

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique



PROJET DE FIN D'ETUDE

MASTER

Pour l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Parcours : Master

Spécialité : Construction Mécanique

Thème

**Modélisation et simulation numérique du
comportement vibratoire d'un arbre flexible en
matériaux composites**

Préparé par :

M.Moulayat younesse

Soutenu publiquement le : 18/09/2022 devant le jury composé de :

M.ZAGANE mohamed El Salah	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Président
M.AISSAT Sahraoui	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M. HAMMOU Mahmoud	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M.BOUZIDANE Ahmed	Professeur	Encadrant
M. BENADDA Mohamed	Docteur	Co-encadrant

Année universitaire : 2021 - 2022

Remerciement :

je remercie "Allah aâzawadjel" de m'avoir données le courage, la patience, la santé et la volonté d'arriver à la fin de ce projet.

Je remercie Monsieur BOUZIDANE Ahmed, Professeur à l'Université Ibn Khaldoun l'encadreur de mon projet de Master réalisé au sein de l'université Ibn Khaldoun qu'il trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements pour son aide, sa disponibilité, ses conseils, sa prise en charge et pour tous les moyens nécessaires mise à mon disposition afin de réaliser ce projet.

Je remercie monsieur BNADDA mohamed, Docteur à l'Université Ibn Khaldoun co-encadreur pour son aide.

Je remercie aussi Monsieur ZAGANE mohamed El Salah Maître de Conférences "A" à l'Université Ibn Khaldoun pour l'honneur qu'il nous a fait de bien vouloir accepter de présider ce jury.

Je suis très honorée que Monsieur AISSAT Sahraoui et HAMMOU Mahmoud ont acceptés de participer à l'examination de ce modeste travail, accepteriez l'expression de notre profondes gratitude.

Mes remerciements vont en particulier à tous mes amis pour leurs soutiens et encouragements.

Grand merci à tous nos enseignants de département de génie mécanique pour leurs efforts durant les années théoriques et leurs gentillesse, accepteriez l'expression de notre reconnaissance .

DEDICACES

À

MES CHERS PARENTS,

MES FAMILLES,

MES FRÈRES ET SŒURS,

Moulayat younesse

ملخص

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة السلوك الديناميكي غير الخطي لعمود مرن مصنوع من مادة مركبة. يتم دعم العمود بواسطة محملين صلبين ويتم التحكم فيهما بواسطة محمل مرن في حالة عابرة يخضع لإثارة من نوع غير متوازن.

تستند الدراسة إلى تأثير موضع القرص ، وسمك الطبقة ، وعدد الطبقات ، وزاوية اتجاه الطبقة على اتساع اهتزاز الجزء المتحرك والقوى المرسلّة.

النتائج التي تم الحصول عليها تظهر تأثير اختيار المادة المركبة على سلوك الاهتزاز. تبدو النتائج مثيرة للاهتمام للغاية ويمكن نشرها في المجالات العلمية.

الكلمات المفتاحية: الدوار ، المواد المركبة ، الاهتزاز ، القوة المرسلّة ، السعة.

Résumé :

L'objectif principal de ce travail consiste à étudier le comportement dynamique non linéaire d'un arbre flexible en matériau composite en régime transitoire soumise à des excitations de type balourd.

L'arbre est supporté par deux paliers rigides et contrôlé par un palier flexible. L'étude est basée sur l'effet de la position du disque, de l'épaisseur des plis, le nombre des plis et de l'angle d'orientation des plis sur les amplitudes des vibrations du rotor et les forces transmises. Les résultats obtenus montrent l'effet du choix du matériau composite sur le comportement vibratoire. Les résultats semblent très intéressants et pouvant être publiés dans des journaux scientifiques.

Mots clés : Rotor, Matériaux Composite, Vibration, Force Transmise, Amplitude.

Abstract:

The main objective of this work is to study the nonlinear dynamic behavior of a flexible shaft in composite material, transient state, subjected to unbalance type excitations. The shaft is supported by two rigid bearings and controlled by a flexible bearing. The study is based on the effect of disc position, ply thickness, ply number and ply orientation angle on rotor vibration amplitudes and transmitted forces. The results obtained show the effect of the choice of the composite material on the vibration behavior. The results seem very interesting and can be published in scientific journals.

Key words: Rotor, Composite Materials, Vibration, Force transmitted, Amplitude.

Tables des matières

Introduction générale.....	1
CHAPITRE I Recherche Bibliographique	
Introduction :.....	4
I.1.Définition d'un matériau composite	4
I.2.Caractéristiques générales des matériaux composites.....	5
I.3.Domains d'application	6
I.4.Classification des matériaux composites selon :.....	6
1.4.1.Forme des constituants :.....	6
1.4.2.Classification des matériaux composites suivant la nature des constituants :	7
I.5.Constituants des matériaux composites :	7
I.5.1.La matrice	7
I.5.2.Le rôle de matrice:	8
I.5.3.Les matrices organiques.....	8
I.6.Les renforts	10
I.8.Types de fibres de renforcement :.....	10
I.9.Avantages des matériaux composites	11
I.10.Inconvénients des matériaux composites.....	11
I.11.Les procédés de fabrication des composites :	11
I.11.1.Les technologies en moule ouvert.....	12
I.11.2.Les technologies en moule fermé	13
I.13 Les rotors	16
I.14 Définition du rotor	16
I.15 Définition d'un arbre.....	17
I.16 Définition d'un palier :.....	18
I.17 Le Balourd	18
I.18 Caractérisations des éléments de rotor.....	19
I.19 Différents types de rotors.....	19
I.20 Classification des rotors.....	21
I.21 Dynamique des rotors en matériaux composites	21
Conclusion :.....	23
CHAPITRE II: Modélisation d'un rotor en matériaux composites	
II.1 Introduction	25
II.2 Représentation du modèle	25
II.3 Le disque.....	26
II.4 la relation entre la contrainte et la déformation.....	28
II.5 L'énergie cinétique du système de rotor composite	28

II.6 l'énergie de déformation	32
II.7 l'angle de rotation et la déformation en flexion	33
Chapitre III : étude et simulation numérique du comportement vibratoire d'un arbre en matériau composite	
III.1 Introduction	36
III.2 Etude du comportement dynamique d'un rotor en matériaux composite.	36
III.3 Configuration du rotor :.....	36
III.4 les caractéristiqueS du matériaux :.....	37
III.5 Organigramme :.....	37
III.6 Méthode de Newmark	38
III.7 Processus de calcul.....	39
III.8 Résultats et Interprétation.....	39
III.8.1 III.8.1 Etude de l'effet de la position de disque	39
III.8.2 Etude de l'effet de l'épaisseur de l'empilement des plis.....	41
III.8.3 Etude de l'effet de nombre des plis	42
III.8.4 Etude l'effet de l'angle de l'orientation des fibres	44
III.9 Conclusion :.....	46

LISTE DES FIGURES

Figure.I.1. Schématisation des renforts noyés dans une matrice	5
Figure.I.2. Différentes familles de matrices.....	8
Figure.I.3. Principaux matériaux de renfort.....	10
Figure.I.4. typologie de base des renforcements.....	11
Figure.I.5. Moulage par Contact	12
Figure.I.6. Moulage par projection simultané.....	13
Figure.I.7. Moulage sous vide	13
Figure.I.8. Moulage par injection basse pression de résine (RTM).....	14
Figure.I.9. Moulage par injection de compound BMC	15
Figure.I.10. Moulage par compression de mat pré imprégné SMC	15
Figure.I.11. Moulage par enroulement filamentaire	16
Figure I. 12 : Vue rapprochée d'un rotor constitué de deux disques montés sur un arbre flexible ..	17
Figure I. 14 : Rotor rigide	20
Figure II-1 Modèle de rotor.....	25
Figure II 2 Modèle simple de rotor	26
Figure II.3 Systèmes de coordonnées pour la description du mouvement du rotor.....	27
Figure.II.4 Le modèle du système de rotor arbre-disque en matériau composite.....	27
Figure.II.5 La structure de l'arbre en matériau composite.....	28
Figure.II.6 Ordre de rotation du disque..	29
Figure.II.7 Système de coordonnées du disque	29
Figure III 1 Organigramme de calcul de l'influence de (t , X , θ , et nombre de couches) sur le comportement de rotor.....	38
Figure III.2 : Effet de X sur les amplitudes en fonction des vitesses de rotation.....	40
Figure III.3 : Effet de t sur les forces transmises en fonction des vitesses de rotation.....	41
Figure III.4: Effet de t sur les amplitudes en fonction des vitesses de rotation.....	42
Figure III.5 : Effet de nombre de couches sur les forces transmises en fonction des vitesses de rotation	43
Figure III.6 : Effet de nombre de couche sur les amplitudes en fonction des vitesses de rotation .	43
Figure III.7 : Effet de θ sur les forces transmises en fonction des vitesses de rotation.....	44
Figure III.8 : Effet de θ sur les amplitudes adimensionnelles en fonction des vitesses de rotation	45

LISTE DES TABLEAUX

Tableau.I.1: Principales différences entre les Matrices TP et TD	5
Tableau I.2. Caractéristiques des résines thermodurcissables et des résines thermoplastiques	9
Tableau III.1 les caractéristique du matériaux	37

Nomenclature

Ψ, θ, ϕ	Angles d'Euler entre les repères R et R_0 . [rad]
$[T_{R_b}^R], [R_R^{R_b}]$	Matrices de passage
$\omega_x, \omega_y, \omega_z$	Composantes de la vitesse angulaire absolue du repère R exprimées dans R. [Hz]
T_d^{Rot}	Energie cinétique en rotation du disque. [N. m]
T_d^{trans}	Energie cinétique en translation du disque. [N. m]
T_d	Energie cinétique en translation du disque. [N. m]
I_{sx}, I_{sz}	Moments d'inertie quadratiques de la section de la masse élémentaire de l'arbre. [m ⁴].
T_a	Energie cinétique de l'arbre. [N. m]
E	Module de Young. [N/m ²]
$M_z(y)$	Moment de flexion dans le plan x^*Oy^* . [N/m]
$M_x(y)$	Moment de flexion dans le plan x^*Oz^* . [N/m]
$\sigma_{yy}^{x'}$	La contrainte au point $M(x', z')$ dans le plan x^*Oy^* . [N/m ²]
$\sigma_{yy}^{z'}$	La contrainte au point $M(x', z')$ dans le plan x^*Oz^* . [N/m ²]
$\varepsilon_{yy}^{x'}$	La déformation au point $M(x', z')$ dans le plan x^*Oy^*
$\varepsilon_{yy}^{z'}$	La déformation au point $M(x', z')$ dans le plan x^*Oz^*
ε	La déformation longitudinale du point M
u_a	L'énergie de déformation de l'arbre. [N. m]
τ	Volume de l'arbre. [m ³]
δW	Le travail virtuel
F_u, F_w	Composantes de la force généralisée [N]
m_b	Masse du balourd. [Kg]
m_d	Masse du disque. [Kg]
T_b	Energie cinétique du balourd. [N. m]
Ω	Vitesse de rotation de l'arbre. [rad/s]
q_1 et q_2	Coordonnées généralisées indépendantes

R_{d1}	Rayon intérieur du disque. [m]
R_{d2}	Rayon extérieur du disque. [m]
I_{dx} , I_{dz}	Inerties massiques du disque suivant x et z . [Kg/m^2]
h	Epaisseur du disque. [m]
L	Longueur de l'arbre. [m]
R_a	Rayon de la section droite de l'arbre. [m]
E	Module de Young. [N/m^2]
S	L'aire de la section droite de l'arbre. [m^2]
I_s	Le moment d'inertie diamétral de l'arbre. [m^4]
T	L'énergie cinétique générale. [$N. m$]
k_{xx} , k_{zz}	Les rigidités selon les directions x et z de l'arbre. [N/m]
c_{xx} , c_{zz}	Amortisseurs selon les directions x et z de l'arbre. [$N. s/m$]
k_{xz} , k_{zx}	Rigidités dans une direction (x ou z) mais affectés par l'autre direction. [N/m]
c_{xz} , c_{zx}	Amortissements dans une direction (x ou z) mais affectés par l'autre direction. [$N. s/m$]
k_s	Rigidités de l'arbre. [N/m]
ω	Pulsation. [rad/s]
d	Excentricité [m]
(rpm)	tour par minute

Introduction générale

Introduction générale

L'industrie mécanique innove toujours au milieu d'un changement constant. Les fabricants sont encouragés à améliorer leurs produits. Les progrès de la conception et de la fabrication permettent désormais aux machines de fonctionner à des plages de régime de plus en plus élevées, ce qui augmente les performances et l'efficacité de la machine. Cependant, les efforts générés deviennent de plus en plus importants, exerçant de fortes pressions sur le comportement dynamique global de la machine, et les amplitudes de vibration deviennent souvent trop élevées pour que la structure puisse les supporter. Pour cela, il est nécessaire de contrôler l'amplitude de déformation de l'arbre et de connaître sa fréquence de résonance pour éviter des vibrations excessives qui conduisent à une baisse d'efficacité, un bruit excessif, etc. ; de telles vibrations peuvent même conduire à une instabilité et à des dommages du système : Défaillance due à la fatigue, endommagement des roulements, friction rotor/stator. la dynamique des machines tournantes est plus que jamais d'actualité.

Les conceptions actuelles continuent de créer des structures de plus en plus fines et légères à base de matériaux composites aux propriétés multiples et différentes. L'utilisation accrue des poutres laminées multicouches dans l'industrie comme éléments mobiles dans les machines nécessite la naissance de leurs fréquences normales lorsque les conditions dynamiques externes conduisent à un comportement géométriquement non linéaire de la structure. L'application de diverses théories avancées aux vibrations de faisceaux à haute fréquence a récemment attiré l'attention de certains chercheurs. Ces théories sont utilisées pour évaluer le comportement vibratoire non linéaire des poutres composites stratifiées dans diverses conditions.

La maîtrise du comportement vibratoire nécessite la connaissance des propriétés des arbres tournants en matériaux composites, et la prédiction de cette connaissance est fondamentale à la conception des machines tournantes afin de donner une idée précise de la plage "sûre" en terme de vitesse de rotation.

L'objectif de ce thème porte sur l'étude du comportement dynamique et vibratoire d'un rotor en matériaux composites.

Ce thème de master est divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique dans le quelle basant sur les propriétés les plus importantes des matériaux composites et des avantages de leur utilisation dans les rotors.

Le Deuxième chapitre présente les modèles mathématiques concernant l'étude d'un rotor en matériaux composite

Le troisième chapitre est consacré à l'étude et à la simulation du comportement dynamique. Cette étude consiste à étudier l'effets de la position de disque, l'épaisseur des plis, nombres des plis et l'angles de l'orientation des plis sur le comportement non linier d'un arbre en matériaux de composites.

A la fin, une conclusion générale est présentée sur le travail qui a été effectué ainsi que les résultats et les recommandations que nous jugeons acceptables. Les résultats obtenus sont très intéressants et peuvent être publiés dans des journaux scientifiques.

CHAPITRE I

Recherche Bibliographique

Introduction :

Depuis l'apparition des premières pièces en résine renforcée de fibres de verre (vers 1940), les matériaux composites ont évolué pour devenir le produit le moins cher ou le plus performant possible, voire les deux. Croissance régulière de 10% depuis 20 ans. De par leurs propriétés techniques et mécaniques, ils peuvent remplacer de nombreux composants métalliques tout en bénéficiant d'un poids moindre. Le matériau "parfait" doit avoir des propriétés mécaniques élevées, être durable et protéger l'environnement tout au long de son cycle de vie. L'économie reste le principal moteur, car les composites doivent être compétitifs pour être viables.

Ces matériaux interviennent dans de nombreux domaines : aéronautique, automobile, construction... Cependant, face à des contraintes économiques et environnementales de plus en plus fortes, l'utilisation de renforts naturels et végétaux dans les composites à matrice organique apparaît aujourd'hui comme une alternative. Ainsi, les recherches sur ce sujet se sont amplifiées ces dernières années et un certain nombre de produits (garde-corps, bardage, palettes, fenêtres, etc.) ont commencé à apparaître sur le marché. De nouvelles applications et des matériaux composites plus performants sont anticipés, mais les connaissances sont encore insuffisantes et des recherches doivent être menées pour mieux comprendre certains mécanismes. [1]

1.1. Définition d'un matériau composite :

Un matériau composite est une combinaison de deux matériaux aux propriétés différentes qui se complètent pour produire un matériau globalement plus performant que les composants utilisés seuls.

Matériau composite constitué d'une matrice et d'un renfort constitué de fibres. La matrice elle-même est constituée de résine (polyester, époxy...) et de charges dont le but est d'améliorer les propriétés de la résine tout en réduisant les coûts de production. D'un point de vue mécanique, l'ensemble résine-charge se comporte comme un matériau homogène, et le matériau composite est considéré comme constitué d'une matrice et d'un renfort.

