourd

V.2.1 Mise en œuvre :

- ✓ Dégager l'arbre 1 afin que seul celui-ci soit entraîné par le moteur ;
- ✓ Régler le variateur de fréquence sur 50 et mettre en marche le moteur ;
- ✓ Ajouter une masse sur le plateau rainuré de l'arbre 1 (Exemple : Vis+écrou)

V.2.2 Mesure :

- ✓ Effectuer les mesures sur les différents points de la ronde « **Balourd2** »

V.3 Edition et impression des spectres

- ✓ Editer le rapport d'analyse « **Balourd 1 et Balourd 2** »
- ✓ Imprimer les spectres significatifs

V.4 Analyse des mesures :

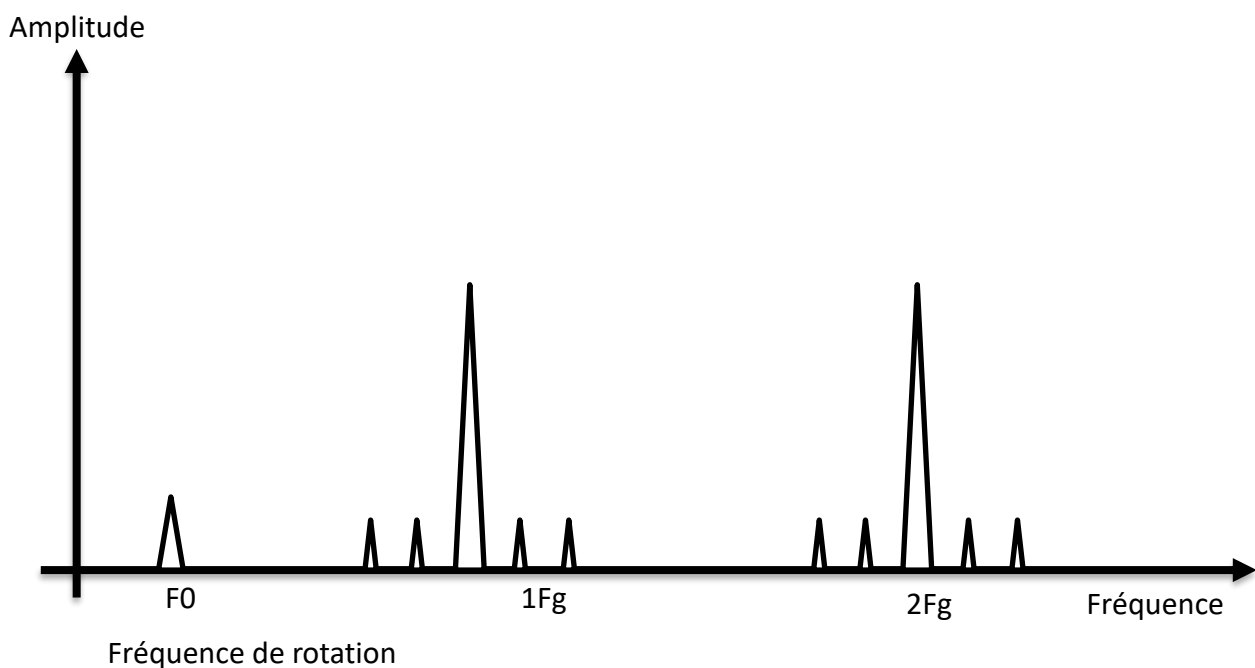
- ✓ Relation entre le niveau globale et la fréquence de rotation.
- ✓ Les directions et/ou localisations des capteurs où l'évolution est la plus marquée.

VI ENGRENEMENT

Définition d'un spectre d'un engrènement normal :

Un spectre normal montre habituellement 1x et 2x la fréquence d'engrènement (F_g). Ces fréquences peuvent également être accompagnées de bandes latérales à la fréquence de rotation. Tous ces pics restent de faible amplitude.

