

*REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE*  
*Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique*  
*Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou*  
*Faculté du génie de la construction*  
*Département de Génie Mécanique*



# Projet de fin d'étude

*En vue de l'obtention du diplôme de*  
**Master académique en Génie**  
**Mécanique**

## Thème :

**Conception d'un tribomètre pion/disque  
équipé d'une enceinte thermique**

Proposé et dirigé par :

*Mr S. Larbi*

Etudié par :

- *Mr MOKHEBI Lyes*
- *Mr NAIT ALI Rabah*

Promotion : 2015/2016

# *Remerciements*

Nous adressons nos plus sincères remerciements à notre encadreur, Mr S. Larbi, un pédagogue et un exemple de sérieux et de discipline, de nous avoir fait profiter de cette unique expérience en étant présent, disponible et encourageant. Son aide et ses précieux conseils ont fait que ce travail soit achevé tout en ayant récolté des compétences et acquis qui nous seront précieux dans notre avenir professionnel.

Par la même occasion, nous remercions vivement Mr S. Djebali et Mr A. Bilek pour leurs conseils et participation au bon déroulement de notre projet de fin d'études.

Aussi, nous adressons nos remerciements aux membres du jury d'avoir accepté d'examiner ce travail. Sans oublier toute l'équipe du laboratoire LMSE, l'ensemble des enseignants qui ont contribué à l'accomplissement de notre formation, l'ensemble des agents de l'atelier du département et ceux de la bibliothèque.

Nous tenons également à remercier Mr M. Beldi du laboratoire LMSE pour sa disponibilité, tous nos camarades de promotion qui nous ont soutenus, ainsi que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

# *Dédicaces*

J'ai l'honneur de dédier ce modeste travail à :

- ✚ Mon grand-père qui m'a élevé. Pour tous les principes qu'il m'a inculqués, les valeurs qu'il m'a transmises. J'espère avoir fait l'objet de sa fierté avec cet accomplissement.
- ✚ Ma grand-mère et mes parents, ma source d'espoir, de fierté et de volonté. Pour leur amour, et pour tout ce qu'ils ont sacrifié pour moi depuis ma tendre enfance.
- ✚ Mes très chères sœurs : Taous, Lynda, Thiziri, Sadia, Dihia, Mélissa, Lola et Maya, pour leurs encouragements et leur soutien inconditionnel, je leurs souhaite toute la réussite et le bonheur auxquels elles aspirent.
- ✚ A tous mes amis et en particulier Yacine, Brahim, Sofiane, Hassene, Djamel, Rosa, Lyza, Manel et Melinda, « Arrache nel mounima » et à mes amis de la cité Hasnaoua 1.
- ✚ A mon binôme et ami R. Nait Ali à qui je souhaite beaucoup de succès.
- ✚ A tous mes enseignants du primaire jusqu'à l'université
- ✚ A l'ensemble des étudiants de ma promotion et ceux des promotions à venir.

*Mokhebi Lyes*

# *Dédicaces*

Je dédie ce modeste travail à :

- ✚ La mémoire de toutes les personnes qui nous ont quittés.
- ✚ Mes chers parents qui n'ont ménagé aucun effort pour m'aider aux moments opportuns.
- ✚ Mes frères, IDIR et WILLIS, pour qui je souhaite tout le succès et la réussite qu'ils méritent.
- ✚ Ma blonde NADINE.
- ✚ Mes cousins et frères MASSI, AKLI, HAKIM, ALILOU, MEHDI, MASSI, BELAID, SALIM, SAMIR, LOUNES.
- ✚ Mes cousines et sœurs, Samira, Yamina, Dyhia, Lylia, Saadia « tite sœur ».
- ✚ Mes chères tantes particulièrement « nana fettoma ».
- ✚ Mes oncles.
- ✚ Tous mes amis, en particulier Djamel Kadri mon entraîneur.
- ✚ A mon binôme et ami, L.Mokhebi.
- ✚ A tous mes enseignants.
- ✚ A l'ensemble des étudiants de ma promotion et ceux des promotions à venir.

*Nait Ali Rabah*

# Liste des figures

## Chapitre 1 :

<b>Figure 1.1</b> : Transport de statue, tombe de Tchuti Hetep, El-Bersheh, Egypte.....	2
<b>Figure 1.2</b> : Le système tribologique.....	6
<b>Figure 1.3</b> : Schéma synoptique d'un système tribologique dans le cas général.....	7
<b>Figure 1.4</b> : Circuit tribologique de Berthier.....	8
<b>Figure 1.5</b> : Types de contacts utilisés sur tribomètres et abrasimètres (D'après la norme ASTM G99).....	9
<b>Figure 1.6</b> : Représentation schématique de la surface.....	14
<b>Figure 1.7</b> : Profil d'une surface.....	16
<b>Figure 1.8</b> : Défauts de profil d'une surface.....	16
<b>Figure 1.9</b> : Période des défauts de forme d'une pièce géométrique.....	17
<b>Figure 1.10</b> : Défauts d'ondulation.....	17
<b>Figure 1.11</b> : Rugosité de 3 <sup>ème</sup> et 4 <sup>ème</sup> ordre.....	18
<b>Figure 1.12</b> : Structure de surfaces : (a)stries régulières ; (b) stries orientées ; (c) aspérités irrégulières.....	18
<b>Figure 1.13</b> : paramètre de rugosité lié à la ligne moyenne.....	19
<b>Figure 1.14</b> : Paramètres de rugosité liés aux motifs.....	19
<b>Figure 1.15</b> : Ecart quadratique moyen.....	20

## Chapitre 2 :

<b>Figure 2.1</b> : Frottement de roulement.....	22
<b>Figure 2.2</b> : Frottement de pivotement.....	23
<b>Figure 2.3</b> : Modèle d'une aspérité ( $\alpha$ est un angle d'attaque, $\theta$ est le demi angle au sommet du cône représentant la rugosité et $h$ la profondeur d'indentation).....	25
<b>Figure 2.4</b> : Evolution du coefficient de frottement en fonction de la charge appliquée.....	26
<b>Figure 2.5</b> : Modélisation de l'angle de frottement.....	26
<b>Figure 2.6</b> : Solide sur plan incliné.....	27
<b>Figure 2.7</b> : Représentation de la loi de Coulomb à coefficient de frottement statique et dynamique.....	27
<b>Figure 2.8</b> : Variation du coefficient de frottement $\mu$ en fonction de la charge normale $N$ ....	29
<b>Figure 2.9</b> : Exemple d'un tribomètre (bille sur disque).....	30
<b>Figure 2.10</b> : Principe d'un tribomètre pion/disque.....	30
<b>Figure 2.11</b> : Schéma de l'usure adhésive à la surface antagoniste avec arrachage de la matière (Stachowiak et Coll, 2001).....	32
<b>Figure 2.12</b> : Exemple d'usure par adhésion.....	32

<b>Figure 2.13</b> : Usure abrasive à 2 corps.....	33
<b>Figure 2.14</b> : Usure abrasive à 3 corps.....	33
<b>Figure 2.15</b> : Exemple d'usure par abrasion.....	33
<b>Figure 2.16</b> : Cratère formé par l'usure par diffusion sur une plaquette de carbure après 20 secondes d'usinage d'un acier AISI 1020.....	34
<b>Figure 2.17</b> : Exemple d'usure par corrosion.....	34
<b>Figure 2.18</b> : Apparence d'une surface usée par fatigue.....	35
<b>Figure 2.19</b> : Perte de matière par érosion.....	36
<b>Figure 2.20</b> : Exemple d'érosion fluide.....	37
<b>Figure 2.21</b> : Evolution de l'usure en fonction du temps.....	38
<b>Figure 2.22</b> : Courbe de Stribeck.....	40
<b>Figure 2.23</b> : Cycle d'un traitement thermique.....	42

### **Chapitre 3 :**

<b>Figure 3.1</b> : L'analyse de la valeur dans un projet.....	52
--	----

### **Chapitre 4 :**

<b>Figure 4.1</b> : Tribomètre de type pion/disque (Laboratoire de Mécanique de l'Université de Constantine).....	63
<b>Figure 4.2</b> : Tribomètre de type pion/disque (Laboratoire de Mécanique de l'Université de Tizi-Ouzou).....	64
<b>Figure 4.3</b> : Relations du banc avec l'environnement (schéma d'ensemble).....	68
<b>Figure 4.4</b> : Préparation du banc.....	69
<b>Figure 4.5</b> : Banc en fonctionnement.....	70
<b>Figure 4.6</b> : Banc au repos.....	70
<b>Figure 4.7</b> : Diagramme des phases de la vie du banc.....	71
<b>Figure 4.8</b> : Phase de fonctionnement du banc.....	72
<b>Figure 4.9</b> : Fonction 1 : Solution 1 : Fixer le banc au sol.....	77
<b>Figure 4.10</b> : Fonction 2, Gr1 : Solution 1 : Générer le mouvement et choisir la vitesse de Rotation.....	79
<b>Figure 4.11</b> : Fonction 2, Gr2 : Solution 1 : Entraîner le système de guidage du disque par un dispositif de liaison.....	81
<b>Figure 4.12</b> : Fonction 2, Gr2 : Solution 2 : Entraîner le système de guidage du disque par un dispositif de liaison.....	83
<b>Figure 4.13</b> : Fonction 2, Gr2 : Solution 3 : Entraîner le système de guidage du disque par un dispositif de liaison.....	85
<b>Figure 4.14</b> : Fonction 2, Gr3 : Solution 1 : Assurer le guidage en rotation de l'arbre de Broche.....	87
<b>Figure 4.15</b> : Fonction 2, Gr4 : Solution 1 : Assurer la fixation du disque.....	89
<b>Figure 4.16</b> : Fonction 2, Gr4 : Solution 2 : Assurer la fixation du disque.....	91
<b>Figure 4.17</b> : Fonction 2, Gr4 : Solution 3 : Assurer la fixation du disque.....	93

<b>Figure 4.18</b> : Fonction 3, Gr1 : Solution 1 : Fixer le pion.....	95
<b>Figure 4.19</b> : Fonction 3, Gr1 : Solution 2 : Fixer le pion.....	97
<b>Figure 4.20</b> : Fonction 3, Gr2 : Solution 1 : Appliquer la charge et la maintenir constante.....	99
<b>Figure 4.21</b> : Fonction 3, Gr2 : Solution 2 : Appliquer la charge et la maintenir constante...	101
<b>Figure 4.22</b> : Fonction 4, Gr1 : Solution 1 : Isoler l'enceinte thermique.....	103
<b>Figure 4.23</b> : Fonction 4, Gr2 : Solution 1 : Ouvrir et fermer l'enceinte thermique.....	105
<b>Figure 4.24</b> : Fonction 4, Gr2 : Solution 2 : Ouvrir et fermer l'enceinte thermique.....	107
<b>Figure 4.25</b> : Fonction 4, Gr3 : Solution 1 : Chauffer l'enceinte et réguler la température...	109
<b>Figure 4.26</b> : Fonction 5 : Mesurer et acquérir les données.....	111

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1.1</b> : Constituants structuraux des tribosystèmes usuels.....	11
<b>Tableau 1.2</b> : Principaux paramètres des matériaux ayant une influence sur le comportement en frottement.....	16
<b>Tableau 3.1</b> : Echelle de hiérarchisation des fonctions.....	56
<b>Tableau 3.2</b> : Exemple de tableau de détermination relative des fonctions par la méthode du tri croisé.....	56
<b>Tableau 3.3</b> : Application sur un équipement de levage.....	59
<b>Tableau 3.4</b> : Application sur armoires modulaires pour machines industrielles.....	60
<b>Tableau 4.1</b> : Membre du groupe d'analyse de la valeur.....	63
<b>Tableau 4.2</b> : Tableau des liaisons entre le banc et son environnement.....	69
<b>Tableau 4.3</b> : Phases de vie du banc.....	70
<b>Tableau 4.4</b> : L'ordre des fonctions recensées.....	74

# *Sommaire*

<b>Introduction générale</b> .....	1
------------------------------------	---

## **Chapitre 1 : Notions sur la tribologie**

1. Tribologie.....	2
1.1. Introduction.....	2
1.2. Histoire de la tribologie.....	2
1.3. Définition.....	5
1.4. Importance de la tribologie.....	5
1.5. L'approche économique de la tribologie.....	6
1.6. Le système tribologique.....	6
1.7. Le circuit tribologique.....	8
1.8. Contact normalisé en tribologie.....	10
1.9. Paramètres tribologiques.....	11
1.9.1. Les paramètres opérationnels.....	11
1.9.2. Les paramètres structuraux.....	11
1.9.3. Les paramètres tribométriques.....	12
1.9.4. Les paramètres d'interaction.....	13
2. La surface.....	14
2.1. Définition.....	14
2.2. Energie superficielle.....	14
2.3. Etat structural d'une surface.....	14
2.4. Types de surfaces.....	16
2.4.1. Surface d'un corps.....	16
2.4.2. Surface géométrique.....	16
2.4.3. Surface spécifiée.....	16
2.4.4. Surface réelle.....	16
2.4.5. Surface mesurée.....	16
2.5. Défauts d'une surface géométrique.....	17
2.5.1. Défauts de forme.....	17
2.5.2. Défauts d'ondulation.....	18
2.5.3. Rugosité.....	18
2.5.3.1. Mesure de la rugosité.....	19
2.5.3.1.1. Ecart arithmétique moyen du profil.....	19
2.5.3.1.2. Profondeur moyenne de rugosité.....	20
2.5.3.1.3. Pas moyen de rugosité.....	20
2.5.3.1.4. Ecart quadratique moyen du profil.....	21
3. Conclusion.....	21

## **Chapitre 2 : Frottement et usure**

1. Introduction.....	22
2. Le frottement.....	22
2.1. Définition.....	22

2.2. La force de frottement.....	22
2.3. Types de frottement.....	23
2.3.1. Frottement de roulement.....	23
2.3.2. Frottement de pivotement.....	23
2.3.3. Frottement de glissement.....	24
2.3.3.1. La force d'adhésion.....	24
2.3.3.2. La force de déformation.....	25
2.4. L'approche d'Amontons et de Coulomb.....	26
2.5. Les facteurs influençant le coefficient de frottement.....	29
2.5.1. La vitesse de glissement.....	29
2.5.2. La nature des matériaux en contact.....	29
2.5.3. La température.....	29
2.5.4. Le temps.....	29
2.5.5. La charge normale appliquée.....	29
2.5.6. Les conditions de travail.....	30
2.5.7. L'état de surface des matériaux.....	30
2.6. Moyens expérimentaux (Tribomètre).....	30
3. L'usure.....	32
3.1. Définition.....	32
3.2. Différents types d'usure.....	32
3.2.1. L'usure par adhésion.....	32
3.2.2. L'usure abrasive.....	33
3.2.3. L'usure par diffusion.....	34
3.2.4. L'usure par corrosion.....	35
3.2.5. L'usure par fatigue.....	35
3.2.5.1. Fatigue mécanique.....	36
3.2.5.2. Fatigue thermique.....	36
3.2.6. L'usure par érosion.....	36
3.3. Durée de vie d'un mécanisme.....	38
3.3.1. Phase de rodage.....	38
3.3.2. Phase de fonctionnement normal.....	38
3.3.3. Phase de destruction.....	38
3.4. Traitement anti-usure.....	39
3.4.1. La lubrification.....	39
3.4.1.1. Objectif de la lubrification.....	40
3.4.1.2. Classification des lubrifiants.....	40
3.4.1.3. La courbe de Stribeck.....	41
3.4.2. Traitement des surfaces.....	42
3.4.2.1. Importance des traitements de surface.....	42
3.4.2.2. Types des traitements de surface.....	42
3.4.2.2.1. Traitement thermique.....	42
3.4.2.2.2. Traitement thermochimique.....	45
3.4.2.2.3. Traitement mécanique.....	46
3.4.3. Revêtement de surface.....	48

3.4.3.1.	Revêtement de surface à partir d'une phase solide.....	48
3.4.3.2.	Revêtement de surface à partir d'une phase liquide.....	48
3.4.3.3.	Revêtement de surface à partir d'une phase gazeuse.....	49
4.	Conclusion.....	50

#### Chapitre 3 : Analyse de la valeur :

1.	Introduction.....	51
2.	Définition de l'analyse de la valeur.....	51
3.	Histoire de l'analyse de la valeur.....	51
4.	Objectif de la méthode.....	52
5.	L'analyse de la valeur dans un projet.....	52
5.1.	Le temps.....	52
5.2.	Le coût.....	53
6.	Les démarches de l'analyse de la valeur.....	54
6.1.	L'orientation de l'action.....	54
6.2.	La recherche de l'information.....	54
6.3.	Analyse des fonctions et des coûts.....	54
6.3.1.	Le cahier des charges fonctionnel.....	54
6.3.2.	Recenser les fonctions.....	54
6.3.3.	Caractériser les fonctions.....	55
6.3.4.	Ordonner les fonctions.....	55
6.3.5.	Hiérarchiser les fonctions.....	55
6.3.6.	Valoriser les fonctions.....	57
6.4.	La recherche d'idées et voies de solutions.....	57
6.5.	L'étude et l'évaluation des fonctions.....	57
6.6.	Le bilan prévisionnel et proposition des choix.....	57
6.7.	Le suivi de réalisation.....	58
7.	Principes à respecter.....	58
8.	Avantages et inconvénients de la méthode.....	58
8.1.	Avantages.....	58
8.2.	Inconvénients.....	59
9.	Quelques exemples d'application.....	59
10.	Conclusion.....	61

#### Chapitre 4 : Application de l'analyse de la valeur :

1.	Orientation de l'action.....	62
1.1.	Objet de l'étude.....	62
1.2.	Objectif.....	62
1.3.	Le groupe de travail.....	63
2.	La recherche d'information.....	63
3.	Analyse des fonctions et des coûts.....	66
3.1.	Le cahier des charges fonctionnel.....	66
3.2.	Analyse fonctionnelle.....	67
3.2.1.	Recherche intuitive.....	67

3.2.2.	Relation avec les éléments extérieurs et l'environnement.....	67
3.2.3.	Analyse séquentielle.....	70
3.3.	Caractériser les fonctions.....	72
3.3.1.	Fonctions de service.....	72
3.3.2.	Fonctions de contrainte.....	73
3.3.3.	Recherche des fonctions techniques.....	73
3.4.	Arborescence des fonctions de la phase.....	74
3.5.	Les fonctions techniques.....	75
3.5.1.	Les éléments internes et externes au banc.....	75
4.	Recherche d'idées et voies de solutions.....	76
4.1.	Fonction 1 : Fixer le banc au sol.....	76
4.1.1.	Solution N°1.....	77
4.2.	Fonction 2 : Transmettre le mouvement de rotation au disque.....	79
4.2.1.	Groupe 1 : Générer le mouvement de rotation et choisir la vitesse.....	79
4.2.2.	Groupe 2 : Entraîner le système de guidage par un dispositif de liaison.....	81
4.2.2.1.	Solution N°1.....	81
4.2.2.2.	Solution N°2.....	83
4.2.2.3.	Solution N°3.....	85
4.2.3.	Groupe 3 : Guider l'arbre de broche en rotation.....	87
4.2.3.1.	Solution N°1.....	87
4.2.4.	Groupe 3 : Fixer le disque sur la broche porte éprouvette.....	89
4.2.4.1.	Solution N°1.....	89
4.2.4.2.	Solution N°2.....	91
4.2.4.3.	Solution N°3.....	93
4.3.	Fonction 3 : Appliquer la charge et la maintenir constante.....	95
4.3.1.	Groupe 1 : Fixer le pion.....	95
4.3.1.1.	Solution N°1.....	95
4.3.1.2.	Solution N°2.....	97
4.3.2.	Groupe 2 : Appliquer la charge.....	99
4.3.2.1.	Solution N°1.....	99
4.3.2.2.	Solution N°2.....	101
4.4.	Fonction 4 : Appliquer et maintenir la température voulue.....	103
4.4.1.	Groupe 1 : Isoler l'enceinte thermique.....	103
4.4.1.1.	Solution N°1.....	103
4.4.2.	Groupe 2 : Ouvrir et fermer l'enceinte thermique.....	105
4.4.2.1.	Solution N°1.....	105
4.4.2.2.	Solution N°2.....	107
4.4.3.	Groupe 3 : Chauffer l'enceinte et réguler la température.....	109
4.4.3.1.	Solution N°1.....	109
4.5.	Fonction 5 : Mesurer et acquérir les données.....	111
5.	Etude et évaluation des solutions (avantages et inconvénients).....	113
5.1.	Fonction 1 : Fixer le banc au sol.....	113
5.1.1.	Solution N°1.....	113
5.2.	Fonction 2 : Transmettre le mouvement de rotation au disque.....	113

5.2.1. Groupe 1 : Générer le mouvement de rotation et choisir la vitesse.....	113
5.2.2. Groupe 2 : Entraîner le système de guidage par un dispositif de liaison.....	113
5.2.2.1. Solution N°1.....	113
5.2.2.2. Solution N°2.....	114
5.2.2.3. Solution N°3.....	114
5.2.2.4. Décision.....	114
5.2.3. Groupe 3 : Assurer le guidage en rotation de l'arbre de broche.....	114
5.2.4. Groupe 4 : Assurer la fixation du disque.....	114
5.2.4.1. Solution N°1.....	114
5.2.4.2. Solution N°2.....	115
5.2.4.3. Solution N°3.....	115
5.2.4.4. Décision.....	115
5.3. Fonction 3 : Appliquer la charge et la maintenir constante.....	115
5.3.1. Groupe 1 : Fixer le pion.....	115
5.3.1.1. Solution N°1.....	115
5.3.1.2. Solution N°2.....	115
5.3.1.3. Décision.....	116
5.3.2. Groupe 2 : Appliquer la charge.....	116
5.3.2.1. Solution N°1.....	116
5.3.2.2. Solution N°2.....	116
5.3.2.3. Décision.....	116
5.4. Fonction 4 : Appliquer et maintenir la température voulue.....	117
5.4.1. Groupe 1 : Isoler l'enceinte thermique.....	117
5.4.2. Groupe 2 : Ouvrir et fermer l'enceinte thermique.....	117
5.4.2.1. Solution N°1.....	117
5.4.2.2. Solution N°2.....	117
5.4.2.3. Décision.....	117
5.4.3. Groupe 3 : Chauffer l'enceinte et réguler la température.....	117
5.5. Fonction 5 : Mesurer et acquérir les données.....	118
6. Bilan prévisionnel et proposition des choix.....	118
6.1. Récupération des solutions retenues.....	118
7. Le suivi de réalisation.....	119
7.1. Solution finale.....	119
7.2. Le choix des matériaux.....	119
7.3. Le mode opératoire.....	119
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>120</b>

# *Introduction générale*

# Introduction générale

L'usure étant un phénomène des plus coûteux et gênants dans l'industrie, il devient de plus en plus impératif d'y remédier du mieux que possible. En effet le secteur industriel investit des sommes importantes pour l'amélioration de la résistance aux frottements et à l'usure des pièces et structures mécaniques. Action qui se justifie par l'importance des pertes économiques liées au phénomène frottement/usure qui, selon les statistiques, présenterait entre 6 et 10% du produit national brut des pays industrialisés, ce qui se traduit par des chiffres plus qu'importants.