Le renfort confère au composite des propriétés mécaniques élevées, tandis que le rôle de la matrice est de transmettre les contraintes mécaniques extérieures aux fibres et de les protéger des agressions extérieures.

1.2. Caractéristiques générales des matériaux composites :

Un matériau composite peut être défini comme une combinaison d'au moins deux matériaux différents ou de plusieurs matériaux non miscibles (mais à forte adhérence) à l'échelle macroscopique, où les propriétés de l'assemblage final surpassent les propriétés de chacun des matériaux constitutifs. On parle désormais couramment de fibres comme d'arrangements "composites", c'est-à-dire de renforts noyés dans une matrice avec une résistance mécanique beaucoup plus faible (Figure I.1). La matrice assure la cohésion et l'orientation des fibres et transmet également les contraintes subies par la pièce. Le matériau ainsi obtenu est très inhomogène et anisotrope. [2]

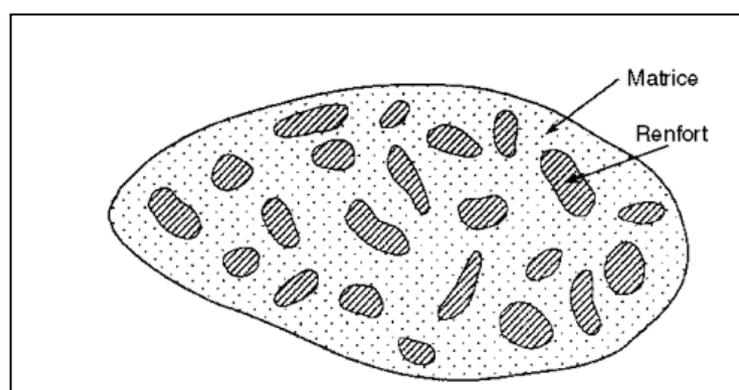


Figure.I.1. Schématisation des renforts noyés dans une matrice [2]

Tableau.I.1: Principales différences entre les Matrices TP et TD. [3]

Type de composite	Constituants	Domaines d'application
1. Composites à matrice Organique (CMO) Papier, carton Panneaux de particules Panneaux de fibres Toiles enduites Matériaux d'étanchéité Pneumatiques Stratifiés renforcés	Résine/charges/fibres cellulosiques Résine/copeaux de bois Résine/fibres de bois Résines souples/tissus Elastomères/bitume/textiles Caoutchouc/toile/acier Résine/charges/fibres de verre, de carbone, etc. Résines/microsphères	Imprimerie, emballage, etc. Menuiserie Bâtiment Sports, bâtiment Toiture, terrasse, etc. Automobile Domaines multiple
2. Composites à matrice Minérale Béton Composite	Ciment/sable/granulats Carbone/fibres de carbone	Génie civil Aviation, espace, sports, biomédecine,

carbone - carbone Composite céramique	Céramique/fibres céramiques	etc. Pièces thermomécaniques
3. Composites à matrice Métallique	Aluminium/fibres de bore Aluminium/fibres de carbone	Espace
4. Sandwiches Peaux Ames	Métaux, stratifiés, etc. Mousses, nids d'abeilles, balsa, plastiques renforcés, etc.	Domaines multiples

1.3. Domaines d'application :

Les excellentes propriétés mécaniques des composites fibre-résine dans certaines propriétés en font des matériaux attractifs pour la construction. De plus, ce qui est intéressant avec ces matériaux, c'est leur anisotropie, que les concepteurs peuvent facilement contrôler, ce qui leur permet d'ajuster la rigidité et la résistance en réponse aux contraintes externes. Par conséquent, le grand avantage des matériaux composites est qu'ils peuvent être optimisés pour chaque application : le renfort peut être placé exactement là où il est nécessaire. Cette optimisation se traduit par des performances élevées de ces matériaux, qui sont souvent les plus légers à ce jour pour une résistance mécanique donnée. Cependant, leur coût de fabrication reste élevé, de sorte que leurs domaines d'application: [4]

- ✓ Électricité et électronique.
- ✓ Bâtiment et travaux publics.
- ✓ Transports routiers, ferroviaires, maritimes, aériens et spatiaux (notamment ; militaire).
- ✓ Santé (instrumentation médicale).
- ✓ Sports et loisirs (skis, raquette de tennis, planche à voile, surf, club de golf, → aviron,...).

Par conséquent, nous notons que les matériaux composites sont principalement utilisés dans des applications où des performances élevées sont recherchées et où le prix n'est pas un facteur majeur.. [4]

1.4. Classification des matériaux composites selon :

1.4.1. Forme des constituants :

En grandes fonction de la forme des constituants, les composites sont classés en deux classes :

Les matériaux composites à particules

Les matériaux composites à fibres , qui à leurs tour se divisent en : [5]

a) Composites à fibres longues : Disposées par un ensemble de fibres continues et immergées dans la matrice pour assurer leur cohésion.

b) Composites à fibres courtes : Le renfort se présente sous la forme de fibres discontinues, disposées de façon aléatoire non directionnelle.

c) Composites à renfort tissu : Le tissu est constitué de fils tissés selon deux directions perpendiculaires, la direction chaîne (liée à la direction longitudinale de la couche composite) et la direction trame (liée à la direction transversale de la couche composite). Les tissus varient selon le type de fil utilisé et la façon dont les fils de chaîne et de trame sont entrelacés.

I.4.2. Classification des matériaux composites suivant la nature des constituants :

En se référant à la matrice, on trouve des matériaux composites à :

- ✓ Matrice organique.
- ✓ Matrice métallique.
- ✓ Matrice de carbone.
- ✓ Matrice céramique. [6]

I.5. Constituants des matériaux composites :

Dans le cas le plus général, un matériau composite est constitué d'une ou plusieurs phases discontinues réparties au sein d'une phase continue. La phase discontinue est généralement plus dure et présente de meilleures propriétés mécaniques que la phase continue. La phase continue s'appelle la matrice et la phase discontinue s'appelle le renforcement ou renforcement. Nous classons la composition des composites comme: [7]

- ✓ Le renfort
- ✓ La matrice

I.5.1. La matrice

Il est possible de lier entre elles les fibres du renfort fibreux et de répartir l'effort (résistance à la compression ou à la flexion). La matrice se déforme facilement et assure une protection chimique des fibres. Généralement des polymères ou des résines organiques.

On peut retrouver dans l'organigramme ci-dessous, les différentes familles de matrices : [8]

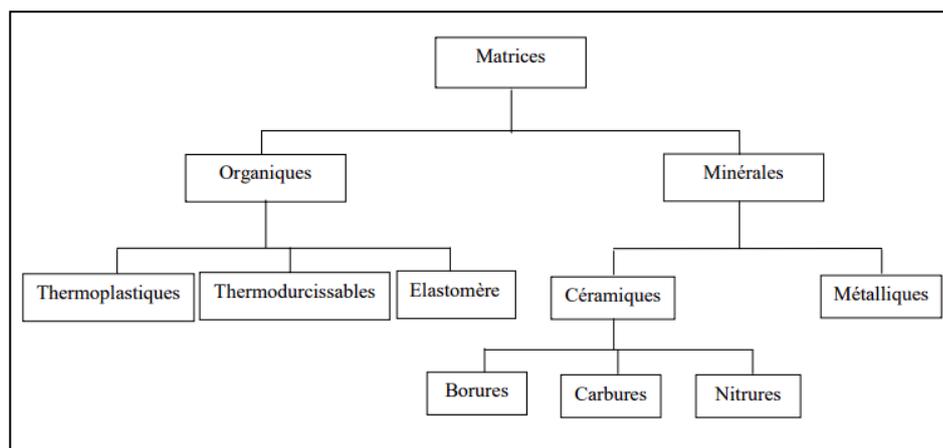


Figure.I.2. Différentes familles de matrices.[9]

I.5.2. Le rôle de matrice:

La fonction du polymère est très importante et les fibres fonctionnent mieux ensemble car le polymère transfère la charge de la fibre aux autres fibres par contrainte de cisaillement. Ainsi, la répartition uniforme de la charge entre les fibres permet à toutes les fibres de subir la même charge dans le composite de faisceaux de fibres sèches. Lorsqu'un filament casse, la charge est répartie sur les autres filaments.

La matrice incorpore les particules individuelles renforcées, les protège des agressions extérieures, augmente la résistance à la rupture de la pièce et donne forme au matériau, pour la matrice elle doit avoir une bonne force d'adhérence avec le matériau de la phase de renforcement (c'est-à-dire une parfaite mouillabilité, aucun produit chimique interaction à l'interface de la matrice et du ferrailage) [10]

I.5.3. Les matrices organiques

Les matrices polymères synthétiques sont les plus courantes dans les composites grand public. Apparentés aux fibres de verre, d'aramide ou de carbone, ils ont un faible module et une faible résistance à la traction, mais sont des renforts faciles à imprégner pour la fabrication. Les thermoplastiques (TP) ont une structure à chaîne droite qui nécessite de la chaleur pour se former.

Le refroidissement, en revanche, peut les réparer (la chaîne se bouche). Dans le cas des thermoplastiques (TP), l'opération est réversible. La structure d'un thermodurcissable (TD) a la forme d'un réseau tridimensionnel, dans ce cas le durcissement est définitif, donc la transformation est une matrice irréversible [11]

a) Les matrices thermoplastiques

Les résines thermoplastiques ont de faibles propriétés mécaniques. Ces résines sont dures et résistantes et nécessitent un traitement à très haute température. Le chlorure de polyvinyle (PVC), le polyéthylène, le polypropylène, le polystyrène, le polyamide polycarbonate sont quelques exemples de ces résines thermoplastiques. Comme les résines thermodurcissables, les matériaux les plus efficaces ont des propriétés mécaniques élevées et une faible densité. [11]

b) La matrice thermodurcissable

Les polymères thermodurcissables sont constitués d'un réseau tridimensionnel de macromolécules. Ils sont obtenus à partir de monomères polyfonctionnels par polycondensation ou polymérisation par addition. Les monomères réagissent entre eux ou avec de petites molécules comme liants. [12]

Les thermodurcissables durcissent de manière irréversible lorsqu'ils sont chauffés. Ils ne peuvent pas être équipés ultérieurement de nouveaux appareils de chauffage. Les thermodurcissables sont généralement des polymères tridimensionnels dans lesquels, une fois polymérisés par la chaleur, le taux de réticulation entre chaînes est très élevé. Le lien croisé limite le mouvement de la chaîne et crée un matériau rigide, solide et durable. Ils sont principalement utilisés dans l'industrie automobile et la construction. Ils sont également utilisés pour fabriquer des jouets, des vernis, des coques de bateaux et des colles. [13]

Tableau I.2. Caractéristiques des résines thermodurcissables et des résines thermoplastiques [14]

Matrices	Thermoplastique	Thermodurcissables
Etat de base	Solide prêt à l'emploi	Liquide visqueux à polymériser
Stockage matière	illimité	Réduit
Mouillabilité des renforts	difficile	Aisée
Moulage	Chauffage + Refroidissement	Chauffage Continu
cycle	Long	Court

Tenue au choc	Assez Bonne	limitée
Tenue thermique	Réduit	Meilleure
Chute et déchets	Recyclables	Perdus

c) Elastomère

L'imprégnation des renforts avec des alliages liquides est une opération techniquement complexe, et en pratique cette technique n'utilise que des alliages d'aluminium, en association avec des fibres ou des particules de graphite ou de céramique. Ils sont faciles à traiter en raison de leur point de fusion relativement bas. Le compromis entre la ténacité de la matrice métallique et la rigidité du renfort confère aux composites des propriétés mécaniques intéressantes, notamment au-dessus de 200°C, par rapport aux alliages individuels. Leur coût de mise en œuvre élevé préserve les composites à matrice métallique pour les applications aéronautiques. [15]

I.6. Les renforts

En général, les structures composites présentent un comportement anisotrope avec de bonnes propriétés de traction des fibres, de mauvaises propriétés de compression et une faible résistance au cisaillement. Afin d'obtenir une structure résistante dans une direction privilégiée, les fibres sont liées selon un motif. Selon les propriétés recherchées, trois types de renforts peuvent être distingués (Figure.I.3).

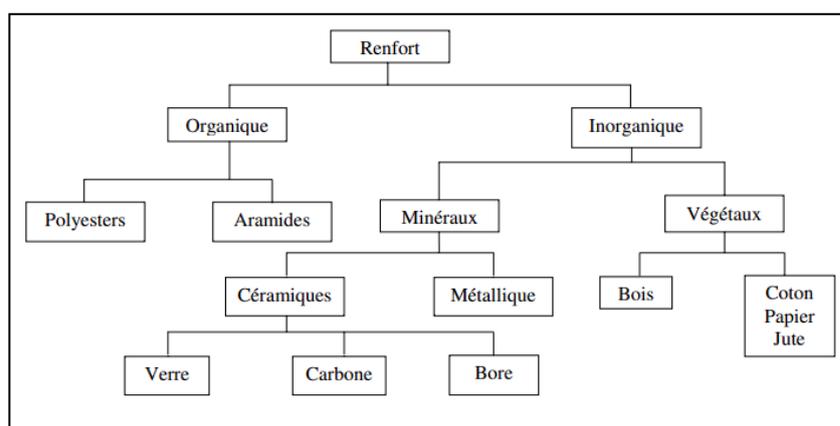


Figure.I.3. Principaux matériaux de renfort. [16]

I.7. Types de fibres de renforcement :

Il existe de nombreux types de fibres différentes qui peuvent être utilisées pour renforcer les composites à matrice polymère. Les plus courantes sont les fibres de carbone (AS4, IM7, etc.) et les fibres de verre (verre S, verre E, etc.). Comme pour la matrice, le choix de la fibre sera déterminé par la figure I.4 . [17]

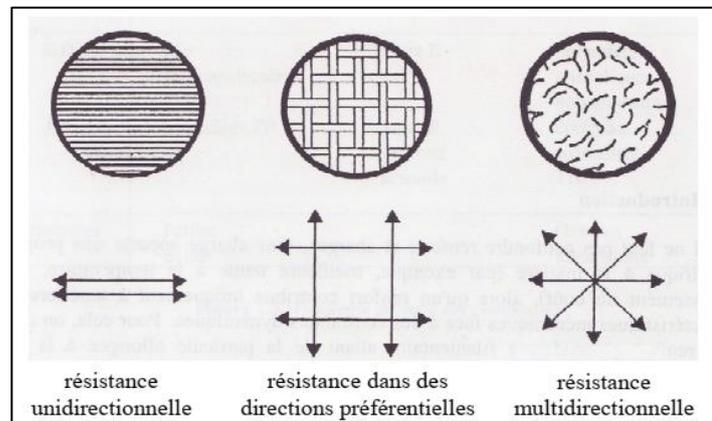


Figure.I.4.typologie de base des renforcements[17]

1.8.Avantages des matériaux composites

- ✓ Gain de masse
- ✓ Formage de pièces complexes (principe de formage) et réduction du nombre d'interfaces (boulonnage, rivetage et soudure sur structures métalliques)
- ✓ Grande résistance à la fatigue
- ✓ Faible vieillissement sous humidité, chaleur, corrosion (sauf en cas de contact aluminium et fibre de carbone)
- ✓ Insensible aux produits chimiques "mécaniques" tels que les graisses, les huiles, les fluides hydrauliques, les peintures, les solvants, le pétrole, etc. [18]

1.9.Inconvénients des matériaux composites

- ✓ Vieillissement sous l'action de l'eau et de la température
- ✓ Attention aux décapants de peinture qui attaquent les résines époxydes
- ✓ Tenue à l'impact moyenne par rapport aux métalliques
- ✓ Meilleure tenue au feu (classement M) que les alliages légers mais émission de fumées (classement F) parfois toxiques pour certaines matrices.
- ✓ Les coûts sont parfois prohibitifs (temps et coût de recherche et de mise en œuvre), les économies de coûts sont surtout efficaces pour les grandes séries [18]

I.10. Les procédés de fabrication des composites :

De nombreuses méthodes de fabrication ont été développées pour répondre aux besoins de l'industrie, et leur choix dépend principalement des propriétés mécaniques et de la géométrie du produit. [19]

I.11.1. Les technologies en moule ouvert

a) Moulage par contact

Le principe consiste à placer un matériau de renfort (sous forme de mat ou de tissu) Comme le montre la figure I.5 dans un moule et à imprégner manuellement une matrice thermodurcissable. Des pièces de toutes formes peuvent être produites à très basse vitesse.

