



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد  
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed  
معهد الصيانة والأمن الصناعي  
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

**Département de Maintenance en Electromécanique**

## **MEMOIRE**

Pour l'obtention du diplôme de Master

**Filière : Génie Industriel**

**Spécialité : Maintenance-Fiabilité-Qualité**

## **Thème**

**Simulation de fonctionnement des embrayages avec  
Ansys**

Réalisé par :

GARAGOUZE Amine

REBIGA Youssef

Membres de jury

<b>Nom et prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Etablissement</b>	<b>Qualité</b>
ADJLOUA Abdelaziz	MCB	IMSI	Président
CHAREF Djilali	MCB	IMSI	Examineur
F. BELARIFI	Professeur	IMSI	Encadreur

September 2023

## Sommaire

<b>Sommaire.....</b>	<b>01</b>
<b>Remerciement.....</b>	<b>03</b>
<b>Dédicace.....</b>	<b>04</b>
<b>Liste des figures et des tableaux.....</b>	<b>06</b>
<b>Principale notions.....</b>	<b>08</b>
<b>Résumé.....</b>	<b>09</b>
<b>Introduction générale.....</b>	<b>10</b>
<b>Chapitre 1 : Étude bibliographique sur les embrayages.....</b>	<b>12</b>
<b>1. Introduction.....</b>	<b>13</b>
<b>2. Étude bibliographique sur les embrayages.....</b>	<b>14</b>
<b>3. Fonctionnement des embrayages.....</b>	<b>15</b>
<b>3.1. Les différentes phases de fonctionnement d'un embrayage.....</b>	<b>15</b>
<b>3.2. Etude cinématique et dynamique des embrayages.....</b>	<b>16</b>
<b>4. Classification des embrayages.....</b>	<b>18</b>
<b>4.1. Les embrayages progressifs.....</b>	<b>18</b>
<b>4.2. Embrayages instantanés.....</b>	<b>23</b>
<b>5. Les caractéristiques des embrayages.....</b>	<b>24</b>
<b>5.1. Les caractéristiques mécaniques et matériaux utilisés pour les             embrayages.....</b>	<b>25</b>
<b>5.2. Les traitements de surfaces sur embrayages.....</b>	<b>25</b>
<b>6. La conclusion.....</b>	<b>26</b>
<b>Chapitre 2 : Comportement fonctionnel des embrayages.....</b>	<b>28</b>
<b>1. Introduction.....</b>	<b>29</b>
<b>2. Mise en situation.....</b>	<b>29</b>
<b>3. Analyse de l'embrayage à diaphragme.....</b>	<b>30</b>
<b>4. Constitution d'un embrayage à diaphragme.....</b>	<b>31</b>

4.1. Rôle des éléments constitutif.....	33
4.2. Analyse Fonctionnelle.....	35
4.3. Système de commande.....	36
5. Comportement des embrayages.....	38
5.1. Comportement statique et dynamique.....	39
5.2. Comportement à l'usure.....	40
6. Différente méthode de calculs.....	41
6.1. Calculs dimensionnels.....	42
6.2. Calculs des contraintes.....	45
7. Conclusion.....	47
 <b>Chapitre 3 : Simulation Avec Ansys pour le calcul des contraintes dans</b>	
<b>les embrayages.....</b>	<b>48</b>
1. Introduction.....	49
2. Les éléments finis.....	49
2.1. Les différentes étapes de la méthode des éléments finis.....	49
2.2. Les étapes pratiques de calcul par éléments finis .....	50
2.3. Le maillage.....	52
2.4. Les différents types des éléments finis.....	52
2.5. Erreurs dans l'analyse par la MEF.....	53
3. Modélisation par ANSYS.....	55
4. Simulation du disque de l'embrayage à membrane.....	56
4.1. Procédure de simulation.....	58
4.2. Résultats et discussions.....	62
5. Conclusion.....	64
6. Conclusion générale.....	66
Références bibliographiques.....	68

## Remerciement

*Nous débutons nos remerciements en exprimant notre profonde gratitude envers Dieu tout-puissant pour nous avoir accordé la force, le courage et la détermination nécessaires pour aborder sérieusement notre travail.*

*Nos parents méritent également une reconnaissance sincère pour leur soutien inébranlable et leur patience inestimable tout au long de notre parcours scolaire.*

*Nous souhaitons exprimer notre chaleureuse reconnaissance envers toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce projet.*

*Un merci particulièrement sincère est adressé à notre encadreur, Mr. BELARIFI, dont l'attention ne s'est pas limitée à l'avancement de notre travail, mais a également englobé notre développement personnel. Ses conseils nous ont permis de donner le meilleur de nous-mêmes, nous poussant à nous surpasser. Nous le remercions pour son exemple inspirant et ses leçons de vie.*

*Nous exprimons notre sincère gratitude à Mlle KAIDI pour son précieux soutien tout au long de la rédaction de ce mémoire.*

*Nos remerciements s'adressent également aux membres du jury pour avoir consacré leur temps à l'examen de notre travail.*

*Nous tenons à exprimer notre reconnaissance envers tous nos enseignants, dont les compétences scientifiques et pédagogiques ont toujours suscité notre profond respect. Nous n'oublions pas le personnel de notre institut, dont la sympathie et la gentillesse ont contribué à rendre notre parcours académique plus agréable.*

*Enfin, nous remercions chaleureusement tous ceux qui ont cru en nous et en nos capacités. Nous aspirons à être à la hauteur de leurs attentes, voire à les surpasser. Un grand merci à chacun d'entre vous.*

## **Dédicace**

*C'est avec une profonde gratitude et des mots sincères que je dédie ce modeste travail.*

*À mes chers parents, dont le soutien, l'encouragement et le soutien inébranlable tout au long de mes années d'études m'ont permis d'atteindre mes objectifs. Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.*

*À mes frères Mohammed, Mustapha et Yacine, à toute ma famille, à mes proches et à ceux qui m'entourent avec amour et bienveillance.*

*À mes encadreurs, enseignants, formateurs, collègues, amis, ainsi qu'à toute l'équipe pédagogique et administrative de l'IMSI.*

*À tous ceux qui me sont chers.*

***Amine***

## Dédicace

*À mes parents, pour leur amour inconditionnel, leur soutien constant et leurs sacrifices qui ont rendu cette réalisation possible.*

*À mon encadreur, Mr Belarifi, pour ses conseils avisés, sa patience et sa confiance en moi tout au long de ce travail.*

*À mes amis, qui ont partagé ce voyage avec moi, pour leur encouragement, leurs discussions stimulantes et leur amitié précieuse.*

*À toute l'équipe pédagogique et administrative de l'IMSI, pour m'avoir fourni les ressources et l'environnement propice à l'apprentissage et à la croissance.*

*À tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à mon éducation et à mon développement académique, je vous adresse ma plus profonde gratitude.*

*Ce mémoire est dédié à ceux qui croient en l'importance de la connaissance et de la persévérance, et à tous ceux qui aspirent à repousser les limites de la compréhension humaine.*

**Yucef**

## Liste des figures et des tableaux

### Liste des Figures

#### *Chapitre 1*

- Figure 1.1** Principe de l'embrayage
- Figure 1.2** Fonctionnement de l'embrayage
- Figure 1.3** Embrayage à friction
- Figure 1.4** *Embrayage à diaphragme*
- Figure 1.5** Embrayage électromagnétique
- Figure 1.6** Embrayage centrifuge
- Figure 1.7.** Embrayage hydraulique
- Figure 1.8 .** Embrayage mono-disques
- Figure 1.9.** Embrayage multi-disques
- Figure1.10** Embrayages instantanée

#### *Chapitre 2*

- Figure 2.1.** Organigramme de mise en situation.
- Figure 2.2** Vue éclatée de l'embrayage à diaphragme.
- Figure 2.3.** Photos des constituants de l'embrayage.
- Figure 2.4.** Photos des surfaces frottantes.
- Figure 2.5** Les différents éléments de disque d'embrayage.
- Figure 2.6** Les différents éléments de diaphragme.
- Figure 2.7** Les différents éléments de La butée de débrayage.
- Figure 2.8** Les différents éléments de l'embrayage
- Figure 2.9** fonctionnement de l'embrayage.
- Figure 2.10** commande mécanique par cable
- Figure 2.11** commande hydraulique récepteur hydraulique externe
- Figure 2.12** commande hydraulique
- Figure 2.13** commande électronique
- Figure2.14** Schématisation du frottement de l'embrayage
- Figure 2.15** Caractéristiques pour les calculs dimensionnels
- Figure 2.16** Caractéristiques pour calculer le couple transmissible

**Figure 2.17** Critères de Tresca-Guest et de von Mises.

**Figure 2.18** *géométrie équivalente contact plan.*

### ***Chapitre 3***

**Figure 3.1** Organigramme de résolution

**Figure 3.2** Les différentes étapes de résolution d'un problème par la MEF

**Figure 3.3** Les différents éléments utilisés par la MEF

**Figure 3.4** Interface Workbench

**Figure 3.5** Dessin d'ensemble de l'embrayage à diaphragme

**Figure 3.6.a** Disque d'embrayage à étudier en vue de face et arrière

**Figure 3.6. b.** Disque d'embrayage à étudier avec la charge appliquée

**Figure 3.6. c.** détails de maillage

**Figure. 3.7.** Procédure de simulation

**Figure 3.8.** Edition des conditions de simulation

**Figure 3.9** Variation des contraintes de Von mises

**Figure 3.10** Variation des déformations

**Figure 3.11** Variation des déplacements

**Figure 3.12** Variation des contraintes maximales

**Figure 3.13** variations des contraintes maximales et de Von Mises en fonction de la pression appliquées pour métal fritté.

**Figure 3.14** variations des contraintes maximales et de Von Mises en fonction de la pression appliquées pour cermet.

**Figure 3.15** variations des contraintes maximales et de Von Mises en fonction de la pression appliquées pour céramique.

**Figure 3.16** variations des contraintes maximales et de Von Mises en fonction de la pression appliquées pour Kevlar.

**Figure 3.17** variations des déplacements des différents matériaux en fonction des pressions appliquées.

### **Liste des tableaux**

#### ***Chapitre 2***

**Tableau 2.1.** Les conditions à satisfaire.

#### ***Chapitre 3***

**Tableau 3.1.** Caractéristiques des matériaux du disque



# Principales notions

## Lettres latines

$F_e$	La force extérieure	[N]
$F_f$	La force de frottement	[N]
$F_N$	La force normale	[N]
$\mu$	Le coefficient de frottement	[--]
$F$	La force résultante	[N]
P	la position	[m]
P	La pression de contact	[--]
$\vec{M}$	Le moment	[--]
Cf	Le couple maximal transmissible	[Nm]
N	l'effort presseur axial générateur de la pression de contact	[N]
f	le coefficient de frottement	[--]
r1	le rayon intérieur de la surface frottant	[m]
r2	le rayon extérieur de la surface frottant	[m]
[K]	matrice de rigidité globale	[--]
n	surfaces frottantes	[m <sup>2</sup> ]
$\sigma_{yt}$	la limite d'élasticité en traction simple	[MPa]
$\sigma_I$	contrainte principale	[MPa]

## Résumé

Ce mémoire a été rédigé dans le contexte du projet de fin d'études visant à l'obtention du diplôme de Master 2 en génie industriel, avec une spécialisation en Maintenance, Fiabilité et Qualité. Notre étude débute par une revue de la littérature portant sur les embrayages. Nous nous sommes penchés sur l'analyse du comportement fonctionnel des embrayages. De comportement statique et dynamique et à l'usure et ces différentes méthodes de calculs. Par la suite, nous avons réalisé des simulations à l'aide du logiciel Ansys afin de déterminer les contraintes présentes dans les embrayages.

## Abstract

This thesis was written in the context of a final project aimed at obtaining a Master's degree in Industrial Engineering, specializing in Maintenance, Reliability, and Quality. Our study begins with a literature review focusing on clutches. We delved into the analysis of the functional behavior of clutches, both in static and dynamic scenarios, as well as wear and the various associated calculation methods. Subsequently, we conducted simulations using the Ansys software to determine the stresses present in clutches.



**Introduction  
générale**

## **Introduction Générale**

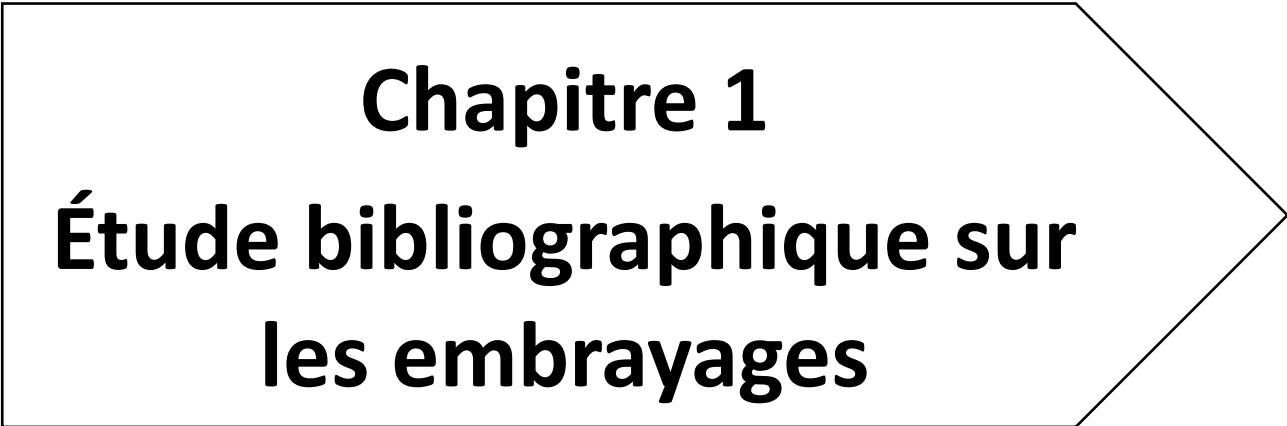
Les embrayages sont des éléments essentiels dans les systèmes de transmission de puissance, permettant de transférer la puissance d'un moteur à une boîte de vitesses. Ils jouent un rôle crucial dans le fonctionnement des véhicules tels que les voitures, les camions, les motos et les machines industrielles. Ils assurent un accouplement progressif entre le moteur et le récepteur, réduisant ainsi les à-coups et les contraintes mécaniques excessives. Ils offrent également la possibilité de désaccoupler le moteur du système de transmission, permettant ainsi de changer de vitesse ou de réaliser d'autres opérations sans interrompre complètement le moteur.

Ce mémoire se concentre sur la simulation des embrayages en utilisant le logiciel Ansys. L'objectif est d'analyser le fonctionnement et la performance des embrayages à l'aide de la méthode des éléments finis. Celle-ci permet d'obtenir une solution numérique pour un problème spécifique et constitue une approche précieuse pour étudier le comportement des embrayages dans différentes conditions de fonctionnement. Le mémoire est organisé en trois chapitres distincts avec une introduction générale qui donne un aperçu sur l'étude et une conclusion générale qui synthétise le travail de ce mémoire.

Le premier chapitre, fournit une étude bibliographique sur les embrayages, en mettant en évidence leurs importances dans les systèmes de transmission. Il présente les fonctions principales de l'embrayage, à savoir l'accouplement progressif et le débrayage, ainsi que leur contribution à un fonctionnement fluide, efficace et sécuritaire des machines équipées d'un embrayage.

Le deuxième chapitre se concentre sur l'analyse fonctionnelle des embrayages, en examinant en détail leurs différents composants et leur fonctionnement. Il met l'accent sur les calculs nécessaires pour déterminer les pressions de contact et les couples de transmission, soulignant ainsi leur influence sur la durabilité et la performance de l'embrayage.

Le troisième chapitre présente la méthode des éléments finis comme approche de simulation pour les embrayages. Il traite de la simulation d'un disque d'embrayage à diaphragme à l'aide du logiciel Ansys, en détaillant les étapes de la simulation pour différents matériaux utilisés. Le module statique structurel d'Ansys est utilisé pour réaliser la simulation et analyser les résultats.



**Chapitre 1**  
**Étude bibliographique sur**  
**les embrayages**

## 1. Introduction

Les embrayages sont des éléments essentiels dans les systèmes de transmission de puissance comme indiqué par son principe de la figure 1.1, permettant de transférer la puissance d'un moteur à une boîte de vitesses. Ils sont utilisés dans de nombreux véhicules tels que les voitures, les camions, les motos et les machines industrielles.

L'embrayage est un dispositif essentiel dans les systèmes de transmission des véhicules et d'autres machines. Son rôle principal est de réaliser un accouplement temporaire entre un arbre moteur et un autre arbre récepteur. Il offre plusieurs fonctions cruciales dans le fonctionnement global du système. Les deux fonctions principales de l'embrayage sont les suivantes :

Tout d'abord, l'embrayage assure un accouplement progressif entre le moteur et le récepteur. Cela signifie qu'il permet de connecter de manière graduelle et contrôlée les deux arbres afin de les faire fonctionner ensemble. Lorsque le moteur est en marche, l'embrayage permet de transmettre progressivement la puissance du moteur au récepteur, qu'il s'agisse des roues d'un véhicule, des pales d'un hélicoptère ou de toute autre application. Cette fonction d'accouplement progressif contribue à réduire les à-coups et les contraintes mécaniques excessives qui pourraient endommager le système.

Ensuite, l'embrayage offre la possibilité de désaccoupler le moteur et le récepteur, c'est ce qu'on appelle le débrayage. Cette fonction est cruciale lorsqu'il est nécessaire de séparer les deux arbres, que ce soit lorsque le véhicule est à l'arrêt ou en cours de fonctionnement. Le débrayage permet de désengager le moteur du système de transmission, ce qui permet de changer de vitesse, de passer en mode de stationnement ou d'effectuer d'autres opérations sans interrompre complètement le moteur. Il facilite également le démarrage en permettant de libérer progressivement la puissance du moteur sans brusquer le récepteur. [1]

En résumé, l'embrayage joue un rôle essentiel dans le fonctionnement des systèmes de transmission. Il permet d'établir une liaison temporaire entre l'arbre moteur et l'arbre récepteur, en assurant un accouplement progressif pour réduire les à-coups, et en permettant le débrayage pour séparer le moteur du système de transmission lorsque nécessaire. Ces fonctions contribuent à un fonctionnement plus fluide, efficace et sécuritaire des machines équipées d'un embrayage.

Dans cette étude bibliographique, nous examinerons les différentes technologies d'embrayage, leur historique, leur fonctionnement, leur conception, leur développement et leur application.

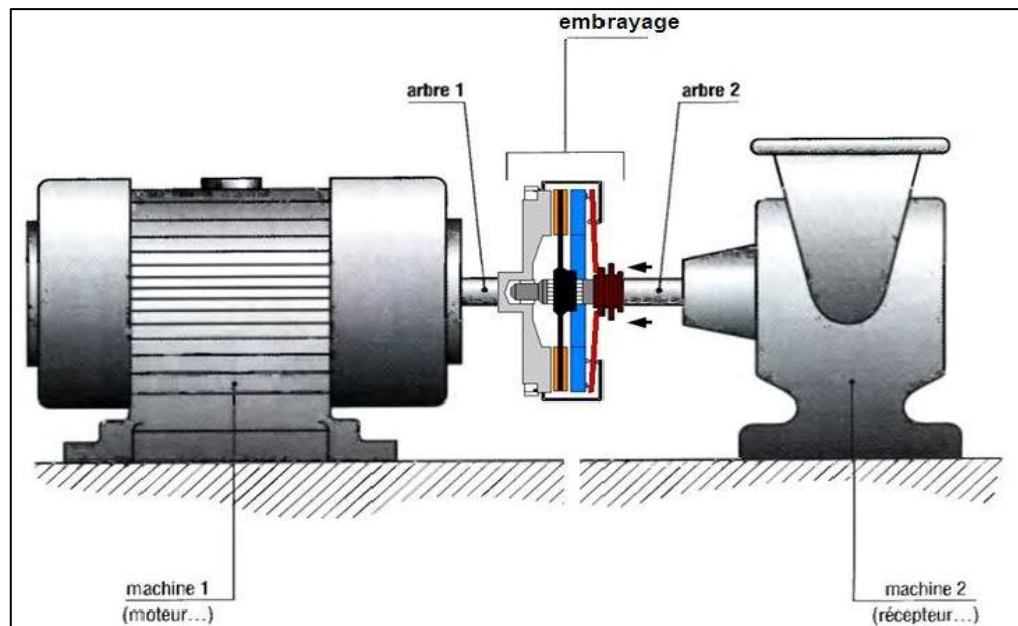


Figure1.1. Principe de l'embrayage

## 2. Étude bibliographique sur les embrayages

L'embrayage à une révolution a été développé au 19<sup>ème</sup> siècle pour actionner des machines telles que des cisailles ou des presses où une seule traction du levier de commande ou (plus tard) pression d'un bouton déclencherait le mécanisme, engager l'embrayage entre la source d'alimentation et le vilebrequin de la machine pendant exactement une révolution avant de désengager l'embrayage. Lorsque l'embrayage est débrayé, l'élément moteur est immobile. Les premières conceptions étaient généralement des embrayages de chiens avec une came sur l'élément entraîné utilisé pour désengager les chiens au point approprié.

Des embrayages à une seule révolution grandement simplifiés ont été mis au point au XX<sup>e</sup> siècle, nécessitant des forces opérationnelles beaucoup plus faibles et dans certaines variations, permettant une fraction fixe d'une révolution par opération. Les embrayages à friction à action rapide ont remplacé les embrayages de chien dans certaines applications, éliminant ainsi le problème de la charge d'impact sur les chiens chaque fois que l'embrayage s'enclenche.