De ce fait, un domaine de recherche a été justement mis au service de cette problématique. La tribologie a donc pour but d'étudier, caractériser et codifier les méthodes qui permettent de donner un bon comportement au contact. Sa démarche consiste en l'interprétation de faits expérimentaux concernant divers aspects du frottement, de l'usure et de la lubrification, et cela en prenant compte plusieurs facteurs tels que la température, la vitesse, le chargement, l'environnement etc.

Pour ce faire, les scientifiques et les chercheurs du domaine ont recours à des méthodes d'essai permettant d'obtenir une caractérisation du frottement, de la lubrification et de l'usure. On peut citer comme exemples les essais sur des tribomètres pion/disque, bloc/cylindre, unidirectionnels ou à mouvement alterné, mais le but reste toujours le même, à savoir, étudier le frottement pour un contact donné.

Notre travail consiste donc à apporter une amélioration au tribomètre du Laboratoire de Mécanique des Structures et Energétique (LMSE) en donnant la possibilité d'introduire un nouveau facteur déterminant dans la tribologie ; le facteur température. Et cela en incluant une enceinte thermique dans notre conception. Tout cela sera régi par un outil d'aide à la conception connu sous le nom de l'Analyse de la Valeur (AV).

Le présent mémoire est composé de quatre chapitres. Le premier présente des notions de base sur la tribologie et la structure des surfaces. Dans le deuxième chapitre, nous proposons des notions un peu plus détaillées sur les frottements et l'usure des matériaux. On présentera la méthode de l'analyse de la valeur ; son historique ainsi que ses démarches dans le troisième chapitre. Quant au quatrième et dernier chapitre, il sera consacré à l'application de l'AV à l'amélioration de notre produit, à savoir, un tribomètre pion/disque équipé d'une enceinte thermique.

*Chapitre I*

**Notions sur la  
tribologie**

## 1. Tribologie

### 1.1. Introduction :

Le frottement est un phénomène physique omniprésent dans notre entourage, il fait partie de notre environnement. Même si parfois il s'avère très gênant, il est pourtant impossible de le supprimer. C'est le principe de l'action/réaction : un système mécanique où les différentes parties n'interagiraient pas les unes avec les autres ne fonctionnerait pas. La tribologie a pour but d'étudier ces frottements ainsi que la lubrification, c'est une discipline dont l'importance a suscité de nombreuses études et est en constant développement.

Pour commencer, la tribologie s'est principalement intéressée au volume des matériaux en contact en déterminant des lois de comportement du frottement et d'usure (approche mécanique). Puis vint la tribologie des surfaces associée à la physico-chimie des surfaces (approche matériaux). Enfin, la tribologie des interfaces (approche complémentaire mécanique/matériaux). Cette dernière notion a permis une meilleure compréhension des mécanismes de frottement et d'usure.

### 1.2. Histoire de la tribologie : [1]

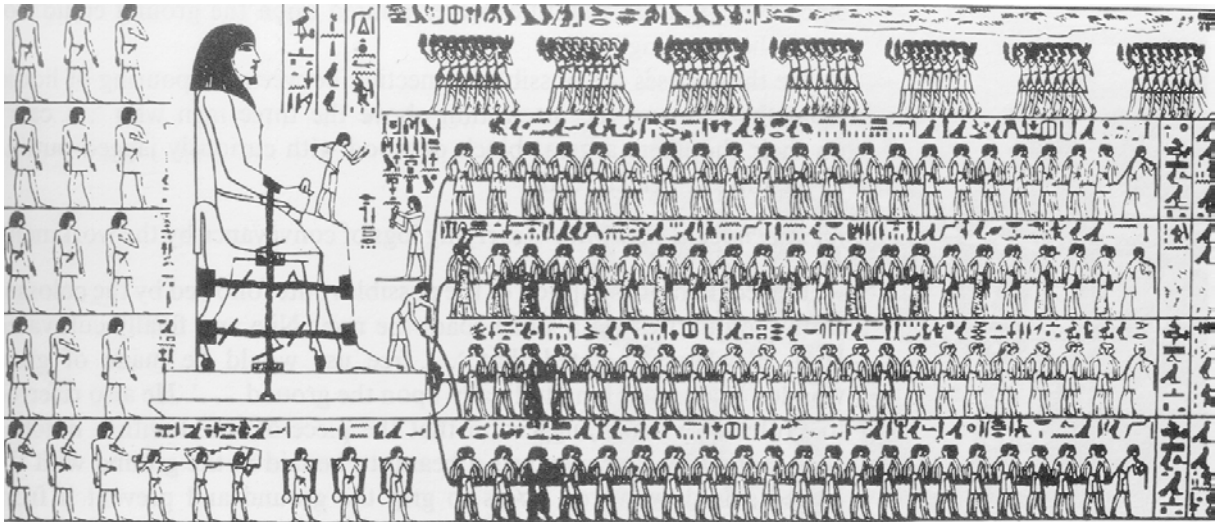
On pense souvent que la tribologie est née avec le développement industriel du XIX<sup>e</sup> et du XX<sup>e</sup> siècle, ce qui est totalement faux. Les notions de frottement et d'usure remontent à la plus lointaine antiquité (plus de 2000 ans av J.C.) et ont accompagné les progrès de l'humanité. Des bas-reliefs égyptiens qui datent de 2400 ans av J.C. montrent l'emploi de lubrifiant pour faciliter le déplacement des lourdes charges. De même on ignore généralement que les romains avaient inventé la butée à billes. Plus près de nous Léonard de Vinci, bien connu pour sa peinture et sa sculpture, fut aussi un mécanicien remarquable dont les travaux sur le frottement, les machines et les mécanismes furent utilisés plus de 2 siècles après sa mort. [2]

Il est connu que le frottement ne présente pas que des aspects négatifs, ainsi la tenue de route des automobiles dépend directement du frottement entre les pneumatiques et la route, de même, l'homme primitif a appris à maîtriser le feu en heurtant du silex ou en frottant des morceaux de bois l'un contre l'autre. Cependant, dès la construction des premiers mécanismes, l'homme a cherché à éliminer l'usure et à diminuer le frottement afin de réduire les efforts. [2]

Parmi les nombreux faits marquants liés à la tribologie durant l'évolution de la science, on peut citer :

- Mise en œuvre du mouvement rotatif pour le perçage durant le Néolithique.
- Utilisation des pivots dans les tours de potiers et de crapaudines pour les portes en Mésopotamie (~4000 av J.C.).
- Apparition de la roue en Mésopotamie (3500 av J.C.).

- Remplacement des glissières par des rouleaux pour déplacer des charges et bénéficier ainsi du facteur de frottement de roulement plus faible que celui de glissement (3000 av J.C.).
- Utilisation de lubrifiants en Egypte (vers 3000 av J.C.) en particulier dans le transport des charges importantes ; des bas-reliefs montrent en effet des esclaves versant du liquide pour faciliter le glissement, sur les glissières des traineaux supportant les statues des colosses à déplacer.



**Figure 1.1 :** Transport de statue, tombe de Tchuti Hetep, El-Bersheh, Egypte.

- Découverte de l'engrenage en Egypte et Mésopotamie (1000 avant J.C.).
- Notions de frottement pendant la période gréco-romaine (400 à 300 avant J.C.).

Une régression technique est notée entre la fin de la préhistoire et le début du moyen âge, mais au début de ce dernier, les progrès reprennent, notamment avec l'utilisation d'huiles animales et végétales pour la lubrification, l'apparition du concept de palier pour le matériel agricole, l'horlogerie, les équipements de mise en œuvre des nouvelles énergies : moulins à vent ou hydrauliques. Des métaux seront utilisés pour la réalisation des paliers et des équipements résistants à l'usure seront utilisés.

A la simple évocation du mot « Renaissance » on pense inévitablement à Léonard De Vinci, cet homme qui fut non seulement un grand peintre et sculpteur, mais aussi un physicien et mathématicien remarquable, il a été un précurseur exceptionnel dans tous les domaines, ainsi, dans le domaine de la tribologie, il fut le premier à quantifier les efforts de frottement et à introduire le coefficient de frottement. Les nombreuses études et schémas qu'il a laissés sur les frottements de glissement, de roulement, sur les matériaux de friction et les engrenages en sont les témoignages les plus typiques.

Plus récemment, au XVII<sup>e</sup> siècle, les premières études sur le frottement, hormis celles de Léonard De Vinci, ont été effectuées d'abord de manière descriptive, puis de plus en plus quantitative :

- Expression des premières lois de frottement par Guillaume Amonton (1699).
- Prise de conscience de l'influence de l'état de surface par B.F de Bélidor (1737).
- Approche analytique de la notion de frottement par Léonhard Euler (1750) introduisant notamment la notion d'angle de frottement :

$$\mu = \tan \alpha \quad (1)$$

- Finalisation des lois de frottement par C.A Coulomb (1782) et qui furent complétées un peu plus tard par les travaux expérimentaux de A.J Morin (1835).

La fin du XVIII<sup>e</sup> siècle et le début du XIX<sup>e</sup> connurent le développement de la lubrification, en effet les scientifique Navier et Stokes proposent en 1822 les équations générales du mouvement des fluides en tenant compte de la viscosité et Poiseuille (1840-1846) travaille sur l'écoulement d'un fluide dans un tube.

En 1883, Nikolai Pavlovich Petrov étudie la viscosité et les expériences de Beauchamp Tower et confirme ainsi les travaux de G.A Hirn sur la lubrification hydrodynamique.

Osborne Reynolds (1842-1912), à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, démontra l'équation qui portera son nom, équation de base de la lubrification hydrodynamique.

Le XX<sup>e</sup> siècle apporte avec lui les concepts de lubrification hydrostatique et élastohydrodynamique, de nombreux scientifiques, notamment Sommerfeld, Gumbel, Stribeck, abordent l'aspect scientifique de la tribologie. Et du point de vue réalisations technologiques on citera Alber Kingsbury et Michell qui ont déposé un brevet pour le patin oscillant, classé comme support de ligne d'arbre des plus performants.

En 1917, Lord Rayleigh fut le premier à présenter l'analyse du système hydrostatique, et établit ainsi de ce type de lubrification en faisant intervenir la portance générée par une pression extérieure.

On citera aussi, dans le domaine de la mécanique des solides, les théories sur la physique du roulement et celles de l'élastohydrodynamique, fruits de la reprise des travaux de Boussinesq et Hertz par Huber, Etribeck et Heathcote au début du XX<sup>e</sup> siècle.

Durant les cinquante dernières années et dans le but de satisfaire les besoins technologiques modernes dont des mécanismes qui ne cessent de s'améliorer en performance, la tribologie est devenue à elle-même une science à part entière, de nombreux chercheurs et équipes scientifiques sont mobilisés afin d'améliorer plusieurs aspects tels que :

- L'analyse et la description des surfaces techniques jusqu'à l'échelle nanométrique.
- L'étude des contacts lisses ou rugueux.
- Etude du frottement, de l'usure et de l'adhérence.
- Approfondissement des connaissances dans le domaine de la lubrification.
- Développement de nouveaux lubrifiants et additifs de plus en plus performants.

- Conception de nouveaux matériaux, traitements et revêtements de surfaces.

### **1.3. Définition :**

Le mot tribologie, dont l'étymologie est grecque (« tribein » pour « frotter » et « logos » pour « étude » ou « science »), a été attribué à cette discipline par l'anglais G. Salomon en 1968, et est apparu dans le dictionnaire français en 1974.

La tribologie est la discipline qui étudie les phénomènes susceptibles de se produire lorsque deux corps en contact sont animés de mouvements relatifs. Elle présente trois aspects distincts : le frottement qui est la résistance à un déplacement imposé, l'usure suite à la dégradation des surfaces qui se traduit par une perte de matière et la lubrification qui consiste à interposer un fluide entre les deux corps en contact. [3]

La tribologie est une science pluridisciplinaire, son développement, qui fut d'abord empirique, repose depuis quelques décennies sur les connaissances acquises à partir de plusieurs sciences telles que la mécanique des solides, de la mécanique des fluides, de la thermique, de la physique, de la chimie, de la science des matériaux et des mathématiques appliquées. [4]

### **1.4. Importance de la tribologie :**

On observe des phénomènes de frottement dans tous les systèmes mécaniques, et cette composante tribologique est décisive dans les domaines d'application variés qui vont de la mécanique industrielle aux systèmes du vivant.

La tribologie s'intéresse à l'étude et à l'interprétation scientifique des faits expérimentaux, elle entre en jeu de façon significative dans de nombreux domaines industriels. La connaissance de la tribologie est devenue une nécessité pour de multiples raisons :

- Assurer le bon fonctionnement et la fiabilité des machines.
- Diminuer le coût d'obtention des surfaces frottantes.
- Améliorer le rendement et la longévité des machines.
- Assurer la sécurité des biens et des personnes, particulièrement dans le domaine du transport.
- Contribuer à la santé publique et au confort, par exemple en diminuant les bruits, très nombreux, liés aux contacts mécaniques. [3]

### 1.5. L'approche économique de la tribologie [5]

Le frottement et l'usure sont responsables des pertes économiques colossales. Il est généralement admis qu'elles représentent de 6 à 10 % du produit national brut des pays industrialisés,

Voici quelques exemples chiffrés :

#### ❖ Royaume-Uni

En 1966, les pertes dues au frottement et à l'usure sont estimées à 1000 000 000 de livres sterling.

- 50 M£ : consommation d'énergie par frottement (« pertes directes »),
- 10 M£ : frais de lubrification, main d'œuvre, ...
- 230 M£ : maintenance et remplacement de pièces usées,
- 115 M£ : réparations et pertes par arrêt des machines,
- 100 M£ : investissements supplémentaires en machines.

#### ❖ L'union des républiques socialistes soviétiques (URSS) ;

D'après le journal du frottement industriel, n°6, Janvier 1980. Le frottement et l'usure coûtent 10 à 12 milliards de roubles par an.

#### ❖ Etats-Unis (USA) ;

En 1977, les pertes dans les systèmes pistons-segments-chemises des moteurs à 0,7 % de la consommation totale d'énergie des États-Unis, soit 100 millions de barils de pétrole par an, coûtant 3 milliards de dollars.

Il est vrai que ces chiffres ne sont pas très récents, mais l'ampleur du phénomène, à quelques détails près, est la même aujourd'hui.

### 1.6. Le système tribologique :

Un système tribologique ou tribosystème est un ensemble d'éléments en interaction statique ou dynamique dont le but est généralement : la transmission d'énergie, étanchéité statique ou dynamique, freinage ou guidage.

Un système tribologique se caractérisera donc par un ou plusieurs contacts par lesquels transiteront les efforts, la chaleur, éventuellement l'électricité.

Dans le cas le plus général, un système tribologique est composé des 4 éléments principaux suivants et représentés dans la figure 2 :

- Les deux premiers corps (1) et (2) soumis à des torseurs cinématiques (vitesse) et dynamique (forces et moments) sont limités par des couches superficielles à caractéristiques spécifiques sont souvent mal connus tant du point de vue géométrique que physicochimique, mécanique ou structural.
- Le milieu inter-facial (3) désigné sous le terme de troisième corps, est soumis à des sollicitations mécaniques, thermiques et physicochimiques. Ce troisième corps ayant des propriétés différentes de celles des premiers corps, sépare partiellement ou totalement les deux matériaux en contact. L'origine de ce milieu inter-facial peut être externe (lubrifiant solide ou liquide) ou interne (détachement des particules des premiers corps).
- L'environnement (4) dont le rôle peut être déterminant dans le comportement du contact.

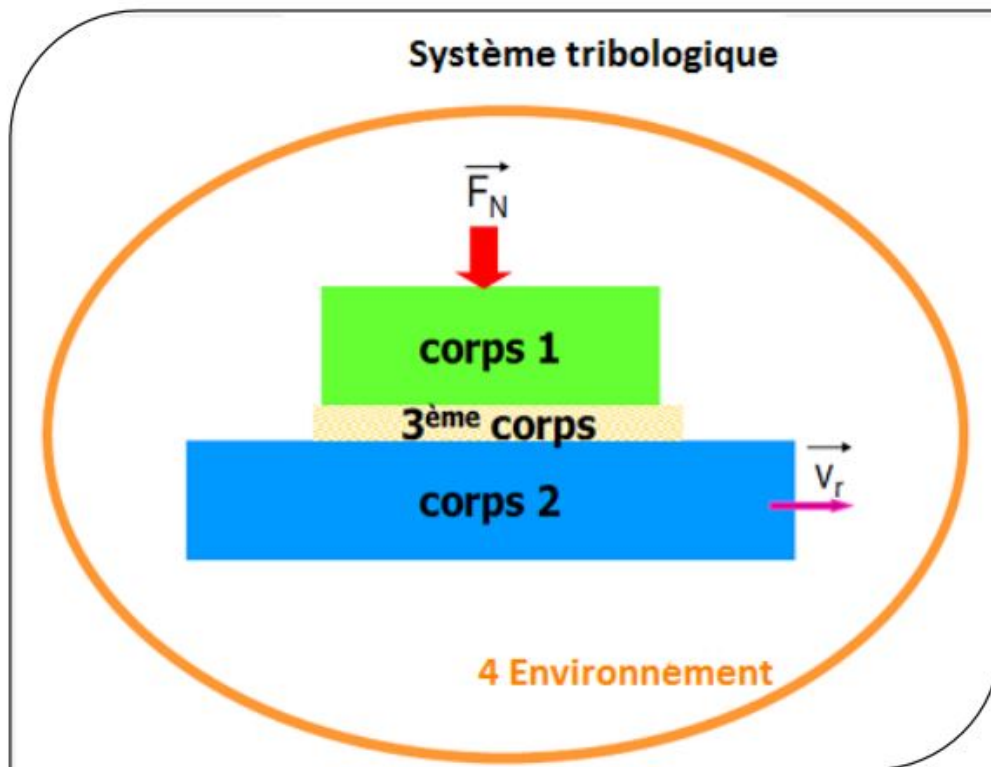
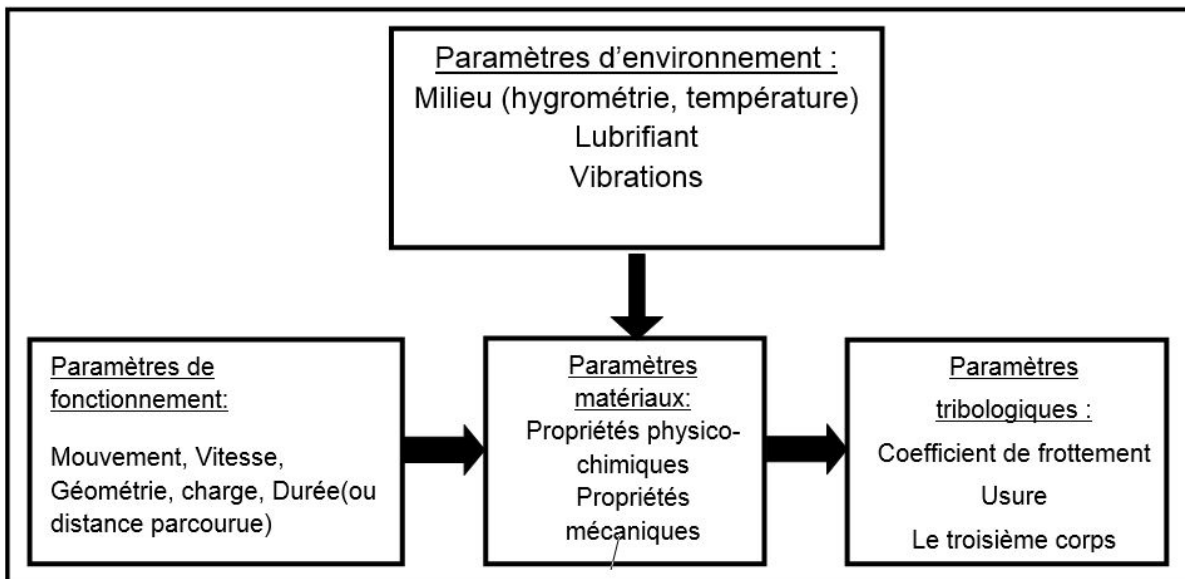


Figure 1.2 : Le système tribologique

La figure 3 montre le cas général d'un système tribologique



**Figure 1.3 :** Schéma synoptique d'un système tribologique dans le cas général

#### ❖ **Phénomènes observables :**

Lors du fonctionnement d'un système tribologique apparaissent un certain nombre de phénomènes caractéristiques dont les suivants :

- La résistance au déplacement qui est naturellement une réaction attendue et qui est exprimée par un coefficient de frottement.
- Les variations instantanées des efforts normaux et tangentiels sont la source de vibrations.
- Les excitations très riches en fréquences générées au niveau des surfaces peuvent se traduire par des bruits.
- L'énergie dissipée dans le contact va en très grande partie (plus de 95%) se transformer en énergie thermique, celle-ci se dissipe dans le milieu environnant et dans chacun des deux solides qui provoquent leur échauffement. [6]

### **1.7. Le circuit tribologique :**

L'ensemble des détériorations de la surface et la perte de matériau donnent les caractéristiques de l'usure. Ce processus se traduit par un enchaînement d'événements liés essentiellement à la présence du troisième corps : détachement des particules, piégeage et formation de débris pour aboutir à l'établissement d'un régime stationnaire traduisant l'équilibre entre détachement et élimination des particules.

