

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université -Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et Technologie
Département Génie Mécanique



Projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIE
Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Construction Mécanique

Thème

**Etude de la maintenance et de la mécanique d'un système disque-
mécanisme d'embrayage d'automobile**

Présenté par :

M^{elle} : DARREDOUNE Fatima Zohra

Devant le jury composé de :

Dr. Hassan ASSEM	M C B	UAT.B.B (Ain Témouchent)	Président
Dr. Soufyane BELHENINI	M C A	UAT.B.B (Ain Témouchent)	Examinateur
Dr. Amine BELOUFA	M C A	UAT.B.B (Ain Témouchent)	Encadrant

Année universitaire : 2022/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Je dédie ce travail à

Mes très chers parents

Mes sœurs

*L'âme de ma défunte
grande mère Fatma*

*Ma grande mère
Moukhelifa et mon oncle
Tadj*

Remerciement

Je remercie en premier lieu, Allah le tout puissant, de m'avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

*Le travail présent a été réalisé sous la direction du **Monsieur BELOUFA Amine**, sans qui je n'aurais jamais pu mener à bien ce modeste travail. Sa patience, son expertise et sa disponibilité m'ont grandement facilité la tâche, notamment dans les calculs complexes. Ses conseils éclairés ont été précieux, et je suis reconnaissante de l'avoir eu à mes côtés.*

*J'exprime toute ma reconnaissance à **Monsieur ASSEM Hassan** pour avoir bien voulu accepter de présider le jury de ce mémoire. Que **Monsieur BELHNINI Soufyane** trouve ici l'expression de mes vifs remerciements pour avoir bien voulu examiner ce travail.*

Je voudrais remercier en particulier mes chers parents et mes sœurs qui ont partagé ce voyage avec moi et qui m'ont toujours fait confiance. Leurs encouragements et leurs conseils a été une source d'inspiration et de motivation.

Un immense merci à mes précieuses copines qui ont été présentes à mes côtés et qui m'ont constamment soutenue.

Je ne saurais oublier de remercier l'ensemble des enseignants du département de Génie Mécanique durant les années d'étude.

Enfin, j'aimerais exprimer ma gratitude envers mes collègues de promotion, mes frères et sœurs de cette aventure académique qui ont rendu cette expérience inoubliable, ainsi que toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Résumé :

Ce mémoire explore en détail des différents aspects liés à l'embrayage, mettant en évidence l'importance de la maintenance et de la simulation pour garantir son bon fonctionnement et a pour objectif d'analyser les problèmes de défaillance auxquels l'embrayage peut être confronté et d'identifier les meilleures pratiques de maintenance pour les éviter. En comprenant les causes de ces problèmes, il devient possible de mettre en place des stratégies de maintenance préventive, permettant de préserver la durabilité et les performances optimales de système et grâce à l'utilisation de logiciels avancés, il est possible de réaliser des simulations précises, reproduisant les conditions de fonctionnement réelles et permettant d'optimiser les performances de l'embrayage ce qui contribue à améliorer sa fiabilité et son efficacité.

Mots clés : automobile, défaillance, maintenance préventive, simulation numérique, fiabilité, inspection visuelle, Ferodo.

Abstract :

This dissertation delves into various aspects related to the automotive clutch, highlighting the significance of maintenance and simulation in ensuring its proper functioning. Its aim is to analyze the potential failure issues that clutches may encounter and identify best maintenance practices to mitigate them. By comprehending the root causes of these problems, it becomes possible to implement preventive maintenance strategies that preserve the durability and optimal performance of the system. Leveraging advanced software, precise simulations can be conducted, replicating real-world operating conditions and optimizing clutch performance. This approach enhances reliability and efficiency, ultimately contributing to the overall improvement of the clutch system.

Keywords : automotive, failure, preventive maintenance, numerical simulation, reliability, visual inspection, Ferodo.

Sommaire

Remerciement	I
Résumé	II
Sommaire	IV
Liste des figures	X
Liste des tableaux	XV
Introduction générale	XVII

Premier Chapitre : Notion générale des embrayages

I.1. Introduction	1
I.2. Définition	1
I.3. Historique	2
I.4. Types des embrayages et leurs caractéristiques	3
I.4.1. L'embrayage à friction	3
I.4.2. L'embrayage centrifuge	4
I.4.3. L'embrayage électromagnétique	4
I.4.4. L'embrayage à diaphragme	5
I.4.5. l'embrayage hydraulique	5
I.4.6. L'embrayage à ressort	6
I.4.7. L'embrayage magnétique	6
I.4.8. L'embrayage à friction à cône	7
I.4.9. L'embrayage à friction à disques multiples	7
I.4.10. L'embrayage à friction à galets	8
I.4.11. L'embrayage à friction à cône et galets	8
I.5. Avantages et inconvénients des types d'embrayages	9
I.6. Les composants du système d'embrayage et leurs caractéristiques	13
I.6.1. La partie mécanique	13
I.6.1.1. Le volant moteur	13
I.6.1.2. Le disque d'embrayage	15

I.6.1.2.1.	Le moyeu cannelé.....	16
I.6.1.2.2.	Les amortisseurs de torsion	17
I.6.1.2.3.	Garniture de friction	18
I.6.1.2.4.	La bague d'appui	19
I.6.1.2.5.	Les rivets	20
I.6.1.3.	Le mécanisme de pression	22
I.6.1.4.	Les fourchettes	23
I.6.2.	La partie hydraulique	24
I.6.2.1.	Le maitre-cylindre d'embrayage.....	24
I.6.2.2.	Le cylindre récepteur	25
I.6.2.3.	La butée.....	26
I.6.2.4.	Le liquide hydraulique	27
I.6.3.	La partie de commande	28
I.6.3.1.	La pédale d'embrayage	28
I.6.3.2.	Le câble d'embrayage	29
I.6.3.3.	Le détecteur de position	30
I.7.	Principe de fonctionnement.....	31
I.8.	Conclusion.....	33

Deuxième Chapitre : Défaillance du système d'embrayages

II.1.	Introduction	35
II.2.	Problèmes de maintenance	35
II.2.1.	L'usure de garniture de friction.....	35
II.2.1.1.	Causes	35
II.2.1.2.	Conséquences.....	36
II.2.2.	Fuite hydraulique.....	37
II.2.2.1.	Causes	37
II.2.2.2.	Conséquences.....	37
II.2.3.	Cable d'embrayage cassé	38
II.2.3.1.	Causes	38

II.2.3.2.	Conséquences.....	38
II.2.4.	Disque déformé	39
II.2.4.1.	Causes	39
II.2.4.2.	Conséquences.....	39
II.2.5.	Butée usée	40
II.2.5.1.	Causes	40
II.2.5.2.	Conséquences.....	40
II.2.6.	Volant moteur défectueux	41
II.2.6.1.	Causes	42
II.2.6.2.	Conséquences.....	42
II.2.7.	Problèmes électriques.....	42
II.2.7.1.	Causes	42
II.2.7.2.	Conséquences.....	43
II.2.8.	Défaillance de mécanisme de pression.....	44
II.2.8.1.	Causes	44
II.2.8.2.	Conséquences.....	44
II.2.9.	L'usure de moyeu.....	45
II.2.9.1.	Causes	45
II.2.9.2.	Conséquences.....	46
II.2.10.	L'usure des ressorts	46
II.2.10.1.	Causes	46
II.2.10.2.	Conséquences.....	46
II.2.11.	La défaillance de la bague d'appui	47
II.2.11.1.	Causes	48
II.2.11.2.	Conséquences.....	48
II.2.12.	L'usure des amortisseurs	48
II.2.12.1.	Causes	48
II.2.12.2.	Conséquences.....	48
II.2.13.	Dysfonctionnement du capteur de position de l'embrayage.....	49

II.2.13.1.	Causes	50
II.2.13.2.	Conséquences	50
II.2.14.	La corrosion	50
II.2.14.1.	Causes	50
II.2.14.2.	Conséquences	50
II.3.	Problèmes de performance	51
II.3.1.	Patinage de l’embrayage	51
II.3.2.	Glissement de l’embrayage	52
II.3.3.	Bruit d’embrayage	52
II.3.4.	Vibrations	52
II.3.5.	Fumée	52
II.4.	Diagnostic et réparation	53
II.4.1.	Méthodes de diagnostic	53
II.4.1.1.	Mesure de l’épaisseur du disque d’embrayage	53
II.4.1.2.	Mesure des dents du volant moteur	53
II.4.1.3.	Inspection visuelle	53
II.4.1.4.	Mesure de l’usure des garnitures	53
II.4.1.5.	Mesure de la planéité de la surface de friction.....	54
II.4.1.6.	Test de fuite hydraulique	54
II.4.1.7.	Essais sur banc d’essai de dynamomètre	54
II.4.1.8.	Analyse thermique	54
II.4.1.9.	Essais de vibration	54
II.4.1.10.	Mesure de la dureté de la pédale d’embrayage	54
II.4.1.11.	Mesure de la résistance électrique	55
II.4.1.12.	Analyse acoustique	55
II.4.1.13.	Analyse des gaz d’échappement	55
II.4.2.	Méthodes de réparation	55
II.4.2.1.	Remplacement des composants défectueux	55
II.4.2.2.	Réglage de l’embrayage.....	55

II.4.2.3.	Lubrification	56
II.4.2.4.	Réparation du volant moteur.....	56
II.4.2.5.	Nettoyage	56
II.4.2.6.	Réparation de la butée d’embrayage.....	56
II.4.2.7.	Remplacement du câble d’embrayage	56
II.5.	Conclusion.....	57

Troisième Chapitre : Approche avancée pour l’analyse du glissement de la garniture d’embrayage : Conception, simulation, calculs et résultats

III.1.	Introduction	59
III.2.	Durée de vie des embrayages	59
III.3.	Procédures de maintenance	59
III.3.1.	Préparation.....	59
III.3.1.1.	Outillage nécessaire	59
III.3.1.2.	Consignes de sécurité.....	60
III.3.2.	Démontage.....	61
III.3.2.1.	Dépose de la boîte de vitesses.....	61
III.3.2.2.	Dépose du kit	65
III.3.2.2.1.	Disque et mécanisme de pression.....	65
III.3.2.2.2.	Volant moteur.....	66
III.3.2.2.3.	Butée.....	66
III.3.3.	Remontage	67
III.3.3.1.	Repose du kit	67
III.3.3.1.1.	Volant moteur.....	67
III.3.3.1.2.	Disque et mécanisme de pression.....	67
III.3.3.1.3.	Butée.....	68
III.3.3.2.	Repose du boîte vitesses	69
III.3.4.	Test	76
III.4.	Conclusion.....	77

Quatrième Chapitre : Guide de maintenance des embrayages

IV.1. Introduction	79
IV.2. Conception et réalisation	79
IV.2.1. Présentation du logiciel « SOLIDWORKS »	81
IV.3. Simulation et modélisation	84
IV.3.1. Présentation du logiciel « ANSYS Workbench v16.2 »	84
IV.3.2. Spécification d'étude	84
IV.3.2.1. Géométrie	84
IV.3.2.2. Matériaux	86
IV.3.2.3. Système des axes	87
IV.3.2.4. Conditions des contacts	88
IV.3.2.5. Maillage	89
IV.3.2.6. Conditions aux limites	90
IV.3.2.6.1. Pour Step1 et Step2	91
IV.3.2.6.2. Pour Step2	93
IV.3.2.7. Paramètres de solution (les réglages de l'analyse)	94
IV.4. Résultats et analyses	94
a) Déplacement axial Uz	94
b) Déplacement radial	96
c) Rotation angulaire	97
d) Déformation équivalente	99
e) Contrainte équivalente de Von Mises	101
f) Contrainte équivalente de cisaillement Plan du repère global XZ	103
g) Etats de contact (volant moteur VM avec la garniture G2)	105
h) Etats de contact (plateau de pression PP avec la garniture G1)	105
IV.5. Conclusion	106
Conclusion générale	108
Références bibliographiques	111

Liste des figures

Premier Chapitre : Notion générale des embrayages

Figure I.1: L'emplacement de l'embrayage	1
Figure I.2: Kit d'embrayage à friction.....	3
Figure I.3 : Modèle d'embrayage centrifuge	4
Figure I.4: Embrayage électromagnétique	4
Figure I.5 : Embrayage à diaphragme	5
Figure I.6 : Système d'embrayage hydraulique	5
Figure I.7 : Embrayage à ressort	6
Figure I.8 : Embrayage magnétique.....	6
Figure I.9 : Embrayage à cône	7
Figure I.10 : Embrayage multidisque.....	7
Figure I.11 : Embrayage à galets multidisque	8
Figure I.12 : Embrayage à cône et à galets	8
Figure I.13 : Vue éclatée d'embrayage	13
Figure I.14 : Modèle d'un volant moteur	14
Figure I.15 : Un disque d'embrayage	15
Figure I.16 : Moyeu du disque.....	16
Figure I.17 : Disque à 4 amortisseurs	17
Figure I.18 : Garniture de friction.....	18
Figure I.19 : Bague d'appui	19

Figure I.20 : Rivets	20
Figure I.21 : Disque sans ressort.....	21
Figure I.22 : Plaque de pression.....	22
Figure I.23 : Fourchette en forme U	23
Figure I.24 : Emetteur	24
Figure I.25 : Récepteur hydraulique d’embrayage.....	25
Figure I.26 : Différents types de butée.....	26
Figure I.27 : Réservoir du liquide d’embrayage	27
Figure I.28 : L’emplacement de la pédale en voiture	28
Figure I.29 : Le câble de la pédale d’embrayage	29
Figure I.30 : Capteur de position multifonctions	30
Figure I.31 : Vue d’ensemble du kit d’embrayag	31
Figure I.32 : Rotation des composants d’embrayage.....	32

Deuxième Chapitre : Défaillance du système d'embrayages

Figure II.1 : Garniture usée jusqu’aux têtes de rivets	36
Figure II.2 : Tuyau de liquide qui coule	37
Figure II.3 : Câble d’embrayage cassé.....	38
Figure II.4 : Un disque bombé	39
Figure II.5 : La différence entre une butée neuve et une butée usée	40
Figure II.6 : Volant moteur défectueux	41
Figure II.7 : Voyant lumineux qui indique un problème de batterie	43

Figure II.8 : Plateau de pression cassé	44
Figure II.9 : Cannelures de moyeu absentes	45
Figure II.10 : Ressorts du disque d'entraînement	47
Figure II.11 : Bague d'appui défectueuse	47
Figure II.12 : Des amortisseurs corrodés	49
Figure II.13 : Difficulté à changer les vitesses	49
Figure II.14 : Disque d'embrayage corrodé.....	51

Troisième Chapitre : Approche avancée pour l'analyse du glissement de la garniture d'embrayage : Conception, simulation, calculs et résultats

Figure III.1 : Dépose de la boîte vitesses.....	64
Figure III.2 : Enlèvement des composants	65
Figure III.3 : Dépose de la butée	66
Figure III.4 : Embrayage centré.....	67
Figure III.5 : Revissage du disque et mécanisme	68
Figure III.6 : Pédale enfoncée par main	70
Figure III.7 : Durite et agrafe en place	71
Figure III.8 : Ajout du liquide de frein	72
Figure III.9 : Réinstallation du demi-berceau.....	73
Figure III.10 : Réinstallation de la boîte à air.....	74
Figure III.11 : Maintenance terminée	75
Figure III.12 : Test routier	76

Quatrième Chapitre : Guide de maintenance des embrayages

Figure IV.1 : Modèle CAO du volant moteur	85
Figure IV.2 : Modèle CAO du disque d'embrayage avec moyeu cannelé	85
Figure IV.3 : Modèle CAO du plateau de pression	85
Figure IV.4 : Modèle CAO d'une garniture lisse	85
Figure IV.5 : Deux types d'assemblage	85
Figure IV.6 : Géométrie de l'ensemble étudié (dimensions en mm)	85
Figure IV.7 : Codage des matériaux sur la géométrie	87
Figure IV.8 : Repérage des cordonnés cylindriques sur l'assemblage	87
Figure IV.9 : Contact avec frottement du plateau de pression PP- garniture G1	88
Figure IV.10 : Contact avec frottement du volant moteur VM- garniture G2	88
Figure IV.11 : Contact collé des deux garnitures G1/G2 avec disque D	89
Figure IV.12 : Géométrie maillée	89
Figure IV.13 : Élément Solid186 de volume cubique ou hexaédrique à 20 nœuds	90
Figure IV.14 : Application des conditions sur les deux garnitures G1/G2 et le disque D	91
Figure IV.15 : Application des conditions sur le plateau PP	92
Figure IV.16 : Application des conditions sur le volant moteur VM	92
Figure IV.17 : Application de pression sur le plateau PP	93
Figure IV.18 : Application de rotation sur le volant moteur VM	93
Figure IV.19 : Représentation visuelle du déplacement axial U_z	94
Figure IV.20 : Variation du déplacement axial U_z en fonction du temps	95

Figure IV.21 : Représentation visuelle du déplacement radial	96
Figure IV.22 : Variation du déplacement radial en fonction du temps.....	96
Figure IV.23 : Représentation visuelle des contraintes en rotation angulaire	97
Figure IV.24 : Variation de la rotation angulaire en fonction du temps	98
Figure IV.25 : Représentation visuelle de la déformation élastique équivalente.....	99
Figure IV.26 : Variation de la déformation élastique équivalente en fonction du temps	99
Figure IV.27 : Repérage de la valeur max de Von-Mises sur la géométrie	101
Figure IV.28 : Variation de contrainte Von-Mises en fonction du temps	102
Figure IV.29 : Représentation visuelle du contrainte de cisaillement	103
Figure IV.30 : Variation du contrainte de cisaillement en fonction du temps	103
Figure IV.31 : Représentation visuelle d'état de contact du VM-G2 (glissement).....	105
Figure IV.32 : Représentation visuelle d'état de contact du PP-G2 (adhérence avec peu de glissement)	105

Liste des tableaux

Premier Chapitre : Notion générale des embrayages

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients de chaque type 9

Quatrième Chapitre : Guide de maintenance des embrayages

Tableau IV.1 : Caractéristiques géométriques du kit d'embrayage..... 80

Tableau IV.2 : Caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés en étude 86

Tableau IV.3 : Conditions de fonctionnement du Ferodo 87

Introduction générale

Introduction générale

Dans ce travail, j'ai mis en épreuve toutes mes connaissances que l'on ait acquises aux cours des cinq dernières années en les exploitant pour mieux comprendre l'importance d'embrayage qui a évolué considérablement au fil du temps en réponse aux avancées technologiques et aux exigences de performance accrues des véhicules moderne.

Ce travail a pour objectif de fournir une perspective complète sur l'embrayage en explorant en détail ses différents aspects. Il se compose de plusieurs sections, chacune abordant un aspect clé du sujet.

Dans le premier chapitre, nous aborderons une compréhension approfondie de l'embrayage, son évolution historique, ses différents types et leurs caractéristiques spécifiques. Nous examinerons également les avantages et les inconvénients de chaque type, mettant en évidence les situations où ils sont le plus efficaces.

Le deuxième chapitre se concentre sur les problèmes de maintenance et de performance des embrayages. Nous explorerons les causes possibles des problèmes courants et les conséquences de ces problèmes sur les performances du véhicule, ainsi que les méthodes de diagnostic et de réparation disponibles pour les résoudre.

Dans le troisième chapitre, nous proposons un guide exhaustif de maintenance d'un embrayage automobile. À travers des procédures étape par étape, nous expliquerons les différentes opérations nécessaires pour maintenir un embrayage en bon état de fonctionnement. De la planification d'entretien à la dépose et au remontage de l'embrayage, en passant par les inspections, les mesures et les réglages, ce guide pratique fournira les informations essentielles pour maintenir la performance et prolonger la durée de vie de l'embrayage.

Enfin, le quatrième chapitre aborde la simulation et la conception de l'embrayage à l'aide des logiciels Solidworks et ANSYS Workbench. Nous expliquerons en détail les étapes de la modélisation, en mettant l'accent sur l'analyse des résultats obtenus. Cette approche permettra d'évaluer la performance de l'embrayage dans différentes conditions et de fournir des informations précieuses pour son amélioration continue.

Et pour conclure, nous discuterons dans la conclusion générale les résultats obtenus sur la recherche avec des propositions des améliorations potentielles pour les futures recherches.

Chapitre 01 :

Notion générale des embrayages

I.1. Introduction :

L'un des principaux systèmes d'un groupe motopropulseur de véhicule moderne basé sur une transmission manuelle ou automatisée est le système d'embrayage et on peut dire que la connaissance et l'usage de ce terme a été popularisé pour un cas d'usage très particulier et techniquement restreint, mais ses formes de réalisation et ses applications se sont étendues à de plus en plus d'activités avec la vulgarisation de la mécanisation et de l'automatisation.

Ce chapitre traite les différents aspects de l'embrayage, également ses types en mettant en évidence leurs avantages et inconvénients respectifs, ainsi que les matériaux et méthodes de fabrication utilisés pour chaque composant de ce système.

On explore aussi comment fonctionne un système d'embrayage dans son ensemble, en prenant en compte tous les composants et les interactions entre eux.

I.2. Définition :

L'embrayage est un composant mécanique dans les voitures qui permet de transmettre le mouvement de rotation généré par le moteur à la boîte des vitesses, tout en permettant également d'interrompre cette transmission. Il joue également un rôle important dans le passage des vitesses en assurant un changement de vitesse fluide.

En règle générale, l'embrayage se situe entre le moteur et la boîte de vitesses, tandis que la pédale d'embrayage n'est présente que sur les véhicules à boîte de vitesses manuelle, généralement située à gauche.

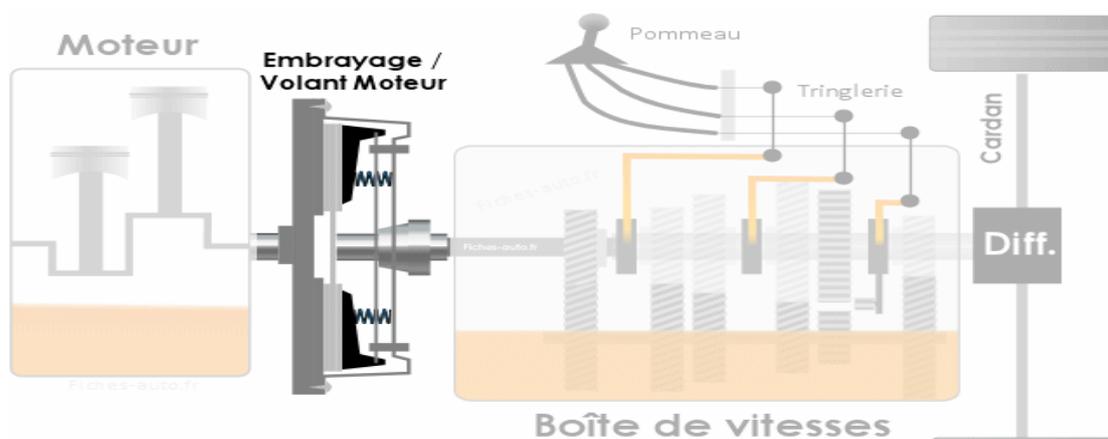


Figure I.1: L'emplacement de l'embrayage [1]

I.3. Historique :

Le système d'embrayage a été inventé à la fin des années 1800 par l'ingénieur français Louis-René Panhard, et il a depuis évolué considérablement au fil du temps.

La conception de Panhard pour son embrayage utilisait un embrayage à cône avec une surface en cuir, qui était actionné par une pédale. Cette innovation a permis au conducteur d'engager ou de désengager le moteur de la transmission en comprimant le ressort d'embrayage et en désengageant le moteur de la transmission lorsqu'il appuyait sur la pédale.

Le système d'embrayage de Panhard était une amélioration significative par rapport aux conceptions précédentes, qui utilisaient un levier actionné à la main pour engager ou désengager le moteur de la transmission, car ce dernier n'était pas très convivial et nécessitait beaucoup d'efforts pour fonctionner. De plus, le design de Panhard était beaucoup plus durable que les conceptions précédentes, qui utilisaient un contact métal sur métal entre les plaques d'embrayage.

Le système d'embrayage de Panhard a tellement bien réussi qu'il est devenu la conception standard pour la plupart des véhicules jusqu'aux années 1920, mais il a été encore amélioré dans les années 1920 avec l'ajout d'une pédale d'embrayage située à côté de la pédale de frein pour rendre l'opération plus facile pour le conducteur et permettre un changement de vitesse plus fluide.

Depuis lors, le système d'embrayage a continué à évoluer, avec l'introduction de systèmes hydrauliques et câblés, qui sont beaucoup plus faciles à utiliser et offrent une expérience de changement de vitesse plus douce et plus précise, témoignant ainsi de l'évolution constante du système d'embrayage grâce à de nouvelles technologies et conceptions.

I.4. Types des embrayages et leurs caractéristiques :

Il existe plusieurs types d'embrayage utilisés dans les véhicules automobiles et industriels tels que :

I.4.1. *L'EMBRAYAGE A FRICTION :*

C'est le type le plus couramment utilisé dans les véhicules automobiles. Il utilise une garniture de friction pour transmettre la puissance du moteur à la boîte de vitesses.



Figure I.2: Kit d'embrayage à friction [2]

I.4.2. L'EMBRAYAGE CENTRIFUGE :

Ce type d'embrayage est couramment utilisé dans les moteurs à essence de petite taille, comme les tondeuses à gazon et les motos. Il utilise des poids centrifuges pour engager et désengager l'embrayage en fonction de la vitesse de rotation.



Figure I.3 : Modèle d'embrayage centrifuge [3]

I.4.3. L'EMBRAYAGE ELECTROMAGNETIQUE :

Ce type utilise un champ magnétique pour assurer l'engagement et le désengagement de l'embrayage. Il est couramment utilisé dans les systèmes de transmission automatique et les systèmes de commande de moteurs électriques.

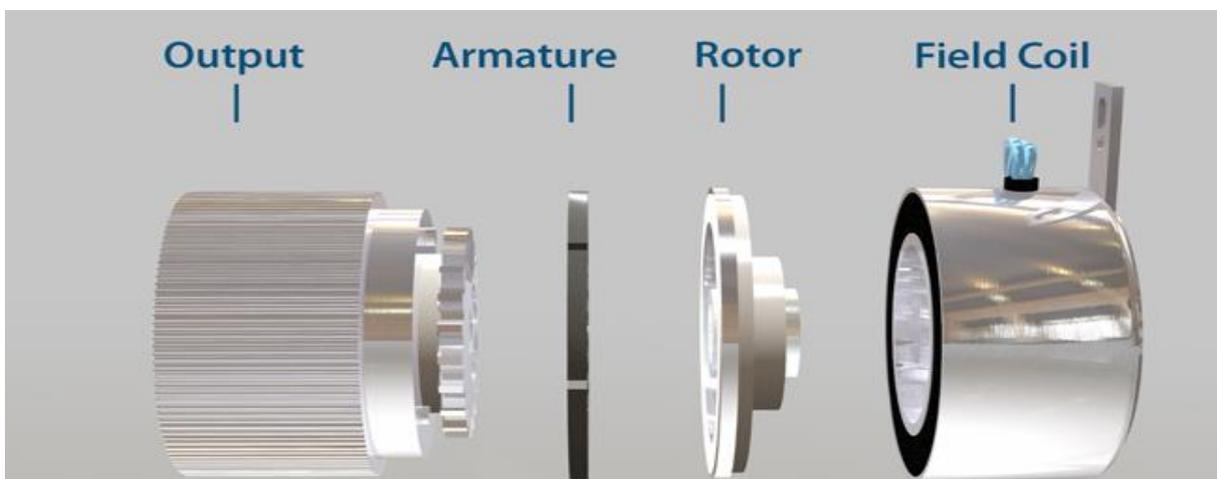


Figure I.4: Embrayage électromagnétique [4]

I.4.4. L'EMBRAYAGE A DIAPHRAGME :

Ce type d'embrayage utilise un diaphragme en forme de dôme pour exercer une pression sur la garniture de friction. Il est couramment utilisé dans les véhicules automobiles.



Figure I.5 : Embrayage à diaphragme [5]

I.4.5. L'EMBRAYAGE HYDRAULIQUE :

Ce type d'embrayage utilise de l'huile sous pression pour exercer une pression sur la garniture de friction. Il est couramment utilisé dans les véhicules lourds et les équipements industriels.