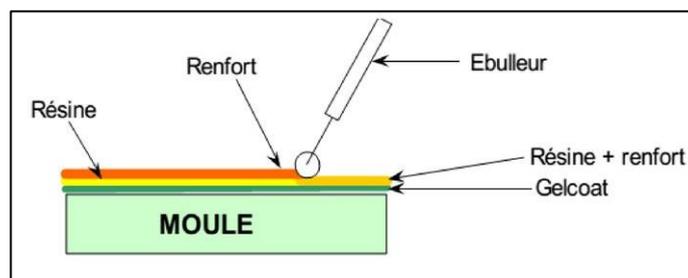


Figure.I.5. Moulage par Contact

b) Moulage par projection simultanée

Le moulage est réalisé en projetant simultanément les fibres coupées et la résine catalytique sur le moule. L'équipement à pulvériser comprend une machine pour couper les mèches et un pistolet pour pulvériser la résine et couper les fibres, l'ensemble de l'opération étant actionné par de l'air comprimé. La couche de fibres imprégnée de résine est ensuite compactée avec un rouleau ondulé et les bulles d'air éliminées (regarde la figure I.6).

Le moulage par projection permet d'obtenir de grandes séries de pièces à moindre coût. Cependant, les renforts se limitent aux fibres coupées et les propriétés mécaniques du matériau restent moyennes.

Le moulage par projection permet d'obtenir de grandes séries de pièces à moindre coût. Cependant, les renforts se limitent aux fibres coupées et les propriétés mécaniques du matériau restent moyennes.

Il est possible d'obtenir deux faces lisses en utilisant un moule et contre-moule, chargés séparément, puis accolés. Ce procédé réserve également la possibilité d'interposer une couche de

tissu entre les deux, et permet alors d'obtenir des pièces ayant de meilleures caractéristiques mécaniques. [20]

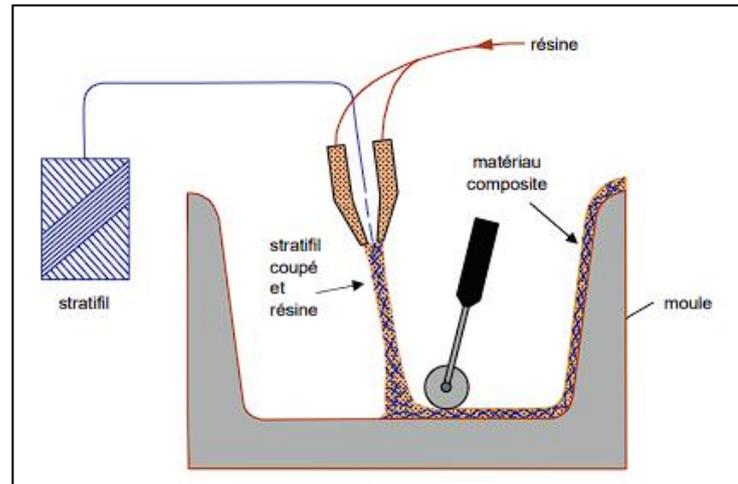


Figure.I.6. Moulage par projection simultané

I.12.2. Les technologies en moule fermé :

a) Moulage sous vide :

L'infusion sous capot silicone est un procédé hybride entre l'infusion sous vide et l'injection RTM. Il s'agit de placer l'armature sèche sous vide dans un moule entouré d'une épaisse bâche en silicone, puis de l'imprégner de la résine arrivant, qui est absorbée par les dépressions créées dans le moule. La technologie permet la réalisation de pièces monolithiques (fines et épaisses), de pseudo intercalaires et d'intercalaires. [21]

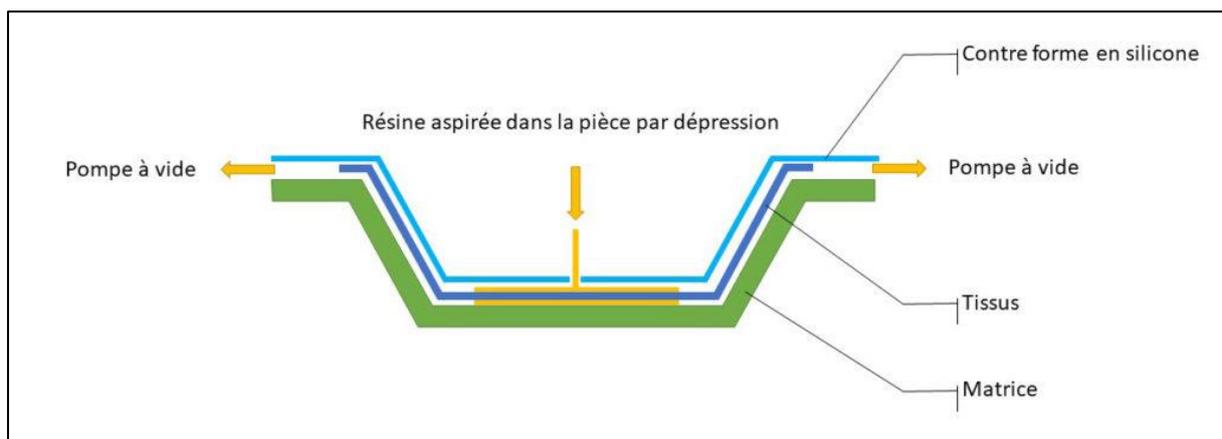


Figure.I.7. Moulage sous vide [21]

b) Moulage par injection basse pression de résine (RTM)

Le moulage par injection est utilisé pour fabriquer de nombreuses choses telles que des bobines, des emballages, des bouchons de bouteilles, des pièces automobiles, des jouets, des peignes de poche, certains instruments de musique (et leurs pièces), des chaises et des petites tables monoblocs, des conteneurs de stockage, des pièces mécaniques (y compris des engrenages) et la plupart des autres produits en plastique disponibles aujourd'hui. Le moulage par injection est la méthode moderne la plus courante de fabrication de pièces en plastique; il est idéal pour produire un grand nombre d'objets identiques. [22]

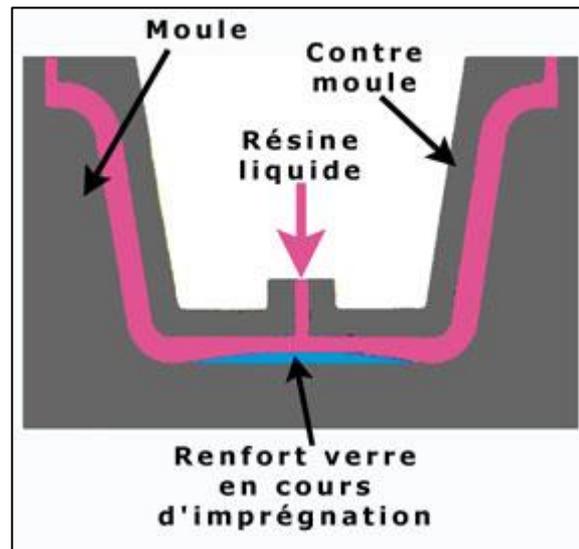


Figure.I.8.Moulage par injection basse pression de résine (RTM)

c) Moulage par injection de compound BMC :

Le BMC (Bulk Molding Compound) est un composé généralement formé en comprimant des résines de polyester, des charges et des renforts sous forme de fibres coupées (telles que 20 % de fibres de verre courtes) pour les processus de moulage à volume élevé.

Le BMC est fortement chargé et renforcé de fibres courtes : la proportion de fibres de verre varie de 10% à 30%, et les longueurs sont comprises entre 6mm et 12mm Comme le montre la figure I.9

Le composé est thermoformé (130-150°C) par moulage par injection (principalement) entre un moule et un contre-moule en acier usiné. La pression de fermeture du moule (50 à 100 bar) provoque l'écoulement de la matière préalablement dosée et remplit la cavité.

Le temps de durcissement très court permet un démoulage rapide. [23]

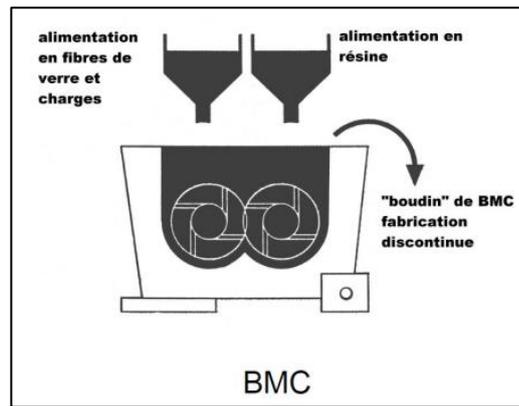


Figure.I.9.Moulage par injection de compound BMC

d) Moulage par compression de mat pré imprégné SMC

Un mat pré-imprégné (SheetMolding Compound) est une nappe de fil coupé ou continu imprégné d'un mélange de résines polyester, de charges et de divers additifs spécifiques.

Découpés en grosses billettes et calibrés (Figure.I.10), les mats pré-imprégnés sont thermoformés (140 à 160°C) par compression entre un moule et un contre-moule en acier usiné. [24]

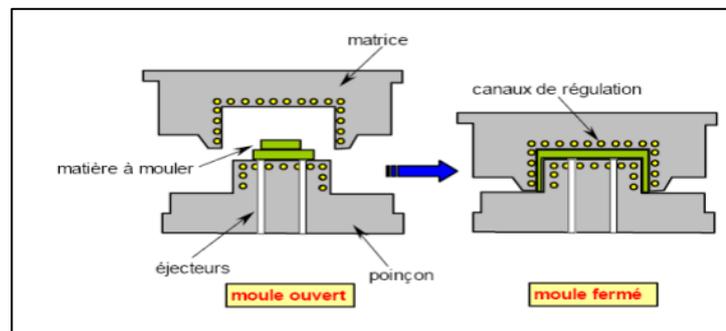


Figure.I.10.Moulage par compression de mat pré imprégné SMC

e) Moulage par enroulement filamentaire

Selon le schéma ci-dessous, il peut être intégré dans une ligne de production continue, permettant la production de tubes très longs. Utilisé dans l'obus de roquettes, torpilles, conteneurs, etc.

Pour les pièces tournantes présentant un gauchissement quelconque, le bobinage est réalisé sur un mandrin de formage détachable, suivi d'une polymérisation en étuve ou en autoclave(Figure.I.11). Le procédé permet de fabriquer des pièces devant résister à la pression interne (réservoirs de carburant, corps de propulseur, etc.) [24]

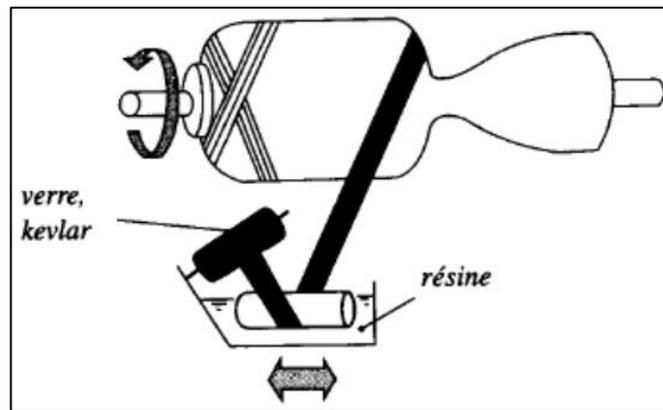


Figure.I.11.Moulage par enroulement filamentaire

I.13 Les rotors

Les rotors sont définis comme étant tout élément tournant autour d'un axe fixe. Ils constituent les pièces maîtresses des machines tournantes dont le domaine d'applications industrielles est très vaste (machines-outils, turbines, véhicules, turbocompresseurs, nucléaire, l'industrie pétrolière, etc.). Parmi leurs fonctions on peut citer la transmission de puissance ou la transformation de énergie mécanique en énergie électrique.

L'arbre d'un rotor peut être considéré comme un corps élastique continu avec des propriétés d'inertie et de masse répartie tout le long de sa longueur surtout dans le domaine de grandes vitesses. L'analyse dynamique des corps continus en rotation s'impose donc car la connaissance précise du comportement vibratoire est indispensable pour assurer un bon fonctionnement.

I.14 Définition du rotor

Le rotor est constitué d'un arbre sur lequel sont montées les parties actives (disques, Bobinage, etc.). Il est maintenu dans le stator par des liaisons tournantes (des paliers radiaux, une butée axiale...). L'arbre se déforme sous l'effet de ces forces et chacun de ces tournons tourne autour d'une position d'équilibre statique constituant la ligne de rotation. Cette ligne varie avec les conditions de fonctionnement (fatigue de l'arbre, la modification des charges des paliers).

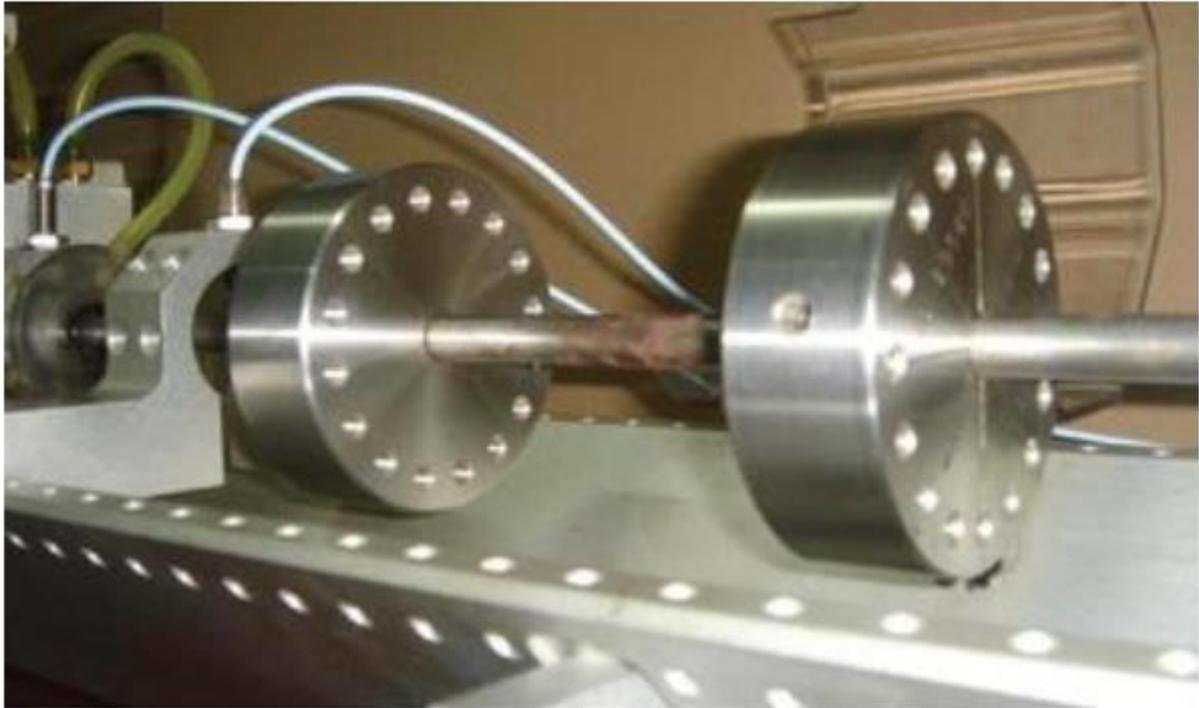


Figure I. 12 : Vue rapprochée d'un rotor constitué de deux disques montés sur un arbre flexible [25]

1.15 Définition d'un arbre

Évidemment, le mouvement le plus facile à transmettre est le mouvement circulaire. L'organe qui transmet ce mouvement en tournant autour de son axe est l'arbre moteur.

Plusieurs raisons ont contribué au choix de la forme cylindrique de l'arbre (forme des surfaces de guidage et d'assemblage, résistances, prix de revient).

Le nom d'un arbre indique les détails de sa fonction ou de sa forme, donc ce que nous disons généralement est :

Selon la forme géométrie :

- Arbre lisse (cylindrique de même diamètre sur toute la longueur)
- Arbre à échelons (cylindrique de diamètres différents successifs)
- Arbre cannelé et arbre denté
- Arbre manivelle
- Arbre plein ou creux

Selon la fonction :

- Arbre moteur
- Arbre récepteur
- Arbre intermédiaire

La force principale appliquée à l'arbre peut être radiale ou axiale, et la contrainte résultante peut

être :

- ✓ du cisaillement, du aux efforts radiaux.
- ✓ De extension de la compression, dues aux efforts axiaux, ils ne sont consideres que dans les etudes precises.
- ✓ de la flexion et de la torsion dues aux efforts s'exetrant à une certaine distance de l'axe

1.16 Définition d'un palier :

Le palier est un élément architectural qui doit répondre aux conditions :

- ✓ Le guidage des arbres : réalisation de l'alésage, réduction de résistance passive.
- ✓ Immobilisation relative de la partie démontable : permettant la mise en place
- ✓ facile de l'arbre.
- ✓ Diminution des frottements.

