

17/531.662

Université du 8 mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique



Mémoire de Fin d'Étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Option : Maintenance Industrielle

Présenté par : AIT YAHIA Chawki

***Identification du broutement en présence
des défauts sur un disque à partir des
signaux des efforts de coupe***

Sous la Direction de :

Dr. Boucherit Septi

Dr. DJAMAA Mohamed Cherif

Année universitaire 2013/2014

Remercîment

Le langage de dieu est à dieu le seul et unique, à qui nous adressons nos amples remerciements.

A vrai dire, l'espace de cette feuille ne suffira pas à contenir les noms des personnes qui nous ont aidés tout au long de notre formation et notre recherche.

Nous remercions également nos encadreurs Dr. DJAMAA Mohamed Cherif et Dr. Boucherit Septi pour avoir bien voulu nous diriger pour la réalisation de ce travail.

Nous tenons remercier aussi l'ensemble des enseignants du département de génie mécanique qui ont contribué amener à bien notre formation.

Et tous les étudiants du département génie mécanique, option :
"Maintenance industrielle" promotion 2014

Et tous ce qui a contribué de près ou de loin pour accomplir notre mission

A tous ces gents MERCI

14/3030

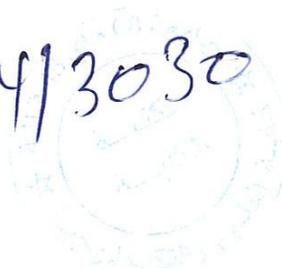


Table des Matières

Résumé

Introduction Générale.....	01
----------------------------	----

Chapitre I : Recherche Bibliographique et Notions Générales

I.1 Synthèse des travaux de recherche.....	03
I.1.1 Les vibrations d'usinage.....	03
I.1.2 Le phénomène du broutement.....	04
I.1.3 Les efforts de coupe.....	07
I.1.3.1 Modélisation des efforts de coupe par Merchant.....	07
I.1.3.2 Modélisation des efforts de coupe en série de Fourier.....	09
I.1.3.3 Simulation des efforts de coupe.....	11
I.1.4 Représentation Temps-fréquence des phénomènes vibratoires.....	12
I.2 Position du problème.....	14

Chapitre II : Théorie et applications de la transformée de Fourier fractionnaire

II.1 Introduction.....	15
II.2 La transformée de Fourier classique.....	15
II.3 La transformée de Fourier fractionnaire.....	16
II.3.2 Représentation intégrale.....	16
II.3.3 Propriétés de la FrFT.....	18
II.3.4 FrFT de fonctions usuelles.....	20
II.3.5 la FrFT dans l'analyse spectrale.....	21
II.3.6 La FrFT dans l'analyse cepstral.....	22
II.4 La transformée de Fourier fractionnaire à court terme.....	23
II.5 Estimation de la largeur du signal à partir des moments dans le domaine fractionnaire.....	24

Chapitre III : Partie expérimentale, Résultats et interprétations

III.1 Introduction.....	27
III.2 Equipements utilisés.....	27
III.2.1. Machine outil.....	27
III.2.2 La pièce à usiner.....	28
III.2.3 Outil de coupe.....	28
III.2.4 Mesure des efforts de coupe.....	28
III.3 Méthode de planification des essais.....	30
III.3.1 Méthode multifactorielle.....	30
III.3.2 Méthode unifactorielle.....	31
III.4 Résultats des essais	31
III.4.1 Premier cas : Disque avec un seul défaut.....	32
III.4.2 Deuxième cas : Disque avec deux défauts espacés 90°.....	36
III.5 Traitement des signaux par la FFT.....	37
III.6 Traitement des signaux par la TFFrCT.....	41
III.6.1 Le disque avec un seul défaut.....	41
III.6.2 Le disque avec deux défauts.....	44
III.7 Interprétation des résultats.....	45
Conclusion générale	48

Principales Notations et Symboles

Table des matières

Références Bibliographiques

Introduction générale

A ce jour, la mise en forme des pièces par enlèvement de matière est encore le procédé de fabrication le plus répandu malgré les progrès réalisés par d'autres procédés de mise en forme des matériaux (formage, fonderie...). Les performances croissantes des machines-outils, des outils de coupe et des logiciels de FAO ont aidé à maintenir le procédé d'usinage plus compétitif en termes de productivité et de qualité pour l'obtention des produits finaux avec des tolérances exigées sur la pièce. Cependant, la réalisation de pièces de faible rigidité avec des vitesses de rotation élevées favorise le développement de phénomènes vibratoires complexes. Pour certaines combinaisons de vitesse de rotation, d'avance et de profondeur de passe de fortes vibrations auto-entretenues ou broutement peuvent avoir naissance en provoquant une forte dégradation de la surface usinée et de l'outil coupant.

Les phénomènes de vibrations lors de l'usinage sont très problématiques pour les industriels, notamment sur les pièces de valeur, car elles entraînent des rebuts et une baisse de la productivité. L'analyse détaillée de ces phénomènes a suscité de nombreux travaux scientifiques depuis les années cinquante et qui ont permis d'identifier certaines causes liées à l'apparition du broutement en proposant des modèles assez aboutis qui caractérisent ce phénomène ainsi que des modèles liés aux efforts de coupe. Ces approches dégagent l'existence des valeurs optimales de la profondeur de passe, de l'avance et de la vitesse de rotation qui permettent de réduire l'impact du broutement. De nombreuses solutions de réduction des vibrations ont été publiées mais très peu sont appliquées sur des pièces complexes, notamment les pièces à parois minces, car les modélisations rencontrent encore des difficultés pour intégrer quelques phénomènes importants.

La détection du phénomène de broutement au cours d'usinage par l'analyse des signaux vibratoires ou ceux des efforts de coupe par des représentations temps-fréquence semble très prometteuse.

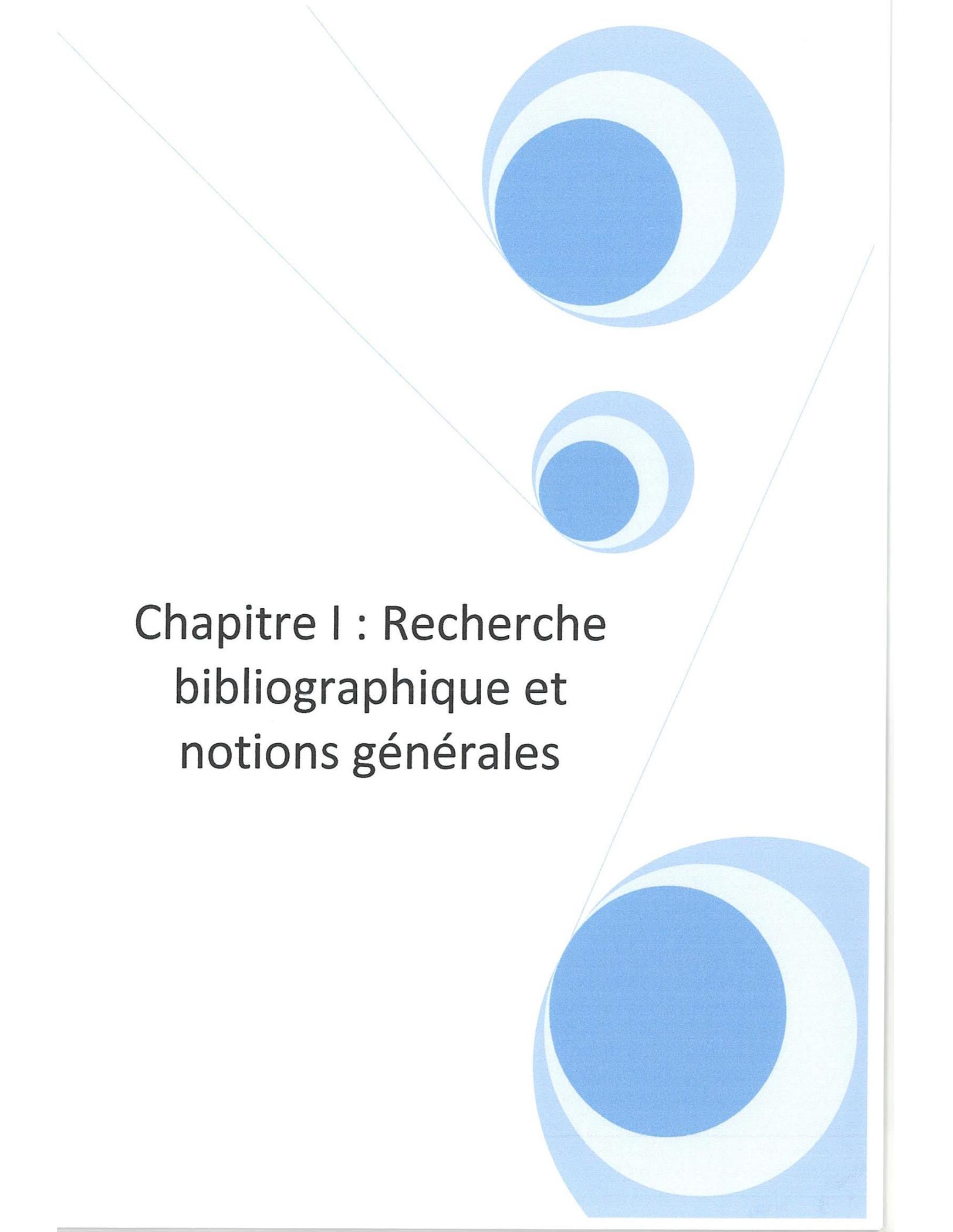
Le mémoire présentant ce travail comprend trois chapitres :

Le premier chapitre représente une synthèse bibliographique qui constitue une meilleure étape pour la connaissance des travaux, des compétences de recherche et des développements effectués dans le cadre des vibrations d'usinage. Il est constitué essentiellement des définitions techniques de phénomène de broutement, les efforts de coupe, la représentation Temps Fréquence (RTF) et la Transformée de Fourier Fractionnaire à Court Terme (TFFrCT).

Le deuxième chapitre est réservé à la théorie et la formulation mathématique de la transformée de Fourier fractionnaire à court terme et leur application.

En fin, le troisième chapitre est consacré à la partie expérimentale qui est basée sur l'usinage d'un disque mince sur un tour en respectant les plans d'expériences proposés. Le but est d'acquérir les signaux concernant les efforts de coupe en se servant de la plate-forme Kistler et de les interpréter à travers des représentations fréquentielles et temps-fréquence.

Ce mémoire est clôturé par une conclusion générale sur les travaux réalisés et les résultats trouvés et une perspective.

The page features an abstract graphic design with three overlapping circles in shades of blue and white, arranged in a triangular pattern. Two thin, light blue lines intersect at a point, forming a large 'V' shape that frames the central text. The circles are positioned at the top, middle, and bottom right of the page.

Chapitre I : Recherche bibliographique et notions générales

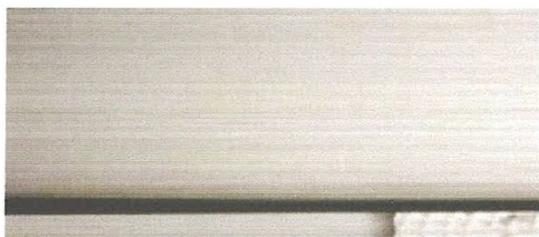
I.1 Synthèse des travaux de recherche

I.1.1 Les vibrations d'usinage

Dans le cadre, des travaux sur les vibrations d'usinage sont résumés dans [1]. Il s'agit de trois types de vibrations qui sont recensées. Premièrement les vibrations libres : Il s'agit de vibrations du système d'usinage (outil, broche, pièce) en réponse à un choc afin de déterminer les caractéristiques dynamiques de la structure. Ce type de vibrations n'intervient pas pendant l'usinage.

Le second type de vibrations comprend les vibrations forcées, qui apparaissent en réponse à un chargement cyclique. Elles sont très présentes en coupe interrompue. En tournage, elles peuvent être induites par un défaut d'excentricité de la pièce lors de son montage. En fraisage, elles sont plus inhérentes à l'opération, puisque par définition l'effort de fraisage est cyclique à la fréquence de dent. En plus de la dégradation de l'état de surface, ces vibrations induisent des défauts d'ordre géométrique sur les pièces.

Le troisième type de vibrations regroupe les vibrations auto-entretenues qui sont connues sous le nom de broutement. Ce phénomène intervient suite à une perturbation du système, qui peut parfois s'auto-entretenir et mener à des amplitudes vibratoires importantes. A la différence des vibrations forcées, la structure vibre à des fréquences distinctes de la fréquence de dent en fraisage ou de broche en tournage. Lorsqu'elles surviennent, ces vibrations affectent la rugosité des pièces et induisent des chocs sur les arêtes de coupe tout en générant parfois beaucoup de bruit. Les conséquences des vibrations auto-entretenues, sur une surface usinée, sont illustrées sur la figure 1.



Sans vibrations auto-entretenues



Avec vibrations auto-entretenues

Figure I.1 : *Détail d'une surface usinée*

I.1.2 Le phénomène du broutement

Une synthèse des travaux de recherche, consacrée à l'étude du broutement, a été présentée dans [1]. Taylor était parmi les premiers à lui accorder une attention digne de son importance et c'est lui aussi qui se rend compte pour la première fois de sa complexité et de ses implications. Même si le broutement n'était pas parmi ses sujets préférés, Taylor allait faire en 1907 une des premières remarques sur ce phénomène, qui reste encore valable, malgré les années qui se sont écoulées. D'après lui, le broutement est le plus obscur et le plus délicat des problèmes posés en usinage car il n'existe aucune formule qui puisse guider précisément le spécialiste à choisir le régime de coupe approprié sans faire apparaître le broutement.

Par la suite, de nombreux chercheurs ont développé différentes approches permettant d'expliquer le phénomène de broutement. Les études systématiques et les premières théories qui allaient essayer des explications des vibrations auto-entretenues (broutement) apparurent après 1945. Parmi ces premières études, on compte celles d'Arnold en 1948 qui a conclut que la présence d'amortissement négatif, tendant à déstabiliser le système, est la cause principale du broutement. Cependant, cette approche dynamique considérant les efforts dépendant de la vitesse de rotation ne permettait pas toujours d'expliquer le broutement.

L'ouvrage qui a peut être marqué le plus l'évolution des recherches sur le broutement est celui de Tobias, apparu en 1965 sur Les vibrations des machines-outils. Il comprend une description des modèles acceptés à l'époque et des études théoriques et expérimentales sur le broutement. Les causes physiques derrière ce phénomène ne sont pas encore complètement comprises et c'est pour cela qu'il est extrêmement difficile de trouver un remède sans réduire les taux d'enlèvement de matière. C'est toujours, cet auteur qui a insisté pour la première fois sur le caractère particulier du broutement par rapport aux vibrations forcées car il est du type auto-entretenu, tirant son énergie du processus de coupe lui-même et par conséquent, des actionneurs de la machine.

L'intérêt des chercheurs était de trouver un moyen de prédire les comportements de ce type pour les opérations d'usinage dans le but d'éviter l'usure des machines et des outils. Tobias en 1958 mettait en cause une

dépendance complexe de la force de coupe par rapport aux paramètres de régime de coupe choisis et un effet de régénération de la surface usinée. Cette dernière, se basant sur le constat que de nombreuses opérations d'usinage correspondent à des passes successives de l'outil sur une trace précédemment réalisée (figure 2), a largement été reprise depuis d'autres chercheurs. Le mouvement vibratoire actuel est directement influencé par l'historique de l'usinage. Un des paramètres à la source du phénomène est donc le temps entre deux coups de dent, ce temps de retard a un effet direct sur le déphasage entre les ondulations. Il est notamment un des éléments clés pour la modélisation des vibrations auto-entretenues.

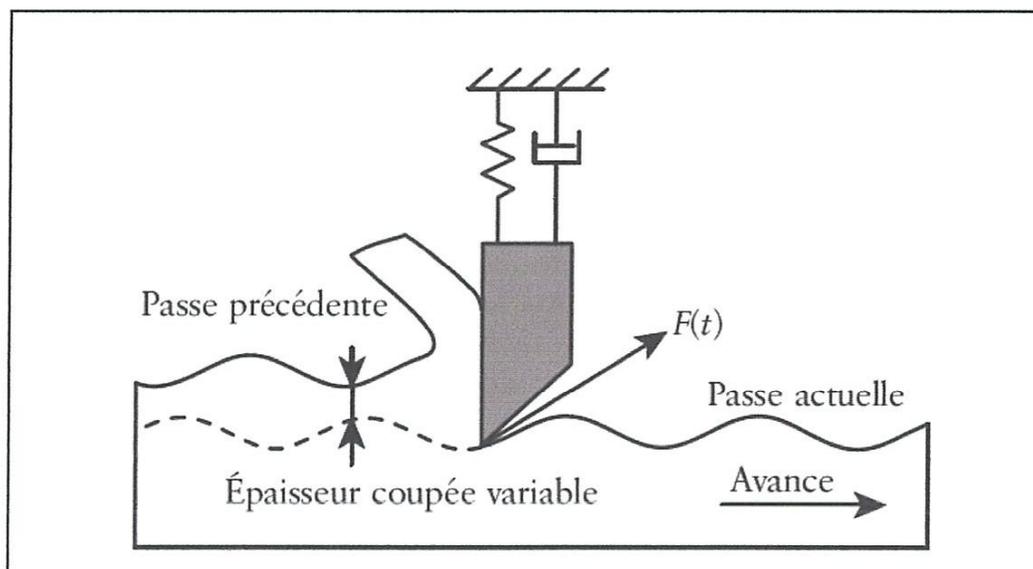


Figure 1.2 : Phénomène de régénération de la surface

Tlustý et Poláček expliquent également les vibrations auto-entretenues (broutement) par le phénomène de couplage entre deux modes propres orthogonaux. Ce couplage engendre un mouvement elliptique de l'outil sous l'effet des efforts de coupe, provoquant ainsi une variation de l'épaisseur de copeau et donc une variation des efforts de coupe (figure 3). Dans un autre travail de Tlustý avec Ismail, ils ont constaté que la variation des efforts de coupe entretient alors le mouvement vibratoire de l'outil, malgré l'amortissement. Ce phénomène non régénératif intervient après la régénération de la surface mais, il n'est pas la cause première de l'instabilité.