Cet enchaînement demande de ne pas confondre entre particules détachées et particules d'usure, le frottement est influencé par la géométrie des premiers corps et la rigidité du mécanisme.

Le gradient de vitesse auquel sont soumis les débris qui constituent le troisième corps (adhérent ou non après ouverture du contact) peut se traduire en termes de débits, dont les différentes composantes participent au processus d'usure défini comme le circuit tribologique de Berthier (figure 1.4).

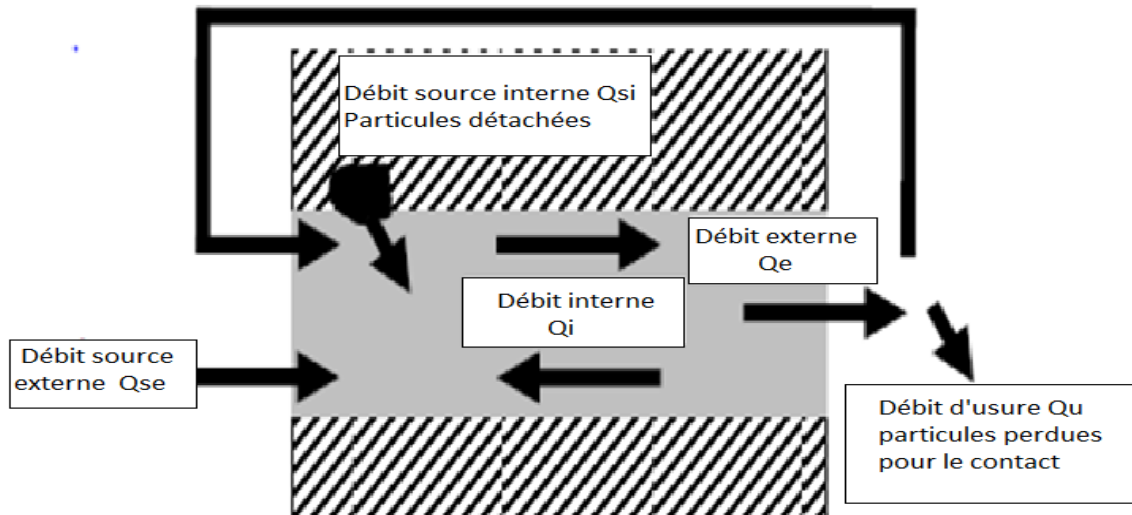


Figure 1.4 : circuit tribologique de Berthier

Le détachement de particules ou débit source interne (Q<sub>si</sub>) alimente le contact en troisième corps dont le mouvement se traduit par le débit interne (Q<sub>i</sub>). Les particules éjectées du contact constituent le débit externe (Q<sub>e</sub>) qui se partage à son tour en un débit de recyclage (Q<sub>r</sub>) qui permet la réalimentation du contact et un débit d'usure (Q<sub>u</sub>) qui concerne les particules définitivement perdues par le système tribologique.

Dans le cas de la lubrification liquide ou solide, il faut tenir compte de l'élément artificiel apporté au système tribologique que l'on traduit par le débit source externe (Q<sub>se</sub>).

Il apparaît ainsi, qu'en aucun cas la mesure du volume de dégradation des premiers corps n'est représentative de l'usure du couple tribologique testé. Si aucun lubrifiant n'est apporté au contact ce qui se traduit par Q<sub>se</sub>=0, le terme de débit source (Q<sub>s</sub>) ne représente que le débit source interne.

O. Dalverny écrit ainsi les relations d'équilibre des débits pour différents types de circuits tribologiques (conservation de la quantité de matière) :

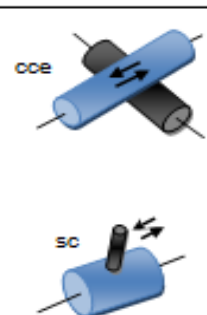
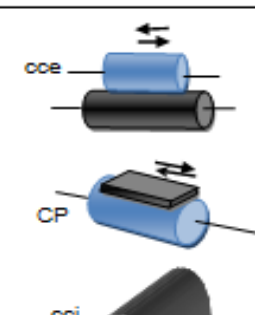
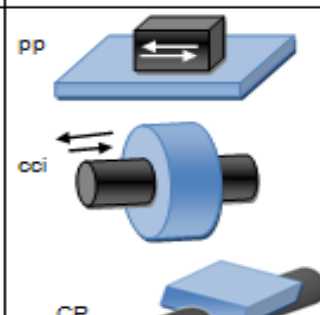
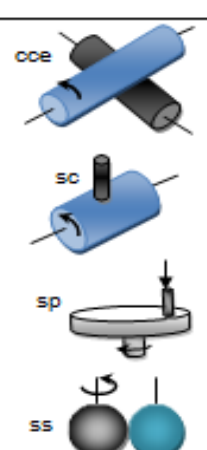
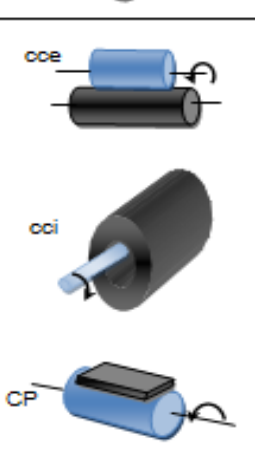
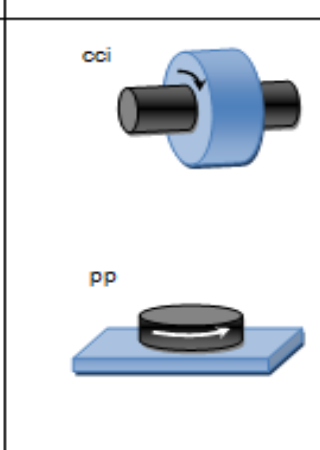
$$\text{Circuit ouvert : } \left\{ \begin{array}{l} Q_i = Q_s - Q_e \\ Q_u = Q_e \end{array} \right. \quad \text{Soit} \quad \left\{ \begin{array}{l} Q_i = Q_s - Q_u \\ Q_u = Q_e \end{array} \right.$$

$$\text{Circuit fermé : } \left\{ \begin{array}{l} Q_i = Q_s - Q_e + Q_r \\ Q_u = Q_e - Q_r \end{array} \right. \quad \text{Soit} \quad \left\{ \begin{array}{l} Q_i = Q_s - Q_u \\ Q_u = Q_e - Q_r \end{array} \right.$$

**1.8. Contacts normalisés en tribologie :**

La normalisation des essais en tribologie présente de nombreuses difficultés en raison de la complexité des phénomènes de frottement et d'usure. Ces essais normalisés peuvent cependant servir, à mieux comprendre les phénomènes tribologiques, par exemple, à établir une base commune pour évaluer les performances d'un nouveau couple de matériaux.

Les méthodes d'essai sont classées en fonction du type de contact et des mouvements relatifs des corps en présence. La norme ASTM G99 présente les trois contacts (ponctuel, linéaire, surfacique) obtenus par combinaisons appropriées de sphères, de cylindres, de plans, avec mouvement alternatif ou continu (figure 1.5). [2].

	Contacts ponctuels	Contacts linéaires	Contacts de surfaces apparentes
Mouvement alternatif			
Mouvement continu			

Cce : cylindre-cylindre (extérieur), cci : cylindre-cylindre (intérieur),  
 Sc : sphère-cylindre, sp : sphère-plan, CP : cylindre-plan,  
 ss : sphère-sphère, pp : plan-plan

**Figure 1.5 :** types de contacts utilisés sur tribomètres et abrasimètres (D'après la norme ASTM G99).

## 1.9. Paramètres tribologiques :

Les paramètres tribologiques sont caractéristiques des systèmes mécaniques qui ont des surfaces qui interagissent en mouvement relatif. La résistance au mouvement (friction) ou la résistance à l'endommagement des surfaces (usure) dans un environnement donné est en relation avec l'action d'une ou plusieurs sollicitations. Un système tribologique est donc caractérisé par les paramètres tribométriques, associés avec les conditions opérationnelles, les paramètres microstructuraux des matériaux et les paramètres d'interactions dépendant du contact et du mode de lubrification. [7]

### 1.9.1. Les paramètres opérationnels :

Ils caractérisent les conditions fonctionnelles du système tribologique. Ce sont, dans la plupart des cas, des variables indépendantes qui peuvent être modifiées pour les tests. Les principaux paramètres opérationnels sont la charge appliquée  $F_n$ , la vitesse  $V$ , le temps  $t$  et la température  $T$ .

### 1.9.2. Les paramètres structuraux :

Ils sont liés aux mécanismes élémentaires des tribosystèmes des produits et des machines. Le modèle classique d'un tribosystème est constitué de quatre composants principaux. Une distinction doit être faite entre les systèmes fermés (les composants sont soumis aux processus de frottement et d'usure d'une manière continue) et les systèmes ouverts (avec écoulement de matière à l'interface dans le cas de machines de mise en forme). Le tableau 1.1 donne la liste des principaux paramètres structuraux d'un tribosystème ouvert ou fermé.

Tribosystème	Élément (1)	Élément (2)	Interface (3)	Environnement	Type du système
Boîte de vitesses	Pignon	Roue dentée	Lubrifiant	Air	Fermé
Roue/rail	Roue	Rail	3 <sup>ème</sup> corps	Air	Ouvert
Glissière	Glissière	Support	Graisse	Air	Ouvert
Roulement	Bille	Cage	Lubrifiant	Huile	Fermé
Pneu/route	Pneu	Sol	Sable, eau	Poussière	Ouvert
Moulin	Roue	Cage	Minerais	Air	Ouvert

**Tableau 1.1 :** Constituants structuraux des tribosystèmes usuels

### 1.9.3. Les paramètres tribométriques :

Ce sont des valeurs qui résultent des mesures des interactions à l'interface de contact, dans des systèmes tribologiques. On en distingue notamment :

- **Le taux d'usure** : Selon la norme DIN EN 50324 (ASTM G99) le taux d'usure se définirait comme étant « le volume perdu divisé par la charge normale et la distance ». Le taux d'usure  $k_v$  est dérivé de la loi d'Archard (2), en éliminant la dureté comme paramètre, et en supposant que la perte de volume  $V$  est proportionnelle à la charge normale  $F_N$  et à la distance de glissement  $d$  parcourue. [8]

$$V = k_v \times F_N \times d \quad (2)$$

Cette formule caractérise bien la phase stationnaire de perte de matière après le rodage initial (running-in) et avant l'apparition d'un mécanisme secondaire comme par exemple la fatigue, qui dépend fortement de la topographie des pièces usinées.

Notons que tous les tribosystèmes, que ce soit dans une application industrielle ou une machine d'essai, possèdent un taux d'usure, qui est défini par le couple de matériaux, la configuration du système et la sollicitation et qu'on peut le déterminer en fin de vie. Le taux d'usure est la « réponse » du tribosystème à une sollicitation.

Bien que certains auteurs l'expriment en  $mm^2/kgf$  ou en  $mm^2/N$ , Le taux d'usure volumétrique  $k_v$  s'exprime le plus souvent en  $mm^3/(N \cdot m)$ . [6]

- **Produit  $p \times v$**  : La pression de contact et la vitesse de glissement sont les deux paramètres clefs de la sollicitation des matériaux dans un tribosystème. Elles interviennent de diverses manières, et d'abord de manière globale. En effet, les valeurs du produit  $p v$  sont fréquemment utilisées dans les fiches des producteurs de matériaux pour préciser les limites d'utilisation des matériaux et couples de matériaux. La valeur  $p v$  en  $MPa \cdot m/s$  est le produit de la pression de contact par la vitesse de glissement et caractérise la sollicitation énergétique du tribosystème/contact. Selon les configurations, la pression est la pression hertzienne de contact (contact non conforme, bille/plan par exemple) ou la pression apparente (contact conforme, plan/plan par exemple).
  - **La pression de contact** détermine directement la sollicitation mécanique de la pièce (effet de plastification locale, fatigue...) et de ses couches superficielle (rupture des films superficielles) : avec le coefficient de frottement, elle détermine les contraintes de traction arrière qui peuvent provoquer la fissuration des couches superficielles fragiles.
  - **La vitesse de glissement** est le facteur le plus influent sur les températures éclair (flash température) c'est-à-dire les températures transitoires, mais très élevées sur les aires réelles de contact, où les deux corps ne sont séparés que par des films très minces, comme en frottement sec ou en régime mixte. L'élévation locale de la température de

contact est susceptible de modifier la nature et les propriétés des surfaces (transition de phase, ramollissement excessif, fusion...) ainsi que la rhéologie de l'interface et surtout du lubrifiant liquide, et la réactivité chimique des pièces et du lubrifiant (oxydation...). [8]

- **Energie de frottement** : Le modèle initialement développé par Fleischer utilise des formules simples. La **perte énergétique**  $E_f$  due au frottement s'écrit :

$$E_f = \mu F_N \times d \quad (3)$$

Avec :

$E_f$  : Perte d'énergie.

$F_N$  : Effort normal.

$\mu$  : Coefficient de frottement de Coulomb.

$d$  : Distance de glissement.

Le produit  $\mu F_N$  représente la **force de frottement**.

- **Humidité relative** : L'humidité est caractérisée par le taux d'humidité relative HR, c'est-à-dire 100 fois le rapport de la pression partielle d'eau dans l'atmosphère à la pression de vapeur d'eau saturante, à la température de l'atmosphère. C'est un facteur qui influe fortement sur le frottement et l'usure ; elle peut assurer une protection contre l'adhésion, car la plupart des matériaux forment des oxydes ou hydroxydes faciles à cisailer, tels que :  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ,  $\alpha\text{-Al}(\text{OH})_3$ ,  $[\gamma\text{-AlO}(\text{OH})]$ , etc. La formation en surface de ces composés affecte le frottement et/ou l'usure. L'humidité est donc alors un paramètre chimique, notamment de tribo-oxydation, qui change la composition et la nature chimiques de la surface. L'humidité doit donc être prise en considération, surtout en frottement sec.
- **Rugosité** : L'état de surface réel des pièces est un paramètre, qui, en régime de lubrification hydrodynamique ou hydrostatique par un fluide (liquide le plus souvent, parfois gaz), caractérise l'épaisseur minimale du film permettant d'assurer la formation d'un film continu et de séparer totalement les solides.

#### 1.9.4. Les paramètres d'interaction :

Ils caractérisent l'action des paramètres opérationnels sur les composants du système tribologique. Il caractérise le monde de contact (distribution des contraintes de contact) ou le type de lubrifiant pour un couple de matériaux donné. Des conditions peuvent être associées au processus de frottement et d'usure (adhésion, abrasion, ...). Les forces d'interaction entre les surfaces en contact dépendent de la nature physicochimique et des énergies de surface. Les contraintes de contact dépendent de la géométrie du contact, de l'élasticité, viscosité, plasticité ou dureté des métaux et de la force externe statique ou dynamique. Les modes de déformation au contact sont gouvernés par la topographie (rugosité) des surfaces. [6]

## 2. La surface :

### 2.1. Définition :

En tribologie, la surface ne se limite pas uniquement à la l'aire d'appui des deux corps, il s'agit aussi des éléments du contact qui jouent un rôle sur le frottement, c'est-à-dire sur les contraintes mécaniques, les températures et le comportement du troisième corps (lubrifiants, débris d'usure...). [2]

De ce fait, on conviendra donc de dire que les paramètres définissant la surface sont l'ensemble des propriétés mécaniques. Physiques et chimiques des matériaux en présence, ainsi qu'aux caractéristiques géométriques du contact incluant, par extension, la forme des pièces. [2]

### 2.2. Energie superficielle :

L'énergie superficielle  $\gamma$  d'un solide (exprimée en  $\text{mJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ) est le travail qu'il faut fournir pour créer, de façon isotherme et réversible, une unité d'aire de surface nouvelle.

Cette énergie reflète globalement la nature des liaisons entre atomes ou molécules constituant le solide car elle correspond en quelque sorte à l'énergie libre ou disponible des liaisons « coupées » à la surface.

En général, les énergies superficielles les plus élevées (jusqu'à plusieurs milliers de  $\text{mJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ) correspondent aux métaux et solides covalents, les plus faibles (moins de  $100 \text{mJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ) aux molécules organiques (polymères et plus particulièrement les composés fluorés), tandis que les composés ioniques (oxydes) se situent à des niveaux intermédiaires, soit quelques centaines de  $\text{mJ}\cdot\text{m}^{-2}$ .

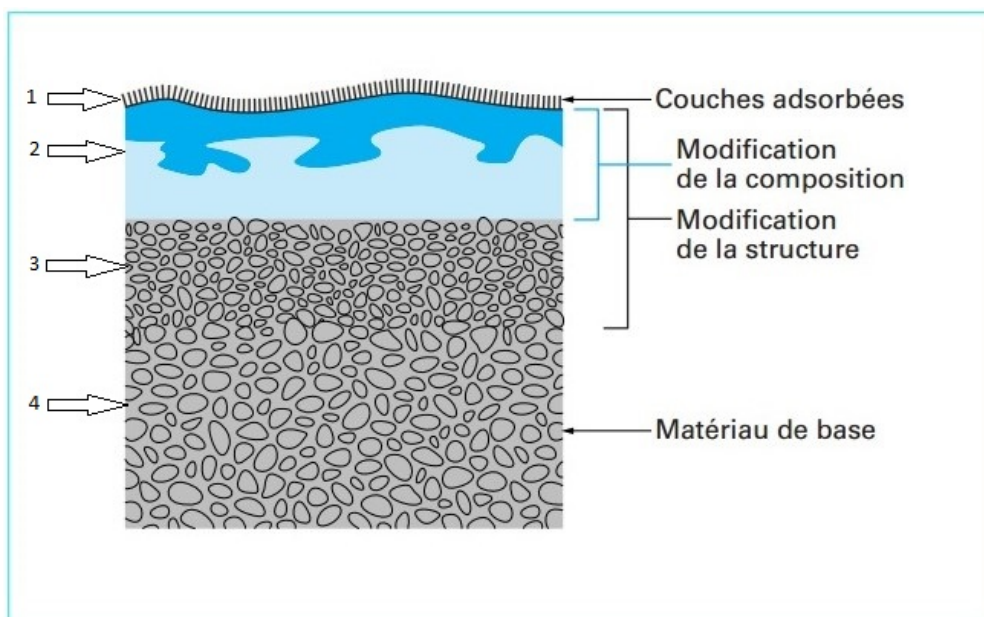
L'énergie superficielle influe à la fois sur les propriétés de frottement à sec des matériaux [forces d'adhésion – coefficient de frottement], et sur le comportement en régime lubrifié, à travers les phénomènes de mouillage-étalement.

L'apport de lubrifiant sur les surfaces métalliques ramène l'énergie superficielle à des valeurs très faibles, de l'ordre d'une dizaine de  $\text{mJ}\cdot\text{m}^{-2}$ . [9]

### 2.3. Etat structural d'une surface :

D'une façon générale, les caractéristiques d'une surface diffèrent de celles du matériau (dans la masse), d'une part à cause de la rupture de la symétrie de la structure atomique (modification des forces de liaison, de la concentration en défauts...), d'autre part parce que l'effet des contraintes extérieures, et notamment de l'environnement (atmosphère, température par exemple) peut engendrer des modifications considérables sur les couches superficielles en créant des concentrations d'éléments très différentes des valeurs moyennes volumiques.