Les paliers portent différents noms, on distingue :

- a) palier de brouette : le guide de l'arbre le plus simple.
- b) palier en deux pièces.
- c) palier à bague ou à coussinet.

1.17 Le Balourd

Même que la masse du balourd est négligeable par rapport à la masse du rotor [26]

il y a toujours un balourd résiduel lié aux rotors quel que soit leur équilibrage [27] ,

et tout cela à cause des résultats des tolérances de fabrication, de l'usureopérationnelle, de la température (Figure I. 13)

distorsions [25], le déséquilibre est créé, il doit donc être pris en compte dans la modélisation [28].

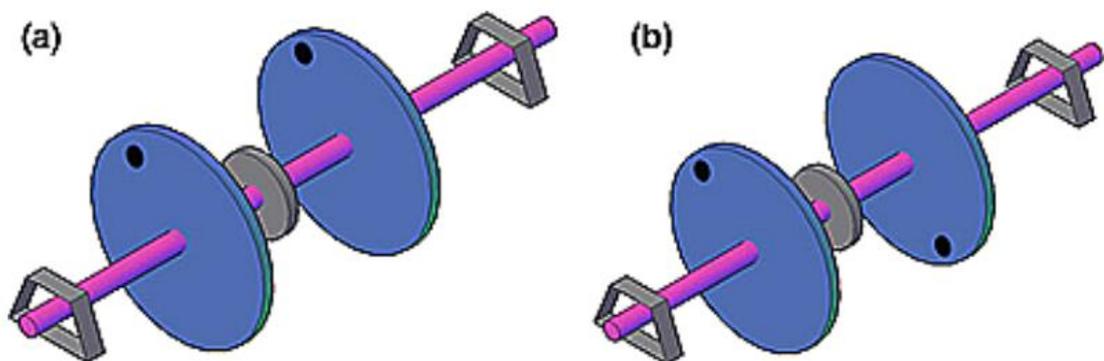


Figure I. 13 : (a) Balourd statique (b) Balourd dynamique [31].

1.18 Caractérisations des éléments de rotor

L'influence sur le comportement dynamique du rotor ressort des caractéristiques des éléments du rotor (arbre, disque, palier), leurs changements influencent également sur les équations dynamiques du système. Deux paramètres peuvent définir ces caractéristiques [30]

1) Paramètres géométriques

- ✓ Uniformité de l'arbre (ex : variation de diamètre)
- ✓ Épaisseur du disque
- ✓ Présence de discontinuité (ex : rotor fissuré)
- ✓ La nature et les types de roulements

2) Paramètres mécaniques

- ✓ Rigidité ou flexibilité du disque.
- ✓ Effet de flexibilité du disque.
- ✓ La nature du matériau de l'arbre.
- ✓ Isotropie et anisotropie.
- ✓ Les mouvements d'appui.

1.19 Différents types de rotors

En général, il existe deux classes particulières de rotors :

1) Rotor rigide

Un rotor rigide est défini comme celui :

- Qui fonctionne en dessous de sa première vitesse critique de flexion .
- Qui a une fréquence avant la vitesse de fonctionnement ou nominale d'une machine [31]

Dans toute la plage de régime de fonctionnement, ces rotors peuvent être équilibrés sur deux plans de correction sélectionnés arbitrairement, ils peuvent également être amenés et resteront dans un état d'équilibre [31].(Figure I. 14)

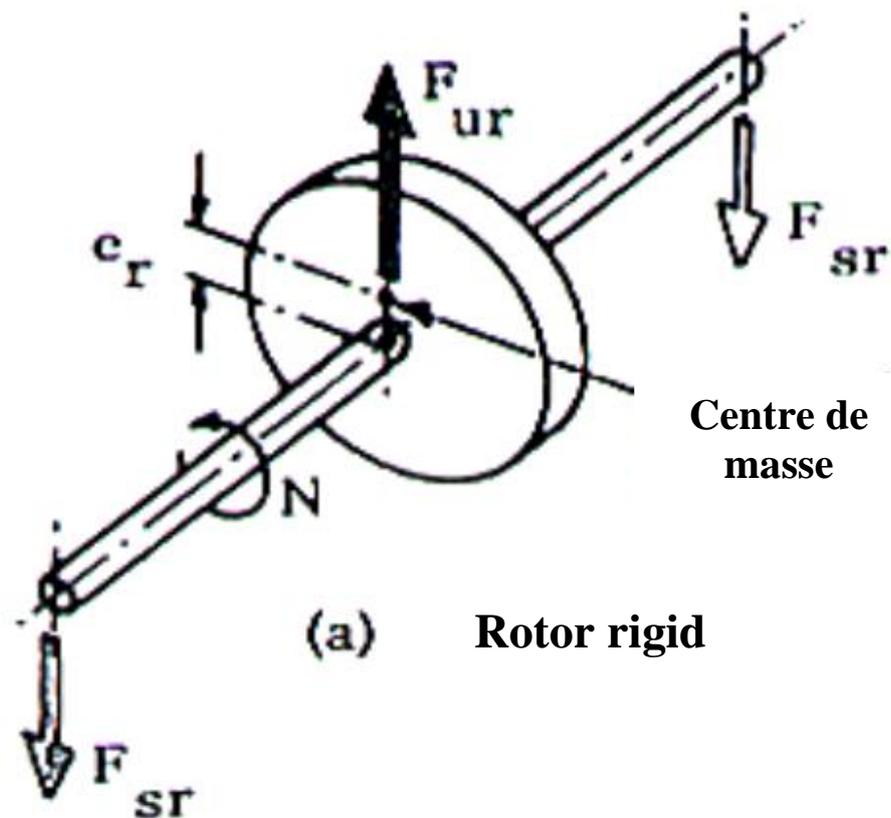


Figure I. 14 : Rotor rigide [32].

2) Rotor flexible

Un rotor flexible est:

- Qui ne peut pas être équilibré dans une machine à équilibrer à basse vitesse [31].
- Qui a plus d'une fréquence à équilibrer avant d'atteindre la vitesse de fonctionnement [31].

Pour des effets dynamiques et afin d'influencer les déformations du rotor, ces rotors fonctionnent proche ou au-delà de sa première vitesse critique de flexion [26], de plus, ils nécessitent une ou plus de correction du plan d'assiette à grande vitesse [31]. (Figure I. 15)

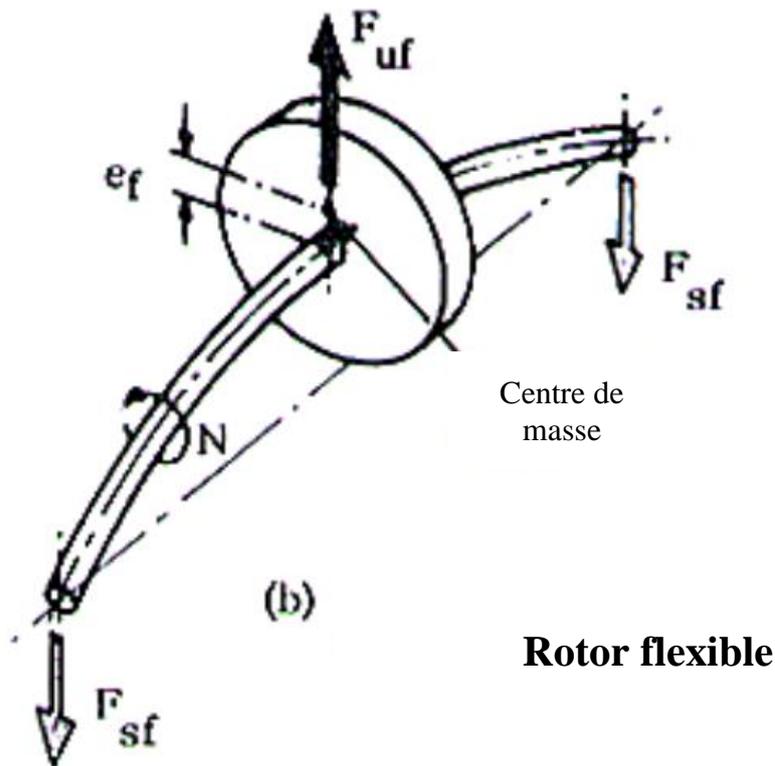


Figure I. 15 : Rotor flexible [32].

I.20 Classification des rotors

La classification des rotors a été faite par l'organisation internationale de normalisation (ISO 1973), afin de décrire les types de rotors et la qualité de l'équilibrage [31], elle peut être déterminée en fonction de paramètres géométriques et mécaniques :

Paramètres géométriques	Paramètres mécaniques
Modèle d'arbre du rotor (dimensions de l'arbre)	Modèle à rotor rigide Modèle de rotor Jeffcot (rotor simple) Modèle de rotor réel (rotor flexible avec des vitesses plus élevées)
Modèle de disque rotor (dimensions du disque)	
Modèle de rotor à pales (ex : hélicoptère)	
Modèle à rotor libre (l'absence de suspension (ex : pas de balourd))	

Tableau I. 1 : Classification des rotors [30].

I.21 Dynamique des rotors en matériaux composites

Les dernières décennies ont vu l'utilisation croissante des matériaux composites dans les applications d'ingénierie. Parmi ces matériaux, les composites en fibre de carbone ont été utilisés dans les industries navale, militaire, aérospatiale et automobile [33], [34]. Cette augmentation est due à leurs excellentes propriétés mécaniques, telles que des rapports résistance/poids élevés, des

rappports module d'élasticité/poids très élevés, une résistance élevée à la fatigue [35], un poids léger, une bonne résistance à la corrosion et des coefficients de résistance thermique très faibles.

Certaines de ces propriétés sont très pertinentes pour le développement des machines tournantes, en particulier pour les arbres de rotor soumis à la fatigue et à un couple élevé [35]. Plusieurs études ont utilisé des matériaux composites pour améliorer l'efficacité des machines tournantes [36], [37]. Certaines applications actuelles incluent les arbres de transmission dans les hélicoptères, les navires et les voitures [38], [39], [40].

La conception des axes de rotor ou d'autres structures, telles que les pales d'hélicoptère et les rotors d'éoliennes, doit être soigneusement conçue en raison des niveaux élevés de charges oscillatoires [41]. Le concepteur peut optimiser la structure en ajustant les propriétés mécaniques du matériau composite par le choix d'un drapage approprié. Ces propriétés affectent le comportement dynamique du rotor en modifiant la fréquence propre et, par conséquent, la vitesse critique et le seuil d'instabilité [42].

Les composites en fibre de carbone sont classés comme des matériaux viscoélastiques, qui ont un amortissement interne élevé par rapport aux matériaux métalliques. L'existence de cet amortissement rend difficile la prédiction des fréquences propres au lieu d'utiliser la raideur statique [43]. Dans un système de rotor, la présence d'un amortissement provenant d'une source externe, comme certains types de roulements, est bénéfique car l'amortissement favorise la stabilité [44]. La situation inverse se produit lorsque l'amortissement se produit dans l'arbre du rotor. Bien que l'amortissement de l'arbre puisse réduire l'amplitude des vibrations à des vitesses sous-critiques, une instabilité se produit souvent dans le rotor à des vitesses supercritiques. Étant donné que de nombreuses machines tournantes fonctionnent à des vitesses supercritiques, il est nécessaire de caractériser la dynamique des arbres composites pour rendre ces applications possibles. Différentes méthodes ont démontré qu'il est possible de choisir des séquences de laminage qui augmentent la vitesse critique d'un arbre, étendant souvent la plage des conditions de fonctionnement stables [45], [46].

Conclusion :

Le choix d'association entre renforteurs et matrices est très subtil. En effet, un matériau composite ne peut remplir pleinement sa fonction mécanique que si la charge appliquée au matériau peut être transférée de la matrice vers les fibres. En raison de cette interaction, les matériaux composites ont une certaine tolérance aux dommages.

Plusieurs mécanismes interviennent et contribuent au travail de rupture : fissuration matricielle, dépolymérisation interfaciale.

Ces mécanismes jouent sur les propriétés physiques et mécaniques de chaque composant et soulignent désormais le rôle déterminant joué par la liaison fibre/matrice.

CHAPITRE II:

Modélisation d'un système
rotor en matériaux
composites

II.1 Introduction

Dans ce chapitre nous examinons les caractéristiques vibratoires latérales non linéaires d'un rotor composite arbre-disque avec des déformations non linéaires. Tout d'abord, nous dérivons l'équation d'énergies cinétiques de l'arbre composite, du disque avec l'excentricité. Ensuite, nous dérivons l'équation décrivant les énergies de déformation de l'arbre composite.

II.2 Représentation du modèle

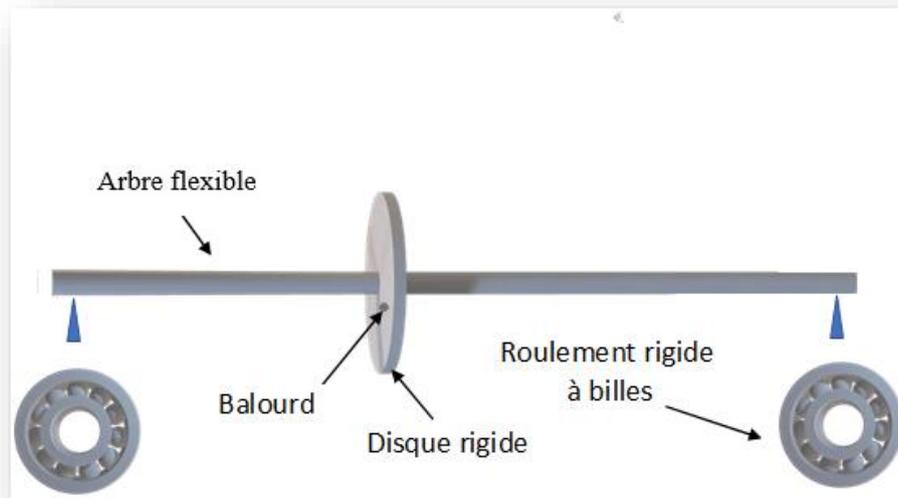


Figure II.1 Modèle de rotor

La figure (II.2) représente un modèle simple de rotor en matériaux constitué d'un arbre sur paliers rigides et non rigides, comprenant un disque et un balourd. Le référentiel (O,x,y,z) est un référentiel galiléen avec l'axe du rotor le long de l'axe y . Chaque déplacement dans les directions x et z utilise un seul degré de liberté. On suppose que le rotor est supporté à ses deux extrémités (2 paliers rigides) par des paliers ferrofluides situés à une certaine longueur. ℓ_2 . Il est constitué :

- d'un arbre de longueur L et de section circulaire constante.
- d'un disque symétrique comportant un balourd, situé à $y = \ell_1$.
- d'un palier situé à $y = \ell_2$.

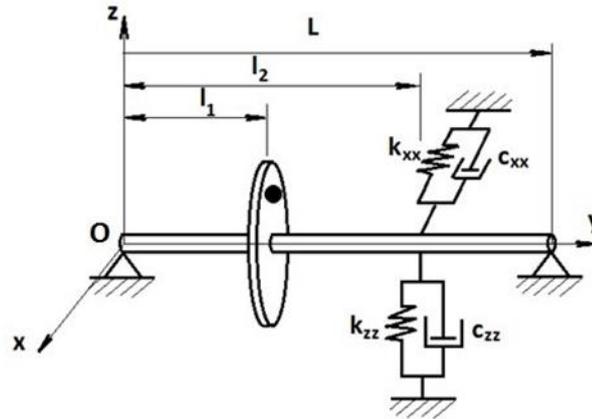


Figure II 2 Modèle simple de rotor

Il s'agit d'un rotor composé d'un arbre flexible, d'un disque rigide placé au milieu de l'arbre, de deux paliers roulements rigides à l'extrémité de l'arbre et contrôlé par un palier ferrofluide situé à $y=l/2$.

Le balourd qui ne peut pas être complètement évité doit aussi être pris en compte. Des expressions d'énergie cinétique sont nécessaires pour caractériser les disques, les arbres et les déséquilibres. L'énergie de déformation est nécessaire pour caractériser l'axe. L'expression du travail virtuel de la force provoquée par l'appui permet de déterminer la force généralisée. L'équation générale du mouvement du rotor est obtenue par les étapes suivantes :

- L'énergie cinétique T , l'énergie de déformation U et le travail virtuel des forces extérieures δW sont calculés pour tous les éléments du système.
- Une méthode numérique est choisie : la méthode de Rayleigh-Ritz pour mettre en évidence les phénomènes ou la méthode des éléments finis pour les applications industrielles.