En plus de leur utilisation dans l'équipement de fabrication lourd, les embrayages à une seule révolution ont été appliqués à de nombreuses petites machines. Dans les machines de totalisation, par exemple, appuyer sur la touche de fonctionnement déclencherait un embrayage

de révolution unique pour traiter le numéro entré le plus récemment. Dans les machines de composition, appuyer sur n'importe quelle touche a sélectionné un caractère particulier et a également engagé un embrayage de rotation unique pour faire tourner le mécanisme pour taper ce caractère. De même, dans les téléimprimeurs, la réception de chaque personnage déclenche un embrayage à une seule révolution pour actionner un cycle du mécanisme d'impression.[2]

En 1928, Frederick G. Creed, a développé un embrayage à ressort à un tour (voir ci-dessus) qui était particulièrement bien adapté à l'action répétitive de démarrage-arrêt requise dans les téléimprimeurs. En 1942, deux employés de Pitney Bowes de l'entreprise Postage Meter Company ont mis au point un embrayage à ressort à un tour amélioré. Dans ces embrayages, un ressort hélicoïdal est enroulé autour de l'arbre entraîné et maintenu dans une configuration élargie par le levier de déclenchement. Lorsqu'il est déclenché, le ressort se contracte rapidement autour de l'arbre de puissance et engage l'embrayage. Aujourd'hui, il existe une grande variété d'embrayages pour répondre aux besoins des différents types de véhicules et de situations de conduite.

### **3. Fonctionnement des embrayages [3-5]**

#### **3.1. Les différentes phases de fonctionnement d'un embrayage**

La figure 1.2, représente les différentes situations dans l'embrayage, à savoir la position embrayée, débrayée et patinage.

##### **3.1.1. Position embrayée**

La position embrayée représentée sur la figure 1.2a, correspond à l'état par défaut, inactif du système, cet état est obtenu quand le conducteur a complètement relâché la pédale d'embrayage. Tous les éléments sont alors solidaires en rotation. Par conséquent, l'arbre d'entrée de boîte est entraîné par le vilebrequin de façon synchrone et l'intégralité du couple moteur est transmise, dans la limite de la capacité de l'embrayage, Celle-ci est bien entendu dimensionnée en conséquence.

##### **3.1.2. Position débrayée**

La position débrayée représentée sur la figure 1.2b, est le mode actif de l'embrayage. Il est induit par l'enfoncement complet de la pédale d'embrayage, Le volant moteur, le mécanisme et la butée restent alors solidaires.

##### **3.1.3. Le patinage**



Le patinage représentée sur la figure 1.2c, correspond à la situation intermédiaire où seule une fraction de la charge nominale est appliquée sur la friction par le plateau de pression, ainsi la transmission d'un couple est permise entre le vilebrequin et l'arbre primaire sans qu'il y ait synchronisme, ce couple est contrôlé par le conducteur par l'actionnement de la pédale d'embrayage, c'est dans cette phase que les vitesses s'ajustent pour permettre le retour à la situation d'embrayage complet.

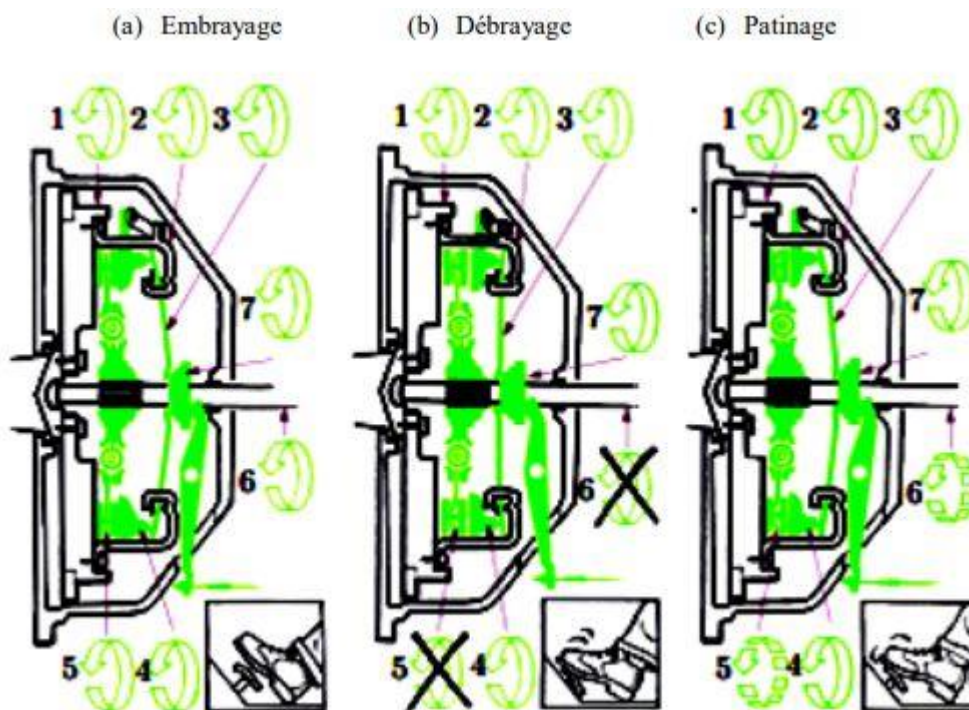


Figure 1.2 Fonctionnement de l'embrayage

(1), le couvercle (2), le diaphragme (3), le plateau (4), la friction (5), l'arbre primaire (6) et la butée (7). Problématique du crissement rotation du vilebrequin. Par contre la friction et l'arbre primaire sont rendus indépendants et ne sont plus entraînés par le moteur.

### 3.2. Etude cinématique et dynamique des embrayages

L'étude cinématique des embrayages s'intéresse aux mouvements et aux positions relatives des différentes pièces qui constituent l'embrayage, ainsi qu'à la manière dont elles interagissent pour permettre ou non la transmission de mouvement entre l'arbre moteur et l'arbre de transmission.

### 3.2.1. La cinématique d'un embrayage

Elle se décompose en trois phases :

#### - Phase d'enclenchement

Lorsque le conducteur appuie sur la pédale d'embrayage, le mécanisme de débrayage se met en action. Le plateau de pression se déplace vers l'arrière, ce qui permet aux disques d'embrayage de se séparer et de ne plus être en contact avec le volant moteur. Pendant cette phase, le mouvement de rotation du moteur est donc isolé de celui de la transmission, ce qui permet de passer les vitesses sans que les engrenages ne soient soumis à des contraintes.

#### - Phase de transfert de couple

Une fois que la pédale d'embrayage est relâchée, le mécanisme de débrayage cesse de fonctionner et les disques d'embrayage sont à nouveau en contact avec le volant moteur. Cela permet de transférer le mouvement de rotation du moteur à la transmission, ce qui permet de faire avancer le véhicule.

#### - Phase de dés enclenchement

Lorsque le conducteur appuie de nouveau sur la pédale d'embrayage, le mécanisme de débrayage se remet en action. Les disques d'embrayage se séparent à nouveau et le mouvement de rotation du moteur est isolé de celui de la transmission. Cette phase permet de changer de vitesse ou d'arrêter le véhicule sans caler le moteur.

L'étude cinématique des embrayages permet de comprendre les mouvements et les positions relatives des différentes pièces qui constituent l'embrayage, ainsi que l'effet de ces mouvements sur la transmission du mouvement entre le moteur et les roues. Cette compréhension est essentielle pour concevoir des embrayages efficaces et fiables pour les véhicules.

### 3.2.2. L'étude dynamique des embrayages

Elle consiste à analyser leur comportement lorsqu'ils sont en fonctionnement, en considérant les forces, les moments et les mouvements qui agissent sur eux.

Les principales grandeurs dynamiques qui sont étudiées sont les suivantes :

#### - Le couple transmissible

C'est la force qui est transmise de l'arbre moteur à l'arbre de sortie de la boîte de vitesses. Le couple transmissible dépend de la force de pression appliquée sur le disque d'embrayage, de la friction entre le disque et le volant moteur, et du diamètre du disque.

*- La force de pression*

C'est la force qui est appliquée sur le disque d'embrayage pour le maintenir en contact avec le volant moteur. La force de pression dépend de la pression hydraulique ou mécanique appliquée sur le plateau d'embrayage.

*- Le temps d'engagement*

C'est le temps qu'il faut pour que le disque d'embrayage se mette en contact avec le volant moteur. Le temps d'engagement dépend de la vitesse de rotation du moteur et de la fréquence de changement de vitesse.

*- La durée de vie*

C'est la durée pendant laquelle l'embrayage peut fonctionner sans défaillance. La durée de vie dépend de la qualité des matériaux utilisés, de la friction entre le disque et le volant moteur, et des conditions d'utilisation.

L'étude dynamique des embrayages est importante pour comprendre leur comportement en situation réelle, et pour concevoir des systèmes de transmission performants et durables. Elle peut être réalisée à l'aide de simulations numériques ou d'essais en laboratoire ou sur route.

#### **4. Classification des embrayages**

Les embrayages peuvent être classés soit par leur mode d'entraînement ou soit par leur mode de commande et peuvent être progressif ou instantané

##### **4.1. Les embrayages progressifs**

Il existe plusieurs types d'embrayages dans cette catégorie, chacun étant conçu pour des applications et des véhicules spécifiques. Nous citerons dans cette synthèse les d'embrayages les plus courants

*- Embrayage à friction*

C'est l'embrayage le plus courant dans les voitures. Il se compose de deux plaques métalliques, l'une étant fixe à l'arbre de transmission et l'autre étant mobile et reliée à la plaque de pression. Lorsque l'embrayage est enclenché, la pression exercée sur la plaque mobile presse les deux plaques ensemble, permettant la transmission de la puissance du moteur aux roues.

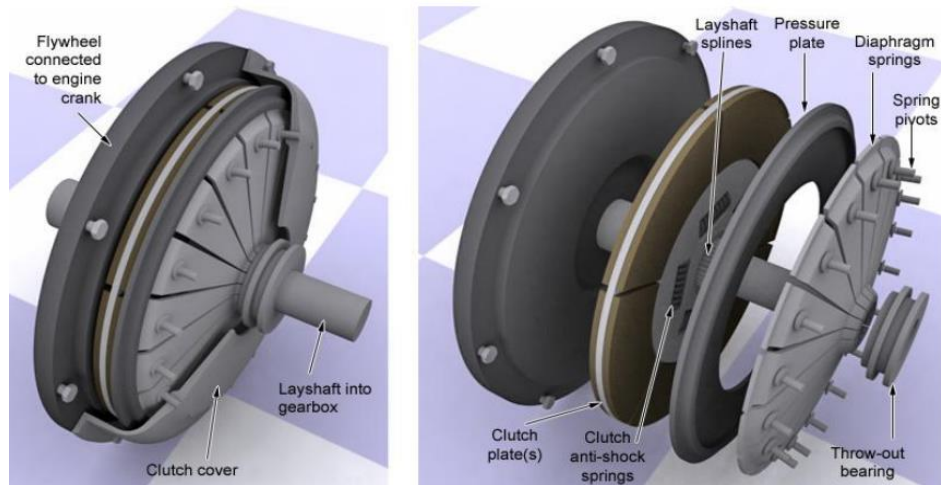


Figure1.3. Embrayage à friction

#### - *Embrayage à diaphragme*

Cette technique utilise un diaphragme au lieu d'un ressort pour presser le disque d'embrayage contre le volant moteur. Il est plus léger et plus compact que l'embrayage à friction, et il est souvent utilisé dans les voitures de sport. Cette méthode est plus récente et est plus couramment utilisée dans les voitures modernes.

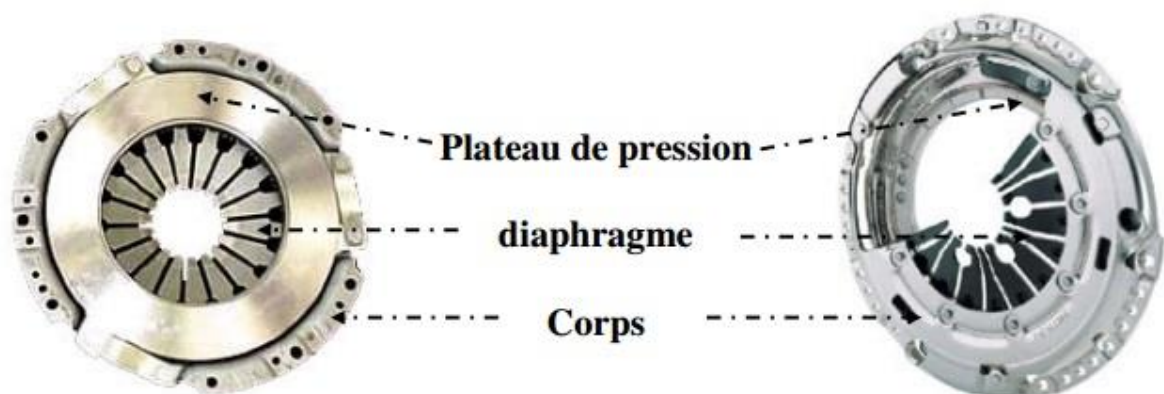


Figure1.4. *Embrayage à diaphragme*

### **- Embrayage électromagnétique**

Ce type d'embrayage utilise un champ électromagnétique pour enclencher et déclencher l'embrayage. Il est souvent utilisé dans les transmissions automatiques. Cette technique est utilisée dans certaines machines industrielles et les équipements de levage.



Figure 1.5 Embrayage électromagnétique

### **- Embrayage centrifuge**

Le principe de fonctionnement de l'embrayage centrifuge repose sur la force centrifuge lorsque vous tournez sur un manège en rotation, plus la vitesse n'augmente, plus la force centrifuge a tendance à vous éjecter vers l'extérieur. Ce principe qui s'applique pour ce type d'embrayage avec des masselottes articulées, reliées entre elles par des ressorts de rappel, solidaires de l'arbre moteur, qui sont progressivement entraînées en rotation. Plus la vitesse augmente, plus elles sont attirées vers l'extérieur. Ce type d'embrayage est utilisé dans les scooters les motos légères et les tondeuses à gazon ainsi que pour les petits moteurs à essence. Elle utilise des ressorts centrifuges pour presser le disque d'embrayage contre le volant moteur lorsque le moteur atteint une certaine vitesse. Il utilise des poids qui s'éloignent du centre de l'embrayage lorsque le moteur tourne à grande vitesse, ce qui permet à l'embrayage de se déclencher ce qui permet de réduire la force nécessaire pour engager l'embrayage.



Entre autres leurs parties extérieures sont recouvertes de garniture de friction. Lorsque le débattement est suffisamment important, elles viennent se coller contre un tambour solidaire de la boîte de vitesse ; La force centrifuge est suffisamment importante pour les solidariser au tambour, et donc transmettre le mouvement de rotation moteur à la boîte de vitesses. [6]

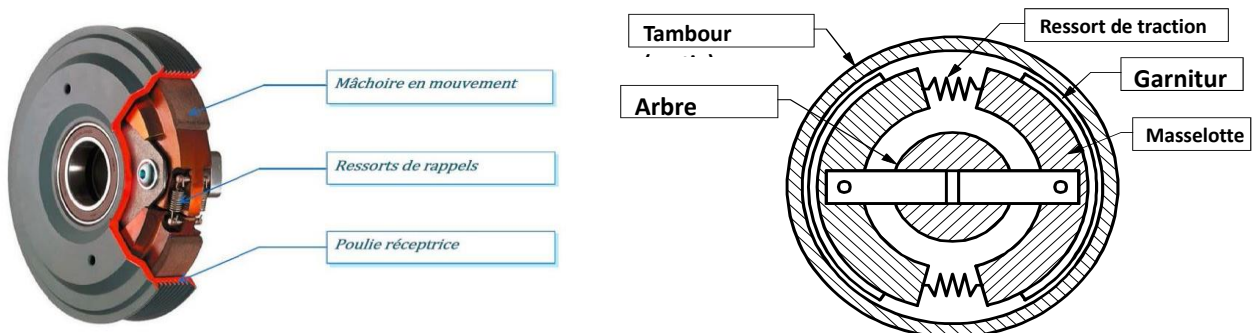


Figure1.6. - Embrayage centrifuge

#### - Embrayage hydraulique

Cet embrayage utilise un liquide hydraulique pour actionner l'embrayage. Il est souvent utilisé dans les camions et les véhicules lourds [7].

Cette technique est utilisée dans les camions et les équipements lourds. Elle utilise un système hydraulique pour engager l'embrayage.

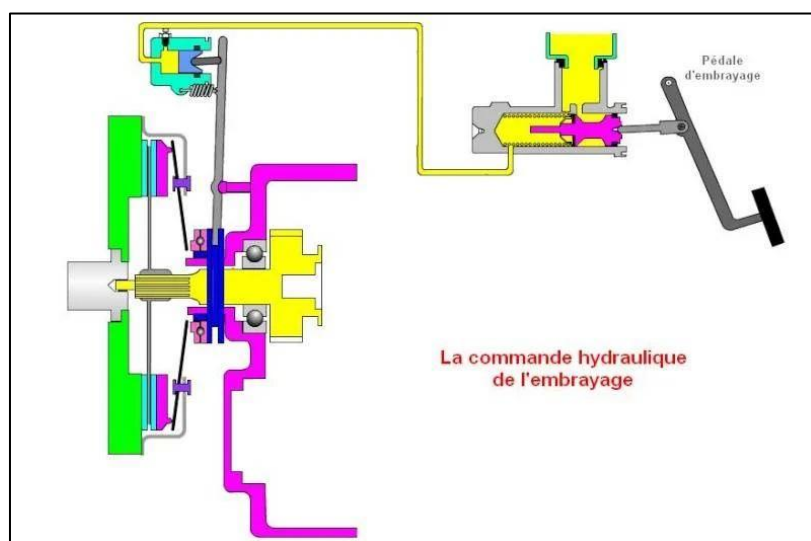


Figure1.7. - Embrayage hydraulique

### - L'embrayage à disque

C'est la technique la plus courante utilisée dans les voitures. Elle est constituée d'un disque d'embrayage situé entre le volant moteur et le mécanisme d'embrayage. Lorsque l'embrayage est engagé, le disque est pressé contre le volant moteur et le moteur est ainsi connecté à la transmission.

Ce type d'embrayage Permet de transmettre des couples importants sans risque de patinage, ces disques travaillent à sec ou dans l'huile. Les embrayages multidisques fonctionnent selon le même principe, sauf qu'on utilise un empilement de disques et de plateaux.

La poussée est donc, en théorie et aux frottements près, la même pour chaque disque et les plateaux intermédiaires permettent de répartir la transmission du couple sur de plus grandes surfaces. Les versions bi disques ou multidisques pour camions peuvent s'en passer, la multiplication des disques visant alors à répartir l'usure et prolonger la durée de vie du système.

Cette configuration est, pour un même couple transmissible, bien plus compacte radialement que celle à un seul disque. Elle est retenue sur les motocyclettes.

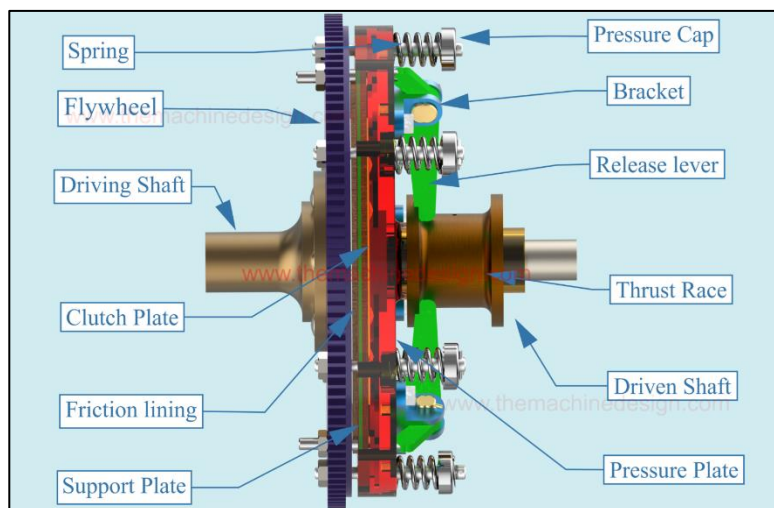
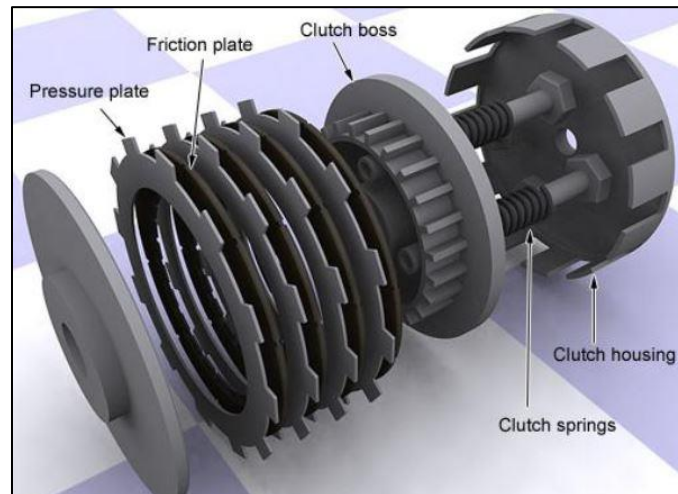


Figure 1.8. Embrayage mono-disques



**Figure 1.9.** Embrayage multi-disques [8]

#### 4.2. Embrayages instantanés

Dans cette catégorie, nous avons les embrayages à griffes et à dents. L'embrayage se fait au repos et se compose de deux manchons équipés de griffes ou de dents appelées crabots. Leur fonctionnement est le suivant :

L'un des manchons est monté de manière coulissante sur l'arbre et est actionné par une fourchette. La fourchette permet de déplacer le manchon coulissant afin de rapprocher les dents des crabots situées sur les deux manchons.

Lorsque les manchons sont rapprochés, les dents des crabots s'engrènent les unes dans les autres, créant ainsi une liaison solide entre les deux arbres. Cela permet le transfert de la puissance et de l'entraînement du moteur vers le récepteur.