Après qu'elle ait été préparée (par traitements thermiques, par usinages...) et placée dans son environnement de travail, une surface est constituée d'une succession de couches dont une représentation schématique typique est proposée :



**Figure 1.6 :** Représentation schématique de la surface. [9]

Il est donc évident que la surface soit l'endroit le plus affecté d'une pièce. La zone 1 est la couche adsorbée constituée le plus souvent d'oxygène, de polluants atmosphériques, de corps gras ... et dont l'épaisseur est généralement inférieure à  $0.01 \mu\text{m}$ . Sa présence concerne la quasi-totalité des matériaux, qu'ils soient métalliques, céramiques ou polymères. La zone 2 est un film d'oxyde ( $1$  à  $10 \mu\text{m}$ ). La zone (3) est une zone mécaniquement perturbée de structure écrouie ou structure de couche de diffusion ( $1$  à  $50 \mu\text{m}$ ). La zone 4, partant de  $100 \mu\text{m}$  est le matériau de base.

Paramètres	Influence
Caractéristiques mécaniques et thermomécaniques Contraintes résiduelle	Réponse aux sollicitations mécaniques (entre les solides, entre troisième corps et solides...) et thermiques : <ul style="list-style-type: none"> <li>– déformabilité des contacts (accommodation, répartition des pressions) ;</li> <li>– aptitude à l'écrouissage ;</li> <li>– résistance à la rayure, à l'abrasion ;</li> <li>– résistance à la fissuration (mécanique-thermique) ;</li> <li>– résistance à la décohésion.</li> </ul>
Propriétés physiques (coefficient de dilatation, conductivité thermique)	Réponse aux sollicitations d'origine thermique : <ul style="list-style-type: none"> <li>– dissipation de la chaleur par conduction ;</li> <li>– résistance aux chocs et à la fatigue thermiques ;</li> <li>– évolutions géométriques : distorsions, rattrapage des jeux, etc.</li> </ul>

Composition		Réactivité entre les solides, entre solide(s) et environnement : – affinité, miscibilité entre les matériaux ; – transformations physicochimiques (effets de l'ambiance, du lubrifiant...).
Structure	Micro	Forces d'adhésion entre les solides, rétention des lubrifiants, ...
	Macro	Genèse, forme et taille des débris d'usure.

**Tableau 1.2 :** Principaux paramètres des matériaux ayant une influence sur le comportement en frottement

## 2.4. Types de surfaces :

La normalisation précise les termes (types) de surface à utiliser :

### 2.4.1. Surface d'un corps :

Elle est constituée par l'ensemble des points qui délimitent la portion de l'espace où se trouve la matière de ce corps.

### 2.4.2. Surface géométrique :

C'est la surface parfaite, idéale. Sur le dessin elle est définie géométriquement par le bureau d'études à l'aide de cotes nominales.

### 2.4.3. Surface spécifiée :

Elle résulte de la surface géométrique transformée par le bureau des études qui prescrit des limites de réalisation de cette surface à l'aide de symboles et de valeurs numériques en complément des cotes nominales du dessin.

### 2.4.4. Surface réelle :

C'est celle qui est obtenue au cours de la fabrication.

### 2.4.5. Surface mesurée :

Elle résulte de l'exploration de la surface réelle par des instruments de mesure. Le degré d'approximation de la surface mesurée par rapport à la surface réelle dépend de la technique de mesure appliquée, de la précision de l'instrument de mesure utilisé et de la nature même de la surface réelle.

L'intersection de la surface réelle avec un plan perpendiculaire à la surface géométrique qui lui correspond s'appelle profil comme indique la figure 1.7.

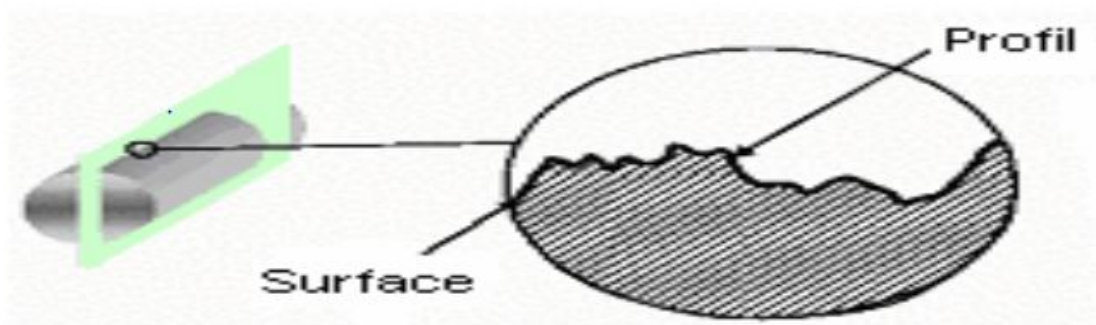


Figure 1.7 : Profil d'une surface

## 2.5. Défaut d'une surface géométrique :

On sait que les cotes dimensionnelles des pièces sont sujettes à tolérances, mais les surfaces proprement dites sont aussi affectées par des irrégularités qui jouent un grand rôle dans le fonctionnement des mécanismes. On a classé les irrégularités selon l'échelle qu'il faut choisir pour les observer. [6]

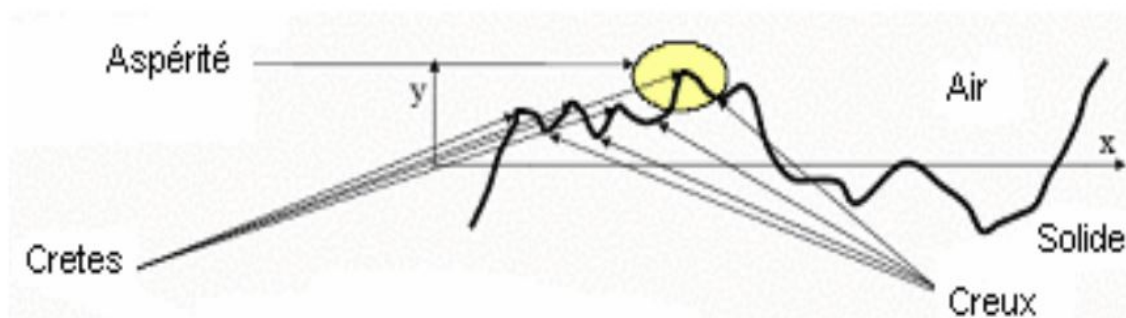


Figure 1.8 : Défauts de profil d'une surface

### 2.5.1. Défauts de forme :

Les défauts de forme ou erreurs macro-géométriques dites de premier ordre proviennent des déformations de la pièce et de la machine-outil lors de l'usinage, tels que : les défauts de planéité, cylindricité, parallélisme, perpendicularité. La période  $x$  des défauts de forme est de plusieurs ordres de grandeur plus grande que leur amplitude  $y$  (figure 1.9).

Les défauts de forme se rapportent à la surface géométrique. [10]

On les mesure avec les instruments de métrologie comme le pied à coulisse ou le micromètre.

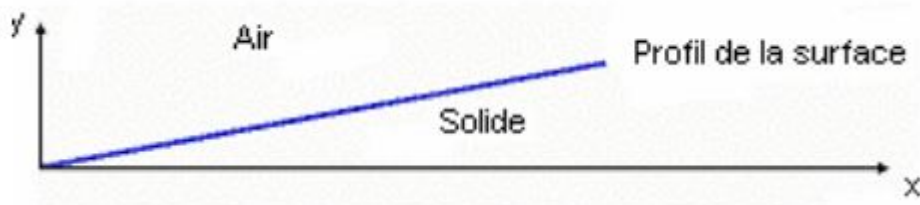


Figure 1.9 : Période des défauts de forme d'une pièce géométrique.

### 2.5.2. Défaut d'ondulation :

Les irrégularités du deuxième ordre (figure 1.10) consistent en ondulations régulières engendrées par des vibrations de la pièce ou de la machine-outil, les ondulations sont apparentes à l'œil nu. [11].

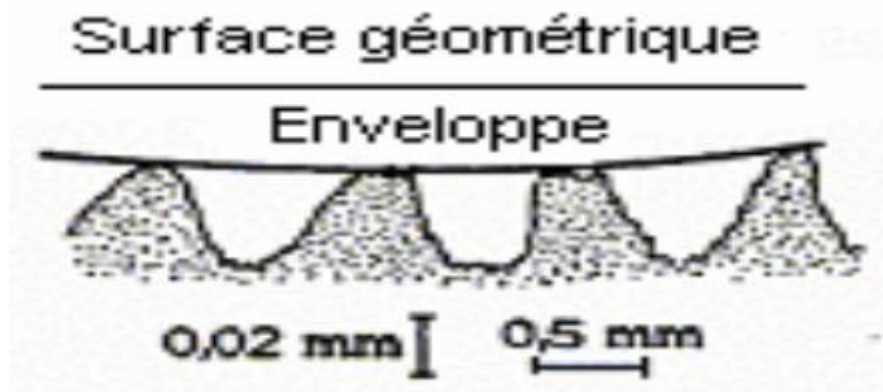
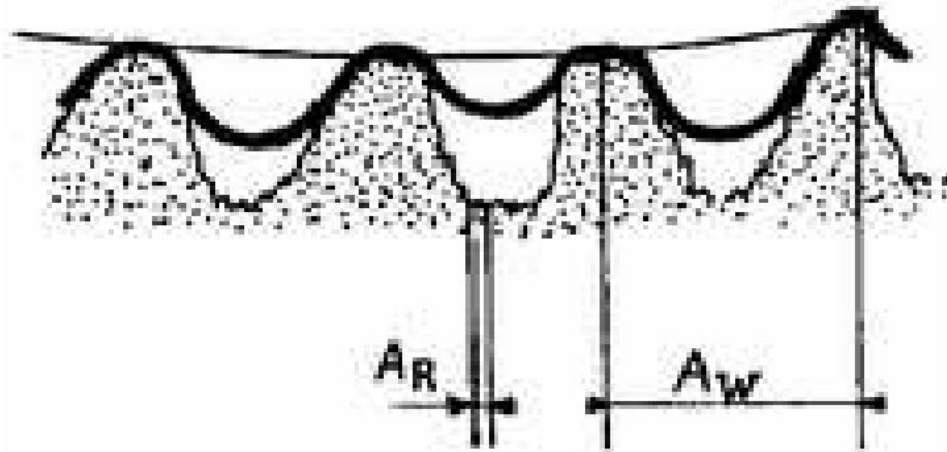


Figure 1.10 : Défauts d'ondulation.

### 2.5.3. Rugosité :

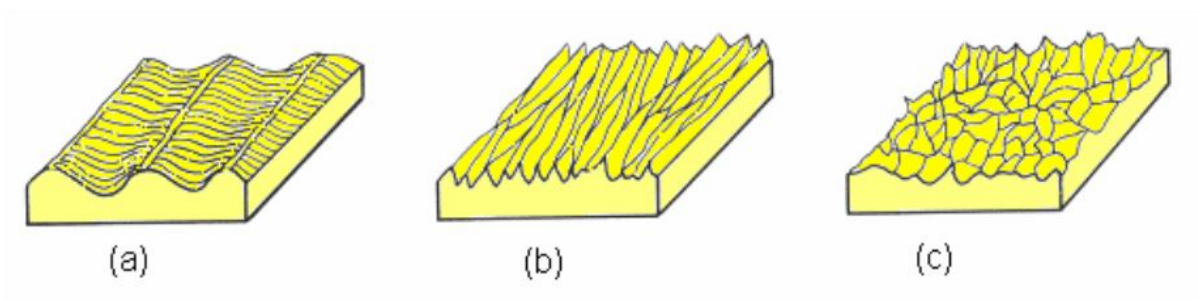
A plus petite échelle, visible seulement à la loupe ou au microscope, on rencontre la rugosité. Elle résulte de stries ou sillons 3<sup>ème</sup> ordre (figure 1.11) défauts périodiques de pas  $A_R$  voisin de 0.1 mm et une période  $A_W$ . Ces stries formées par l'avance progressive de l'outil (tournage, rabotage).

Le 4<sup>ème</sup> ordre ou les aspérités se forment lors de l'arrachage de la matière par les outils. [11].



**Figure 1.11** : Rugosité de 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> ordre.

Le 5<sup>ème</sup> et 6<sup>ème</sup> ordre correspondent respectivement aux structures cristallines et moléculaires. Une surface réelle résulte de la superposition de la rugosité et des défauts de forme (figure 1.12). [6].



**Figure 1.12** : Structure de surfaces : (a) stries régulières ; (b) stries orientées ; (c) aspérités irrégulières.

### 2.5.3.1. Mesure de la rugosité :

#### 2.5.3.1.1. Ecart arithmétique moyen du profil (Ra) :

La rugosité arithmétique (**Ra**) est égale à la moyenne arithmétique, calculée sur la longueur de base, de la valeur absolue de l'ordonnée ( $Z$ ) entre chaque point du profil et l'axe  $ox$ .

$$R = \frac{1}{L} \int_0^L |Z(x)| dx \quad (4)$$

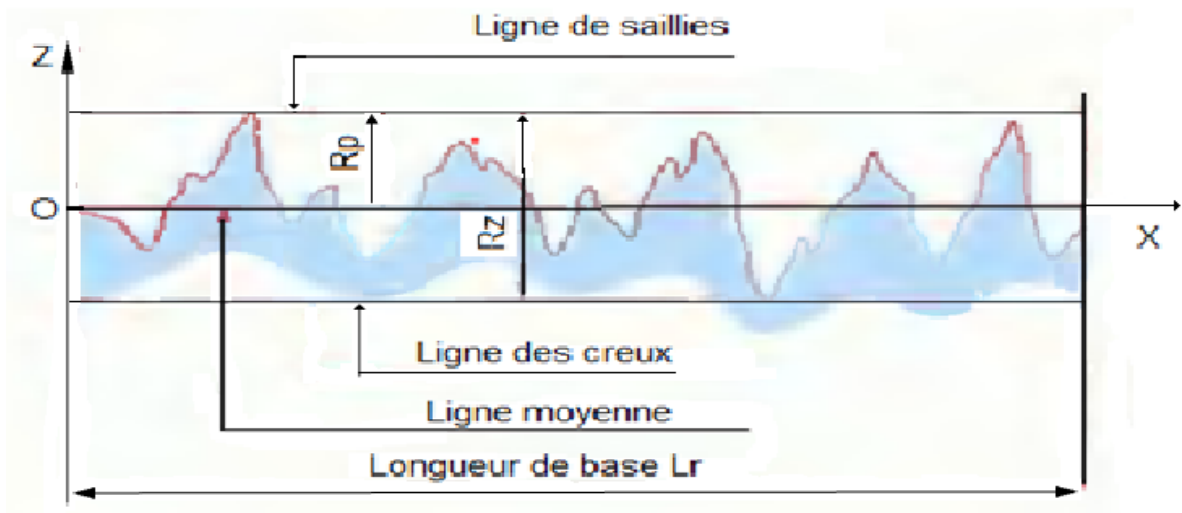


Figure 1.13 : paramètre de rugosité lié à la ligne moyenne.

2.5.3.1.2. Profondeur moyenne de rugosité (R) :

C'est la moyenne des distances saillie-creux.

$$R = \frac{R_1 + \dots + R_n}{n} \quad (5)$$

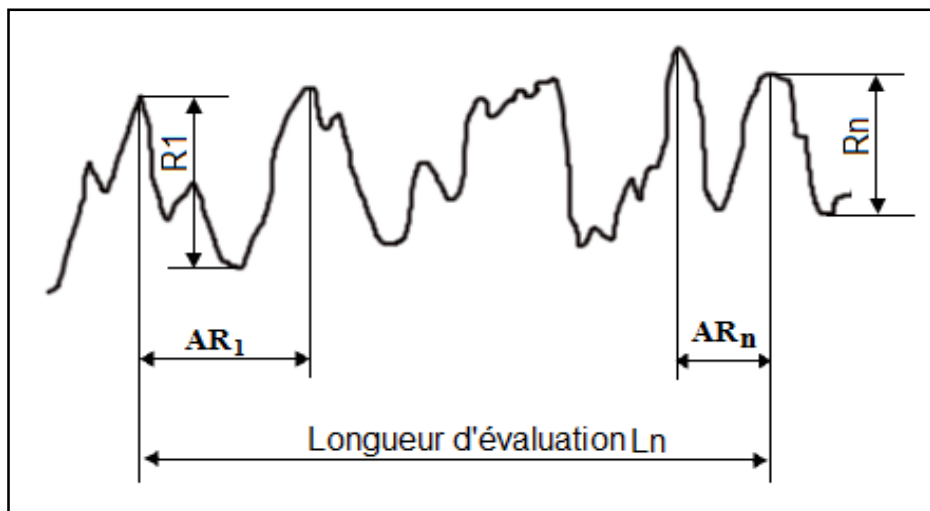


Figure 1.14 : Paramètres de rugosité liés aux motifs.

2.5.3.1.3. Pas moyen de rugosité (AR) :

C'est la moyenne des distances saillie-saillie (figure 1.14).

$$A_R = \frac{A_{R1} + \dots + A_{Rn}}{n} \quad (6)$$

#### 2.5.3.1.4. Ecart quadratique moyen du profil ( $R_q$ ) :

Valeur moyenne quadratique des écarts du profil par rapport à la ligne de référence des moindres carrés à l'intérieur de la longueur de base (figure 1.15).

$$R_q = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

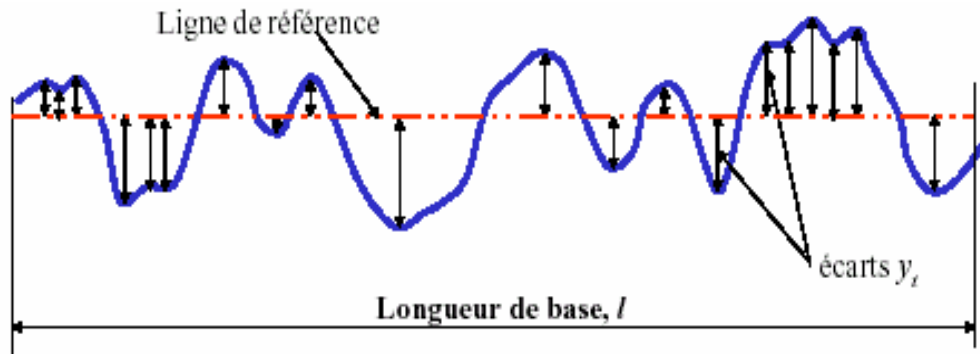


Figure 1.15 : Ecart quadratique moyen.

### 3. Conclusion :

Une machine, une installation industrielle sont des biens durables ; elles ont une durée de vie que le constructeur a calculée et que l'utilisateur doit obtenir, pour maximiser cette durée, il faut agir sur le choix de la nature des matériaux et sur l'utilisation raisonnable des paramètres tribologiques pendant le service de façon à optimiser les conditions de fonctionnement.

Pour cette fin, nous devons nous documenter un peu plus sur les phénomènes de frottement et d'usure afin de mieux cerner le problème et d'anticiper les dégradations prématurées.

## *Chapitre II*

# ***Frottement et usure***

## 1. Introduction :

Notre quotidien tel qu'on le connaît serait quasiment unimaginable sans les frottements. Marcher, tenir quelque chose dans sa main, craquer une allumette, en allant jusqu'à démarrer et freiner une voiture, etc. tout cela, et bien plus d'autres exemples, est affecté par le phénomène du frottement. Ce dernier intervient lorsque deux surfaces en contact sont mises en mouvement l'une par rapport à l'autre, produisant une force qui s'oppose au mouvement. La plupart de ces phénomènes peut se comprendre sur la base des lois du frottement énoncées dès le 18<sup>ème</sup> siècle par Amontons et Coulomb (mais déjà mises en évidence par Léonard de Vinci 200 ans plus tôt), à partir de la notion de coefficient de frottement. Pourtant l'évidence apparente de ce "vieux problème" cache l'extrême complexité sous-jacente. L'origine du frottement fait intervenir une multitude d'ingrédients, couvrant un spectre très large de phénomènes physiques : rugosité des surfaces, élasticité, plasticité, adhésion, lubrification, thermique, usure, chimie des surfaces, humidité, etc. Il y a donc un contraste paradoxal entre la simplicité de lois du frottement et la complexité des phénomènes sous-jacents, qui a constitué un défi majeur intriguant l'imagination des scientifiques depuis près de 500 ans.

## 2. Le frottement :

### 2.1. Définition :

Une définition de ce que nous entendons par frottement mérite d'être donnée en raison de la complexité de la nature du frottement et du caractère interdisciplinaire de ce champ de recherche, qui requiert l'expérience et les connaissances des chimistes, des ingénieurs, des métallurgistes et des physiciens. [11]

- Le frottement peut être défini comme la force résistante tangentielle à l'interface commune entre deux corps lorsque, sous l'action d'une force externe, un corps se déplace ou tend à se déplacer relativement à la surface de l'autre.
- Le frottement est aussi défini comme la résistance ou mouvement qui existe lorsqu'un objet solide est déplacé tangentiellement par rapport à la surface d'un autre qu'il touche, ou lorsque l'on essaie de provoquer un autre déplacement.
- Les normes ne définissent pas le frottement mais la force de frottement qui est la force résistante tangentielle à l'interface entre deux corps lorsque, sous l'action d'une force extérieure, un corps se déplace ou tend à se déplacer relativement à l'autre [ASTM, 1990].