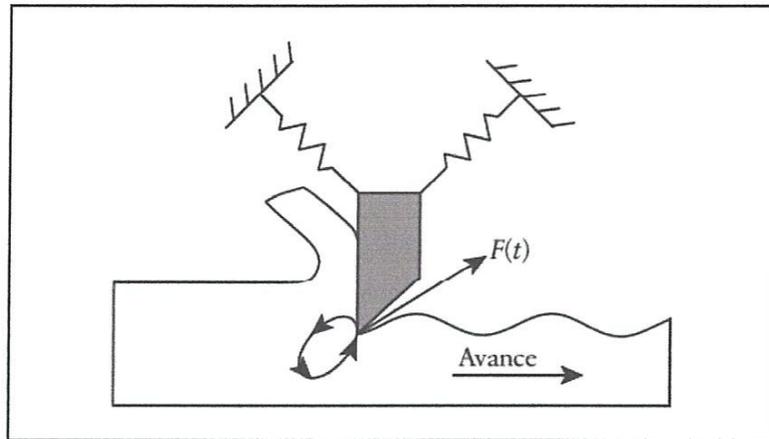


Figure I.3 : Phénomène de couplage des modes

Une autre approche, basée sur la formation du copeau, voit le broutement comme un phénomène de friction, intrinsèque à la coupe. Il peut alors être produit par le frottement, non-linéaire, entre la face de coupe de l'outil et la pièce selon Cook et plus tard Bailey en 1975. D'autres auteurs ont également montré l'effet du frottement entre la face de dépouille de l'outil et la pièce. Ce phénomène de talonnage permet également d'expliquer la stabilité de la coupe pour de faibles vitesses de coupe selon Keeg. Enfin, Hasting et al ont montré que les effets thermomécaniques liés à la coupe, tels que les déformations plastiques ou encore l'élévation de température peuvent être une cause mineure de broutement.

Dans la référence [2], l'auteur montre que les expérimentations ont prouvé une prépondérance de l'effet de régénération dans les origines du phénomène. Le cas des deux ou plusieurs modes couplés est une amélioration du modèle qui ne change pas les conditions d'amorçage des vibrations. Le modèle de Tobias (figure 4) généralement accepté à l'époque prenait en compte :

- une rigidité constante de la machine, une masse vibrante équivalente ;
- dynamiques des structures de machines outils ;
- une caractéristique linéaire du processus de coupe provenant d'un modèle simple de type Merchant dans lequel la force dépendait proportionnellement des dimensions du copeau ;
- une dépendance classique de l'épaisseur du copeau du passage antérieur de l'arête coupante. Ce qui introduisait un retard dans le système.

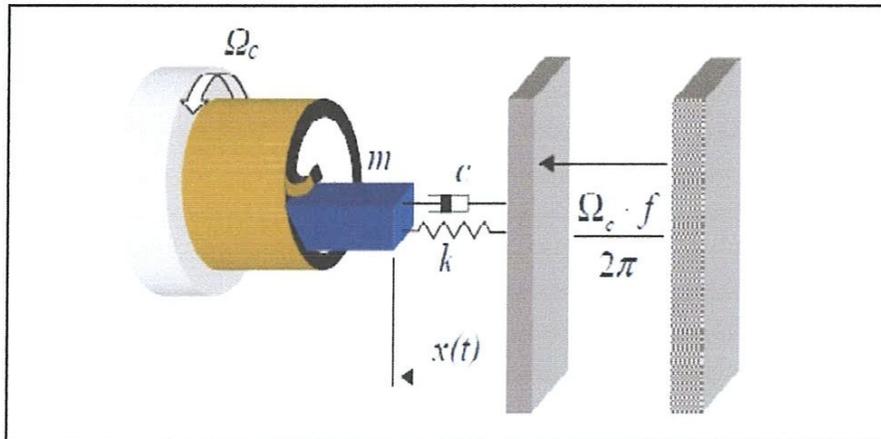


Figure I.4 : Modèle classique du brottement réduit à un axe

I.1.3 Les efforts de coupe

La connaissance des efforts de coupe est primordiale pour assurer le maintien en position de la pièce et éviter des déformations de l'outil ou de la pièce.

I.1.3.1 Modélisation des efforts de coupe par Merchant

La modélisation des efforts de coupe est à la base de toute étude sur les vibrations encourus d'usinage, étant donné qu'il s'agit de la source principale d'excitation de la structure [3]. Merchant propose le premier modèle de coupe en 1944 (figure 5) qui est largement repris par la suite. La modélisation de la coupe fait intervenir deux processus élémentaires, la formation et l'évacuation du copeau. Le but est de prédire la forme du copeau, les efforts de coupe et les échauffements de la pièce, du copeau et de l'outil. Les efforts de coupe sont issus de trois zones distinctes : la zone de cisaillement du copeau (zone primaire), la zone de frottement du copeau sur la face de coupe (zone secondaire), et la zone de frottement de l'outil sur la surface de la pièce (zone tertiaire). Actuellement, les méthodes numériques ainsi que l'évolution des ressources informatiques ont permis de grandes avancées dans le domaine.

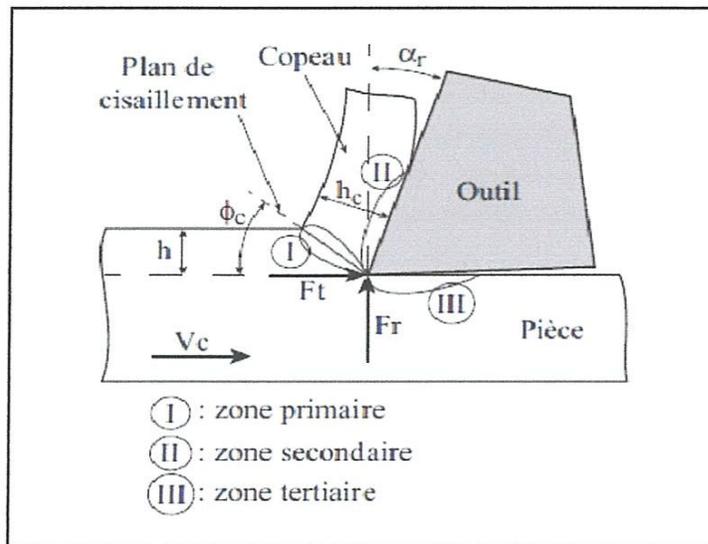


Figure I.5 : Modèle de coupe de Merchant

L'action de l'outil sur la pièce peut être décomposée en trois efforts simples :

- L'effort de coupe \vec{F}_C ;
- L'effort tangentiel \vec{F}_t ;
- L'effort radial \vec{F}_r .

D'une manière générale :

$$\vec{F}_r \approx \left(\frac{1}{2} \text{ à } \frac{2}{3} \right) \vec{F}_C \text{ et } \vec{F}_t \approx 0.3 \vec{F}_C$$

La valeur de l'effort de coupe est donnée par la formule :

$$F_C = K_C A_D$$

Avec :

- K_C : pression spécifique de coupe ;
- A_D : section du copeau.

I.1.3.2 Modélisation des efforts de coupe en série de Fourier

Les études expérimentales montrent une évolution non sinusoïdale de la force de coupe lorsque l'épaisseur de coupe varie d'une manière sinusoïdale [4]. La figure 6 montre un mouvement sinusoïdal de l'outil, alors que les forces de coupe et de pénétration présentent des distorsions avec une avance de phase pour le déplacement de l'outil. La force de coupe résultante peut être décomposée en série de Fourier de la forme suivante :

$$F_c(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\bar{\omega}t + b_n \sin n\bar{\omega}t)$$

Avec $\bar{\omega}$: la pulsation propre du système

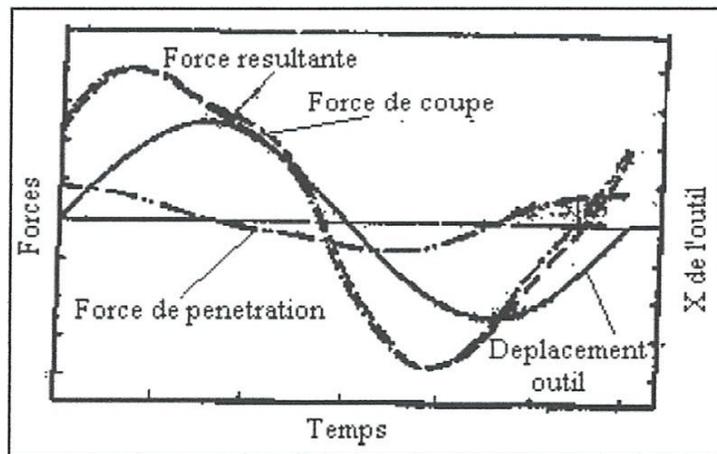


Figure 1.6 : Non-linéarité entre force de coupe et déplacement de l'outil

Le système usinant (pièce/outil) peut être modélisé par un système "masse-ressort-amortisseur" à un degré de liberté dans la direction normale au déplacement (figure 7, [3]). Cette modélisation assez simple permet de réduire considérablement la complexité des calculs et offre une précision acceptable dans le cas où l'étude vise à calculer la limite de stabilité de l'outil.

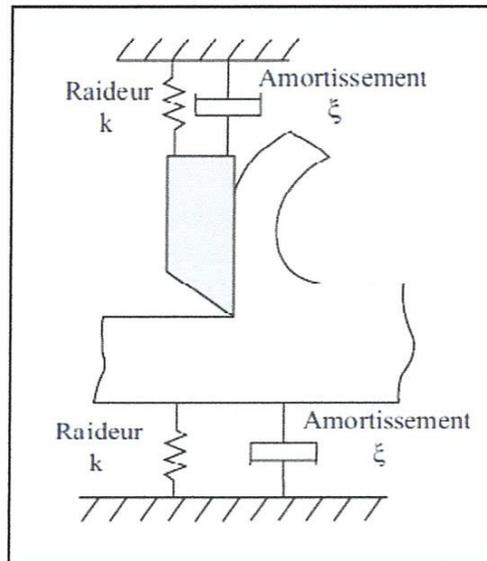


Figure 1.7 Modélisation outil-pièce

Donc, le problème du broutement peut être représenté par l'équation suivante :

$$m \ddot{x} + \xi \dot{x} + kx = F_c$$

Avec :

x : Déplacement généralisé,

m : la masse équivalente du système d'outil,

ξ : coefficient d'amortissement,

k : constant de rigidité.

Ecrit en suite dans l'espace de Laplace, ce système permet de définir le schéma fonctionnel du broutement comme le montre la figure 8.

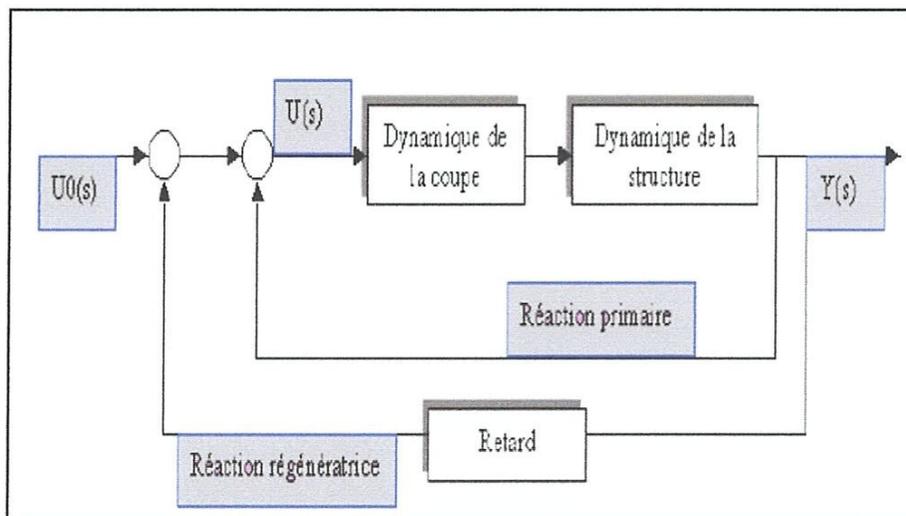


Figure 1.8 : Schéma fonctionnel du broutement

I.1.3.3 Simulation des efforts de coupe

Topal et Çoğun [5] ont fait un travail sur une méthode de compensation des efforts de coupe qui est basée sur la génération d'un chemin alternatif de l'outil assisté par ordinateur. Ils ont obtenu que cette méthode peut réduire l'erreur induite jusqu'à 90 % approximativement.

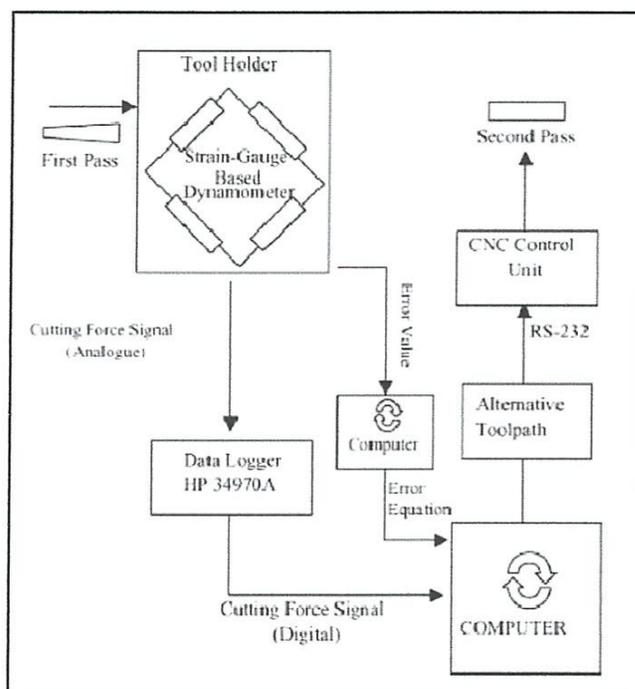


Figure 1.9 : Schéma illustrant la stratégie de compensation d'erreur

Petropoulos et al [6] ont constaté que la profondeur de coupe et l'avance de l'outil d'ordre variant sont les paramètres les plus influents sur les efforts de coupe tandis que la vitesse de coupe a un effet négatif moins important. Dans ce contexte, Li et al [7] ont fait une simulation permettant de choisir la profondeur et la largeur de coupe avec une grande précision de sorte que les efforts de coupe puissent être prévus avec précision.

Dans un travail présenté par Lacerda et Lima [8], une méthode analytique a été appliquée dans laquelle les forces dans la zone de contact entre l'outil et la pièce pendant l'usinage sont évaluées. Ils ont utilisé un algorithme basé sur un modèle mathématique dérivé de plusieurs essais expérimentaux avec un dynamomètre situé entre la pièce et la table de machine. Les résultats d'algorithme dépendent des propriétés physiques du matériau de la pièce et de la géométrie de l'outil lors de la prévision des vibrations de broutement.

I.1.4 Représentation Temps-fréquence des phénomènes vibratoires

Comme son nom l'indique, une représentation temps-fréquence (RTF) classique fournit une information concernant la variation du contenu spectral au cours du temps. Du point de vue mathématique, une RTF peut être vue comme une application qui associe à un signal $s(t)$ une fonction bidimensionnelle $P_s(t, f)$ dans le plan temps-fréquence. En fonction de leurs propriétés mathématiques, les RTFs peuvent être linéaires ou bilinéaires. Les RTFs linéaires, telles que la transformée de Fourier à court terme (TFFrCT) ou la transformée en Ondelettes (TO), sont particulièrement intéressantes pour des signaux multi-composantes, car la RTF globale s'écrit comme la somme de RTFs des composantes du signal. Les RTFs bilinéaires ont pour objectif louable de fournir la distribution énergétique temps-fréquence d'un signal.

Li et Liang [9] ont surveillé l'état d'une boîte à vitesse par l'analyse des signaux vibratoires à l'aide de la représentation Temps-Fréquence améliorée par GST (Generalized Synchrosqueezing Transform) qui est proposée pour rendre la RTF plus lisible. Ils ont trouvé que la représentation GST est une application conjointe pour la transformation des signaux et l'amélioration des RTF. L'efficacité de la méthode GST pour surveiller l'état de la boîte de vitesse a été démontré à la fois par simulation et essais expérimentaux.

Poudel et al [10] ont présenté une nouvelle approche pour la détection des défauts structuraux en utilisant la différence entre les déformées. Une transformée d'ondelette est effectuée sur les fonctions de différence entre les déformées avec la compréhension de leur contenu fréquentiel spatial, permettant d'afficher les modifications locales à cause des dommages structuraux.

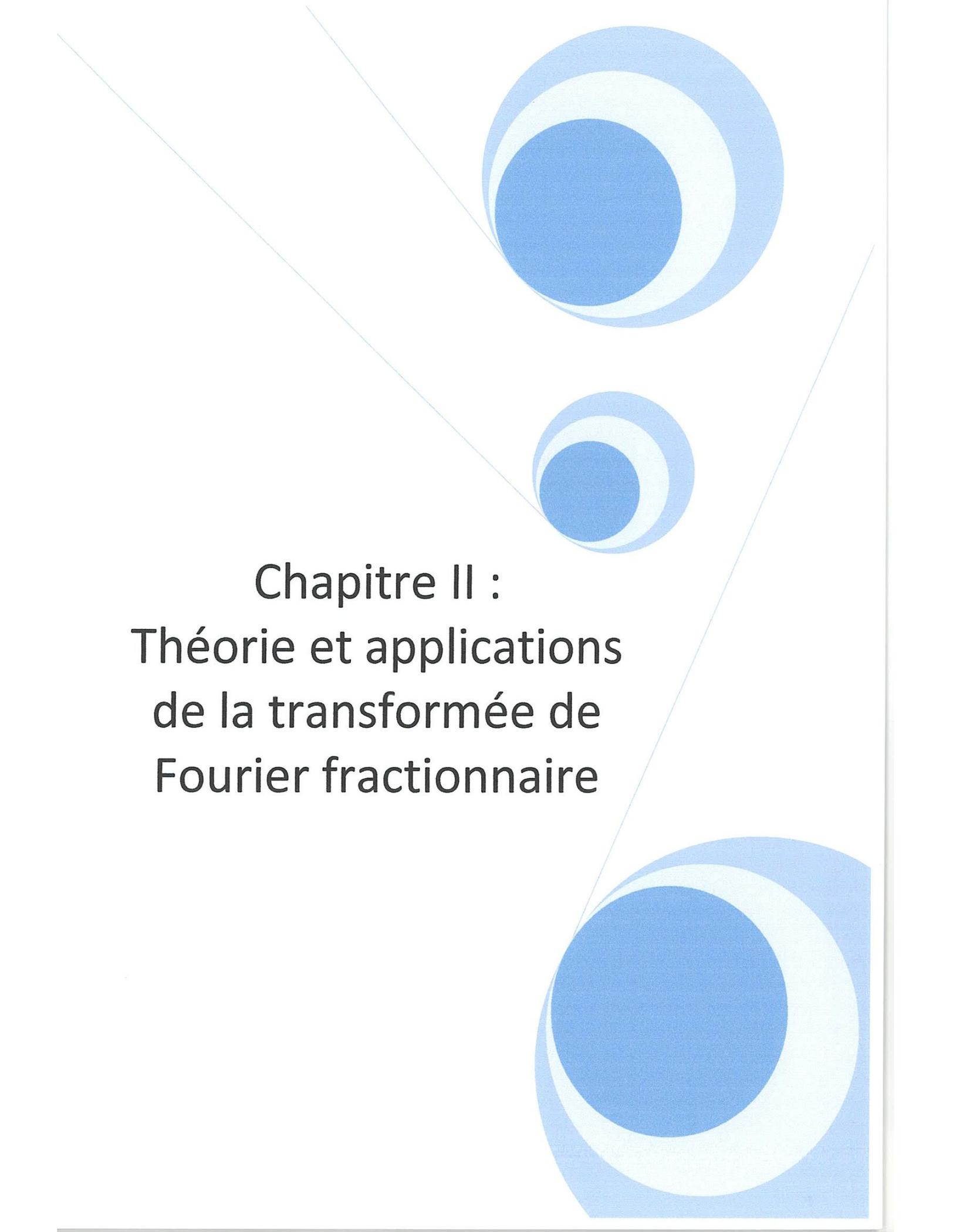
Xiang et al [11] ont développé une méthode pour la détection des fissures au niveau d'un arbre, elle est basée sur la combinaison entre la méthode d'ondelette et un algorithme algébrique, ce dernier est appliqué pour éliminer l'erreur fréquentiel entre la simulation numérique et les mesures expérimentales. Des résultats numériques et expérimentaux ont indiqué que la méthode proposée peut détecter les fissures au niveau des arbres avec haute performance.