Typologie :



VI.1 Mesure sur machine équilibré :

VI.1.1 Mise en œuvre :

- ✓ Positionner l'arbre 1 à l'aide de la cale de réglage et des butées fixes du banc.
- ✓ Positionner l'arbre 2 afin de réaliser l'engrènement des 2 pignons en réduisant au maximum le jeu de fond de denture.
- ✓ Positionner l'arbre 3 en veillant à tendre au maximum la courroie afin de générer une charge sur les pignons.
- ✓ Régler le variateur de fréquence sur 50 et mettre en marche le moteur.

VI.1.2 Mesure :

- ✓ Effectuer les mesures sur les différents points de la ronde.

VI.2 Edition et impression des spectres

- ✓ Décharger la ronde.
- ✓ Editer le rapport d'analyse.
- ✓ Imprimer les spectres significatifs

VI.3 Analyse des mesures :

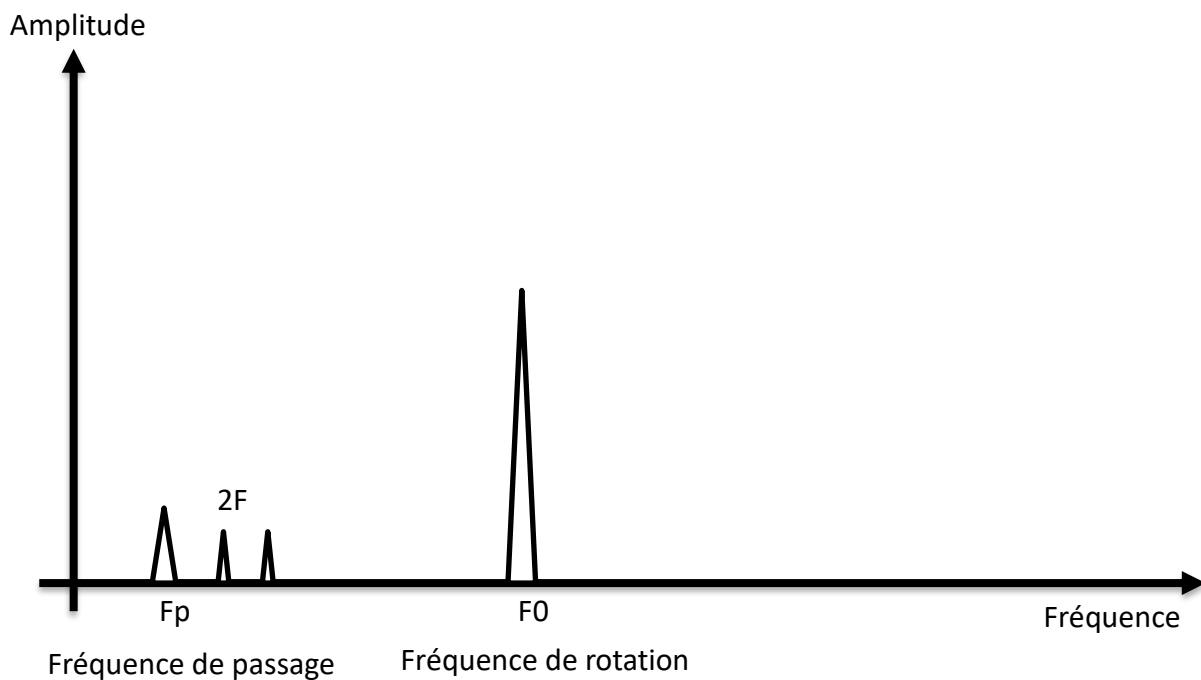
Constater sur les spectres la présence de la raie d'engrènement : $F_e = 60.F_0 = 1480 \text{ Hz}$ (pour $F_0 = 24.7 \text{ Hz}$), la présence de l'harmonique 2 de la raie d'engrènement : $2F_e = 2975 \text{ Hz}$ ainsi que les niveaux vibratoires importants qui en résultent.

VII COURROIE

Définition :

Le défaut de courroie se manifeste par une énergie vibratoire à la fréquence de passage de la courroie (F_p).