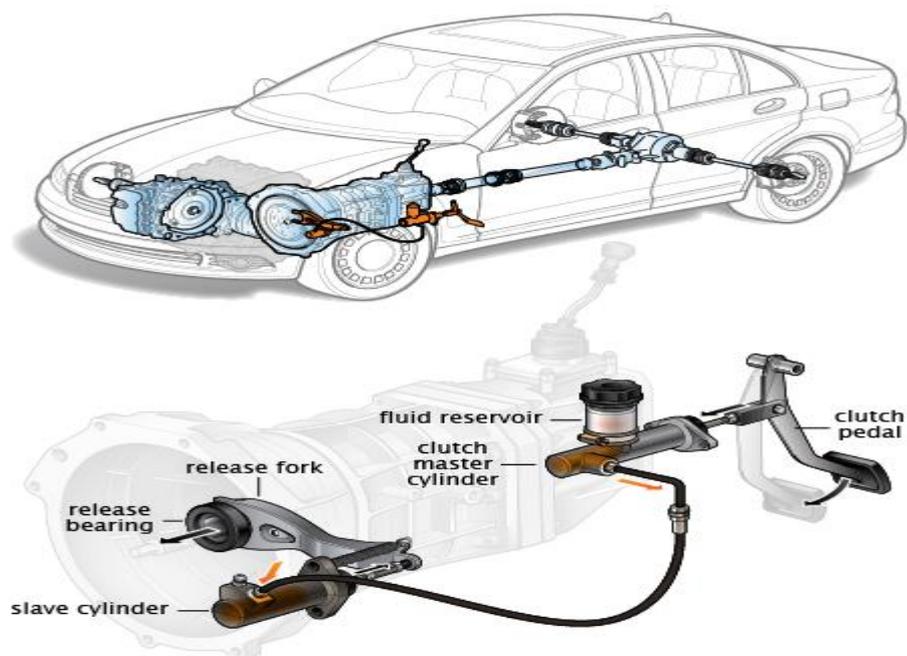


Figure I.6 : Système d'embrayage hydraulique [6]

I.4.6. L'EMBRAYAGE A RESSORT :

Ce type d'embrayage utilise des ressorts pour exercer une pression sur la garniture de friction. Il est couramment utilisé dans les machines agricoles et les équipements industriels.

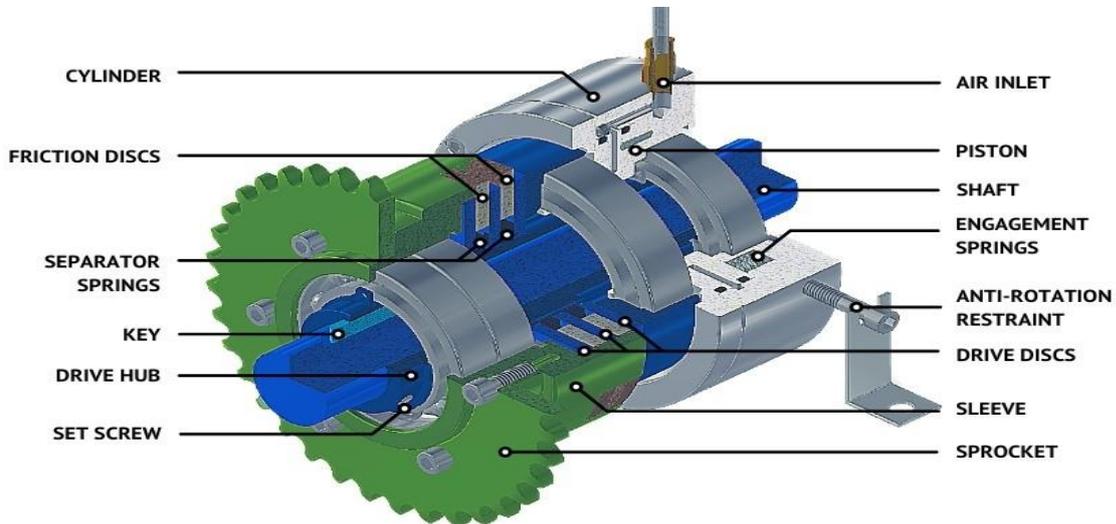


Figure I.7 : Embrayage à ressort [7]

Ces types sont les plus répandus dans l'industrie automobile et industrielle mais il existe également d'autres types moins connus et moins utilisés comme :

I.4.7. L'EMBRAYAGE MAGNETIQUE :

Ce type d'embrayage utilise un champ magnétique pour engager et désengager l'embrayage. Il est souvent utilisé dans des applications où une transmission de puissance rapide et précise est nécessaire, comme dans les machines d'impression et les équipements de production de semi-conducteurs.



Figure I.8 : Embrayage magnétique [8]

I.4.8. L'EMBRAYAGE A FRICTION A CONE :

Ce type d'embrayage utilise un cône pour transmettre la puissance du moteur à la transmission. L'angle du cône détermine la force de serrage et la quantité de couple transmise. Il est souvent utilisé dans les machines agricoles et les équipements de construction.

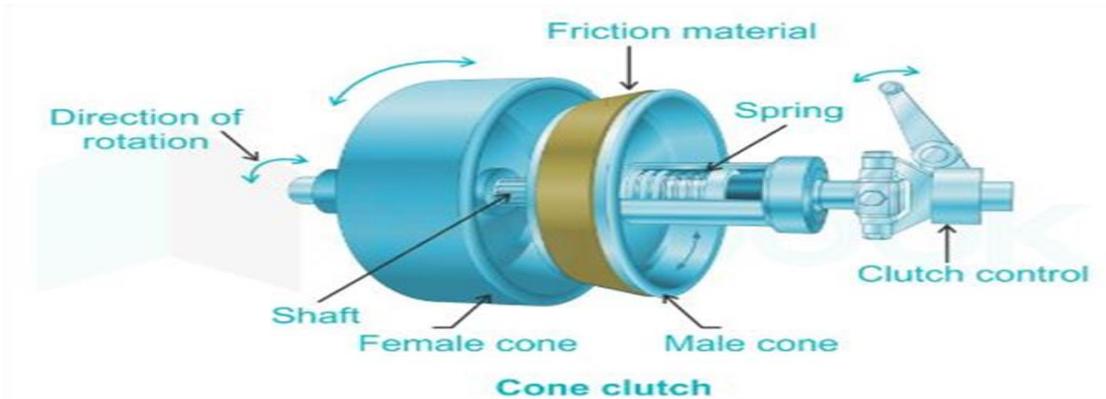


Figure I.9 : Embrayage à cône [9]

I.4.9. L'EMBRAYAGE A FRICTION A DISQUES MULTIPLES :

Ce type d'embrayage utilise plusieurs disques garnis de friction pour transmettre la puissance du moteur à la transmission. Les disques sont pressés ensemble pour créer de la friction et transmettre le couple. Il est souvent utilisé dans les voitures de course et les véhicules de sport haut de gamme.



Figure I.10 : Embrayage multidisque [10]

I.4.10. L'EMBRAYAGE A FRICTION A GALETS :

Ce type d'embrayage utilise des galets pour transmettre la puissance du moteur à la transmission. Les galets sont pressés ensemble pour créer de la friction et transmettre le couple. Il est souvent utilisé dans les scooters et les petites motocyclettes.



Figure I.11 : Embrayage à galets multidisque [11]

I.4.11. L'EMBRAYAGE A FRICTION A CONE ET GALETS :

Ce type d'embrayage utilise à la fois des cônes et des galets pour transmettre la puissance du moteur à la transmission. Les cônes et les galets sont pressés ensemble pour créer de la friction et transmettre le couple. Il est souvent utilisé dans les machines agricoles et les équipements de construction.



Figure I.12 : Embrayage à cône et à galets [12]

I.5. Avantages et inconvénients des types d’embrayages :

Il est important de noter que le choix de l'embrayage dépendra des besoins spécifiques de l'application, incluant la capacité de charge, la durée de vie, le coût, le niveau de performance ainsi que le confort de conduite. Par conséquent, il est crucial d'évaluer soigneusement les avantages et les inconvénients de chaque type d'embrayage avant de prendre une décision et le tableau suivant contient une évaluation précise de chaque type :

Types d’embrayage	Avantages	Inconvénients
Embrayage à friction :	Facile à entretenir et à réparer. Faible coût de production. Grande capacité de charge. Durée de vie relativement longue.	Usure rapide des surfaces de friction. Engagement et désengagement brusques et parfois rugueux. Émissions de chaleur élevées pendant l'utilisation prolongée.
Embrayage centrifuge :	Engagement automatique à des vitesses élevées. Pas besoin d'un mécanisme de libération externe. Longévité considérable.	Faible capacité de charge. Changement rapide et brusque d'état. Pas adapté aux vitesses de rotation faibles ou moyennes.
Embrayage électromagnétique :	Engagement et désengagement rapide et précis. Faible bruit et vibrations.	Coût de production plus élevé. Capacité de charge limitée.

	<p>Fonctionnement sans usure et sans entretien.</p> <p>Utilisation efficace de l'énergie.</p>	<p>Nécessite une alimentation électrique pour fonctionner.</p>
Embrayage à diaphragme :	<p>Léger et compact.</p> <p>Commutation en douceur.</p> <p>Nécessite moins de force pour fonctionner que l'embrayage à ressort.</p>	<p>Capacité de charge relativement faible.</p> <p>Sensible aux changements de température.</p> <p>Coût de fabrication plus élevé.</p>
Embrayage hydraulique :	<p>Engagement et désengagement doux et progressif.</p> <p>Faibles niveaux de bruit et de vibrations.</p> <p>Longue durée de vie.</p> <p>Capacité de charge importante.</p>	<p>Coûteux à produire.</p> <p>Maintenance plus complexe que l'embrayage à friction mécanique.</p> <p>Peut avoir des fuites de liquide hydraulique.</p>
Embrayage à ressort :	<p>Grande capacité de charge.</p> <p>Faible coût de fabrication.</p> <p>Fonctionnement fiable dans une large gamme de</p>	<p>Changement rapide d'engagement ou de désengagement.</p> <p>Nécessite plus de force pour fonctionner que l'embrayage à diaphragme.</p>

	températures et de conditions.	Nécessite plus d'espace que l'embrayage à diaphragme.
Embrayage magnétique :	<p>Action d'engagement et désengagement rapide et précise.</p> <p>Fonctionnement sans contact mécanique.</p> <p>Peut fonctionner dans des environnements sales ou corrosifs.</p>	<p>Limitations en termes de charge supportée.</p> <p>Fabrication onéreuse.</p> <p>Peut être utilisé uniquement avec une source d'alimentation électrique.</p>
Embrayage à friction à cône :	<p>Engagement et désengagement progressifs.</p> <p>Forte capacité de charge.</p> <p>Conçu pour les applications à haute vitesse.</p>	<p>Dégradation rapide des surfaces de friction.</p> <p>Engagement et désengagement brusques à basse vitesse.</p> <p>Peut nécessiter un mécanisme de libération externe.</p>
Embrayage à friction à multidisques :	<p>Capacité de charge élevée considérablement.</p> <p>Changement de vitesse sans à-coups.</p> <p>Peut être utilisé à des régimes élevés.</p>	<p>Coût de production supérieur.</p> <p>Nécessite un mécanisme de relâchement externe.</p> <p>Détérioration rapide des surfaces de friction.</p>

Embrayage à galets :	<p>Engagement et désengagement fluide.</p> <p>Grande capacité de support de charge.</p> <p>Peut être utilisé à des vitesses de rotation élevée.</p>	<p>Coût de fabrication important.</p> <p>Nécessite des galets de haute qualité pour un fonctionnement fiable.</p> <p>Sensible aux vibrations et aux chocs.</p>
Embrayage à cône à galets :	<p>Passage de vitesse facile.</p> <p>Capacité de charge importante.</p> <p>Adapté pour les vitesses de rotation élevées.</p>	<p>Sa production engendre des coûts élevés.</p> <p>Nécessite un mécanisme de libération externe.</p> <p>Sensible aux variations de température.</p>

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients de chaque type

I.6. Les composants du système d'embrayage et leurs caractéristiques :

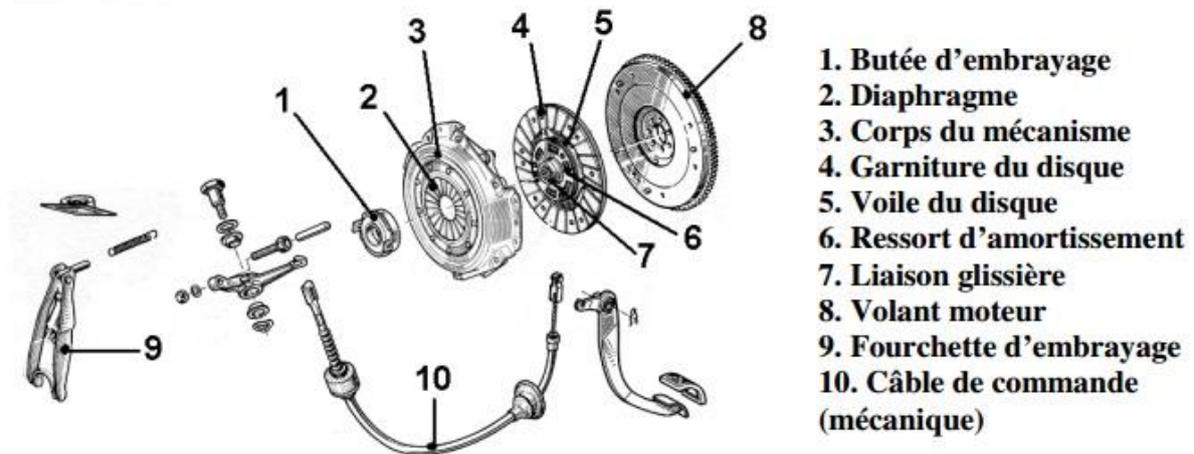


Figure I.13 : Vue éclatée d'embrayage [13]

Le système d'embrayage de nos jours est composé de trois parties distinctes, chacune remplissant une fonction spécifique dans l'opération de l'embrayage. Il s'agit notamment de :

I.6.1. **LA PARTIE MECANIQUE :**

C'est la partie principale du système d'embrayage. Elle est responsable de la transmission de la puissance entre le moteur et la boîte de vitesses. Ses composants comprennent :

I.6.1.1. **Le volant moteur :**

C'est un disque lourd en métal qui stocke l'énergie cinétique et fournit une surface d'adhérence pour le disque d'embrayage. Il est généralement fabriqué à partir de fonte ou d'acier, bien que des matériaux composites avancés, tels que la fibre de carbone, soient utilisés pour les applications de course et de haute performance.

Le processus de fabrication du volant moteur commence par la conception assistée par ordinateur (CAO) du composant, définissant les dimensions, les spécifications et les tolérances avec précision. Ensuite, le matériau choisi est fondu dans un four, avec une température de fusion pouvant atteindre jusqu'à 1 500 degrés Celsius. Le métal fondu est ensuite coulé dans un moule préalablement conçu selon les dimensions précises du volant moteur, généralement en sable ou en céramique.

Le volant moteur subit ensuite des opérations d'usinage pour enlever les bavures et les excès de matériau, ainsi que pour usiner les surfaces de montage et les alésages. Il est important que

le volant moteur soit équilibré pour garantir un fonctionnement fluide et éviter les vibrations. Cette étape consiste à éliminer les déséquilibres en retirant du matériau de certaines zones ou en ajoutant du matériau à d'autres zones du volant moteur.

Enfin, le volant moteur subit un traitement thermique pour améliorer sa résistance et sa durabilité. Ce traitement peut inclure un chauffage à haute température suivi d'un refroidissement rapide pour durcir le matériau. D'autres étapes, telles que le fraisage, le tournage, le perçage, le meulage et le polissage, peuvent également être nécessaires en fonction des spécifications et des exigences du fabricant.

Une fois toutes ces étapes terminées, le volant moteur est prêt à être installé dans le système d'embrayage.



Figure I.14 : Modèle d'un volant moteur [14]

I.6.1.2. Le disque d'embrayage :

Le disque est un élément essentiel de l'ensemble de l'embrayage qui prend la forme d'un sandwich situé entre le volant moteur et le mécanisme de pression. Son rôle est de transférer le couple du moteur vers la transmission en créant une friction entre lui-même et la surface d'adhérence du volant moteur.



Figure I.15 : Un disque d'embrayage [15]

Les principaux éléments constitutifs du disque comprennent :

I.6.1.2.1. *Le moyeu cannelé :*

Le moyeu cannelé est généralement fabriqué à partir d'un acier de haute qualité pour assurer sa résistance et sa durabilité. Il est usiné avec une forme cannelée pour s'adapter parfaitement aux cannelures du volant moteur et assurer un transfert de couple en douceur.

Le processus de fabrication du moyeu cannelé commence par la découpe de l'acier brut en forme ronde à l'aide d'une scie à ruban ou d'un tour. Ensuite, la pièce est usinée pour obtenir la forme cannelée, soit par une machine à tailler les cannelures, soit par une machine à fraiser.

Une fois que le moyeu cannelé a été usiné avec précision, il subit souvent un traitement thermique pour renforcer sa structure et augmenter sa résistance. Enfin, il peut être poli pour garantir une surface lisse et uniforme, ce qui est essentiel pour un engagement et un désengagement de l'embrayage sans à-coups.



Figure I.16 : Moyeu du disque [16]

I.6.1.2.2. Les amortisseurs de torsion :

Les amortisseurs de torsion sont des éléments essentiels du système d'embrayage, qui sont insérés dans le disque pour réduire les vibrations et les bruits pendant son fonctionnement. Leur nombre varie en fonction de la taille et du type de véhicule, allant d'un ou deux pour les petits véhicules jusqu'à huit pour les gros. Plus le nombre d'amortisseurs de torsion est élevé, plus la transmission de puissance est régulière et les vibrations sont réduites. Les amortisseurs de torsion sont principalement fabriqués à partir de matériaux tels que l'acier, l'aluminium ou le composite, chacun ayant ses avantages et inconvénients. L'acier est le plus couramment utilisé en raison de sa résistance à la corrosion et de sa durabilité. L'aluminium est plus léger mais plus cher à produire, tandis que les composites offrent des avantages de poids et de résistance, mais nécessitent des techniques de fabrication plus avancées. Les méthodes de fabrication des amortisseurs de torsion diffèrent selon les matériaux utilisés, allant de l'estampage pour l'acier au forgeage ou à l'usinage pour l'aluminium, en passant par le moulage sous pression ou la stratification de fibres pour les composites.

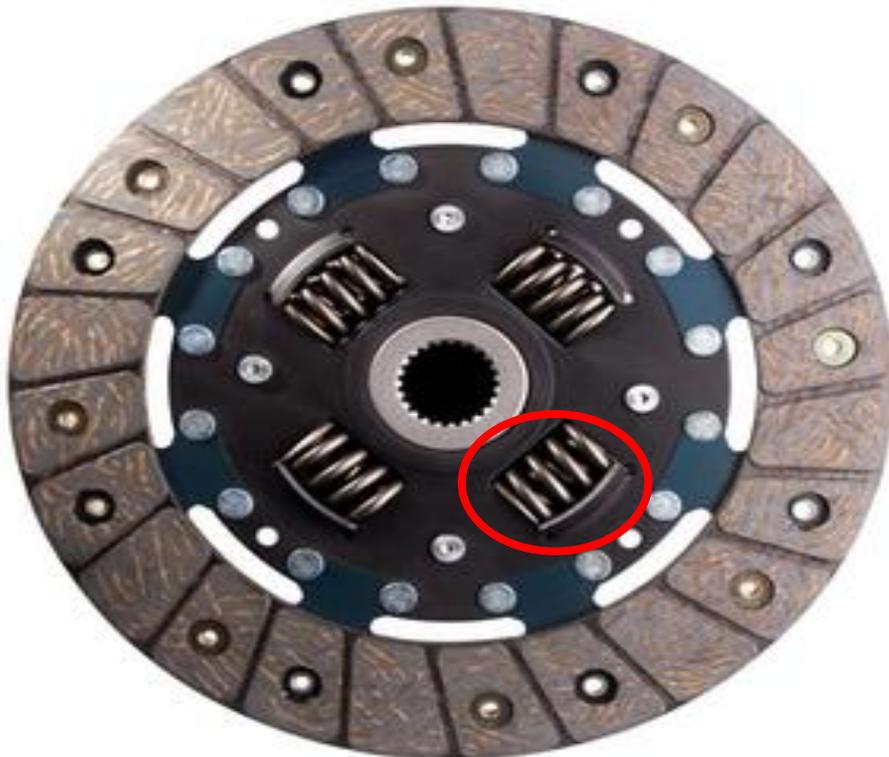


Figure I.17 : Disque à 4 amortisseurs [17]

I.6.1.2.3. *Garniture de friction :*

La garniture de friction est généralement fabriquée à partir d'un matériau composite composé de fibres et de charges liées avec une résine phénolique ou une résine céramique. Les fibres peuvent être en aramide, en carbone, en verre ou en acier. Les charges sont souvent des poudres métalliques telles que le cuivre, le fer ou le bronze. Le mélange est formé en une feuille plane qui est ensuite découpée en segments pour s'adapter à la forme du disque d'embrayage.

Le processus de fabrication de la garniture de friction peut impliquer plusieurs étapes, notamment le mélangeage des ingrédients, le pressage, la cuisson et le traitement de surface. Les ingrédients sont d'abord mélangés à sec, puis ils sont pressés dans un moule pour former des segments de garniture. Les segments sont ensuite cuits à une température élevée pour durcir la résine et lier les fibres et les charges ensemble.

Après la cuisson, la surface de la garniture de friction est souvent traitée pour améliorer ses propriétés de friction, d'usure et de durabilité. Cela peut inclure l'application d'un revêtement, d'un vernis ou d'un traitement chimique. Enfin, les segments de garniture de friction sont collés sur les plaques de support pour former le disque d'embrayage.



Figure I.18 : Garniture de friction [18]

I.6.1.2.4. La bague d'appui :

La bague d'appui, également appelée bague de centrage, est une pièce en acier ou en laiton qui est utilisée pour centrer le disque d'embrayage sur le volant moteur. Elle est fixée sur le moyeu cannelé du disque d'embrayage et est conçue pour s'engager dans une rainure correspondante sur le volant moteur. La bague d'appui est généralement fabriquée à partir de barres de matériau rond qui sont usinées pour obtenir les dimensions requises. Elle est ensuite percée et alésée pour s'adapter aux dimensions du moyeu cannelé du disque d'embrayage et à la rainure correspondante du volant moteur. La bague d'appui est ensuite fixée sur le moyeu cannelé du disque d'embrayage à l'aide de rivets ou de soudure.



Figure I.19 : Bague d'appui [19]

I.6.1.2.5. Les rivets :

Les rivets utilisés pour fixer les plaquettes de friction sur la plaque de pression sont généralement fabriqués en acier. Ils sont produits à partir de fil d'acier ou de barres d'acier qui sont coupées en longueurs appropriées. Les extrémités des rivets sont ensuite chauffées jusqu'à ce qu'elles soient incandescentes. Les deux pièces à assembler sont placées ensemble et le rivet est poussé à travers les trous pré percés. La partie supérieure du rivet est ensuite martelée pour créer une tête, fixant ainsi les deux pièces ensemble de manière permanente. Les rivets doivent être suffisamment résistants pour maintenir les plaquettes en place pendant l'utilisation de l'embrayage, mais aussi suffisamment souples pour permettre une certaine flexibilité.

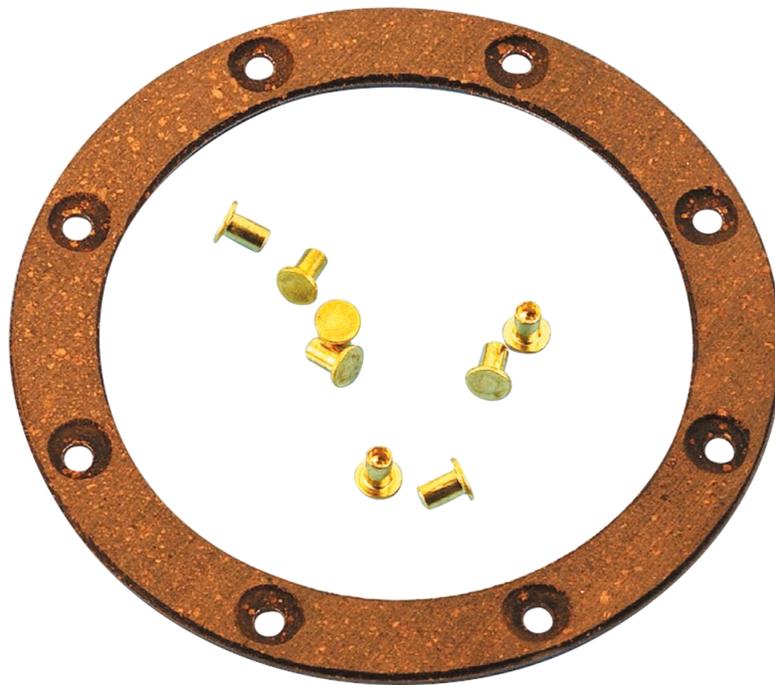


Figure I.20 : Rivets [20]

Ces composants peuvent varier selon les types de disques d'embrayage, mais ils constituent les principaux éléments d'un disque d'embrayage standard. Il est possible que certains fabricants ajoutent ou retirent des éléments supplémentaires pour améliorer les performances ou la durabilité de l'embrayage. Par exemple, un disque sans ressort peut être utilisé, bien qu'il soit moins courant, car il est moins efficace pour absorber les chocs que le disque standard.



Figure I.21 : Disque sans ressort [21]

1.6.1.3. Le mécanisme de pression :

Le mécanisme de pression d'embrayage est composé de ressorts et de diaphragmes qui exercent une force sur le disque d'embrayage afin de le maintenir contre le volant moteur, permettant ainsi la transmission de la puissance du moteur à la transmission lorsque l'embrayage est engagé. La fabrication de la plaque de pression, qui est un élément crucial de l'embrayage, implique plusieurs étapes importantes. Tout d'abord, une feuille d'acier est découpée en forme de cercle et est ensuite pressée à chaud dans un moule pour donner une forme convexe. La surface de la plaque de pression est ensuite usinée pour obtenir une surface lisse et uniforme. Par la suite, les ressorts de pression sont fixés sur la plaque de pression en étant insérés dans des trous prévus à cet effet, puis maintenus en place par des crochets métalliques. Les ressorts sont conçus pour fournir une pression suffisante pour maintenir le disque d'embrayage en place contre le volant moteur. Enfin, pour améliorer la durée de vie de l'embrayage, la plaque de pression est généralement recouverte d'un matériau anti-usure tel que le molybdène ou le carbone, qui est appliqué à l'aide d'un processus de projection thermique ou de dépôt chimique.



Figure I.22 : Plaque de pression [22]

I.6.1.4. Les fourchettes :

On a deux types : une pour l'embrayage qui est en forme de U et est reliée à la butée par un bras et elle est souvent équipée d'un roulement pour réduire la friction et on trouve une pour le débrayage qui a la forme de L ou de T et est fixée à la plaque de pression et elle peut être équipée d'un mécanisme de réglage pour ajuster sa position par rapport à la plaque de pression.

Lorsque la butée est actionnée, elle pousse la fourchette d'embrayage qui à son tour pousse la fourchette de débrayage pour désengager l'embrayage. Les matériaux utilisés pour la fabrication des fourchettes d'embrayage et de débrayage sont généralement de l'acier moulé ou usiné et les étapes de fabrication varient en fonction du procédé utilisé, mais comprennent généralement la conception et le dessin technique, la fabrication d'un modèle en argile, bois ou métal, la fabrication d'un moule en sable, la coulée de l'acier, l'ébavurage et la finition, l'usinage, le traitement thermique et le contrôle qualité.



Figure I.23 : Fourchette en forme U [1]

I.6.2. LA PARTIE HYDRAULIQUE :

C'est la partie responsable de l'actionnement de l'embrayage en utilisant un liquide de transmission sous pression et ses composants comprennent :

I.6.2.1. Le maître-cylindre d'embrayage :

Également appelé l'émetteur, est un réservoir de liquide hydraulique situé dans le compartiment moteur. Il est équipé d'un piston qui est actionné par la pédale d'embrayage, lorsque cette dernière est enfoncée, le piston du maître-cylindre d'embrayage comprime le liquide hydraulique et l'envoie à travers les tuyaux jusqu'au récepteur d'embrayage.

Cet émetteur est fabriqué à partir de différents matériaux tels que l'aluminium, l'acier, le caoutchouc, le nylon et le laiton, selon les spécifications du constructeur. Ses étapes de fabrication peuvent varier, mais en général, voici les étapes courantes :

1. Moulage : Le corps principal de l'émetteur est moulé à partir d'un matériau approprié tel que l'aluminium.
2. Usinage : Une fois le corps principal fabriqué, des opérations d'usinage sont effectuées pour créer des ports pour le liquide de frein et pour la connexion des tuyaux.
3. Assemblage : Les différents composants de l'émetteur, tels que le piston, le ressort, le joint et la vis de purge, sont assemblés selon les spécifications du constructeur.
4. Test : Avant d'être expédié, chaque émetteur est testé pour s'assurer qu'il fonctionne correctement et qu'il n'y a pas de fuite.