Une généralisation de la FFT conventionnelle a donné naissance à la transformée de Fourier fractionnaire en introduisant un paramètre angulaire, noté α . Son succès a commencé à partir des années 1990 en particulier pour l'analyse des signaux pseudopériodiques afin de détecter les défauts d'engrenages [12] et pour l'analyse cepstrale [13]. Récemment, des spectrogrammes basés sur la transformée de Fourier fractionnaire ont été présentés donnant ainsi une meilleure résolution temps-fréquence des signaux contenant des composantes non-stationnaires [14]. Capus & Brown [15] ont montré que la transformée de Fourier fractionnaire est un outil puissant pour l'analyse des signaux pseudopériodiques. Cependant, elle ne parvient pas à localiser le contenu fréquentiel requis dans certaines applications. La transformée de Fourier fractionnaire à court terme est proposée pour résoudre ce problème car elle permet une représentation conjointe temps-fréquence avec une bonne résolution bidimensionnelle [16].

Luo et al [17] ont proposé une nouvelle technique pour la détection des défauts d'engrenages qui génère des signaux non stationnaires, elle est basée sur la combinaison entre l'algorithme multi-échelle et la transformée de Fourier fractionnaire (FrFT). Ils ont trouvé que la technique proposée est performante d'après les analyses des résultats des simulations et ceux expérimentaux.

I.2 Position du problème

Les pièces mécaniques peuvent contenir des fissures, des soufflures et des inclusions dures cachées dans la matière. En général, ces défauts structuraux peuvent être détectés par des techniques de contrôle non destructif mais ils peuvent aussi avoir naissance au cours des opérations d'usinage et remontent à la surface active de la pièce dont on exige souvent la bonne qualité et les dimensions précises. Dans ce travail, on propose l'analyse des signaux des efforts de coupe mesurés à chaque passe lors d'une opération de tournage d'un disque mince. A cet effet, des défauts vont être créés sur la surface cylindrique du disque sous forme de rainures longitudinales. Comme les signaux mesurés sont non stationnaires, la transformée de Fourier fractionnaire à court terme va être appliquée dans le but d'identifier le phénomène relatif au broutement dans le domaine fréquentiel s'il va eu lieu ainsi que les signatures des défauts dans le domaine temporel grâce aux représentations temps-fréquence qu'offre la TFFrCT.

The page features a decorative graphic consisting of three overlapping circles in shades of blue, arranged vertically. Two thin, light blue lines intersect at a point above the middle circle, forming a V-shape that frames the text. The circles are positioned in the top right and bottom right corners of the page.

Chapitre II :
Théorie et applications
de la transformée de
Fourier fractionnaire

II.1 Introduction

Il est fréquent de voir les espaces temps et fréquences comme deux espaces orthogonaux, le passage de l'un à l'autre s'effectue par la transformée de Fourier. Les distributions temps et fréquences utilisent en effet cette orthogonalité comme principe pour leur représentation dans le plan dit temps fréquences. Pourtant, cette orthogonalité trouve une justification mathématique et il est maintenant possible par l'intermédiaire de la transformée de Fourier fractionnaire (FrFT) de représenter le signal dans des domaines intermédiaires formant un angle non droit par rapport à l'espace-temps.

L'idée de la puissance fractionnaire de l'opérateur de Fourier paraît dans la littérature mathématique dès 1929. Elle a été intégrée par suite en mécanique quantique, en optique et en traitement du signal [18]. Son succès dans les publications a commencé à partir des premières années de 1990. Un état récent de l'art peut être trouvé dans Ozaktas et al, 2001[19].

II.2 La transformée de Fourier classique

Nous en rappelons quelques définitions et propriétés qui sont en rapport avec la transformée de Fourier classique continue (FT) afin que nous puissions justifier notre définition de la transformée de Fourier fractionnaire (FrFT) plus tard.

Sur une fonction de l'espace L comme par exemple, $L^2(\mathbb{R})$ l'opérateur de la transformée de Fourier classique $FT: f \rightarrow F$ et son inverse sont donnés par :

$$f(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-i\xi x} dx \quad (\text{II.1})$$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\xi) e^{-i\xi x} d\xi \quad (\text{II.2})$$

Dans les applications du traitement du signal, f est souvent un signal qui dépend du temps alors x dénote temps et ξ fréquence.

Par conséquent $f(x)$ est une description du domaine temporelle du signal et $F(\xi)$ une description du domaine fréquentielle.

En outre, il est vérifié immédiatement que :

$$(f^2 f)(x) = f(-x), (f^3 f)(\xi) = f(-\xi) \text{ et } (f^4 f)(x) = f(x)$$

Cela veut dire que pour $a \in \mathbb{Z}$ nous pouvons identifier l'opérateur F^a avec une rotation dans le plan (x, ξ) sur un angle $\alpha = a \frac{\pi}{2}$.

L'idée de la transformée de Fourier fractionnaire FRFT est de définir l'opérateur F^a pour tout $a \in \mathbb{R}$. Ce sera utile d'introduire quelque notation. Soit R_a la matrice de la rotation.

$$R_a = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} = e^{J\alpha}, \quad J = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (II.3)$$

En supposant que $(x_a, \xi_a)^T = R_a(x, \xi)^T$, les changements aux variables complexes $z = x - i\xi$, et que $z_a = e^{i\alpha}z$. Notant ça avec la notation $\xi = x_1$, et pour indiquer que $R_a f(x, \xi) = f(x_a, \xi_a)$ et pour indiquer que $R_a(x, \xi) = (x_a, \xi_a)$.

II.3 La transformée de Fourier fractionnaire

Ozaktas et al, 2001 [19] donnent six différentes définitions possibles de la FrFT et autres peuvent être trouvées ailleurs. Nous préférons suivre une approche intuitive et le définir la transformée de Fourier fractionnaire F^a comme une extension de de la transformée de Fourier classique (pour $a \in \mathbb{Z}$ à $a \in \mathbb{R}$).

La transformée de Fourier fractionnaire est une généralisation de la transformée de Fourier conventionnelle. Elle dépend d'un paramètre appelé angulaire, et noté a . Lorsque l'on place dans le plan temps-fréquence avec les axes temps-fréquences orthogonaux, la transformée de Fourier d'un signal peut être interprétée comme une rotation d'un angle de $\frac{\pi}{2}$. En suivant cette analogie avec les rotations, on va chercher une transformation qui agisse comme une rotation dans le plan temps-fréquence (et qui, par suit, coïnciderait avec la transformée de Fourier fractionnaire, que nous noterons des lors FrFT fractionnel Fourier Transforme).

II.3.1 Représentation intégral

La représentation intégral de la transformée de Fourier fractionnaire la plus courante F^a pour $a \notin 2\mathbb{Z}$.

$$f_a(\xi) = (F^a f)(\xi) = \frac{e^{-\frac{1}{2}(\frac{\pi}{2}\tilde{\alpha}-\alpha)} e^{\frac{1}{2}\xi^2 \cot \alpha}}{\sqrt{2\pi}|\sin \alpha|} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left\{ -i \frac{x\xi}{\sin \alpha} + \frac{i}{2} x^2 \cot \alpha \right\} f(x) dx \quad (II.4)$$

Où $\tilde{\alpha} = \text{sgn}(\sin \alpha)$

Précédemment nous avons défini

$$(F^\alpha f)(x) = f(x) \quad \text{Si } \alpha=0, \quad \text{et}$$

$$(F^\alpha f)(\xi) = f(-\xi). \quad \text{Si } \alpha = \pm\pi.$$

C'est logique avec cette représentation intégrale parce que pour ces valeurs spéciales, elle maintient que $\lim_{\xi \rightarrow 0} f_{a+\xi} = f_a$. Donc, avec cette limite propriété, nous pouvons supposer que la représentation intégrale tient sur tout l'intervalle $\alpha \leq |\pi|$. Quand $\alpha > |\pi|$, la définition est prise Modulo 2π et sera réduite à l'intervalle $[-\pi, \pi]$.

Définir la FrFT par cette transformation intégrale, nous pouvons dire que la FrFT existe dans $f \in L^1(\mathbb{R})$ et dans $(f \in L^2(\mathbb{R}))$ ou quand c'est une fonction généralisée. En effet, dans ce cas, l'intégrant dans (II.4) est aussi dans $f \in L^1(\mathbb{R})$ et dans $(f \in L^2(\mathbb{R}))$ ou c'est une fonction généralisée. Donc la FrFT existe exactement sous les mêmes conditions comme sous lesquelles la TF existe. Donc nous avons prouvé que :

Supposant $\alpha = a \frac{\pi}{2}$, alors la FrFT a une représentation intégrale :

$$f_a(\xi) = (F^\alpha f)(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} K_a(\xi, x) f(x) dx \quad (II.5)$$

Le noyau est définie comme suit : pour $\alpha \notin 2Z$, et avec $\tilde{\alpha} = \text{sgn}(\sin\alpha)$

$$K_a(\xi, x) = C_a \exp \left\{ -i \frac{x\xi}{\sin\alpha} + \frac{i}{2} (x^2 + \xi^2) \cot\alpha \right\}$$

$$\text{Avec } C_a = \frac{e^{-\frac{1}{2}(\frac{\pi}{2}\tilde{\alpha}-\alpha)}}{\sqrt{2\pi|\sin\alpha|}} = \sqrt{\frac{1-i\cot\alpha}{2\pi}}$$

Pour $\alpha \in 4Z$ la FRFT devient l'opérateur identité, d'où

$K_{4n}(\xi, x) = \delta(\xi - x), n \in Z$ et pour $\alpha \in 2 + 4Z$, c'est l'opérateur de parité :

$$K_{2+4n}(\xi, x) = \delta(\xi + x), n \in Z$$

Si nous restreignons a à l'intervalle $0 < \alpha < 2$, alors la F^α est un homomorphisme de $L^2(\mathbb{R})$ (avec l'inverse F^α). Cela est prouvé par Andrews et al [20].

II.3.2 Propriétés de la FrFT

Quelques unes des propriétés les plus importantes de la FrFT sont liées aux propriétés de son noyau. Nous allons d'abord étudier quelques propriétés du noyau :

$$K_{\alpha=a\frac{\pi}{2}}(\xi, x) = K_{\alpha=a\frac{\pi}{2}}(x, \xi) \quad (\text{Symétrie}) \quad (\text{II.6})$$

$$K_{-\alpha}(\xi, x) = [K_{\alpha}(\xi, x)] \quad (\text{Self-reciprocity}) \quad (\text{II.7})$$

$$K_{\alpha+2\pi}(\xi, x) = K_{\alpha}(\xi, x) \quad (\text{Périodicité}) \quad (\text{II.8})$$

$$K_{\alpha}(-\xi, x) = K_{\alpha}(\xi, -x) \quad (\text{Renversement des axes}) \quad (\text{II.9})$$

$$\int K_{\alpha_1}(\xi, x_1) K_{\alpha_2}(x_1, x) dx \quad (\text{Additivité}) \quad (\text{II.10})$$

$$\int K_{\alpha}(\xi, x_1) [K_{\alpha_2}(\xi', x)]^* dx = \delta(\xi - \xi') \quad (\text{complitude}) \quad (\text{II.11})$$

$$\int K_{\alpha}(\xi, x) [K_{\alpha}(\xi, x')]^* d\xi = \delta(x - x') \quad (\text{Orthonormalité}) \quad (\text{II.12})$$

On déduit de ces propriétés sur le noyau K les propriétés suivantes sur l'opérateur F^{α} :

- **Additivité** : $F^{\alpha_1} F^{\alpha_2} = F^{\alpha_1 + \alpha_2}$ (II.13)

- **Périodicité** : $F^{\alpha + 2\pi} = F^{\alpha}$ (II.14)

- **La FEFT est une transformation unitaire :**

- **Objectivité** : $F^{-\alpha} F^{\alpha} = I$ (II.15)

- **Conservation de l'énergie :**

$$\int f(x) f_2^*(x) dx = \int F_1^{\alpha}(\xi) [F_2^{\alpha}(\xi)]^* d\xi$$

$$\int |f(x)|^2 dx = \int |F^{\alpha}(\xi)|^2 d\xi \quad (\text{II.16})$$

En outre, nous allons présenter quelques propriétés de la FrFT liées à certaines opérations sur le signal $f(x)$. Là encore, on pourra faire un parallèle avec les propriétés analogues de la transformée de Fourier classique.

- **Propriété de renversement de l'axe :**

$$(F^{\alpha}\{f(-x)\})(\xi) = F^{\alpha}(-\xi) \quad (\text{II.17})$$

- **Propriété du complexe conjugué :**

$$(F^{\alpha}\{f^*(x)\})(\xi) = [F^{-\alpha}(-\xi)]^* \quad (\text{II.18})$$

- **Propriété de translation dans le temps :**

$$(F^{\alpha}\{f(x - \mu)\})(\xi) = F^{\alpha}(\xi - \mu \cos(\alpha)) e^{i\pi \mu^2 \cos(\alpha) \sin(\alpha)} e^{-2i\pi \mu \xi \sin(\alpha)} \quad (\text{II.19})$$

• **Propriété de modulation :**

$$(F^\alpha\{f(x)e^{i2\pi vx}\})(\xi) = F^\alpha(\xi - v\sin(\alpha))e^{2i\pi v \cos(\alpha)}e^{-i\pi v^2 \sin(\alpha)\cos(\alpha)} \quad (II.20)$$

• **Propriété de multiplication par x :**

$$(F^\alpha\{xf(x)\})(\xi) = \xi \cos(\alpha) F^\alpha(\xi) + \frac{i \sin(\alpha)}{2\pi} \cdot \frac{dF^\alpha(\xi)}{d\xi} \quad (II.21)$$

• **Propriété de différenciation :**

$$(F^\alpha\{f'(x)\})(\xi) = i2\pi\xi \sin(\alpha) F^\alpha(\xi) + \cos(\alpha) \cdot \frac{dF^\alpha(\xi)}{d\xi} \quad (II.22)$$

• **Propriété du produit mixte :**

$$(F^\alpha\{xf'(x)\})(\xi) = \sin(\alpha) (i2\pi\xi^2 \cos(\alpha) - \sin(\alpha))F^\alpha(\xi) + \xi \cos(2\alpha) \cdot \frac{dF^\alpha(\xi)}{d\xi} + i \frac{\sin(2\alpha)}{4\pi} \cdot \frac{d^2F^\alpha(\xi)}{d\xi^2} \quad (II.23)$$

• **Propriété de division par x :**

$$\left(F^\alpha\left\{\frac{f(x)}{x}\right\}\right)(\xi) = -i \frac{2\pi}{\sin(\alpha)} e^{i\pi \cot(\alpha)\xi^2} \int_{-\infty}^{\xi} e^{-i\pi \cot(\alpha)x} F^\alpha(x) dx \quad (II.24)$$

• **Propriété d'intégration :**

$$\left(F^\alpha\left\{\frac{f(x)}{x}\right\}\right)(\xi) = -i \frac{2\pi}{\sin(\alpha)} e^{i\pi \cot(\alpha)\xi^2} \int_{-\infty}^{\xi} e^{-i\pi \cot(\alpha)x} F^\alpha(x) dx \quad (II.25)$$

• **FrFT d'un produit :**

La FrFT d'un produit de $f(x)$ par $g(x)$ est obtenu en multipliant la FrFT par une fonction de pépiement (chirp), puis en convole avec la TF de g et enfin on module le tout par une chirp et une constante. On peut se référer par exemple à [21] pour plus de détails.

$$(F^\alpha\{f(x)g(x)\})(\xi) = |\csc(\alpha)| e^{i\pi\xi^2 \cot(\alpha)} * \int_{-\infty}^{\infty} X^\alpha(v) e^{-i\pi v^2 \cot(\alpha)} * G^\alpha([(u-v)\csc(\alpha)]) dv \quad (II.26)$$

• **FrFT d'un produit de convolution :**

Nous nous référons de nouveau à la référence [21]. Nous prenons de nouveau $f(x)$ et $g(x)$ deux fonctions de $L^1 \cap W$ et on considère leur convolution :

$$W(x) = (f * g)(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)g(x - \tau)d\tau \quad (II.27)$$

Qui est dans $L^1(\mathbb{R})$. Nous en prenons donc la transformée de Fourier classique et nous avons :

$$W(\xi) = F(\xi) \cdot G(\xi) \quad (II.28)$$

Avec F et G dans $L^1 \cap W$. On sait que W^α est la FrFT de W d'angle $\alpha = \frac{\pi}{2}$. Nous utilisons donc directement la formule (30) et nous obtenons alors :

II.3.4 La FrFT dans l'analyse spectrale

Les signaux vibratoires sont très sensibles aux défauts et ils sont souvent utilisés pour la détection des défauts dans les machines. Comment extraire efficacement le signal du défaut de l'équipement ou comment améliorer le rapport signal sur bruit (S/N) actuellement c'est le problème principale de la recherche dans le domaine de détection des défauts dans les machines tournantes.

Plusieurs méthodes de traitement de signale tel que la transformation en ondelette (WT) [22], l'algorithme génétique (GA) [23] et les réseaux de neurones (artificial neural network ANNE) ont été proposé pour supprimer ou minimiser le bruit.