II.3 Le disque

Pour calculer l'énergie cinétique d'un disque considéré comme rigide, il faut calculer le vecteur vitesse (linéaire et rotationnel). Pour cela, en se référant au vecteur rotation, une référence Galileo $R_0(O_0, x, y, z)$ est liée au rotor non déformé, et une autre référence mobile $R(O_d, X, Y, Z)$ est liée au disque. (Figure II.3)

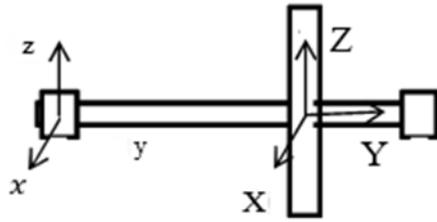


Figure II.3 Systèmes de coordonnées pour la description du mouvement du rotor

Le système de coordonnées (O_d, X, Y, Z) peut être relié au système de coordonnées (O_0, x, y, z) par l'intermédiaire des angles d'Euler (voir figure. II.3).

Nous étudions les caractéristiques de vibration latérale non linéaire d'un système de rotor arbre-disque rotatif, comme le montre la figure II. 1. Le système de rotor à disque d'arbre adopte un matériau [composite en graphite époxy](#), qui a une bonne rigidité de support. Supposons que la longueur totale de l'arbre composé est L , son rayon intérieur est R_0 et son rayon extérieur est R_1 . De plus, le disque rigide est situé au centre de l'arbre avec un rayon extérieur R_2 et un rayon intérieur R_1 . La masse excentrée m est située au diamètre extérieur d_1 du disque. Selon les hypothèses ci-dessus, l'énergie totale du système se compose de quatre parties : l'énergie cinétique du disque, la masse excentrique, l'arbre composite et l'énergie de déformation non linéaire de l'arbre. En figure. 1. XYZ est un système de coordonnées de référence fixe et xyz est un système de coordonnées rotatif fixé sur le disque.. Avant la rotation du système, les deux systèmes de coordonnées se chevauchent.

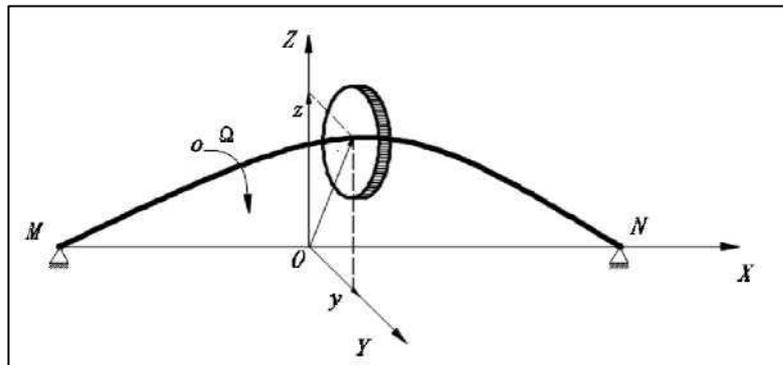


Figure.II.4 Le modèle du système de rotor arbre-disque en matériau composite.

Analyse structurale de l'arbre composite. L'arbre composite est fait de composite stratifié, qui a différents angles d'empilage, une section transversale circulaire et la vitesse angulaire autour de la rotation de l'axe des X (voir la partie gauche de la Figure . 2). Les axes 1, 2 et 3 sont des systèmes de coordonnées des axes matériels (voir la partie droite de la Figure . 2). n indique l'angle entre l'axe du matériau 1 et l'axe x , appelé angle de pli.

II.4 la relation entre la contrainte et la déformation

Selon la littérature [47], la relation entre la contrainte et la déformation d'une coquille cylindrique composite monocouche dans le système de coordonnées cylindriques (x, r, e) satisfait les Éq. (1).

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{\theta\theta} \\ \sigma_{rr} \\ \sigma_{r\theta} \\ \sigma_{xr} \\ \sigma_{x\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{13} & 0 & 0 & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{23} & 0 & 0 & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{11} & 0 & 0 & \bar{Q}_{36} \\ 0 & 0 & 0 & \bar{Q}_{44} & \bar{Q}_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{Q}_{45} & \bar{Q}_{55} & 0 \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{36} & 0 & 0 & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{\theta\theta} \\ \varepsilon_{rr} \\ \gamma_{r\theta} \\ \gamma_{xr} \\ \gamma_{x\theta} \end{bmatrix} \quad (II.1)$$

où, $[\bar{Q}_{ij}]$ est la matrice de transformation de rigidité composite, $[\bar{Q}_{ij}]$ est déduit par $[\bar{Q}_{ij}] = [T]^{-1}[Q_{ij}][T]^{-T}$, $[T]$ est la matrice de transformation entre la direction hors axe et les directions principales, qui peut être représentée comme ci-dessous.

$$[T] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 0 & 0 & 0 & 2mn \\ n^2 & m^2 & 0 & 0 & 0 & -2mn \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m & -n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & n & m & 0 \\ -mn & mn & 0 & 0 & 0 & (m^2 - n^2) \end{bmatrix} \quad (II.2)$$

où, $m = \cos \rho$, $n = \sin \rho$, ρ est pli angulaire.

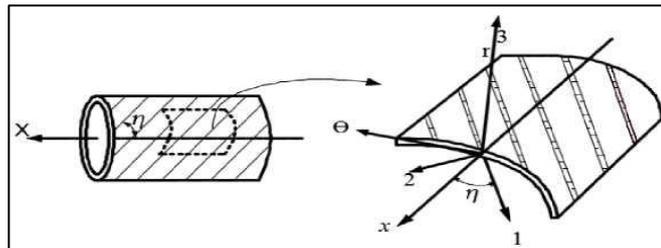


Figure.II.5 La structure de l'arbre en matériau composite.

II.5 L'énergie cinétique du système de rotor composite

L'énergie cinétique du système de rotor composite arbre-disque. En supposant que le disque tourne Oz degrés autour de l'axe Z, puis tourne Oy degrés autour de l'axe y1, et enfin tourne Ox degrés autour de l'axe des x (comme le montre la Figure II.6). La vitesse angulaire peut être définie comme étant la Eq II.3

$$\omega_v = \dot{\theta}_z Z + \dot{\theta}_y y_1 + \dot{\theta}_x x \quad (II.3)$$

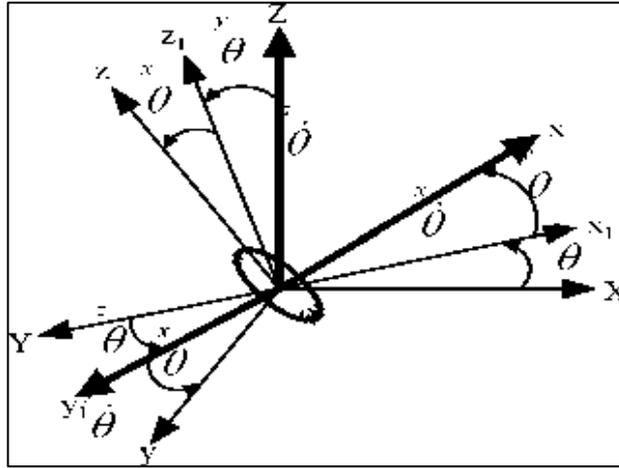


Figure.II.6 Ordre de rotation du disque..

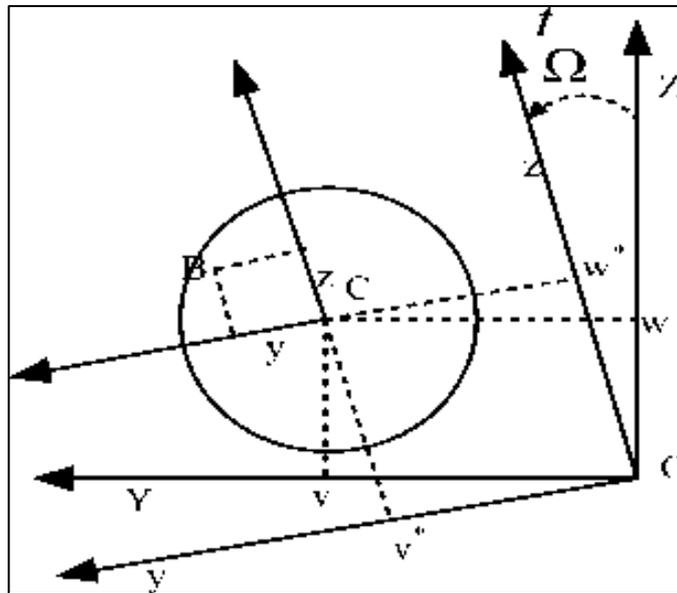


Figure.II.7 Système de coordonnées du disque

Selon la projection de la vitesse angulaire dans le système de coordonnées rotatif xyz (voir figure II.7), nous pouvons obtenir la vitesse angulaire autour de l'axe x, y, z respectivement, c.-à-d. Eqs. II.4

$$\omega = \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{\theta}_x + \dot{\theta}_z \sin \theta_y \\ \dot{\theta}_y \cos \theta_x - \dot{\theta}_z \cos \theta_y \sin \theta_x \\ \dot{\theta}_y \sin \theta_x + \dot{\theta}_z \cos \theta_y \cos \theta_x \end{pmatrix} \quad (II.4)$$

En supposant que u, v et w est le déplacement du système dans le système de coordonnées fixe X, Y et Z respectivement. Si nous ne considérons pas le mouvement du disque dans la direction de l'axe X, alors u=0. Par conséquent, l'énergie cinétique totale du système rotor comprend des parties, c'est-à-dire l'énergie cinétique du disque dans la direction Y, Z, l'énergie cinétique du système de coordonnées de rotation dans la direction x, y, z. L'énergie cinétique du disque peut être définie comme Eq. II.5.

$$T_d = \frac{M_d}{2} (\dot{v}^2 + \dot{w}^2) + \frac{I_{dx}}{2} \omega_x^2 + \frac{I_{dy}}{2} \omega_y^2 + \frac{I_{dz}}{2} \omega_z^2 \quad (\text{II.5})$$

où, M_d est la masse du disque, I_{dx} , I_y , I_z est le moment d'inertie autour de l'axe de x , y , z respectivement.

Substituer les éléments ω_x , ω_y , ω_z dans l'Eq. II.5 et simplifier l'équation, nous pouvons obtenir l'Eq. II.6

$$T_d = \frac{M_d}{2} (\dot{v}^2 + \dot{w}^2) + \frac{I_{dx}}{2} (\dot{\theta}_y^2 + \dot{\theta}_z^2) + \frac{1}{2} I_{dx} (\Omega^2 + 2\Omega \dot{\theta}_z \theta_y) \quad (\text{II.6})$$

Suivant une méthode similaire, nous pouvons obtenir l'équation sur l'énergie cinétique de l'arbre composite, c.-à-d. Eq. II.7

$$T_s = \frac{1}{2} \int_0^L \left\{ I_m (\dot{v}^2 + \dot{w}^2) + I_d (\dot{\theta}_y^2 + \dot{\theta}_z^2) + 2\Omega I_p \theta_y \dot{\theta}_z + \Omega^2 I_p \right\} dx \quad (\text{II.7})$$

où, L est la longueur de l'arbre, $2QI_pOyOz$ est la force de Coriolis, I_d ($6y t 62$) est le coefficient de force inertielle, I_m est la masse de l'arbre composite par unité de longueur, I_d est le moment d'inertie diamétrique de l'arbre composite, I_p est le moment polaire d'inertie de l'arbre composite.

L'énergie cinétique de la masse excentrique est obtenue selon la littérature [54], qui peut être exprimée en Eq II.8

$$T_u = \frac{1}{2} m_u (\dot{v}^2 + \dot{w}^2 + \Omega^2 d_1^2 + 2\Omega d_1 \dot{v} \cos \Omega t - 2\Omega \dot{w} d_1 \sin \Omega t) \quad (\text{II.8})$$

L'énergie cinétique totale du système rotor arbre-disque composite est la somme de l'énergie cinétique du disque, de l'énergie cinétique de l'arbre composite et de l'énergie cinétique de la masse excentrique, qui peut être exprimée en Eq II.9

$$T_R = T_d + T_s + T_u \quad (\text{II.9})$$

Énergie de déformation de l'arbre composite. Selon la littérature [13], l'arbre sera déformé de manière non linéaire sous la force externe. Et la déformation non linéaire peut être formellement exprimée comme Eq II.10

$$\varepsilon_{xx} = -y \frac{\partial^2 v^*}{\partial x^2} - z \frac{\partial^2 w^*}{\partial x^2} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v^*}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w^*}{\partial x} \right)^2 \quad (\text{II.10})$$

À partir de la Figure II.6, nous pouvons voir que la relation entre le système de coordonnées rotatif xyz et le système de coordonnées fixe XYZ satisfait les équations II.11

$$\begin{aligned} v^* &= v \cos \Omega t - w \sin \Omega t \\ w^* &= v \sin \Omega t + w \cos \Omega t \end{aligned} \quad (\text{II.11})$$

La relation entre l'angle de rotation et le déplacement peut être représentée par les équations. II.12

$$\theta_y = -\frac{\partial w^*}{\partial x} \quad \theta_z = \frac{\partial v^*}{\partial x} \quad (\text{II.12})$$

Substitution d'éqs. II.11 et II.12 dans l'équation. II.10, nous pouvons obtenir l'équation. II.13

Cette équation décrit la déformation non linéaire variable secondaire de l'arbre sous la force externe.

$$\varepsilon_{xx} = z \frac{\partial \theta_y}{\partial x} - y \frac{\partial \theta_z}{\partial x} + \frac{1}{2} \theta_y^2 + \frac{1}{2} \theta_z^2 \quad (\text{II.13})$$

L'énergie de déformation de l'arbre composite peut être représentée par l'équation. II.14

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L \int_S \sigma_{xx} \varepsilon_{xx} ds dx \quad (\text{II.14})$$

où, S est la section transversale de l'arbre composite, σ_{xx} est la force de déformation.

Éq. (15) [55] est la contrainte et la déformation de la couche k dans le repère cylindrique.

$$\sigma_{xx}^k = \bar{Q}_{11}^k \varepsilon_{xx} + k_s \bar{Q}_{16}^k \gamma_{x\theta} \quad (\text{II.15})$$

Remplacer l'éq II.15 dans l'éq II.14 on peut obtenir l'Eq II.16.

$$u = u_1 + u_2 \quad (\text{II.16})$$

$$\text{ou } U_1 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \int_0^L \int_S \bar{Q}_{11}^k \varepsilon_{xx}^2 ds dx, \quad U_2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \int_0^L \int_S k_s \bar{Q}_{16}^k \gamma_{x\theta} \varepsilon_{xx} ds dx$$

Remplacer l'éq II.13. en U_1 on peut aussi obtenir l'Eq II.17.

$$U_1 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \bar{Q}_{11}^k \int_0^L \int_S \left(z \frac{\partial \theta_y}{\partial x} - y \frac{\partial \theta_z}{\partial x} + \frac{1}{2} \theta_y^2 + \frac{1}{2} \theta_z^2 \right)^2 ds dx \quad (\text{II.17})$$

Comme $I_y = \int_S z^2 dS$ et $I_z = \int_S y^2 dS$, si on laisse $I_d = I_y = I_z$, Eq II.17 peut être simplifié comme Eq II.18.

$$U_1 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \bar{Q}_{11}^k I_d \int_0^L \left[\left(\frac{\partial \theta_y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \theta_z}{\partial x} \right)^2 \right] dx + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \bar{Q}_{11}^k S \int_0^L \left[\frac{1}{4} \theta_y^4 + \frac{1}{4} \theta_z^4 + \frac{1}{2} \theta_z^2 \theta_y^2 \right] dx \quad (\text{II.18})$$

Remplacer l'éq II.13. dans U_2 , nous pouvons obtenir l'Eq II.19.

$$U_2 = \frac{1}{2} k_s \sum_{k=1}^N \bar{Q}_{16}^k \gamma_{x\theta} \int_0^L \int_S \left(z \frac{\partial \theta_y}{\partial x} - y \frac{\partial \theta_z}{\partial x} + \frac{1}{2} \theta_y^2 + \frac{1}{2} \theta_z^2 \right) ds dx \quad (\text{II.19})$$

où, k_s est le coefficient de correction de cisaillement, et $\gamma_{x\theta}$ peut être obtenu à partir de la littérature [57], qui est définie comme Eq II.20.

$$\gamma_{x\theta} = \theta_z \sin \beta + \theta_y \cos \beta - \sin \beta \theta_z - \cos \beta \theta_y \quad (\text{II.20})$$

Remplacer l'éq II.20 en éq II.19 nous pouvons obtenir l'équation II.21.