Figure I.24 : Emetteur [23]

I.6.2.2. *Le cylindre récepteur :*

C'est un cylindre hydraulique fixé sur le mécanisme d'embrayage. Il est équipé d'un piston qui est actionné par le liquide hydraulique provenant du maître-cylindre d'embrayage. Lorsque le liquide hydraulique est envoyé dans le récepteur d'embrayage, le piston pousse une fourchette de débrayage qui libère la plaque de pression et désengage l'embrayage. Sa fabrication implique plusieurs étapes :

1. **Étape de préparation :** Tout d'abord, les matériaux nécessaires à la fabrication du récepteur, tels que le métal, le caoutchouc, le plastique et le liquide de frein, sont sélectionnés et préparés pour le processus de fabrication.
2. **Usinage :** Ensuite, la matière première est usinée pour obtenir les différentes parties du récepteur. Les parties clés comprennent le corps du récepteur, les pistons et les joints toriques. L'usinage peut être réalisé par différentes techniques telles que le tournage, le fraisage et le perçage.
3. **Assemblage :** Une fois les différentes pièces usinées, elles sont assemblées pour former le récepteur. Les joints toriques sont placés sur les pistons et insérés dans le corps du récepteur. Le tout est maintenu en place par des clips ou des boulons.
4. **Traitement de surface :** Enfin, le récepteur est soumis à un traitement de surface pour améliorer sa résistance à la corrosion et sa durabilité. Cela peut impliquer l'application d'un revêtement en poudre, la galvanisation ou l'anodisation, en fonction du matériau utilisé.



Figure I.25 : Récepteur hydraulique d'embrayage [1]

I.6.2.3. La butée :

Elle se trouve généralement entre la plaque de pression et le mécanisme de débrayage. Elle est conçue pour exercer une pression sur la plaque de pression, ce qui permet de désengager l'embrayage lorsque la pédale d'embrayage est enfoncée. Elle est en général fabriquée à partir d'une bague extérieure, d'une bague intérieure, d'un ressort de compression et de billes de butée. Les deux bagues sont fabriquées à partir d'acier de haute qualité, tandis que le ressort de compression est souvent fabriqué à partir d'acier inoxydable. Les billes de butée peuvent être en acier ou en céramique, en fonction des exigences de performance et de durabilité.

La fabrication de la butée commence par la découpe des bagues à la taille requise, suivie de la fabrication du ressort de compression et de l'assemblage des billes de butée. Les billes de butée sont insérées entre les deux bagues et maintenues en place par le ressort de compression. L'ensemble est ensuite usiné pour obtenir les tolérances de fabrication requises.

La butée peut être fabriquée avec différentes conceptions pour répondre aux exigences spécifiques de l'application, comme la butée à diaphragme ou la butée à ressort hélicoïdal. Ces designs peuvent varier dans leur méthode de fabrication et leurs matériaux utilisés, mais l'objectif est de fournir une pression constante et uniforme sur le diaphragme ou le plateau de pression pour une performance optimale de l'embrayage.

Butée hydraulique



Butée mécanique



Figure I.26 : Différents types de butée [24]

I.6.2.4. *Le liquide hydraulique :*

Dans les systèmes d'embrayage hydrauliques, le liquide hydraulique est utilisé pour transmettre la force de la pédale d'embrayage au mécanisme de pression d'embrayage. Dans les systèmes d'embrayage câblés, le liquide de transmission est utilisé pour lubrifier et refroidir les composants de l'embrayage.

Il est généralement fabriqué à partir de deux types de liquides : soit de l'huile minérale, soit un liquide synthétique à base de glycol. Ces deux derniers ont des propriétés différentes en termes de température de fonctionnement, de résistance à l'usure et de compatibilité avec les différents matériaux utilisés dans les systèmes hydrauliques.

La fabrication du liquide hydraulique d'embrayage implique l'utilisation de plusieurs étapes. Tout d'abord, les ingrédients nécessaires sont mélangés dans des proportions spécifiques pour obtenir la composition souhaitée. Ensuite, le mélange est soumis à un processus de purification pour éliminer toute impureté ou contamination. Enfin, le liquide est conditionné dans des contenants appropriés pour le stockage et la distribution.



Figure I.27 : Réservoir du liquide d'embrayage [25]

I.6.3. LA PARTIE DE COMMANDE :

Le système de commande est responsable de la liaison entre le conducteur et la commande de la transmission. Ses composants sont :

I.6.3.1. La pédale d'embrayage :

La pédale d'embrayage, est située dans l'habitacle de la voiture et est actionnée par le conducteur. Lorsqu'elle est enfoncée, elle tire sur un câble ou agit sur un mécanisme de levier qui désengage le mécanisme d'embrayage, permettant ainsi de changer de vitesse et lorsqu'elle est relâchée, le mécanisme d'embrayage est réengagé, permettant ainsi à la puissance du moteur de passer à travers la transmission et aux roues de se mettre en mouvement.

Elle est généralement fabriquée en acier ou en aluminium. Le processus de fabrication dépend du matériau utilisé. Dans le cas de l'acier, la pédale peut être découpée dans une plaque à l'aide d'une machine de découpe ou formée à partir d'une tôle en utilisant des presses hydrauliques. Dans le cas de l'aluminium, la pédale peut être moulée ou usinée à partir d'un bloc d'aluminium à l'aide de machines-outils. Une fois la forme de la pédale obtenue, elle peut être usinée ou percée pour y ajouter des éléments tels que le ressort de rappel ou le pivot de la pédale. Ensuite, la pédale est généralement recouverte d'un revêtement en caoutchouc ou en plastique pour fournir une surface antidérapante pour le conducteur.



Figure I.28 : L'emplacement de la pédale en voiture [26]

I.6.3.2. *Le câble d'embrayage :*

Le câble ou la tige d'embrayage relie la pédale d'embrayage au mécanisme de pression d'embrayage. Lorsque le conducteur appuie sur la pédale d'embrayage, le câble ou la tige transmet la force nécessaire pour désengager l'embrayage.

Les deux sont fabriqués en acier ou en aluminium, en fonction des exigences de résistance et de légèreté. Pour les tiges, un processus de forgeage peut être utilisé pour former la forme désirée, tandis que pour les câbles, un processus de laminage ou d'extrusion peut être utilisé pour former la gaine extérieure en acier et le câble en acier ou en acier inoxydable.

Une fois la forme de la tige ou du câble obtenue, ils peuvent être usinés pour obtenir les caractéristiques précises requises, telles que les filetages ou les attaches pour se connecter à la pédale d'embrayage et au mécanisme de transmission.

Dans le cas des câbles, un revêtement en plastique peut être ajouté pour protéger le câble contre la corrosion et l'usure. Des tests de résistance et de durabilité sont souvent effectués pour garantir que la tige ou le câble répond aux normes de qualité et de sécurité.



Figure I.29 : Le câble de la pédale d'embrayage [27]

I.6.3.3. *Le détecteur de position :*

Le détecteur de position d'embrayage est un capteur fixé à l'extrémité de la tige de poussée de la pédale d'embrayage et il peut être de différents types, tels que des capteurs de position de potentiomètre ou des capteurs de pression hydrauliques. L'une de ses utilisations les plus courantes est de garantir que le moteur ne démarre pas si la transmission est engagée. En effet, lorsque la transmission est engagée, le moteur est lié aux roues et pourrait causer des dommages ou des accidents si le véhicule démarre alors que la transmission est engagée. Le détecteur de position d'embrayage permet donc d'éviter ce risque en empêchant le démarrage du moteur si la pédale d'embrayage n'est pas enfoncée.

Il peut également être utilisé pour activer d'autres fonctions du véhicule telles que la surveillance du régime moteur, la gestion de la vitesse de rotation du moteur et la protection contre le calage du moteur.

Il est généralement fabriqué à partir de matériaux tels que le plastique, le métal et l'électronique et la plupart de ces capteurs sont fabriqués en utilisant des techniques de circuits imprimés, qui impliquent la production de couches de matériaux conducteurs et isolants sur une surface plane. Les composants électroniques sont ensuite soudés sur ces couches pour créer le circuit.



Figure I.30 : Capteur de position multifonctions [28]

I.7. Principe de fonctionnement :

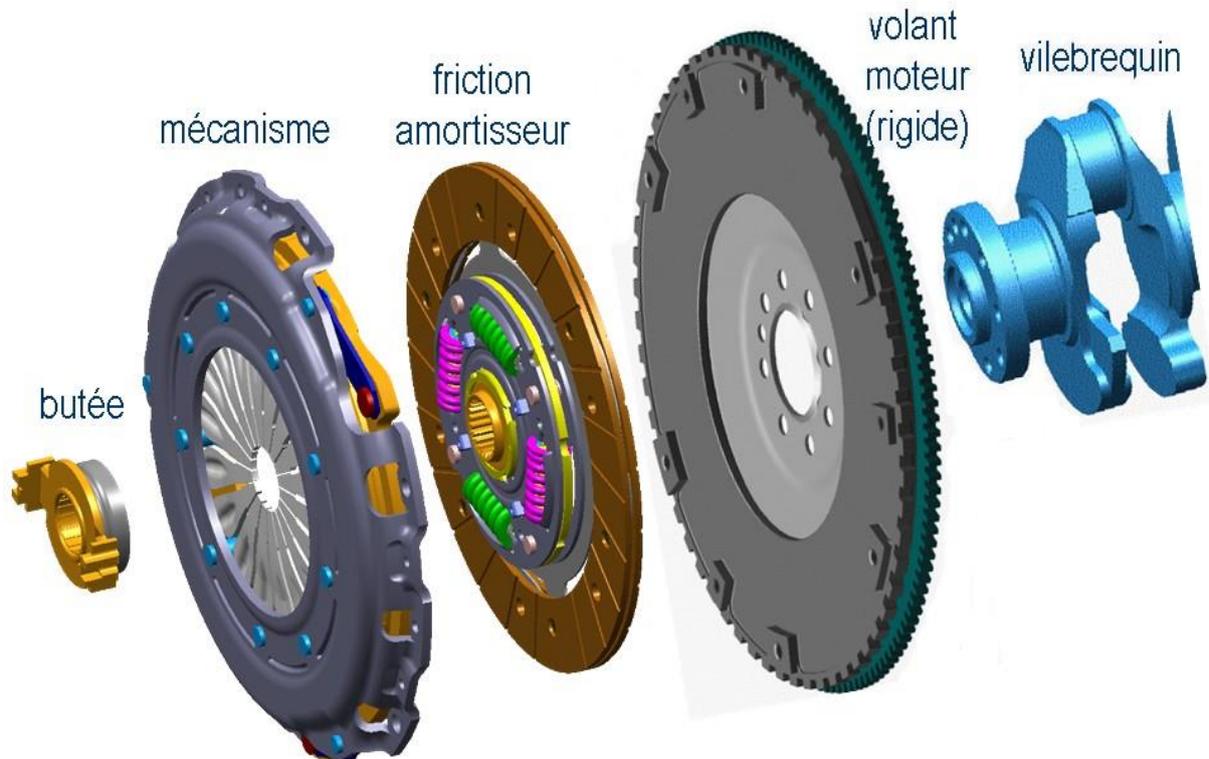


Figure I.31 : Vue d'ensemble du kit d'embrayage [29]

Le système d'embrayage est conçu pour permettre à la transmission de se déconnecter temporairement du moteur pour faciliter les changements de vitesse et assurer un démarrage en douceur. Son principe de fonctionnement est relativement simple :

Lorsque le conducteur appuie sur la pédale d'embrayage (débrayé), cela comprime le liquide hydraulique qui se déplace vers le récepteur d'embrayage qui pousse la tige ou le câble de commande qui à son tour, comprime la plaque de pression contre le disque d'embrayage. Cette friction entre le disque et le volant moteur, transmise la puissance du moteur à la transmission et aux roues motrices. En conséquence, d'un côté le disque et l'arbre d'entrée de boîte cessent de tourner et de l'autre côté le volant moteur et le plateau de pression continuent à tourner indépendamment.

Et quand le conducteur relâche la pédale d'embrayage (embrayé), la pression sur la plaque de pression diminue, ce qui permet aux ressorts entre plaques de faire reculer le disque d'embrayage. Cela libère la friction entre ce dernier et le volant moteur, ce qui permet la rotation de ces deux ainsi de l'arbre de la boîte comme c'est montré à la figure I.32.

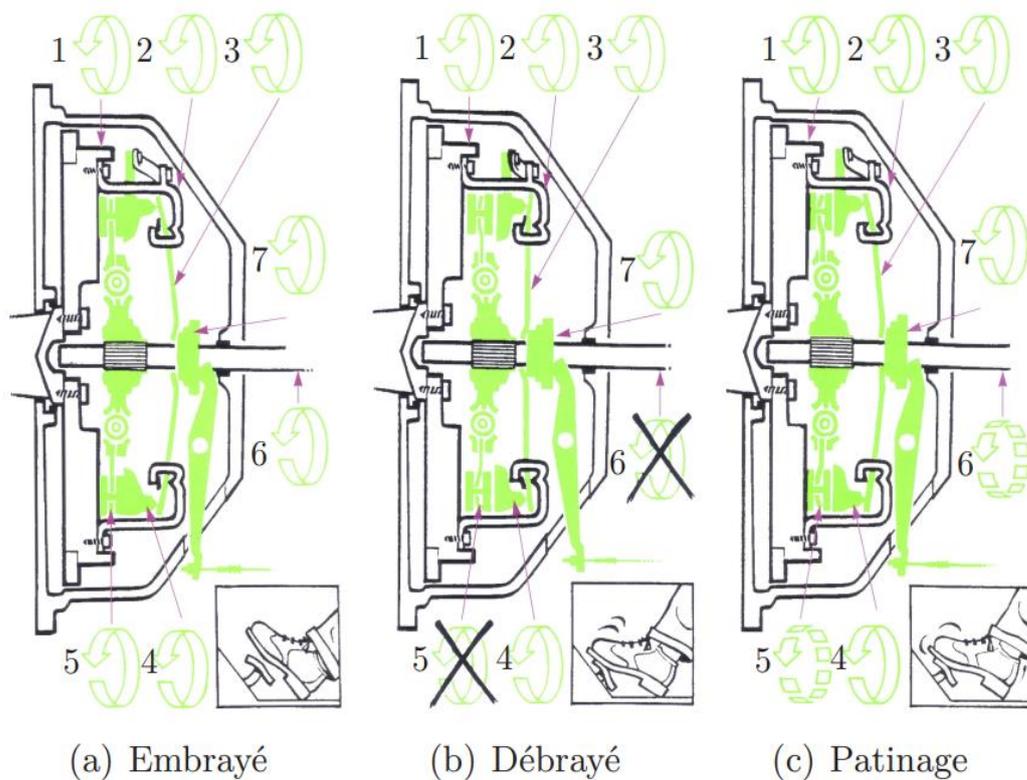


Figure I.32 : Rotation des composants d'embrayage, (1) le volant moteur, (2) le couvercle, (3) le diaphragme, (4) plateau de pression, (5) garniture de friction, (6) l'arbre primaire de la boîte vitesses, (7) la butée [30]

I.8. Conclusion :

L'embrayage est un composant clé des transmissions modernes qui depuis ses débuts modestes dans les premières voitures, a connu de nombreuses évolutions technologiques, avec des designs plus complexes, des matériaux plus résistants et des systèmes hydrauliques sophistiqués. Les différents types d'embrayages, tels que les embrayages à friction et les embrayages à diaphragme, sont conçus pour répondre aux besoins spécifiques des différents types de véhicules et de conduite. Composé de plusieurs éléments, y compris le volant moteur, le disque d'embrayage, le mécanisme de pression et le plateau de pression, l'embrayage fonctionne selon un principe simple mais efficace, permettant au conducteur de connecter ou de déconnecter temporairement la transmission du moteur pour un changement de vitesse en douceur et de maintenir le contrôle du véhicule tout en assurant une utilisation efficace et durable des composants.

Chapitre 02 :

Défaillance du système d'embrayage

II.1. Introduction :

Malgré sa conception robuste, l'embrayage peut être sujet à des défaillances qui peuvent compromettre son bon fonctionnement. Ces défaillances peuvent être dues à divers facteurs tels que l'usure, la surchauffe, la corrosion, ou encore une utilisation inappropriée.

Pour détecter ces problèmes, des méthodes de mesure ont été développées, telles que l'inspection visuelle, la mesure de l'épaisseur des disques, etc. Une fois les problèmes identifiés, des méthodes de diagnostic et de réparation peuvent être utilisées pour résoudre les problèmes rencontrés.

Ce chapitre traite des diverses défaillances auxquelles un système d'embrayage peut subir, notamment leurs causes et leurs conséquences sur les performances et la durée de vie de l'embrayage. Il présente également des méthodes de mesure et de détection de ces problèmes, ainsi que des techniques de diagnostic et de réparation visant à optimiser la longévité de l'embrayage.

II.2. Problèmes de maintenance :

Les problèmes de maintenance sont liés à la dégradation naturelle des composants de l'embrayage et nécessitent une maintenance régulière pour maintenir les performances optimales de l'embrayage. Ils peuvent inclure :

II.2.1. ***L'USURE DE GARNITURE DE FRICTION :***

II.2.1.1. *Causes :*

- Une utilisation excessive de l'embrayage, comme une conduite sportive ou des changements de vitesse fréquents.
- Une utilisation inappropriée de l'embrayage, comme des arrêts et des démarrages brusques.
- Un entretien inadéquat de l'embrayage, comme un niveau de liquide hydraulique bas ou un embrayage mal réglé.
- Des matériaux de garniture de friction de mauvaise qualité ou incompatibles avec le système d'embrayage.

II.2.1.2. Conséquences :

- Une perte de traction et de contrôle du véhicule, en particulier lors de l'accélération ou du passage des vitesses.
- Des bruits ou des vibrations excessifs provenant du système d'embrayage.
- Une augmentation de la température du système d'embrayage, pouvant entraîner une défaillance totale.
- Une réduction de la durée de vie de l'embrayage et une nécessité d'un remplacement anticipé.



Figure II.1 : Garniture usée jusqu'aux têtes de rivets [31]

II.2.2. FUIITE HYDRAULIQUE :**II.2.2.1. Causes :**

- Joint d'étanchéité défectueux.
- Tuyau de liquide hydraulique endommagé.
- Raccord de tuyau desserré ou cassé.
- Pompe hydraulique usée.
- Cylindre maître ou esclave défectueux.

II.2.2.2. Conséquences :

- Perte de pression dans le système d'embrayage.
- Difficulté à changer de vitesse ou à embrayer.
- Pédale d'embrayage molle ou spongieuse.
- Fuite de liquide hydraulique sur le sol.
- Risque de panne de l'embrayage si le niveau de liquide hydraulique devient trop bas.

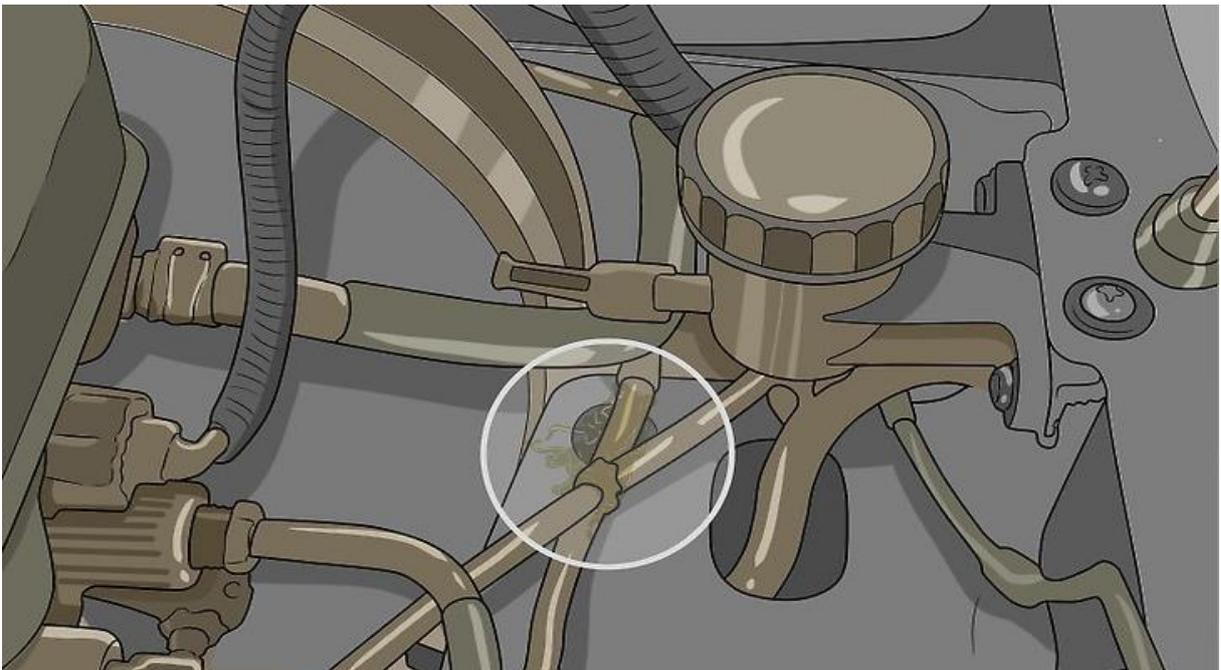


Figure II.2 : Tuyau de liquide qui coule [32]

II.2.3. CABLE D'EMBRAYAGE CASSE :

II.2.3.1. Causes :

- Usure normale du câble due à l'utilisation prolongée.
- Tension excessive sur le câble.
- Exposition à des températures élevées.
- Mauvaise installation ou maintenance.

II.2.3.2. Conséquences :

- Incapacité de changer de vitesse ou de débrayer.
- Difficulté à passer les vitesses ou broutages de la voiture.
- Usure prématurée de l'embrayage.
- Risque d'accident si le conducteur n'est pas en mesure de contrôler la voiture.
- Possibilité que le câble d'embrayage endommage d'autres composants du système d'embrayage.



Figure II.3 : Câble d'embrayage cassé [33]

II.2.4. DISQUE DEFORME :

II.2.4.1. Causes :

- Surchauffe du disque d'embrayage.
- Utilisation excessive de l'embrayage.
- Pression excessive sur le disque lors de l'assemblage.

II.2.4.2. Conséquences :

- Perte d'adhérence entre le disque et le volant moteur.
- Difficulté à engager les vitesses.
- Bruits inhabituels lors du passage des vitesses.
- Usure prématurée du disque et des autres composants de l'embrayage.



Figure II.4 : Un disque bombé [34]

II.2.5. BUTEE USEE :**II.2.5.1. Causes :**

- Usure normale due à l'utilisation régulière de l'embrayage.
- Défaut de lubrification de la butée.
- Qualité inférieure de la butée ou des composants environnants.
- Réglage incorrect du système d'embrayage.

II.2.5.2. Conséquences :

- Difficulté à changer de vitesse ou à enclencher la marche arrière.
- Bruit de grincement ou de frottement lors de la pression sur la pédale d'embrayage.
- Défaillance complète de l'embrayage.
- Endommagement du volant moteur ou de la cloche d'embrayage.



Figure II.5 : La différence entre une butée neuve et une butée usée [35]

II.2.6. *VOLANT MOTEUR DEFECTUEUX :*



Figure II.6 : Volant moteur défectueux [36]

II.2.6.1. *Causes :*

- Surutilisation ou utilisation prolongée de l'embrayage.
- Dommages causés par des vibrations excessives.
- Dommages causés par une température élevée ou un incendie dans la zone du volant moteur.
- Alignement inadéquat entre le moteur et la transmission.
- Défauts de fabrication ou d'usinage.
- Erreurs de montage.

II.2.6.2. *Conséquences :*

- Les vibrations excessives peuvent endommager les roulements et les joints.
- Les bruits excessifs peuvent causer des dommages permanents au moteur ou à la transmission.
- Les pièces adjacentes peuvent être endommagées en raison de la surchauffe.
- Le volant moteur peut se fissurer ou se briser, ce qui peut entraîner une perte de contrôle du véhicule et des dommages importants.

II.2.7. **PROBLEMES ELECTRIQUES :**

II.2.7.1. *Causes :*

- Défauts de la batterie
- Connecteurs mal branchés.
- Câblages endommagés.
- Problèmes avec le capteur de position de pédale d'embrayage et celui du volant moteur.
- Défauts dans les circuits électriques de l'embrayage.

II.2.7.2. Conséquences :

- Difficulté à démarrer le moteur.
- Impossible de passer les vitesses.
- Problèmes de synchronisation des vitesses.
- Témoin lumineux de l'embrayage allumé.
- Les voyants lumineux du tableau de bord ne se mettent pas en marche.
- Problèmes de démarrage en côte.

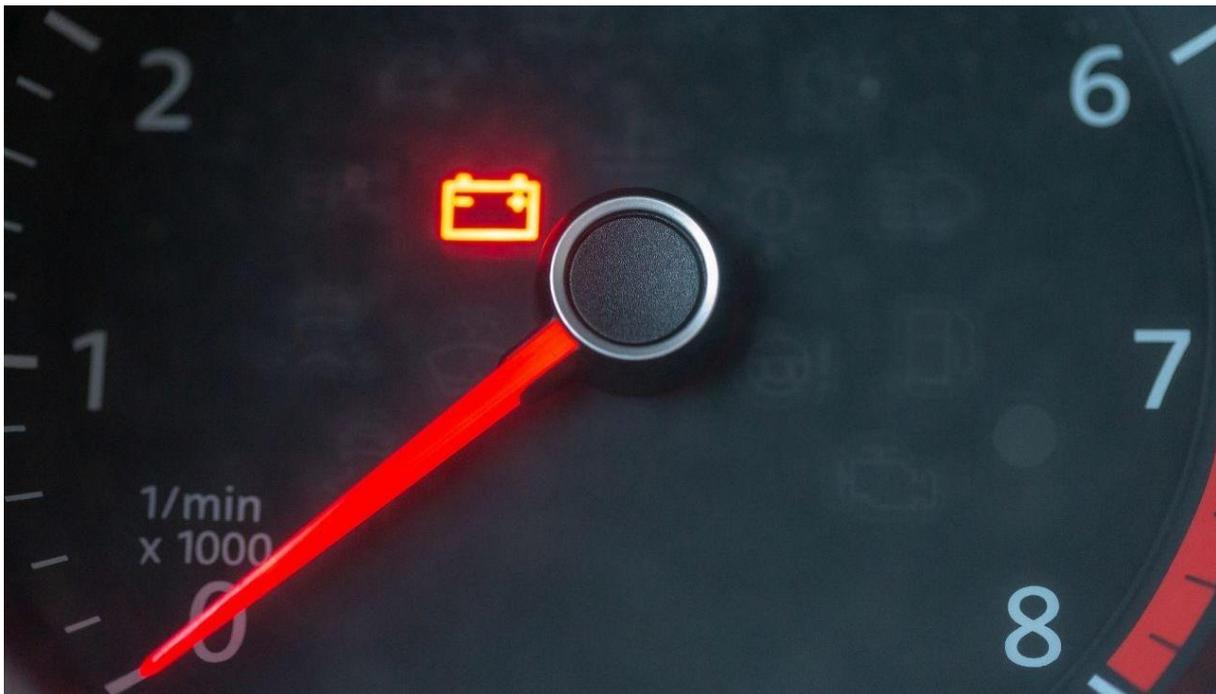


Figure II.7: Voyant lumineux qui indique un problème de batterie [37]

II.2.8. *DEFAILLANCE DE MECANISME DE PRESSION :***II.2.8.1. *Causes :***

- Usure excessive de la plaque de pression.
- Défaillance de la butée.
- Défaillance du volant moteur.
- Mauvais réglage du mécanisme de pression.
- Utilisation excessive de la pédale d'embrayage.
- Corrosion ou fuite des fluides hydrauliques.

II.2.8.2. *Conséquences :*

- Patinage ou glissement de l'embrayage.
- Difficulté ou impossibilité de changer de vitesse.
- Bruit ou vibration anormale.
- Usure prématurée des composants de l'embrayage.
- Augmentation de la température de l'embrayage.