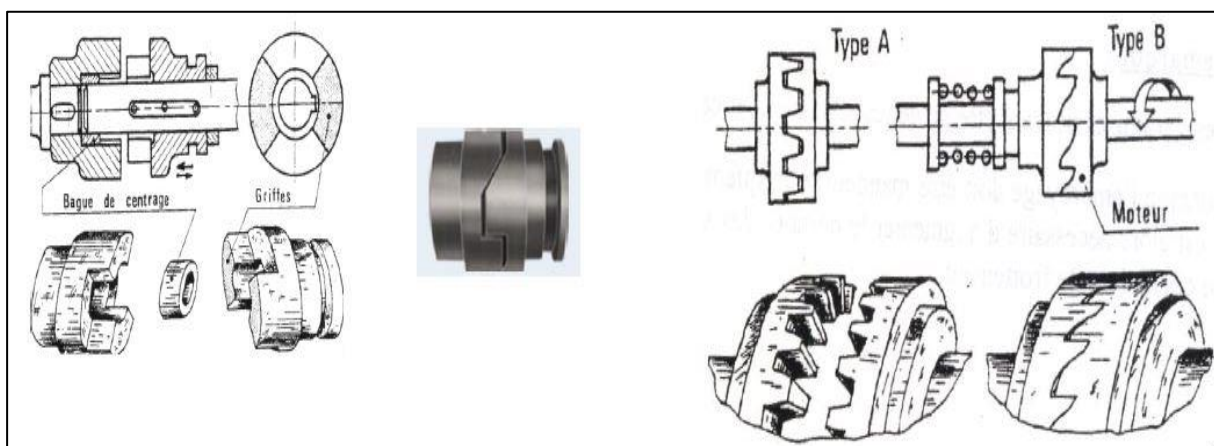
Il convient de noter que ces embrayages à crabots ne peuvent être utilisés que lorsque la manipulation de l'embrayage s'effectue à l'arrêt ou à une très faible vitesse. Ils ne sont pas conçus pour une utilisation lors de changements de vitesse à des vitesses de rotation élevées.

Lorsqu'il n'y a qu'un seul sens de rotation requis, la manipulation de l'embrayage est facilitée par l'utilisation d'une denture asymétrique. Cette denture asymétrique permet non seulement la réalisation de l'embrayage, mais elle permet également le débrayage automatique. Ainsi, lorsque l'arbre menant (celui qui transmet la puissance) ralentit ou s'arrête, l'arbre mené (celui qui est entraîné) a la possibilité de poursuivre son mouvement de manière autonome.



En résumé, les embrayages à crabots se composent de deux manchons avec des crabots, l'un coulissant et manœuvré par une fourchette. Lorsque les crabots s'engrènent, il y a un entraînement. Cependant, ces embrayages ne sont utilisables qu'à l'arrêt ou à très faible vitesse. Ils peuvent également incorporer une denture asymétrique pour faciliter la manœuvre d'embrayage et permettre le débrayage automatique lorsque l'arbre menant ralentit ou s'arrête. [1]

Il existe également d'autres types d'embrayages moins courants, tels que les embrayages magnétiques, les embrayages à poudre métallique, les embrayages à friction en céramique, et les embrayages à cône. Chaque type d'embrayage a ses propres avantages et inconvénients, et il est important de choisir le type d'embrayage qui convient le mieux à votre véhicule et à vos besoins.



Embrayages à griffes

Embrayages à dents

Figure1.10. Embrayages instantanée

## 5. Les caractéristiques des embrayages

Les embrayages sont des dispositifs mécaniques qui permettent de transférer la puissance du moteur vers les roues d'un véhicule en engageant et en désengageant la transmission. Les

caractéristiques mécaniques et les matériaux utilisés pour les embrayages dépendent du type d'embrayage, du véhicule, de la puissance du moteur et de la charge à laquelle il est soumis.

### **5.1. Les caractéristiques mécaniques et matériaux utilisés pour les embrayages**

Les principaux types d'embrayages sont les embrayages à friction, les embrayages hydrauliques et les embrayages électromagnétiques. Les embrayages à friction sont les plus courants et sont composés d'un disque d'embrayage, d'un volant d'inertie et d'un mécanisme de pression. Les matériaux utilisés pour les disques d'embrayage sont généralement des composites de friction, qui sont des matériaux composites à base de fibres de verre, de carbone ou de kevlar imprégnées de résines thermodurcissables. Ces matériaux offrent une résistance élevée à l'usure, à la température et aux vibrations.

Les volants d'inertie sont généralement en acier et peuvent être usinés ou coulés. Le mécanisme de pression est généralement constitué d'un diaphragme ou de ressorts hélicoïdaux qui maintiennent le disque d'embrayage contre le volant d'inertie. Les ressorts peuvent être en acier ou en acier inoxydable et doivent être conçus pour résister aux charges élevées et aux cycles de fatigue répétés.

Les embrayages hydrauliques sont utilisés principalement dans les véhicules lourds et offrent une grande capacité de charge. Ils sont composés d'un piston hydraulique qui applique une pression sur un disque d'embrayage en mouvement. Les matériaux utilisés pour les disques d'embrayage sont généralement les mêmes que pour les embrayages à friction, mais ils sont souvent renforcés pour résister aux charges plus élevées.

Les embrayages électromagnétiques sont utilisés principalement dans les transmissions automatiques et les systèmes de transmission à variation continue (CVT). Ils sont constitués d'un disque d'embrayage et d'un électro aimant qui applique une force pour engager ou désengager l'embrayage. Les matériaux utilisés pour les disques d'embrayage sont généralement des composites de friction similaires à ceux utilisés pour les embrayages à friction.

### **5.2. Les traitements de surfaces sur embrayages**

Les traitements de surface sur les embrayages sont utilisés pour améliorer les propriétés tribologiques des matériaux et pour prolonger la durée de vie de l'embrayage. Les traitements de surface couramment utilisés sont les suivants :

*- Le polissage*

Il s'agit d'un processus de lissage de la surface du disque d'embrayage pour réduire la rugosité et améliorer la résistance à l'usure. Le polissage peut être effectué à l'aide de diverses techniques, telles que le polissage manuel, le polissage électrolytique, le polissage par ultrasons, etc.

*- Le traitement thermique*

Il s'agit d'un processus de chauffage du disque d'embrayage à des températures élevées pour améliorer la dureté et la résistance à l'usure de la surface. Les traitements thermiques couramment utilisés comprennent le durcissement par induction et le trempage.

*- Le traitement de surface chimique*

Il s'agit d'un processus de modification chimique de la surface du disque d'embrayage pour améliorer la résistance à l'usure et la durabilité. Les traitements de surface chimiques couramment utilisés comprennent le traitement par nitro-carburation, le traitement par nitruration, le traitement par oxydation, etc.

*Le traitement cryogénique*

Il s'agit d'un processus de refroidissement du disque d'embrayage à des températures très basses pour améliorer la résistance à l'usure et la durabilité. Le traitement cryogénique est souvent utilisé en combinaison avec d'autres traitements de surface pour améliorer les propriétés tribologiques du disque d'embrayage.

*- Le revêtement par film mince*

Il s'agit d'un processus de dépôt d'un revêtement sur la surface du disque d'embrayage pour améliorer sa résistance à l'usure et sa durabilité. Les revêtements couramment utilisés sont le carbone amorphe, le carbone DLC (Diamond Like Carbon) et le chrome dur. Ces revêtements améliorent la résistance à l'usure, la dureté et la résistance à la corrosion de la surface du disque d'embrayage.

**6. La conclusion**

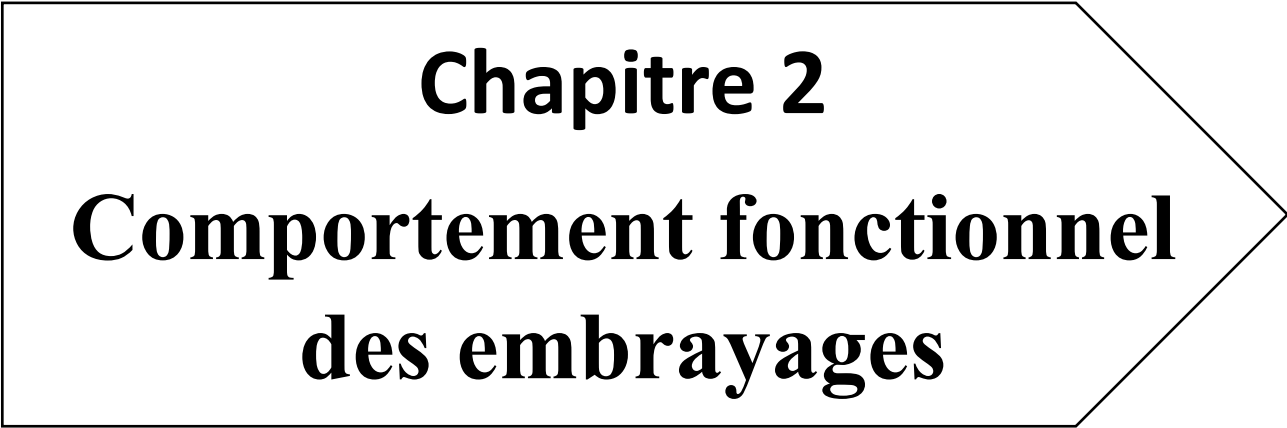
La synthèse de l'étude bibliographique sur les embrayages nous a permis de mettre en évidence l'importance de ces éléments dans les systèmes de transmission de puissance. Ces derniers sont utilisés dans différents types de véhicules et de machines industrielles, et ils ont évolué au fil du temps pour répondre aux besoins spécifiques de chaque application.

L'historique des embrayages a montré que leur utilisation remonte aux machines à vapeur du 18<sup>e</sup> siècle, mais c'est avec l'invention de la voiture au 19<sup>e</sup> siècle que leur utilisation s'est généralisée. Depuis lors, de nombreux types d'embrayages ont été développés, tels que l'embrayage à friction, l'embrayage à diaphragme, l'embrayage électromagnétique, l'embrayage centrifuge et l'embrayage hydraulique, pour n'en nommer que quelques-uns. Chaque type d'embrayage présente des avantages et des inconvénients, et il est essentiel de choisir le type approprié en fonction du véhicule et des exigences de conduite.

Le fonctionnement des embrayages a été décrit, mettant en évidence le rôle du mécanisme d'embrayage dans la transmission de puissance entre le moteur et la boîte de vitesses. L'actionnement de l'embrayage permet de relier ou de désolidariser le moteur de la transmission, permettant ainsi le passage des vitesses et le démarrage en douceur. Les embrayages modernes sont souvent équipés de systèmes hydrauliques ou électroniques pour une action plus précise et une meilleure performance.

L'étude cinématique et dynamique des embrayages a révélé l'importance de comprendre les mouvements et les positions relatives des différentes pièces qui composent l'embrayage, ainsi que leur comportement en fonctionnement. Cela permet de concevoir des embrayages efficaces et fiables, capables de transmettre le couple moteur de manière optimale et de résister aux contraintes rencontrées lors de la conduite.

Enfin, nous avons traité les caractéristiques mécaniques et les matériaux utilisés pour les embrayages, ou nous avons remarqué que les embrayages à friction sont généralement composés de disques d'embrayage en matériaux composites de friction, offrant une résistance élevée à l'usure et à la chaleur. Les volants d'inertie sont souvent en acier, offrant une grande résistance aux contraintes mécaniques. Les matériaux et les caractéristiques mécaniques sont choisis en fonction des exigences spécifiques de chaque application avec des traitements de surface adéquats pour améliorer les propriétés tribologiques des matériaux et prolonger leur durée de vie.



**Chapitre 2**  
**Comportement fonctionnel**  
**des embrayages**

## 1 Introduction

L'embrayage est un élément essentiel dans le système de transmission d'un véhicule. Il permet de connecter et de déconnecter le moteur de la boîte de vitesses, ce qui permet de changer de vitesse et de contrôler la puissance transmise aux roues. Dans ce chapitre, nous nous sommes concentrés sur l'analyse fonctionnelle des embrayages, en examinant en détail leurs différents composants et leur fonctionnement.

Nous avons abordé plusieurs aspects importants liés au dimensionnement des embrayages. Tout d'abord, nous avons étudié les calculs nécessaires pour déterminer les pressions de contact et les couples de transmission. Nous avons souligné l'importance de ces calculs pour assurer la durabilité et la performance de l'embrayage. En effet, la pression de contact entre les plaques d'embrayage, la surface des plaques de friction, le diamètre du disque d'embrayage et la vitesse de rotation sont autant de facteurs qui influent sur les résistances de l'embrayage.

## 2 Mise en situation

Quelle que soit la disposition des organes de transmission, le système d'embrayage comprend l'ensemble des pièces situées entre le moteur et la boîte de vitesse et dont la fonction globale est définie par l'organigramme de la figure 2.1 et les conditions à satisfaire indiqués au tableau 2.1, de ce fait on peut préconiser deux solutions technologiques à savoir :

- Un embrayage mécanique à diaphragme et disque de friction
- Un embrayage hydraulique pour transmission automatique (convertisseur de couple)

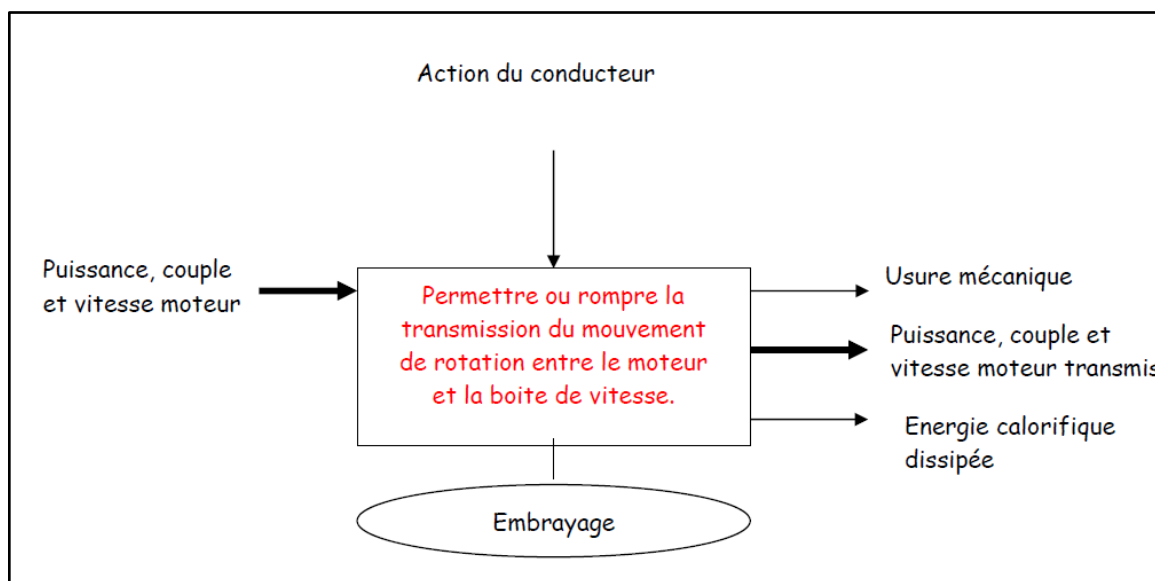


Figure 2.1. Organigramme de mise en situation

Nécessiter peu d'entretien	Remplacement peu aisé.
Etre progressif	Permettre le démarrage sans brutalité grâce à un léger glissement (patinage).
Etre adhérent	Position "embrayé", il ne doit plus patiner.
Etre résistant	Aux frottements (usure) et aux températures élevées.
Etre facile à manœuvrer	Peu d'effort sur la pédale.

Tableau 2.1. Les conditions à satisfaire.

### 3 Analyse de l'embrayage à diaphragme

Embrayage à disques doit permettre :

- Un accouplement progressif par friction sans usure rapide des surfaces :
- Une progressivité de l'accouplement sans à-coups dans la transmission :
- Une évacuation rapide de l'énergie calorifique dégagée pendant l'accouplement :
- Une transmission intégrale (sans glissement), dans sa phase - embrayée -, quels que soient les couples à transmettre :
- Une manœuvre facile et un effort réduit de la part du conducteur.

Un disque d'embrayage est garni, sur ses deux faces, d'une matière dont le coefficient de frottement est élevé et qui résiste bien à la chaleur. Il est lié en rotation avec l'arbre primaire (arbre d'entrée) de la boîte de vitesses et libre en translation sur celui-ci. Serré entre le volant et le plateau presseur par des ressorts de pression, il est entraîné par adhérence.

Les avantages de l'embrayage à diaphragme sont les suivants :

- grande progressivité au démarrage.
- faible effort à exercer sur la pédale.
- force pressante sur le disque peu variable, malgré l'usure des garnitures.
- meilleure ventilation et bon équilibrage dynamique de l'ensemble.

#### 4 Constitution d'un embrayage à diaphragme

La figure 2.2, indique en vue éclatée la constitution d'un embrayage à diaphragme. La figure 2.3, représente les différents éléments de l'embrayage et la figure 2.4, montre différentes photos du mécanisme et des surfaces frottantes de l'embrayage [9]

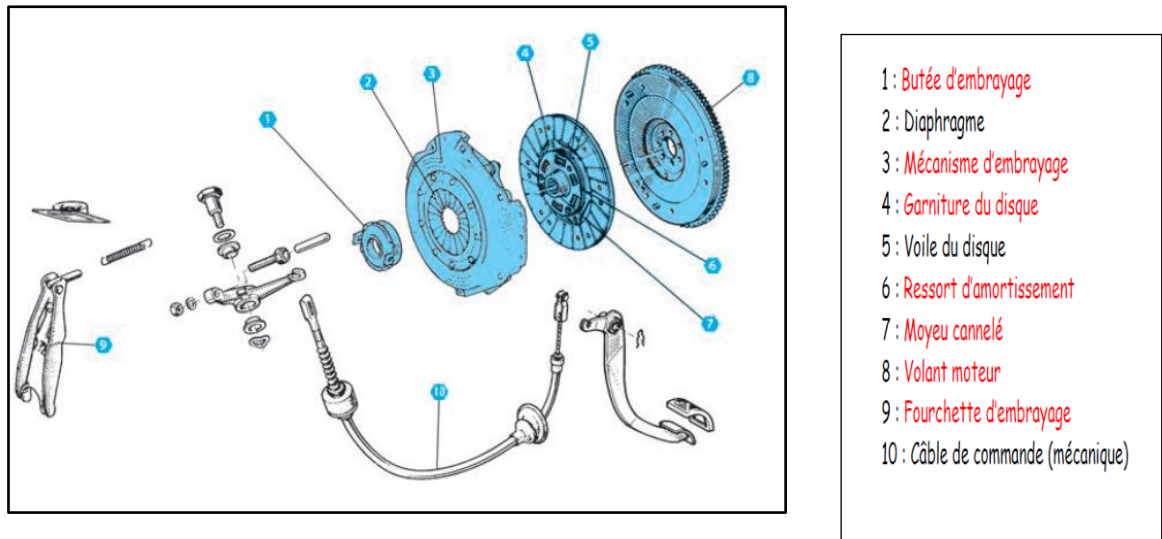
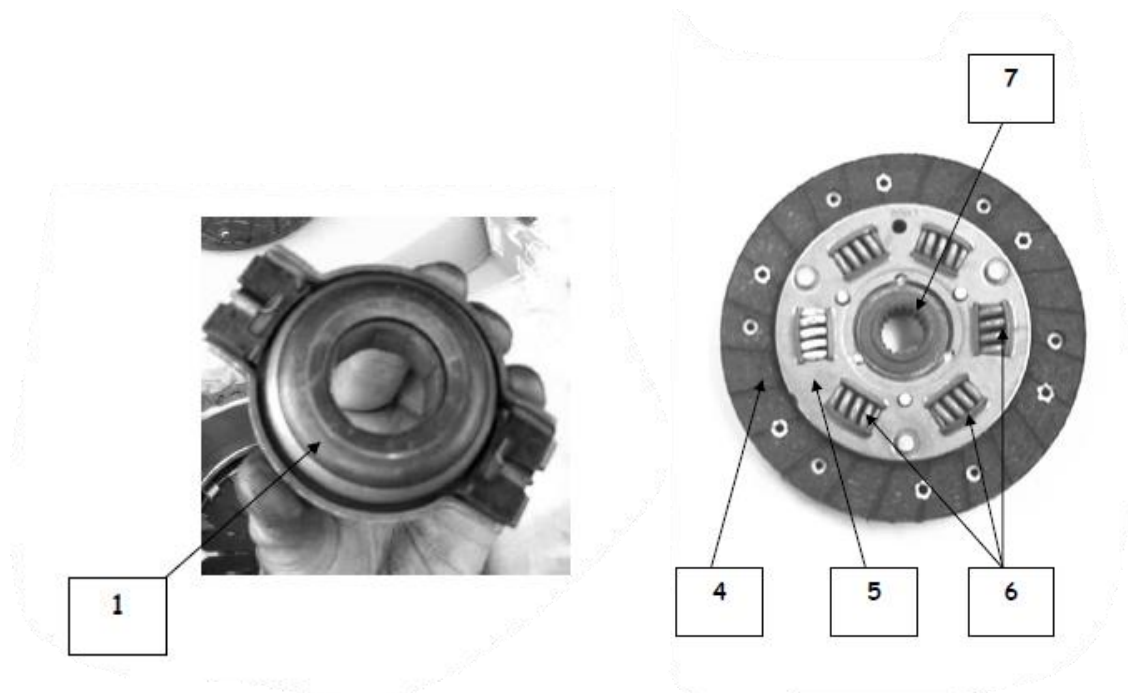