Typologie :



VII.1 Mesure sur machine équilibré :

VII.1.1 Mise en œuvre :

- ✓ Positionner l'arbre 1 à l'aide de la cale de réglage et des butées fixes du banc.
- ✓ Positionner l'arbre 2 afin de réaliser l'engrènement des 2 pignons en réduisant au maximum le jeu de fond de denture.
- ✓ Positionner l'arbre 3 en veillant à tendre au maximum la courroie afin de générer une charge sur les pignons.
- ✓ Régler le variateur de fréquence sur 50 et mettre en marche le moteur.

VII.1.2 Mesure :

- ✓ Effectuer les mesures sur les différents points de la ronde.

VII.2 Edition et impression des spectres

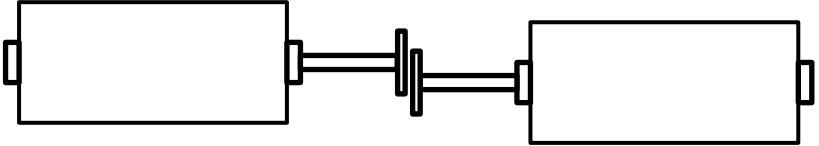
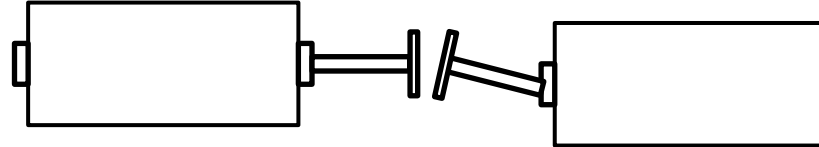
- ✓ Décharger la ronde.
- ✓ Editer le rapport d'analyse.
- ✓ Imprimer les spectres significatifs

VII.3 Analyse des mesures :

Constater sur les rapports de mesures et les spectres édités la présence de la fréquence de courroie (F_c).

VIII DELIGNAGE

Deux types de délignage existent :

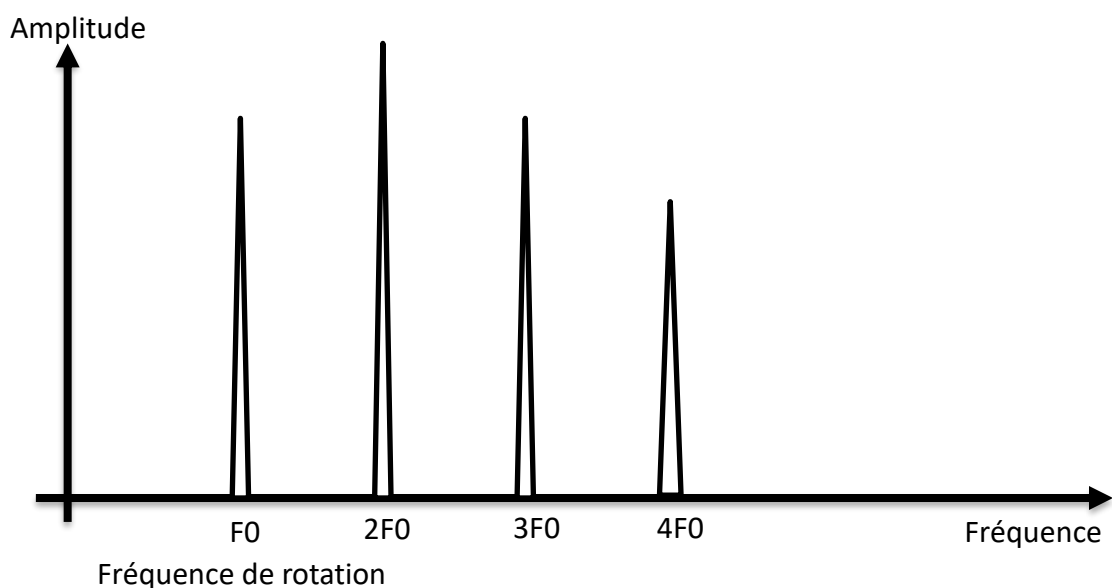
Délignage parallèle	<p>Les deux arbres accouplés ont des axes parallèles non confondus</p> 
Délignage angulaire	<p>Les deux arbres accouplés ont des axes sécants non parallèles</p> 

Le balourd se manifeste par une énergie vibratoire localisée :

- A la fréquence de rotation $2.F_0$, $3.F_0$ ou $4.F_0$ dans toutes les directions de mesures.