### 2.2. La force de frottement :

Dès qu'un solide est mis en contact avec un autre solide, il apparaît un phénomène d'adhérence qu'on appelle le frottement.

La force de frottement est celle qui agit entre deux surfaces en contact de façon à empêcher le mouvement de l'une par rapport à l'autre. Cette force peut être :

- **Une force de cohésion** : C'est la force qui lie entre les molécules de deux corps.
- **Une force d'adhésion** : les la force qui accroche les liquides aux solides et, à un degré moindre, les solides entre eux. [2].

### 2.3. Types de frottement :

On peut considérer plusieurs types de frottements, si les deux corps sont des solide cette force est appelée frottement solide, elle peut être de type glissement, roulement (louvoisement). Si au moins l'un des deux corps est fluide la force est appelée frottement fluide. Et dans chaque cas on peut distinguer le frottement statique et le frottement cinématique (dynamique).

#### 2.3.1. Frottement de roulement :

Le frottement de roulement, c'est-à-dire lorsqu'un point ou une ligne de contact de A et B joue le rôle de centre instantané de rotation, le mouvement peut s'obtenir en déplaçant la direction de la force Q parallèlement à elle-même d'une longueur H, le coefficient de frottement de roulement est égal à  $H/R$  ; c'est un nombre sans dimension. [12]

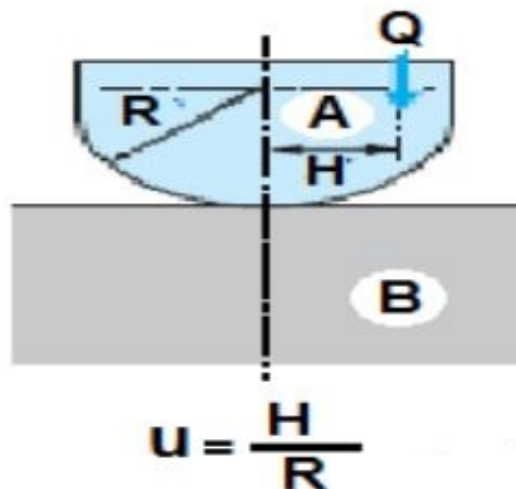


Figure 2.1 : Frottement de roulement. [12]

#### 2.3.2. Frottement de pivotement :

Le frottement de pivotement est le frottement qui se produit lorsqu'une surface oscille, tourne autour d'un axe fixe en reposant par le même point sur une autre surface. Dans ce type de frottement, le contact entre les deux surfaces qui devrait être théoriquement ponctuel, est en fait constitué par une certaine surface plus ou moins importante selon la charge et l'élasticité des matériaux des deux corps. La toupie en mouvement donne l'exemple d'un frottement de pivotement. Dans ce cas, le coefficient de frottement a la dimension d'une longueur. [13]

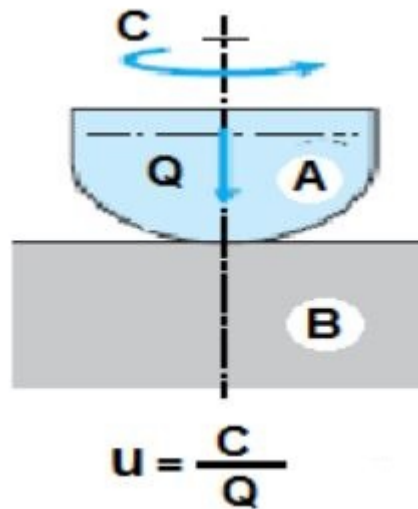


Figure 2.2 : Frottement de pivotement. [12]

### 2.3.3. Frottement de glissement :

La théorie du frottement de glissement fut étudiée déjà par Léonard de Vinci qui s'y intéressa vers 1500, au glissement des corps sur les plans inclinés, mais c'est Amontons, vers 1700, puis Coulomb, vers 1800, qui établirent la loi. [13]

Le frottement de glissement se produit lorsqu'on déplace, sans la faire rouler ; la surface d'un corps solide sur la surface d'un autre corps solide. C'est le type de frottement le plus fréquent (Un piston glissant dans un cylindre, un arbre tournant à sec dans un palier...).

Le modèle classique du frottement par glissement admet que la force de frottement peut être décomposée en une force d'adhésion et une force de déformation :

$$F_{fr} = F_{ad} + F_{déf} \quad (8)$$

#### 2.3.3.1. La force d'adhésion :

Lors d'un contact entre deux solides, la surface réelle du contact  $S_r$  ne représente qu'une faible fraction de la surface apparente. Si on pose  $\tau$  la contrainte limite de cisaillement du matériau le plus tendre, la force d'adhésion s'écrit :

$$F_{ad} = S_r \times \tau \quad (9)$$

Si  $P$  est la pression de contact entre les deux matériaux, la force normale est :

$$F_N = S_r \times P \quad (10)$$

Dans ces conditions, on peut écrire l'équation du coefficient de frottement adhésif :

$$\mu_{ad} = \frac{F_{ad}}{F_N} = \frac{\tau}{P} \quad (11)$$

On remarque dans l'équation (10) que le coefficient de frottement adhésif est indépendant de la surface de contact, mais il dépend de la charge appliquée.

Ce modèle ne tient pas compte de la force tangentielle appliquée sur la surface de contact.

Dans le cas de la présence d'une force tangentielle  $F_T$ , un écoulement plastique supplémentaire se forme et provoque l'augmentation de l'aire réelle de contact :

$$S^2 = \left(\frac{F_N}{P}\right)^2 + \left(\frac{F_T}{\tau}\right)^2 \quad (12)$$

$\left(\frac{F_T}{\tau}\right)^2$ , représente l'aire supplémentaire produite par la force tangentielle  $F_T$ .

Ce modèle permet de tenir compte des films d'oxyde qui se forment sur les métaux. Ces films possèdent une contrainte limite de cisaillement :

$$\tau_f = c \times \tau \quad (13)$$

$c$  : Paramètre inférieur à l'unité.

La force de frottement d'adhérence s'écrit :

$$F_{ad} = \tau_f \times S \quad (14)$$

Le coefficient de frottement adhésif devient :

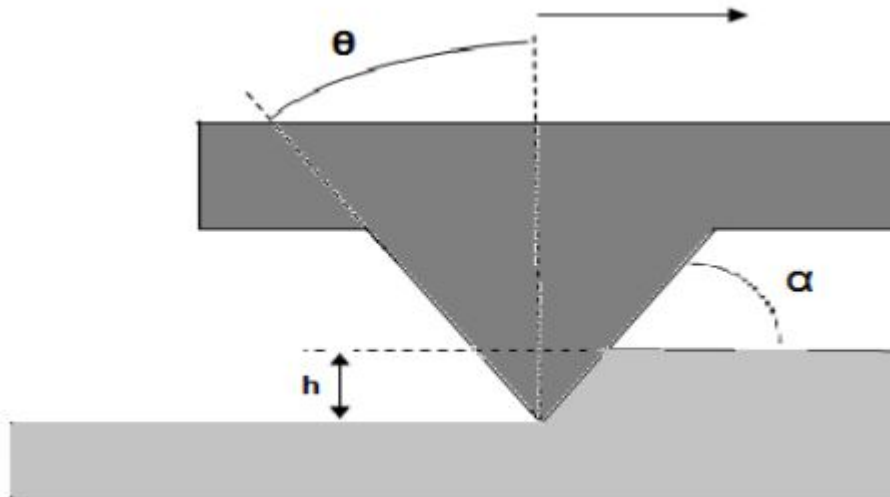
$$\mu_{ad} = \frac{F_{ad}}{F_N} = \frac{c}{\alpha\sqrt{1-c^2}} \quad (15)$$

Où :  $\alpha = \frac{P}{\tau}$

### 2.3.3.2. La force de déformation :

La contribution de la déformation à la force de frottement peut être estimée en considérant une seule aspérité en contact avec une surface plane.

Si on considère que l'aspérité est conique de demi-angle  $\theta$ , et que le contact par l'intermédiaire de la pression, supposée uniforme, ne se fait que sur la partie frontale de l'aspérité (Figure 2.3).



**Figure 2.3 :** Modèle d'une aspérité ( $\alpha$  est un angle d'attaque,  $\theta$  est le demi angle au sommet du cône représentant la rugosité et  $h$  la profondeur d'indentation)

Le coefficient de frottement de déformation est :

$$\mu_{déf} = \frac{F_{déf}}{F_N} = \frac{C_T}{C_N} \frac{2}{\pi \cdot \tan(\theta)} \quad (16)$$

Avec  $C_T$ ,  $C_N$  sont des coefficients dépendant de la forme et de l'écrasement du matériau.

L'expression du coefficient de frottement prenant compte de l'adhésion et de la déformation s'écrit comme suit :

$$\mu = \mu_{ad} + \mu_{déf} = \frac{c}{\alpha \sqrt{1-c^2}} + \frac{2C_T}{\pi C_N} \cot(\theta) \quad (17)$$

#### 2.4. L'approche d'Amontons et de Coulomb :

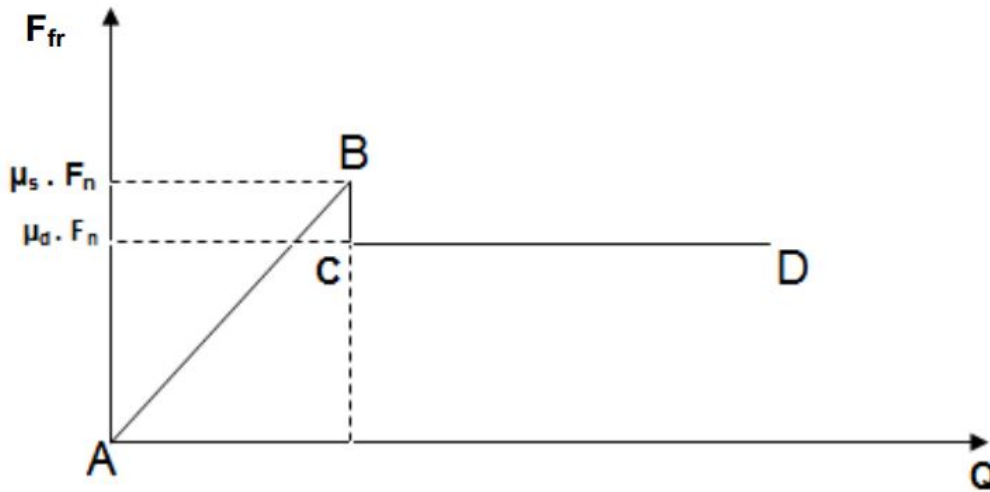
Lorsque l'on tente de faire glisser un solide posé sur un plan il apparaît, spontanément, une force de frottement qui s'oppose à la mise en mouvement, Il s'ensuit que tant que la force appliquée est trop faible, elle sera équilibrée par la force de frottement solide et l'objet restera immobile (figure 2.4).

Tant que l'objet est immobile, nous avons :

$$F_{fr} \leq \mu_s \times F_N \text{ (Droite AB)} \quad (18)$$

Lorsque le solide se met en mouvement, la force de frottement chute instantanément de la valeur ( $\mu_s \cdot F_N$ ) à la valeur ( $\mu_d \cdot F_N$ ), (droite BC).  $F_{fr}$  demeure ensuite constante, indépendamment de la vitesse du solide. Dès que le mouvement est amorcé, nous avons quelle que soit la vitesse :

$$F_{fr} \leq \mu_d \times F_N \text{ (Droite CD)} \quad (19)$$

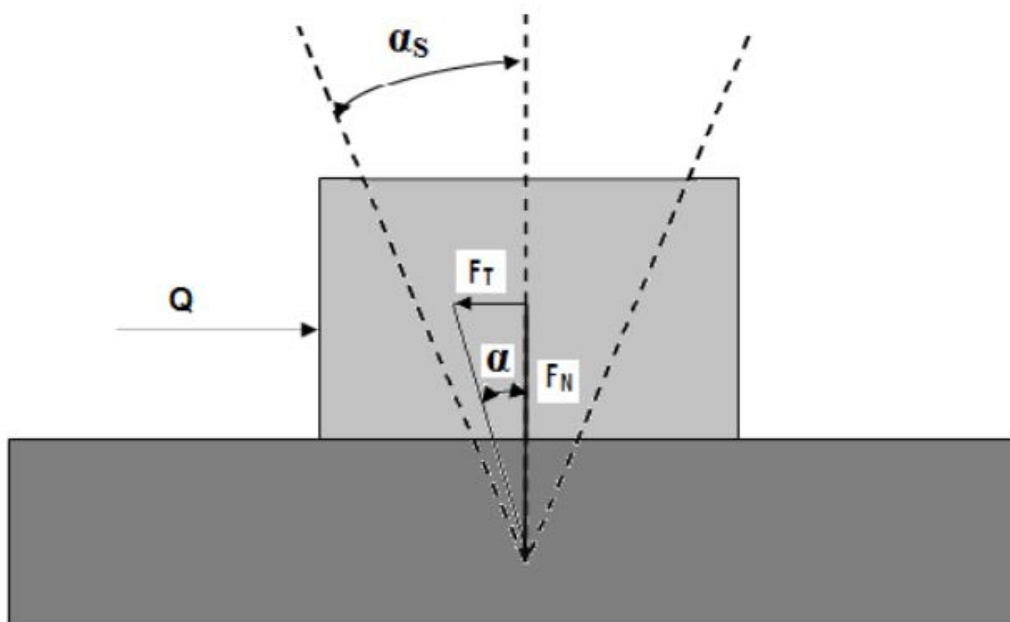


**Figure 2.4 :** Evolution du coefficient de frottement en fonction de la charge appliquée [4]

On peut aussi utiliser l'angle de frottement pour mieux expliquer ce phénomène :

Si  $\alpha < \alpha_s$  : absence de mouvement relatif entre les deux corps.

Si  $\alpha > \alpha_s$  : le solide se met en mouvement.



**Figure 2.5 :** Modélisation de l'angle de frottement. [4]

La distinction entre le coefficient statique et dynamique a été introduite par Euler, à partir de l'étude d'un solide posé sur un plan incliné d'un angle  $\alpha$ . (Figure 2.6)

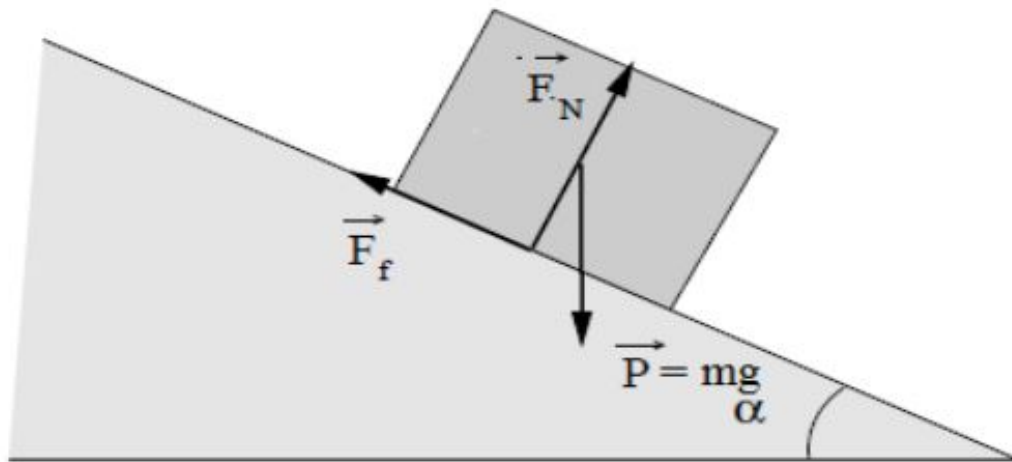


Figure 2.6 : Solide sur plan incliné.

A l'équilibre :

$$P + F_T + F_N = 0 \quad (20)$$

$$\left. \begin{array}{l} F_T = P \sin \alpha \\ F_N = P \cos \alpha \end{array} \right\} \implies \mu_s = \tan \alpha \quad (21)$$

D'après la loi de Coulomb, lorsque le solide glisse, le rapport  $\frac{F_T}{F_N}$  ne reste pas égal à

$\mu_s$ .

La figure suivante représente graphiquement la loi de Coulomb.

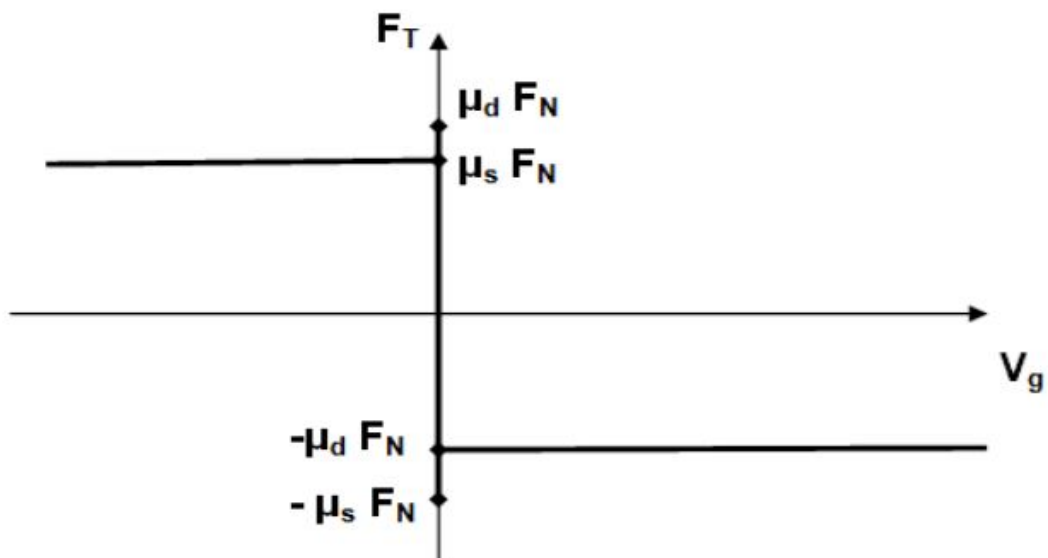


Figure 2.7 : Représentation de la loi de Coulomb à coefficient de frottement statique et dynamique.

## 2.5. Les facteurs influençant le coefficient de frottement :

Le facteur de frottement, ou coefficient de frottement, est une grandeur qui varie en fonction de très nombreux paramètres :

### 2.5.1. La vitesse de glissement :

La valeur du coefficient de frottement est différente à l'arrêt que lorsque les corps glissent l'un sur l'autre (coefficient de frottement statique et dynamique). Dans le cas des métaux secs le coefficient de frottement dynamique est généralement plus petit qu'à l'arrêt, il atteint rapidement la valeur dynamique lorsque la vitesse dépasse quelques cm/s.

A très grande vitesse, le coefficient de frottement des métaux diminue fortement, parce que le métal fond dans les zones de contact et forme un film lubrifiant. [3]

### 2.5.2. La nature des matériaux et du contact :

Le frottement diminue lorsqu'un des matériaux du couple tribologique est tendre, car l'effort de labourage est faible. C'est pourquoi on revêt les surfaces d'une fine couche d'un matériau tendre ou d'un film d'oxyde.

Le coefficient de frottement est plus grand dans le cas du frottement de glissement car la forces d'adhésion et de labourage sont importantes, mais il est plus faible dans le frottement de roulement ou de pivotement. [2]

### 2.5.3. La température :

Le coefficient de frottement des métaux diminue souvent légèrement lorsque la température des pièces s'élève ; puis, au-delà de 500°C à 800°C, il augmente fortement. Ce comportement peut s'expliquer par le fait que la dureté du métal tombe rapidement, les points de contact tendent vers une plastification étendue. Le coefficient de frottement des céramiques croît fortement (400 à 600 °C), puis diminue au-delà.

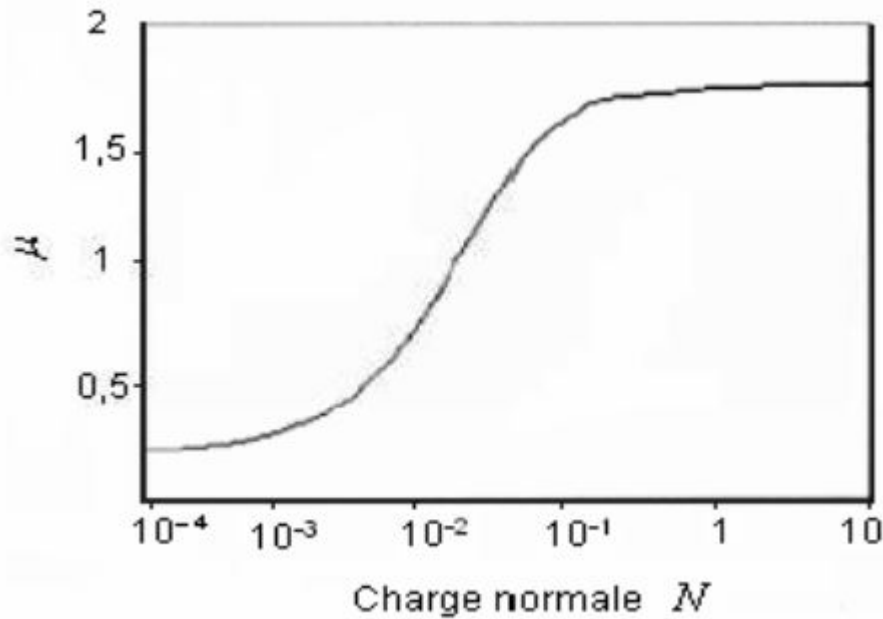
### 2.5.4. Le temps :

Le coefficient de frottement statique augmente avec le temps dans le cas d'un contact polymère/acier poli.