Figure 2.2. Vue éclatée de l'embrayage à diaphragme





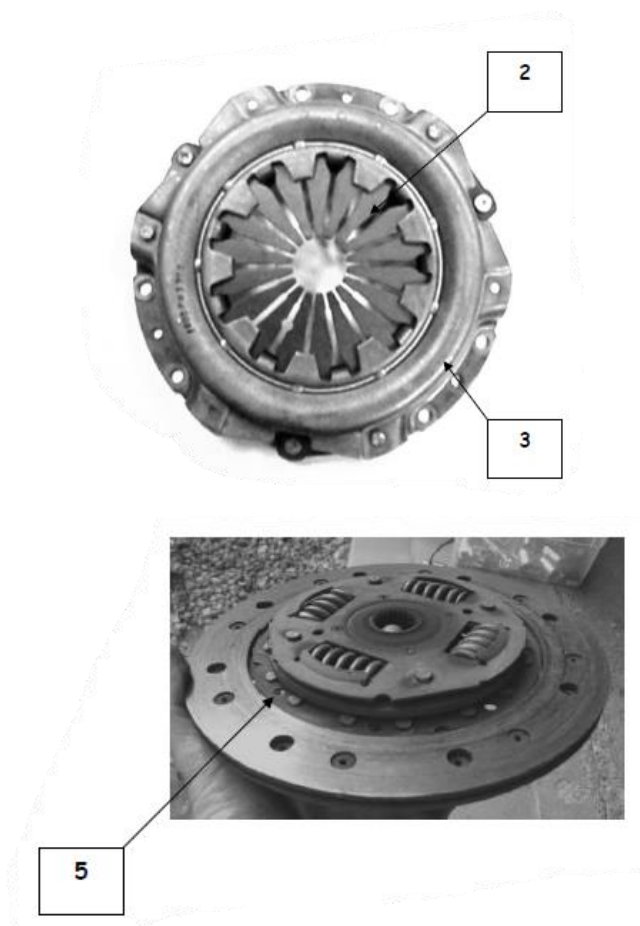


Figure 2.3. Photos des constituants de l'embrayage

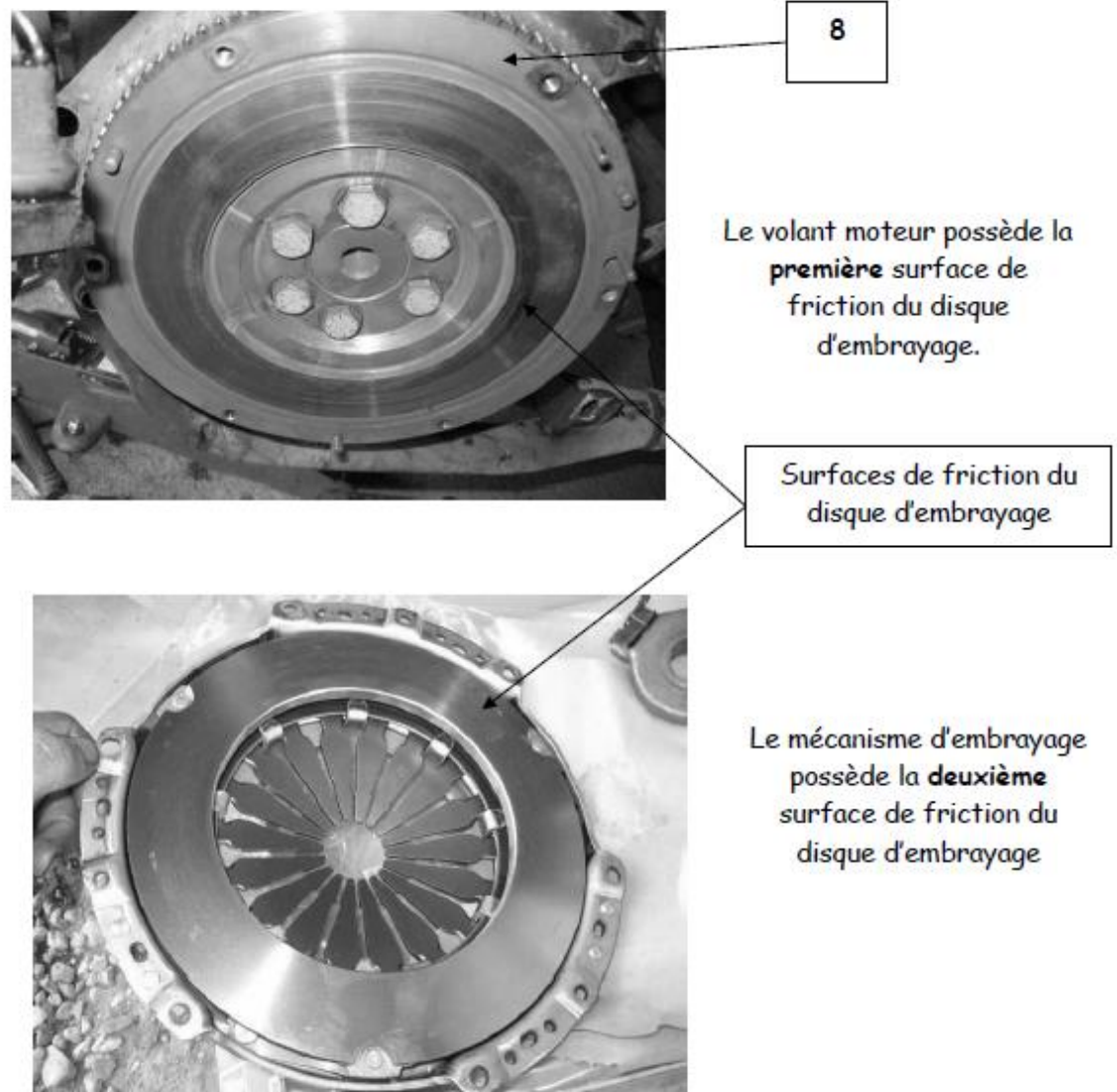


Figure 2.4. Photos des surfaces frottantes

#### 4.1. Rôle des éléments constitutif [10]

Le volant moteur : Il sert de support au mécanisme d'embrayage et possède une surface de friction pour le disque d'embrayage.

Le disque d'embrayage : C'est une pièce en tôle, sur laquelle viennent se fixer les garnitures. Une liaison par moyeu cannelé est solidaire de l'arbre primaire de la boîte de vitesse des ressorts, situés sur le moyeu, permettent d'éviter des à-coups lors des phases d'embrayage trop rapides et violentes.

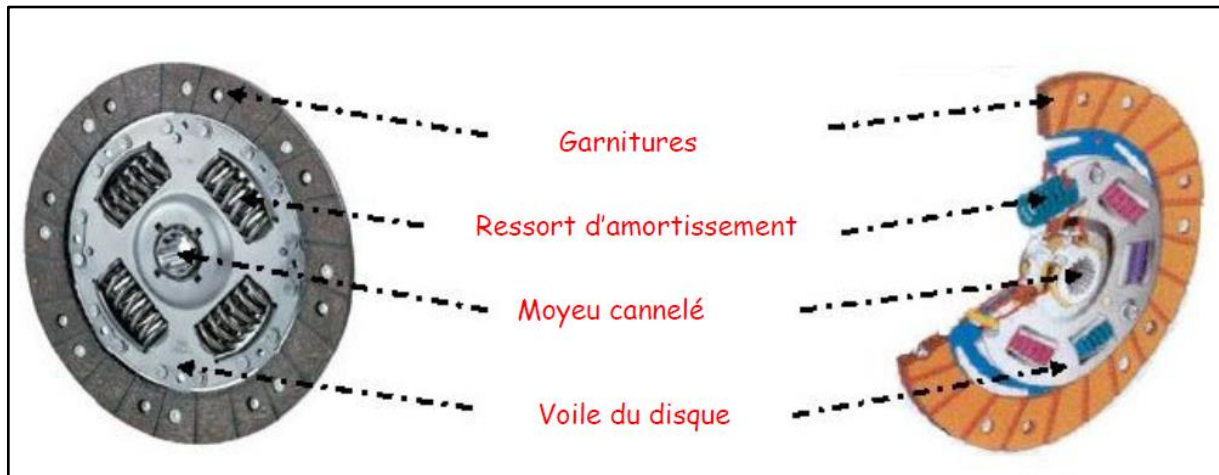


Figure 2.5. Les différents éléments de disque d'embrayage

Le mécanisme à diaphragme : Il est fixé sur le volant moteur et assure la liaison entre celui-ci et le disque d'embrayage. Il possède un plateau de pression (surface de friction pour le disque d'embrayage) qui plaque le disque contre le volant moteur et un diaphragme qui joue le rôle de ressorts.

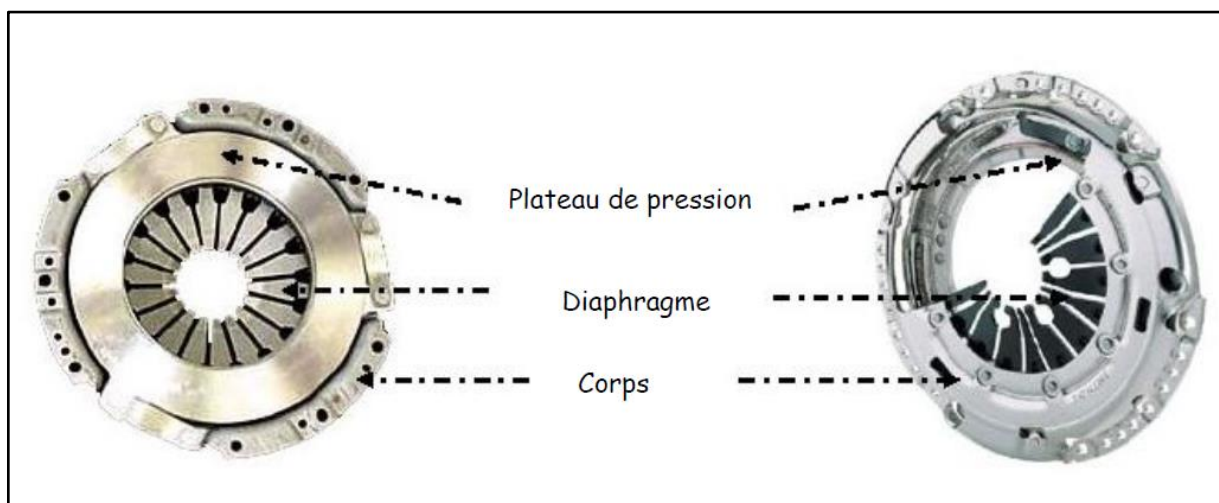


Figure 2.6 Les différents éléments de diaphragme

La butée de débrayage [10] : Son rôle consiste à commander le mécanisme d'embrayage en transmettant la force venant de la commande d'embrayage (câble par exemple).

Cette force s'exerce sur le diaphragme, ce qui aura pour conséquence de libérer le pincement du disque et donc de désaccoupler le moteur de la boîte de vitesses. La butée est un roulement à bille.

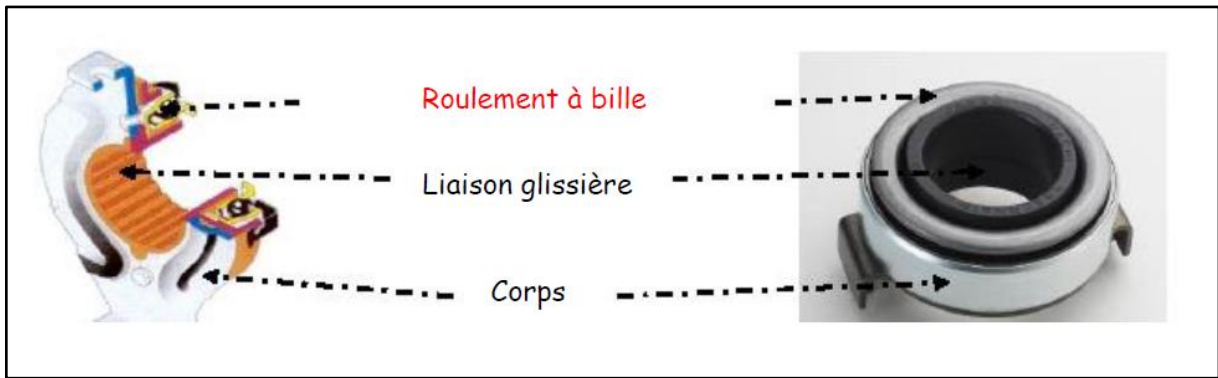


Figure 2.7 Les différents éléments de La butée de débrayage

#### 4.2. Analyse Fonctionnelle

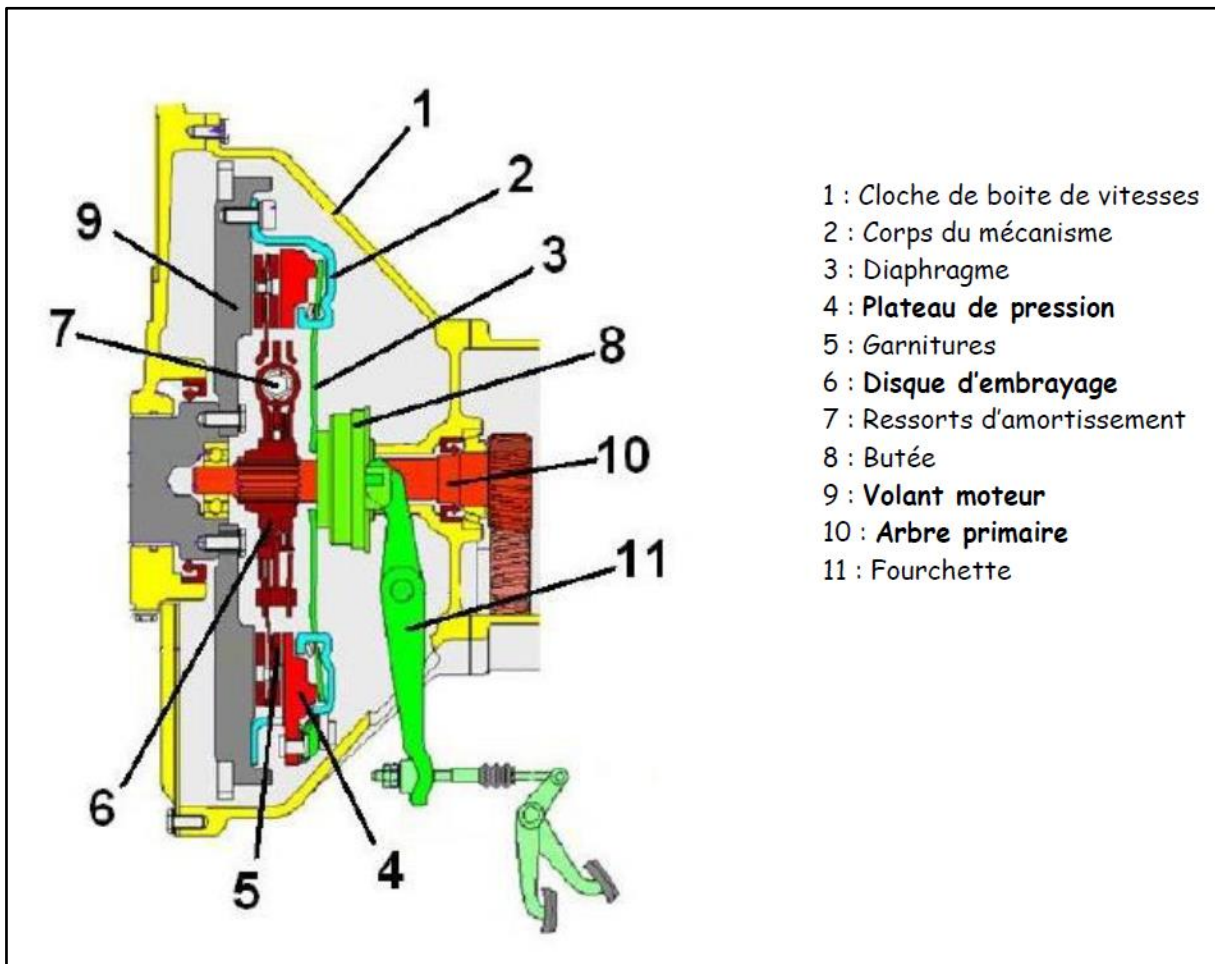


Figure 2.8 Les différents éléments de l'embrayage

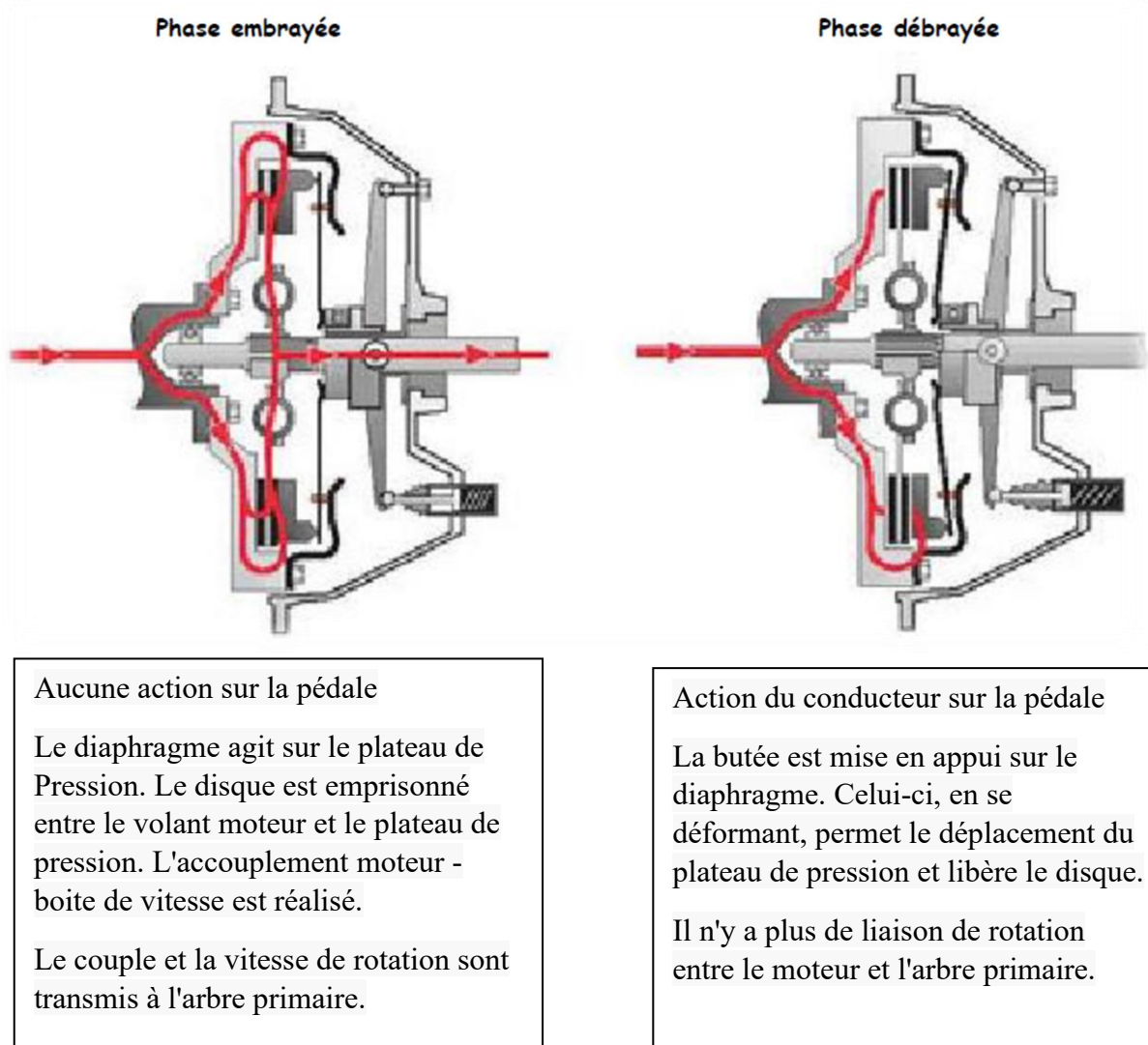


Figure 2.9 fonctionnement de l'embrayage

### 4.3. Système de commande

Pour actionner le système d'embrayage, le conducteur dispose généralement d'une pédale sauf pour les dispositifs électroniques ou automatique. Cette pédale est reliée soit à un système mécanique, soit à un système hydraulique.

Le jeu entre le point haut de la pédale d'embrayage et le point où la pédale rencontre une résistance (appui sur le diaphragme) s'appelle la GARDE d'EMBAYAGE.

Cette garde d'embrayage se règle de nos jours automatiquement.