La suppression du bruit adaptatif (Adaptive noise cancelling ANC) est une méthode efficace pour estimer le signal quand il est corrompu par un bruit additif [24]. L'efficacité de l'amélioration du signal dépend du degré de corrélation entre le signal de référence et le bruit contenu dans le signal fondamental. Pour une meilleure efficacité, plusieurs algorithmes pour la détermination des paramètres des filtres adaptatifs ont été proposés, par exemple l'algorithme de la méthode des moindres carrés, l'algorithme des moindres carrés récursifs (RLS) dans le domaine fréquentielle et ainsi de suite.

La transformée de Fourier fractionnaire (FrFT) appartient à la classe des représentations temps fréquence qui ont été largement utilisées dans le domaine du traitement de signal pour extraire les composants utiles du signal d'un bruit compliqué et des données d'interférences [22-23]. Un ordre de transformation fractionnaire optimal doit correspondre simultanément à une densité d'énergie et intensité optimale du signal dans le domaine temporel et fréquentiel [23].

Shao et al, 2005 [24] ont proposé un filtre adaptatif basé sur la transformée de Fourier fractionnaire pour supprimer le bruit des signaux vibratoires et de mettre en valeur les composants du signal provenu des défauts dynamiques des machines. L'approche compte sur l'usage des filtres adaptatifs dans le domaine de la transformée de Fourier fractionnaire en optimisant l'ordre de la transformation et les paramètres du filtre. L'ordre de la transformation est choisi quand le signal rassemble la plus haute énergie et les paramètres du filtre sont déterminés par les règles évolutionnaires.

II.3.5 La FrFT dans l'analyse cepstral

En général, l'inverse de la transformation de Fourier du logarithme de la transformation de Fourier d'un signal est la représentation de ce signal dans le domaine cepstral. L'opération de convolution de deux signaux dans le domaine temporelle devient une addition dans le domaine cepstral. La transformée de Fourier fractionnaire (FrFT) est la généralisation de la transformation de Fourier standard (FT). Dans une transformation de Fourier fractionnaire FrFT, le noyau de la transformation est un ensemble de chirps (pépiements) linéaires alors qu'il est composé de sinusöide complexe dans la transformation de Fourier FT. Selon l'ordre fractionnaire, les signaux peuvent être représentés dans des domaines multiples, ce qui donne un degré de liberté supplémentaire à la FrFT dans le traitement du signal par rapport à la transformée de Fourier standard.

Admettons que $S(t)$ formé par le produit de convolution de deux fonctions différentes, $w(t)$ et $r(t)$. La représentation de la partie réelle de $s(t)$ dans le domaine cepstral par la transformée de Fourier standard et la transformée de Fourier fractionnaire est comme suit:

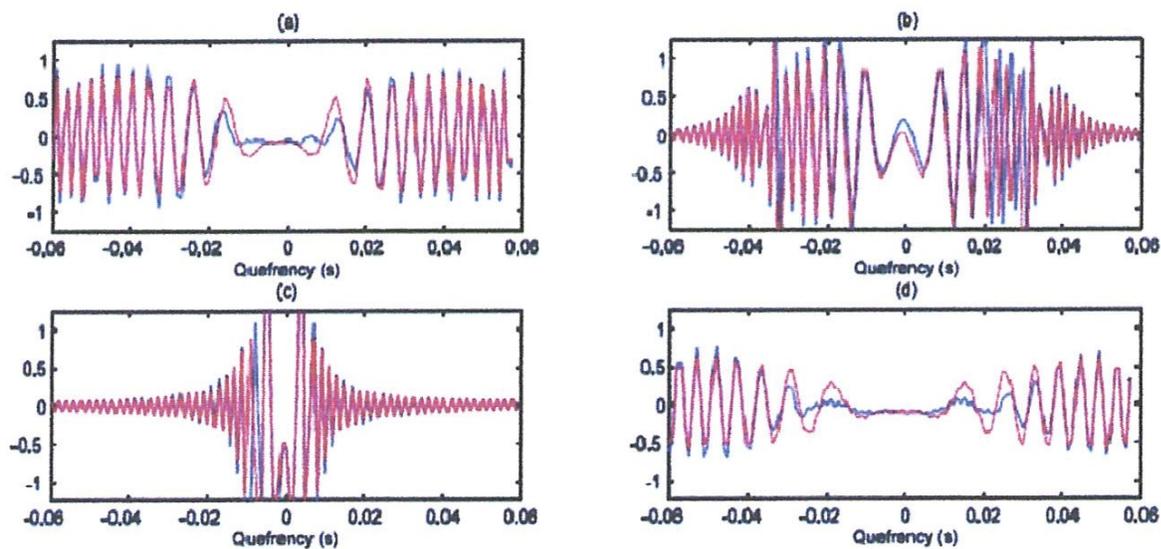


Figure II.3 : La représentation cepstral de $S(t)$ selon les ordres fractionnaires

a) : $\alpha=0.9$; b) : $\alpha=0.95$; c) : $\alpha=0.99$; d) : $\alpha=1.15$

II.4 La transformée de Fourier fractionnaire à court terme

Dans les problèmes réels un signal n'est pas linéairement modulé. Il peut même être multi-composant. Néanmoins, si les fréquences instantanées des composantes du signal changent lentement dans la direction d'une certaine ligne dans le plan temps-fréquence (nous nous référerons à cette ligne comme axe principal), nous pouvons trouver les domaines fractionnaires où le signal est mieux concentré ou mieux se propager. Afin de trouver ces domaines fractionnaires avec un minimum de coûts informatiques, conduisant à des améliorations possibles dans les représentations temps-fréquence, nous allons utiliser les moments de la transformée de Fourier fractionnaires du signal.

La TFFrCT a été introduit pour une meilleure localisation temporelle des fréquences contenu dans un signal $x(t)$, par l'utilisation d'une Fenêtre adaptée $g(t)$:

$$TFFrCT[x](t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t + t_0)g^*(t_0) \exp(-j2\pi t_0 f) dt_0 \quad (II.30)$$

Certes, pour filtrer un signal purement sinusoïdal, on a besoin d'une fenêtre large, tandis que pour le filtrage d'une impulsion delta comme signal, une fenêtre étroite doit être appliquée. Donc, nous pouvons ajuster la fenêtre si la forme du signal est connue. Supposons maintenant que la Largeur minimale du signal ne correspond pas à la direction du temps ou de fréquence (figure II.1), puis nous pouvons voir que d'une transformation affine du plan de phase conduit à une représentation optimale du signal (par exemple, la largeur minimale).

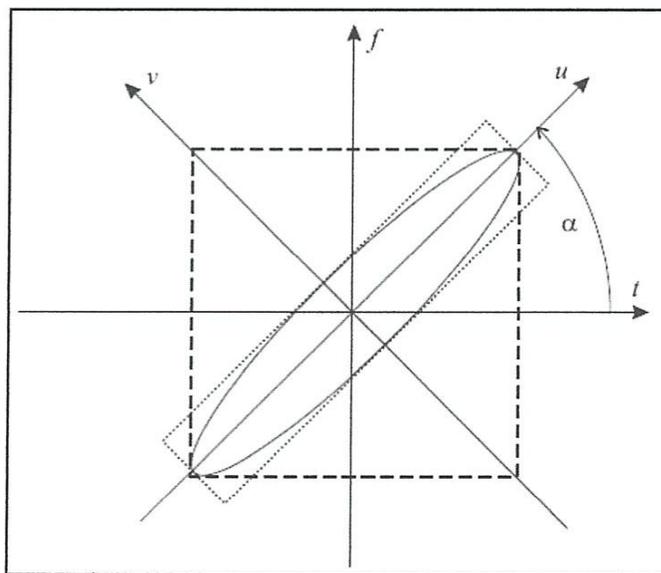


Figure II.1 : Illustration du deux plans : principal (t, f) et fractionnaire (u, v)

Afin de représenter un signal dans un nouveau système de coordonnées, nous utilisons le fait que la rotation dans le plan temps-fréquence correspond à la transformée de Fourier fractionnaire du signal. La Transformée de Fourier fractionnaire d'une fonction $x(t)$ peut être défini comme [25].

$$FrFT[x]_{\alpha}(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} K_{\alpha}(t, f) x(t) dt \quad (II.31)$$

$K_{\alpha}(t, f)$ est donnée par :

$$K_{\alpha}(t, f) = \frac{\exp(j\alpha/2)}{\sqrt{j\sin\alpha}} \exp\left(j\pi \frac{(t^2 + f^2)\cos\alpha - 2tf}{\sin\alpha}\right) \quad (II.32)$$

En outre, avec la relation suivante :

$$\begin{pmatrix} t \\ f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad (II.33)$$

On peut obtenir la transformée de Fourier fractionnaire de la formule de Kernel:

$$k(\alpha, t_0, u - u_0) \exp(j2\pi u_0 v) \exp(-j\pi uv) = [k(-\alpha, u_0, t - t_0) \exp(j2\pi t_0 f) \exp(-j\pi t f)]^* \quad (II.34)$$

Prenons, la transformée de Fourier à court terme de $x(t)$, définie par :

$$\begin{aligned} TFFrCT[x]_{\alpha}(u, v) &= TFFrCT_{x_{\alpha}}(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} X_{\alpha}(u + u_0) g^*(u_0) \exp(-j2\pi u_0 v) du_0 \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} R_x^{\alpha}(u + u_0) [R_g^0(u_0)]^* \exp(-2j\pi u_0 v) du_0 \end{aligned} \quad (II.35)$$

De la relation (II.34) nous obtenons :

$$\begin{aligned} &\exp(-j\pi uv) \times \int_{-\infty}^{\infty} R_x^{\alpha}(u + u_0) [R_g^0(u_0)]^* \exp(-2j\pi u_0 v) du_0 \\ &= \exp(-j\pi t f) \times \int_{-\infty}^{\infty} R_x^{\alpha}(t + t_0) [R_g^{-\alpha}(t_0)]^* \exp(-j2\pi t_0) dt_0 \end{aligned} \quad (II.36)$$

Et de la dernière identité, nous concluons que la transformée de Fourier fractionnaire à court terme de $x(t)$ dans le domaine fractionnaire a peut ainsi être calculé directement en tant que TFCT normale du signal $x(t)$ en utilisant une fenêtre qui est la TF fractionnaire de la première fenêtre $g(t)$, suivie par la rotation du système de coordonnées:

$$TFFrCT[x]_{\alpha}(u, v) = \exp[j\pi(uv - tf)] * \int_{-\infty}^{\infty} x(t + t_0) [R_g^{-\alpha}(t_0)]^* \exp(-j2\pi t_0 f) dt_0 \quad (II.37)$$

Ou u, v et t, f sont liés par la relation (II.33).

II.5 Estimation de la largeur du signal à partir des moments dans le domaine fractionnaire

La largeur d'un signal dans le domaine temporel ou dans le domaine de fréquence peut être estimée à partir de son moment central du second ordre [25].

Le moment central du second ordre dans le domaine fractionnaire p_α est définie par :

$$p_\alpha = \int_{-\infty}^{\infty} |R_x^\alpha(t)|^2 (t - m_\alpha)^2 dt = (w_\alpha - m_\alpha^2) \quad (II.38)$$

Où le moment du premier ordre :

$$m_\alpha = \int_{-\infty}^{\infty} |R_x^\alpha(t)|^2 t dt$$

Est liée au centre de gravité du spectre de puissance fractionnaire :

$$w_\alpha = \int_{-\infty}^{\infty} |R_x^\alpha(t)|^2 t^2 dt$$

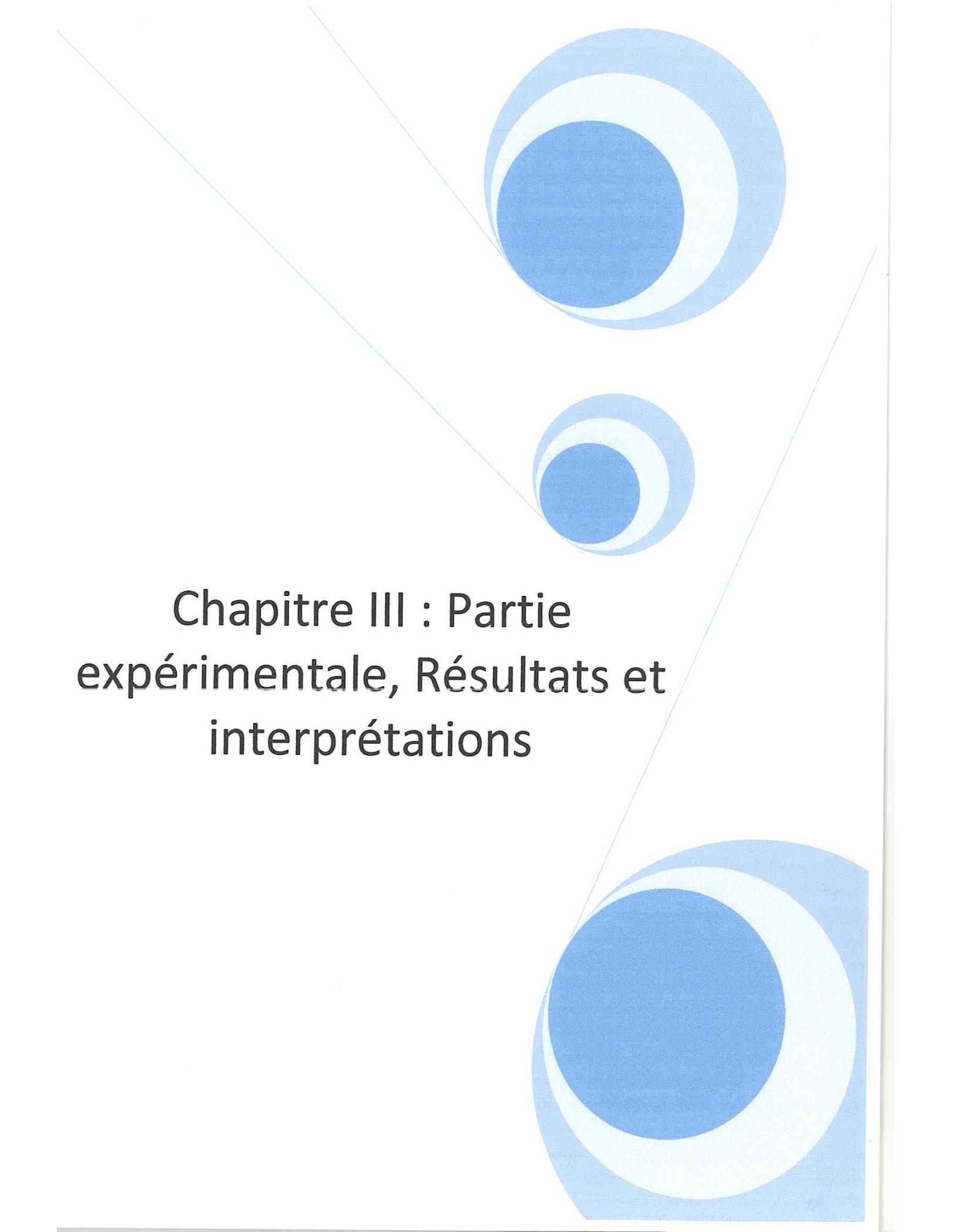
Le moment de premier ordre m_a dans un domaine fractionnaire défini par un angle arbitraire a peut être calculé à partir de la relation

$$m_\alpha = m_0 \cos \alpha + m_{\pi/2} \sin \alpha \quad (II.39)$$

Où m_0 et $m_{\pi/2}$ sont des moments du premier ordre dans le domaine temporelle et le domaine fréquentielle, respectivement. En outre, tout moments du second ordre W_α peut être obtenu à partir de trois autres moments W_β, W_γ, W_μ , et par exemple, si les angles β, γ, μ, t ne sont pas les mêmes, et la différence entre eux n'est pas égal à π [25]. En utilisant les résultats de Jubisa et al (2002) [20] nous avons:

$$w_\alpha = w_0 \cos^2 \alpha + w_{\pi/2} \sin^2 \alpha + \left[w_{\pi/4} - \frac{(w_0 + w_{\pi/2})}{2} \right] \sin 2\alpha \quad (II.40)$$

Tenant compte des équations. (II.38), (II.39), et (II.40). Nous concluons que les trois spectres de puissance fractionnaire FT permettent de calculer le moment central du second ordre p_α , qui caractérise la largeur du signal dans les domaines fractionnaire correspondants:

The page features a decorative graphic consisting of three blue circles of varying sizes, each with a white ring around its center. These circles are arranged in a vertical line, with the largest at the top and bottom, and a smaller one in the middle. Two thin, light blue lines extend from the top-left and bottom-right corners of the page towards the center, framing the central text.

**Chapitre III : Partie
expérimentale, Résultats et
interprétations**

III.1 Introduction

La recherche d'une productivité meilleure lors de la coupe des métaux est donc une préoccupation majeure des industriels. Cette amélioration permanente repose plus au mois directement sur la connaissance approfondie des mécanismes physiques et la maîtrise des phénomènes vibratoires associés au procédé d'usinage. Son intérêt ne peut pas être éclipsé par le développement de nouveaux moyens d'usinage ou de nouvelles techniques de commande et de programmation, même si ces derniers points participent aussi au développement de la fabrication à grande vitesse, mais aussi au développement des systèmes experts. Ces derniers peuvent être utilisés pour le diagnostic et le contrôle des phénomènes vibratoires en particulier le broutement comme étant un phénomène aléatoire qui peut se produire en basses, moyennes et hautes fréquences ainsi que la détection des défauts sur la surface usinée au cours d'usinage.

III.2 Equipements utilisés

III.2.1. Machine outil

Les essais ont été effectués sur un tour à charioter et à fileter modèle SN40C de la société Tchèque TOS TRENCIN ayant une puissance du moteur de 6.6 KW. La gamme de vitesses de rotation varie entre 355 et 2000 tr/min et la gamme des avances varie entre 0.08 et 6.4 mm/tr (Figure III.1).



Figure III.1 : Tour à charioter et à fileter modèle SN40C

Pour mener notre étude, la machine d'usinage est supposée avoir une grande rigidité pour écarter les vibrations de la machine.

III.2.2 La pièce à usiner

Pour mener la partie expérimentale, nous avons créé volontairement des défauts sur la surface cylindrique du disque en acier ordinaire sous forme de rainure de 2mm de profondeur et de 0.5mm de largeur. La figure III.2 montre le montage expérimental utilisé. Le montage de la pièce sur l'arbre est assuré par fixation par vis. Ce qui nous donne la possibilité de réaliser un montage mixte sur le tour.