$$U_2 = \frac{1}{2} k_s \sum_{k=1}^N \bar{Q}_{16}^k \int_0^L \int_S \left(z \frac{\partial \theta_y}{\partial x} - y \frac{\partial \theta_z}{\partial x} + \frac{1}{2} \theta_y^2 + \frac{1}{2} \theta_z^2 \right) (\theta_z \sin \beta + \theta_y \cos \beta - \sin \beta \theta_z - \cos \beta \theta_y) ds dx = 0 \quad (\text{II.21})$$

II.6 l'énergie de déformation

Enfin, l'énergie de déformation de l'arbre composite peut être obtenue selon Eq II.22

$$U = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \bar{Q}_{11}^k I_d \int_0^L \left[\left(\frac{\partial \theta_y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \theta_z}{\partial x} \right)^2 \right] dx + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \bar{Q}_{11}^k S \int_0^L \left[\frac{1}{4} \theta_y^4 + \frac{1}{4} \theta_z^4 + \frac{1}{2} \theta_z^2 \theta_y^2 \right] dx \quad (\text{II.22})$$

Sur la figure 1, le déplacement de l'arbre composite à la position x dans les directions de l'axe y et de l'axe z peut être exprimé par l'équation. ensemble II.23.

$$\begin{cases} v(x, t) = f(x)V(t) = f(x)V \\ w(x, t) = f(x)W(t) = f(x)W \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

où, V, W sont le déplacement du disque dans l'axe y, z respectivement. $f(x) = \sin \frac{\pi x}{L}$ est la fonction de mode de vibration du premier ordre de la vibration latérale de l'arbre composite. La dérivée première et la dérivée seconde de $f(x)$ peuvent être représentées par les équations II.24.

$$\begin{cases} g(x) = f'(x) = \frac{\pi}{L} \cos \frac{\pi x}{L} \\ h(x) = f''(x) = -\left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \sin \frac{\pi x}{L} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

La vitesse de y et z dans la position x de l'arbre composite peut être exprimée par les équations II.25.

$$\begin{cases} \dot{v}(x, t) = f(x)\dot{V}(t) = f(x)\dot{V} \\ \dot{w}(x, t) = f(x)\dot{W}(t) = f(x)\dot{W} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

II.7 l'angle de rotation et la déformation en flexion

Comme l'angle de rotation du disque (i.e., θ_y et θ_z) s'écarte légèrement de l'axe y et de l'axe z, l'angle de rotation et la déformation en flexion de l'arbre peuvent être exprimés en fonction du déplacement, c'est-à-dire l'ensemble d'équations II.26

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_z = \partial v / \partial x = f'(x)V = g(x)V \\ \dot{\theta}_z = \partial^2 v / \partial x \partial t = f'(x)\dot{V} = g(x)\dot{V} \\ \partial \theta_z / \partial x = \partial^2 v / \partial x^2 = f''(x)V = h(x)V \\ \theta_y = -\partial w / \partial x = -f'(x)W = -g(x)W \\ \dot{\theta}_y = -\partial^2 w / \partial x \partial t = -f'(x)\dot{W} = -g(x)\dot{W} \\ \partial \theta_y / \partial x = -\partial^2 w / \partial x^2 = -f''(x)W = -h(x)W \end{array} \right. \quad (\text{II.26})$$

En substituant l'ensemble d'équations II.26 dans les équations. II.6, II.7, II.8 et II.9, et en les simplifiant, on obtient l'Eq. II.27

$$T = T_d + T_x + T_a = p_1(\dot{V}^2 + \dot{W}^2) + \frac{1}{2}I_{dx}\Omega^2 - p_2\Omega\dot{V}W + \frac{1}{2}\Omega^2 I_p L + \frac{1}{2}m_a\Omega^2 d_1^2 + m_u f(x)\Omega d_1 \cos \Omega t \dot{V} - m_u f(x)d_1 \Omega \sin \Omega t \dot{W} \quad (\text{II.27})$$

où,

$$\begin{aligned} p_1 &= \frac{M_d}{2}f(x)^2 + \frac{I_{dx}}{2}g(x)^2 + \frac{1}{2}m_a f(x)^2 + \frac{1}{2}I_{wx}^L \int_0^L f(x)^2 dx + \frac{1}{2}I_d \int_0^L g(x)^2 dx \\ p_2 &= I_{dx}g(x)^2 + I_p \int_0^L g(x)^2 dx \end{aligned}$$

En substituant l'ensemble d'équations Eq. II.26 en éq. II.22 et en le simplifiant, on obtient l'équation suivante.

$$U = k_1(W^2 + V^2) + k_2(W^4 + V^4 + 2V^2W^2) \quad (\text{II.28})$$

$$\text{où, } k_1 = \frac{\bar{Q}_{11n}I_d}{2} \int_0^L h(x)^2 dx, k_2 = \frac{\bar{Q}_{11n}S}{8} \int_0^L g(x)^4 dx.$$

Basé sur l'équation de Lagrange. II.29, nous prenons les deux variables indépendantes V,W dans les directions y et z et substituons Eq. II.27 et II.28 dans l'équation. II.29, puis obtenez enfin les équations. II.30 représenté par V, W. L'ensemble d'équations non linéaires du rotor arbre-disque composite (c'est-à-dire les équations II.31) est obtenu en simplifiant et en introduisant un coefficient d'amortissement externe c.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} = Q_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{II.29})$$

$$\left. \begin{aligned} 2p_1\ddot{V} - p_2\Omega\dot{W} + 2k_1V + 4k_2(V^3 + VW^2) &= m_u d_1 f(x) \Omega^2 \sin \Omega t \\ 2p_1\ddot{W} + p_2\Omega\dot{V} + 2k_1W + 4k_2(W^3 + V^2W) &= m_u d_1 f(x) \Omega^2 \cos \Omega t \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.30})$$

Ainsi, le système des équations d'un rotor en matériaux de composite en régime permanent s'écrit comme suit//

$$\left. \begin{aligned} \ddot{V} - a_1\Omega\dot{W} + a_2V + a_3(V^3 + VW^2) + c\dot{V} &= m d_1 f(x) \Omega^2 \sin \Omega t \\ \ddot{W} + a_1\Omega\dot{V} + a_2W + a_3(W^3 + V^2W) + c\dot{W} &= m d_1 f(x) \Omega^2 \cos \Omega t \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.31})$$

$$\text{où } a_1 = \frac{P_2}{2p_1}, a_2 = \frac{K_1}{p_1}, a_3 = \frac{2K_2}{P_1}, m = \frac{m_u}{2p_1}$$

Par analogie, le système des équations d'un rotor en matériau de composite en régime transitoire est donné comme suit :

$$\left. \begin{aligned} \ddot{V} - a_1\Omega\dot{W} + a_2V + a_3(V^3 + VW^2) + cp\dot{V} + kpV &= m d_1 f(x) (\Omega^2 \sin \phi - \dot{\Omega}^2 \cos \phi) \\ \ddot{W} + a_1\Omega\dot{V} + a_2W + a_3(W^3 + V^2W) + cp\dot{W} + kpW &= m d_1 f(x) (\Omega^2 \cos \phi + \dot{\Omega}^2 \sin \phi) \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.31})$$

Chapitre III :

Etude et simulation
numérique du comportement
vibratoire d'un arbre en
matériau composite

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous sommes intéressées à présenter une étude numérique sur le comportement dynamique d'un arbre flexible en matériaux composite supporté par deux paliers rigides et contrôlé par un palier flexible.

Cette étude porte principalement sur l'effets de la position de disque, l'épaisseur des plis, le nombre des plis et l'angle de l'orientation des plis sur le comportement non linière et les forces transmises d'un arbre flexible en matériaux composite en régime transition .

Les résultats semblent très intéressants et peuvent être publier dans des journaux scientifiques.

III.2 Etude du comportement dynamique d'un rotor en matériaux composite.

Rapportons que le système des équations de rotor en matériaux de composite en régime transitoire est donné comme suit :

$$\left. \begin{aligned} \ddot{V} - a_1\Omega\dot{W} + a_2V + a_3(V^3 + VW^2) + cp\dot{V} + kpV &= md_1f(x)(\Omega^2 \sin \phi - \dot{\Omega}^2 \cos \phi) \\ \ddot{W} + a_1\Omega\dot{V} + a_2W + a_3(W^3 + V^2W) + cp\dot{W} + kpW &= md_1f(x)(\Omega^2 \cos \phi + \dot{\Omega}^2 \sin \phi) \end{aligned} \right\} \quad (\text{III. 1})$$

III.3 Configuration du rotor :

Les propriétés géométriques du rotor sont données comme suit/

Diamètre de l'arbre de composite	Da=0.1
Rayon inférieur du composite	R1=Da/2
Rayon du disque	R2=0.8
Rayon inférieur tc : épaisseur du plis	R0=R1-tc

La masse et les inerties du disque sont :

La masse du disque	MD=9.189 kg
Le moment diamétral suivant X	IDX=0.1953
Le moment diamétral suivant Y	R2=0.8
Longueur	2.4 m

Balourd

Balourad	$mb = 0.0001 \text{ m.Kg}$
Distance	$d=0.4 \text{ m}$

III.4 Les caractéristiques du matériaux de composite :

Tableau III.1 présente les propriétés mécaniques du matériau en composite utilisé pour la simulation

<i>Caractère</i>	<i>Nomenclature</i>	<i>Valeur</i>
<i>Module de Young</i>	E_1	<i>211 GPa,</i>
<i>Module de Young</i>	E_2	<i>24.1 GPa</i>
<i>Module de cisaillement</i>	G_{12}	<i>6.9 GPa</i>
<i>Coefficient de Poisson</i>	ν_{12}	<i>0.36</i>
<i>La masse volumique du composite</i>	ρ	<i>1967 kg/m3</i>

III.5 Organigramme :

La figure III.1 schématise l'organigramme général de résolution du système d'équation pour étudier l'effet de l'effets de la position de disque, l'épaisseur des plis, le nombre des plis et l'angle de l'orientation des plis sur le comportement dynamique non linier et les forces transmises. Il est à noter que la méthode de résolution est basée sur l'application de la méthode de Newmark. Les calculs itératifs dans le temps sont effectuées à l'aide des pas variables ;

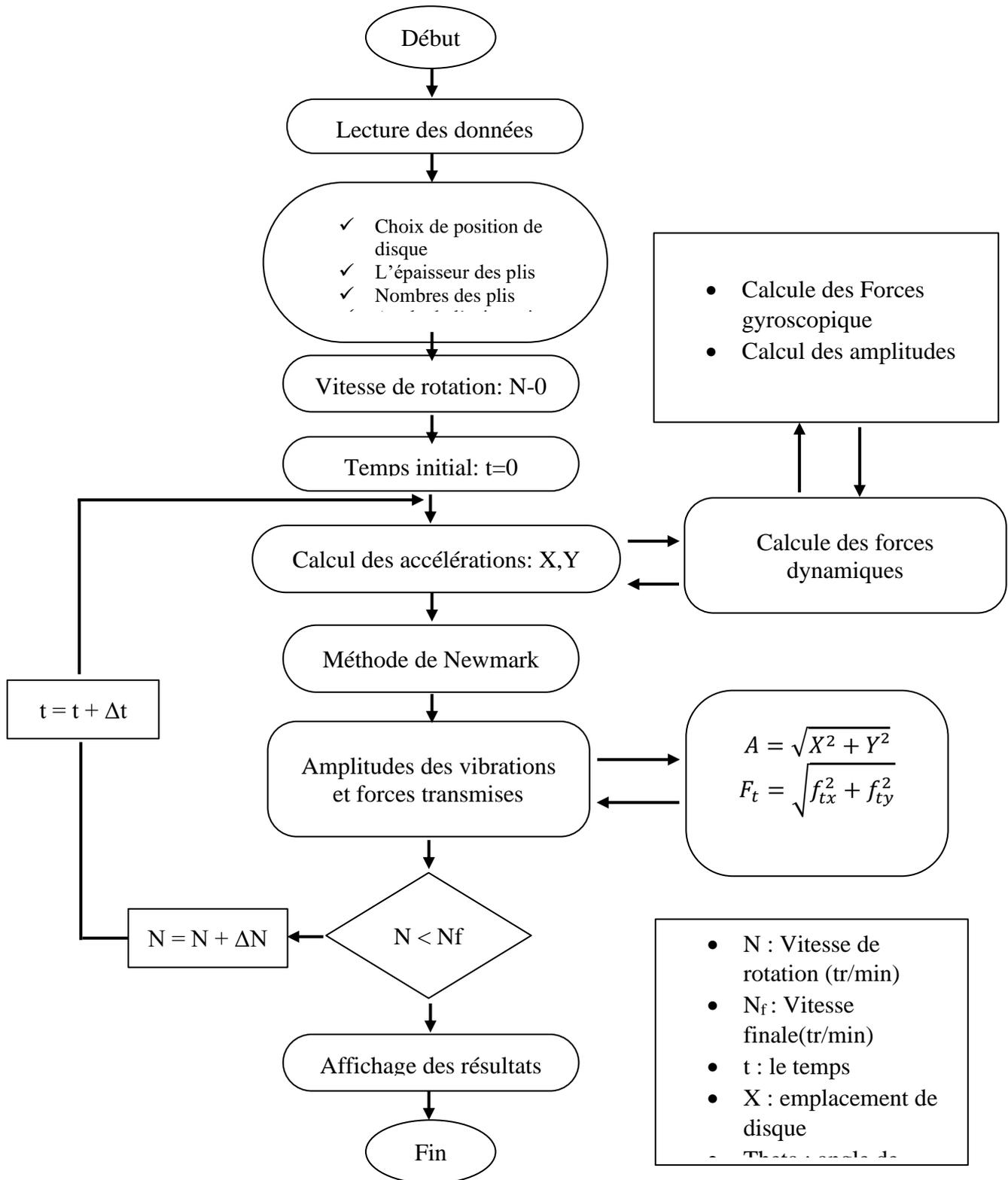


Figure III-1 Organigramme du processus de calcul

III.6 Méthode de Newmark

La méthode itérative de Newmark, qui consiste à estimer la solution des équations dynamiques du système arbre -palier par un calcul temporel pas à pas, est donnée comme suit [3] :

$$\begin{cases} \dot{q}(t + \Delta t) = \dot{q}(t) + [(1 - \delta)\ddot{q} + \delta\ddot{q}(t + \Delta t)]\Delta t \\ q(t + \Delta t) = q(t) + \dot{q}(t)\Delta t + [(0,5 - \alpha)\ddot{q}(t) + \alpha\ddot{q}(t + \Delta t)]\Delta t^2 \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

Où δ et α sont des constantes permettant de modifier le schéma numérique. Le plus souvent

$$\alpha = 0,25$$

$$\delta = 0,50$$

$$q = (X, Y)$$

III.7 Processus de calcul

Le calcul non linéaire consiste à résoudre le système d'équation (III.1) de la dynamique pour le système de notre rotor par un calcul temporel et fréquentiel. La résolution temporelle est effectuée à l'aide de la méthode itérative de Newmark. Les forces hydrostatiques créées par le fluide sur l'arbre sont calculées à chaque itération.