L'étude menée par Bureau et Al. Sur les systèmes polymère/polymère sans lubrification montre aussi l'accroissement du coefficient de frottement statique avec le temps de contact. [14].

### 2.5.5. Charge normale appliquée :

La figure 2.8 donne un exemple de la variation du coefficient de frottement  $\mu$  en fonction de la charge normale appliquée  $N$  pour du cuivre glissant sur du cuivre dans l'air et sans lubrification pour un essai pion-disque.



**Figure 2.8 :** Variation du coefficient de frottement  $\mu$  en fonction de la charge normale  $N$

Avec l'augmentation de la charge appliquée, le film d'oxyde (1 à 10nm) qui joue un rôle critique dans le contact glissant est progressivement détruit, entraînant une augmentation progressive du coefficient de frottement qui se stabilise à une valeur correspondant au contact métal-métal. [11]

#### 2.5.6. Les conditions de travail :

Le frottement sec crée des fortes contraintes entre les aspérités des deux surfaces en contact, ce qui favorise l'augmentation de la force de frottement.

L'utilisation d'un lubrifiant permet d'éviter le contact métal-métal, et facilite le glissement des deux corps entre eux, ce qui donne un coefficient de frottement plus faible. [2]

#### 2.5.7. L'état de surface des matériaux :

Le coefficient de frottement est relativement grand lorsque les surfaces sont très rugueuses. [7].

#### 2.6. Moyens expérimentaux (Tribomètre) :

Le tribomètre est un appareil utilisé pour déterminer certaines propriétés tribologiques de couches minces, soit la résistance à l'usure (le taux d'usure), le coefficient de friction et l'énergie dissipée. Il existe une grande variété d'équipements pour les essais, qui peuvent être classés par le mode de contact.

Les résultats des mesures dépendent énormément des conditions d'essais : vitesse de glissement, charge appliquée, état de surface des échantillons, distance de glissement, durée de l'essai, couple de matériaux en contact, humidité ambiante et température, lubrification. [2]



Figure 2.9 : Exemple d'un tribomètre (bille sur disque).

Dans notre travail, on s'intéresse uniquement au tribomètre pion-disque, son principe consiste à appliquer une charge sur un pion en contact avec la surface plane d'un disque en rotation, le coefficient de frottement est calculé par un logiciel de traitement de données, d'après la relation  $\mu = F_T / F_N$ . La force normale est connue, la force tangentielle est déterminée à partir des données enregistrées par un capteur.

La figure suivante schématise le principe du tribomètre pion-disque.

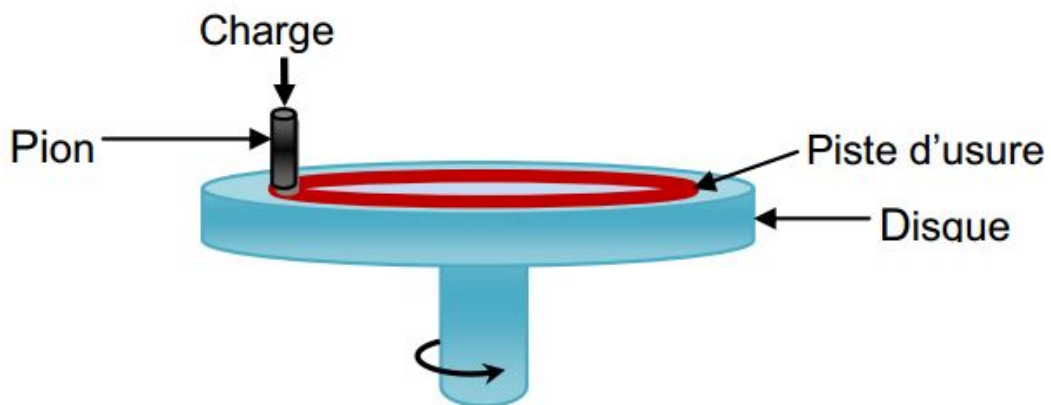


Figure 2.10 : Principe d'un tribomètre pion/disque.

### 3. L'usure :

La détérioration d'une matière produit des déchets qu'on appelle l'usure, c'est la conséquence du frottement et il se produit au niveau de la zone de contact. Avec le frottement l'usure est un vaste domaine couvert par la tribologie. Il existe certes des théories de l'usure, mais de nombreux effets sont inexpliqués. L'usure détruit les surfaces fonctionnelles des surfaces et cause avec la corrosion, d'énormes pertes. On est toujours intéressé à réduire, voire supprimer l'usure pour prolonger la vie d'une machine. La prévention de l'usure repose essentiellement sur l'expérience acquise dans l'exploitation industrielle.

#### 3.1. Définition :

Le terme usure, dans son acception la plus large, exprime la détérioration des composants due à l'usage. L'usure est générée par plusieurs mécanismes physiques, chimiques ou mécaniques indépendants ou non. En fait, l'usure considérée comme un phénomène global est très difficile à décrire du point de vue quantitatif. Il en résulte que les différentes approches théoriques sont faites à partir d'hypothèses simplificatrices tendant à dissocier les processus mis en jeu pour mieux les appréhender.

#### 3.2. Différents types d'usure :

##### 3.2.1. L'usure par adhésion :

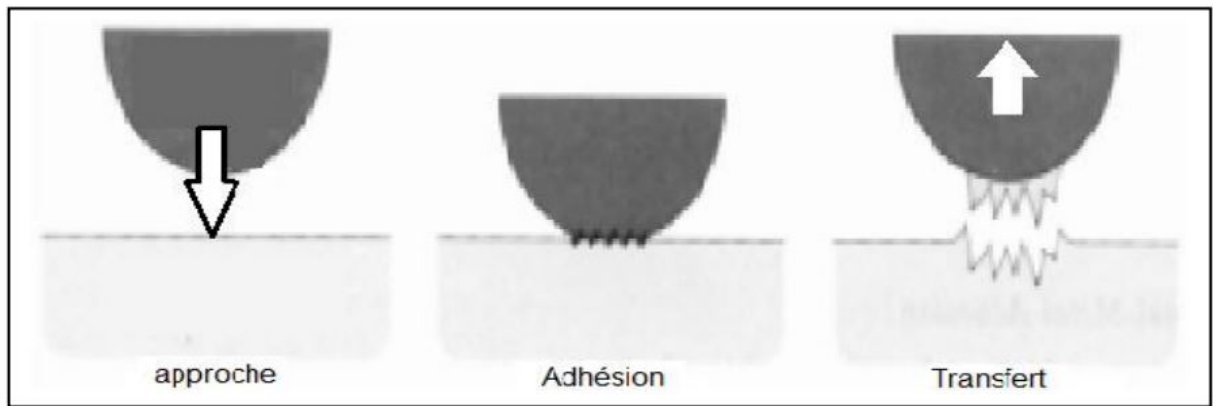
La théorie de l'usure d'adhésion a été développée par Archard. C'est quand deux corps en contact forment sur leurs surfaces des soudures froides appelées jonctions. Pour réaliser le mouvement relatif, ces jonctions doivent être cisailées.

L'usure de deux surfaces dépend de la section de cisaillement des jonctions :

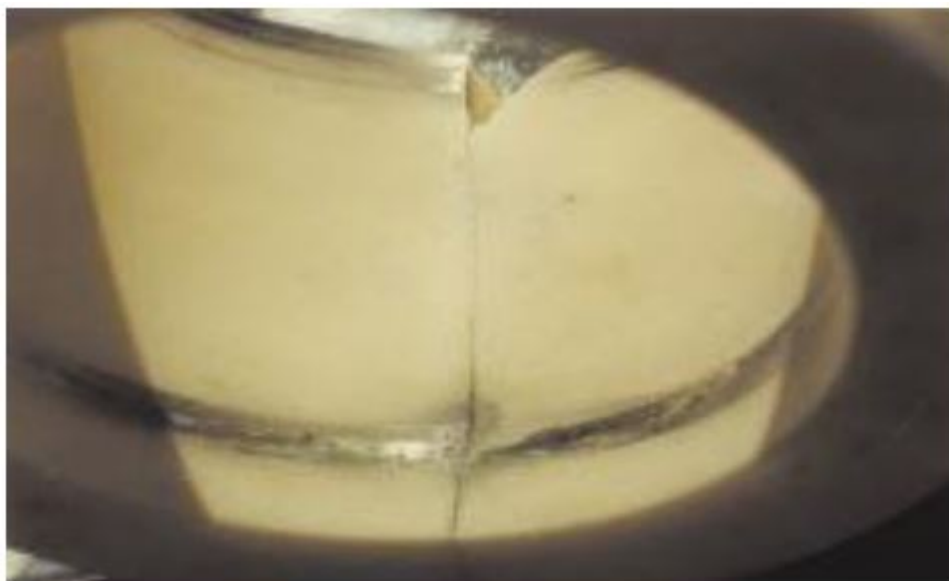
- Si le cisaillement est produit sur la surface initiale de séparation des corps, l'usure est nulle.
- Si le cisaillement est produit à l'intérieur des corps ayant la résistance la plus petite, un fragment du matériel de ce corps est transféré sur la surface de l'autre corps.

Quelquefois on observe un transfert de la surface la plus dure vers la surface la plus faible. Les particules d'usure libres sont formées pendant le processus suivant le frottement par détachement des particules du matériel transféré. [7]

Généralement, ce type d'usure se produit lors d'un frottement sec ou en présence d'un lubrifiant aléatoire.



**Figure 2.11** : Schéma de l'usure adhésive à la surface antagoniste avec arrachage de la matière (Stachowiak et Coll, 2001). [15]



**Figure 2.12** : Exemple d'usure par adhésion.

### 3.2.2. L'usure abrasive :

L'abrasion est l'opération mécanique consistant à enlever de la matière sur une surface par des phénomènes de microcoupure. Le processus d'usure par abrasion existe sous deux formes :

- L'abrasion de deux corps où les aspérités de la surface plus dure cisailent les aspérités de la surface plus faible (figure 2.14).
- L'abrasion avec trois corps où les particules dures situées entre les surfaces en mouvement provoquent des microcoupures dans une ou dans les deux surfaces (figure 2.15).

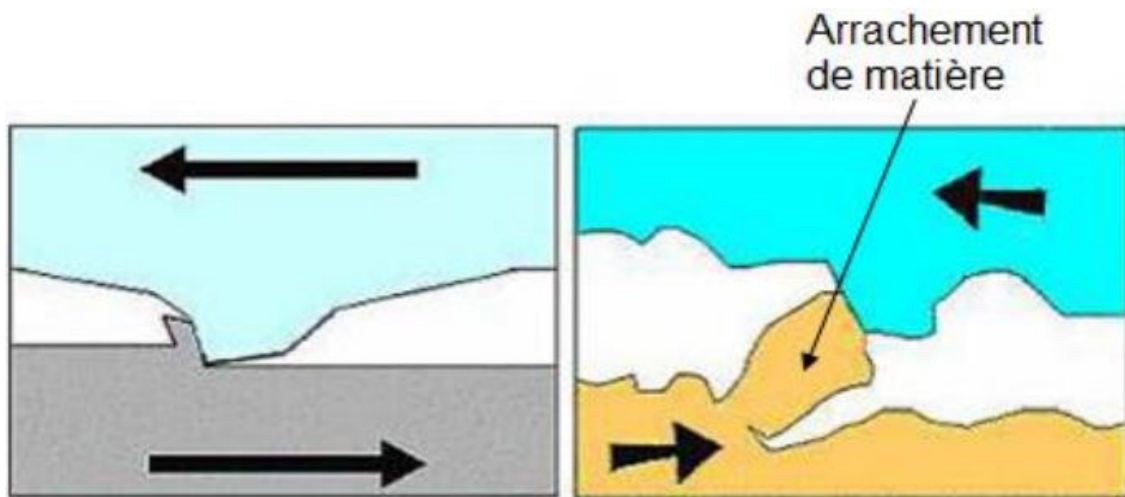


Figure 2.13 : Usure abrasive à 2 corps.

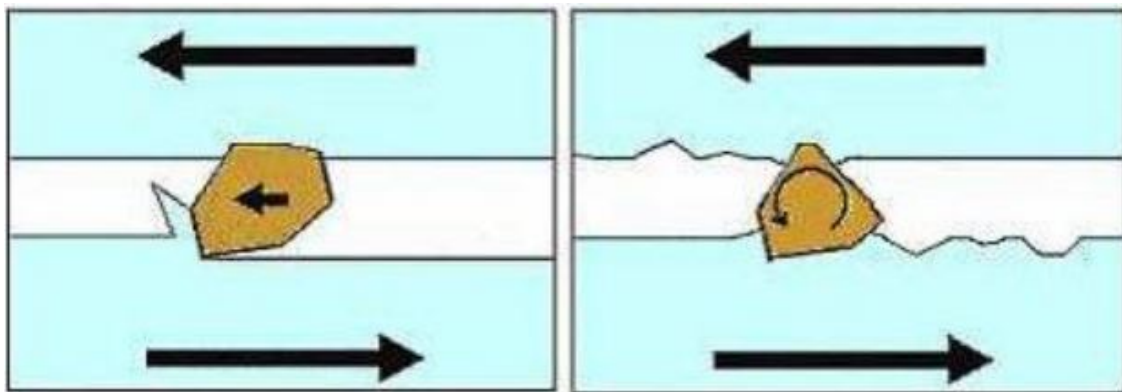


Figure 2.14 : Usure abrasive à 3 corps.



Figure 2.15 : Exemple d'usure par abrasion.

### 3.2.3. L'usure par diffusion :

Les hautes températures, ainsi que les pressions et la vitesse relative de glissement, permettent de donner suffisamment d'énergie (élévation de température) aux atomes pour que ceux-ci puissent migrer de l'un des deux corps vers l'autre. Ce processus est aussi grandement accentué par les phénomènes d'affinités chimiques que l'on peut avoir entre les atomes des deux corps. [5]



**Figure 2.16 :** Cratère formé par l'usure par diffusion sur une plaquette de carbure après 20 secondes d'usinage d'un acier AISI 1020. [5]

### 3.2.4. L'usure par corrosion :

Lorsque le couple de frottement est utilisé dans un milieu corrosif, des réactions se produisent sur l'une ou les deux surfaces de couple de frottement ; elles ont un rôle protecteur pour la surface. Souvent les couches dues aux réactions sont enlevées par frottement de sorte que le processus corrosif peut se répéter. [7]

Ce type d'usure dépend de la nature de l'agent corrosif et de certaines conditions fonctionnelles comme des huiles dégradées thermiquement à un fort niveau d'acidité, corrosion à l' $O_2$  due à la présence d'eau dans l'atmosphère (rouille)...



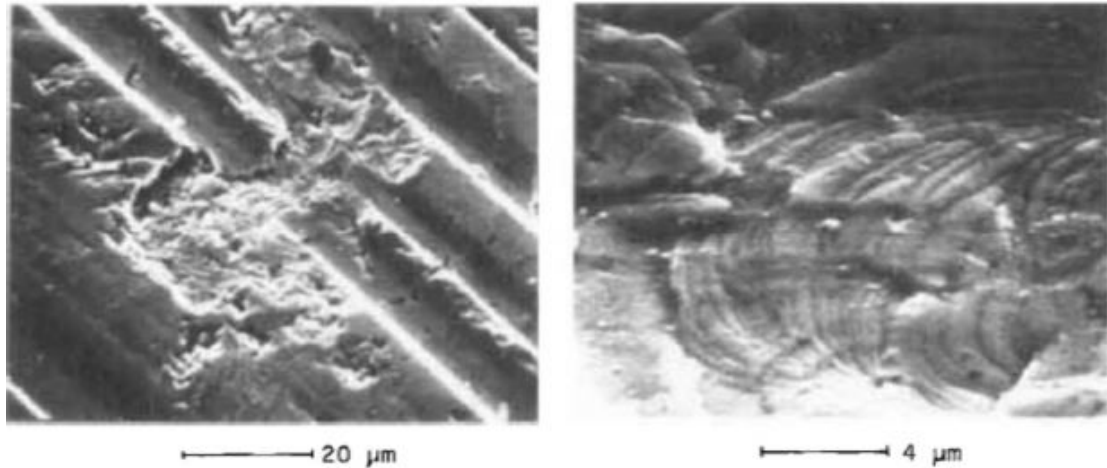
**Figure 2.17 :** Exemple d'usure par corrosion.

### 3.2.5. L'usure par fatigue :

Le phénomène de fatigue (figure 2.18) est dû au contact de deux corps ayant un mouvement relatif et présente une importance à l'échelle macroscopique et microscopique.

L'usure par la fatigue macroscopique est produite pour des corps de géométrie quelconque spécifiques au tribosystème pouvant appliquer un roulement avec et sans glissement.

La fatigue microscopique apparaît au contact des rugosités des surfaces en glissement.



**Figure 2.18 :** Apparence d'une surface usée par fatigue. [16]

#### 3.2.5.1. Fatigue mécanique :

La fatigue mécanique est liée à l'application répétée des contraintes sur la zone de contact. On la rencontre typiquement dans les contacts de type hertzien des systèmes de transmissions d'énergie ou d'effort (engrenages, contacts cames/poussoirs...), ou de guidage (roulements, contact roue/rail...) sollicités en roulement, ou roulement + glissement. Elle peut aussi apparaître lors de l'impact répété d'une surface par des particules solides ou des fluides qui peuvent générer des contraintes plus ou moins cycliques dans les couches superficielles, ou encore, à une échelle microscopique, lors du contact répété d'aspérités sur des surfaces solides en mouvement relatif. [7]

#### 3.2.5.2. Fatigue thermique :

Certaines configurations de contact, notamment celles où le taux de glissement est important, peuvent être soumises à des flux thermiques élevés pendant des temps très courts. Les gradients thermiques qui en découlent font apparaître, même pour des chargements mécaniques faibles. Les contraintes élevées engendrées par les dilatations et contractions thermiques locales successives sont certainement un des moteurs de cette fissuration.

#### 3.2.6. L'usure par érosion :

L'érosion est une usure particulière, causée par des impacts de particules solides contenues dans un fluide en mouvement ou par des particules liquides en milieu gazeux.

### 3.2.6.1. Formes particulière de l'usure érosive :

#### ❖ L'érosion fluide :

- **Erosion d'impact** : est due aux contraintes présentes sur la surface d'un corps solide lors du contact avec le jet du fluide. Ces contraintes peuvent atteindre des valeurs suffisamment grandes pour provoquer des fissures ; ces dernières s'agrandissent et conduisent au détachement des particules du matériau.
- **Les phénomènes de cavitation** : Qui apparaissent sur les surfaces des couples de frottement et sont présents sous différentes formes ; ils peuvent conduire au détachement de particules du matériau.

#### ❖ L'érosion solide :

L'érosion solide est due au passage d'un courant de fluide sur la surface du solide ; ceci produit un détachement de particules du solide.