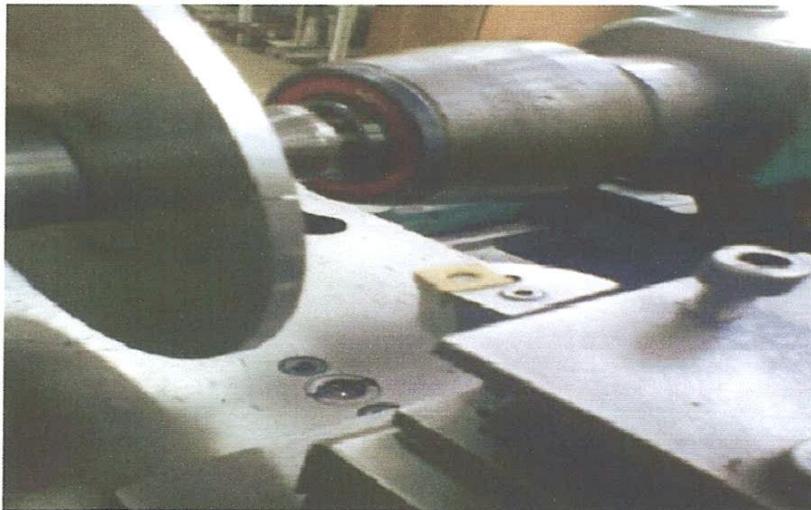


Figure III.2 : Montage expérimental de tournage

III.2.3 Outil de coupe

Pour la réalisation des essais, un porte plaquette ayant un angle de direction de 75° a été utilisé permettant ainsi une fixation par trou central de la plaquette. Des plaquettes amovibles de forme carrée en carbure revêtu GC415 ont été utilisées (Figure III.3).

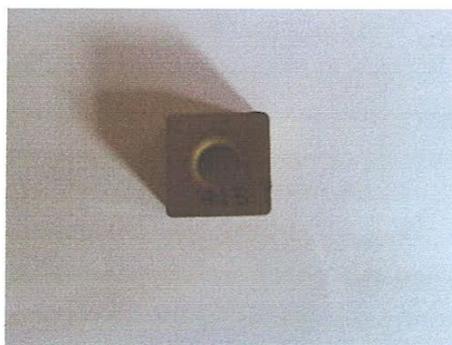


Figure III.3 : plaquette amovible de forme carrée en carbure revêtu GC415

III.2.4 Mesure des efforts de coupe

La mesure des efforts de coupe en cours d'usinage consiste en une chaîne d'acquisition composée d'un ordinateur, d'un dynamomètre Kistler de type 9257B et d'un amplificateur de charge Kistler 5019B à trois canaux (trois amplificateurs type 5011B) (Figure III.4). Le dynamomètre à quartz peut ainsi mesurer les composantes F_x , F_y et F_z de la résultante des efforts de coupe exercés sur l'outil et ce dans le repère fixe du capteur (Figure III.5).



Figure III.4 : Amplificateur de charge Kistler 5019B et ordinateur

- Force axiale F_x ou effort d'avance F_a ;
- Force radiale F_y ou effort de pénétration F_p ;
- Force tangentielle F_z ou effort de coupe tangentiel F_c .

Les principales caractéristiques du dynamomètre Kistler 9257B sont indiquées dans le tableau III.1.

Type	Gamme de mesure (KN)	Sensibilité (pC/N)	Fréquence propre (KHz)	Température d'utilisation (°C)
9257B	$F_x, F_y, F_z \pm 5$	$F_x, F_y = -7.5$ $F_z = -3.7$	$f_n(x, y) = 2.3$ $f_z = 3.5$	0-70

Tableau III.1. Caractéristiques du dynamomètre Kistler 9257B

L'acquisition et le traitement des signaux correspondant à chaque composante F_x , F_y , et F_z de l'effort de coupe sont effectués sous le logiciel Dyno Ware, type 2825D 1-2, version 2.31. Pour l'analyse des signaux, Dyno Ware fournit une visualisation en temps réel des courbes de mesure, ainsi que des fonctions mathématiques et graphiques très utiles. Il permet également de configurer les

principaux instruments de mesure, de fournir une documentation détaillée des mesures et de stocker les configurations et les données de mesure. Le traitement des signaux mesurés est particulièrement important lorsque l'on mesure les forces car les capteurs piézoélectriques produisent une charge électrique qui varie proportionnellement à la charge appliquée sur le capteur. L'amplificateur de charge convertit cette charge en signal de tension ou de courant proportionnel.

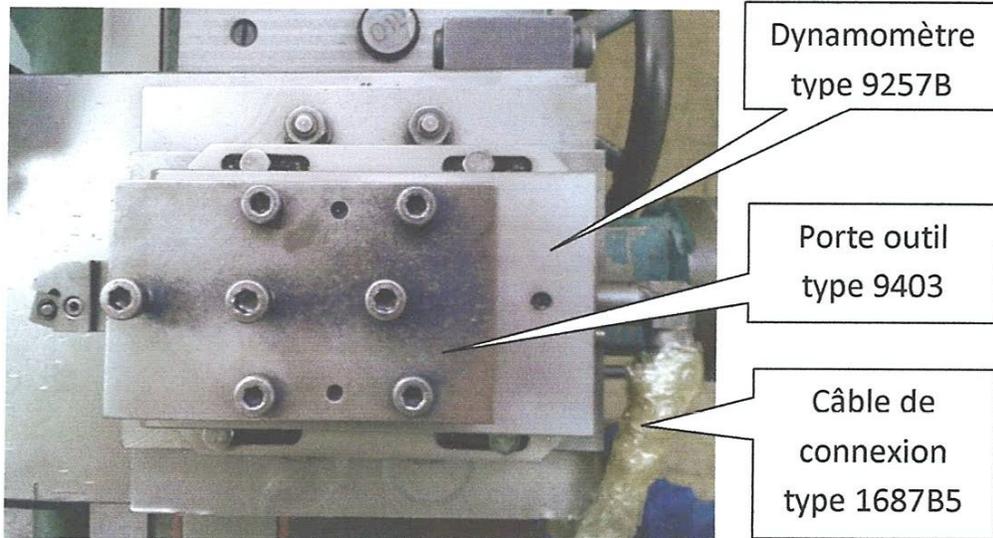


Figure III.5 : Dynamomètre à trois composantes type 9257B

III.3 Méthode de planification des essais

III.3.1 Méthode multifactorielle

L'expérimentateur, quel que soit son domaine d'étude, est toujours confronté au problème d'organisation optimale de ses essais de façon à obtenir des bonnes informations dans les meilleurs délais et pour le moindre cout.

L'utilisation des plans d'expériences, en particulier les tables orthogonales de Taguchi, permet la détermination de l'influence des effets simultanés et de l'interaction des paramètres opératoires sur les paramètres de sortie.

En effet, le principe de la méthode consiste à faire varier simultanément les niveaux de un ou plusieurs facteurs à chaque essai. Ceci va permettre de diminuer fortement le nombre d'expériences à réaliser tout en augmentant le nombre de facteurs étudiés

Le point délicat dans l'utilisation des plans d'expériences sera donc de minimiser le plus possible le nombre d'expériences à mener sans sacrifier la précision sur les résultats.

Dans notre travail, le plan orthogonal standard L8 (2^3) de Taguchi est adopté comme plan expérimental. Les paramètres à étudier et l'attribution des niveaux respectifs sont indiqués dans le tableau III.2.

N° Essai	Fréquence de rotation (tr/min)	Avance (mm/tr)	Profondeur de passe (mm)
Essai 01	1400	0.08	0.5
Essai 02	1400	0.08	1
Essai 03	1400	0.16	0.5
Essai 04	1400	0.16	1
Essai 05	355	0.08	0.5
Essai 06	355	0.08	1
Essai 07	355	0.16	0.5
Essai 08	355	0.16	1

Tableau III.2. Paramètres de coupe du plan orthogonal standard L8.

III.3.2 Méthode unifactorielle

Le principe de cette méthode est de faire varier un seul paramètre et de fixer les autres. Dans notre cas, la fréquence de rotation est le paramètre variable par contre la vitesse d'avance et la profondeur de passe sont maintenus constants lors du tournage du disque possédant deux défauts répartis à 90° . Les essais et les conditions de travail sont montrés dans le tableau III.3.

N° Essai	Fréquence de rotation (tr/min)	Avance (mm/tr)	Profondeur de passe (mm)
Essai 09	1400	0.08	0.5
Essai 10	710	0.08	0.5
Essai 11	355	0.08	0.5

Tableau III.3. Paramètres de coupe dans le cas de deux défauts espacés d'angle 90° .

III.4 Résultats des essais

Après un réglage des paramètres de la plate-forme Kistler, en particulier la fréquence d'échantillonnage de 12000Hz et le temps de mesure pour chaque essai, les essais ont été réalisés selon les plans d'expériences déjà mentionnés. Les signaux mesurés des efforts de coupe dans les trois directions ont été exportés en format texte puis convertis en fichiers Excel pour faciliter leurs exploitations par Matlab.

III.4.1 Premier cas : Disque avec un seul défaut

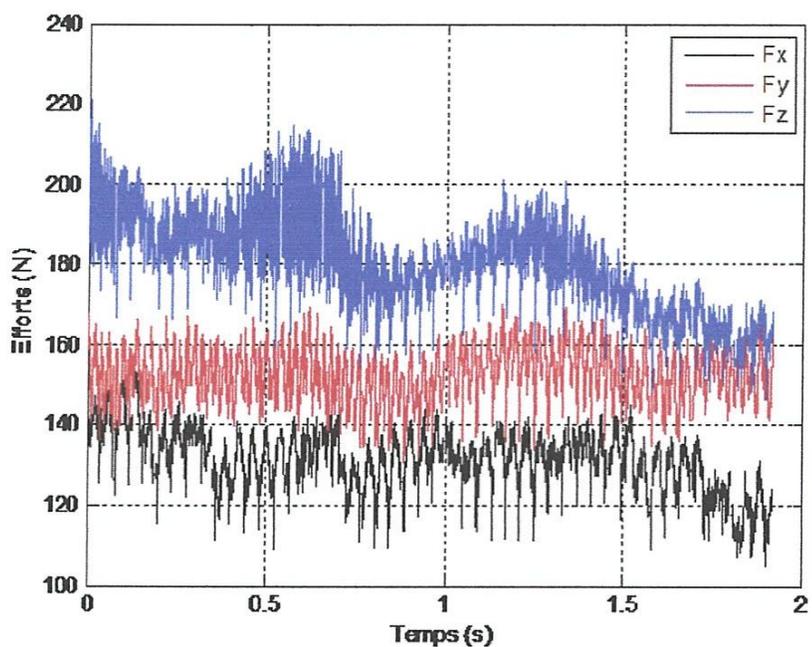


Figure III.6 : Efforts de coupe de l'essai 1 ($N=1400$ tr/min, $a=0.08$ mm/tr et $p=0.5$ mm)

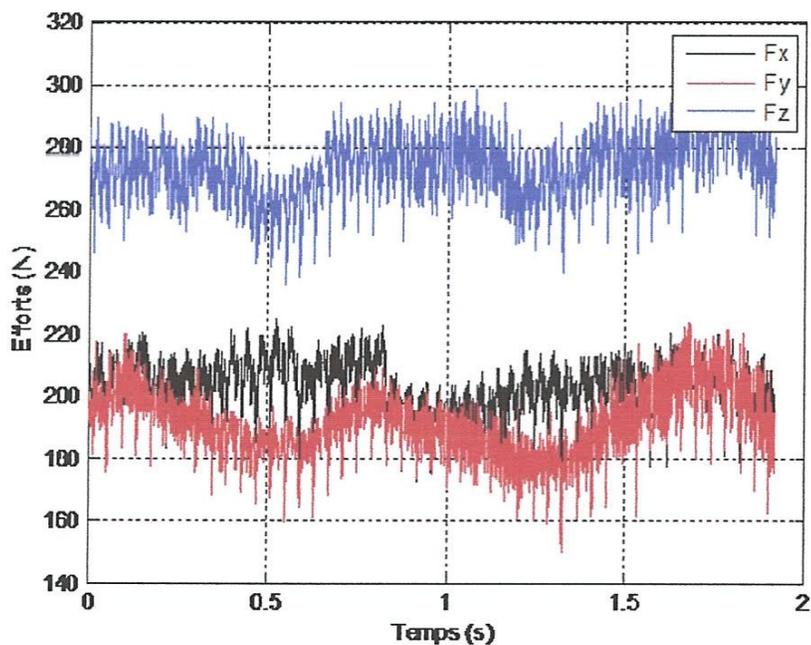


Figure III.7 : Efforts de coupe de l'essai 2 ($N=1400$ tr/min, $a=0.08$ mm/tr et $p=1$ mm)

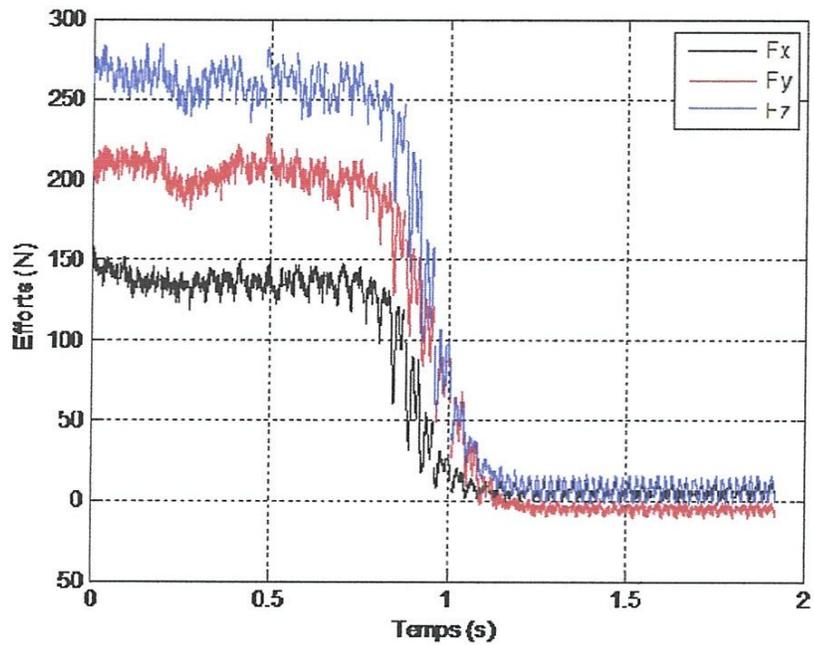


Figure III.8: Efforts de coupe de l'essai 3 ($N=1400$ tr/min, $a=0.16$ mm/tr et $p=0.5$ mm)

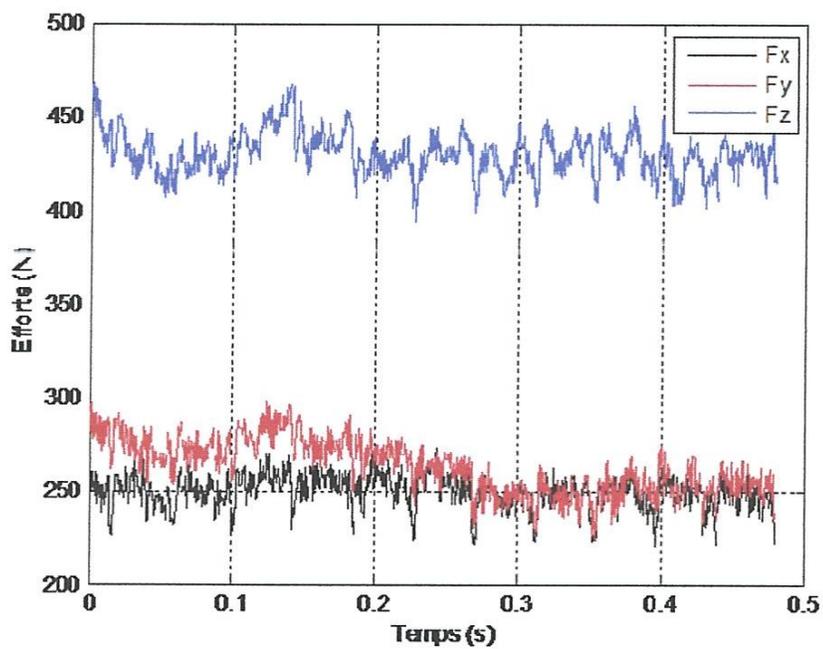


Figure III.9 : Efforts de coupe de l'essai 4 ($N=1400$ tr/min, $a=0.16$ mm/tr et $p=1$ mm)

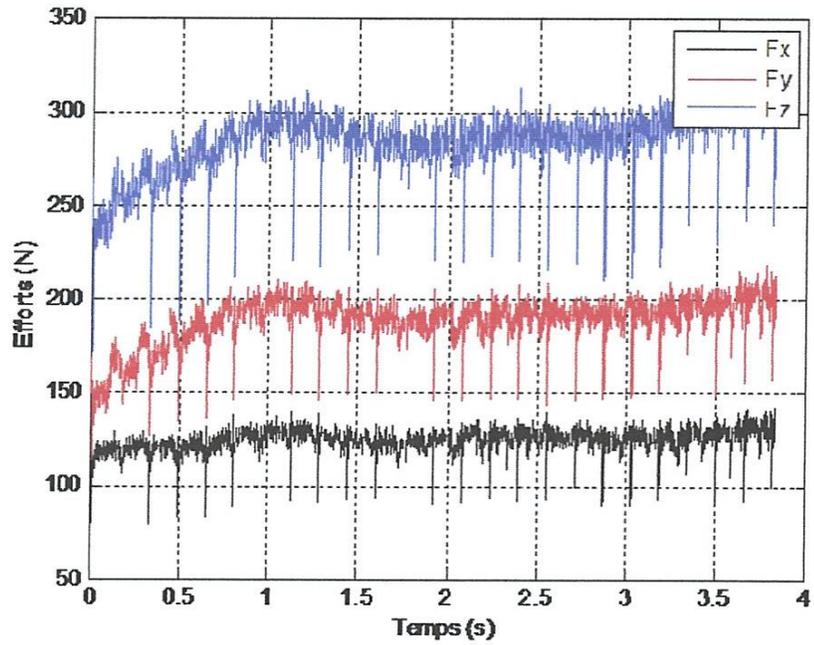


Figure III.10 : Efforts de coupe de l'essai 5 ($N=355$ tr/min, $a=0.08$ mm/tr et $p=0.5$ mm)