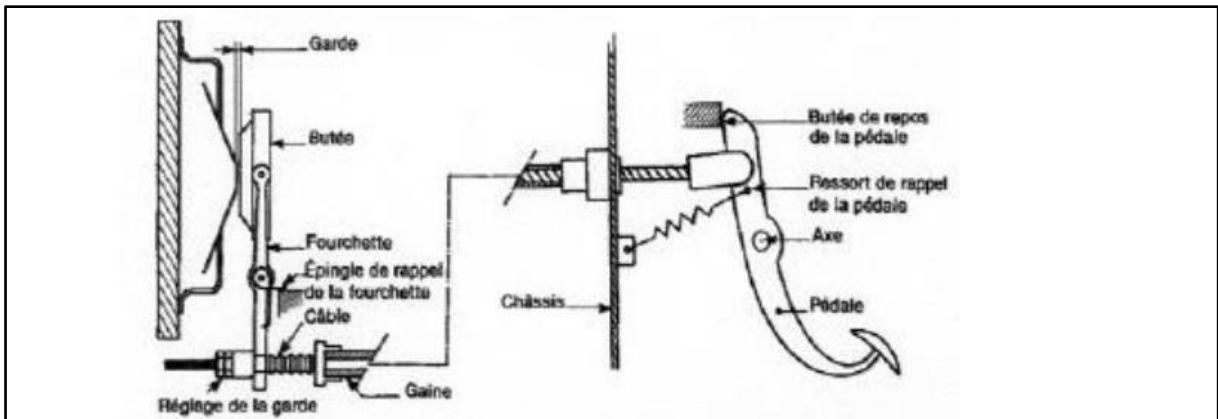


Figure 2.10 commande mécanique par câble

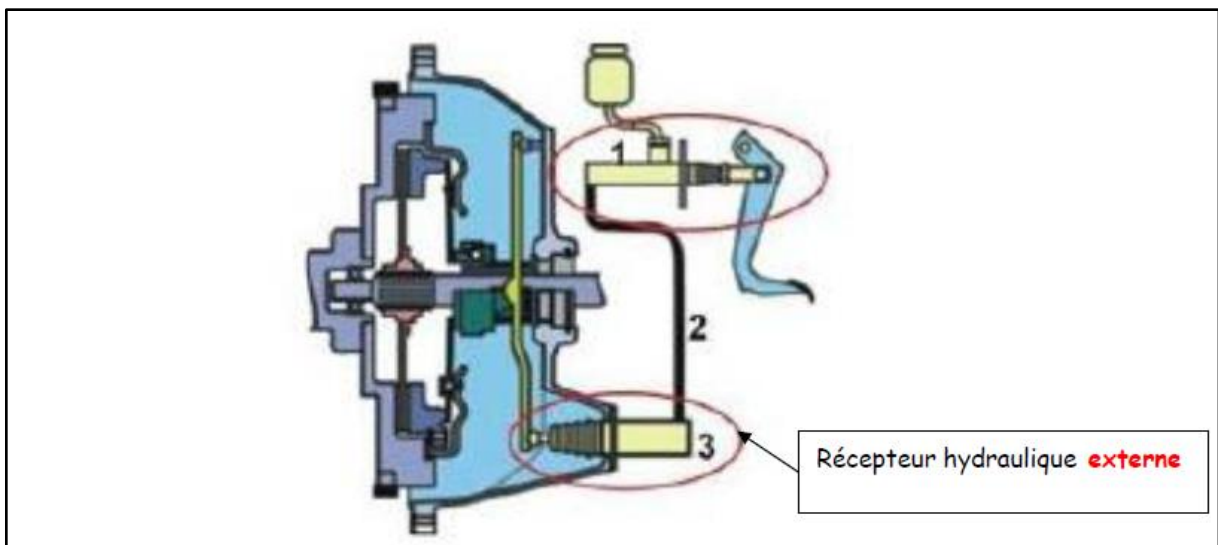


Figure 2.11 commande hydraulique récepteur hydraulique externe

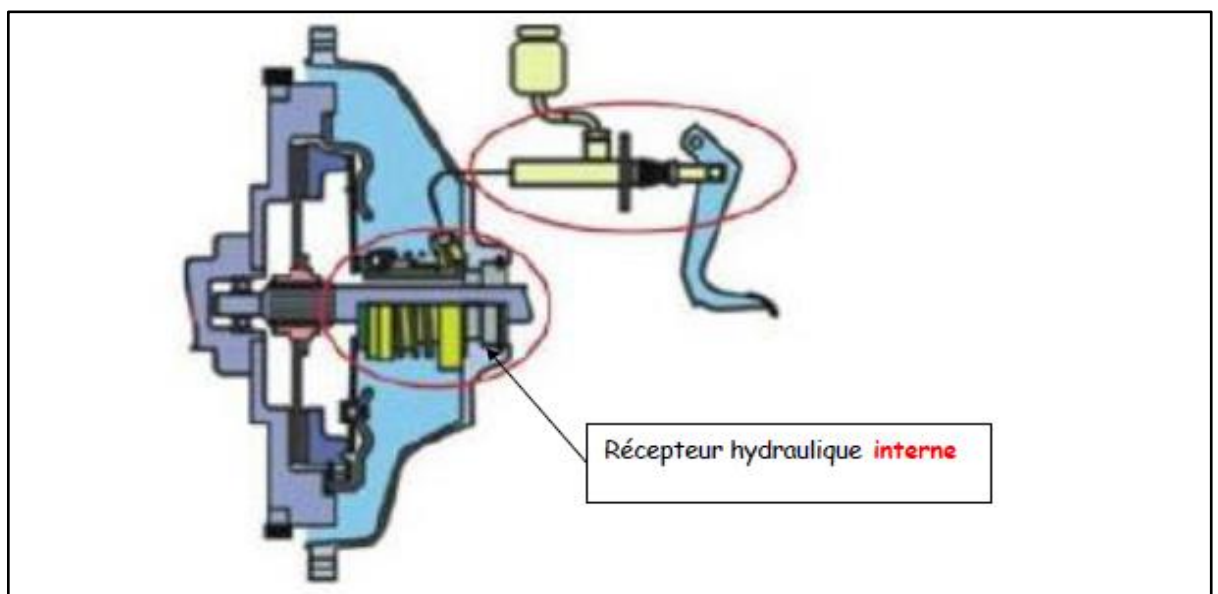


Figure 2.12 commande hydraulique

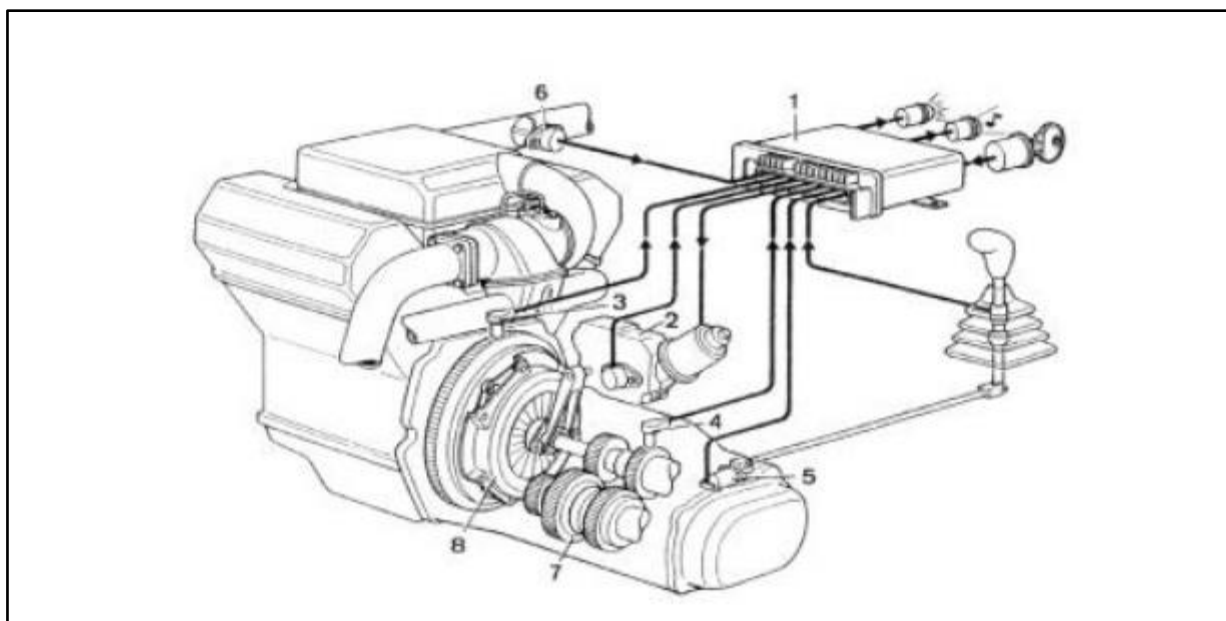


Figure 2.13 commande électronique

## 5 Comportement des embrayages

La Figure 2.14, représente de manière simplifiée le schéma du dispositif d'embrayage. Les éléments en bleu sont entraînés par le moteur tandis que les éléments en gris sont liés à la boîte de vitesse.

Deux cas sont à distinguer ; le cas où la vitesse de glissement est nulle lorsque la force extérieure  $F_e(t)$  est inférieure à la force de frottement  $F_f(t)$  et ne permet donc pas d'initier le mouvement et le cas où la vitesse de glissement est non nulle où la force de frottement  $F_f(t)$  est inférieure à la force extérieure  $F_e(t)$ . En ce qui concerne l'embrayage, la force de frottement  $F_f(t)$  correspond au couple transmis par l'embrayage et la force extérieure correspond au couple moteur.

La force normale  $F_N(t)$  appliquée par le diaphragme de l'embrayage dépend de la position  $P(t)$  de la butée d'embrayage. Le coefficient de frottement  $\mu$  dépend des propriétés mécaniques de la friction en contact avec le volant moteur et le plateau de pression.

$$F_f(t) = \begin{cases} \mu \cdot F_N(t) & \text{si } \Delta\omega(t) \neq 0 \\ F_e(t) & \text{si } \Delta\omega(t) = 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

Il en ressort que les embrayages se calcul à la résistance et à l'usure

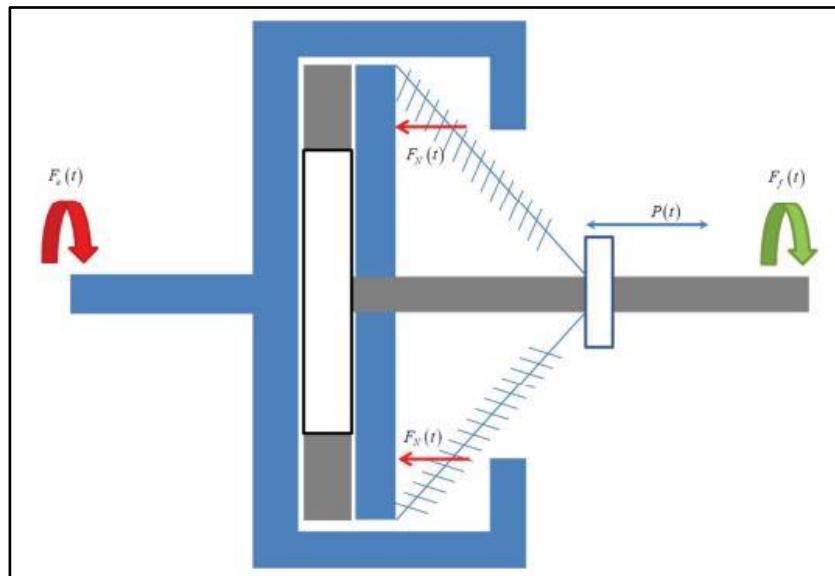


Figure2.14 Schématisation du frottement de l'embrayage

### 5.1.Comportement statique et dynamique

Le calcul des résistances des embrayages permet de déterminer la force nécessaire pour transmettre la puissance du moteur aux roues, ainsi que la résistance de l'embrayage à cette force. Les calculs de résistances des embrayages dépendent de plusieurs facteurs, notamment :

La pression de contact entre les plaques d'embrayage : Cette pression détermine la force nécessaire pour faire adhérer les plaques d'embrayage et transmettre le couple moteur aux roues. Cette pression est généralement déterminée par la force exercée par le diaphragme ou le ressort.

La surface des plaques d'embrayage : La surface des plaques d'embrayage influe sur la quantité de force nécessaire pour les faire adhérer et transmettre le couple moteur aux roues.

La friction entre les plaques d'embrayage : La friction entre les plaques d'embrayage détermine la force nécessaire pour les faire adhérer et transmettre le couple moteur aux roues. Cette friction dépend des matériaux utilisés pour les plaques d'embrayage.

Le diamètre du disque d'embrayage : Le diamètre du disque d'embrayage influe sur la force nécessaire pour faire adhérer les plaques d'embrayage.

La vitesse de rotation : La vitesse de rotation des plaques d'embrayage influe sur la force nécessaire pour les faire adhérer et transmettre le couple moteur aux roues.



Pour calculer les résistances des embrayages, des modèles mathématiques complexes peuvent être utilisés, impliquant des équations différentielles et des calculs de forces et de moments. Ces modèles peuvent varier en fonction du type d'embrayage et de ses spécifications.

## 5.2. Comportement à l'usure [11]

Nous donnons un aperçu sur le comportement à l'usure des embrayages, mais ne sera pas traité dans nos calculs dans ce chapitre.

L'usure est un phénomène qui se produit lorsque les surfaces en contact subissent des dommages en raison d'un frottement souvent élevé. Le frottement peut se manifester de différentes manières : mécanique, géométrique et énergétique.

Une classification des types d'usure a été proposée par Stachowiak. Pour mieux comprendre les différents mécanismes en jeu. Cette classification distingue les types d'usure suivants :

- **Usure par abrasion, érosion ou cavitation** : Ce type d'usure se produit lorsque des particules solides en mouvement viennent en contact avec la surface d'un matériau, provoquant l'usure et l'élimination de matière. L'abrasion est causée par des particules dures qui frottent contre la surface, tandis que l'érosion est due à l'action d'un fluide (liquide ou gaz) qui transporte des particules et les fait impacter la surface. La cavitation se produit lorsque des bulles de gaz se forment et implosent rapidement, créant des chocs sur la surface.

- **Usure par fatigue** : Ce type d'usure résulte du passage répété d'un solide sur une surface. Les contraintes cycliques engendrées par ce mouvement répétitif peuvent provoquer des microfissures et des déformations progressives, entraînant finalement une défaillance du matériau.

- **Usure adhésive** : L'usure adhésive se produit en raison des forces d'attraction interatomiques entre les surfaces en contact. Lorsque deux surfaces glissent l'une contre l'autre, des adhésions temporaires peuvent se former et se rompre, entraînant l'arrachement de matière et l'usure des surfaces.

- **Usure corrosive** : Ce type d'usure est provoqué par des réactions chimiques entre les surfaces en contact et le milieu environnant. Lorsque des substances corrosives sont présentes, elles peuvent attaquer le matériau, provoquant ainsi son usure.

- **Usure par petits débattements (fretting)** : Cette usure se produit lorsque de légers mouvements vibratoires ou oscillatoires se produisent entre deux surfaces en contact. Ces

mouvements peuvent entraîner l'usure et l'endommagement des surfaces, même si les débattements sont minimes.

En utilisant cette classification, il devient possible de mieux comprendre les mécanismes d'usure spécifiques qui peuvent se produire dans différentes situations. Cela permet de développer des stratégies de prévention et de protection appropriées pour prolonger la durée de vie des matériaux et des composants.[12]

## **6 Différente méthode de calculs**

Il existe différentes méthodes de calcul utilisées pour l'analyse et la conception des embrayages. Voici quelques-unes des méthodes couramment utilisées :

### ***- Calcul des contraintes de contact***

Cette méthode consiste à calculer les contraintes de contact entre les surfaces de friction de l'embrayage, en prenant en compte la pression de contact, les forces appliquées et les caractéristiques géométriques de l'embrayage. Différentes théories peuvent être utilisées, telles que la théorie de Hertz ou la théorie des plaques élastiques.

### ***- Calcul de la capacité de transmission de couple***

Cette méthode vise à déterminer la capacité de l'embrayage à transmettre le couple entre les arbres d'entrée et de sortie. Elle prend en compte les caractéristiques de frottement des surfaces de friction, les forces appliquées et les propriétés géométriques de l'embrayage.

### ***- Calcul de la durée de vie et de la résistance à la fatigue***

Cette méthode évalue la durée de vie de l'embrayage en prenant en compte les charges cycliques et les contraintes auxquelles il est soumis. Elle implique des calculs de résistance à la fatigue en utilisant des critères tels que la contrainte de Von Mises ou les critères de fatigue spécifiques aux matériaux utilisés.

### ***- Simulation numérique par éléments finis***

Cette méthode utilise des logiciels de simulation par éléments finis pour modéliser l'embrayage et effectuer des analyses de contraintes, de déformations et de comportement dynamique. Elle permet d'obtenir des résultats précis en prenant en compte des conditions de charge complexes et des interactions entre les différentes parties de l'embrayage.

### - Approche expérimentale

Outre les calculs analytiques, les essais expérimentaux sont également couramment utilisés pour caractériser les performances des embrayages. Ils peuvent inclure des tests de friction, des tests de durée de vie, des mesures de couple transmis, etc.

#### 6.1. Calculs dimensionnels [13]

Les calculs concernent les embrayages à disques. Considérons la figure 2.15, on va calculer les caractéristiques suivantes :

- La force axiale et la force de pression
- Le couple transmissible

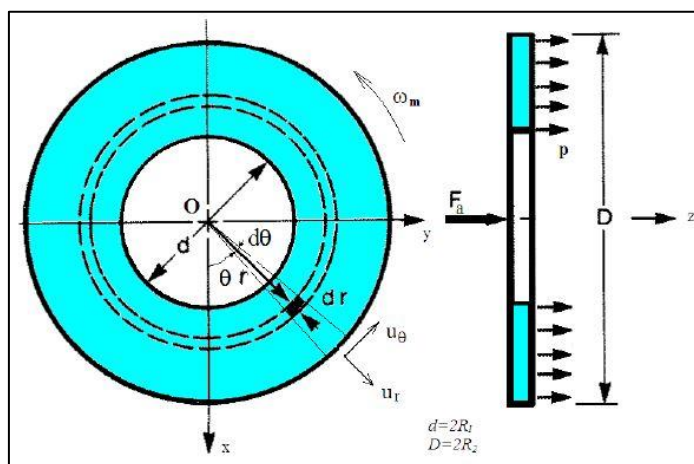


Figure 2.15 Caractéristiques pour les calculs dimensionnels

##### 6.1.1. Force axiale et pression de contact

La force résultante des forces de contact est :

$$\vec{F} = \int_{Q \in S} \vec{f}(Q) dS = \int_0^{2\pi} \int_{R_1}^{R_2} (p \cdot \vec{z} + f \cdot p \vec{f}\theta) r dr d\theta \quad (2.2)$$

On obtient :

$$\vec{F} = \pi p (R_2^2 - R_1^2) \vec{z} \quad (2.3)$$

L'équilibre du disque implique :

$$\vec{F} = \vec{F}_a = F_a \quad (2.4)$$

D'où la relation qui relie la pression appliquée en tout point du disque à la force axiale exercée :

$$\vec{F} = \pi p (R_2^2 - R_1^2) \quad (2.5)$$

$$\text{La pression de contact vaut : } p = \frac{F_a}{\pi(R_2^2 - R_1^2)} \quad (2.6)$$

Cette pression doit vérifier la condition de résistance au matage.

### 6.1.2. Couple transmissible [13]

Le moment résultant par rapport au point O des forces de contact est :

$$\vec{M}_0 = \int_{Q \in S} \overrightarrow{OQ} \wedge \vec{f}(Q) dS = \int_0^{2\pi} \int_{R_1}^{R_2} r \vec{f}_r \wedge (p \cdot \vec{z} + f \cdot p \vec{f}_\theta) r dr d\theta \quad (2.7)$$

$$\text{On obtient : } \vec{M}_0 = \frac{2}{3} \pi f p (R_2^3 - R_1^3) \vec{z} \quad (2.8)$$

Pour le calcul du couple maximal transmissible, on admet habituellement, qu'un embrayage est constitué d'un ou plusieurs disques avec contact bilatéral. Cependant, afin de simplifier

La mise en place des résultats, nous allons faire l'étude d'un système d'embrayage à contact unilatéral.

On suppose la densité de répartition de la pression constante sur l'ensemble de la surface frottant du disque.

On note :

- Cf (Nm) le couple maximal transmissible par l'embrayage,
- N (N), l'effort presseur axial générateur de la pression de contact,
- f le coefficient de frottement,
- r2 le rayon extérieur de la surface frottant,
- r1 le rayon intérieur de la surface frottant.

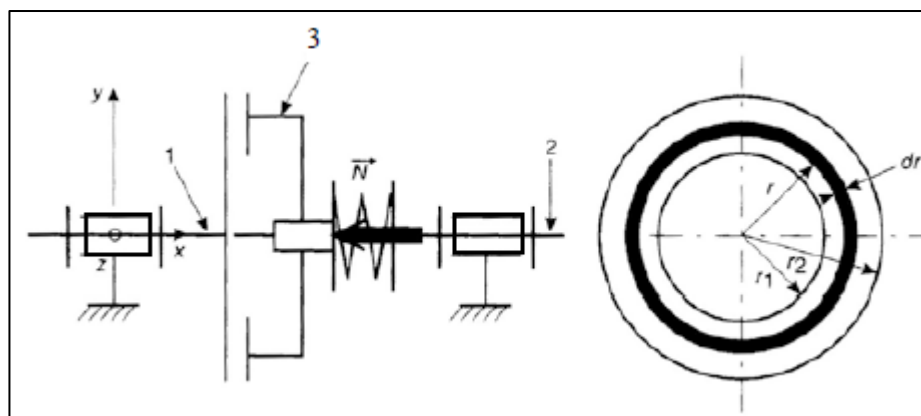


Figure 2.16 Caractéristiques pour calculé le couple transmissible

Pour passer d'une modélisation locale des actions mécaniques transmissibles par le contact entre les deux disques de friction à une modélisation globale, il faut tout d'abord définir un petit élément de surface :  $dS = 2\pi r \cdot dr$  (2.9)

En ce qui concerne la densité de répartition de pression, il existe deux modèles : [14]

- Pression de contact  $p$  uniformément répartie : l'usure instantanée sera alors inégale sur la garniture des disques de friction (avec une usure qui augmentera avec le rayon),
- Pression de contact  $p_r$  répartie suivant une loi hyperbolique :

$$p_r = p_{r1} \cdot (r_1/r) \quad (2.10)$$

avec  $r_1$  le rayon minimal et  $p_{r1}$  la pression de contact pour ce rayon.

Pour ce deuxième modèle, l'usure des garnitures de disque sera constante sur l'ensemble du disque.

Ces deux modèles donnent des résultats sensiblement identiques pour peu que les rayons  $r_1$  et  $r_2$  soit relativement proches,

Ce qui est souvent le cas, nous n'étudierons donc que le cas simple de la répartition de pression constante.