Ces formes d'érosion se manifestent en général par des fissures sur les matériaux fragiles, et par des piqûres et rayures sur les matériaux ductiles, en prenant en compte l'angle et la vitesse d'attaque du fluide (figure 2.19). [7]

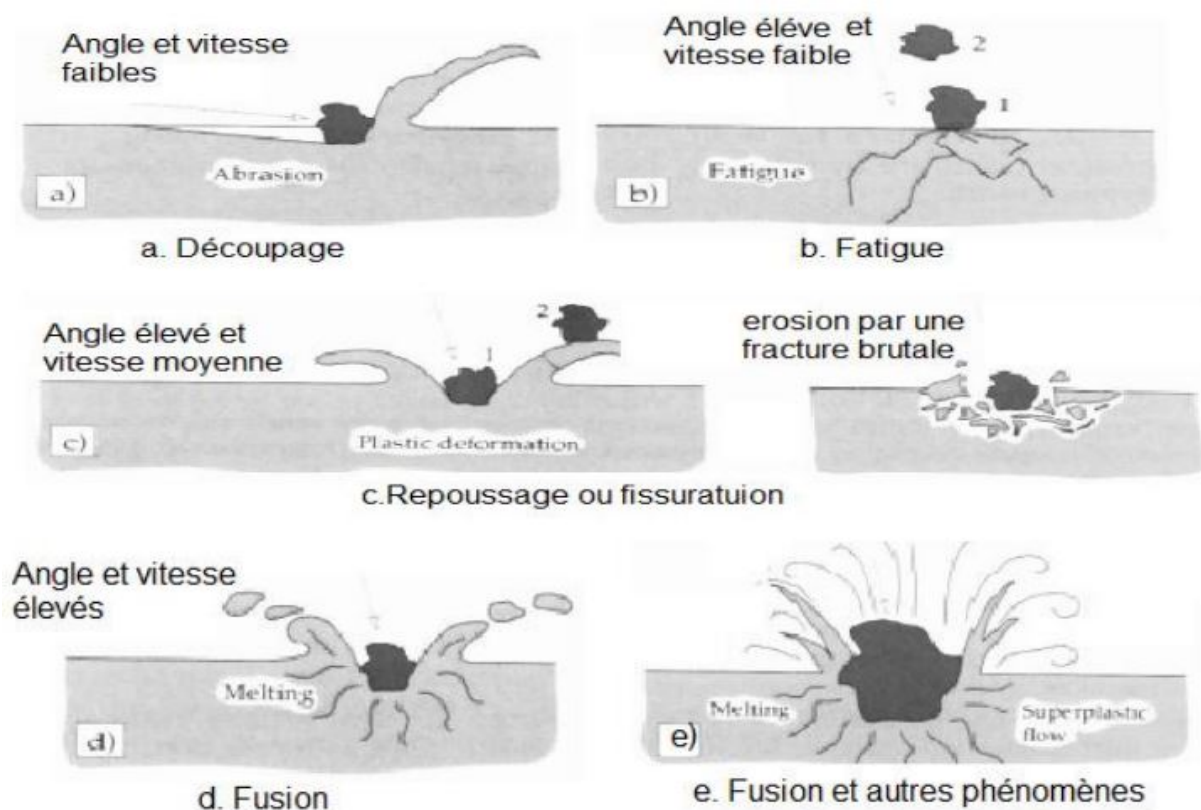
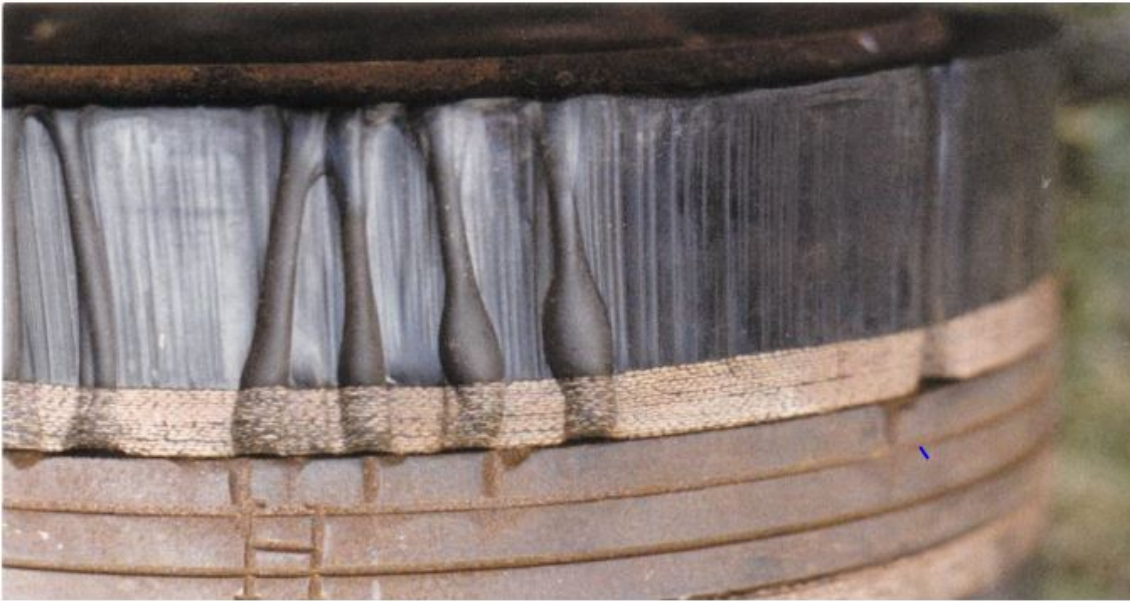


Figure 2.19 : Perte de matière par érosion. [15]

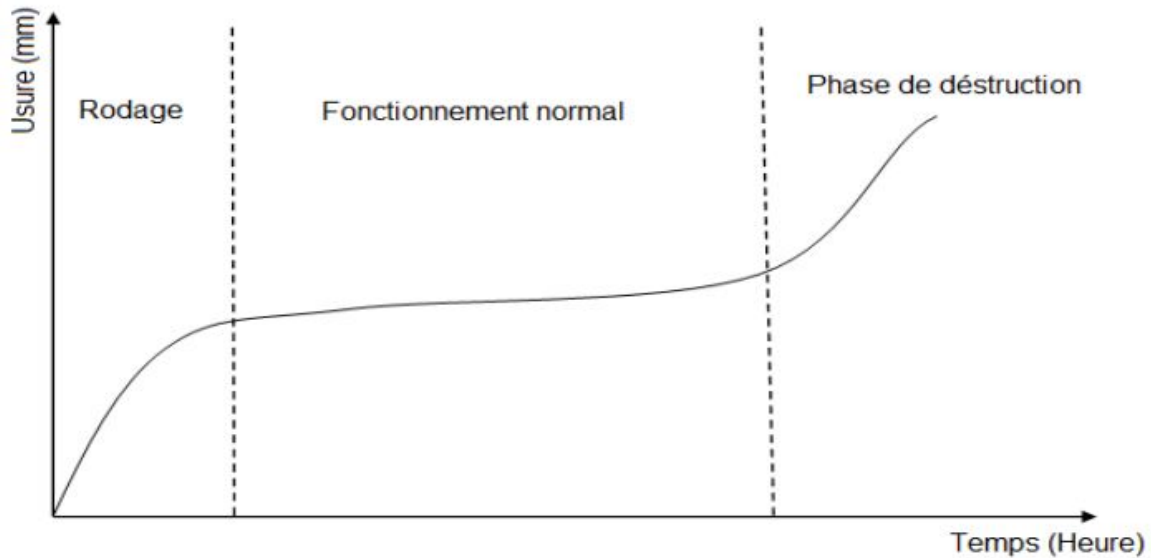


**Figure 2.20 :** Exemple d'érosion fluide.

### 3.3. Durée de vie d'un mécanisme :

Selon la quantité de matière perdue par un élément actif d'un tribosystème, durant sa vie en fonctionnement, on distingue trois phases (figure 2.21) :

- 3.3.1. Phase de rodage :** C'est l'ultime finition de la pièce. Les actions sur les grosses aspérités diminuent avec le temps, les pics sont arasés progressivement tandis que les vallées restent intactes. Le taux d'usure et le facteur de frottement baissent, les portées s'améliorent. Une nouvelle topographie remplace la rugosité originale de la pièce. Si l'usure se ralentit lors de la mise en fonctionnement, on constate une amélioration de l'état de surface, et réciproquement.
- 3.3.2. Phase de fonctionnement normal :** Correspond à l'utilisation normale de l'organe mécanique. La perte de matière est faible, régulière et fonction sensiblement linéaire du temps.
- 3.3.3. Phase de destruction :** Traduit la mise hors service du composant due à une usure exagérée, qui tend à modifier les conditions nominales de fonctionnement : jeux exagérés, lubrification inefficace, efforts élevés, endommagement des surfaces.



**Figure 2.21** : Evolution de l'usure en fonction du temps. [17]

### 3.4. Traitements anti-usure :

La réduction de l'usure, dégradation surfacique souvent associée à une perte de matière non contrôlée (contrairement aux processus d'usinage ou polissage par exemple), est un enjeu clé dans le contexte actuel et la réduction des pertes énergétique est une préoccupation majeure. Par exemple, le remplacement de pièces mécaniques usées entraîne de nouvelles fabrications, de la maintenance... donc des dépenses énergétiques supplémentaires et des pertes économique. Augmenter la fiabilité donc la durée de vie des mécanismes permet alors de limiter ces remplacements et aussi de garantir la sécurité des systèmes en réduisant les risques de rupture catastrophique par exemple. A ce titre, la lubrification, les traitements et les revêtements des surfaces ont un rôle de premier plan qui est aujourd'hui unanimement reconnu.

#### 3.4.1. La lubrification :

Pour réduire le frottement et l'usure, pour faciliter le glissement, il faut éviter que les aspérités des surfaces entrent en contact, s'accrochent, se soudent. Il faut donc séparer les surfaces en présence par un corps intermédiaire : le lubrifiant.

La lubrification est l'une des parties de la tribologie et un ensemble des techniques permettant de réduire le frottement et donc l'usure entre deux pièces en contact. Elle se trouve au carrefour de nombreux domaines tels que la mécanique des milieux déformable, les problèmes de contact, la thermochimie, ... etc.

En mécanique, on lubrifie les pièces de métal ou de céramique avec un corps gras, comme de l'huile ou de la graisse. Les lubrifiants sont des produits liquides, pâteux ou solides d'origine minérale (hydrocarbures pour l'essentiel), animale, végétale ou synthétique.

### 3.4.1.1. Objectifs de la lubrification :

Dans tous les cas, les lubrifiants ont essentiellement pour fonction de :

- Réduire les pertes dues au frottement en vue d'économiser l'énergie et également de réduire l'échauffement des pièces induit par frottement.
- Combattre l'usure et la corrosion des surfaces en frottement, en vue d'augmenter la longévité et la fiabilité des machines.
- évacuer, lors des vidanges, les particules dues à l'usure.
- améliorer l'état de surface des pièces usinées.
- Contribuer à parfaire l'étanchéité tant interne qu'externe des mécanismes. [13]

### 3.4.1.2. Classification des lubrifiants :

Les lubrifiants peuvent être classés selon leurs états physiques, selon leurs origines,...etc.

#### ❖ Selon leur origine : [5]

- **Lubrifiants d'origine animale** : Ils sont constitués essentiellement d'esters résultant de la combinaison d'acides gras avec la glycérine. Ce sont souvent des «ancêtres» mais certains entrent encore dans diverses compositions.
- **Lubrifiants d'origine végétale** : Ce sont en général des combinaisons d'acides gras peu ou pas estérifiés. Certains sont encore largement utilisés en addition dans les huiles de pétrole ou dans les graisses.
- **Lubrifiants d'origine synthétique** : issues de synthèse chimique mettant en œuvre des dérivés du pétrole et/ou d'huiles végétales. Les lubrifiants synthétiques appliqués sur des parcelles se dégradent plus vite et plus complètement que les lubrifiants minéraux, mais pas aussi vite et bien que les huiles végétales.
- **Lubrifiants d'origine minérale** : Ils existent en deux types de structure, les structures paraffinées formées d'hydrocarbures saturés à chaînes droites (très stables à l'oxydation, bonne résistance à la température), et les structures naphthéniques formées de noyaux cycliques (grande aptitude à la gélification).

#### ❖ Selon leur état physique :

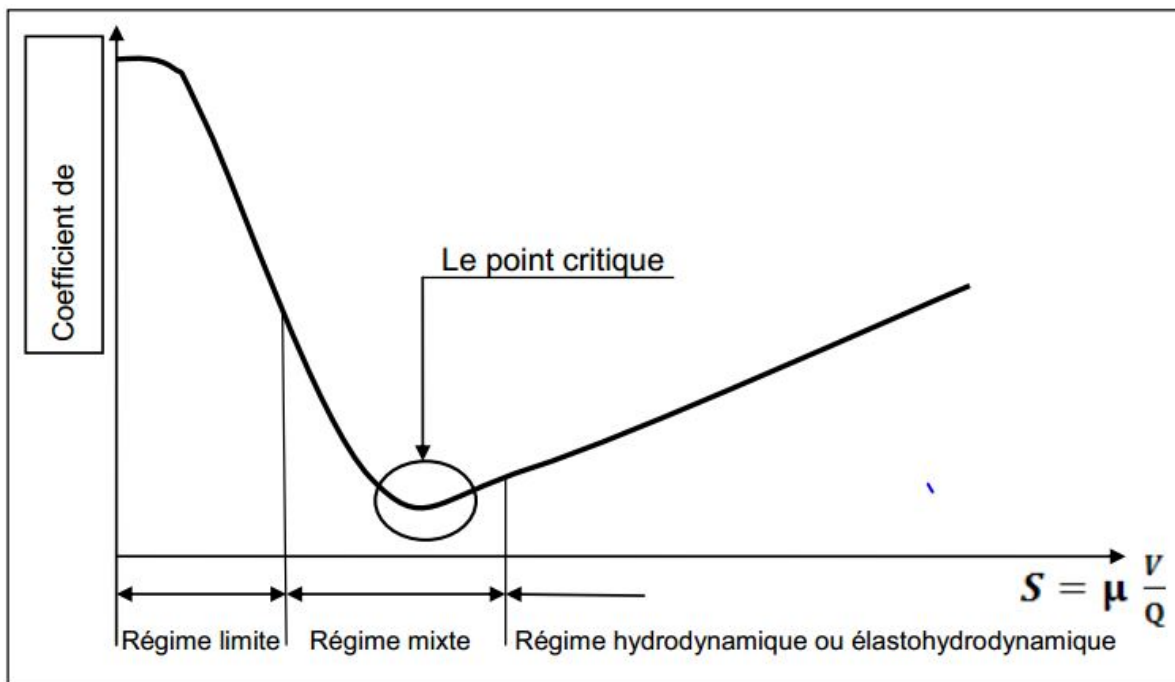
- **Lubrifiants liquides** : C'est des substances liquides composé généralement de huile, qu'est un élément base et des additifs et dans certains cas de l'eau comme dans les lubrifiants de la coupe des métaux. [2]
- **Les graisses** : Les graisses sont des produits viscoplastiques à aspect butyreux, obtenus par dispersion d'un agent épaississant (ou gélifiant) insoluble, dans une huile lubrifiante pouvant contenir, en outre, des additifs variés (antioxydants, antirouille, anticorrosifs, extrême pression, anti-usure), et quelquefois, des lubrifiants solides. [18]
- **Lubrifiants solides** : Les lubrifiants solides peuvent être utilisés sous forme de poudres, de pâtes, de dispersions dans l'huile, dans l'eau, dans un fluide volatil, dans

les graisses, sous forme de vernis de glissement et de matériaux composites autolubrifiants.

- **Lubrifiants gazeux** : Dans certains mécanismes on trouve des surfaces mobiles totalement séparées par un flux de gaz maintenu sous pression ; le plus souvent, pour des raisons évidentes de disponibilité et de coût, on utilise de l'air. Il ne s'agit pas là d'une lubrification au sens propre du terme, mais d'une disposition constructive qui permet d'utiliser à bon escient des propriétés physiques des écoulements gazeux. Le gaz peut être utilisé sous faible pression, il se comporte alors comme un fluide à peu près incompressible, et l'on obtient alors des déplacements sur coussins d'air. [5]

### 3.4.1.3. La courbe de Stribeck : [12]

La courbe de Stribeck représente la variation du coefficient de frottement en fonction d'un nombre sans dimension "S" (nombre de Sommerfeld) prenant en compte la charge, la vitesse et la viscosité du lubrifiant.



**Figure 2.22** : Courbe de Stribeck. [12]

Le domaine situé au-delà du point critique correspond au régime hydrodynamique, dont les caractéristiques sont essentiellement dépendantes de la résistance au cisaillement du film visqueux.

Le domaine situé en deçà du point critique est celui du frottement onctueux ou régime limite. La zone de transition entre les régimes limite et hydrodynamique correspond au régime mixte. Une lubrification dite "aléatoire" correspond aux régimes limite et mixte.

### 3.4.2. Traitement des surfaces :

Les traitements de surface sont des procédés qui modifient les propriétés superficielles d'un matériau. Ils rendent possible l'utilisation des matériaux traditionnels dans la plupart des technologies de pointe : les alliages d'aluminium dans la construction aéronautique, par exemple.

Ces procédés sont nombreux et font intervenir des domaines très variés de la physique et de la chimie : électrochimie, métallurgie, mécanique, optique...

Les procédés de revêtement de surface dont le but est de protéger contre la corrosion (par exemple l'anodisation de l'aluminium, le dépôt des peintures lors de la construction des navires aux Chantiers de l'Atlantique sont très utilisés) permettent de rendre un matériau apte à être sollicité dans un domaine donné.

#### 3.4.2.1. Importance des traitements de surfaces :

Les traitements de surface confèrent à ces dernières les propriétés nécessaires pour remplir leur fonction, on parle de fonctionnalisation des surfaces. Un petit regard autour de nous, nous montre que presque tous les objets qui nous entourent ainsi que leurs composantes ont subi des traitements de surface. Nous trouvons les fonctions suivantes qui peuvent être combinées :

- Décoration : couleur, réflectivité (brillant-mat).
- Protection contre l'attaque physico-chimique de l'environnement : corrosion, oxydation, dissolution, transpiration, diffusion, mouillabilité, ...etc.
- Protection contre les attaques mécaniques de l'environnement : abrasion, érosion, rayage, écaillage.

Il y'a aussi les traitements de surface qui donnent aux composantes les propriétés requises pour remplir leur fonction dans le système :

- Transfert de mouvement : coefficient de frottement très faible.
- Transfert d'énergie : émission, absorption et réflexion électromagnétique, conduction thermique. [17]

#### 3.4.2.2. Types des traitements de surfaces :

Vouloir assurer la protection des surfaces, conduit naturellement à envisager la modification de celle-ci par différentes techniques.

##### 3.4.2.2.1. Traitement thermique :

Les traitements thermiques sont des opérations de chauffage suivi de refroidissement qui ont pour but de donner à une pièce métallique Les propriétés les plus convenables pour son emploi ou sa mise en forme. Ils permettent dans une large mesure d'améliorer les caractéristiques mécaniques d'un matériau de composition déterminée. D'une façon

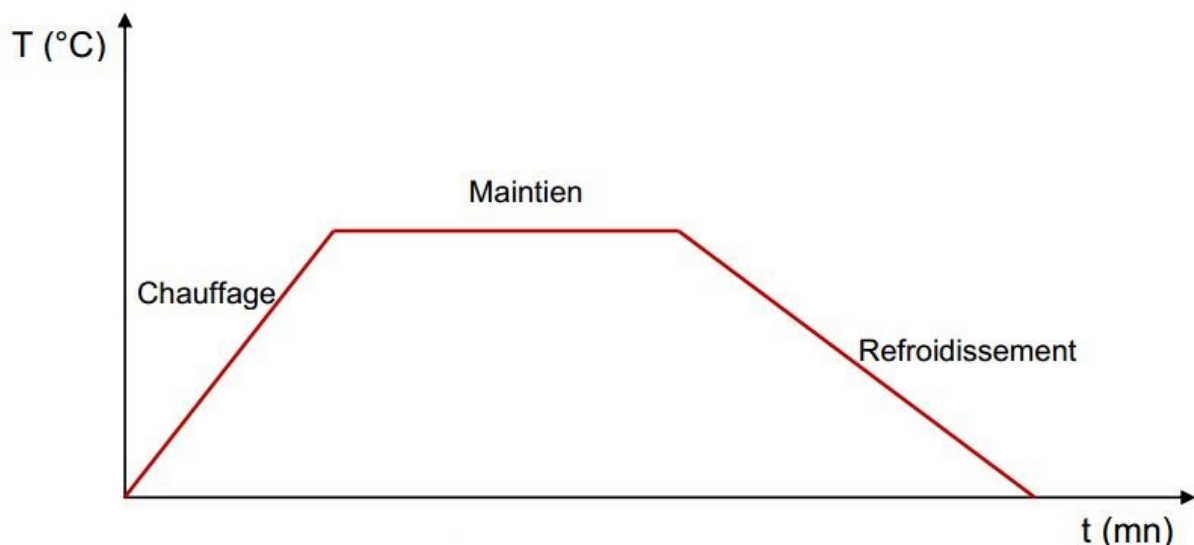
générale, les traitements thermiques ne modifient pas la composition chimique des matériaux, mais ils permettent de modifier (généralement améliorer) leurs caractéristiques comme : la résistance à l'usure, la résistance à la corrosion et la résistance mécanique (dureté, résistance à la traction, résilience et élasticité). [3]

On distingue trois types de traitements thermiques : la trempe, le recuit et le revenu.

– **Cycle d'un traitement thermique** : [3]

De façon générale, un traitement thermique comprend trois étapes (figure 2.23) :

- Un chauffage à une température dépendant du type de traitement voulu.
- Maintien isotherme à cette température de traitement.
- Un refroidissement dans un milieu préalablement défini.



**Figure 2.23** : Cycle d'un traitement thermique.

• **La trempe :**

La trempe ou trempage, c'est le plus important de tous les traitements thermiques. Cette opération consiste à plonger un matériau chaud dans un fluide plus froid afin de le doter de propriétés nouvelles. Elle est réalisée immédiatement après l'opération dite « mise en solution ».

C'est un traitement thermique effectué à une vitesse de refroidissement suffisamment rapide, pour éviter la transformation de l'austénite en produit d'équilibre (ferrite et perlite) et obtenir de la martensite. Il se fait en trois étapes :

- Chauffage dans le domaine austénitique.
- Maintenir suffisamment pour permettre une dissolution partielle ou totale des carbures (selon le volume des pièces).
- Un refroidissement rapide.