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

Typologie :



VIII.1 Mesure sur machine sans délignage :

VIII.1.1 Mise en œuvre :

- ✓ Dégager l'arbre 1 afin que seul celui-ci soit entraîné par le moteur.
- ✓ Positionner l'arbre 1 à l'aide de la cale de réglage et des butées fixes du banc.
- ✓ Régler le variateur de fréquence sur 50 et mettre en marche le moteur.

VIII.1.2 Mesure :

- ✓ Effectuer les mesures sur les différents points de la ronde « **Délignage 1** »

VIII.2 Mesure sur machine avec délignage angulaire

VIII.2.1 Mise en œuvre :

- ✓ Dégager l'arbre 1 afin que seul celui-ci soit entraîné par le moteur.
- ✓ Modifier la position de l'arbre en ne bougeant que le palier 4.
- ✓ Régler le variateur de fréquence sur 50 et mettre en marche le moteur.

VIII.2.2 Mesure :

- ✓ Effectuer les mesures sur les différents points de la ronde « **Délignage 2** »

VIII.3 Mesure sur machine avec délignage parallèle

VIII.3.1 Mise en œuvre :

- ✓ Dégager l'arbre 1 afin que seul celui-ci soit entraîné par le moteur.
- ✓ Modifier la position de l'arbre en bougeant parallèlement les paliers 3 et 4.
- ✓ Régler le variateur de fréquence sur 50 et mettre en marche le moteur.

VIII.3.2 Mesure :

- ✓ Effectuer les mesures sur les différents points de la ronde « **Délignage 3** »

VIII.4 Edition et impression des spectres

- ✓ Décharger la ronde « Délignage 1 ».
- ✓ Editer le rapport d'analyse.
- ✓ Imprimer les spectres significatifs.

- ✓ Décharger la ronde « Délignage 2 ».

- ✓ Editer le rapport d'analyse.
- ✓ Imprimer les spectres significatifs.

- ✓ Télécharger la ronde « Délégnage 3 ».
- ✓ Editer le rapport d'analyse.
- ✓ Imprimer les spectres significatifs.

VIII.5 Analyse des mesures :

Constater sur les rapports de mesures et sur les spectres édités l'augmentation du niveau vibratoire des harmoniques 2 et / ou 3 (50 Hz et 75 Hz) de la fréquence de rotation F0 (25 Hz).

Noter les directions et / ou localisations des capteurs où l'évolution est la plus marquée.

IX ROULEMENT

Définition :