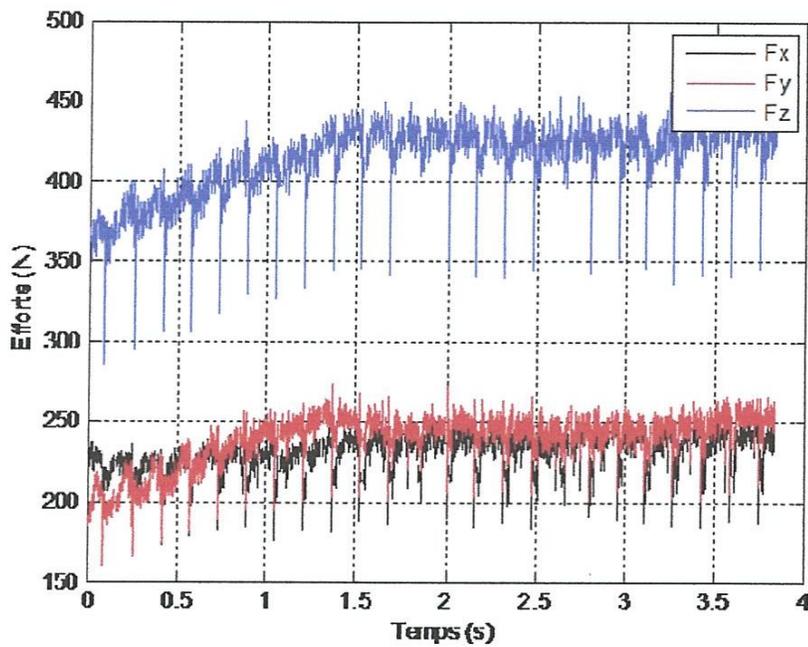


Figure III.11 : Efforts de coupe de l'essai 6 ($N=355$ tr/min, $a=0.08$ mm/tr et $p=1$ mm)

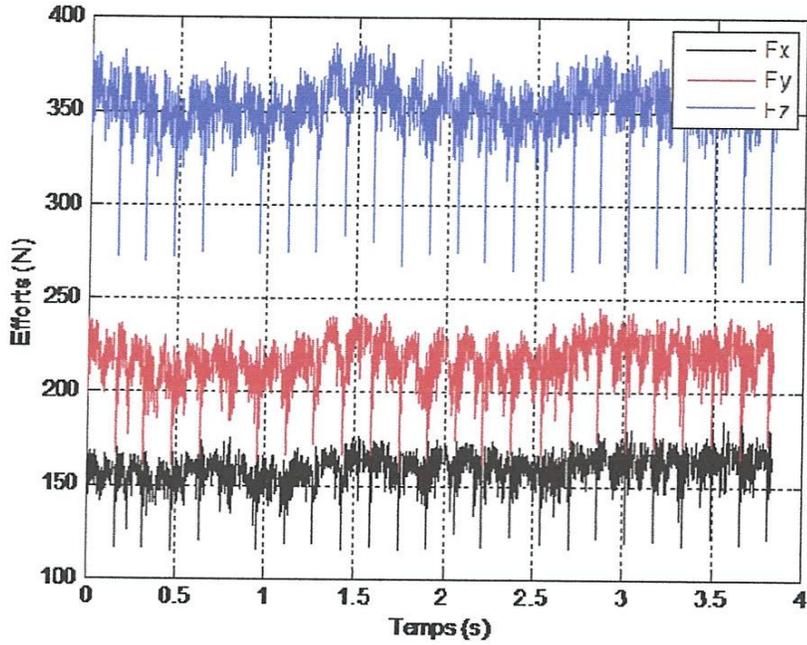


Figure III.12 : Efforts de coupe de l'essai 7 ($N=355$ tr/min, $a=0.16$ mm/tr et $p=0.5$ mm)

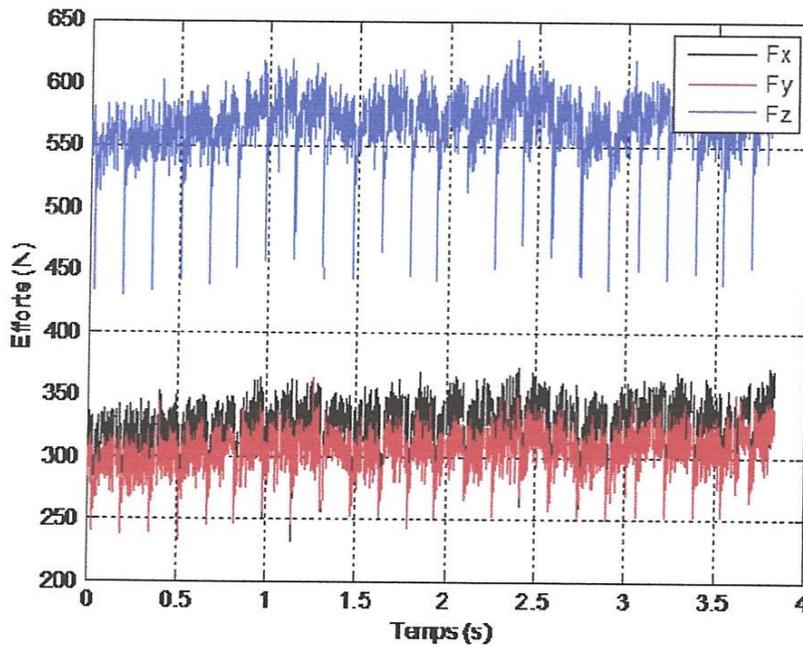


Figure III.13 : Efforts de coupe de l'essai 8 ($N=355$ tr/min, $a=0.16$ mm/tr et $p=1$ mm)

III.4.2 Deuxième cas : Disque avec deux défauts espacés de 90°

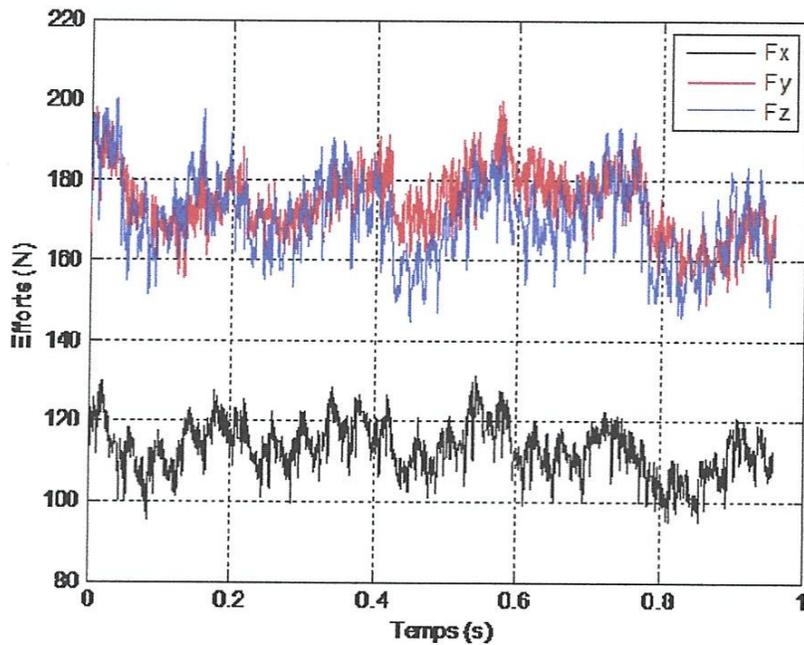


Figure III.14 : Efforts de coupe de l'essai 9 ($N=1400$ tr/min, $a=0.08$ mm/tr et $p=0.5$ mm)

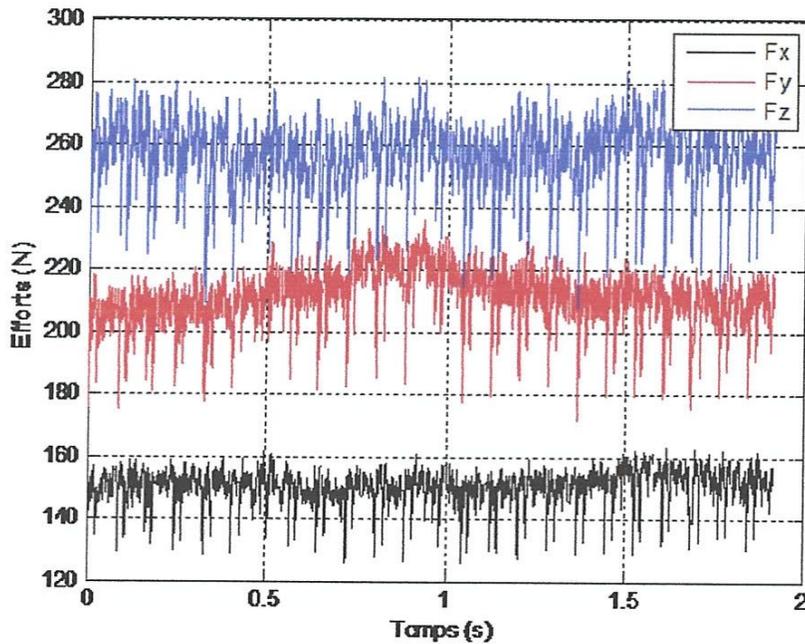


Figure III.15 : Efforts de coupe de l'essai 10 ($N=710$ tr/min, $a=0.08$ mm/tr et $p=0.5$ mm)

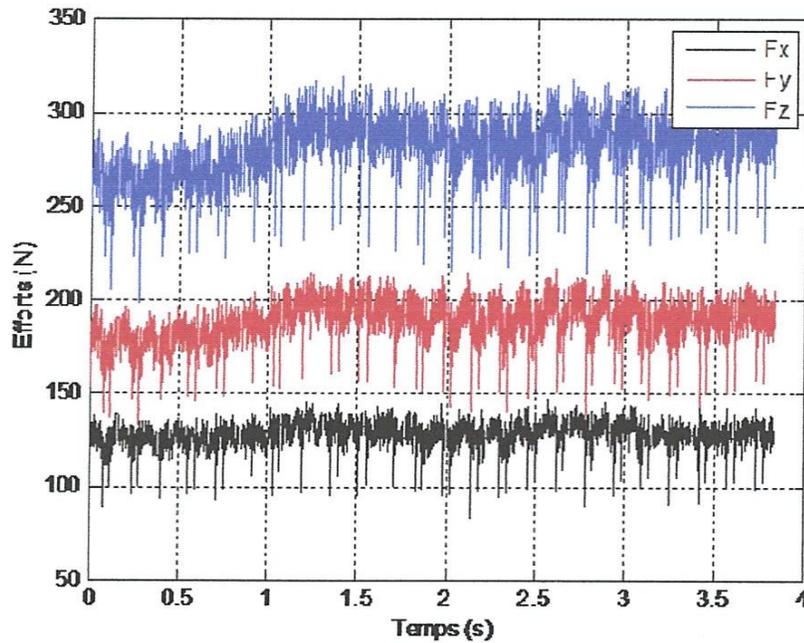


Figure III.16 : Efforts de coupe de l'essai 11 ($N=355$ tr/min, $a=0.08$ mm/tr et $p=0.5$ mm)

III.5 Traitement des signaux par la FFT

Un premier traitement des signaux mesurés est obtenu par l'application de la transformée de Fourier classique (FFT) dans le but est de déterminer les signatures fréquentielles telles que la fréquence de rotation et ses harmoniques, les fréquences propres ou autres. Nous avons choisi l'effort tangentiel pour représenter les spectres du fait que cet effort est généralement le plus important et qui est mesuré dans le sens de la rotation du disque.