On peut donc exprimer l'effort presseur  $N$  et en déduire la valeur de  $p$  :

$$dN = p \cdot dS \rightarrow N = p \cdot S \rightarrow p = \frac{N}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} \quad (2.11)$$

On peut ensuite exprimer le couple transmissible à la limite à l'adhérence :

$$dCf = r \cdot dT \rightarrow dCf = r f \cdot dN \rightarrow dCf = r f p \cdot dS \quad (2.12)$$

On intègre sur l'ensemble de la surface de friction et on obtient :

$$cf = \int_{r_1}^{r_2} 2\pi r^2 f p . dr \rightarrow cf = \frac{2\pi}{3} f p (r_2^3 - r_1^3) \quad (2.13)$$

On remplace alors p par sa valeur en fonction de l'effort presseur N et on trouve :

$$Cf = \frac{2}{3} N f \frac{(r_2^3 - r_1^3)}{(r_2^2 - r_1^2)} \quad (2.14)$$

Dans le cas d'embrayage avec plusieurs disques et n surfaces frottantes, la relation ci-dessus peut s'écrire  $Cf = \frac{2n}{3} N f \frac{(r_2^3 - r_1^3)}{(r_2^2 - r_1^2)}$  (2.15)

## 6.2. Calculs des contraintes

Le calcul des contraintes dans les embrayages dépend de plusieurs facteurs, notamment la géométrie de l'embrayage, les matériaux utilisés, les conditions d'exploitation (charge, vitesse, température, etc.) et les forces appliquées. Il existe différentes méthodes pour calculer les contraintes dans les embrayages.

### 6.2.1. Critère de von Mises [15]

La figure 2.17. Indique le comportement d'un matériau soumis à des contraintes avec les critères de Von Mises et de Tresca

La fonction f du critère de von Mises est définie en fonction du second invariant du déviateur de contraintes et s'écrit :

$$f = \sqrt{3J_2} - \sigma_{yt} \quad (2.16)$$

Où :

$$J_2 = \left(\frac{1}{6}\right) [(\sigma_I - \sigma_{II})^2 + (\sigma_{II} - \sigma_{III})^2 + (\sigma_{III} - \sigma_I)^2] \quad (2.17)$$

$\sigma_{yt}$  : est la limite d'élasticité en traction simple

Dans l'espace des contraintes principales à trois dimensions, le critère de von Mises s'écrit donc :  $f = (\sigma_I - \sigma_{II})^2 + (\sigma_{II} - \sigma_{III})^2 + (\sigma_{III} - \sigma_I)^2 - 2\sigma_{yt}^2 = 0$  (2.18)

Le critère de von Mises est représenté dans l'espace des contraintes principales par cylindre à base circulaire axé sur la trisectrice du repère du repère  $(\sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III})$ .

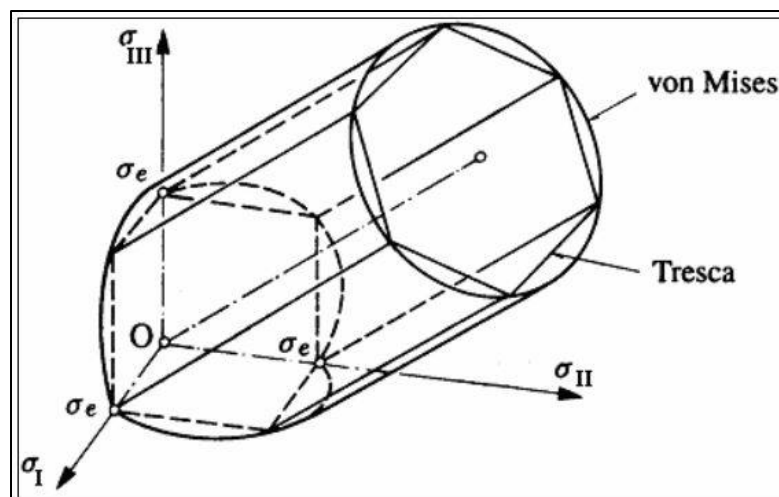


Figure 2.17 Critères de Tresca-Guest et de von Mises

### 6.2.2. Les conditions de résistance

On modélise la géométrie lors du contact de l'embrayage comme étant le contact ou une pièce infiniment rigide qui est appliquée sur une plaque épaisse, reposant elle-même sur une base rigide (figure 2.18), (le contact plan ou surfacique est généralement un contact rigide), cette surface est souvent un cylindre ou rectangle. Le calcul de la distribution de la pression et des déformations de ce type est difficile, il a surtout été développé en mécanique des sols. Mais les relations de la résistance des matériaux et les critères de la limite d'élasticité restent toujours valides pour tous les types de contact.

Les conditions de résistances sont :

$$\sigma_{max} \leq P_{max} \quad (2.19)$$

$$P_{max} = \frac{N}{S} \quad (2.20)$$

En introduisant ces équations dans une seule équation on obtient :

$$\sigma_{max} \leq \frac{N}{S} \quad (2.21)$$

Les contacts plans sont soumis aux critères de résistances des corps rigide (Tresca, Hill, Von-mises).

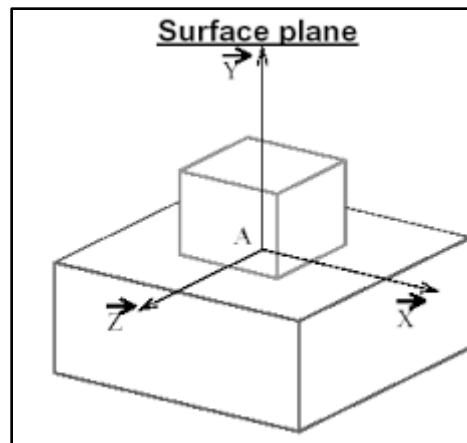


Figure 2.18 géométrie équivalente contact plan

## 7 Conclusion

Nous sommes intéressés dans ce chapitre à l'analyse fonctionnelle des embrayages à membrane, où nous avons passés en revue les différents constituants et leur fonctionnement, entre autres nous avons traité les différents calculs intervenant dans le dimensionnement à savoir les pressions et les couple de transmission ainsi que leurs résistances. Dans ce contexte nous avons montrés que la pression de contact entre les plaques d'embrayage, la surface des plaques de friction, le diamètre du disque d'embrayage et la vitesse de rotation sont autant de facteurs qui influent sur les résistances de l'embrayage. Ces calculs sont importants pour dimensionner l'embrayage et assurer sa durabilité et sa performance. Il est à remarquer que les différentes méthodes de calcul proposées sont souvent utilisées de manière complémentaire pour obtenir une analyse approfondie des performances et des caractéristiques des embrayages. Le choix de la méthode dépendra de divers facteurs tels que la complexité de l'embrayage, les ressources disponibles et les objectifs de conception.



# **Chapitre 3**

**Simulation Avec Ansys pour le calcul  
des contraintes dans les embrayages**

## 1. Introduction

La méthode des éléments finis (abrégée MEF) représente une modalité d'obtenir une solution numérique correspondant à un problème spécifique. Cette méthode n'offre pas une formule pour une certaine solution et ne résout pas une classe de problèmes. La MEF est une méthode approximative à moins qu'un certain problème puisse être extrêmement simple conduisant ainsi à une formule exacte toujours valable. Dans ce contexte nous présentons dans ce chapitre, la procédure de simulation d'un disque d'embrayage par la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel Ansys 2019 R3. Les différentes étapes de la simulation seront développées pour quatre matériaux soumis à trois niveaux de pressions. Pour ce travail, nous avons opté pour le module statique structurel afin de réaliser la simulation et d'analyser les résultats.

## 2. Les éléments finis :

La méthode des éléments finis (MEF) repose sur un concept simple : la subdivision (discrétisation) d'une forme complexe en un grand nombre de sous-domaines élémentaires de forme géométrique simple, appelés éléments finis, qui sont interconnectés par des points appelés nœuds. Chaque élément est traité indépendamment en ce qui concerne son comportement mécanique, puis ces éléments sont assemblés de manière à satisfaire l'équilibre des forces et la compatibilité des déplacements à chaque nœud.

La MEF utilise des approximations simples des variables inconnues à l'intérieur de chaque élément afin de transformer les équations aux dérivées partielles en équations algébriques. Les nœuds et les éléments n'ont pas nécessairement de signification physique particulière, mais sont choisis en fonction des considérations de précision de l'approximation.

En résumé, la méthode des éléments finis subdivise une forme complexe en éléments finis connectés par des nœuds, puis approxime les variables inconnues à l'intérieur de chaque élément pour obtenir un système d'équations algébriques. Cette approche permet de résoudre des problèmes complexes en découpant le domaine en parties plus simples tout en garantissant l'équilibre des forces et la compatibilité des déplacements [16].

### 2.1. Les différentes étapes de la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis se résume en sept étapes :

- ✓ Discrétisation du domaine en un maillage d'éléments finis.
- ✓ Interpolation en respectant les critères de convergence.
- ✓ Calcul des caractéristiques de chaque élément.

- ✓ Assemblage.
- ✓ Introduction des conditions aux limites essentielles et résolution ;
- ✓ Évaluation, dans chaque élément, des grandeurs utiles (contraintes, déplacements).
- ✓ Jugement de manière critique les résultats obtenus.

[17]

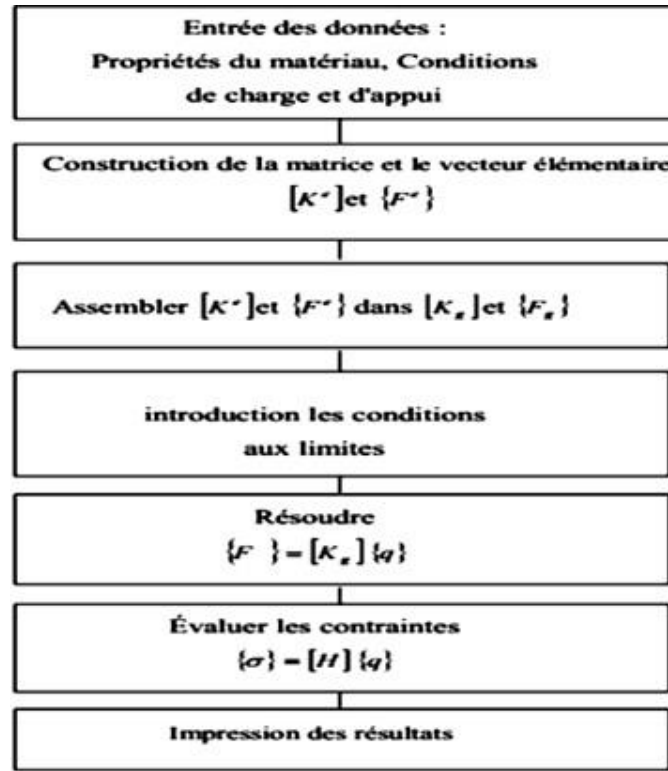


Figure 3.1. Organigramme de résolution

## 2.2. Les étapes pratiques de calcul par éléments finis

Pour utiliser la méthode des éléments finis, plusieurs étapes sont nécessaires. Tout d'abord, il est essentiel de discrétiser le problème en réalisant un maillage, c'est-à-dire en subdivisant le domaine en éléments finis. Ensuite, il faut modéliser l'effet de l'environnement en appliquant les forces extérieures et les déplacements imposés. De plus, il est important de choisir un modèle de comportement pour le matériau étudié et de l'attribuer aux éléments du maillage.

Une fois ces étapes préliminaires effectuées, la méthode des éléments finis procède à un calcul pratique qui se décompose en trois étapes principales :

**Le prétraitement** : Cette étape consiste à construire un système d'équations en exploitant les données des modèles. Ce système d'équations correspond aux équations d'équilibre des

nœuds et aux déplacements nodaux imposés. On établit ainsi les conditions nécessaires pour résoudre le problème.

**Le calcul** : Dans cette étape, le système d'équations construit lors du prétraitement est résolu. Cela permet d'obtenir les déplacements nodaux et les efforts nodaux dans le domaine étudié. Les valeurs des inconnues du problème sont déterminées afin d'obtenir une solution numérique.

**Le post-traitement** : Une fois le calcul effectué, cette étape est consacrée à la reconstruction des résultats souhaités. Typiquement, il s'agit des champs de déplacement, de déformation et de contrainte dans le domaine étudié. On peut visualiser ces résultats pour analyser le comportement du système et prendre des décisions appropriées.

En résumé, la méthode des éléments finis nécessite la discrétisation du problème, la modélisation de l'environnement, le choix d'un modèle de comportement du matériau, et ensuite, elle effectue un prétraitement pour construire le système d'équations, un calcul pour résoudre ce système et obtenir les déplacements et les efforts nodaux, et enfin un post-traitement pour reconstruire les résultats demandés.

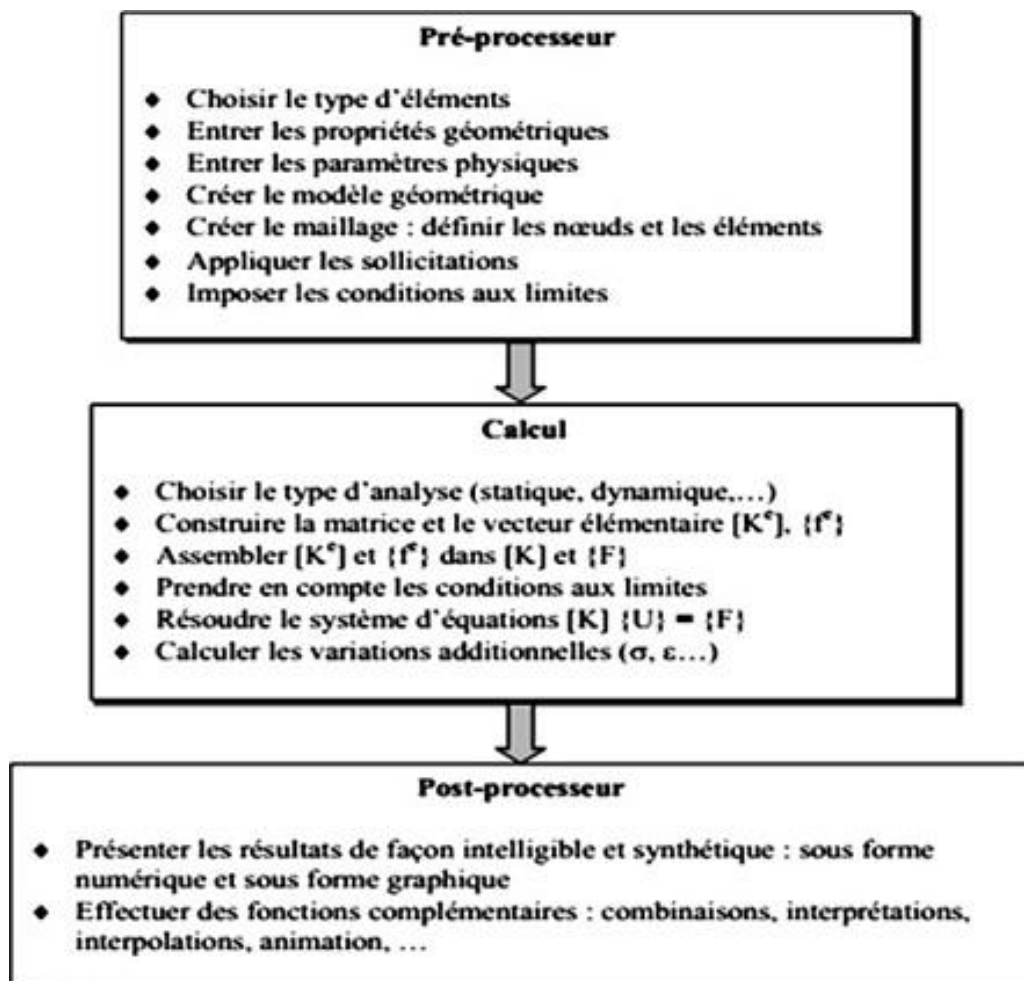


Figure 3.2. Les différentes étapes de résolution d'un problème par la MEF

### **2.3.Le maillage**

Le maillage est constitué d'un nuage des éléments qui sont liés entre eux par des nœuds. Il est caractérisé par sa taille  $h$  et le degré  $p$  d'interpolation. Une maille contient au minimum trois éléments. Le maillage détermine le modèle géométrique du produit, obtenu en réunissant les différents sous-domaines. Il détermine aussi l'allure du champ de déplacement, et donc de déformation et de contrainte. Ainsi, il influe fortement sur la pertinence des résultats et doit être réalisé avec soin.

### **2.4.Les différents types des éléments finis**

La méthode des éléments finis (MEF) fait appel à plusieurs types d'éléments qui ont été développés au fil du temps pour s'adapter à différents problèmes. Ces éléments se distinguent en fonction de leur forme géométrique, comme indiqué dans le Tableau.

Tout d'abord, on trouve les éléments à une dimension, tels que les barres, les poutres rectilignes ou courbes. Ces éléments sont utilisés pour modéliser des structures linéaires qui se déplacent principalement dans une seule direction. Ils sont représentés par des lignes dans le maillage.

Ensuite, on rencontre les éléments à deux dimensions, qui sont utilisés pour des problèmes d'élasticité plane, c'est-à-dire des situations où les déformations et les contraintes se produisent principalement dans un seul plan. Ces éléments peuvent être utilisés pour modéliser des déformations planes, des contraintes planes, l'axisymétrie, ainsi que des théories des poutres, des plaques ou des coques. Ils sont représentés par des surfaces dans le maillage.

Enfin, on a les éléments à trois dimensions, qui sont utilisés pour modéliser des problèmes dans l'espace tridimensionnel. Ils peuvent être des éléments de volume, utilisés pour représenter des solides tridimensionnels, ou des coques épaisses, qui sont utilisées pour modéliser des structures minces avec une épaisseur significative. Ces éléments tridimensionnels permettent de prendre en compte les déformations et les contraintes qui se produisent dans toutes les directions de l'espace.

En utilisant ces différents types d'éléments, la méthode des éléments finis offre une grande flexibilité pour modéliser et résoudre une variété de problèmes en ingénierie et en physique, en tenant compte de la dimensionnalité des structures et des comportements mécaniques spécifiques à chaque cas.[16]



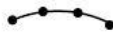

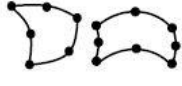
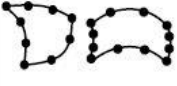
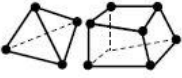




Eléments	linéaires	paraboliques (quadratiques)	Cubiques
unidimensionnels			
bidimensionnels			
tridimensionnels			
autres types	● Masse	Ressort 	Contact 

Figure 3.3. Les différents éléments utilisés par la MEF

## 2.5. Erreurs dans l'analyse par la MEF

### 2.5.1. Erreurs usuelles

Une matrice de rigidité globale  $[K]$  peut être singulière au cas où :

- les propriétés du matériau (modules d'élasticité) sont nulles ;
- un ou plusieurs nœuds ne sont pas connectés à un élément quelconque ;
- le manque de supports, ou bien les supports sont insuffisants pour prévenir des mouvements de corps rigide ;
  - un mécanisme est créé du fait que le modèle (une partie du modèle) est insuffisamment bloquée ;
  - il y a de grandes différences en ce qui concerne les rigidités ;
  - une partie de la structure a flambé ;
  - dans une analyse non-linéaire les supports ou les connexions ont atteint une rigidité nulle, donc une partie de la structure est insuffisamment bloquée.

Une matrice  $[K]$  singulière déclenche un message d'erreur et arrête le processus d'analyse numérique. Si l'exécution s'arrête ou l'exécution continue mais les résultats sont bizarres il est clair que quelque chose est louche et dans ce cas une recherche de l'erreur est absolument nécessaire.

Il est plus dangereux s'il existe des erreurs qui puissent conduire à des résultats plausibles, mais pas précis, exacts. Dans cette catégorie on peut énumérer :

- une utilisation erronée des types d'éléments ; par exemple, les éléments de coque (SHELL) sont utilisés à la place des éléments de type "SOLIDE" ou bien des éléments de symétrie axiale à la place des éléments plans (PLANE éléments);
- les appuis (supports) sont mal disposés en direction, type ou location ;
- les chargements sont mal disposés en direction, type, location ou grandeur ;
- autres données peuvent être incorrectes ; par exemple une utilisation incorrecte des unités de mesure (vitesse angulaire  $\omega$  en rot/sec au lieu de rad/sec) ;
- un élément peut être défini plusieurs fois ; la duplication est très difficile à détecter à cause du fait que il est très difficile d'observer l'erreur lors du traçage ;
- une connexion peut être sans aucune signification du point de vue physique.

### 2.5.2. Critique des résultats obtenus par MEF

Au cours d'une post-procession les déplacements sont ceux qui doivent être examinés premièrement. D'habitude les logiciels tracent seulement des lignes droites entre les nœuds, de telle manière que les formes courbes supposées être des éléments déformés des poutres, les bords des éléments de plaque ou de coque, ne sont pas visibles.

Au cas où une symétrie est anticipée cet aspect serait visible dans le champ de déplacements. Les déformations produites par une variation de température sont tracés par le logiciel seulement si la configuration non-déformée existe à une température de 0°.

Les réactions dans les supports doivent être examinées afin de vérifier si elles satisfassent les équations d'équilibre statique, par exemple de vérifier si la somme des composantes des réactions sur la direction  $Ox$  équilibre les forces appliquées sur cette direction. A noter que toutes les réactions doivent être rapportées au même système de coordonnées.

Avant d'examiner les résultats qui concernent les contraintes, avant de faire une évaluation, on doit se poser les questions suivantes :

- est-ce qu'elles se réfèrent aux systèmes globales ou locales d'axes ?
- au cas où le système d'axes est bien défini, comment ces axes sont-elles orientées ?