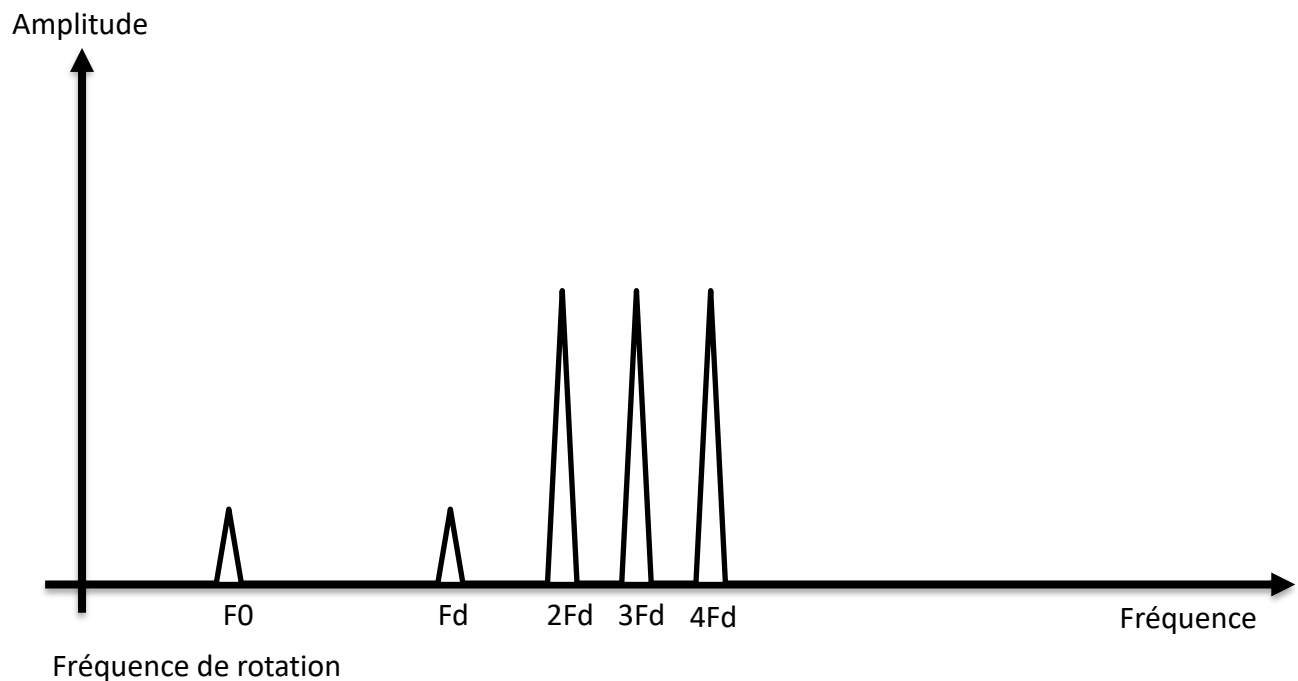
Les défauts de roulements se manifestent généralement par le passage d'une énergie vibratoire large bande en haute fréquence et/ou des familles d'harmoniques des fréquences cinématiques du roulement.

Une technique de mise en évidence de ce type de défauts s'appuie sur un outil de traitement du signal appelé « Détection d'Enveloppe »

Cet outil permet la mise en évidence des fréquences cinématiques propres aux défauts de roulements.

Dans notre cas, le défaut est localisé sur la bague externe du roulement du palier 8 et génère une énergie vibratoire à la fréquence (F_e) : $F_e = 4.83.F_0 = 120 \text{ Hz}$ pour $F_0 = 24.8 \text{ Hz}$

Typologie :



IX.1 Mesure sur machine équilibré :

IX.1.1 Mise en œuvre :

- ✓ Positionner l'arbre 1 à l'aide de la cale de réglage et des butées fixes du banc.
- ✓ Positionner l'arbre 2 afin de réaliser l'engrènement des 2 pignons en réduisant au maximum le jeu de fond de denture.
- ✓ Positionner l'arbre 3 en veillant à tendre au maximum la courroie afin de générer une charge sur les pignons.
- ✓ Régler le variateur de fréquence sur 50 et mettre en marche le moteur.

IX.1.2 Mesure :

- ✓ Effectuer les mesures sur les différents points de la ronde : points 7 et 8.

IX.2 Edition et impression des spectres

- ✓ Décharger la ronde.
- ✓ Editer le rapport d'analyse.
- ✓ Imprimer les spectres significatifs

IX.3 Analyse des mesures :

Constater la présence de la raie de défaut de roulement et de ses harmoniques.

Structure du compte rendu de TP

1. Introduction

2. Etude cinématique

3. Expérience 1 : Etat initial

- a. Description
- b. Résultats
 - i. NG
 - ii. AS
- c. Interprétation

4. Expérience 2 : Balourd

- a. Description
- b. Résultats
 - i. NG
 - ii. AS

c. Interprétation

5. Expérience 3 : Engrenage

- a. Description
- b. Résultats
 - i. NG
 - ii. AS
- c. Interprétation

6. Expérience 4 : Courroie

- a. Description
- b. Résultats
 - i. NG
 - ii. AS
- c. Interprétation

7. Expérience 5 : Balourd

- a. Description
- b. Résultats
 - i. NG
 - ii. AS
- c. Interprétation

8. EXPERIENCE 6 : Alignement

- a. Description
- b. Résultats
 - i. NG
 - ii. AS
- c. Interprétation

9. Conclusion et recommandation