Figure II.8 : Plateau de pression cassé [34]

II.2.9. L'USURE DE MOYEU :

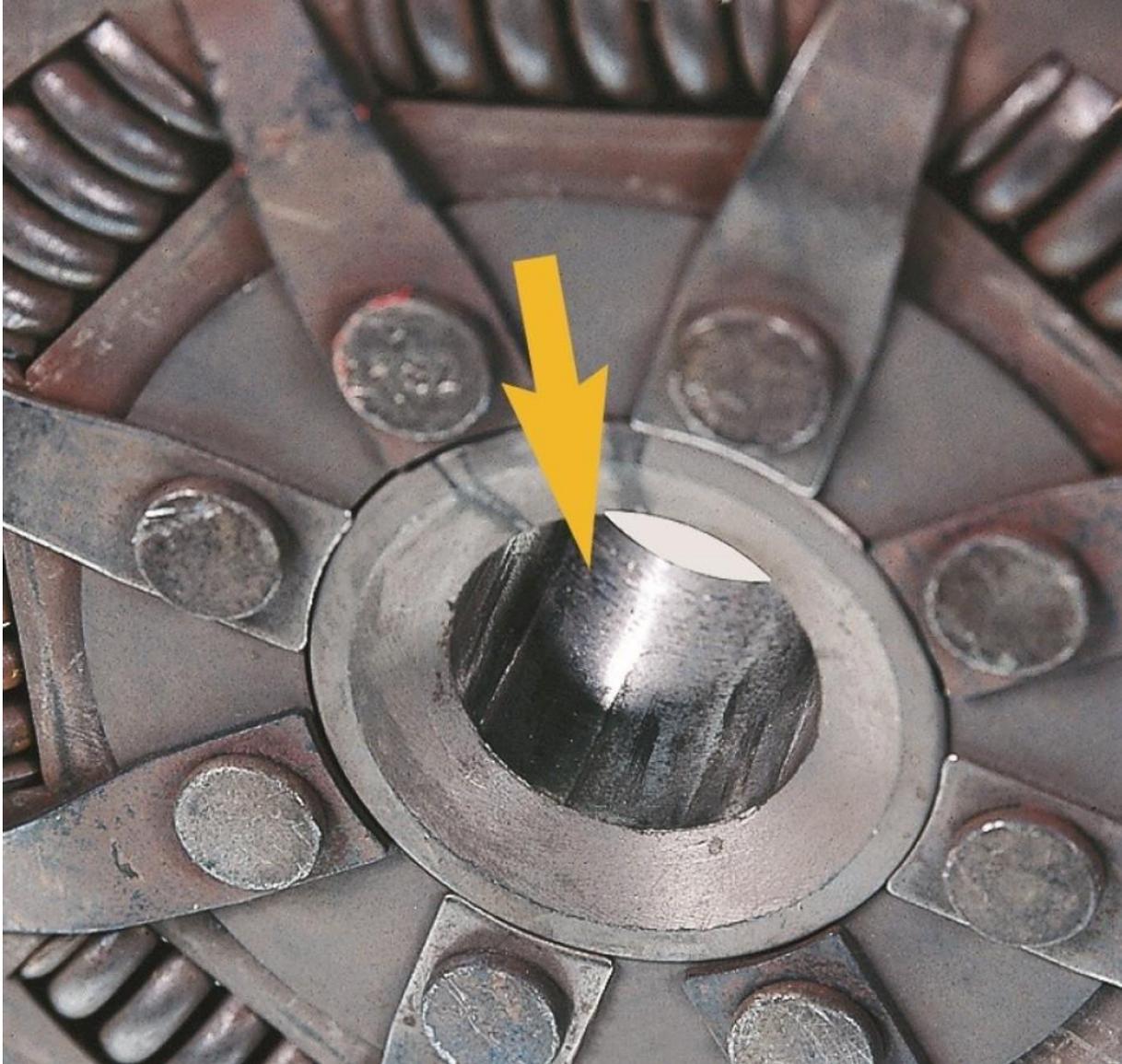


Figure II.9 : Cannelures de moyeu absentes [38]

II.2.9.1. Causes :

- Frottement excessif entre le moyeu et la butée.
- Qualité inférieure du matériau utilisé pour le moyeu.
- Mauvais alignement des pièces du système d'embrayage.
- Utilisation prolongée de l'embrayage sans entretien adéquat.

II.2.9.2. Conséquences :

- Usure prématurée de la garniture de friction.
- Difficulté à changer de vitesse ou passage difficile.
- Un bruit caractéristique de grincement ou de claquement se produit lors du changement de vitesse.
- Risque de blocage du système d'embrayage.

II.2.10. L'USURE DES RESSORTS :

II.2.10.1. Causes :

- Utilisation prolongée de l'embrayage dans des conditions de surcharge.
- Usure normale due à l'utilisation régulière.
- Défauts de fabrication du ressort.
- Tension insuffisante du ressort.

II.2.10.2. Conséquences :

- Difficulté à débrayer ou à enclencher les vitesses.
- Patinage de l'embrayage.
- Perte de pression d'embrayage.
- Usure prématurée de la garniture de friction.
- Bruits inhabituels provenant de l'embrayage.
- Surchauffe de l'embrayage.
- Possibilité d'une panne complète du système d'embrayage.

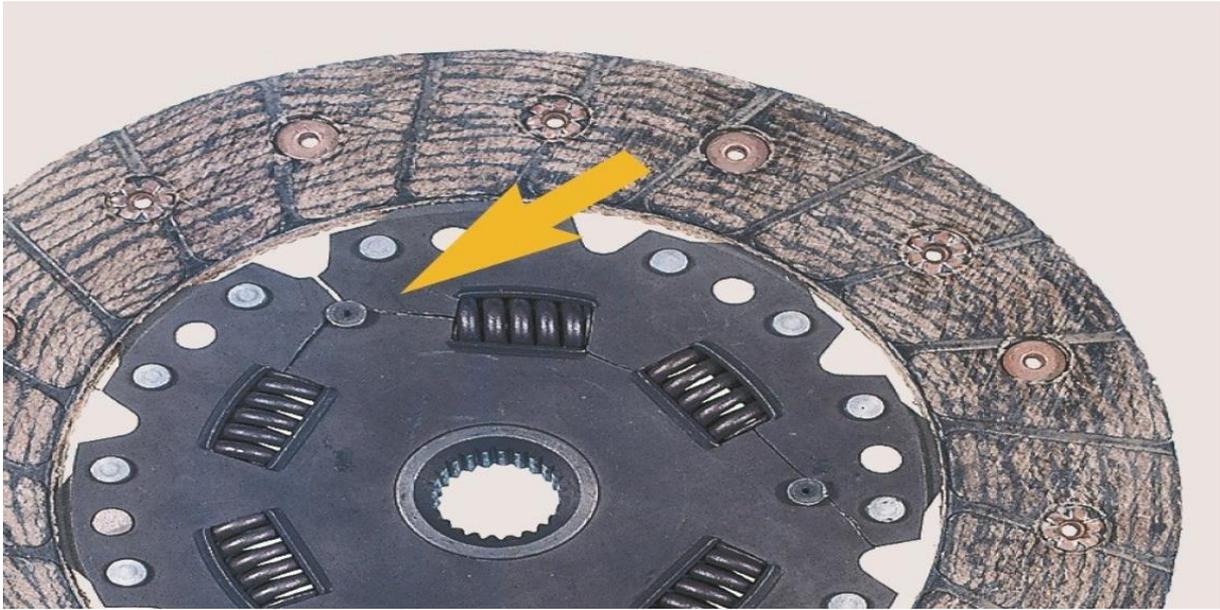


Figure II.10 : Ressorts du disque d'entraînement [34]

II.2.11. LA DEFAILLANCE DE LA BAGUE D'APPUI :



Figure II.11 : Bague d'appui défectueuse [39]

II.2.11.1. *Causes :*

- Usure naturelle due à l'utilisation prolongée de l'embrayage
- Mauvaise qualité de la bague d'appui
- Lubrification insuffisante

II.2.11.2. *Conséquences :*

- Dégradation de la qualité de l'embrayage, entraînant une usure prématurée des autres composants
- Bruit de grincement lors de l'embrayage ou du passage des vitesses
- Risque d'endommagement du volant moteur ou des autres composants de l'embrayage.

II.2.12. *L'USURE DES AMORTISSEURS :*

II.2.12.1. *Causes :*

- Surutilisation de l'embrayage.
- Utilisation excessive du frein moteur.
- Défectuosité du système de lubrification.
- Mauvaise qualité de fabrication des amortisseurs.
- Utilisation d'un embrayage de qualité inférieure.

II.2.12.2. *Conséquences :*

- Vibration de l'embrayage.
- Bruits inhabituels lors du changement de vitesse.
- Usure prématurée des composants de l'embrayage.
- Perte de puissance de transmission.
- Défaillance complète de l'embrayage.



Figure II.12 : Des amortisseurs corrodés [40]

II.2.13. *DYSFONCTIONNEMENT DU CAPTEUR DE POSITION DE L'EMBRAYAGE :*



Figure II.13 : Difficulté à changer les vitesses [41]

II.2.13.1. *Causes :*

- Usure ou endommagement du capteur de position.
- Connexion électrique défectueuse ou relâchée.
- Problèmes de tension électrique.
- Défaillance du calculateur de commande électronique.

II.2.13.2. *Conséquences :*

- Difficulté ou impossibilité de changer les vitesses.
- Perte de puissance et de couple moteur.
- Dysfonctionnement du système de régulation de la vitesse de croisière.
- Dysfonctionnement de la transmission automatique, si équipée.
- Dysfonctionnement du système de démarrage et d'arrêt automatique du moteur.
- Risque du calage de moteur.

II.2.14. **LA CORROSION :**

II.2.14.1. *Causes :*

- Exposition à l'humidité ou à l'eau.
- Utilisation du véhicule dans des conditions de route salées ou corrosives.
- Mauvaise protection des pièces en métal du système d'embrayage.
- Utilisation prolongée du véhicule sans entretien adéquat.

II.2.14.2. *Conséquences :*

- Usure prématurée des pièces en métal du système d'embrayage.
- Perte de performance de l'embrayage.
- Défaillance du système d'embrayage.



Figure II.14 : Disque d'embrayage corrodé [42]

II.3. Problèmes de performance :

II.3.1. *PATINAGE DE L'EMBAYAGE :*

Le patinage se produit lorsque l'embrayage n'est pas en mesure de transférer la puissance du moteur à la transmission, ce qui se traduit par une augmentation de la consommation de carburant et une perte de performance globale. Les causes possibles incluent une usure excessive des garnitures d'embrayage, une pression d'embrayage inadéquate, une huile ou une graisse contaminée, une torsion excessive du disque d'embrayage ou une tension insuffisante du ressort de pression.

II.3.2. GLISSEMENT DE L'EMBRAYAGE :

Le glissement se produit lorsque le disque d'embrayage n'adhère pas suffisamment au volant moteur, ce qui entraîne une perte de puissance et une augmentation de la température de l'embrayage. Cela peut être causé par un disque d'embrayage usé, un mécanisme de réglage de l'embrayage défectueux ou une lubrification insuffisante du système d'embrayage.

II.3.3. BRUIT D'EMBRAYAGE :

Les bruits d'embrayage peuvent être causés par une usure excessive du disque d'embrayage, des ressorts d'embrayage cassés ou des roulements de butée d'embrayage défectueux. Un bruit de grincement peut également indiquer que la surface de friction du disque d'embrayage est contaminée par de l'huile.

II.3.4. VIBRATIONS :

Les vibrations peuvent être causées par une variété de facteurs, tels qu'un déséquilibre du volant moteur, une usure excessive des garnitures d'embrayage, un embrayage mal aligné, une torsion excessive du disque d'embrayage ou une tension insuffisante du ressort de pression.

II.3.5. FUMEE :

Cela peut être un signe que l'embrayage est en train de brûler. Cela peut être causé par une usure excessive des garnitures d'embrayage, une pression d'embrayage inadéquate, une torsion excessive du disque d'embrayage ou une tension insuffisante du ressort de pression.

II.4. Diagnostic et réparation :

II.4.1. *METHODES DE DIAGNOSTIC :*

Dans le domaine de la maintenance des véhicules automobiles, les méthodes de diagnostic ont considérablement évolué ces dernières années. Avec l'avènement de la technologie moderne, les mécaniciens disposent désormais de nombreux outils et équipements de diagnostic sophistiqués pour aider à identifier les problèmes de fonctionnement des véhicules. Ces outils de diagnostic peuvent être utilisés pour une variété de fonctions, allant de la simple lecture de codes d'erreur jusqu'à la réalisation de tests plus approfondis pour déterminer l'état de santé du véhicule. Dans cette optique, il est important de comprendre les différentes méthodes de diagnostic disponibles pour pouvoir choisir la plus adaptée à chaque situation et de ces méthodes on cite :

II.4.1.1. *Mesure de l'épaisseur du disque d'embrayage :*

Cette méthode consiste à mesurer l'épaisseur du disque d'embrayage à différents endroits à l'aide d'un micromètre. Les valeurs mesurées sont comparées aux spécifications du fabricant pour déterminer si le disque doit être remplacé.

II.4.1.2. *Mesure des dents du volant moteur :*

Cette méthode consiste à mesurer la hauteur des dents du volant moteur à l'aide d'un comparateur. Si les dents sont usées au-delà des spécifications du fabricant, le volant moteur doit être remplacé.

II.4.1.3. *Inspection visuelle :*

Il est important de faire une inspection visuelle de tous les composants du système d'embrayage pour détecter les fissures, les cassures, les brûlures ou toute autre forme d'usure anormale.

II.4.1.4. *Mesure de l'usure des garnitures :*

Pour effectuer cette mesure, le capteur de déplacement est placé sur la surface de friction du disque d'embrayage. Le capteur mesure la distance entre la surface de friction et une référence fixe, généralement un point fixe sur le boîtier de l'appareil de mesure. En faisant pivoter le disque d'embrayage à différentes positions, le capteur peut mesurer l'usure sur toute la surface de friction.

II.4.1.5. *Mesure de la planéité de la surface de friction :*

Elle est un peu plus complexe car elle consiste à mesurer la différence de hauteur de la surface de friction par rapport à une surface plane de référence. Pour ce faire, un comparateur à cadran est utilisé. Le comparateur est placé sur la surface de friction du disque, et le cadran est aligné avec la surface plane de référence. Ensuite, le disque est tourné, et le comparateur enregistre les variations de hauteur de la surface de friction. Les données sont ensuite utilisées pour calculer la planéité de la surface de friction du disque d'embrayage.

II.4.1.6. *Test de fuite hydraulique :*

Cette méthode consiste à utiliser un détecteur de fuite pour localiser l'endroit où le fluide hydraulique s'échappe. Elle peut être réalisée à l'aide de différents types de détecteurs de fuite, tels que des détecteurs de fluorescence ou des détecteurs acoustiques.

II.4.1.7. *Essais sur banc d'essai de dynamomètre :*

Cette méthode est utilisée pour détecter les défauts de patinage et de glissement. Elle consiste à mesurer la vitesse de rotation du moteur et la vitesse de sortie de l'embrayage à différentes charges et vitesses. Des mesures précises peuvent être effectuées pour déterminer si l'embrayage patine ou glisse.

II.4.1.8. *Analyse thermique :*

Cette méthode consiste à mesurer la température du système d'embrayage à différents points de fonctionnement. Des températures anormalement élevées peuvent indiquer un problème de surchauffe.

II.4.1.9. *Essais de vibration :*

Cette méthode est utilisée pour détecter les défauts de vibration. Elle consiste à mesurer les vibrations de l'embrayage à différents points de fonctionnement. Des vibrations excessives peuvent indiquer un problème de déséquilibre ou de défaut de montage.

II.4.1.10. *Mesure de la dureté de la pédale d'embrayage :*

Cette méthode est utilisée pour détecter les défauts de débrayage. Elle consiste à mesurer la force nécessaire pour enfoncer la pédale d'embrayage à différents points de fonctionnement. Des variations dans la dureté de la pédale peuvent indiquer un problème de débrayage.

II.4.1.11. *Mesure de la résistance électrique :*

Cette méthode est utilisée pour détecter les défauts de rupture de circuit électrique. Elle consiste à mesurer la résistance électrique de l'embrayage à différents points de fonctionnement. Des mesures de résistance élevées ou faibles peuvent indiquer un problème de circuit électrique.

II.4.1.12. *Analyse acoustique :*

Cette méthode permet de mesurer les sons produits par la machine pour détecter les défauts de fonctionnement. Les microphones sont placés près de la machine pour capter les sons, qui sont ensuite analysés par des logiciels de diagnostic pour déterminer l'état de la machine.

II.4.1.13. *Analyse des gaz d'échappement :*

Une méthode avancée consiste à effectuer une analyse des gaz d'échappement pour détecter les problèmes de combustion et de synchronisation. Cela peut aider à identifier les problèmes liés à l'embrayage.

II.4.2. *METHODES DE REPARATION :*

Il existe plusieurs méthodes de réparation pour les problèmes de maintenance liés au système d'embrayage comme :

II.4.2.1. *Remplacement des composants défectueux :*

Cette méthode consiste à remplacer les composants défectueux du système d'embrayage. Par exemple, si le disque d'embrayage est usé, il est remplacé par un nouveau disque. De même, si le mécanisme de débrayage est endommagé, il est remplacé.

II.4.2.2. *Réglage de l'embrayage :*

Si le problème est lié au réglage de l'embrayage, il peut être réglé. Les mécanismes d'embrayage modernes sont dotés d'un dispositif de réglage qui permet de régler la position de l'embrayage. Le réglage de l'embrayage doit être effectué avec précision pour éviter les problèmes de patinage ou de glissement.

II.4.2.3. *Lubrification :*

Si le problème est lié à une lubrification inadéquate des composants de l'embrayage, il peut être résolu en effectuant une lubrification appropriée. Les composants de l'embrayage doivent être lubrifiés régulièrement pour assurer leur bon fonctionnement.

II.4.2.4. *Réparation du volant moteur :*

Si le volant moteur est endommagé, il doit être réparé. Le volant moteur peut être rectifié ou remplacé selon la gravité du dommage

II.4.2.5. *Nettoyage :*

Si le problème est lié à l'accumulation de saleté ou de poussière sur les composants de l'embrayage, il peut être résolu en nettoyant les composants. Les composants doivent être nettoyés avec précaution pour éviter d'endommager la surface de friction.

II.4.2.6. *Réparation de la butée d'embrayage :*

Si la butée d'embrayage est endommagée, elle doit être remplacée. Il est important de vérifier régulièrement l'état de la butée d'embrayage et de la remplacer en cas de besoin.

II.4.2.7. *Remplacement du câble d'embrayage :*

Si le câble d'embrayage est endommagé, il doit être remplacé. Il est important de s'assurer que le câble d'embrayage est en bon état de fonctionnement pour éviter les problèmes de débrayage.

II.5. Conclusion :

La défaillance du système d'embrayage peut causer des problèmes de maintenance et de performance qui affectent la capacité de la voiture à fonctionner correctement. Cependant, grâce aux méthodes de diagnostic modernes, il est possible de détecter ces problèmes rapidement et précisément. Les professionnels de l'automobile peuvent utiliser des méthodes telles que l'inspection visuelle, la vérification de la pédale d'embrayage et les essais routiers pour identifier les problèmes. Une fois le problème détecté, il est possible d'utiliser différentes méthodes de réparation, telles que le remplacement des pièces défectueuses, la réparation des fuites hydrauliques et la réparation ou le remplacement du volant moteur. En conclusion, il est important de surveiller régulièrement l'état du système d'embrayage et de résoudre rapidement tout problème pour éviter les coûts élevés de réparation et pour assurer une performance optimale de la voiture.

Chapitre 03 :

Guide de maintenance des embrayages

III.1. Introduction :

Pour assurer un fonctionnement optimal et une durée de vie prolongée de l'embrayage, il est recommandé de respecter un calendrier de maintenance régulier. Cela permet de prévenir les problèmes potentiels et les pannes inattendues, tout en garantissant une excellente performance.

Ce chapitre, vise à fournir un aperçu complet sur les bonnes pratiques et les procédures à suivre pour maintenir un embrayage de Renault Mégane 2. En comprenant et appliquant ces étapes, les propriétaires de véhicules et les professionnels de l'automobile pourront garantir un fonctionnement sûr et fiable du système d'embrayage.

III.2. Durée de vie des embrayages :

Un embrayage bien entretenu peut durer entre 80 000 et 150 000 kilomètres. Bien entendu cette estimation n'est pas stable et peut varier considérablement en fonction de nombreux facteurs : conduite (agressive ou calme), environnement (ville ou campagne), pièce (robuste ou fragile).

III.3. Procédures de maintenance :

La maintenance de l'embrayage se réfère aux actions correctives et réparatrices effectuées lorsque des problèmes sont identifiés ou lorsque des pièces nécessitent un remplacement. Ça peut inclure des réparations, des remplacements de composants défectueux, des ajustements et des réglages plus approfondis, et peut nécessiter l'intervention d'un professionnel qualifié. Ses procédures doivent suivre un ordre comme se suit :

III.3.1. *PREPARATION :*

III.3.1.1. *Outillage nécessaire :*

Les outils utilisés lors du remplacement d'un embrayage peuvent varier en fonction du modèle de véhicule et des spécifications du fabricant donc il est toujours préférable de se référer au manuel d'entretien du véhicule pour obtenir des informations spécifiques mais cela n'empêche pas qu'il existe certains outils de base et indispensables tels que :

- Une caisse à outils qui contient :
 - Clé à cliquet et ensemble de douilles : Utilisées pour desserrer et serrer les écrous et boulons de l'embrayage et des composants associés.

- Clé dynamométrique : Permet de serrer les écrous et boulons avec le bon couple de serrage recommandé par le fabricant.
- Outil d'alignement d'embrayage : Un outil spécial qui aide à aligner le disque d'embrayage lors de son installation.
- Outil de dépose de roulement : Si des roulements doivent être remplacés, un outil spécifique peut être nécessaire pour les retirer.
- Outils de mesure : Des outils tels qu'un pied à coulisse ou un micromètre peuvent être nécessaires pour mesurer certaines dimensions critiques lors de l'installation de nouveaux composants.
- Graisseur : Utilisé pour lubrifier les points de pivotement et les mécanismes mobiles de l'embrayage.
- Outils de sécurité : Cela peut inclure des gants de sécurité, des lunettes de protection et d'autres équipements de protection individuelle (EPI).
- Un cric.
- Des chandelles.
- Une chèvre hydraulique ou un palan.
- Un bac à vidange.

III.3.1.2. *Consignes de sécurité* :

- ✓ Avant toute intervention il est important d'assurer que le véhicule est correctement immobilisé et surélevé par des chandelles, une fois c'est fait il faut poursuivre par démonter les roues de l'essieu concerné et les glisser sous le véhicule.
- ✓ Lors de l'ouverture du capot il est impératif de débrancher la borne négative de la batterie pour éviter tout risque d'électrocution.
- ✓ Il est nécessaire de s'équiper d'un extincteur en état de marche à proximité car un véhicule contient plusieurs sortes de produits inflammables comme l'essence ou l'huile.

III.3.2. DEMONTAGE :**III.3.2.1. Dépose de la boîte de vitesses :**

- Tout d'abord il faut retirer la batterie puis retirer le bac à batterie à l'aide d'un ticket, d'une rallonge et d'une douille Torx 40 pour dévisser les 3 vis de maintien du bac.
- A l'aide d'une douille de 10, dévisse l'écrou de maintien de la gaine électrique sur le bac à batterie.
- Retire le conduit d'admission d'air en tirant simplement dessus à l'aide d'un tournevis.
- A l'aide d'un tournevis plat déclipse de la gaine électrique de son logement, déverrouille les trois connectiques électriques du réseau du calculateur et retire-les.

(Tu peux maintenant retirer l'ensemble Bac à batterie-calculateur)

- Débranche le débitmètre d'air et retire le capteur de pression du turbo, puis à l'aide d'un tournevis plat dévisse le collier du conduit d'admission d'air du turbo et extrait le.
- Retire la seconde partie du conduit d'admission d'air au niveau de la calandre, puis retire la boîte à air qui est clipsé sur son support et après déclipse le reniflard de la boîte de vitesses.
- Tu dois maintenant d'éclipser les deux commandes de la boîte de vitesses en appuyant sur les deux ergots situés sur la rotule à l'aide d'un tournevis plat, puis en faisant levier avec ce dernier.
- Dégage les deux commandes de boîte de vitesses en appuyant sur les clips de verrouillage à l'aide d'un tournevis plat.

(Il est maintenant nécessaire de se placer sous le véhicule)

- Le changement d'embrayage impose de retirer les deux cardans, il faut donc réaliser une vidange de la boîte de vitesses pour ne pas répandre de l'huile partout.
- Retire des deux côtés les agrafes de maintien de garde-boues avant à l'aide d'une fourche, puis retire les garde-boues.
- A l'aide d'un cliquet et d'une douille de 30 dévisse l'écrou du moyeu des deux côtés du véhicule.
- Il est nécessaire après de retirer les deux rotules de triangle de suspension et les deux rotules de direction et au niveau de passage de roue de retirer le flexible du capteur ABS de ses différents logements afin de pouvoir retirer le cardan.

(Tu peux maintenant retirer le cardan de le porte fusée)

- Pour côté conducteur, tu peux retirer le cardan en faisant levier au niveau de la boîte de vitesses et pour côté passager il est nécessaire de dévisser la vis du palier de transmission à l'aide d'une clé plate de 13 pour pouvoir retirer le cardan.
- Il va être nécessaire de descendre le moteur afin de retirer la boîte de vitesses, donc retire le berceau et à l'aide du cliquet et d'une douille de 18 dévisse les deux vis qui maintiennent le demi berceau.
- A l'aide du cliquet et d'une douille de 13, dévisse de chaque côté le boulon qui relie le berceau au demi berceau.
- Pour côté conducteur à l'aide des mêmes outils, retire les deux vis qui relient la plaque métallique au demi-berceau, puis retire ce dernier et finalise le retrait de la plaque métallique.
- Dévisse les trois vis du support moteur anti-basculement à l'aide d'une douille de 18 puis retire le.

- A l'aide d'une clé plate de 13 dévisse les trois vis qui maintient la béquille du catalyseur côté volant moteur puis retire-la.
- A l'aide d'une clé plate de 13, retire le boulon qui maintient la boîte de vitesses au bloc moteur puis retire les quatre vis qui maintient le carter au volant moteur.

(Il est nécessaire de venir en appui avec un cric au niveau du carter pour soutenir le moteur lors du retrait du support moteur côté boîte de vitesses)

- A l'aide d'une douille de 16, commence par dévisser la vis centrale du tampon de boîte de vitesses puis dévisse à l'aide des mêmes outils les trois vis qui maintient le support pendulaire de la boîte de vitesses.
- Abaisse ensuite de quelques centimètres le moteur en vérifiant qu'il ne tire sur aucun élément lors de sa descente puis retire le support pendulaire.
- Il faut maintenant retirer le capuchon de la purge du circuit d'embrayage, puis soulève les deux agrafes du récepteur d'embrayage à l'aide d'un tournevis plat.
- Retire le récepteur d'embrayage.

(Tu peux installer le capuchon de purge sur le récepteur d'embrayage pour éviter que le liquide de frein ne se répande)

- Retire le capteur de marche arrière en soulevant la languette à l'aide d'un tournevis plat et en tirant sur la connectique.
- A l'aide d'un tournevis plat, débranche le capteur de vitesse puis déclipse la gaine électrique de la boîte de vitesses.
- A l'aide d'un ticket, d'une rallonge et d'une douille de 13 dévisse la vis qui maintient la masse au moteur et les deux vis du démarreur puis retire les.

- A l'aide d'un tournevis plat, écarte le démarreur de la boîte de vitesses car la pige de centrage peut rendre difficile la séparation des deux blocs.
- Retire maintenant les trois autres vis avec la douille de 13 et une douille Torx 30.

(La boîte de vitesses est maintenant libre)



Figure III.1 : Dépose de la boîte vitesses [43]

(Dans certains véhicules il peut être nécessaire de décaler la boîte de vitesses plutôt que de la déposer complètement)

III.3.2.2. Dépose du kit :

III.3.2.2.1. Disque et mécanisme de pression :

- A l'aide d'un cliquet, d'une douille de dix, retire les 6 vis qui maintiennent le mécanisme et le disque sur le volant moteur puis retire les pour vérifier leurs états et s'ils ne nécessitent pas un changement nettoie la surface plate de la cloche d'embrayage (mécanisme de pression) qui est en contact avec le disque avec du nettoyant frein et un chiffon



Figure III.2 : Enlèvement des composants [44]

(Dans certains cas il est primordial de changer le volant moteur en même temps que l'embrayage)

III.3.2.2.2. Volant moteur :

- Dévisse le volant moteur à l'aide d'une clé à chocs.
- Mets en place le long goujon qui lie la boîte de vitesse au bloc moteur puis revisse de quelques filets une des vis de la cloche d'embrayage et installe une clé plate à œillets sur ses deux éléments pour bloquer le volant moteur.
- A l'aide d'un cliquet et d'une douille de 17 dévisse les 7 vis de la platine de maintien du volant moteur et retire-la puis dépose le volant et vérifie son état

III.3.2.2.3. Butée :

- A l'aide d'un cliquet d'une douille de 10, dévisse les deux vis de la butée d'embrayage puis retire-la.



Figure III.3 : Dépose de la butée [44]

III.3.3. REMONTAGE :**III.3.3.1. Repose du kit :****III.3.3.1.1. Volant moteur :**

- Met en place le volant moteur avec des vis neuves puis réitère la technique de blocage de l'autre côté et revisse ces vis et après effectue un serrage en quinconce de 55 N.m à la clé dynamométrique.

(Il est nécessaire de nettoyer les deux surfaces de contact du volant moteur avec du nettoyant frein et un chiffon)

III.3.3.1.2. Disque et mécanisme de pression :

- Met en place le disque en positionnant la partie avec les ressorts dans la cloche.
- Munis-toi d'un centreur d'embrayage et vérifie que les composants sont parfaitement alignés.