- les contraintes résultantes sont-elles reportées (par exemple celles dues aux moments résultants) ?
- dans les éléments de poutre, de plaque ou de coque, les contraintes peuvent rester valides à la surface supérieure, moyenne ou inférieure ?
- est-ce que les contraintes sont médiées dans les nœuds ?
- ceci serait incorrect au cas où le système d'axes de coordonnées ne s'adapte pas ou s'il existe des discontinuités d'épaisseurs ou des discontinuités des propriétés du matériau ;

Quelques caractéristiques qui puissent définir un champ de contrainte précis, exact sont présentées ci-dessous :

- le contour des contraintes doit être normal à un plan de symétrie réfléchissant ;
- sur une frontière libre (sans chargements), une des contraintes principales doit être nulle ;
- sur une frontière chargée par une pression  $p$ , une des contraintes principales doit être " $-p$ " ;
- les trajectoires des contraintes principales doivent être normales ou tangentes aux frontières libres, à celles sollicitées par une pression  $p$  ;
- dans les problèmes de symétrie axiale, les contraintes normales - radiales ou circonférentielles doivent être égales sur l'axe de révolution ;
- le rapprochement, l'exactitude des contours des contraintes est un autre guide ; au cas où les contours des contraintes ont des incréments égaux entre eux, les éléments qui présentent une dispersion des contraintes doivent être plus raffinés que ceux qui ne présentent pas de dispersion ;
- au cas où certains phénomènes tels que le flambement, les déformations dans le domaine plastique, l'action variable des efforts n'ont pas été pris en compte, une nouvelle analyse par MEF devrait être faite.

### 3. Modélisation par ANSYS

ANSYS est un logiciel à usage général, utilisé pour simuler des interactions de toutes les disciplines de la physique , de la structure, de la vibration, de la dynamique des fluides, du



transfert de chaleur et de l'électromagnétisme pour les ingénieurs par la méthode des éléments finis pour les structures solides ou des volumes fini pour les fluides en deux ou trois dimensions

Ainsi, ANSYS, permet de simuler des tests ou des conditions de travail, permet de tester en environnement virtuel avant de fabriquer des prototypes de produits. En outre, la détermination et l'amélioration des points faibles, la vie informatique et la prévision des problèmes probables sont possibles grâce à des simulations 3D en environnement virtuel.

ANSYS peut importer des données des différents formats de logiciels de CAO et permet également de construire une géométrie avec ses capacités de "prétraitement". De même, dans le même préprocesseur, un modèle d'éléments finis (maillage) requis pour le calcul est généré. Après avoir défini les chargements et effectué les analyses, les résultats peuvent être visualisés sous forme numérique et graphique.

Depuis la version 11.0 Ansys fonctionne en mode Workbench.

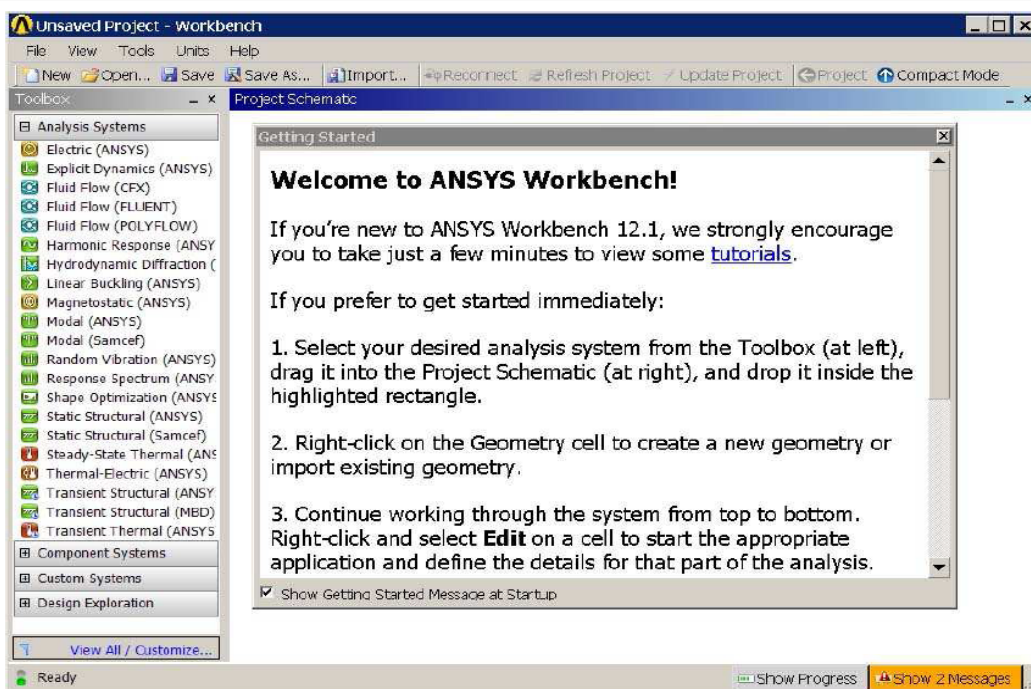


Figure 3.4. Interface Workbench

#### 4. Simulation du disque de l'embrayage à membrane

La figure 3.5. représente le dessin d'ensemble de l'embrayage à membrane établis sur Autodesk Inventor 2017, et pour lequel nous allons étudier la simulation du disque indiqué par la figure 3.6, soumis à trois niveau de pressions de 1MPa, 2MPa et 4MPa pour quatre matériaux de garniture aux caractéristiques différents comme indiqué au tableau 3.1, qui peuvent faire l'objet de revêtements de ces disques.

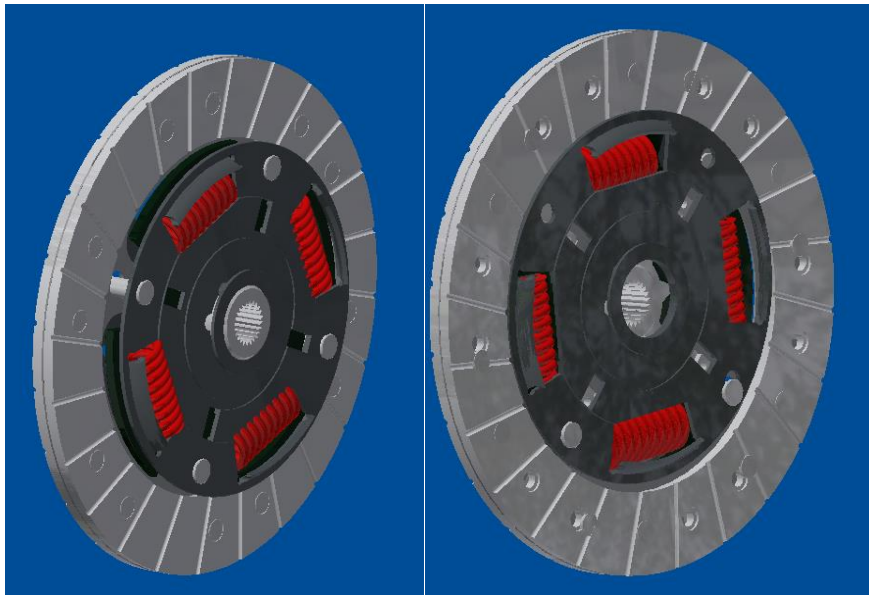


Figure 3.5 Dessin d'ensemble de l'embrayage à diaphragme

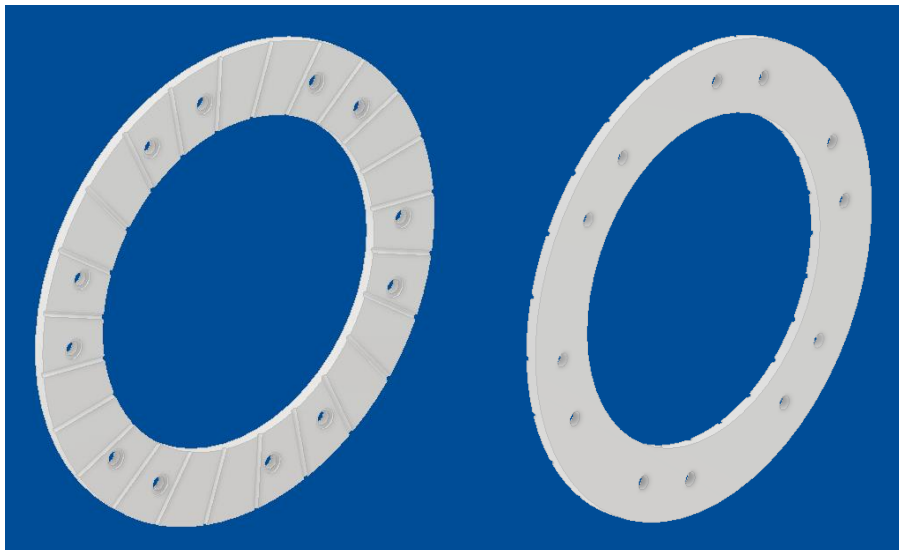


Figure3.6. a. Disque d'embrayage à étudier en vue de face et arrière

Matériaux	Limite d'élasticité en traction [MPa]	Coefficient de poisson	Module d'élasticité [GPa]	Densité [Kg/ m <sup>3</sup> ]
Métal fritté	140	0.24	115	6400
Cermet	1039	0.23	380	5000
Céramique	1138	0.22	325	2130
Kevlar	3240	0.36	71	1470

Tableau 3.1. Caractéristiques des matériaux du disque

#### 4.1.Procédure de simulation

La procédure de la simulation, consiste après l'ouverture d'Ansys Workbench 2019R3, de créer une bibliothèque des matériaux à simuler, d'importer la géométrie au (format .IGS) comme indiqué par la figure 3.7. Par la suite éditer le model et d'établir les conditions de simulation comme indiqué par la figure 3.8 et enfin générer les résultats désirés comme indiqué par les figures 3.9, 3.10, 3.11 et 3.12.

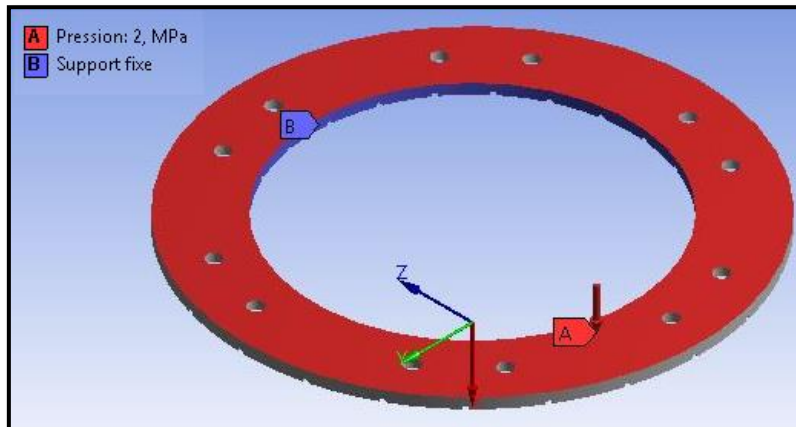


Figure3.6. b. Disque d'embrayage à étudier avec la charge appliquée

Détails de "Maillage"	
<b>Affichage</b>	
Style d'affichage	Utiliser les réglages de géométrie
<b>Réglages par défaut</b>	
Physique de préférence	Mécanique
Ordre des éléments	Contrôlé par le programme
<input type="checkbox"/> Taille des éléments	5, mm
<b>Dimensionnement</b>	
Utilise un dimensionnement adaptatif	Oui
Résolution	Par défaut (2)
Simplification du maillage	Oui
<input type="checkbox"/> Taille de simplification	Par défaut
Transition	Rapide
Centre d'angle de course	Grossier
Taille d'élément initiale	Assemblage
Diagonale de la boîte englobante	255,36 mm
Aire de surface moyenne	228,39 mm <sup>2</sup>
Longueur d'arête minimale	0,42682 mm
<b>Qualité</b>	
<b>Inflation</b>	
<b>Avancés</b>	
<b>Statistiques</b>	
<input type="checkbox"/> Nœuds	15774
<input type="checkbox"/> Éléments	7824