III.8 Résultats et Interprétation

III.8.1 Etude de l'effet de la position de disque

Les figures III.1 et III.2 montrent l'effet de la position de disque sur le comportement dynamique de rotor en composite et les forces transmises respectivement pour un angle d'orientations des plis [45/-45], une épaisseur $t=0.001\text{mm}$ et dont les caractéristiques physiques sont présentées dans le tableau III.1

- 1) Ces figures montrent que les fréquences critiques (W_n) diminuent lorsque la position de disque s'éloigne du milieu de l'arbre. Ceci est expliqué par l'augmentation de la rigidité de l'arbre
- 2) Il est à noter que lorsque la position de disque qui se trouve au 1/3 de l'arbre, présente une meilleure réponse vibratoire par rapport aux autres positions. Ceci est dû aussi à l'augmentation de la rigidité de rotor en composite

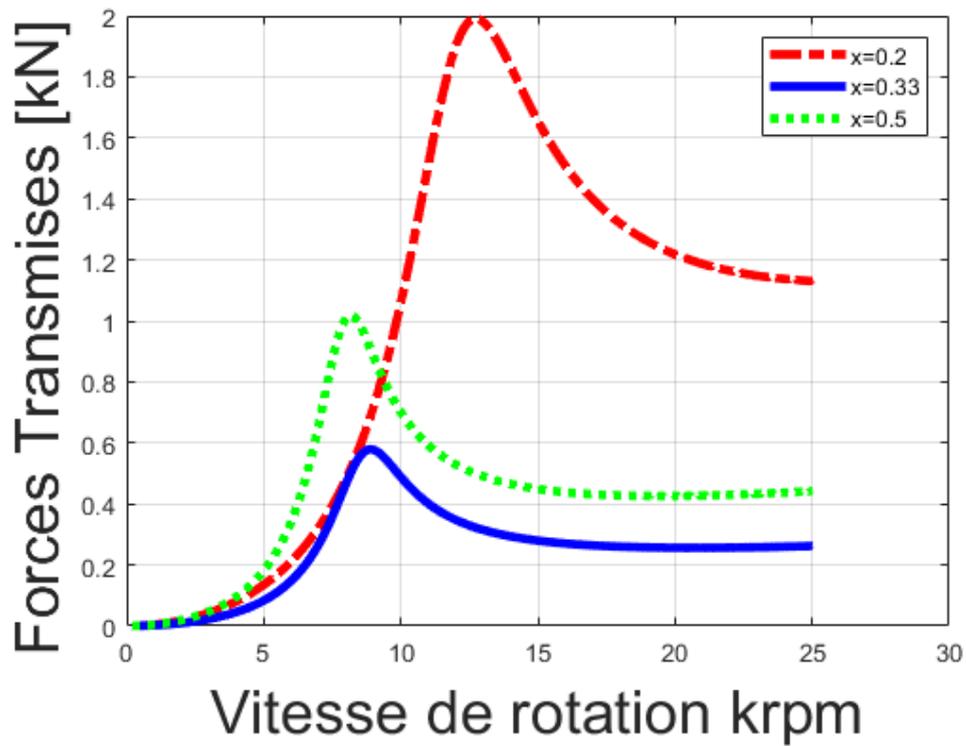


Figure III.1 : Effet de la position de disque sur les forces transmises en fonction des vitesses de rotation

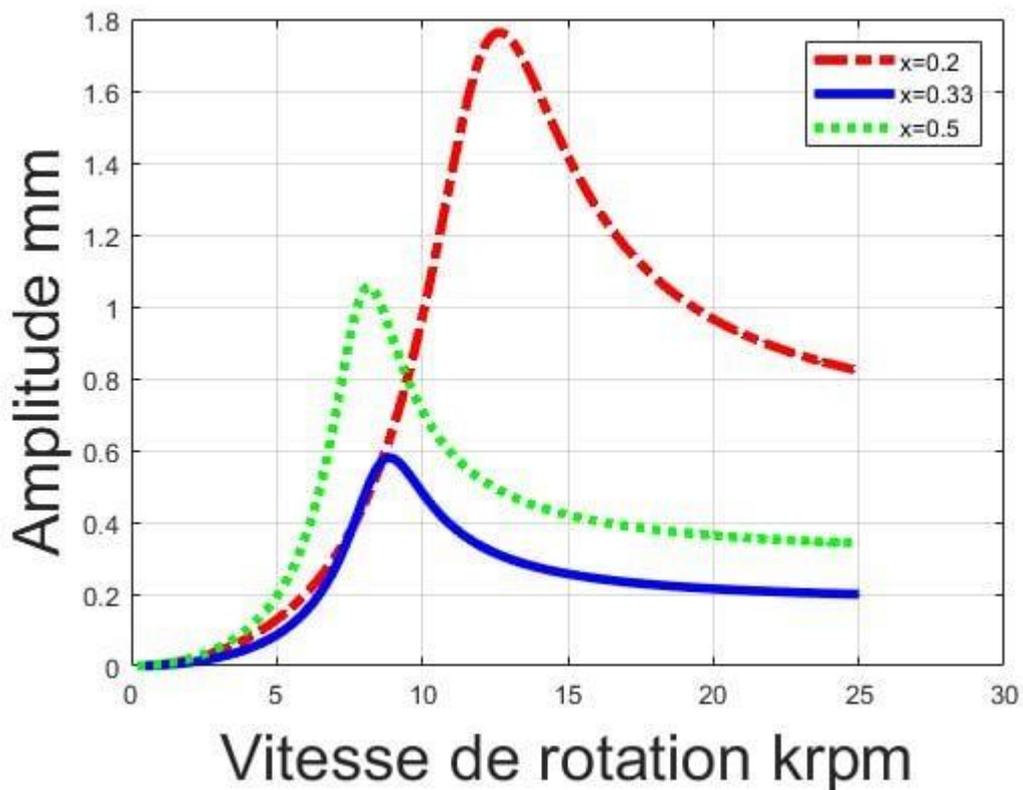


Figure III.2 : Effet de la position de disque sur les amplitudes en fonction des vitesses de rotation

III.8.2 Etude de l'effet de l'épaisseur de l'empilement des plis

Les figures III.3 et III.4 illustrent l'évolution de l'amplitude de vibration et des forces transmises en fonction de la vitesse de rotation pour différentes valeurs de l'épaisseur des plis pour un rotor en composite, pour une position de disque se trouve à 0.5 et pour un empilement des plis [45/-45].

Ces résultats montrent que les amplitudes de vibrations et forces transmises augmentent avec l'épaisseur des plis. Ceux-ci sont expliqués par l'augmentation de rigidité qui entraîne une diminution de taux d'amortissement. Il est à noter que les fréquences critiques augmentent aussi avec l'épaisseur de plis.

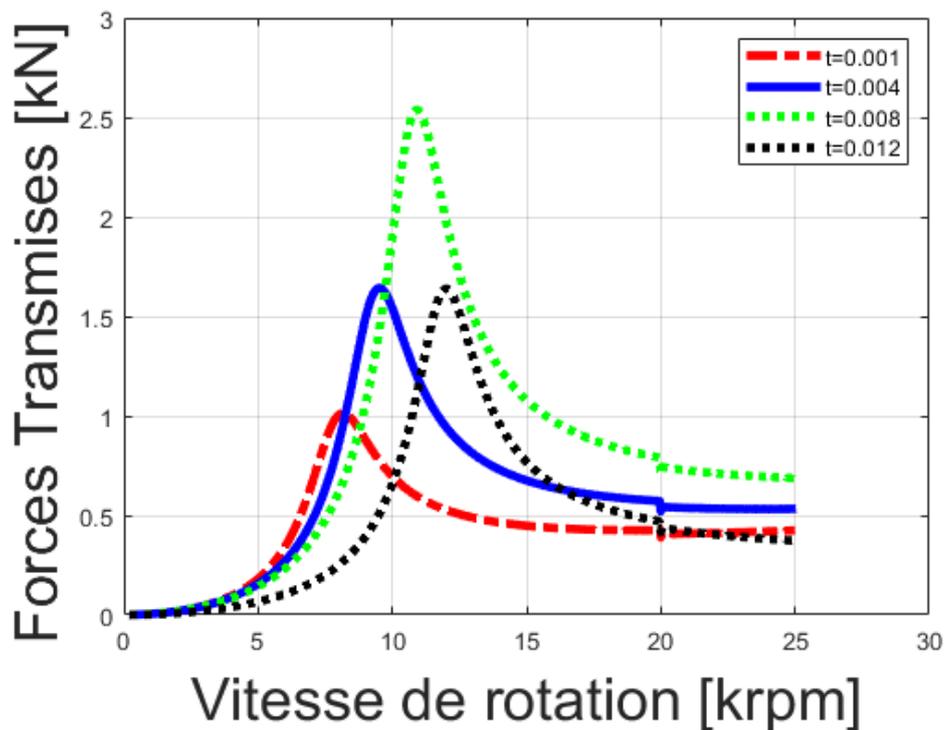


Figure III.3 : Effet de l'épaisseur de l'empilement des plis sur les forces transmises en fonction des vitesses de rotation

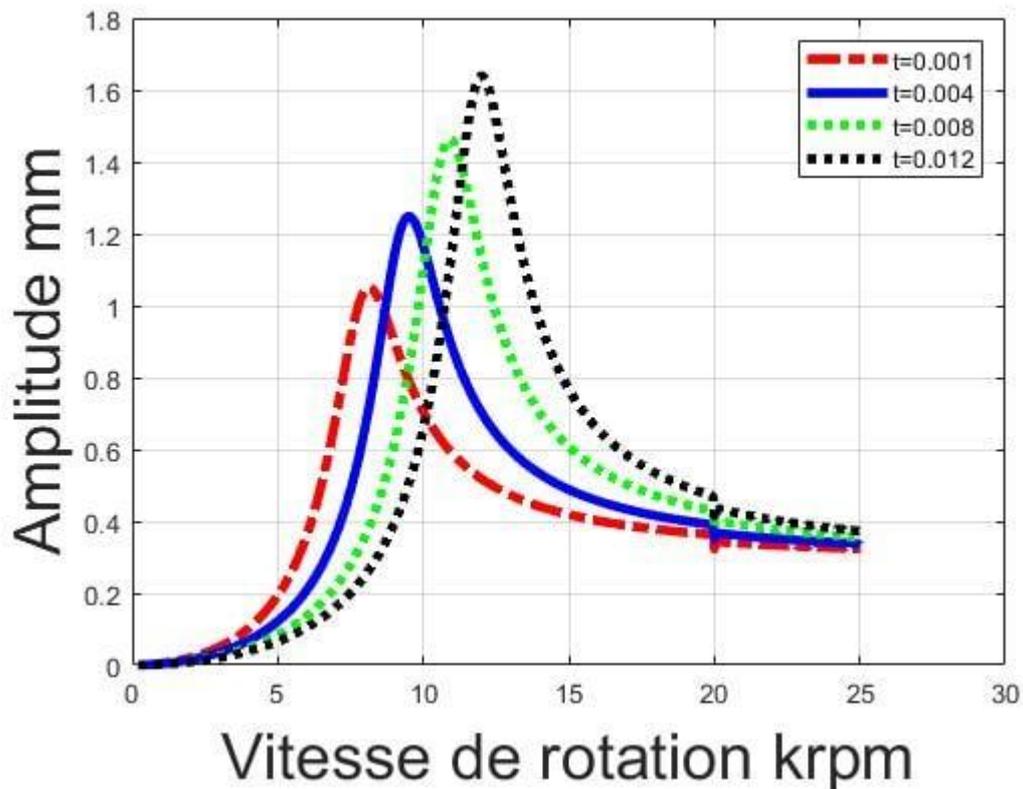


Figure III.4: Effet de l'épaisseur de l'empilement des plis sur les amplitudes en fonction des vitesses de rotation

III.8.3 Etude de l'effet de nombre des plis

Afin d'analyser l'effet de nombre des plis sur le comportement non linéaire d'un rotor en composite et les forces transmises pour une épaisseur de plis ($t_c=0.001\text{mm}$) et pour une position de disque qui se trouve à 0.5 ; une série de simulation a été effectuée.

Les figures III.5 et III.6 présentant l'effet du nombre des plis sur la réponse vibratoire d'un rotor en composite et les forces transmises en fonction de la vitesse de rotation. Ces figures montrent que les amplitudes de vibration et des forces transmises ainsi que les fréquences critiques augmentent avec le nombre des plis. Cela signifie que l'augmentation du nombre des plis augmente la rigidité de rotor ce qui entraîne une diminution de taux d'amortissement.

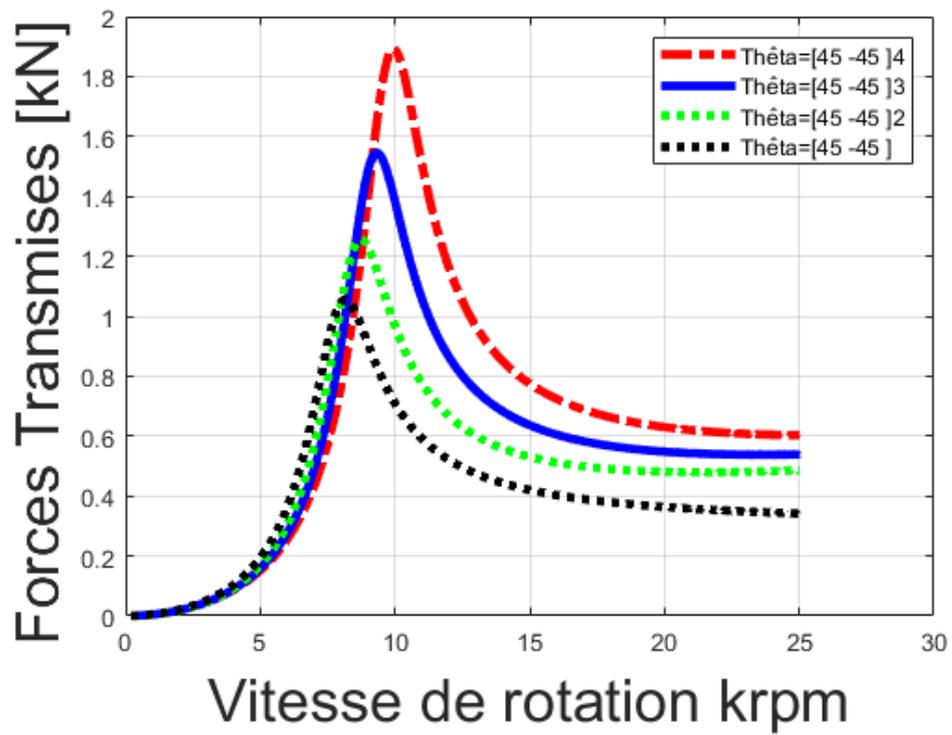


Figure III.5 : Effet de nombre de plis sur les forces transmises en fonction des vitesses de rotation

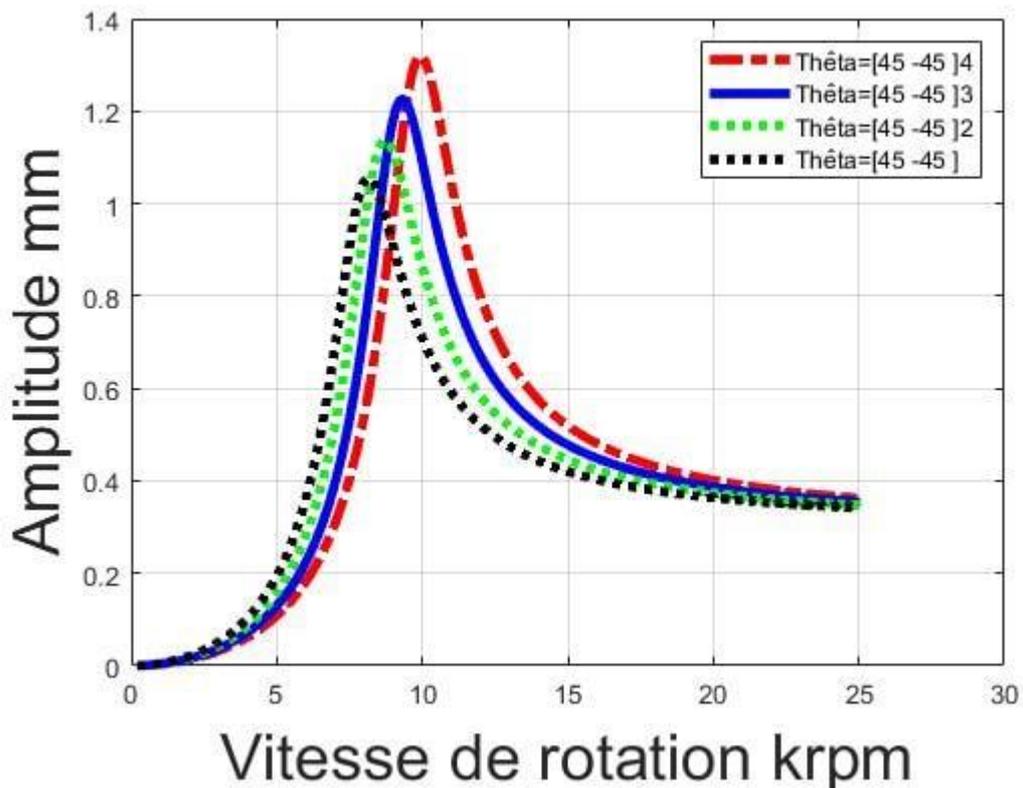


Figure III.6 : Effet de nombre de plis sur les amplitudes en fonction des vitesses de rotation

III.8.4 Etude l'effet de l'angle de l'orientation des fibres

Dans cette partie, nous allons présenter une série de simulation sur l'effet de l'angle de l'orientation des fibres sur le comportement dynamique et les forces transmises d'un arbre en composite. Pour cela, une série de simulation est effectuée pour une épaisseur des plis constante ($t_c = 0.001\text{mm}$) et pour une position de disque qui se trouve à 0.5.

Les figures III.7 et III.8 montrent l'effet de l'angle de l'orientation des fibres sur les amplitudes de vibration et les forces transmises. Ces figures illustrent que les amplitudes des vibrations et les forces transmises augmentent lorsque l'angle de l'orientation des fibres diminue. Cette diminution entraîne une augmentation de rigidité, ce qui traduit pour une augmentation des fréquences critiques.