III.5.1 Premier cas : Disque avec un seul défaut

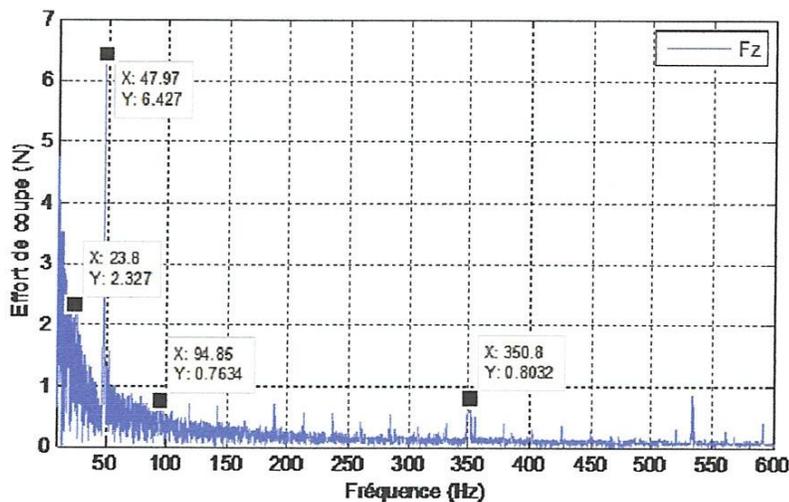


Figure III.17 : Spectre de l'effort de coupe F_z pour l'essai 1

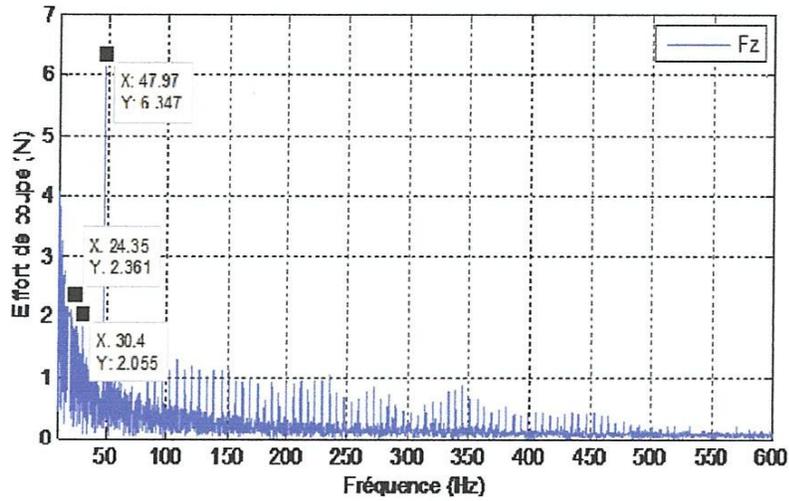


Figure III.21 : Spectre de l'effort de coupe F_z pour l'essai 5

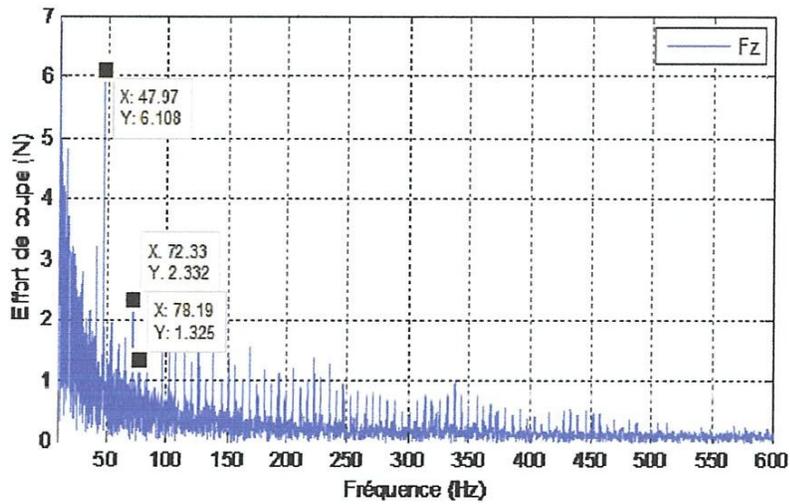


Figure III.22 : Spectre de l'effort de coupe F_z pour l'essai 6

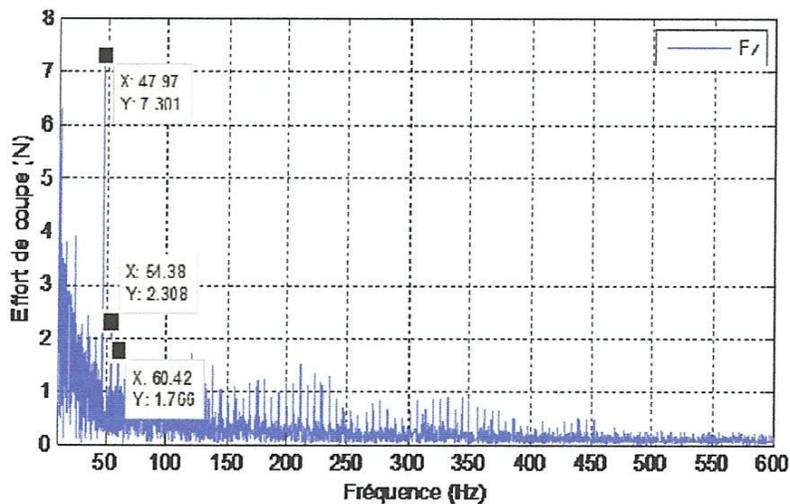


Figure III.23 : Spectre de l'effort de coupe F_z pour l'essai 7

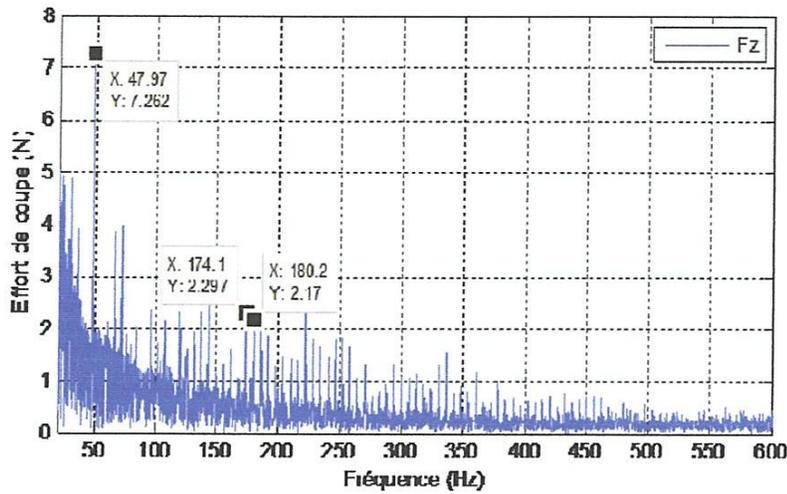


Figure III.24 : Spectre de l'effort de coupe Fz pour l'essai 8

III.5.2 Deuxième cas : Disque avec deux défauts espacés de 90°

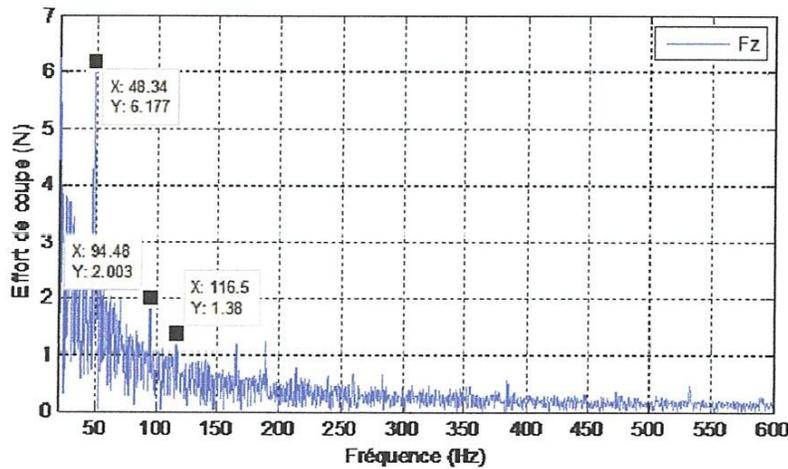


Figure III.25 : Spectre de l'effort de coupe Fz pour l'essai 9

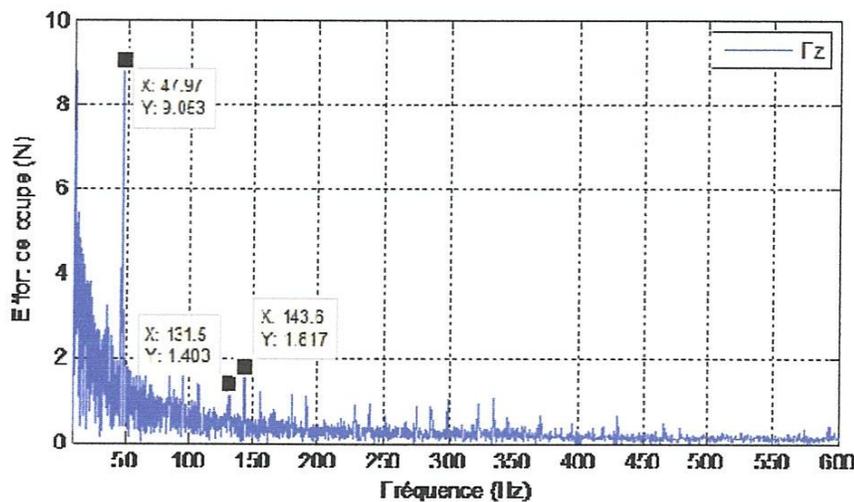


Figure III.26 : Spectre de l'effort de coupe Fz pour l'essai 10

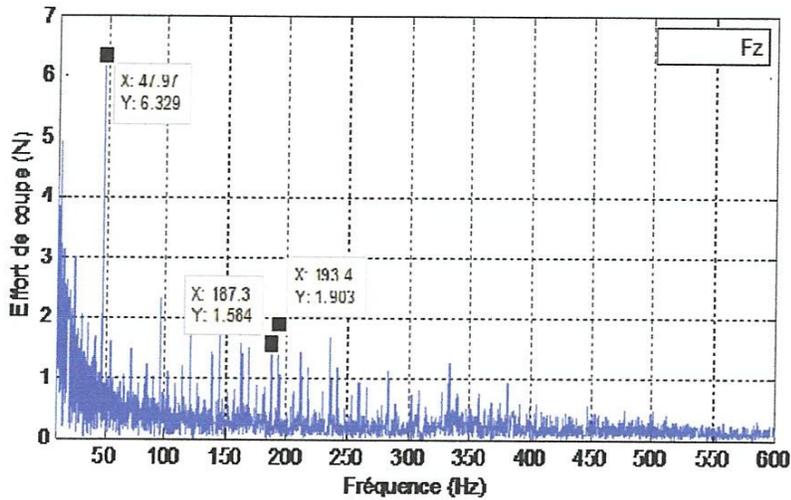


Figure III.27 : Spectre de l'effort de coupe F_z pour l'essai 11

III.6 Traitement des signaux par la TFFrCT

Les spectrogrammes sont obtenus par l'application de la transformée de Fourier fractionnaire à court terme (TFFrCT) aux signaux issus des essais lorsque le disque comporte des défauts.

III.6.1 Premier cas : Disque avec un seul défaut

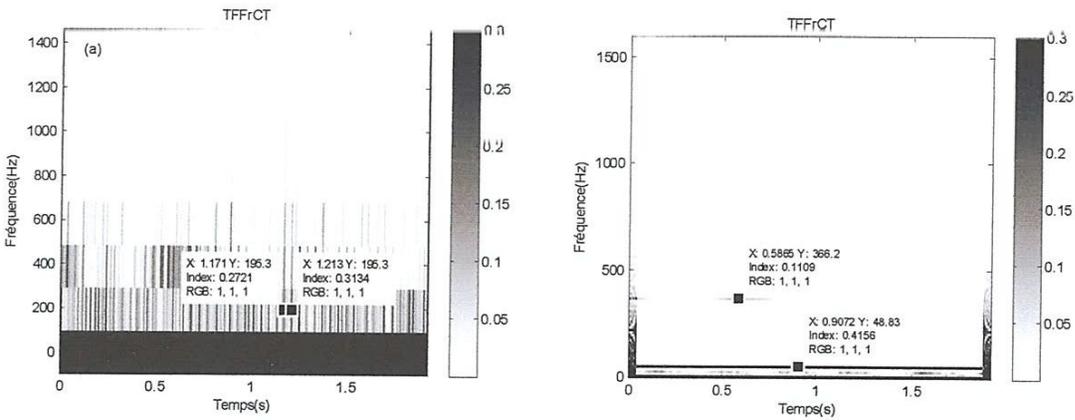


Figure III.28 : Spectrogrammes pour différentes largeurs fenêtre de Gauss.

a) $M=64$ ($t=0.002$ s), b) $M=1024$ ($t=0.04$ s) de l'essai 1

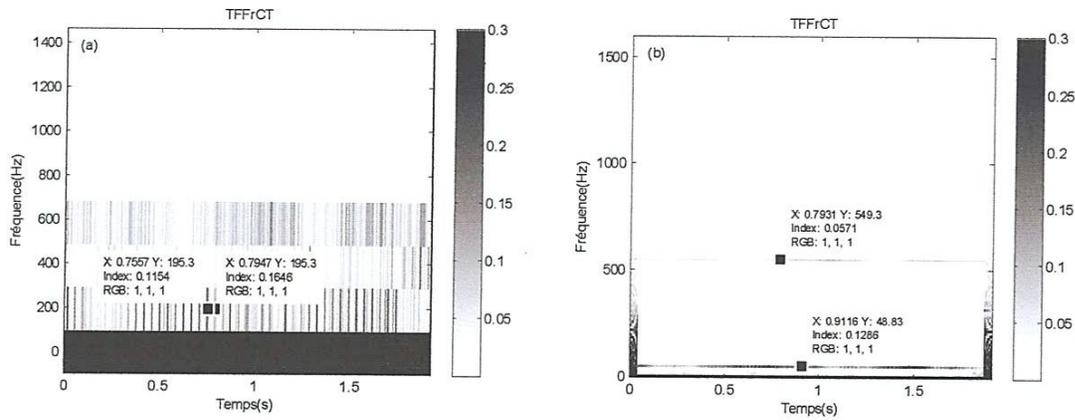


Figure III.29 : Spectrogrammes pour différentes largeurs fenêtre de Gauss.
a) $M=64$ ($t=0.002$ s), b) $M=1024$ ($t=0.04$ s) de l'essai 2

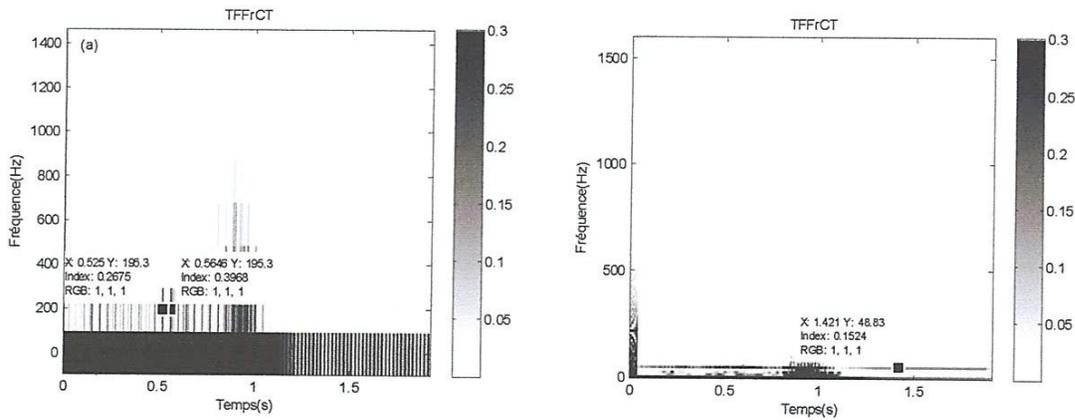


Figure III.30 : Spectrogrammes pour différentes largeurs fenêtre de Gauss.
a) $M=64$ ($t=0.002$ s), b) $M=1024$ ($t=0.04$ s) de l'essai 3

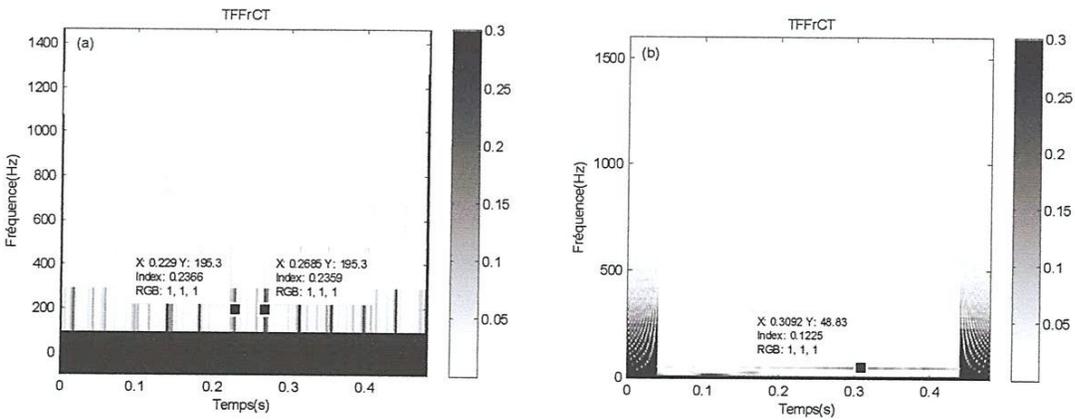


Figure III.31 : Spectrogrammes pour différentes largeurs fenêtre de Gauss.
a) $M=64$ ($t=0.01$ s), b) $M=1024$ ($t=0.17$ s) de l'essai 4

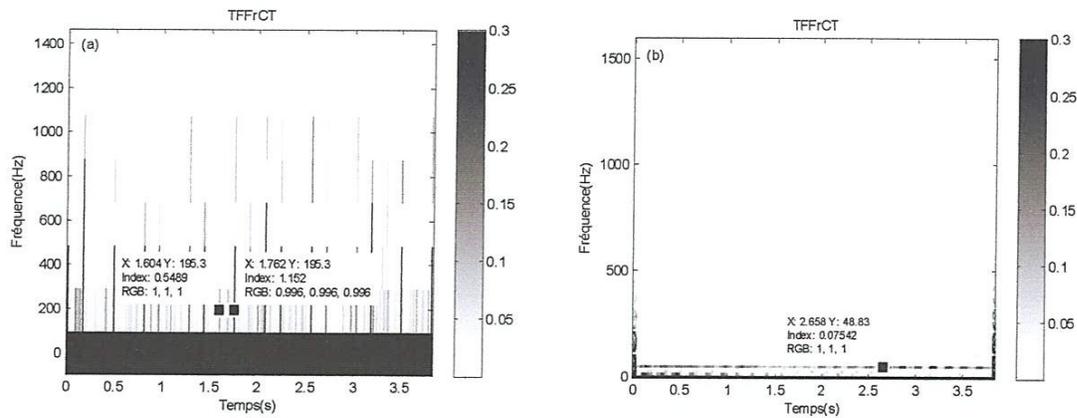


Figure III.32 : Spectrogrammes pour différentes largeurs fenêtre de Gauss.
 a) $M=64$ ($t=0.001$ s), b) $M=1024$ ($t=0.02$ s) de l'essai 5

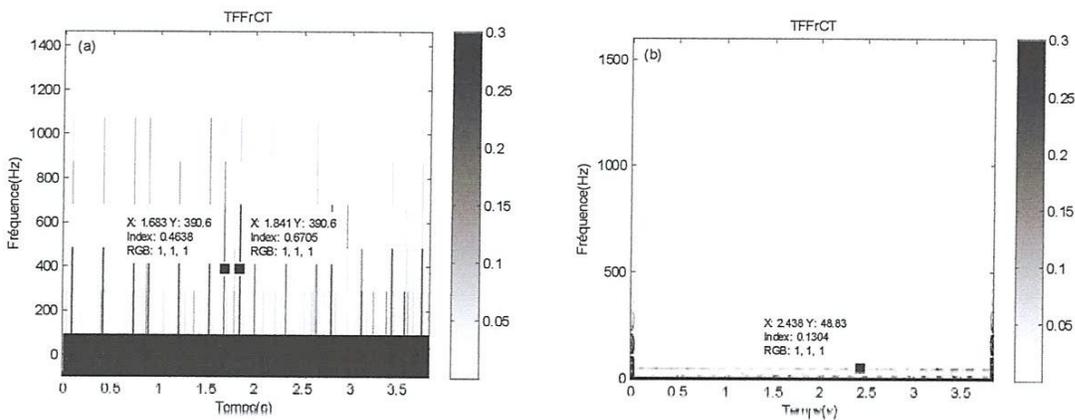


Figure III.33 : Spectrogrammes pour différentes largeurs fenêtre de Gauss.
 a) $M=64$ ($t=0.007$ s), b) $M=1024$ ($t=0.125$ s) de l'essai 6

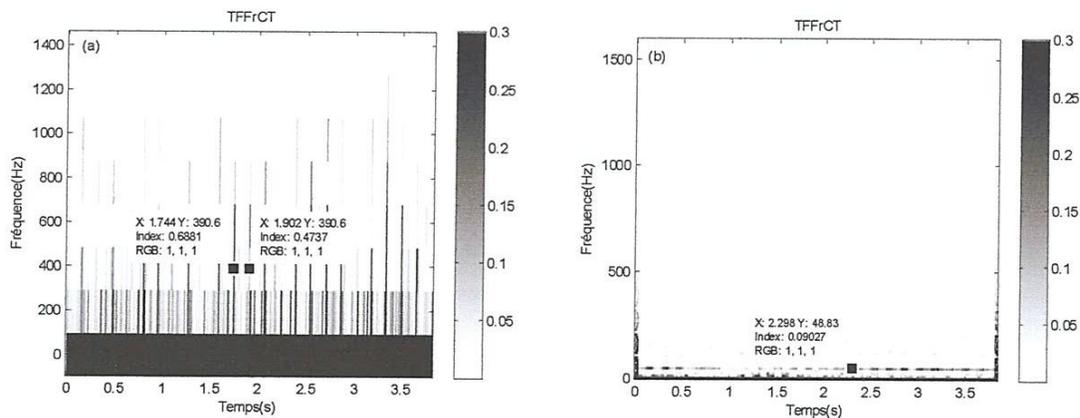


Figure III.34 : Spectrogrammes pour différentes largeurs fenêtre de Gauss.
 a) $M=64$ ($t=0.007$ s), b) $M=1024$ ($t=0.125$ s) de l'essai 7

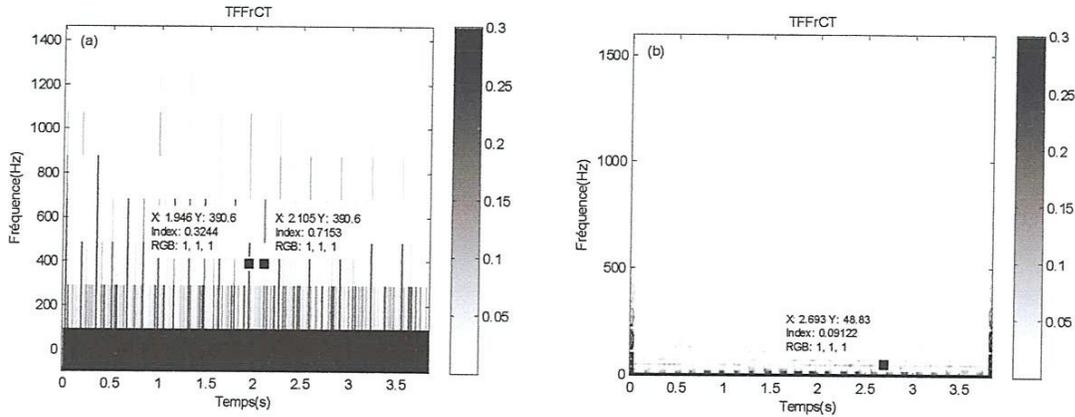


Figure III.35 : Spectrogrammes pour différentes largeurs fenêtre de Gauss.
 a) $M=64$ ($t=0.007$ s), b) $M=1024$ ($t=0.125$ s) de l'essai 8

III.6.2 Deuxième cas : Disque avec deux défauts espacés de 90°

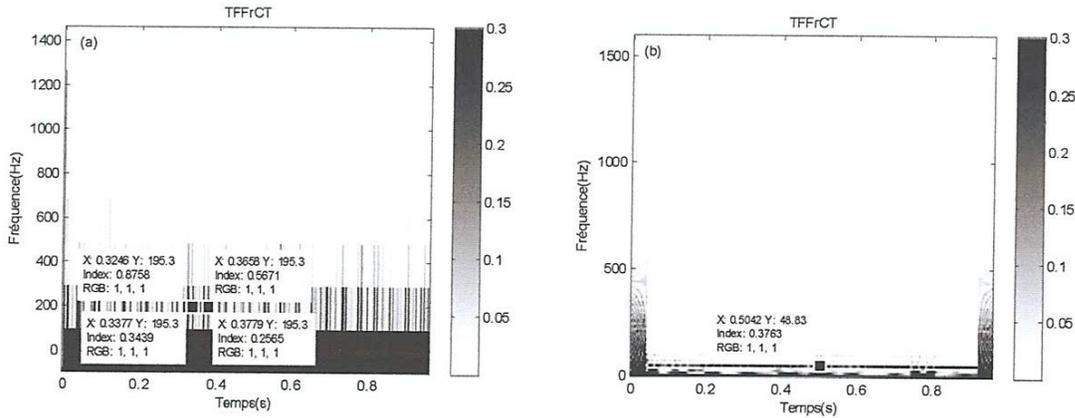


Figure III.36 : Spectrogrammes pour différentes largeurs fenêtre de Gauss.
 a) $M=64$ ($t=0.007$ s), b) $M=1024$ ($t=0.125$ s) de l'essai 9