Figure III.4 : Embrayage centré [45]

- Tu peux visualiser trois tétons de centrage pour la mise en place de l'embrayage sur le volant moteur.
- Munis-toi du montage et installe-le sur le volant moteur en utilisant des vis neuves puis effectue un serrage en quinconce de 15 N.m avec la clé dynamométrique et n'oublie pas de retirer l'outil de centrage.



Figure III.5 : Revissage du disque et mécanisme [44]

III.3.3.1.3. *Butée :*

- Il est nécessaire de nettoyer l'arbre primaire avec du nettoyant frein et un chiffon, puis graisser le guide de butée ainsi que les cannelures de l'arbre primaire avec un peu de graisse pour engrenages.
- Mets en place une nouvelle butée sur l'arbre primaire et revisse-la et finalise avec un serrage de 21 N.m à la clé dynamométrique.

III.3.3.2. *Repose du boîte vitesses :*

- Remets la boîte de vitesses à sa place en enfilant l'arbre primaire dans l'empreinte du disque d'embrayage.
- Réalise un serrage très léger et vérifie que la boîte de vitesses vient en appui contre le bloc moteur.
- Réemboîte le démarreur dans son emplacement, puis revisse les deux vis de maintien et la vis Torx et finalise avec un serrage de 44 N.m à la clé dynamométrique.
- Remet en place le support pendulaire de la boîte de vitesses et revisse-le à la main.
- Soulève le bloc moteur à l'aide du cric et fais passer la vitesse verticale du support pendulaire dans le tampon de boîte de vitesses puis revisse les vis et finalise-les avec un serrage de 62 N.m à la clé dynamométrique.
- Retire le cric puis revisse les 4 vis de carter avec un couple de serrage qui égale 44 N.m et revisse aussi le boulon qui maintient la boîte de vitesses au bloc moteur avec un couple de 105 N.m.
- Remet en place la béquille du catalyseur et revisse-la avec un couple de 21 N.m.
- Remet en place le support moteur anti-basculement et revisse les trois vis avec un couple de 105 N.m.
- Révisse la masse sur le bloc moteur.

(Tu dois maintenant purger ton circuit d'embrayage)

- Au niveau de récepteur d'embrayage retire le bouchon plastique de la nouvelle butée et réinsère la durite dans le récepteur d'embrayage.
- Ajoute du liquide de frein dans le réservoir et enlève le bouchon de purge sur le récepteur d'embrayage puis enfile un tuyau en plastique plongé dans une bouteille sur le purgeur.

(Cette manipulation nécessite deux personnes)

- Le système d'embrayage étant complètement désamorcé, la pédale va être molle donc il faut commencer par pomper à la main sur la pédale puis maintien-la complètement enfoncé.



Figure III.6 : Pédale enfoncée par main [45]

- Soulève uniquement la première agrafe ce qui va te permettre de tirer sur la durite sans qu'elle se déconnecte complètement, mais juste assez pour laisser la pression s'échapper au niveau du purgeur.
- Tu remets ensuite en place la durite et tu rabaisse l'agrafe et relâche la pédale.

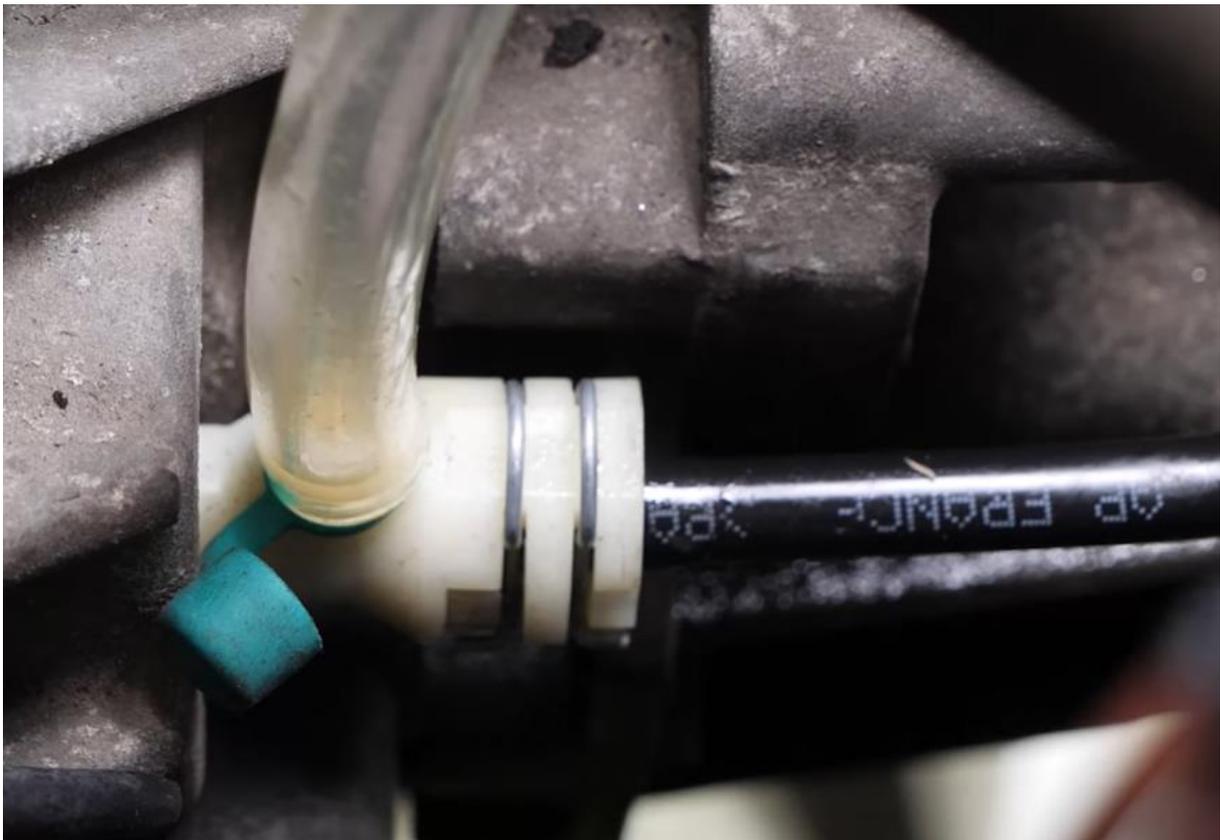


Figure III.7 : Durite et agrafe en place [45]

(Tu peux refaire la même manipulation de purge entre cinq et dix fois jusqu'à qu'il n'y ait plus d'air qui s'échappe du purgeur)

- Maintenant retire le tuyau à l'aide d'une pince à bec plat et refermes le capuchon du purger et n'oublies pas de réajuster ton niveau de liquide de frein.



Figure III.8 : Ajout du liquide de frein [45]

- Rebranche la connectique du capteur de marche arrière puis celle du capteur de vitesse et reclipse la gaine électrique.
- Ré-emboîte le cardan côté boîte de vitesses puis réinsère le dans la porte fusée et fais de même avec le cardan côté passager.
- Remets-le en place et revisse le palier de transmission avec un couple de 44 N.m.
- Remet en place les rotules de triangles dans les portes-fusées puis revisse-les avec un couple de 62 N.m.

- Remet en place les rotules de direction dans les portes fusées, puis revise-les avec un couple de 37 N.m.
- Remet en place les écrous de moyeu et avant de les revisser, bloque la rotation du disque en insérant un tournevis plat assez fin pour qu'il rentre entre les deux parois du disque.
- Maintenant revise les écrous avec un couple de 280 N.m et reclipse le flexible du capteur ABS dans son logement.



Figure III.9 : Réinstallation du demi-berceau [45]

- Remets le demi-berceau et ré-emboîte le au niveau du berceau et maintiens la partie d'avant avec un cric afin de pouvoir ré-emboîter les silent blocs du radiateur dans ce dernier puis soulève minutieusement jusqu'à emboîter le radiateur sur la partie haute.

- Revise les deux vis de maintien du demi berceau avec un couple de 105 N.m puis revise les deux écrous au niveau du berceau avec un couple de 21 N.m.
- Remets en place la plaque métallique puis revise- la avec un couple de 62 N.m.
- Remets en place les garde boue.

(Il est maintenant nécessaire de remettre de l'huile dans la boîte de vitesse)

- Remets en place les roues de ton véhicule et le reposer au sol puis ré-emboite les commandes de vitesses dans leurs emplacements et les rotules aussi.
- Reclipe le reniflard de boîte de vitesses et remets en place la boîte à air.



Figure III.10 : Réinstallation de la boîte à air [45]

- Remets en place la première partie du conduit d'admission d'air et le bac à batterie puis revisse-le avec un couple de 21 N.m.
- Revisse le collier de serrage du conduit d'air sur la boîte à air puis remets en place le capteur de pression d'air du turbo et rebranche le débitmètre d'air.
- Reverrouille les trois connectiques du calculateur et revisse l'écrou de la gaine électrique.
- Remets en place la seconde partie du conduit d'admission d'air et reclipse-la et finalement remet en place la batterie.



Figure III.11 : Maintenance terminée [45]

III.3.4. TEST :

Pour assurer le bon fonctionnement du nouvel embrayage, il est impératif de démarrer le véhicule et effectuer un court trajet, en passant par les différentes vitesses et en observant tout signe de vibrations, de bruits ou de glissement anormal.



Figure III.12 : Test routier [43]

III.4. Conclusion :

L'embrayage en tant que composant critique, requiert une attention particulière et un processus de maintenance régulier qui nécessite des outils appropriés

Donc peu importe que vous soyez un conducteur soucieux de la performance de votre véhicule ou un professionnel de l'automobile cherchant à offrir un service de qualité à vos clients, ce guide vous fournira les connaissances nécessaires et les étapes détaillées pour entretenir et maintenir les embrayages de manière optimale contribuant ainsi à prévenir les pannes soudaines et coûteuses, tout en assurant une conduite fluide et sans à-coups.

Chapitre 04 :

Approche avancée pour l'analyse du glissement de la garniture
d'embrayage : Conception, simulation, calculs et résultats

IV.1. Introduction :

L'avancée des technologies de simulation numérique a révolutionné le domaine de l'ingénierie mécanique en offrant aux ingénieurs des outils puissants pour l'analyse, la conception et l'optimisation des systèmes mécaniques. La simulation permet d'explorer virtuellement le comportement d'un système avant sa fabrication physique, ce qui permet d'économiser du temps, des coûts et des ressources, tout en améliorant l'efficacité et la fiabilité des conceptions.

Le chapitre présent vise à explorer en détail la modélisation, la simulation et l'analyse du kit d'embrayage, un composant essentiel des systèmes de transmission de puissance des véhicules, grâce à des logiciels de pointe tels que SolidWorks et ANSYS Workbench v16.2 dans des conditions réalistes, tout en explorant différents scénarios de fonctionnement.

Enfin, les résultats obtenus sont présentés sous forme d'analyses détaillées. Ces données permettent de mieux comprendre le comportement de la garniture d'embrayage, d'identifier les éventuels problèmes ou limitations, et d'optimiser sa conception et ses performances.

IV.2. Conception et réalisation :

Dans notre cas, il s'agit de concevoir un kit d'embrayage composé d'un plateau de pression et un disque qui comporte un moyeu cannelé et un volant moteur avec deux garnitures de friction en utilisant le logiciel Solidworks.

Les caractéristiques géométriques de ces composant en question sont données dans le tableau IV.1.

Disque embrayage	Diamètre extérieur	310mm
	Diamètre intérieur	175mm
	Epaisseur	10mm
Moyeu cannelé	Diamètre extérieur	55mm
	Hauteur	45mm
	Nombre de dents	10dents
	Diamètre extérieur des dents	45mm
	Diamètre intérieur des dents	36mm
Garnitures	Diamètre extérieur	310mm
	Diamètre intérieur	175mm
	Epaisseur	4mm
Volant moteur	Diamètre extérieur	310mm
	Diamètre intérieur	175mm
	Epaisseur	18mm
Plateau de pression	Diamètre extérieur	310mm
	Diamètre intérieur	175mm
	Epaisseur	18mm

Tableau IV.1 : Caractéristiques géométriques du kit d'embrayage

IV.2.1. PRESENTATION DU LOGICIEL « SOLIDWORKS » :

SolidWorks est un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) utilisé principalement dans le domaine de l'ingénierie mécanique et de la conception de produits. Il permet aux ingénieurs et concepteurs de créer des modèles 3D précis et détaillés de pièces et d'assemblages, de réaliser des simulations, d'effectuer des tests virtuels, de générer des dessins techniques et d'interagir avec d'autres logiciels de fabrication. SolidWorks offre une interface conviviale, des fonctionnalités avancées de modélisation et d'assemblage, ainsi que des outils de visualisation et de documentation pour faciliter le processus de conception et de fabrication.

Dans les figures ci-dessous sont présentées les réalisations des composants requis puis leur assemblage en utilisant des garnitures lisses et striées :

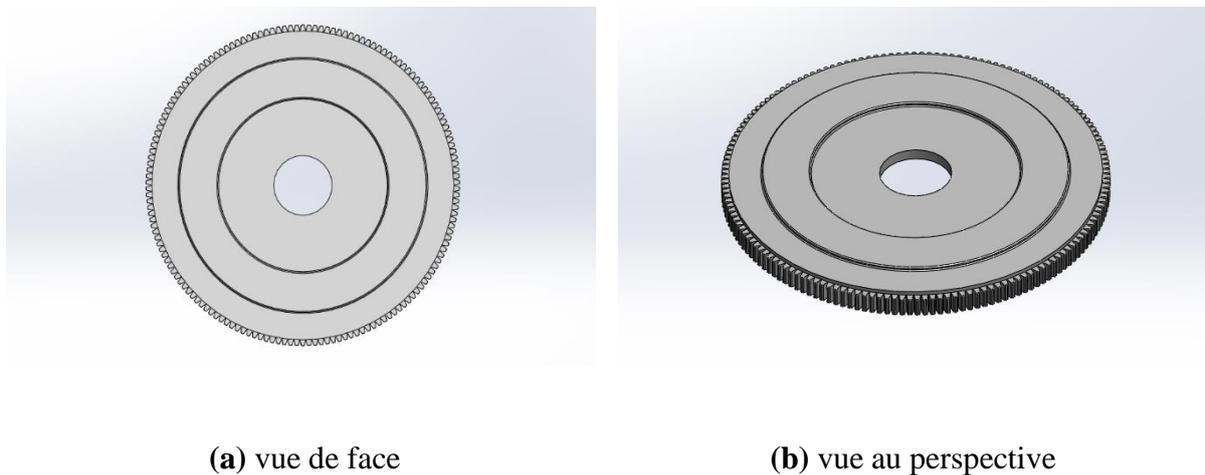


Figure IV.1 : Modèle CAO du volant moteur

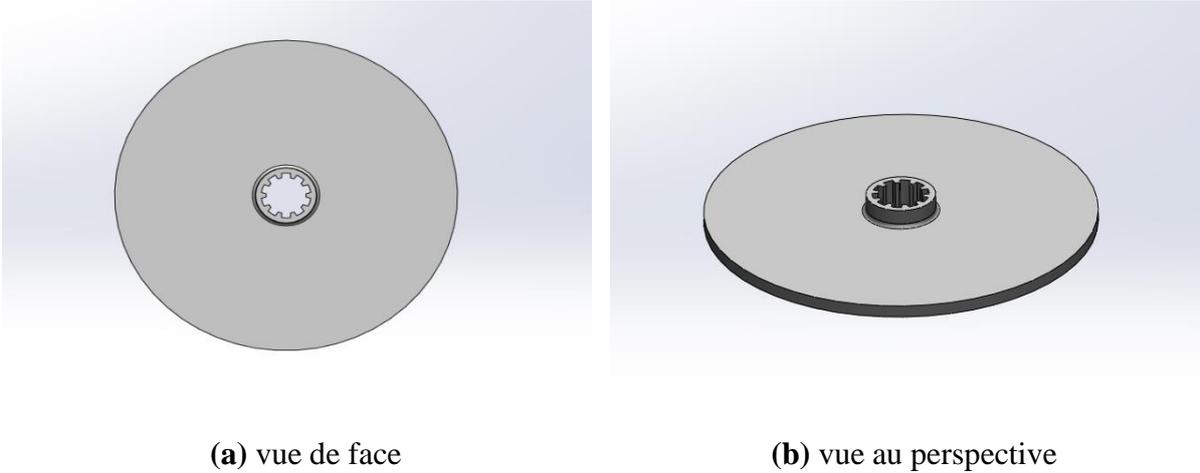


Figure IV.2 : Modèle CAO du disque d'embrayage avec moyeu cannelé

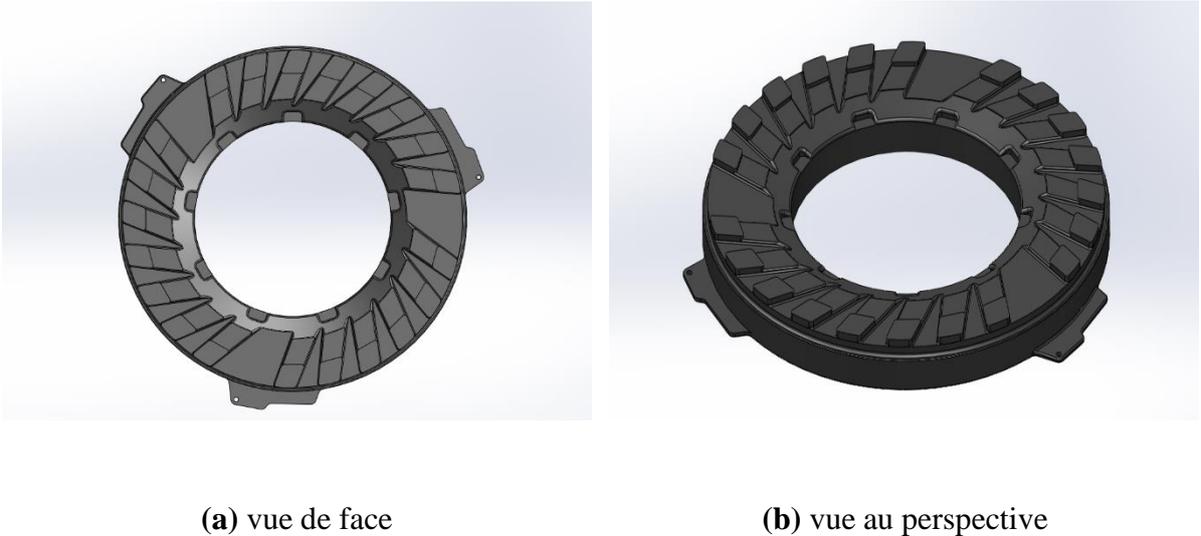
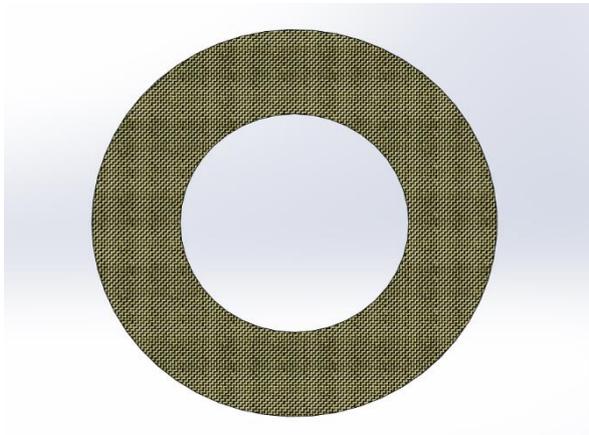
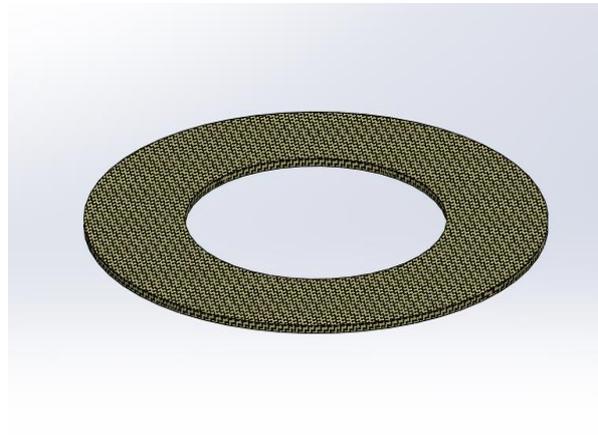


Figure IV.3 : Modèle CAO du plateau de pression



(a) vue de face

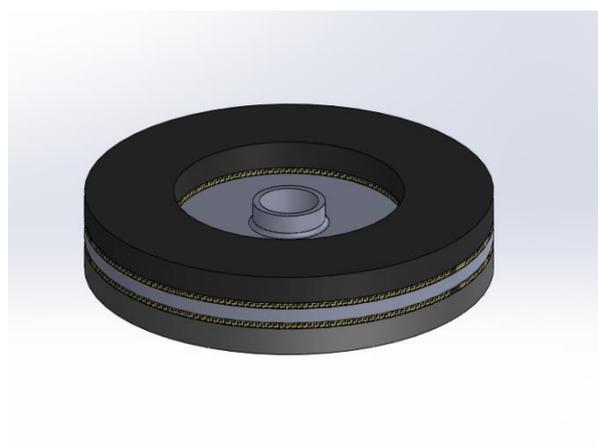


(b) vue au perspective

Figure IV.4 : Modèle CAO d'une garniture lisse



(a) assemblage initial



(b) assemblage simplifié

Figure IV.5 : Deux types d'assemblage

IV.3. Simulation et modélisation :

IV.3.1. *PRESENTATION DU LOGICIEL « ANSYS WORKBENCH V16.2 » :*

ANSYS Workbench v16.2 est un environnement de développement intégré et un logiciel de simulation numérique avancé utilisé dans le domaine de l'ingénierie qui était développé par ANSYS Inc., une entreprise renommée spécialisée dans les logiciels de simulation.

Il offre une interface utilisateur conviviale et un ensemble d'outils puissants pour la modélisation, la simulation et l'analyse de divers problèmes d'ingénierie en utilisant des méthodes de calcul basées sur les éléments finis. Il permet aux ingénieurs et aux chercheurs de concevoir, tester et optimiser des produits et des systèmes avant leur fabrication, réduisant ainsi les coûts et les délais de développement.

Le logiciel offre également une approche intégrée et complète de la simulation numérique et des fonctionnalités avancées telles que l'optimisation de conception, l'analyse paramétrique, la co-simulation avec d'autres logiciels, la visualisation des données et la génération de rapports, aidant les ingénieurs à prendre des décisions éclairées et à améliorer la qualité et la fiabilité de leurs produits.

IV.3.2. *SPECIFICATION D'ETUDE :*

Dans cette partie, la simulation numérique et le calcul éléments finis de la tenue mécanique de l'ensemble disque embrayage ont été fait par le logiciel ANSYS Workbench V16.2.

IV.3.2.1. *Géométrie :*

Une fois la conception et la réalisation sur Solidworks est finie, on fonce sur la simulation numérique après l'importation de l'assemblage des composants comme il est présenté ci-dessous :

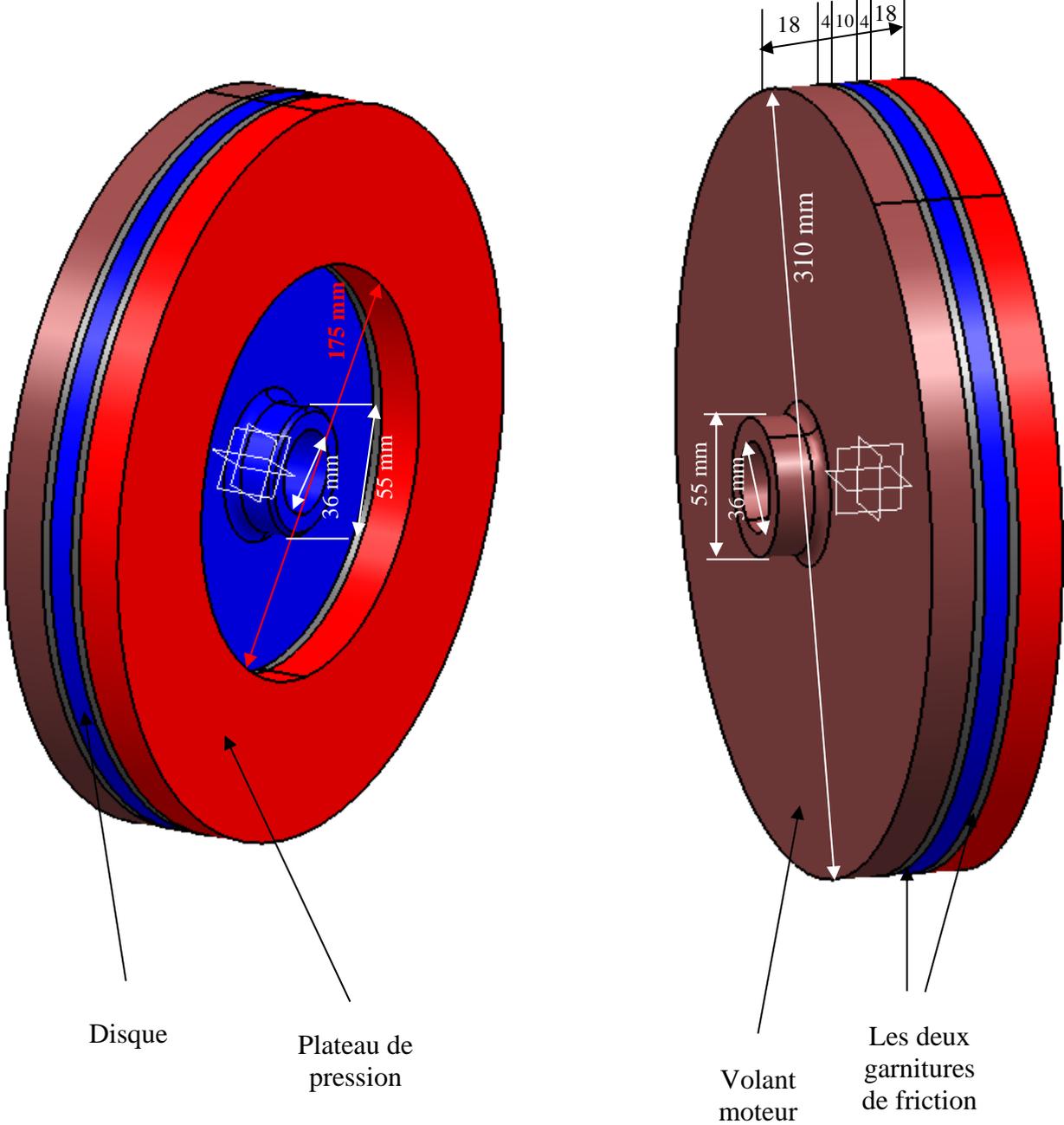


Figure IV.6 : Géométrie de l'ensemble étudié (dimensions en mm)

IV.3.2.2. *Matériaux :*

Les éléments du disque d'embrayage	Matériau	Désignation & Composition	Module de Young (MPa)	Coefficient du poisson	Limite d'élasticité (MPa)	Densité (kg/m ³)	Conductivité thermique (W/mK)
Volant moteur	Acier [46-47]	ASTM A615-60 (60ksi)	200000	0,33	420	7850	54
	Fonte à graphite sphéroïdale ou nodulaire [48-49]	GJS-400-15	173000	0,28	220-470	7300	36,2 à 300°C
Plateau de pression	Acier à haute teneur en carbone C > 0,8% [50]	AISI 1065	13800-235000 (200000)	0,28-0,31 (0,3)	275 - 3340 (490)	451-8260 (7850)	19-52 (49,8)
	Fonte Grise [51-53]	EN-GLJ-300 Fe/3.0C/1.7Si/1.1Ni/0.6Mn/0.5Cr/0.2P/0.12S	135000	0,26	En traction 260 En compression 827	7250	45 à 300°C
Disque	Acier [54]	AISI 4142	206000	0,29	966	7850	42,6
Les deux garnitures de friction	Ferodo [55-57]	Matériau composite à composition organique (céramique, carbone, cuivre, kevlar, verre, etc.) (fritté, brasé ou moulé)	E _{comp} =122 E _{trac} =35	0,2	2,5 (en compression)	2320	0,57

Tableau IV.2 : Caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés en étude

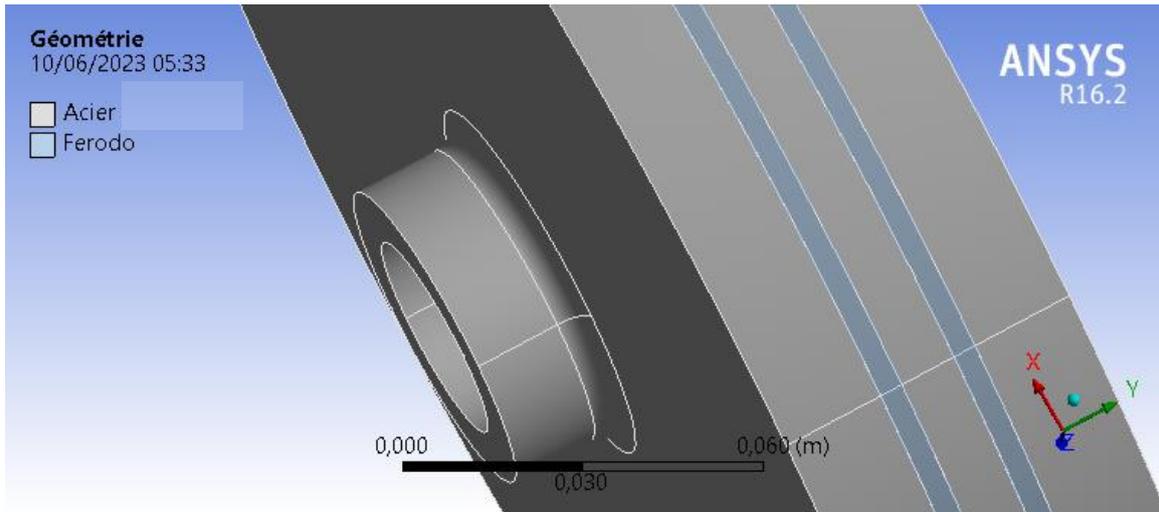


Figure IV.7 : Codage des matériaux sur la géométrie

- Pour le Ferodo :

Max. pression de contact	$P = 800 \text{ N/cm}^2$
Max. vitesse de frottement	$V = 30 \text{ m/s}$
Max. température en continu	$T = 350 \text{ °C}$
Max. température instantanée	$T = 800 \text{ °C}$
Min. résistance au cisaillement	2,5 MPa

Tableau IV.3 : Conditions de fonctionnement du Ferodo

IV.3.2.3. Système des axes :

On utilise le système des coordonnées cylindriques (UZ, R et θ_y)

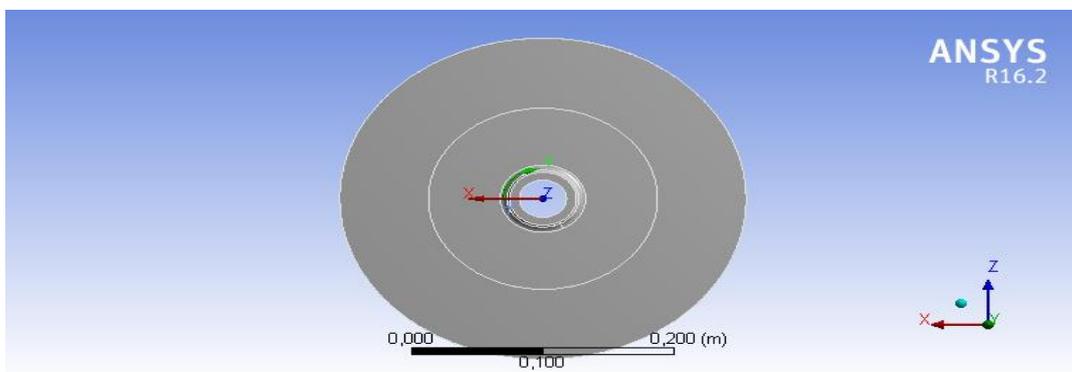


Figure IV.8 : Repérage des coordonnées cylindriques sur l'assemblage

IV.3.2.4. Conditions des contacts :

Le coefficient du frottement entre acier/ferodo (volant moteur/garniture de friction ou plateau de pression/garniture de friction) se trouve entre 0,3 et 0,55. Nous choisissons alors un coefficient de frottement de 0,4.