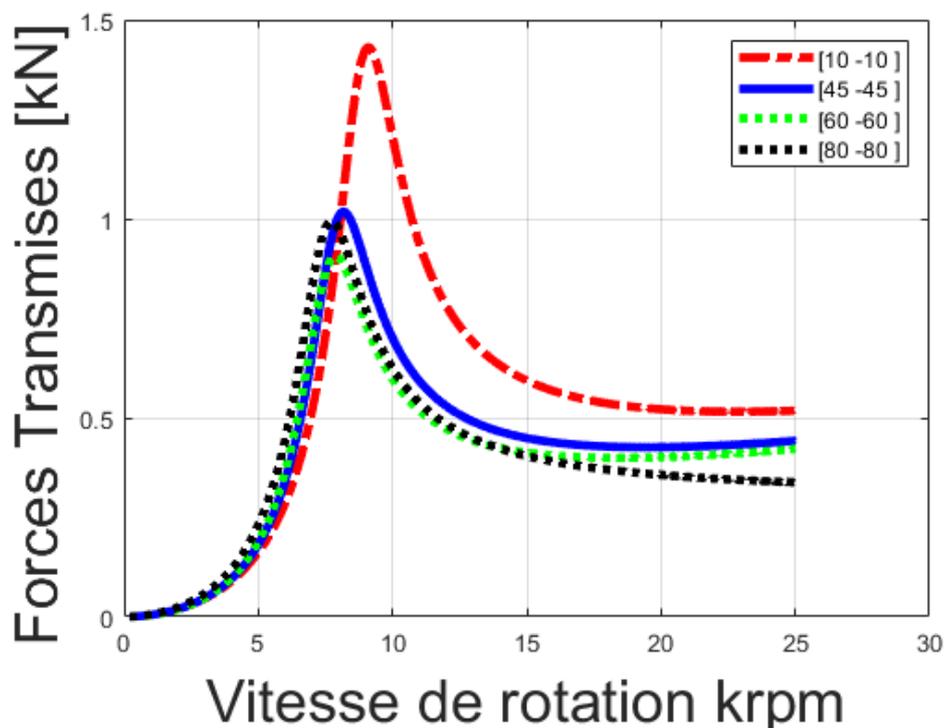


Figure III.7 : Effet l'effet de l'angle de l'orientation des fibres sur les forces transmises en fonction des vitesses de rotation

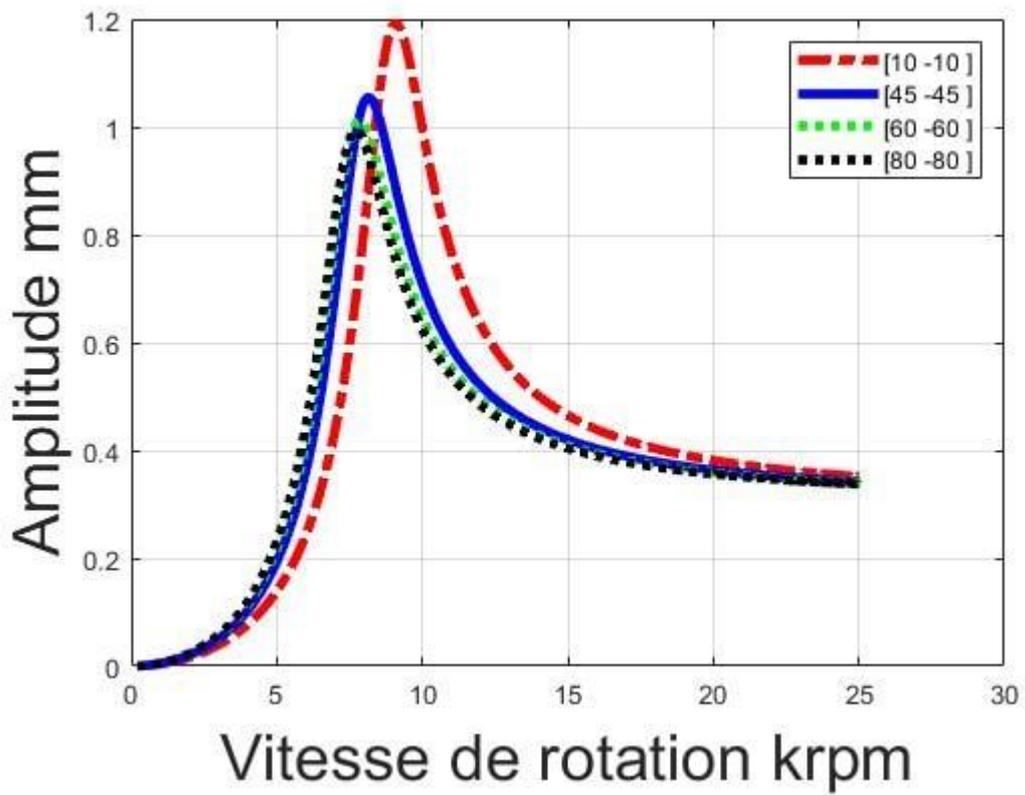


Figure III.8 : Effet l'effet de l'angle de l'orientation des fibres sur les amplitudes adimensionnelles en fonction des vitesses de rotation

III.9 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié les effets de la position de disque, l'épaisseur des plis, le nombre de plis et l'angle de l'orientation des plis sur le comportement non linéaire d'un arbre en matériaux de composite.

Les résultats obtenus mettent en évidence l'effet de choix du matériau de composite sur le comportement vibratoire de l'arbre tournant.

Conclusion

générale

Conclusion :

L'objectif principale de ce travail consiste à étudier le comportement vibratoire d'un arbre flexible en matériaux supporté par deux paliers rigide et contrôlé par un palier flexible soumis à des excitations de type balourd.

Le modèle mathématique développé est obtenu à l'aide de l'équation de Lagrange. Les expressions de l'énergie cinétique, de l'énergie de déformation et du travail virtuel ont été déterminées à l'aide de la méthode de Rayleigh-Ritz. Pour cela, un code du calcul écrit en fortran 90 a été développé pour étudier l'effet de position de disque, l'épaisseur de plis, du nombre des plis et l'angle d'orientation de plis sur le comportement dynamique et les forces transmises.

Les résultats obtenus mettent l'effet du choix de matériau de composite du rotor sur le comportement dynamique et les forces transmises.

Références

bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Khalafa. Amar, Etude de comportement mécanique d'un matériau composite stratifié. Mémoire de magister, M'hamed Bouguera, Boumerdes. Algérie. 2010.
- [2] Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de magistère en mécanique option : construction mécanique par Bendifallah Mourad travail de recherche sur les matériaux à mémoire viscoélastiques parfaitement élastiques pour une nouvelle prothèse totale de hanche. université de batna année universitaire 2011 / 201250
- [3] «Glossaire des matériaux composites» - carma –Actualisation octobre 2006.
- [4]Département de Génie mécanique memoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de : master en génie mécanique option : génie des matériaux présenté par : Abdelkebir Abderraouf thème l'effet de la temperature de mercerisation sur les proprietes du composite [tissus de jute / polyester] université de m'sila année universitaire : 2017 / 2018
- [5] Universite M'hamed Bougara – Boumerdes Faculté des sciences de l'ingénieur Mémoire de Magister Présenté par : ROUAM Kamila en vue de l'obtention du diplôme de Magister en : Filière : Science et Génie des Matériaux Option : Physique et Mécanique des Matériaux Thème Elaboration, caractérisation mécanique et hygrothermique d'un stratifié renforcé par des fibres naturelles
- [6] Jean Marie Berthelot, Matériaux composites, comportement mécanique et Analyse des structures, 4ème Edition, Lavoisier 2005.
- [7] B. Bonnet. « Comportement au choc de matériaux composites pour applications automobiles ». Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2005.
- [8] Master en Physique Option : Energétique Spécialité : Energie et développement durable
Thème : Etude numérique avec comparaison expérimentale des propriétés thermophysiques des matériaux composites à matrice polymère HADDADI Manel 2010/2011 Batna
- [9] R. C. Progelhof, J. L. Throne et R. R. Ruetsch, "Méthodes de prédiction de la conductivité thermique des systèmes composites", Ingénierie et science des polymères, vol. 16, pp. 615-625, 1976.
- [10] Mohamed Boudiaf University of M'sila Année Universitaire : 2019 / 2020
Département de Génie mécanique memoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de : MASTER En Génie Mécanique Option : Génie des Matériaux Présenté par : Kouidri Djamila & Madani Meryem Thème L'étude de l'effet alcalin sur les propriétés des fibres naturelles
- [11] Abdelmadjid Si Salem, « Développement d'une poutre en béton-composite : analyse expérimentale et modélisation »Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi- Ouzou, 2016.
- [12] Miah, Mohammad Julhash, Mubarak a. khan, and ruhul a. khan.« Fabrication et caractérisation de composites à base de polyéthylène basse densité renforcé de fibres de jute : effets du traitement chimique ». Journal de la recherche scientifique 3.2 [2011].
- [13] Ragoubi, Mohamed,«Contribution à l'amélioration de la compatibilité interfaciale fibres naturelles / matrice thermoplastique via un traitement sous décharge couronne», thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy I, [2010].

- [14]] JULES.E.J, « Couplages entre propriétés thermiques, réactivité chimique et viscosité des matériaux composites therm durcissables en relation avec les conditions de leur élaboration fondée sur l'hystérésis Diélectrique », Ecole nationale supérieure d'arts et métiers, 2001.
- [15] Michel Dupeux, « Aide-mémoire science des matériaux », Dunod, Paris, 2004.
- [16] MOKADDEM.A, « Modélisation du Comportement de L'interface Fibre-Matrice de Matériaux Composites », Mémoire de magister, USTO, 2008.
- [17] Usinage de moules en matériaux composites, expression des contraintes liées au procédé, Grégory chardon 12 mars 2012.
- [18] Nadia bahlouli ipst-ulp, Cours Matériaux Composites / DESS Mécanique avancée et Stratégie industrielle
- [19] «Glossaire des matériaux composites» - carma –Actualisation octobre 2006.
- [20] Jean-marie berthelot 5eme edituin Matériaux composite comportement mécanique et analyse des structures.editions TEC& Doc Lavoisier
- [21]<https://www.ouest-composites.com/technologie/bache-silicone/>
- [22] "Aperçu de l'application : moulage par injection" .Yaskawa America, Inc. Archivé de l'original le 2006-04-12 . Récupéré le 2009-02-27
- [23] <https://www.europages.fr/Le-Moulage-Par-Compression-Bmc/BORFLEX-SERVICES/cpid-6223470.html>
- [24] MASTER ACADEMIQUE Domaine : Sciences et technologiques Filière : Génie Mécanique Spécialité : Maintenance Industrielle Présenté par : belghamriadnane ben khoukha Mohammed sghir Comportement vibratoire des matériaux compositesourgla 2017-2018
- [25] N. Rieger, Rotordynamics 2 : Problèmes en turbomachines, Springer, 2014.
- [26] W. & GE Chen, Introduction à la dynamique des systèmes de roulement de rotor, Trafford Victoria, 2007.
- [27] R. Tiwari, Systèmes rotoriques : analyse et identification, CRC Presse, 2017.
- [28] R. ZAHI, Comportement dynamique des rotors à arbre conique en matériaux composites, thèse de doctorat, 2018.
- [29] S. & E. Ahmima, « Contribution à l'étude du comportement dynamique des rotors verticaux », 2015.
- [30] R. & L. J. Subbiah, Rotor et dynamique structurelle des turbomachines, Suisse :Springer, 2018.
- [31] F. Ehrich, Handbook of rotordynamics, floride : société d'édition Krieger, 1992.
- [32] M. Buragohain, Structures composites : conception, mécanique, analyse, fabrication et tests, presse CRC, 2017.

- [33] Qatu MS, Iqbal J. Vibration transversale d'arbres composites à plis croisés à deux segments avec une masse forfaitaire. *Compos Structure* 2010.
- [34] Hajianmalek M, Qatu MS. Analyse des vibrations transversales d'arbres composites à deux segments généralement laminés avec une masse forfaitaire à l'aide de la quadrature différentielle généralisée. *J Vib Control* 2012.
- [35] Chang C-Y, Chang M-Y, Huang JH. Analyse vibratoire d'arbres composites tournants contenant des renforts orientés aléatoirement. *Compos Structure* 2004.
- [36] Paykani A, Khoshravan MR. Conception d'un arbre de transmission composite et de son accouplement pour application automobile. *J Appl Res Technol* 2012.
- [37] Dharmadhikari SR, Mahakalkar GS, Giri JP, Khutafale ND. « Conception et analyse d'un arbre de transmission composite à l'aide d'Ansys et d'un algorithme génétique », une revue critique. *nt J Mod Eng Res [IJMER]* 2013.
- [38] Arun M, Vinoth KS. Conception et développement d'arbres de transmission en fibre de verre en aluminium laminé pour véhicules utilitaires légers. *Int J Innov Technol Exploring Eng [IJITEE]* Mai 2013.
- [39] Talib ARA, Ali A, Badie MA, Lah NAC, Golestaneh AF. Développement d'un arbre de transmission automobile en composite époxy renforcé de fibre de carbone/verre. *Mater Des* 2010.
- [40] Badie MA, Mahdi E, Hamouda AMS. Une enquête sur l'arbre de transmission automobile en composite époxy renforcé de fibre de carbone / fibre de verre hybride. *Mater Des* 2011.
- [41] DeValve C, Pitchumani R. Une analyse numérique de l'amortissement à base de nanotubes de carbone dans les structures composites rotatives. *Structure de composition* 2013.
- [42] Sino R, Baranger TN, Chatelet E, Jacquet G. Analyse dynamique d'une rotation arbre composite. *Compos Sci Technol* 2008.
- [43] Treviso A, Genechten BV, Mundo D, Tournour M. Amortissement dans les matériaux composites : propriétés et modèles. *Compos : Partie B* 2015.
- [44] Sun J, Arteaga IL, Kari L. Modélisation dynamique d'une lame rotative multicouche via la théorie quadratique des couches. *Compos Struct* 2013.
- [45] Shin ES. Stabilité d'un puits composite supercritique supporté par une poutre non rigide. Dans : 15e congrès international sur le son et les vibrations [ICSV15], vol. 1, Daejeon, juillet 2008.
- [46] Lee SK, Kim MW, Park CJ, Chol MJ, Kim G, Cho J-M, et al. Effet de l'orientation des fibres sur la réponse acoustique et vibratoire d'une plaque composite fibre de carbone/époxy : mode de vibration naturelle et rayonnement sonore. *Int J Mech Sci* 2016.
- [47] J. R. Vinson, R. L. Sierakowski, *Le comportement des structures composées de matériaux composites*, Kluwer Academic Publishers, 2008.
- [48] C. D. Kim, C. W. Bert, Analyse de la vitesse critique des arbres de transmission creux en composite laminé, *Comp. Eng.* 3[7-8] [1993] 633-643.

- [49] Y. S. Ren, Q. Y. Dai, X. Q. Zhang, Vibration libre et stabilité d'un arbre composite à paroi mince en rotation, *J. Vibr. Eng.* 2015
- [50] J. B. Gunda, R. K. Gupta, G. R. Janardhan, et al, Analyse vibratoire de grande amplitude des poutres composites : solutions simples de forme fermée, *Comp. Struct.* 2011
- [51] R. K. Kapania, S. Raciti, Vibrations non linéaires de poutres laminées asymétriques, *AIAA J.* 1989
- [52] G. Singh, G. Venkateswara Rao, N. G. R. Iyengar, Analyse des vibrations non linéaires des poutres mixtes laminées asymétriques, *AIAA J.* 1991
- [53] M. R. Shad, G. Michon, A. Berlioz, Modélisation et analyse de la dynamique non linéaire du rotor due aux déformations d'ordre supérieur en flexion, *Appl. Math. Model.* 2011
- [54] S. A. A. Hosseini, S. E. Khadem, Analyse des vibrations libres d'un arbre tournant avec des non-linéarités de courbure et d'inertie, *Mech. Mach. Theory*, 2009
- [55] Y. S. Ren, X. Q. Zhang, Q. Y. Dai, Vibration de flexion non linéaire d'un arbre à paroi mince composite rotatif déséquilibré, *J. Vibr. Shock*, 2015
- [56] S. H. Chen, Une méthode d'analyse quantitative des systèmes de vibration fortement non linéaires, Science Press, Beijing, 2009
- [57] M. Y. Chang, J. Chen, C. Chang, Un simple modèle d'arbre composite laminé tournant, *Int. J. Sol. Struct.* 2004
- [58] S. L. Lau, Y. K. Cheung, Principe variationnel incrémental d'amplitude pour les vibrations non linéaires des systèmes élastiques, *J. Appl. Mech.* 1981