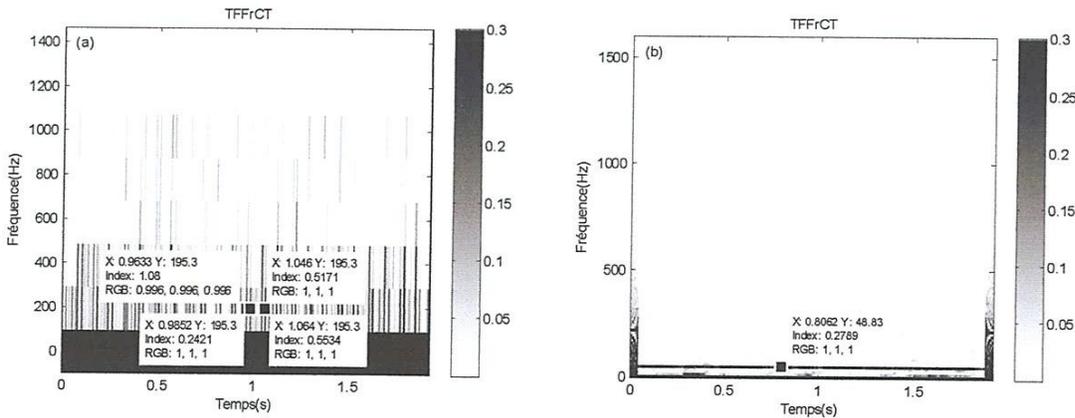


Figure III.37 : Spectrogrammes pour différentes largeurs fenêtre de Gauss.
 a) $M=64$ ($t=0.007$ s), b) $M=1024$ ($t=0.125$ s) de l'essai 10

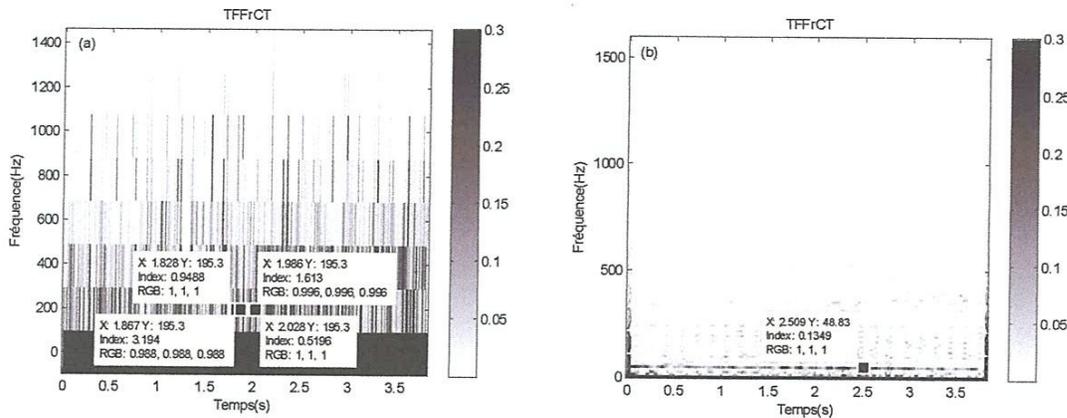


Figure III.38 : Spectrogrammes pour différentes largeurs fenêtre de Gauss.
 a) $M=64$ ($t=0.007$ s), b) $M=1024$ ($t=0.125$ s) de l'essai 11

III.7 Interprétation des résultats

D'après les spectres présentés (Figs. III.17-27), des pics représentant les différentes fréquences de rotation et leurs harmoniques sont nettement visibles. En plus des fréquences de rotation, un pic caractéristique est apparait à une fréquence de 47,97Hz dans tous les spectres sauf pour l'essai 4 où une fausse manipulation lors de la mesure est apparemment à l'origine d'une mauvaise représentation du signal de l'effort de coupe et du spectre correspondant. D'une première vue, cette fréquence est confondue avec la 2^{ème} harmonique de la fréquence de rotation (23,33Hz) pour les 4 premiers essais, avec la 8^{ème} harmonique de la fréquence de rotation (5,91Hz) pour les 4 suivants et avec la 4^{ème} harmonique de la fréquence de rotation (11,33Hz) pour l'essai 10 réalisé sur le disque présentant deux défauts. Comme l'amplitude du pic correspondant est plus élevée que celui de la fréquence de rotation elle-même, ceci nous a poussé à réaliser un essai à 2000 tr/min correspondant à 33,33Hz. Le spectre résultant du signal mesuré de la force F_z (Fig. III.39) montre la présence d'un pic à la même fréquence (47,97Hz). Ce qui veut dire que cette fréquence n'est plus une harmonique de la fréquence de rotation. Une seule interprétation valable est que cette fréquence est une fréquence propre du mandrin sur lequel est monté le disque comme le montre la figure III.2.

Un autre pic caractérisé par une fréquence de 523.1Hz apparait uniquement lors de l'essai 2 (Fig. III.18). Pour s'assurer de ce résultat, un autre essai a été réalisé dans les mêmes conditions de coupe de l'essai 2. La figure III.40 montre la présence d'un pic à faible amplitude à cette fréquence devant un nouveau

pic apparaissant à 1113Hz. Ces deux fréquences sont des résonances du disque parmi plusieurs autres qui sont écrasées dans le spectre.

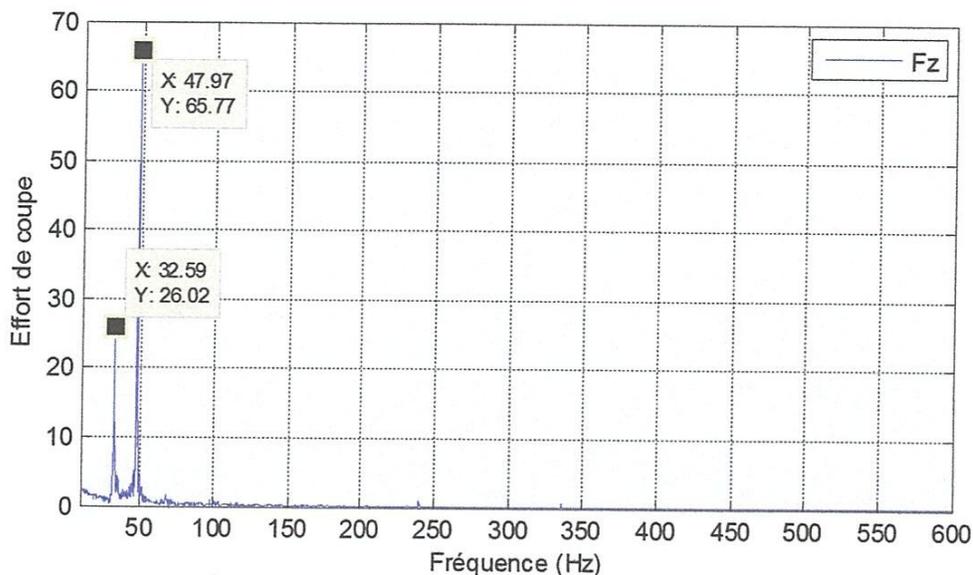


Figure III.39 : Spectre de l'effort de coupe F_z pour un essai de confirmation à 2000tr/min

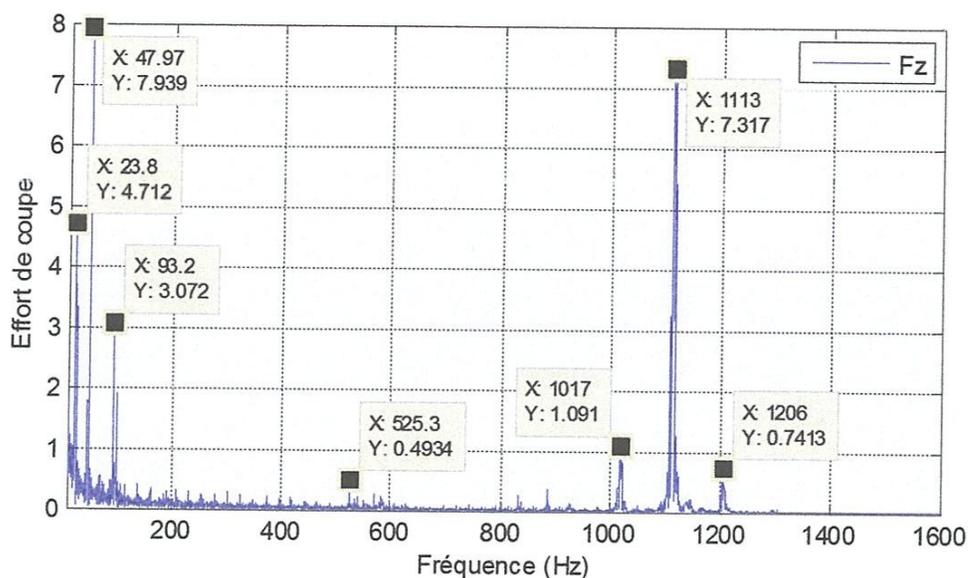


Figure III.40 : Spectre de l'effort de coupe F_z pour un essai comparatif de l'essai 2

Les spectrogrammes montrent que la largeur de la fenêtre de Gauss utilisée joue un rôle important sur la résolution temporelle et fréquentielle. Une fenêtre étroite permet une meilleure localisation temporelle des impacts au détriment d'une résolution fréquentielle. Dans les figures (III.28a-35a), des impacts espacés de la période de contact de l'outil avec les défauts créés de 0.042 s pour une fréquence de rotation de 1400 tr/min et de 0.159 s pour une

fréquence de rotation de 355 tr/min. Dans le cas d'existence de deux défauts, deux séries d'impact sont visibles (Figs. III.36a-38a) dont les périodes sont égales à 0.042 s, 0.084s et 0.159s correspondant respectivement aux fréquences de rotation du disque 1400 tr/min, 710 tr/min et 355 tr/min. Les impacts de chaque série sont décalés de 0.013 s, 0.022 s et 0.044s. Ce résultat confirme la présence de deux défauts espacés d'un angle approximatif de 90°.

Alors, lorsque cette fenêtre est large (Figs. III.28b-38b), une bonne localisation fréquentielle est atteinte tout en perdant la résolution temporelle. Les représentations temps-fréquence issues de l'application de TFFrCT confirment, donc, les constatations précédentes en ce qui concerne les fréquences 47.97Hz, 350.8Hz et 523.1Hz. Dans ce cas, l'évolution des phénomènes fréquentiels dans le temps peut être continue pour les fréquences 47.97Hz (Figs. III.28b-38b) et 523.1Hz (Fig. III.29b) et discontinue pour le cas de la fréquence 350.8Hz (Fig. III.28b). Comme le broutement est un phénomène aléatoire, il peut exciter certaines fréquences de résonance du disque d'une manière continue ou discontinue lors de l'usinage.

Conclusion générale

Notre travail est focalisé sur l'application d'une technique de détection des défauts à travers des représentations fréquentielles et temps-fréquence. Ces techniques ont été appliquées sur les signaux des efforts de coupe mesurés lors du tournage d'un disque mince.

Nous avons utilisé la représentation fréquentielle pour déterminer les fréquences de rotation et leurs harmoniques ainsi que les fréquences de résonance fortement excitées par les efforts de coupe.

La transformée de Fourier fractionnaire à court terme a été utilisée pour la représentation temps-fréquence. La fenêtre de Gauss assure un compromis entre la résolution temporelle et fréquentielle. Une fenêtre étroite permet une meilleure localisation temporelle des impacts au détriment d'une résolution fréquentielle. Or, si cette fenêtre est large, une bonne localisation fréquentielle est atteinte tout en perdant la résolution temporelle.

Les représentations temps-fréquence issues de l'application de l'HrCT ont permis de localiser les défauts créés à travers l'espace temporel entre les impacts ainsi que le broutement comme étant un phénomène aléatoire pouvant exciter certaines fréquences de résonance du disque d'une manière continue ou discontinue lors de l'usinage.

Suite à la complexité du broutement, d'autres paramètres à savoir le bruit émis lors de l'usinage et l'état de surface comme étant des conséquences de l'apparition de ce phénomène peuvent faire l'objet d'autres études.

Principales notations et symboles

FrFT	Transformée de Fourier fractionnaire
FT	Transformée de Fourier classique
$L^2(\mathbb{R})$	Opérateur de la transformée de Fourier classique
R_α	Matrice de rotation
$K_\alpha(\xi, x)$	Noyau de la transformée de Fourier fractionnaire
TFFrCT	Transformée de Fourier fractionnaire à court terme
p_α	Moment central du second ordre dans le domaine fractionnaire
m_α	Moment du premier ordre
w_α	Moment de deuxième ordre

Références bibliographiques

- [1] S. Seguy, De l'adaptation à la variation continue de la vitesse de broche afin de contrôler le broutement en fraisage de parois minces : modélisations et études expérimentales. Thèse de Doctorat, INP de Toulouse (2008) 196 p.
- [2] G. Moraru, Etude du comportement du système «pièce-outil-machine» en régime de coupe vibratoire. Thèse de Doctorat, ENSAM et Université de Bucarest (2002) 150 p.
- [3] M. V. Thevenot, Contribution à la maîtrise des phénomènes vibratoires en usinage de parois minces : Application à l'usinage de pales aéronautiques. Thèse de Doctorat, INP de Toulouse (2005) 190 p.
- [4] R. Younes, J. Chalfoun, Y. Alayli, P. Wagstaff, 19^{ème} colloque de vibration, Chocs et bruit, 16-18 juin 2004, Paris, France.
- [5] E. S. Topal, C. Çoğun, A cutting force induced error elimination method for turning operations. *Journal of Materials Processing Technology* 170 (2005) 192–203.
- [6] G. Petropoulos, I. Ntziantzias, C. Anghel, A predictive model of cutting force in turning using Taguchi and response surface techniques. 1st international conference on experiments/process/system modeling/simulation/ optimization, Athens, 6-9 July, 2005.
- [7] J. G. Li, Y. X. Yao, P. J. Xia, C. Q. Liu, C. G. Wu, Extended octree for cutting force prediction. *International Journal of Advances Manufacturing Technology* 39 (2008) 866–873.
- [8] H. B. Lacerda, V. T. Lima, Evaluation of cutting forces and prediction of chatter vibrations in milling, Technical Editor: Alisson Rocha Machado, II Brazilian Manufacturing Congress, 18-21 May 2003, Uberlândia, MG, Brazil.
- [9] C. Li, M. Liang, Time–frequency signal analysis for gearbox fault diagnosis using a generalized synchrosqueezing transform, *Mechanical Systems and Signal Processing* 26 (2012) 205–217.
- [10] U. P. Poudel, G. Fu, J. Ye, Wavelet transformation of mode shape difference function for structural damage location identification. *Earthquake engineering and structural dynamics* 36 (2007) 1089–1107.
- [11] J. Xiang, Y. Zhong, X. Chen and Z. He, Crack detection in a shaft by combination of wavelet-based elements and genetic algorithm. *International Journal of Solids and Structures* 45 (2008) 4782–4795.
- [12] J. Luo, D. Yu, M. Liang, Application of multi-scale chirplet path pursuit and fractional Fourier transform for gear fault detection in speed-up

- andspeed-down processes. *Journal of Sound and Vibration* 331 (2012) 4971-4986.
- [13] K. H. Miah, R. H. Herrera, M. Baan, M. D. Sacchi, Application of fractional Fourier transform in cepstrum analysis. *Recovery* (2011).
- [14] R. Tao, Y. L. Li, Y. Wang, Short-time fractional Fourier transform and its applications. *IEEE* (May 2010) 2568-2580.
- [15] C. Capus, K. Brown, Short-time fractional Fourier methods for the time-frequency representation of chirp signals. *Journal of Acoustical Society of America* 113 (2003) 113-116.
- [16] L. Stankovic, T. Alieva, M. J. Bastiaans, Time–frequency signal analysis based on the windowed fractional Fourier transform. *Signal Processing* 83 (2003) 2459 – 2468.
- [17] J. Luo, D. Yu, M. Liang, Application of multi-scale chirplet path pursuit and fractional Fourier transform for gear fault detection in speed up and speed-down processes. *Journal of Sound and Vibration* 331 (2012) 4971–4986.
- [18] L. B. Almeida. The fractional Fourier transform and time-frequency representation. *IEEE Trans. Sig. Proc*, 42, 1994.
- [19] H. M. Ozaktas, Z. Zalevesky, And M. A. Kutay. *The fractional Fourier Transform*. Wiley, Chichester, 2001.
- [20] G. E. Andrews, R. Askey, And R. Roy. *Special functions*, volume 71 of *Encyclopedia of Mathematics and its applications*. Cambridge University press, Cambridge, UK, 1999.
- [21] Luis Almeida Product and convolution theorems for the Fractional Fourier Transform *IEEE signal processing Letters*, Vol 4, NO 1, janvier 1997.
- [22] Jafarizadeha M A, Hassanejadb R, Etefaghb MM and Chitsaz 2008 Asynchronous input gear damage diagnosis using time averaging and wavelet filtering *Mech. Syst. Signal Process.* 22 172-201.
- [23] Zhang Y X, Randall RB 2009 rolling element bearing fault diagnosis based on the combination of genetic algorithms and fast kurtogram *Mech. Syst. Signal Process.* 23 172-201.
- [24] Shao Y M and Nezu K 2005 Design of mixture denoising for detecting fault bearing signals. *J. Sound Vib.* 282 899-917.
- [25] L Jubisa Stankovic, Tatiana Alieva, and Martin J. Bastiaans (Time-frequency signal analysis Based on the windowed Fractional Fourier Transform) Volkswagen stiftung, Federal Republic of Germany 2002.

Résumé

Lors de l'usinage des pièces mécaniques, des défauts structuraux tels que les fissures, les soufflures et les inclusions dures peuvent apparaître. En général, ces défauts sont cachés mais ils peuvent être détectés en analysant les signaux des efforts de coupe. Des défauts simples et multiples ont été créés sur la surface cylindrique d'un disque sous forme de rainures longitudinales. Le chariotage des disques est réalisé tout en mesurant les efforts de coupe à chaque passe. Comme les signaux mesurés correspondants sont toujours entachés par du bruit, des techniques de traitement de signal : la transformée de Fourier fractionnaire à court terme et l'analyse spectrale ont été appliquées dans le but d'identifier ces défauts. En comparant les résultats obtenus, nous avons constaté que le broutement est un phénomène aléatoire et leur identification dépend de plusieurs paramètres tels que le bruit émis, état de surface ...etc.

Mots clés : *Défaut structural, tournage, efforts de coupe, disque mince, analyse de Fourier.*