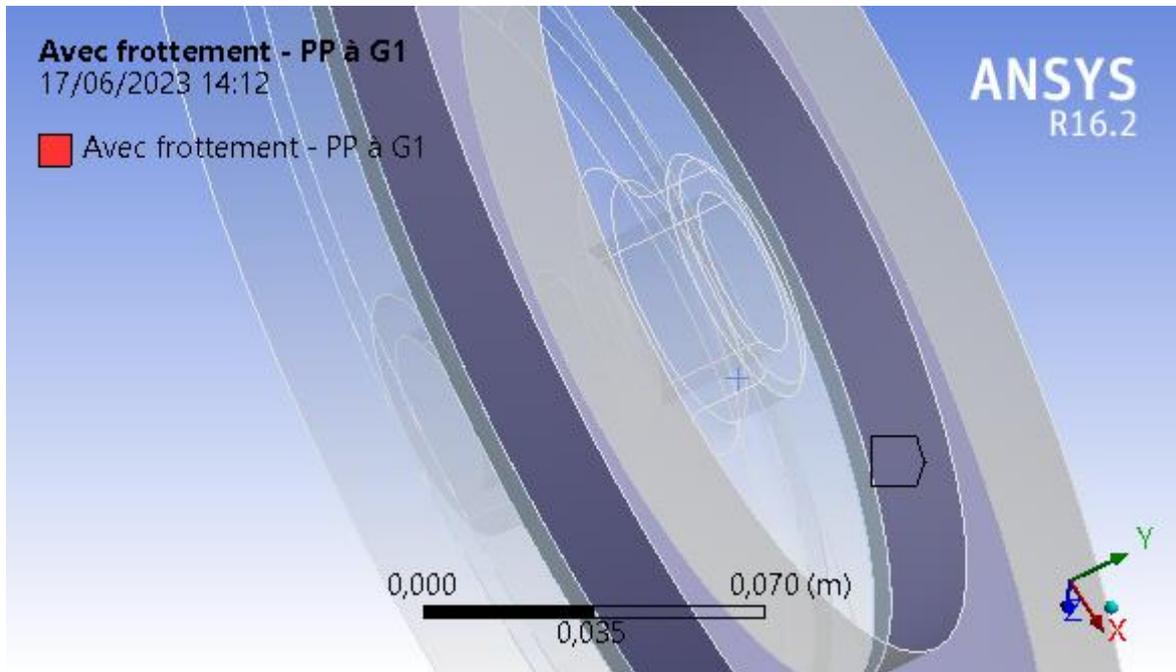


Figure IV.9 : Contact avec frottement du plateau de pression PP- garniture G1

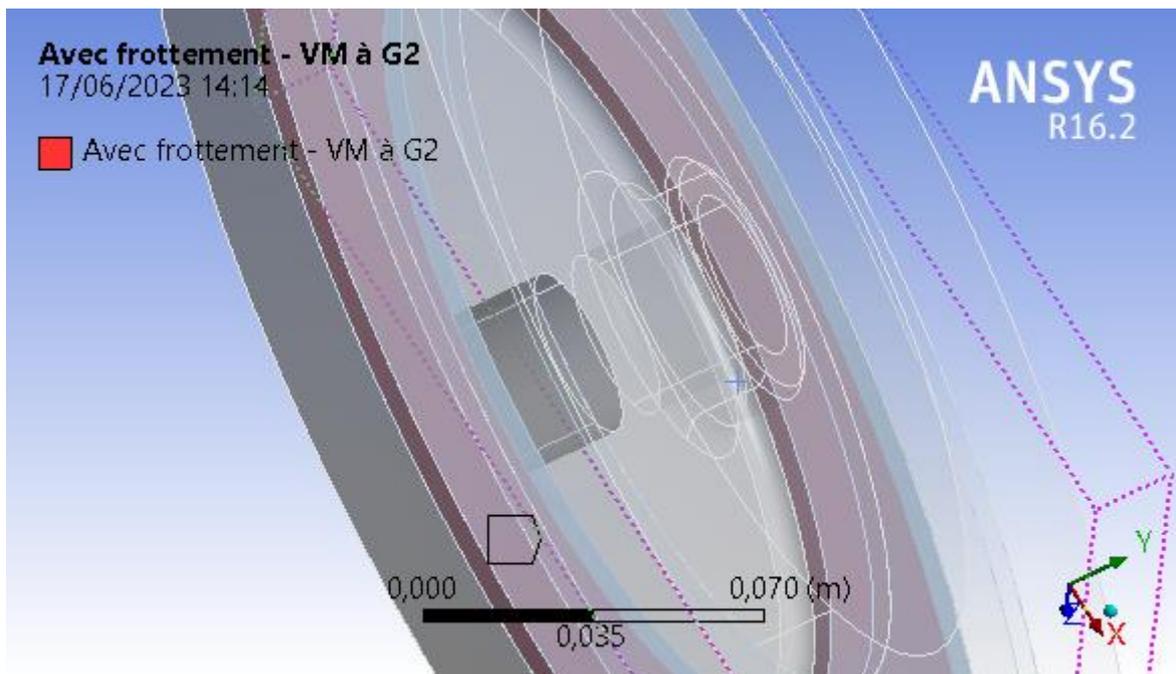


Figure IV.10 : Contact avec frottement du volant moteur VM- garniture G2

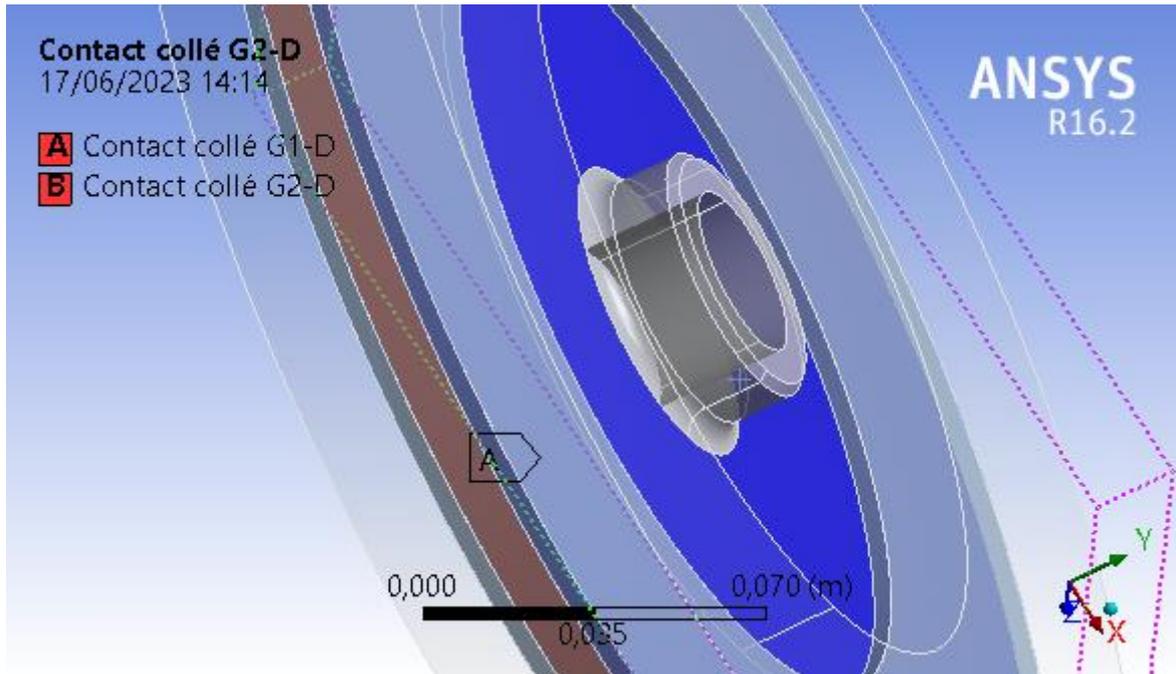


Figure IV.11 : Contact collé des deux garnitures G1/G2 avec disque D

Le comportement du contact est contrôlé par le programme de calcul, il peut être soit symétrique ou asymétrique (rigide/flexible ou l'inverse sinon rigide/rigide ou flexible/flexible).

IV.3.2.5. *Maillage :*

Les surfaces de contact sont maillées en utilisant les éléments TARGE170 et CONTA174, avec un maillage de dimensionnement moyen appliqué à l'aide de la méthode à dominance hexaédrique sans recourir à un raffinement des surfaces de contact.

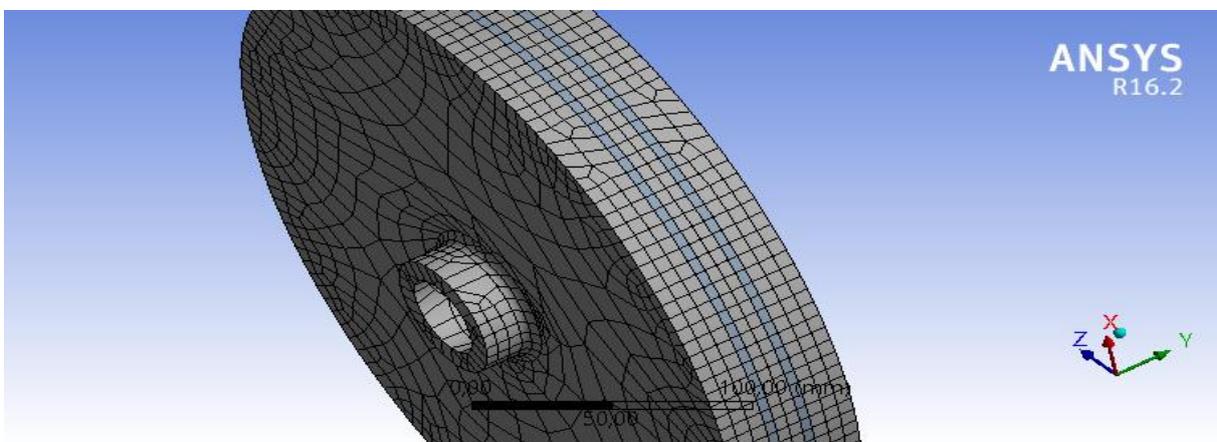


Figure IV.12 : Géométrie maillée

- Nombre des nœuds = 55109.
- Nombre des éléments = 16924.

Les éléments quadratiques utilisés dans le maillage sont de type hexaédrique SOLID186, leurs degrés de liberté sont trois translations et trois rotations.

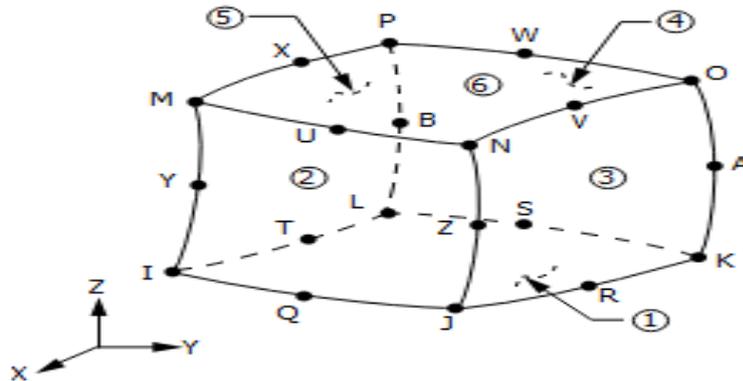


Figure IV.13 : Elément Solid186 de volume cubique ou hexaédrique à 20 nœuds

IV.3.2.6. Conditions aux limites :

Le calcul se fait en deux steps :

- 1^{er} step : on applique une pression de $P = 2\text{MPa}$ au plateau de pression.
- 2^{ème} step : on bloque ce plateau (pour simuler le cas d'un moteur qui cale) et on applique une rotation au volant moteur $\theta_y = 40^\circ$.

Nous analysons par la suite les contraintes équivalentes générées aux niveaux de toutes les pièces.

IV.3.2.6.1. Pour Step1 et Step2 :

a) Blocage suivant le rayon R et condition de type libre suivant l'axe Z et autour de l'axe Y :

Cette condition concerne les pièces : les deux garnitures G1/G2 et le disque D.

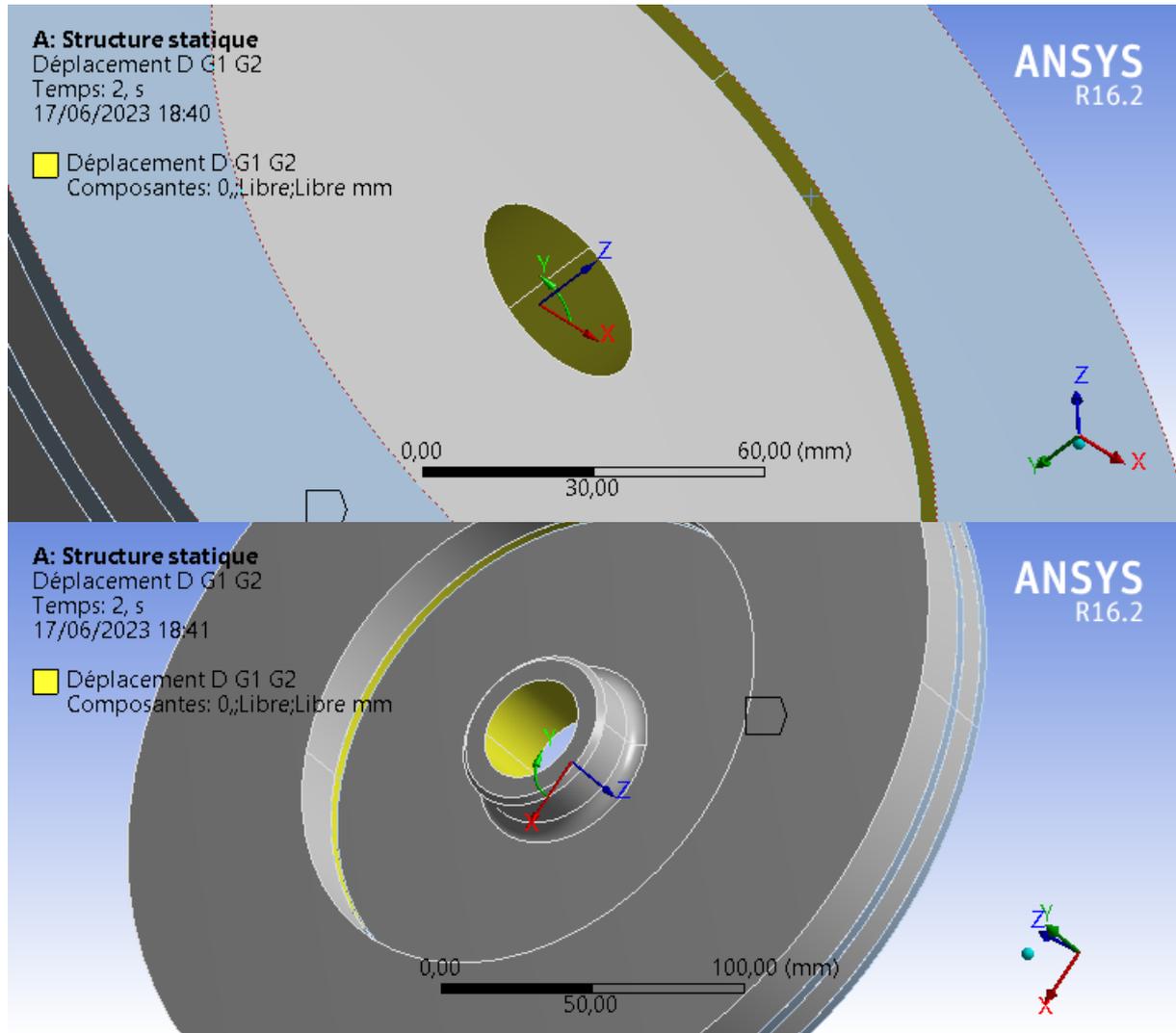


Figure IV.14 : Application des conditions sur les deux garnitures G1/G2 et le disque D

- b) Blocage suivant le rayon R et autour de l'axe Y et condition de type libre suivant l'axe Z pour le plateau de pression PP :

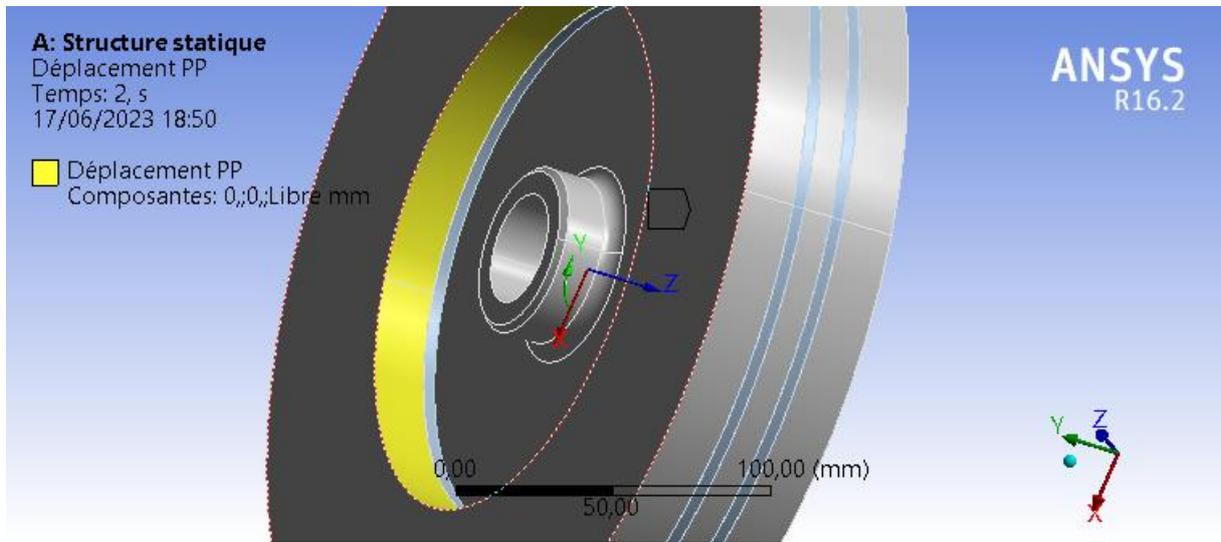


Figure IV.15 : Application des conditions sur le plateau PP

- c) Blocage suivant le rayon R et suivant l'axe Z et condition de type libre suivant autour de l'axe Y du volant moteur VM :

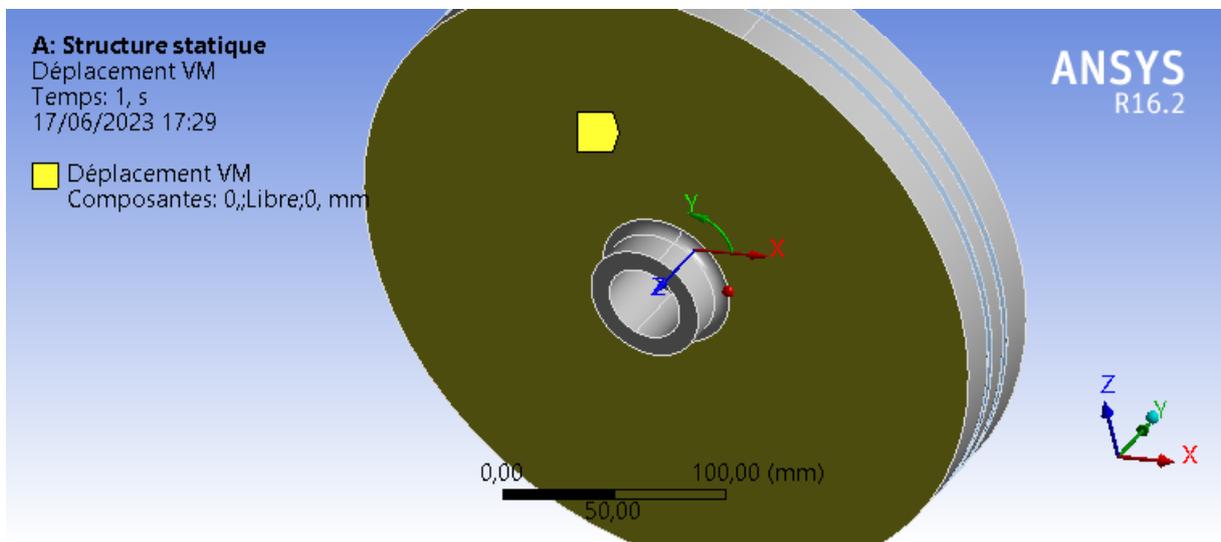


Figure IV.16 : Application des conditions sur le volant moteur VM

d) Application de la pression $P = 2\text{MPa}$ au niveau du plateau de pression PP :

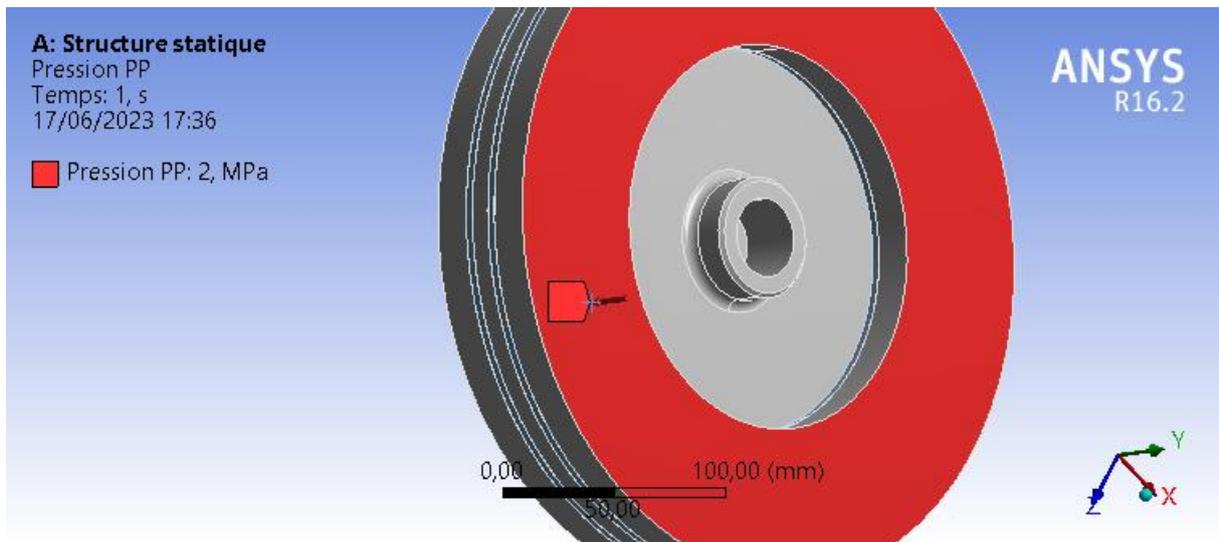


Figure IV.17 : Application de pression sur le plateau PP

IV.3.2.6.2. Pour Step2 :

On garde toutes les conditions aux limites du Step1. Puis on applique :

a) Rotation du volant moteur autour de l'axe Y ($\theta_y = 40^\circ = 0,7$ radian ou $Y = R * \theta_y = 27,5 * 0,7 = 19,25$ mm) :

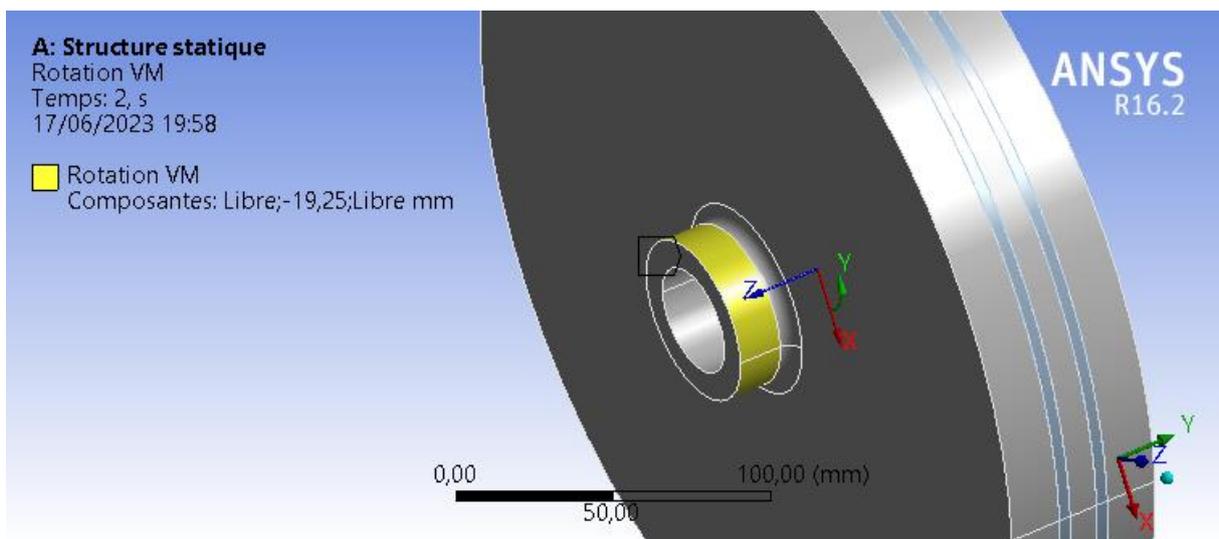
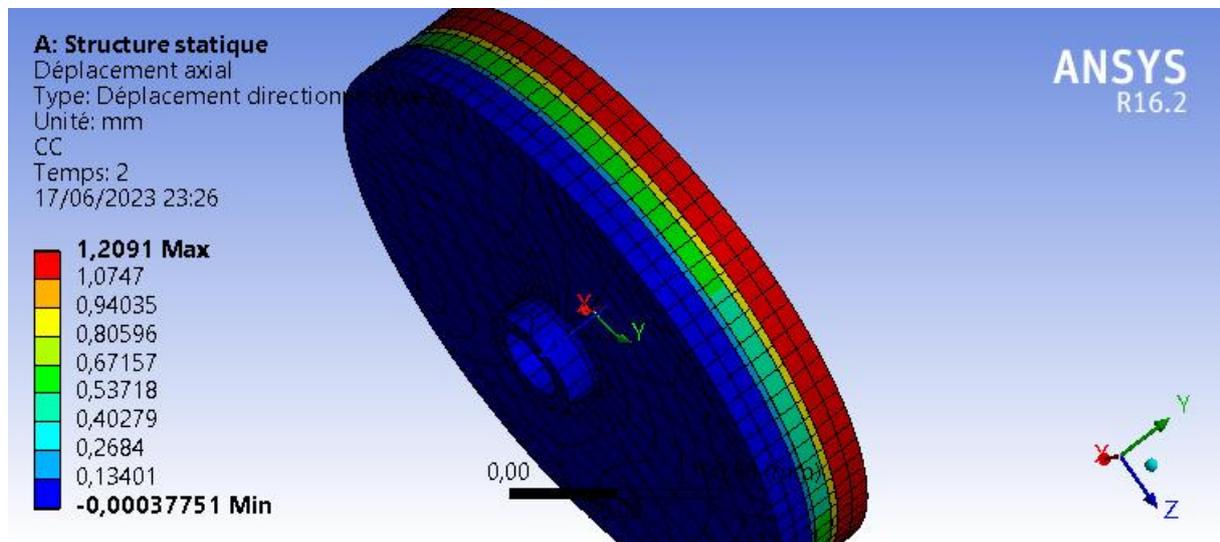


Figure IV.18 : Application de rotation sur le volant moteur VM

IV.3.2.7. Paramètres de solution (les réglages de l'analyse) :

- Le calcul se fait en statique avec un temps de 1s avec deux steps et sans l'activation des grands déplacements.
- Programme de résolution du système des équations non linéaires est la méthode itérative Newton-Raphson accouplée au programme du gradient conjugué préconditionné PGCP.
- Les critères de convergence en force et en déplacement ont été utilisés.
- La formulation du contact utilisé par le logiciel ANSYS Workbench est MPC.
- Le calcul a été fait sur un PC de 2Go de RAM et un processeur Intel Celeron possédant une vitesse de 2,16 GHz, le temps de calcul CPU est de 10 heures.