Figure3.6. c. détails de maillage

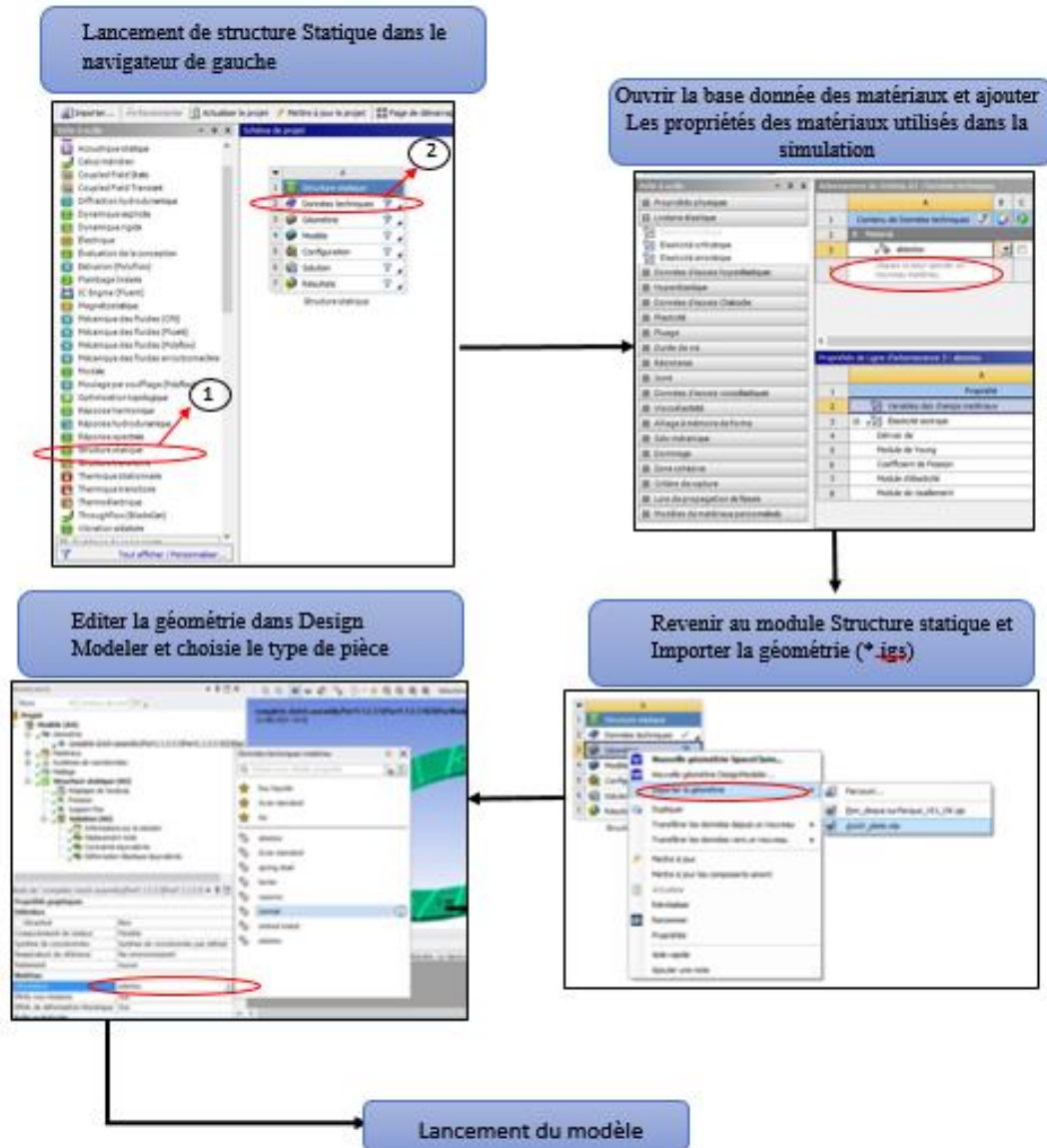


Figure. 3.7. Procédure de simulation



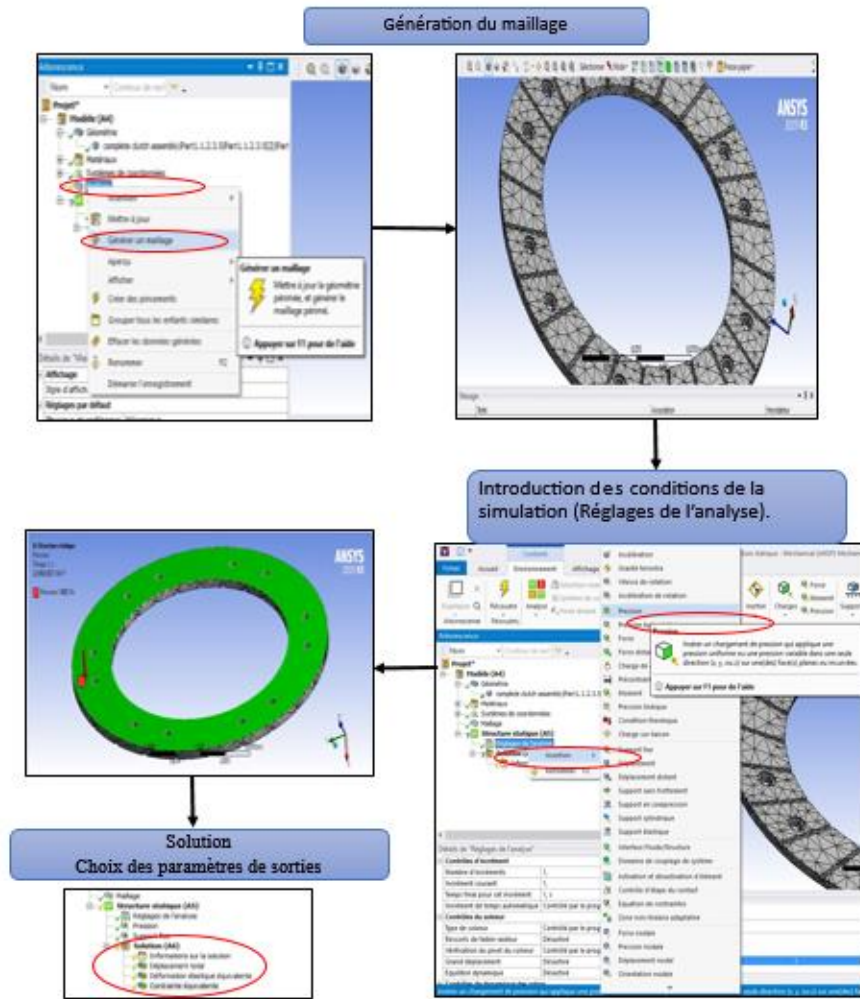


Figure 3.8. Edition des conditions de simulation

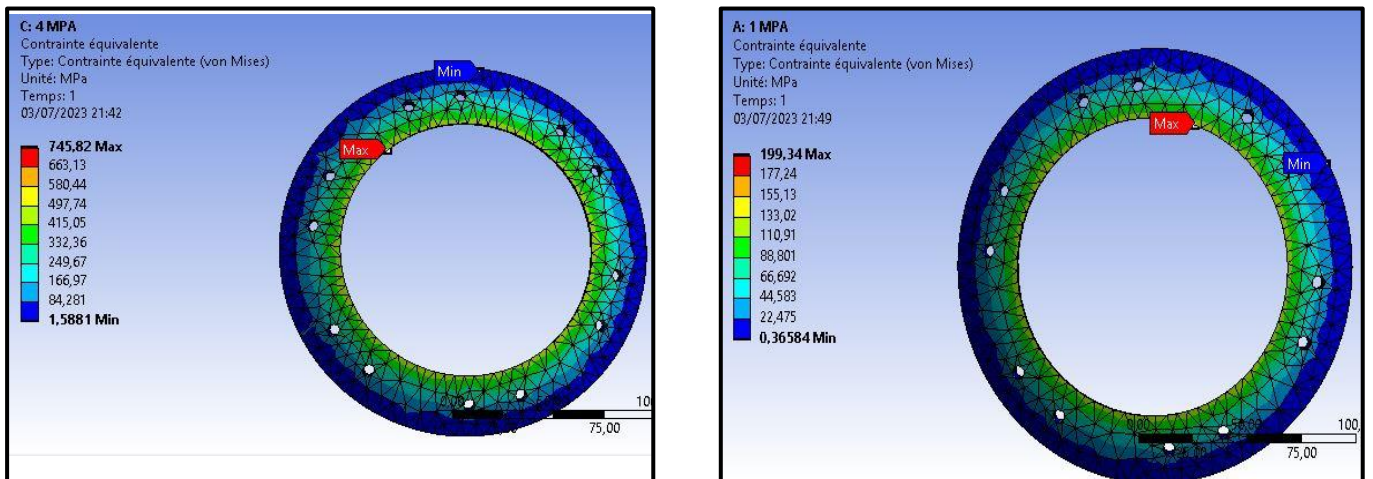


Figure 3.9 Variation des contraintes de Von mises

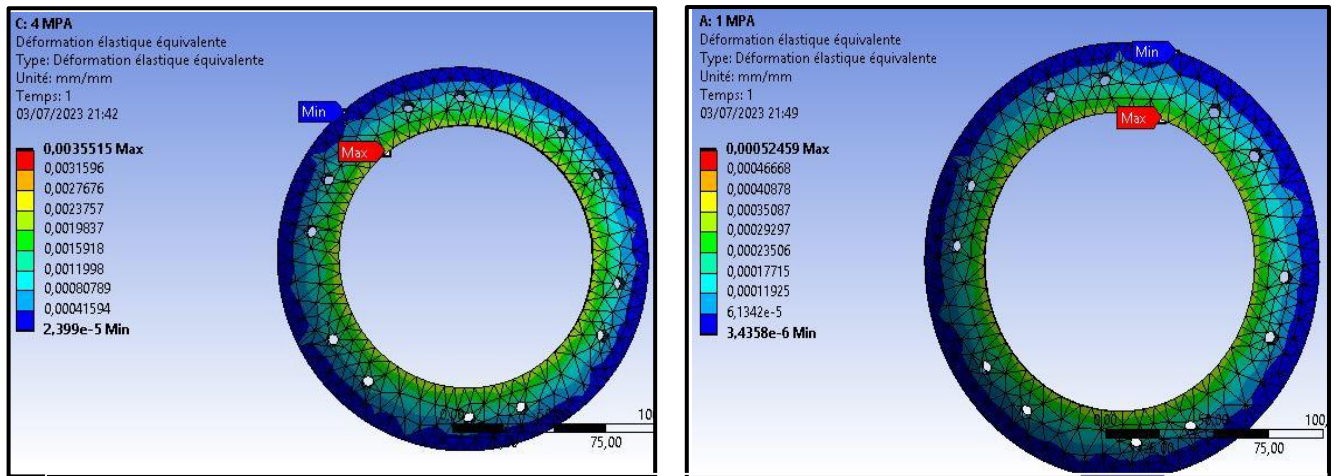


Figure 3.10 Variation des déformations

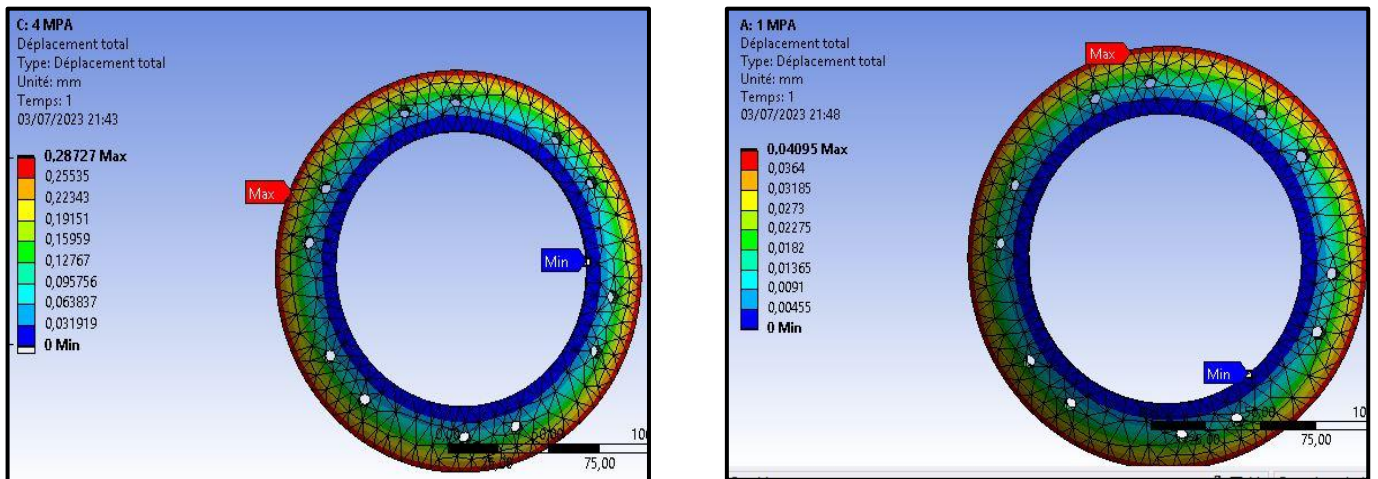


Figure 3.11 Variation des déplacements

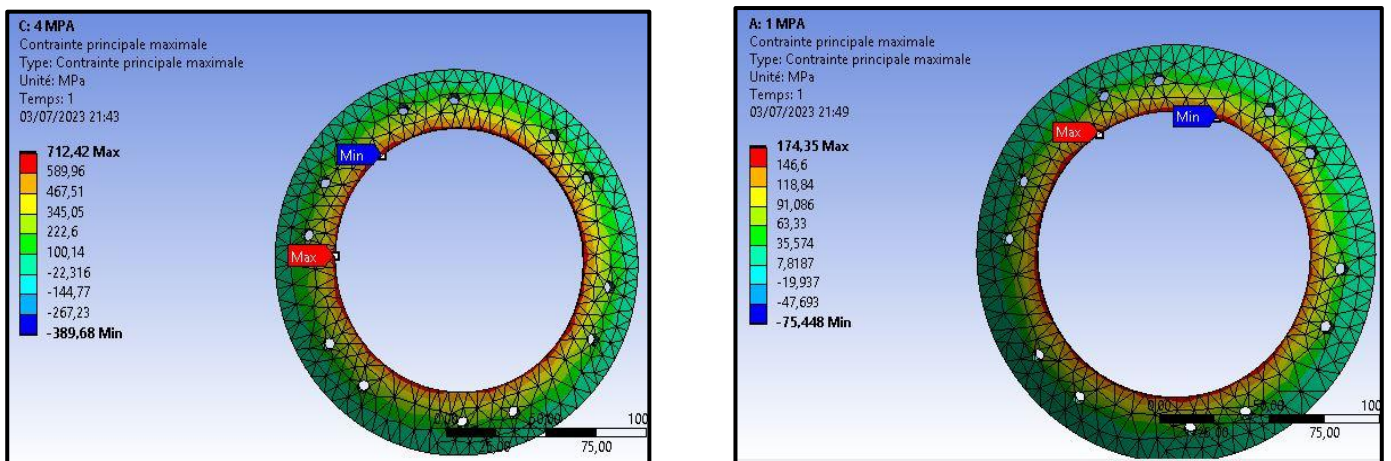


Figure 3.12 Variation des contraintes maximales

## 4.2. Résultats et discussions

Les différents résultats de la simulation concernant la variation des contraintes maximales et de Von Mises en fonction de la pression appliquées sont synthétisées par les figures 3.13, 3.14, 3.15 et 3.16. La figure 3.17 représente la variation des déplacements des différents matériaux en fonction des pressions appliquées.

Les différents résultats montrent ce qui suit :

- Les contraintes sont proportionnelles à la variation de la pression et croissent d'une manière presque linéaire.

- Quel que soit le matériau et la pression utilisée lors de la simulation les contraintes maximales sont au-dessous des contraintes de Von mises, ce qui implique que les différents matériaux résistent bien aux différentes pressions.

- Le graphe des déplacements en fonction des contraintes (figure 3.17), montre le bon comportement du cermet et de la céramique avec de faible déplacement par rapport aux autres matériaux, ce qui font de bon revêtement pour les disques mais un complément d'analyse tribologique au frottement et à l'usure qui va décider des différents matériaux à utiliser.

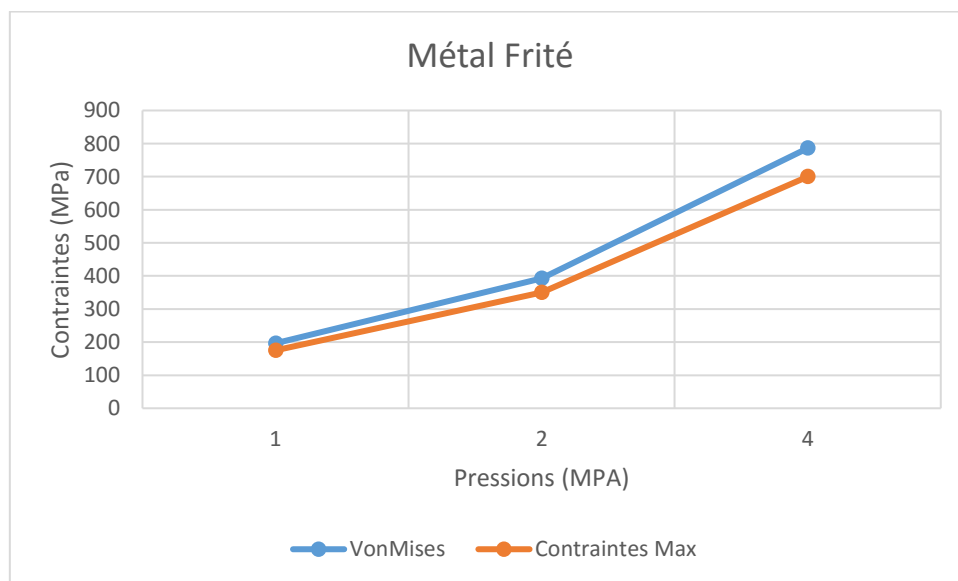


Figure 3.13 variations des contraintes maximales et de Von Mises en fonction de la pression appliquées pour métal fritté

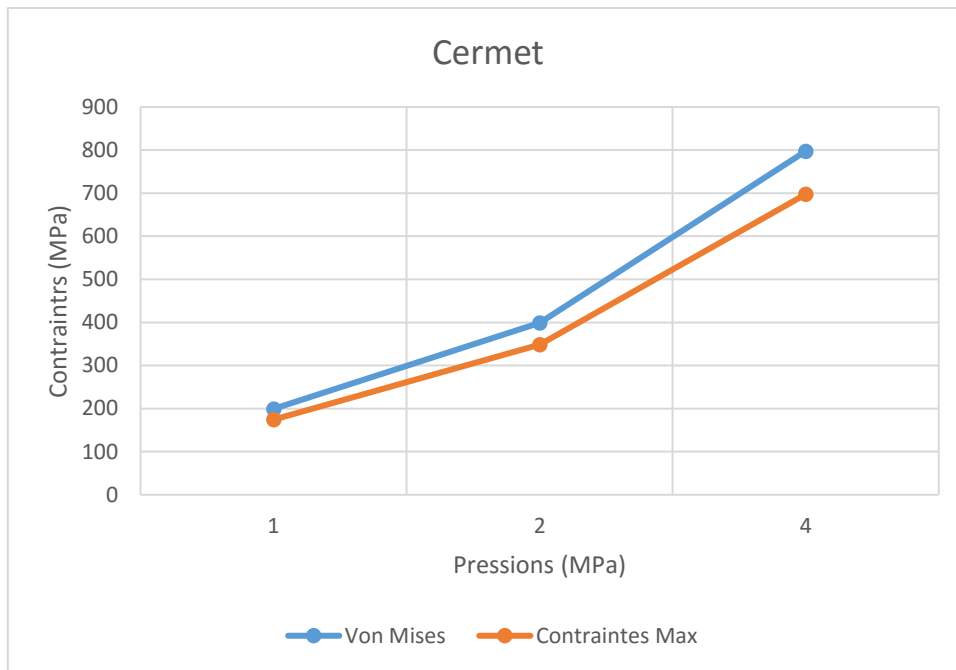


Figure3.14 variations des contraintes maximales et de Von Mises en fonction de la pression appliquées pour cermet

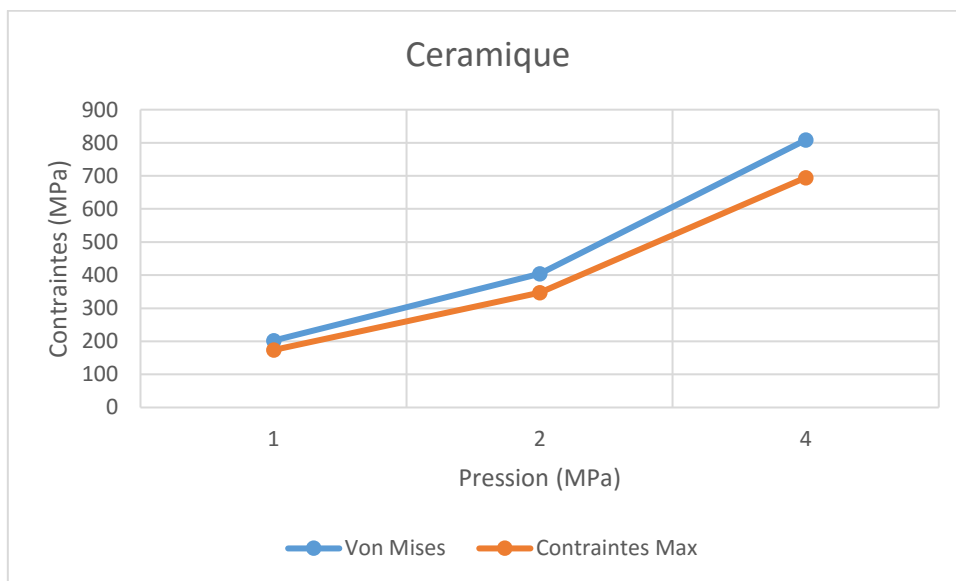


Figure3.15 variations des contraintes maximales et de Von Mises en fonction de la pression appliquées pour céramique



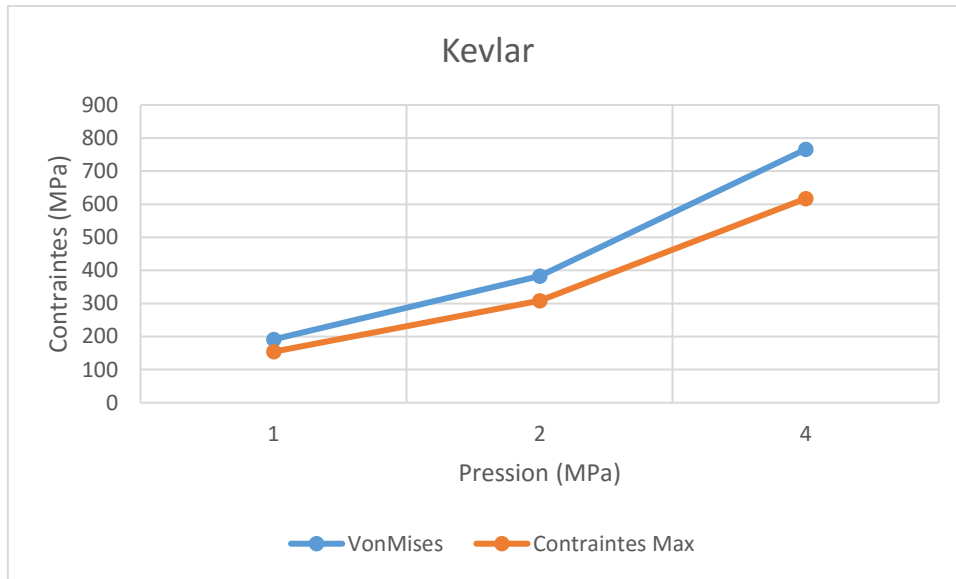


Figure3.16 variations des contraintes maximales et de Von Mises en fonction de la pression appliquées pour kevlar

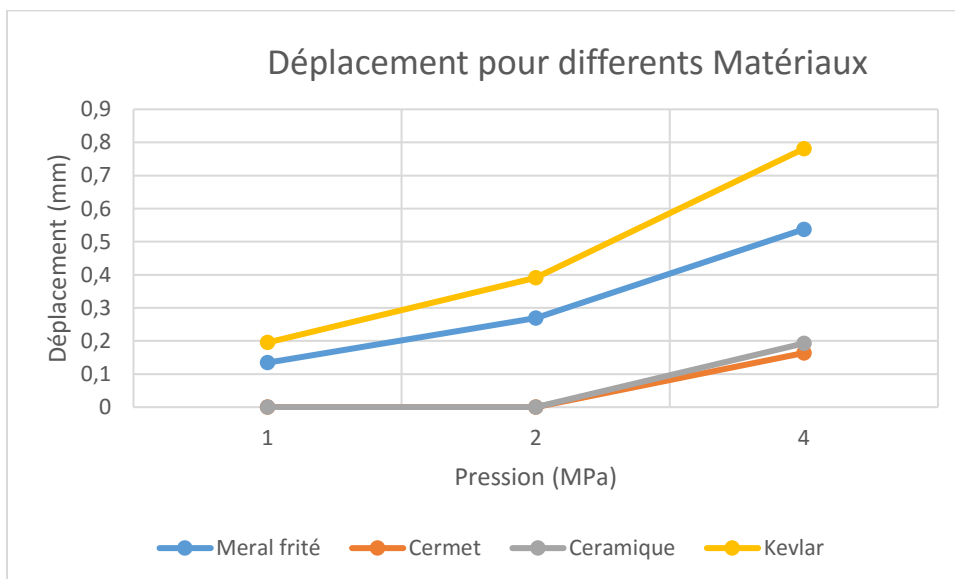



Figure3.17 variations des déplacements des différents matériaux en fonction des pressions appliquées

## 5. Conclusion

Nous avons traité dans ce chapitre, la simulation du comportement du disque d'embrayage à diaphragme soumis à trois niveaux de pression pour la détermination des contraintes maximales supportés, les contraintes pratique de Von Mise et les déplacements. Ce travail a été réalisé avec le logiciel Ansys R19, avec le module en structure statique (Static Structural), la géométrie a été conçu soit Inventor 217 et importer vers le module pour analyse. Après l'établissement

des différentes conditions d'utilisation et un maillage par élément fini, nous avons récupéré les différents résultats sous forme de graphe qui permettent de faire une première synthèse à savoir que les Matériaux Cermet et la céramique ont un meilleur comportement par rapport aux autres utilisées lors de la simulation, vu que leur déformation est minimal par rapport aux autres. Par contre la décision du choix ne peut être effectuée qu'après l'étude du comportement au frottement et à l'usure.



# **Conclusion générale**

## Conclusion Générale

Ce mémoire a exploré la simulation sous Ansys du comportement à la résistance du disque d'un embrayage à diaphragme avec quatre matériaux soumis à trois niveaux de pression dans le but de cerner le meilleurs matériaux pouvant faire l'objet d'un revêtement adéquat pour l'optimisation du fonctionnement . Les différents résultats montrent que tous les matériaux utilisés lors de cette simulation résistent bien aux différentes pressions vu que les contraintes maximales sont au-dessous de la contrainte pratique de Von Mises. L'analyse des graphes des déformations montre, que les matériaux Cermet et la Céramique ont un meilleur comportement par rapport au métal fritté et au Kevlar vu que leurs déformation est minimal.

Cette étude, nous a permis de mieux comprendre les embrayages à travers la simulation sur Ansys. Les connaissances acquises sur le fonctionnement, les performances et les caractéristiques mécaniques ainsi que les matériaux utilisés peuvent être appliquées pour améliorer la conception et l'efficacité des embrayages dans diverses applications. La méthode des éléments finis s'est avérée être une approche précieuse pour analyser et prédire le comportement des embrayages, offrant des informations précieuses pour les ingénieurs et les concepteurs. Cependant, il est important de noter que la simulation seule ne peut pas remplacer les tests expérimentaux, et il est nécessaire de combiner les deux approches pour obtenir une compréhension complète des embrayages.

Entre autre, la décision du choix ne peut être effectuée qu'après l'étude du comportement au frottement et à l'usure.

En fin Nous espérons que ce modeste travail contribue à l'ouverture de la voie à de futures recherches et développements dans le domaine de la simulation des embrayages. En explorant davantage les interactions entre les différents composants, les conditions de fonctionnement variées et l'utilisation de matériaux innovants, il est possible de concevoir des embrayages plus performants, durables et efficaces. Ces avancées contribueront à l'amélioration continue des systèmes de transmission de puissance et à une utilisation plus efficace de l'énergie dans les véhicules et les machines industrielles.

## Références bibliographiques :

- [1] **M. Ben Jaber** , *Notes de Cours de Technologie de Conception Mécaniques par Institut Préparatoire aux Etudes d'Ingénieurs d'El Manar*. 2008
- [2] Wikipedia, : <https://en.wikipedia.org/wiki/Clutch> 16/05/2023
- [3] **B. Herve**, *Crissement d'embrayage analyses linéaire, non-linéaire et étude expérimentale* , Thèse, Ecole centrale de Lyon, 2009
- [4] **R. Lindas**, *Embrayages, étude théorique et constitution générale*”. *Techniques de l'Ingénieur*, B5850, 1987.
- [5] **R. Lindas**. *Embrayages, étude technologique*”. *Techniques de l'Ingénieur*, B5851, 1987
- [6]: <https://entretien-voiture.ooreka.fr/astuce/voir/464767/embrayage-centrifuge#> 16/05/2023
- [7] <https://www.oscaro.com/fr/conseils-mecaniques/embrayage-et-boite-de-vitesse> .16/05/2023
- [8] <https://www.directindustry.fr/prod/mwm-freni-frizioni/16/05/2023>
- [9] **Hubert MÈMETEAU Bruno COLLOMB** : *Transmission, freinage, tenue de route et équipement électrique*
- [10] *Lycée professionnel Gaston Barré Baccalauréat professionnel MAINTENANCE des VEHICULES AUTOMOBILES SESSION 2013-2014 L'embrayage*
- [11] **Damien HERRISSON** Thèse « Méthode de dimensionnement à l'usure de systèmes de transmission » de DOCTEUR DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE Spécialité : Mécanique des Structures.
- [12] **Mme SANHADJI** thèse *Etude expérimentale du comportement au frottement et à l'usure en contact plan du laiton et du bronze en milieu lubrifié.*
- [13] **Rémi LOSERO**, *CONTROLE EN COUPLE ET EN VITESSE DU GLISSEMENT D'UN EMBRAYAGE SIMPLE OU DOUBLE DANS UNE TRANSMISSION AUTOMOBILE*, thèse de doctorat en automatique, L'UNIVERSITÉ DE VALENCIENNES ET DU HAINAUT-CAMBRÉSIS 2016.
- [14] <https://legrand-genie.blogspot.com/2017/02/calculs-embrayages.html> 18/05/2023
- [15] **Jean Christophe Cuillère** : *introduction à la méthode des éléments finis*, DUNOD, 2e édition, p16-17. Paris, 2011.
- [16] **M. ADJLOUA**, *cours de la méthode des éléments finis master1 Université D'oran2 Mohamed ben Ahmed, Oran*, 2016
- [17] **Lakhdar BESSAIS**, thèse Magister, « Analyse des structures par la M.E.F basée sur l'approche en déformation », Université Mohamed Khider, faculté des Sciences et de la Technologie, département : Génie Mécanique, Biskra. Décembre 2012.