IV.4. Résultats et analyses :**a) Déplacement axial Uz :****Figure IV.19 :** Représentation visuelle du déplacement axial Uz

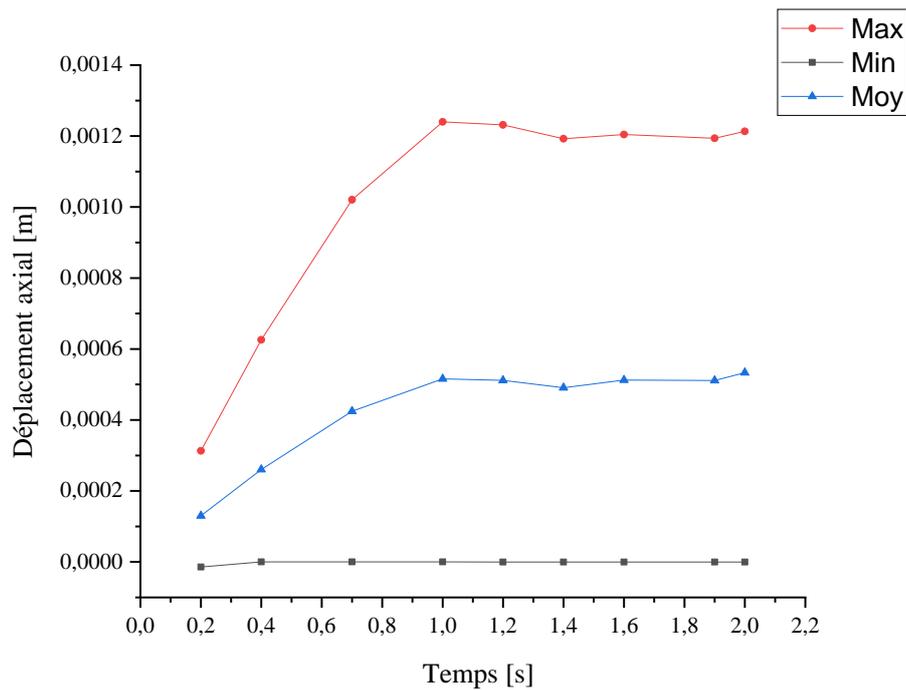


Figure IV.20 : Variation du déplacement axial U_z en fonction du temps

La figure présente les variations du déplacement axial U_z de notre géométrie au fil du temps, en mettant en évidence les courbes représentant les valeurs maximales, minimale et moyenne. Une observation importante est que la courbe des valeurs maximales montre une tendance constante à l'augmentation, ce qui suggère une augmentation progressive de la déformation maximale du système. De même, la courbe des valeurs minimales suit une tendance similaire, montrant une augmentation constante du déplacement axial minimal et pour la courbe des valeurs moyennes, elle présente une stabilité relative avec des variations limitées au fil du temps. Cela indique que bien que les valeurs maximales et minimales puissent fluctuer, la valeur moyenne du déplacement axial U_z reste relativement constante, ce qui suggère une certaine régularité dans le comportement du système. Cette stabilité peut être le résultat d'un équilibre entre différents facteurs qui influencent le déplacement axial.

b) Déplacement radial :

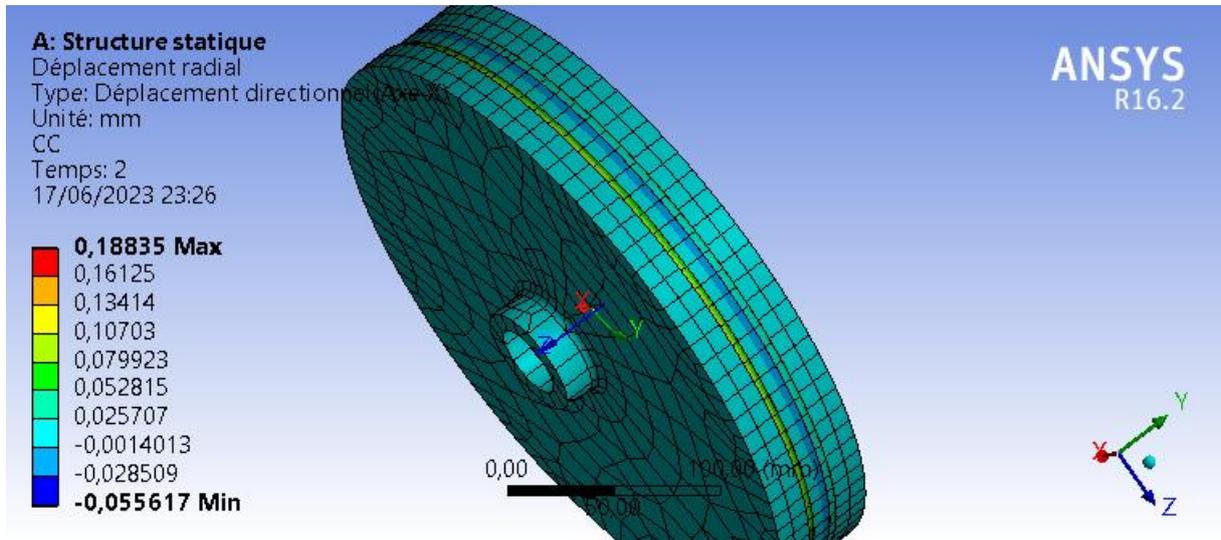


Figure IV.21 : Représentation visuelle du déplacement radial

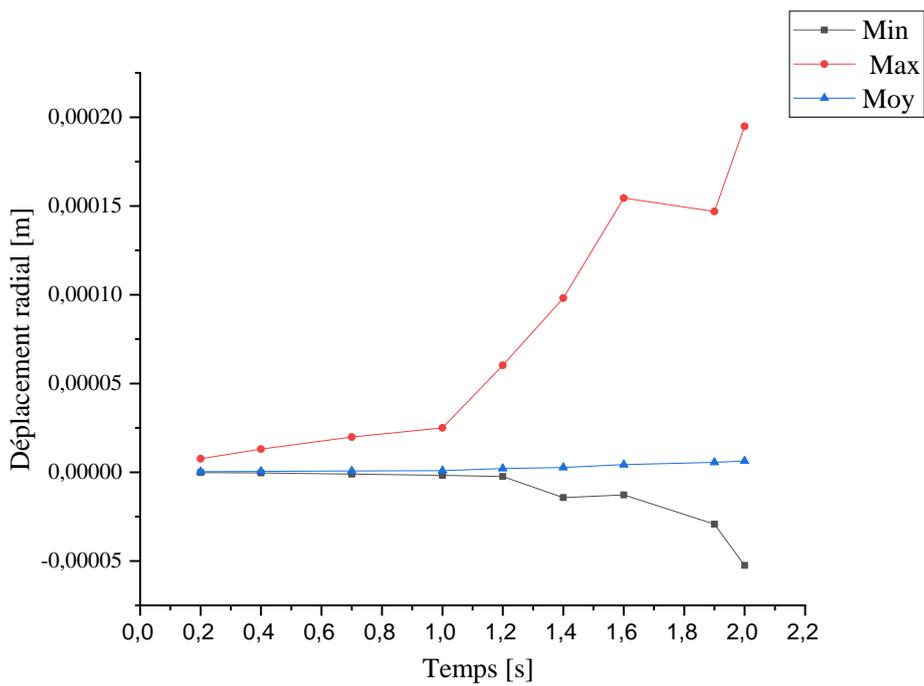


Figure IV.22 : Variation du déplacement radial en fonction du temps

La figure présente la variation du déplacement radial qui offre des informations importantes sur le comportement de la géométrie : La courbe des valeurs maximales montre une tendance constante à l'augmentation. Cela suggère une augmentation des contraintes ou des sollicitations sur le système dans la direction radiale. Une surveillance attentive de cette tendance est essentielle pour prévenir toute défaillance potentielle due à des valeurs maximales dépassant les limites de tolérance. La courbe des valeurs minimales présente une stabilité relative. Cela peut indiquer que la géométrie conserve une certaine capacité à maintenir des valeurs de déplacement radial minimales constantes malgré les variations dans les autres paramètres. Cette stabilité peut être le résultat d'une conception ou d'un réglage approprié du système d'embrayage. La courbe des valeurs moyennes montre une diminution progressive. Cette tendance indique une détérioration globale de la performance du système dans la direction radiale. Il est important d'analyser en détail les facteurs contribuant à cette diminution afin d'identifier les causes potentielles, telles que l'usure des composants, des ajustements inappropriés ou des contraintes excessives. Des mesures correctives doivent être envisagées pour maintenir ou améliorer la performance du système dans la direction radiale.

c) **Rotation angulaire :**

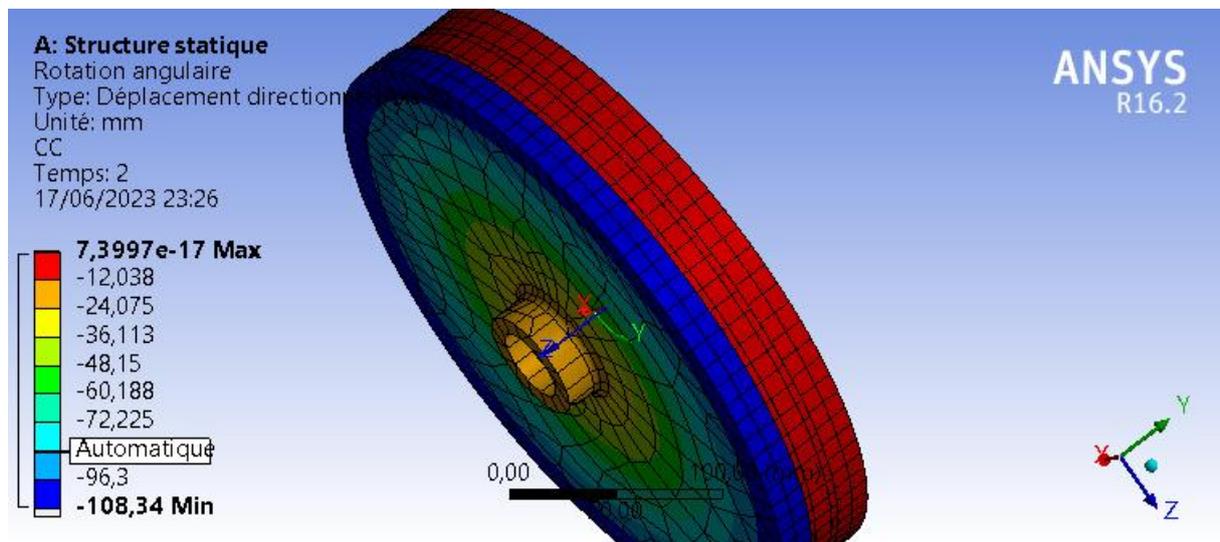


Figure IV.23 : Représentation visuelle des contraintes en rotation angulaire

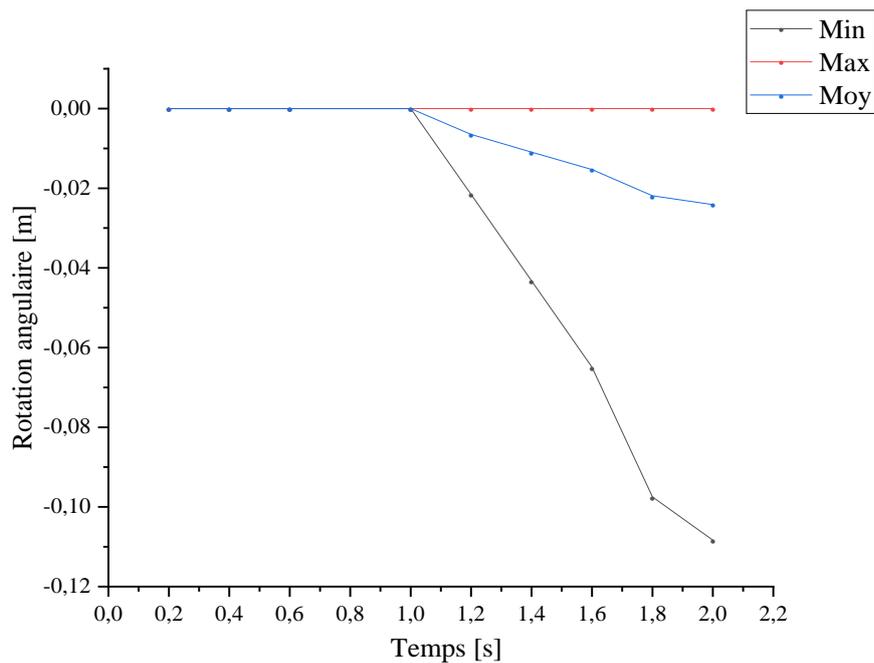


Figure IV.24 : Variation de la rotation angulaire en fonction du temps

L'analyse de ces courbes permet d'obtenir des informations importantes sur le comportement du système étudié : La courbe des valeurs maximales de la rotation angulaire reste stable et élevée tout au long de l'observation. Cela suggère que le système subit des rotations angulaires importantes, potentiellement en raison de forces ou de mouvements externes appliqués. Il est crucial de surveiller cette valeur maximale pour s'assurer qu'elle reste dans les limites acceptables et ne conduit pas à des contraintes excessives ou à une détérioration prématurée du système. La courbe des valeurs minimales montre une diminution significative après une phase de stabilisation. Cette tendance indique une perte progressive d'amplitude des mouvements angulaires dans le système, ce qui peut résulter de l'usure, du jeu excessif ou de contraintes non linéaires. Il est essentiel d'identifier les causes sous-jacentes de cette diminution et de prendre des mesures correctives appropriées pour maintenir la performance du système. La courbe des valeurs moyennes montre une stabilité initiale, suivie d'une légère diminution. Cette diminution peut être due à des phénomènes tels que des frottements internes, des pertes d'énergie ou des déformations mécaniques dans le système. Bien qu'une diminution légère puisse être tolérable, il est important d'examiner attentivement les facteurs contribuant à cette diminution pour éviter toute dégradation ultérieure de la performance du système.

d) Déformation équivalente :

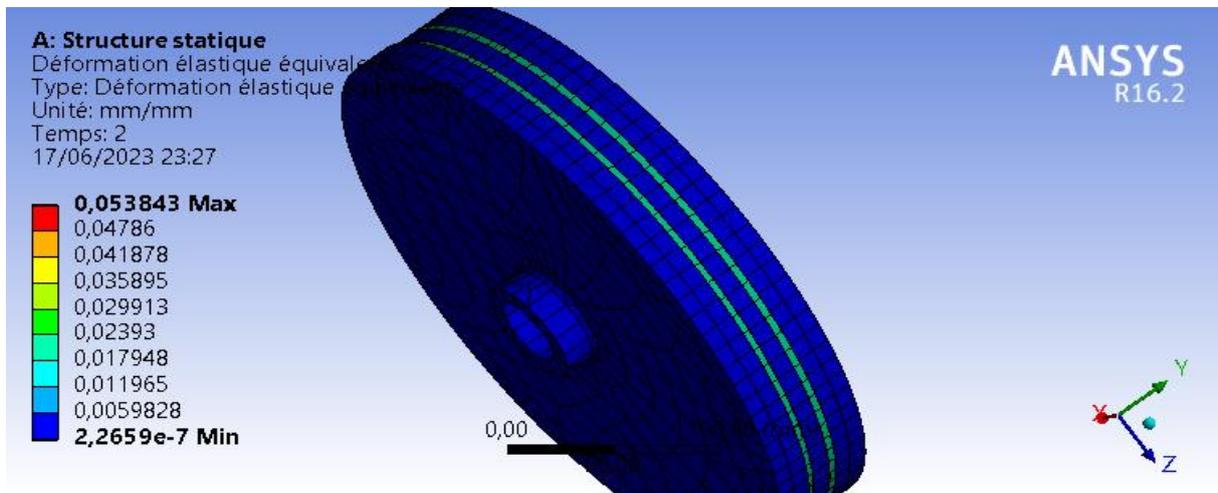


Figure IV.25 : Représentation visuelle de la déformation élastique équivalente

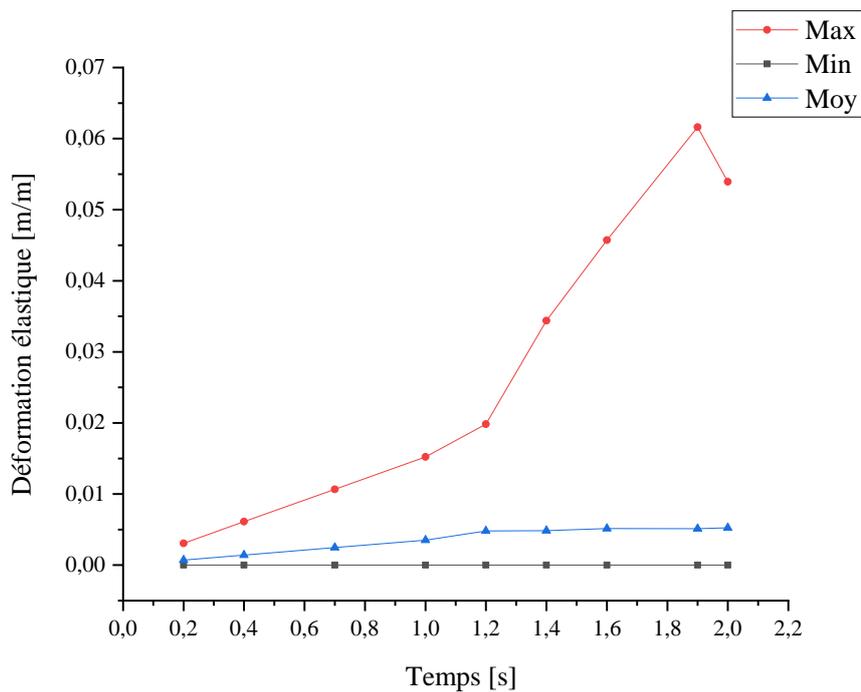


Figure IV.26 : Variation de la déformation élastique équivalente en fonction du temps

L'analyse des courbes de déformation élastique équivalente maximale, minimale et moyenne offre des informations importantes sur le comportement du système étudié en termes de déformation et de résistance structurelle : La courbe représentant les valeurs maximales montre une augmentation progressive qui indique une accumulation progressive de déformations dans le système au fur et à mesure que les charges ou les contraintes augmentent. Il est essentiel de surveiller attentivement cette tendance et de s'assurer que les valeurs maximales restent inférieures aux limites de déformation acceptables pour éviter toute déformation excessive ou des dommages structuraux. La courbe des valeurs minimales reste stable en bas, avec une légère augmentation par la suite. Cette stabilité initiale peut indiquer que le système a une capacité intrinsèque à résister à des déformations minimales malgré les variations des charges appliquées. La légère augmentation des valeurs minimales peut être attribuée à une augmentation des contraintes ou à des conditions de fonctionnement plus exigeantes. La courbe des valeurs moyennes reste stable en bas, mais diminue progressivement. Cette diminution peut suggérer une diminution de l'amplitude des déformations moyennes dans le système. Cela peut être le résultat de plusieurs facteurs, tels que des propriétés de matériau spécifiques, des modifications de conception ou des ajustements appropriés.

e) Contrainte équivalente de Von Mises :

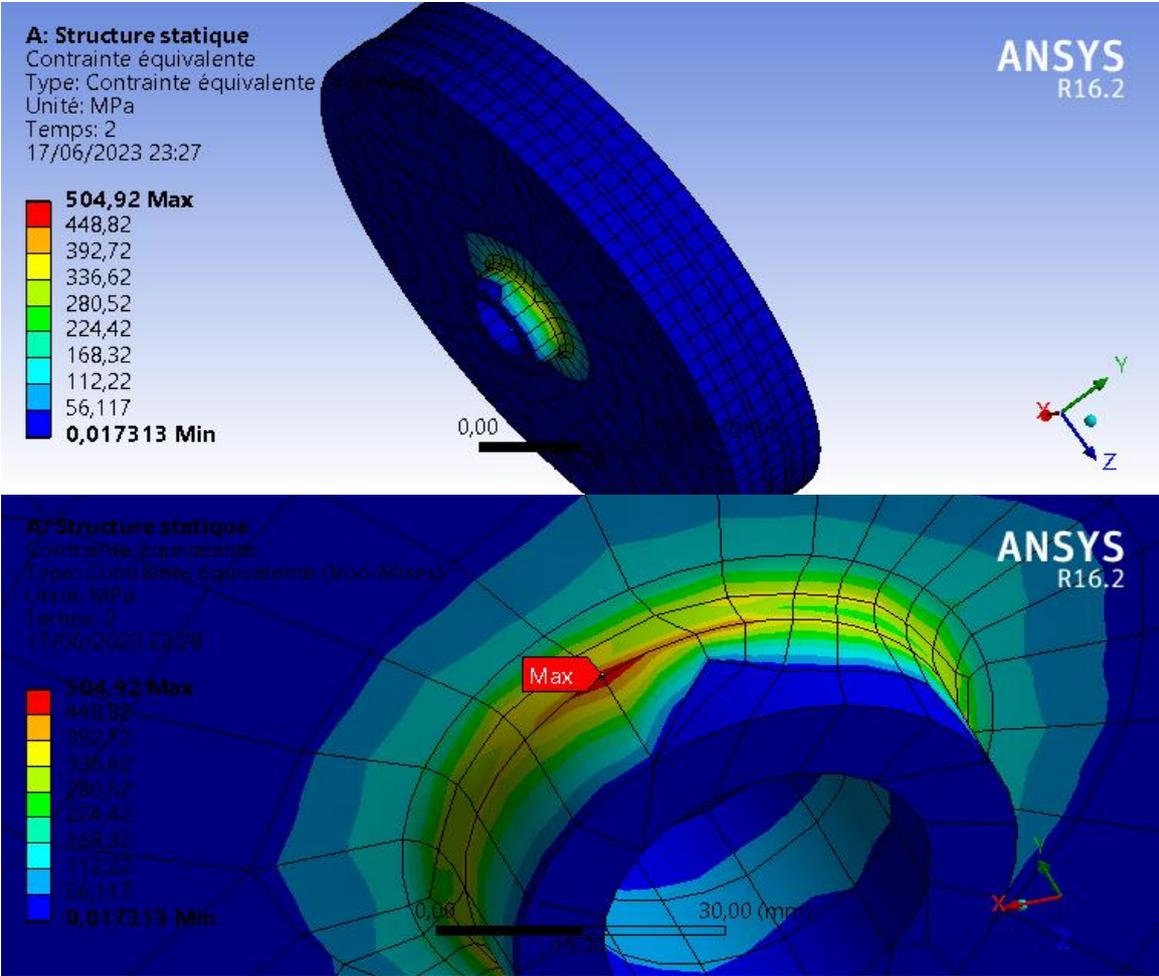


Figure IV.27 : Repérage de la valeur maximale du contrainte de Von-Mises sur la géométrie

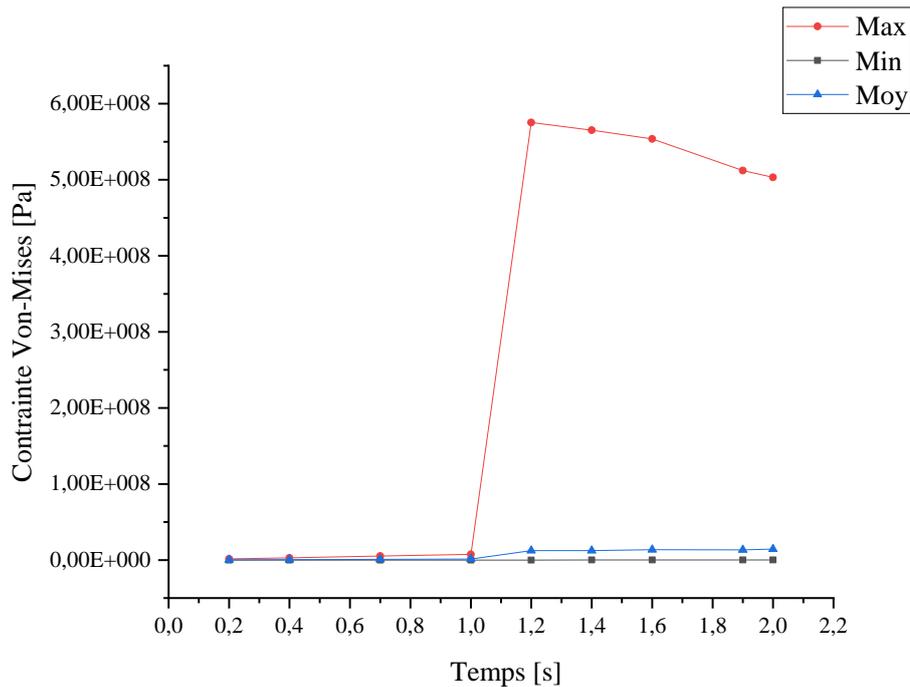


Figure IV.28 : Variation de contrainte Von-Mises en fonction du temps

L'analyse de ces courbes fournit des informations cruciales sur le comportement du système étudié en termes de sollicitations et de résistance mécanique : La courbe représentant les valeurs maximales de la contrainte de von Mises montre une augmentation significative au fil du temps, cela suggère une augmentation des contraintes subies par le système, ce qui peut indiquer une augmentation des charges appliquées ou des conditions de fonctionnement plus exigeantes (Nous remarquons que σ_{\max} est supérieure à la limite d'élasticité (**voir Tableau IV.2**)). Pour la courbe des valeurs minimales, elle présente une stabilité en bas qui peut indiquer une capacité du système à maintenir une résistance minimale adéquate malgré les variations des conditions de fonctionnement. Cela peut être le résultat d'une conception solide ou d'une utilisation appropriée des matériaux. La courbe des valeurs moyennes montre une stabilité initiale, suivie d'une légère augmentation vers la fin. Cette augmentation peut être attribuée à l'accumulation progressive des contraintes au cours du temps. Bien que la légère augmentation soit généralement tolérable, il est important d'évaluer attentivement cette tendance pour éviter toute dégradation prématurée du système et prendre des mesures appropriées si nécessaire.

f) Contrainte équivalente de cisaillement Plan du repère global XZ :

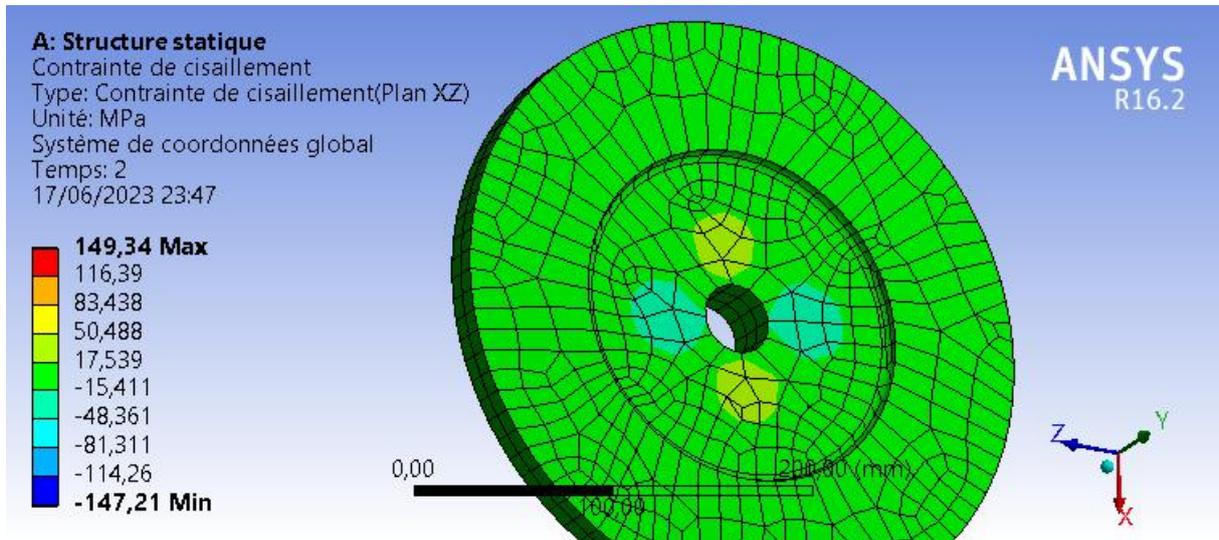


Figure IV.29 : Représentation visuelle du contrainte de cisaillement

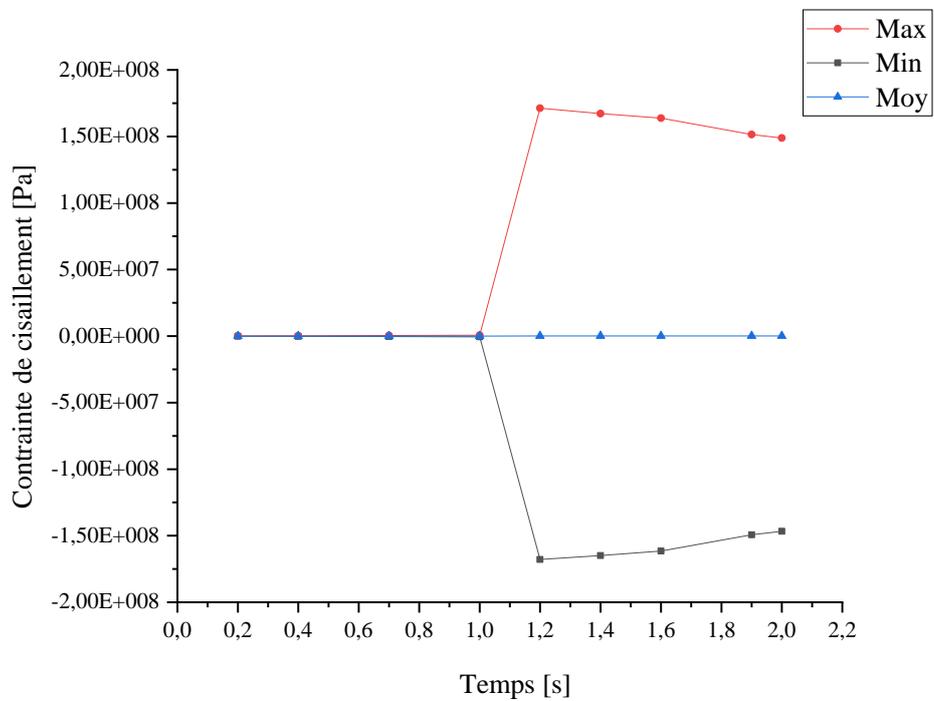


Figure IV.30 : Variation du contrainte de cisaillement en fonction du temps

L'analyse des courbes de contrainte de cisaillement maximale, minimale et moyenne, représentées sous la forme d'un trident, offre des informations essentielles sur le comportement du système étudié en termes de résistance au cisaillement : La courbe des valeurs maximales montre une augmentation progressive après une phase de stabilisation initiale qui indique une accumulation de contraintes de cisaillement dans le système à mesure que les charges ou les sollicitations augmentent. Il est important de surveiller attentivement cette tendance et de s'assurer que les valeurs maximales restent dans les limites de résistance du matériau et des composants pour prévenir toute défaillance potentielle. La courbe des valeurs minimales reste stable en début, puis diminue fortement par la suite. Cette tendance suggère que le système a initialement une résistance adéquate au cisaillement, mais qu'elle diminue progressivement avec l'application de charges ou le passage du temps. Il est crucial de comprendre les facteurs contribuant à cette diminution afin d'éviter des situations où la résistance au cisaillement pourrait être insuffisante et conduire à des défaillances.

La courbe des valeurs moyennes de la contrainte de cisaillement reste stable au milieu du trident. Cela indique une certaine régularité dans les contraintes de cisaillement moyennes subies par le système.

g) Etats de contact (volant moteur VM avec la garniture G2) :

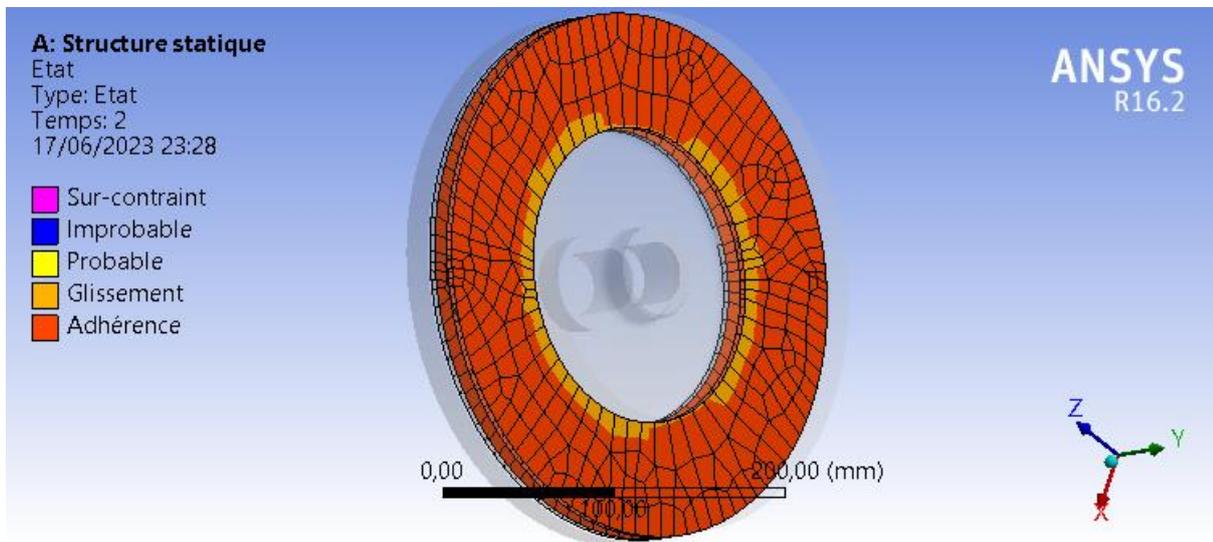


Figure IV.31 : Représentation visuelle d'état de contact du VM-G2 (glissement)

h) Etats de contact (plateau de pression PP avec la garniture G1) :

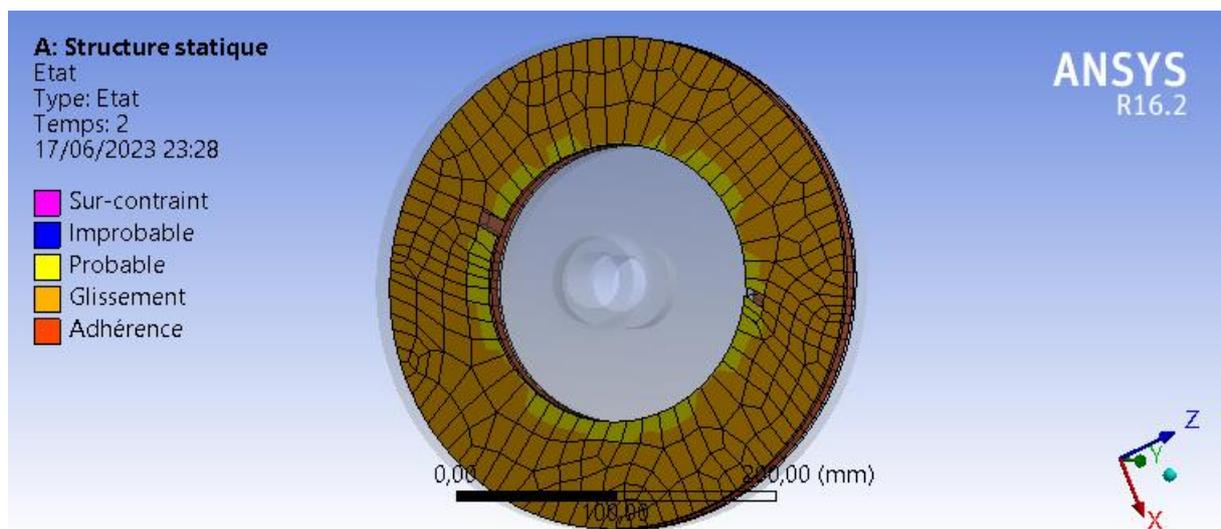


Figure IV.32 : Représentation visuelle d'état de contact du PP-G2 (adhérence avec peu de glissement)

IV.5. Conclusion :

L'utilisation des logiciels de conception et de simulation tels que SolidWorks et ANSYS Workbench a été toujours essentielle pour les études mécaniques. Ces outils permettent de réaliser une conception précise, d'évaluer les performances, d'identifier les problèmes potentiels et de proposer des améliorations. Ils ont ouvert de nouvelles perspectives en matière de conception et de développement des systèmes à les rendre plus performants et plus durables. Leur utilisation est devenue indispensable dans le domaine de l'ingénierie mécanique, offrant aux ingénieurs des outils puissants pour innover et améliorer les produits.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'embrayage, composant essentiel du système de transmission, joue un rôle crucial dans le fonctionnement harmonieux des véhicules. En assurant la liaison et la séparation du moteur et de la boîte de vitesses, il permet un changement en douceur des rapports de transmission et une maîtrise optimale de la puissance. Au-delà de cette fonction fondamentale, l'embrayage présente une diversité de types, de caractéristiques et de problématiques qui nécessitent une approche approfondie pour en comprendre toutes les subtilités.

Au terme de ce travail, nous avons exploré divers aspects de l'embrayage automobile, en abordant des notions générales, les problèmes de défaillance, la maintenance et la conception avancée. Cette étude a permis d'acquérir une compréhension approfondie de ce composant clé du système de transmission, ainsi que des défis et des opportunités qu'il présente.

Dans un premier temps, une synthèse bibliographique portée sur les notions générales de l'embrayage, y compris ses différents types, ses composants et son fonctionnement a été réalisée. Cette introduction nous a fourni les bases nécessaires pour explorer plus en détail les aspects liés à la défaillance, la maintenance et la conception de l'embrayage.

La deuxième partie du travail a été consacrée sur les problèmes de défaillance auxquels l'embrayage peut être confronté. Nous avons identifié les causes potentielles de ces défaillances, telles que l'usure, la surchauffe, les vibrations ainsi que les conséquences sur les performances et la durabilité de l'embrayage. Cette analyse approfondie nous a permis de mieux comprendre les enjeux de la maintenance et de la gestion des problèmes de défaillance pour assurer un fonctionnement optimal de l'embrayage.

La troisième partie de l'étude a été consacrée comme un guide détaillé de maintenance de l'embrayage d'un modèle spécifique, la Renault Mégane 2. Nous avons fourni des instructions précises pour l'entretien régulier de l'embrayage, en mettant l'accent sur les points clés tels que l'inspection, la mesure de l'usure et le remplacement des composants défectueux. Ce guide pratique vise à aider les propriétaires de véhicules à maintenir la performance et la durabilité de leur embrayage.

Dans la dernière partie, une exploration de la conception et la simulation avancées d'un kit d'embrayage a été faite. En utilisant des logiciels de modélisation tels que SolidWorks et ANSYS Workbench, nous avons pu créer des modèles virtuels de l'embrayage et appliquer des conditions limites spécifiques pour évaluer son comportement. Les résultats obtenus à partir de ces simulations nous ont permis de visualiser les déformations, les contraintes et les déplacements des composants, ainsi que d'interpréter les graphes générés. Ces informations précieuses ont contribué à l'optimisation de la conception de l'embrayage et à une meilleure compréhension de son comportement dans des conditions réelles.

Ce mémoire a permis de jeter un regard approfondi sur l'embrayage automobile, couvrant des aspects allant des notions générales à la maintenance et à la conception avancée. Nous avons mis en évidence l'importance de la maintenance régulière pour prévenir les défaillances et assurer la performance de l'embrayage. De plus, notre étude sur la conception et la simulation nous a permis de mieux comprendre le comportement de l'embrayage dans des conditions spécifiques et d'identifier des possibilités d'amélioration.

Pour les futures recherches sur l'embrayage automobile, nous suggérons d'explorer davantage les matériaux et les revêtements innovants pour les composants d'embrayage, en vue d'améliorer leur durabilité et leurs performances. De plus, une attention particulière pourrait être accordée à l'optimisation des conditions de fonctionnement et des paramètres de conception pour une meilleure efficacité énergétique et une réduction des émissions. Enfin, l'utilisation de techniques de modélisation et de simulation avancées pourrait être étendue pour approfondir notre compréhension du comportement de l'embrayage dans des situations réelles, et ainsi améliorer sa conception et son fonctionnement.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Pour l'élaboration de la présente étude nous avons utilisé :

Sites web :

- [1] « Fonctionnement d'un embrayage / Commande d'embrayage ». <https://www.fiches-auto.fr/articles-auto/fonctionnement-d-une-auto/s-729-fonctionnement-de-l-embrayage.php>.
- [2] « Embrayage et Boîte de Vitesses - Infos, Devis, Rdv », My-ProCar.com. <https://www.my-procar.com/garage-et-reparation-auto/embrayage-et-boite-de-vitesses>.
- [3] « Embrayage centrifuge FERODO STIHL TS400 de chez au prix de 22,68 € », LG Motoculture. <https://www.lgmotoculture.fr/embrayages/2919-embrayage-centrifuge-ferodo-stihl-ts400.html>.
- [4] « Electromagnetic Clutches and Brakes - Ogura Industrial Corp - ». https://ogura-clutch.com/electromagnetic_clutch.php.
- [5] **R. Janke**, « Kupplungsdruckplatte CJ Bj. 82-86 mit 6 Zyl. Motor », 4 Wheel Parts. <https://www.4-wheel-parts.de/de/Kupplungsdruckplatte-Jeep-CJ-Bj--82-86-mit-6-Zyl--Motor.html>.
- [6] « Hydraulic Clutch System », RepairPal.com. <https://repairpal.com/hydraulic-clutch-system>.
- [7] « How It Works : Spring Engaged Friction Clutch », Mach III. <https://www.machiii.com/resources/how-our-products-work/how-it-works-spring-engaged-friction-clutch/>.
- [8] « Magnetic clutch ». https://www.hawkpumps.com/fr/accessoires_sous-categorie/auxiliaire/72/magnetic-clutch.

[9] Staff, Testbook. « Cone Clutches MCQ [Free PDF] - Objective Question Answer for Cone Clutches Quiz - Download Now ! » <https://testbook.com/objective-questions/mcq-on-cone-clutches--5eea6a1139140f30f369eb11>.

[10] « Embrayage multidisque : fonctionnement / Principe de fonctionnement ». <https://www.fiches-auto.fr/articles-auto/fonctionnement-d-une-auto/s-1610-embrayage-multidisque.php>.

[11] **Dhjhdjhd**, « Changer les galets et débrider le variateur », Scooter Honda SCV100 Lead, 31 juillet 2015. <https://scooterhondascv100lead.wordpress.com/2015/07/31/changer-les-galets/>.

[12] « Kit embrayage complet pour tracteur massey ferguson », Camagris SARL. <https://www.cam-agri-parts.fr/fr/kit-embrayage/191-kit-embrayage-complet-pour-tracteur-massey-ferguson-8491130581835.html>.

[13] « Fonctionnement de L'embrayage | Piècetri.com ». <https://www.piecetrip.com/2015/05/lembrayage.html>.

[14] « Volant moteur : fonctionnement et coût de remplacement | Mecagoo ». <https://mecagoo.com/blog/volant-moteur-fonctionnement-et-cout-de-remplacement/>.

[15] « Composants d'embrayage du carter d'embrayage disque embrayage de la plaque d'embrayage de l'ensemble plaque de pression pour camion lourd - Chine Plaque d'entraînement de disque d'embrayage », https://fr.made-in-china.com/co_campshinning/product_Clutch-Housing-Clutch-Components-Disc-Assy-Clutch-Clutch-Plate-Pressure-Plate-for-Heavy-Truck_rrsghooyg.html.

[16] « Disque d'embrayage SACHS 1864 654 115 | PiecesEtPneus.com ». <https://www.piecesetpneus.com/F-36653-disque-d%27embrayage/P-21014921-disque-d%27embrayage-sachs-1864-654-115>.

[17] « Disque d'embrayage VALEO 279375 », [piecesetpneus.com](https://www.piecesetpneus.com). <https://www.piecesetpneus.com/F-36653-disque-d%27embrayage/P-1092442-disque-d%27embrayage-valeo-279375>.

[18] « Garniture, rondelle, friction d'embrayage, recharge ». <https://sgm-pieces.com/Friction-matiere-disque-dembrayag>.

[19] « [Hot Item] Le roulement de l'embrayage Auto Kits de roulements Beaing Auto Parts 30bcds2/C06 88506 35bcds306224/16 Dg2 35BCD08 35BW08 », Made-in-China.com. https://fr.made-in-china.com/co_primeseiko/product_Auto-Bearing-Clutch-Beaing-Bearing-Kits-Auto-Parts-30bcds2-C06-Dg306224-16-88506-35bcds2-35bcd08-35bw08_ehrrrgusy.html.

[20] « PLATEAU DE GARNITURE DE MOYEU D'EMBRAYAGE AVEC RIVETS », Zodiac. <https://catalog.zodiac.nl/fr/08-primaire-embrayage/embrayage-big-twin-boite-4-et-premiers-boite-5/plateau-de-garniture-de-moyeu-d-embrayage-avec-rivets-2746>.

[21] « Speed Shop : Disque d'embrayage 180mm sans ressort - Disque - Embrayage - Boite à vitesses, embrayage, silentblocs, pièces boite... » <https://www.speed-shop.fr/default/boite-a-vitesses-embrayage-silentblocs-pieces-boite/embrayage/disque/disque-d-embrayage-180mm-sans-ressort.html>.

[22] « Plaque D'embrayage De Pression Accessoire Pour Voiture Pour Toyota Hiace V 2004,31210 — 26170, Ap02 - Buy 31210-26170, Clutch Pressure Plate, Clutch Pressure Plate For Toyota Product on Alibaba.com ». <https://french.alibaba.com/product-detail/Clutch-Pressure-Plate-for-Toyota-Hiace-1600474702310.html>.

[23] « Quand et pourquoi changer ses émetteur et récepteur d'embrayage auto ? », Oscaro France. <https://www.oscaro.com/fr/conseils-mecaniques/embrayage-et-boite-de-vitesse/quand-comment-remplacer-emetteur-recepteur-embrayage>.

[24] « Butée d'embrayage usé endommage l'embrayage et la boîte de vitesses ». <https://www.automecanik.com/blog-pieces-auto/conseils/butee-d-embrayage>.

[25] « Embrayage hydraulique : fonctionnement, purge et pannes | Kit-embrayage.fr ». <https://www.kit-embrayage.fr/blog/embrayage-hydraulique-fonctionnement-purge-et-pannes/>.

[26] « Pédales à gaz et embrayage », Depositphotos. <https://fr.depositphotos.com/115252408/stock-photo-gas-and-clutch-pedals.html>.

[27] « Câble d'embrayage », GOMECANO.COM.
<https://www.gomecano.com/service/cable-d-embrayage/>.

[28] « Capteur de position multifonctions », EFI AUTOMOTIVE.
<https://www.efiautomotive.com/produits/capteur-de-position-lineaire-dembrayage/>.

[29] « Le Garage Salambo est à votre service pour la grosse mécanique ». <https://www.garage-toulouse.fr/reparation-moteur-joint-de-culasse-embrayage-kit-de-distribution.html>.

[30] https://bibli.ec-lyon.fr/exl-doc/TH_T2159_bherve.pdf

[31] « Conseil pour ateliers concernant le patinage de l'embrayage ». <https://aftermarket.zf.com/fr/fr/sachs/la-technologie-sur-le-terrain/conseils-pratiques-pour-ateliers/systemes-d-embrayage/l-embrayage-patine/>.

[32] « Comment contrôler le niveau du fluide d'embrayage », wikiHow.
<https://fr.wikihow.com/contr%C3%B4ler-le-niveau-du-fluide-d%27embrayage>.

[33] « casse câble embrayage clio 1 - Renault - Mécanique / Électronique - Forum Technique », Forum Auto, 30 novembre 2006. <https://forum-auto.caradisiac.com/topic/235580-casse-c%C3%A2ble-embrayage-clio-1/>.

[34] « Conseil pour ateliers : pas de débrayage ». <https://aftermarket.zf.com/fr/fr/sachs/la-technologie-sur-le-terrain/conseils-pratiques-pour-ateliers/systemes-d-embrayage/pas-de-debrayage/>.

[35] « Fonctionnement de la commande hydraulique d'embrayage ». <https://www.fiches-auto.fr/articles-auto/fonctionnement-d-une-auto/s-1486-fonctionnement-de-la-commande-hydraulique-d-embrayage.php>.

[36] « Casses de volants moteur : un vrai problème / Cause des soucis de volant moteur ? » <https://www.fiches-auto.fr/articles-auto/fiabilite/s-430-diesels-volant-moteur-defectueux.php>.

[37] <https://www.facebook.com/CarterCashAuto>, « Ma voiture ne démarre pas : est-ce forcément la faute de la batterie ? », Le Blog de Carter-Cash, 6 janvier 2023.

https://www.carter-cash.com/blog/d-129-probleme_de_demarrage_la_batterie_presumee_coupable/.

[38] « Bruits de l'embrayage ? Conseils pour ateliers concernant de possibles causes ». <https://aftermarket.zf.com/fr/fr/sachs/la-technologie-sur-le-terrain/conseils-pratiques-pour-ateliers/systemes-d-embrayage/bruits-d-embrayage/>.

[39]

http://www.miljeep.fr/modules/newbb_plus/archive.php?forum=3&topic_id=17630&content_only=1.

[40] « Évaluation de pièces usagées SACHS provenant de véhicules industriels et critères de reprise ». <https://aftermarket.zf.com/fr/fr/sachs/la-technologie-sur-le-terrain/evaluation-de-pieces-usagees/>.

[41] « Vitesses difficiles à passer / Tringlerie de boîte ». <https://www.fiches-auto.fr/articles-auto/savoir-trouver-une-panne/s-1560-vitesses-difficiles-a-passer.php>.

[42] « Clutch plate Scania 5 series 2010-2016 clutch disc for sale, 6761082 », Truck1. <https://www.truck1.eu/spare-parts/clutch-discs/clutch-plate-scania-5-series-2010-2016-a6761082.html>.

[43] « Comment changer un embrayage ? », Vroomly. <https://www.vroomly.com/blog/comment-changer-un-embrayage/>

[44] « Changement d'un kit d'embrayage auto - comment le remplacer ? », Oscaro France. <https://www.oscaro.com/fr/conseils-mecaniques/embrayage-et-boite-de-vitesse/quand-comment-replacer-kit-embrayage>.

[45] « Changer l'embrayage Megane 2 1.5 dci ». YouTube, téléchargé par Ma Clé 12, 25 juin 2022, <https://www.youtube.com/watch?v=KJb53iEV6B0>.

[46] <https://www.crescentfoundry.com/blog/things-to-look-while-choosing-the-best-flywheel-for-your-business/>

[47] <https://www.mateenbar.com/assets/Documents/Technical-Data-60-Nov20.pdf>

[48]

<https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=8224b8c929f04a559f8aae5ad943bfcf>

[49] <https://www.russellductile.co.uk/wp-content/uploads/2019/05/Spheroidal-Graphite.pdf>

[50] AZO Materials: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6575>

[51] S. Prakash et al., Analysis of Mf241Di clutch plate with different material (30Cr13 steel and En15steel), International Conference on Advanced Nanomaterials & Emerging Engineering Technologies (IEEE), India, 2013.

[52] <https://www.sn-castiron.nl/en/materials/cast-iron-en-gjl/>

[53] <https://www.russellductile.co.uk/wp-content/uploads/2019/05/Grey-Cast-Irons.pdf>

[54]

<https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=1b012a1ae1d64e409c445a814bfcf9d5>

[55] Site Web de l'entreprise Ferodo : <https://www.ferodo.com>

[56] Fascicule de Brevet Européen **EP 1 277 000 B1** : Procède d'obtention d'une garniture de friction d'embrayage, 2006.

[57] Brevet INPI Paris **FR2534995A1** : Matériau de frottement, garniture d'embrayage à sec et procédé de fabrication de cette garniture, 1984.

Articles et documents :

« Embrayage (mécanique). Introduction, embrayage de machines d'exploitation ». Encyclopédie boowiki | portail internet d'information.

« La transmission automatique à double embrayage : Un brevet français ». Lefigaro.

« Gaston fleischel — wikipédia ». Wikipédia, l'encyclopédie libre, 2008.

« Automobile/Histoire des inventions. Boîte mécanique ou automatique, les inventeurs français ont tout découvert ! », Le dauphiné libéré : Info et actu nationale et régionale - isère, haute-savoie, savoie, drôme, ardèche, hautes-alpes et vaucluse, 2020.

« Qu'est-ce que l'embrayage et comment ça marche ». Le Blog de l'AUTODOC CLUB : Des conseils et des idées pour votre voiture.

Pandora. « Que contient un kit d'embrayage ? ». Vroomly, 2023.

Pandora. « Quels sont les symptômes d'une butée d'embrayage usée ? ». Vroomly, 17 janv. 2020.

Cestes, Marine. « Comment savoir si l'embrayage est mort ? ». Ça m'intéresse, 2023.

« L'embrayage ». Lolo le mécano.

Burchila, Bogdan, et al. « Embrayages à sec ». Techniques de l'Ingénieur, 2002.

« EMBRAYAGES ». JOHO pierre.

Lindas, Roland. « Embrayages ». Techniques de l'Ingénieur, 1987.

« DISQUE D'EMBRAYAGE ET LE MECANISME ». Mecanique Book.

Lisa. « Quelle est la durée de vie de mon embrayage ? ». Vroomly, 2020.

« Embrayage (mécanique). Introduction, embrayage de machines d'exploitation ». Encyclopédie boowiki | portail internet d'information.

Duboz, Sébastien. « Comment fonctionne l'embrayage sur les voitures ». Planète Renault, 2008.

« Qu'est-ce qu'un embrayage électromagnétique ? ». Spiegato.

Thèses de mémoire et doctorat :

M. Ben Jaber, «Mechanical Design Technology ». 2008.

B. HERVÉ, « CRISSEMENT D'EMBRAYAGE ANALYSES LINÉAIRE, NON-LINÉAIRE ET ÉTUDE EXPÉRIMENTALE », École Centrale de Lyon, Lyon, 2009.

S. R. Gaudreau, « CONCEPTION D'UN ACTIONNEUR ÉLECTROMÉCANIQUE POUR UN EMBRAYAGE DE TRANSMISSION MANUELLE AUTOMATISÉE », Sherbrooke (Québec) Canada, 2013.

P. Dolcini, « Contribution au confort de l'embrayage », Automatique / Robotique. Institut National Polytechnique de Grenoble – INPG, France, 2007.

M. BOUREKBA et N. BOUMEDIENE, « Étude et simulation mécanique d'une garniture d'un disque d'embrayage », Université Ibn Khaldoun, Tiaret, 2020.

Logiciels :

Solidworks Dessin

ANSYS Workbench v16.2Simulation

Origin 2018 Traitement des courbes

Word 2016 Traitement du texte

PowerPoint 2016 Présentation