La vitesse de trempe minimale appelée (vitesse critique de trempe) est la vitesse permettant d'éviter la transformation de la perlite ou de la bainite et obtenir une structure entièrement martensitique. La vitesse de trempe permet de définir la trempabilité ; c'est l'aptitude d'un acier à se transformer en martensite ou l'aptitude de l'acier à prendre la trempe. [19]

- **Le revenu :**

Le revenu se pratique après une trempe, pour réduire les contraintes mécaniques internes créées durant celle-ci. Le revenu permet d'améliorer la résistance mécanique des pièces traitées, de rétablir les valeurs de résilience et de réduire les contraintes mécaniques internes. La dureté diminue également quelque peu (dissolution de certains composés fragiles tels que les carbures favorisés).

La méthode consiste à chauffer la pièce à une température inférieure à celle d'austénitisation, température déterminée en fonction du type de matériau, et de refroidir cette pièce très lentement. [5]

Le revenu a pour but d'atténuer certains effets néfastes de la trempe et en particulier la fragilité de la martensite. C'est un début de retour à l'état d'équilibre.

- **Le recuit :**

Ce traitement consiste à chauffer l'acier à une température appropriée et à traverser ensuite le domaine de transformation par un refroidissement lent effectué de préférence dans un four ou toute autre installation bien isolée thermiquement. Le refroidissement lent se poursuit généralement aux basses températures. Les recuits en général amèneront les alliages en équilibre physico-chimique et mécanique. Ils tendent à réaliser l'équilibre structural en faisant disparaître les états hors d'équilibre résultants des traitements thermiques et mécaniques antérieurs.

Le recuit correspond aux valeurs maximales des caractéristiques de ductilité (résilience et allongement), et aux valeurs minimales des caractéristiques de résistance (dureté, limite élastique, charge à la rupture). Le recuit a pour but de [5] :

- Diminuer la dureté d'un acier trempé.
- Obtenir le maximum d'adoucissement pour faciliter l'usinage ou les traitements mécaniques.
- Régénérer un métal écroui ou surchauffé.
- Homogénéiser les textures hétérogènes.
- Réduire les contraintes internes.

### 3.4.2.2.2. Traitement thermochimique :

Le nom "traitement thermochimique" est donné à la saturation superficielle de l'acier en tel ou tel élément (par exemple : carbone, azote, aluminium, chrome, etc.), par sa diffusion à l'état atomique à partir d'un milieu extérieur porté à une température élevée, c'est à dire, dans le cas où l'on aura besoin d'une dureté superficielle encore plus élevée et une ductilité au cœur encore plus grande, on utilise les traitements thermochimiques.

Tous les traitements thermiques à envisager se déroulent sans changement de composition chimique. Tandis que les traitements thermochimiques s'effectuent avec changement de la composition chimique d'une certaine épaisseur de la couche superficielle.

- **Principaux types de traitements thermochimiques :**
- **La cémentation et carbonisation :**

Les traitements de cémentation et carbonisation réalisent un enrichissement des surfaces, respectivement en carbone (0.7 à 0.9%C) et en carbone + azote, qui permet d'obtenir, après trempe martensitique, un durcissement superficiel sur des profondeurs allant jusqu'à plusieurs millimètres pour la cémentation, et de l'ordre de quelques dixièmes de millimètre pour la carbonisation. [12]

- **La nitruration :**

C'est un procédé de durcissement superficiel appliqué à l'acier permettant d'obtenir des duretés plus élevées que celles obtenues par cémentation (la couche nitrurée garde sa dureté jusqu'aux températures 500 à 550°C). La nitruration consiste à saturer en azote, la surface de l'acier dans le milieu ammoniacal. La nitruration accroît sensiblement la tenue à l'usure, la limite de fatigue et la tenue à la corrosion dans des milieux comme l'atmosphère, l'eau, la vapeur,...etc.

La nitruration est très employée pour les arbres des machines-outils de précision, les cylindres des moteurs puissants etc. [5]

- **La cyanuration :**

La cyanuration, réalisée à des températures de 820 ou 860°C dans des bains contenant 20 à 25 % de NaCN, 25 à 50 % de NaCl et 25 à 50 % de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, est destinée pour obtenir une couche de faible épaisseur (0,15 à 0,35 mm). La durée de l'opération variant en fonction de l'épaisseur de la couche à obtenir est de 30 à 90 minutes, et pour obtenir une couche plus épaisse (0,5 à 2 mm), l'opération se déroule dans un bain différent composé de NaCN, BaCl<sub>2</sub> et NaCl.

La cyanuration est un procédé ayant pour but la saturation simultanée de la surface de l'acier en carbone et en azote afin d'augmenter la dureté et la tenue à l'usure. Les aciers destinés à subir un tel traitement contiennent de 0,2 à 0,4 % C.

La cyanuration est très employée dans l'industrie automobile et applicable aux petites pièces, telles que les pignons de commande de la pompe à huile, les compteurs de vitesse,

les axes de ressort de la suspension arrière, les vis sans fin du volant, les petits arbres, les écrous,...etc. [14].

- **La chromisation :**

Le procédé de chromisation, est une cémentation au chrome donnant une couche superficielle extrêmement dure et un excellent coefficient de frottement après 90 minutes à 1075°C dans les vapeurs de fluorures de chrome, la couche de diffusion atteint 0.1mm.

L'acier chromisé porte un véritable revêtement de carbures de chrome extrêmement durs provoqué par la rétrodiffusion du carbone de l'acier vers la couche chromisée. [19]

La chromisation est très employée pour les pièces constituant les machines à vapeur, soupapes, valves, tubulures, ...etc. [5]

- **La boruration :**

Le traitement de boruration est réalisé entre 800 et 1050 °C, le bore diffusé sur 400 microns se combine pour donner du borure de fer. [19]. La boruration confère aux pièces une grande résistance à l'abrasion, corrosion et à l'usure.

Le bore permet d'obtenir des borures, de type FeB ou Fe<sub>2</sub>B, qui assurent une dureté très élevée (1800 à 2000HV (dureté Vickers)).

La boruration est appliquée aux pièces employées dans l'industrie pétrolière, bagues de pompes à boue, les matrices et estampes pour le formage à chaud. La boruration est un procédé que peuvent subir tous les aciers. [5]

### **3.4.2.2.3. Traitement mécanique :**

Le traitement mécanique des surfaces consiste à bonifier les caractéristiques mécaniques-tribologiques, la tenue à la corrosion des matériaux, par déformation plastique des couches superficielles.

Les traitements mécaniques sont plus courants qu'on ne le pense, ils s'appliquent à la grande majorité des matériaux métalliques : acier ordinaires, aciers inoxydables, alliage de titane, d'aluminium, superalliages. Ils peuvent être également utilisés comme post traitements à des procédés thermique ou thermo-chimique (cémentation, trempage, carbonitruration...) pour le renforcement des propriétés mécaniques.

#### **1. Le rôle des traitements mécaniques :**

En fonction de la nature des matériaux et du type de procédé utilisés, plusieurs effets peuvent être concernés :

- Ecrouissage (accroissement de la dureté).
- Création de contrainte résiduelles de compression (mise en précontrainte).
- Optimisation de la rugosité.

- Réduction de la densité des défauts (par exemple transformation  $\gamma \rightarrow \alpha$  pour les aciers austénitiques, l'austénite résiduelle).
- La plupart des procédés sont utilisables pour le conditionnement local ou partiel des pièces (renforcement de zones sensibles, par exemple en fatigue). [12]

## 2. Les différentes méthodes de traitements mécaniques :

Les principaux traitements appartenant à cette catégorie sont :

- **Le grenailage de précontrainte :**

Il s'agit du procédé le plus largement employé, grâce à sa souplesse de mise en œuvre associée à des potentialités de grande productivité. Il consiste à projeter à grande vitesse des petites billes d'acier sphérique, de verre, de céramique ou de fil coupé rodé. Le grenailage de précontrainte élève la résistance à la fatigue de pièces de toutes sortes : ressorts, arbres...etc. [12]

- **Le galetage :**

Le galetage, c'est un brunissage (polissage) avec des galets. La pièce est usinée en laissant une surépaisseur par rapport à la cote nominale, et le métal est repoussé en faisant rouler les galets dessus. [5]

Cette technologie, confère aux pièces traitées des propriétés sensiblement comparables à celles obtenues par grenailage [12]. Les surfaces galetées résistent davantage à la fatigue et supportent mieux que les surfaces rectifiées, se comportant comme si elles étaient déjà rodées. Elles s'usent parfois moins que les surfaces trempées. [5]

- **Le polissage :**

le polissage d'une pièce consiste à effectuer un traitement manuel de surface qui consiste à faire disparaître les irrégularités dues à l'usinage précédent, au meulage ou à l'aspect initial de fonderie et permet alors de donner un aspect "fini lisse" et "brillant miroir".

- **Le rodage (superfinition) :**

Le rodage est une ancienne technique d'enlèvement de matière pour atteindre des tolérances de planéité. Les systèmes de rodage sont prévus pour les pièces usinées qui doivent présenter des surfaces extrêmement planes et parallèles ou des tolérances d'épaisseur rigoureuses ou des rugosités très basses. [5]

### 3.4.3. Revêtement des surfaces :

Le revêtement est possible sur tous types de matériau, il consiste à projeter des particules venant s'écraser sur les surfaces à traiter. Ces particules projetées peuvent être du tungstène, du cuivre, du cobalt, de l'aluminium, du molybdène ...etc.

L'efficacité d'un revêtement dépend fortement du substrat : nature, dureté, ténacité, pureté, état de surface, l'environnement ...etc.

Cette technique a pour but de conférer des propriétés particulières telles que ; redonner les dimensions initiales à une pièce fortement usée, protéger les métaux de la corrosion, modifier (améliorer) leur résistance au frottement, décollement, traction, flexion, cisaillement... etc. [14]

#### 3.4.3.1. Revêtement à partir de la phase solide :

Il s'agit du traitement de surface le plus ancien. On met en contact deux matériaux par collage ou par plaquage. L'idéal pour un tel revêtement serait d'incorporer le substrat et le revêtement dans un test normalisé des propriétés mécaniques : résistance à la rupture à l'interface en traction, flexion, et au décollement en cisaillement.

La résistance des meilleures colles en traction est inférieure à 0,8 MPa ; et très faibles en flexion. Les tests d'adhésion utiles sont donc limités à 0,5 MPa ; juste suffisante pour les laques ou des revêtements optiques. [5].

Il existe plusieurs techniques de revêtement à partir de la phase solide et parmi elles on trouve :

##### ❖ Dépôt de poudres

Il consiste à projeter des poudres en suspension dans un liant qui est ensuite éliminé au cours du chauffage nécessaire à la diffusion des matériaux. Transportées par ; le gaz vecteur, liquide ou champ électrique (la plus utilisée pour les particules chargées). [5].

##### ❖ Laminage

Le procédé consiste à apposer le feuil sur les surfaces fonctionnelles et ensuite le lier par un écrouissage. La méthode s'applique aujourd'hui sur les tôles bandes ou plaques. Dans la plupart des cas, on applique un matériau mou sur un matériau plus dur [5].

##### ❖ Frittage ou cuisson

On laque le produit puis on lui fait subir un traitement thermique pour l'étalement et la densification. Il se pratique sur les matériaux inorganiques, des polymères ou des mélanges de poudres organiques et minérales. [5].

#### 3.4.3.2. Revêtement à partir d'une phase liquide :

La synthèse d'un feuil de revêtement à partir d'une phase liquide est la méthode la plus utilisée. Le recouvrement de la surface solide par un film liquide uniforme est un problème

complexe du génie chimique. Les films liquides sont souvent utilisés pour les micros composites. On utilise souvent les laques. [5].

#### ❖ Revêtement métallique par coulée ou immersion

Technique ancienne qui grâce à son faible coût est très répandue pour la fabrication d'objet bimétallique tel que les coussinets. Le procédé par immersion peut être utilisé en vrac ou à l'attache, il est utilisé à basse température de fusion, tel que pour le Zinc et L'éther. Le dépôt par coulée simple d'un alliage fondu sur un objet de forme quelconque ou une tôle est très répandu dans la fabrication des paliers et des coussinets. [5].

#### ❖ Revêtement par soudage

Un arc ou un jet de soudage peuvent être combinés avec un apport de matière important sous forme de barrette ou de fil dans la zone de fusion.

En refroidissant, le métal déposé formera un revêtement, dont l'épaisseur peut être augmentée par de passages multiples. [5].

#### ❖ Dépôts à flamme ou par plasma

On dépose à la flamme ou par plasma sur des surfaces métalliques :

- Des films de céramiques ou de cermets (Céramiques-Métaux), parfois enrichis de carbures métalliques.
- Des lubrifiants solides minéraux
- Des métaux : tungstène, chrome, titane, sous forme de carbures ou d'oxydes.

Ces films permettent le glissement sur des pièces en aciers durs, en fonte, en alliages de nickel. Suivant la constitution du revêtement, le coefficient de frottement est plus ou moins élevé mais l'usure est toujours très faible et c'est ce que l'on recherche avant tout. Quant à la température maximale d'utilisation, elle peut être très élevée : 700 °C et même plus de 1000°C parfois. [13].

#### 3.4.3.3. Revêtement à partir d'une phase gazeuse :

La phase vapeur est une méthode de choix pour les dépôts de revêtement réfractaires et pour la création de matériaux nanostructurés.

On distingue traditionnellement deux méthodes de dépôt à partir de la phase gazeuse :

Dépôt de vapeur par voie physique : Physical Vapour Deposition (PVD)

Dépôt de vapeur par voie chimique : Chemical Vapour Deposition (CVD). [5]

#### ❖ Dépôt de vapeur par voie physique (PVD)

Dans le PVD on utilise l'évaporation, la sublimation ou la pulvérisation par bombardement ionique pour transformer la matière à déposer en phase vapeur. Ces

vapeurs sont ensuite condensées sur la surface que l'on traite. L'évaporation et la condensation sont régies par les lois thermodynamiques (Clausius-Clapeyron). [2]

#### ❖ Dépôt de vapeur par voie chimique (CVD)

Le CVD est une méthode de synthèse de matériau sur une surface à partir de constituants qui sont amenés par la phase gazeuse. Cette technique est utilisée pour le dépôt de nitrure et de carbures. Il faut tenir compte des réactions chimiques dans le réacteur et leur importance. On utilise un spectroscope de masse pour analyser l'évolution de la réaction chimique. La nature chimique du substrat joue aussi un rôle important dans la croissance du film. [2]

#### 4. Conclusion :

Tous corps qui entrent en contact engendrent systématiquement un frottement, ce qui, avec le temps et l'exercice d'un mouvement relatif entre eux, aboutit à une dégradation des surfaces. Cette recherche bibliographique a été donc consacrée à l'étude de ces différents aspects de la tribologie afin de mieux prévoir les éventuels risques de toute forme de dégradation.

L'usure et la rupture qui se produisent prématurément ont une cause qu'il faut rechercher dans la conception, la réalisation, l'utilisation, le montage et enfin l'entretien de chaque machine et mécanisme.

## *Chapitre III*

# **Analyse de la valeur**

## 1. Introduction

Aujourd'hui, pour être compétitive, l'entreprise doit appliquer des méthodes permettant d'obtenir une qualité optimale dans un environnement en perpétuel changement où les cycles de vie des produits sont de plus en plus courts.

Conduire un projet revient à prendre les mesures nécessaires pour atteindre les objectifs du projet, à savoir développer et livrer un produit de qualité, en maîtrisant les ressources et les délais. On appelle conduite de projet l'organisation méthodologique mise en œuvre pour faire en sorte que le produit réalisé par l'entreprise réponde aux attentes du client et qu'il soit livré dans les conditions de coût et de délai prévus initialement. Pour ce faire, la gestion de projet a pour objectifs d'assurer la coordination des acteurs et des tâches dans un souci d'efficacité et de rentabilité.

La démarche de conception employée dans ce projet est basée sur la méthode dite d'Analyse de la Valeur (AV). C'est le meilleur moyen pour atteindre les résultats attendus, son utilisation est justifiée par les réussites enregistrées dans de nombreux pays tel que les Etats-Unis, la France, l'Allemagne, ...etc.

## 2. Définition de l'analyse de la valeur

L'analyse de la valeur est une méthode de compétitivité organisée et créative visant à la satisfaction complète du besoin de l'utilisateur d'un produit, procédé ou service par une démarche spécifique de conception à la fois fonctionnelle, économique et pluridisciplinaire.

L'analyse de la valeur est une méthode de conception de produit qui s'intéresse à la conformité : qualité de définition et à la réduction au strict nécessaire.

Ce concept s'appuie sur deux piliers

**En aval** : en visant à augmenter la satisfaction apportée par le produit étudié aux divers besoins auxquels il répond sans pour autant augmenter les coûts.

**En amont** : en visant à diminuer les coûts nécessaires à la satisfaction des besoins auxquels répond le produit étudié sans pour autant diminuer la satisfaction qu'il apporte.

## 3. Histoire de l'analyse de la valeur

L'analyse de la valeur n'est pas une innovation récente ou une nouvelle méthode à la mode. Elle fut mise au point au début des années 50, dans la foulée de la reconstruction économique de l'après-guerre, à une époque où les matériaux s'étaient raréfiés, entraînant des problèmes d'approvisionnement dans les usines et, conséquemment, une augmentation des coûts.

Au lendemain de la Seconde Guerre Mondiale, en 1947, Lawrence D. MILES, sous l'impulsion de R.S. MACNAMARA, Directeur de General Electric, amorce les premiers travaux d'analyse de la valeur avec un petit groupe de travail. Très encourageantes, ces premières études se sont vite généralisées. Elles abordent simultanément les notions de performances et de coûts, en recherchant des optimums.

Au cours des années 60, après s'être largement répandue aux Etats-Unis, la méthode gagnera des adeptes dans les grands pays industrialisés : le Japon en 1965, Canada en 1993 (association canadienne pour l'analyse de la valeur). [5].

L'analyse de la valeur vient en Europe grâce aux sociétés filiales des sociétés américaines et grâce à des sociétés conseillées ou non à des sociétés américaines. La Grande-Bretagne fut la première à tirer profit de l'expérience américaine, ensuite l'Allemagne de l'ouest, les pays Scandinaves, la Hollande...etc.

En France malgré tout, un mouvement favorable s'est créé après les premières tentatives qui remontent aux années 1958-1960, c'est vers 1961-1962 que des efforts réels ont été entrepris, depuis 1964 peut être, l'effet de boule de neige s'est amorcé et le développement de l'analyse de la valeur devient plus net. Elle s'est répandue dans nombreuses industries (automobile, aéronautique, chemins de fer, électroménager,...etc.), et en 1979 a été créée l'association française pour l'analyse de la valeur (A.F.A.V).

Les organismes officiels ont également codifié ces techniques et les ont traduites sous forme de normes, c'est le cas en France :

NF X 50 - 100 : analyse de la valeur – de l'expression du besoin à la compétitivité.

NF X 50 – 150 : Analyse de la valeur – Analyse fonctionnelle – Vocabulaire.

NF X 50 – 151 : Analyse de la valeur – Analyse fonctionnelle – expression fonctionnelle du besoin et cahier des charges fonctionnel.

NF X 50 – 152 : Analyse de la Valeur – Caractéristiques fondamentales.

NF X 50 – 153 : Analyse de la valeur – Recommandations pour sa mise en œuvre.

NF EN 12973 : Management par la valeur. [5].

#### **4. Objectifs de la méthode**

L'analyse de la valeur, lorsqu'elle se préoccupe des produits, a également pour objectif essentiel de parvenir à une réduction des coûts ou plutôt aux coûts minimums, qu'il s'agisse de produits existant ou de produits nouveaux à créer. Mais elle le fait en s'attachant aux fonctions à remplir et non en partant de la réalisation actuelle ou d'une réalisation classique du produit. La conception se trouve donc pleinement intégrée au travail entrepris.

#### **5. L'analyse de la valeur dans un projet**

Si on analyse le déroulement d'un projet (développement de produit ou changement organisationnel) suivant deux axes :

**5.1. Le temps** : qu'il faudra découper en deux phases :

- La conception (démarche intellectuelle).
- La mise en œuvre (souvent plus matérielle).

**5.2. Le coût** : En conception, nous pouvons tracer deux courbes :

- Celle correspondant aux coûts nécessaires à la réalisation du projet (frais d'étude, groupe de projet),
- Celle correspondant aux dépenses engagées par les décisions de conception (choix techniques, esthétiques, politiques, et environnementaux).

Dans une approche générale, on peut dire que 10 à 20% des coûts du projet sont utilisés en conception et conduisent à engager des décisions concernant 70 à 80% des dépenses totales du projet. Cet écart entre l'argent réellement dépensé en conception et les moyens engagés par les décisions, donne une idée des risques en conception.

L'Analyse de la valeur propose de réduire ce risque en mettant en place des groupes de travail pluridisciplinaires qui augmentent certes les dépenses en conception, mais qui affirment les décisions et les rendent plus flexibles.

Dans la mise en œuvre, les dépenses liées à la réalisation du projet sont importantes et elles correspondent à un moment où les décisions restant à prendre sont faibles.

L'Analyse de la Valeur : doit conduire à limiter les coûts de mise en œuvre par une conception plus précise et plus flexible avec un groupe de travail. "Les risques" lors de la mise en œuvre seront donc réduits.

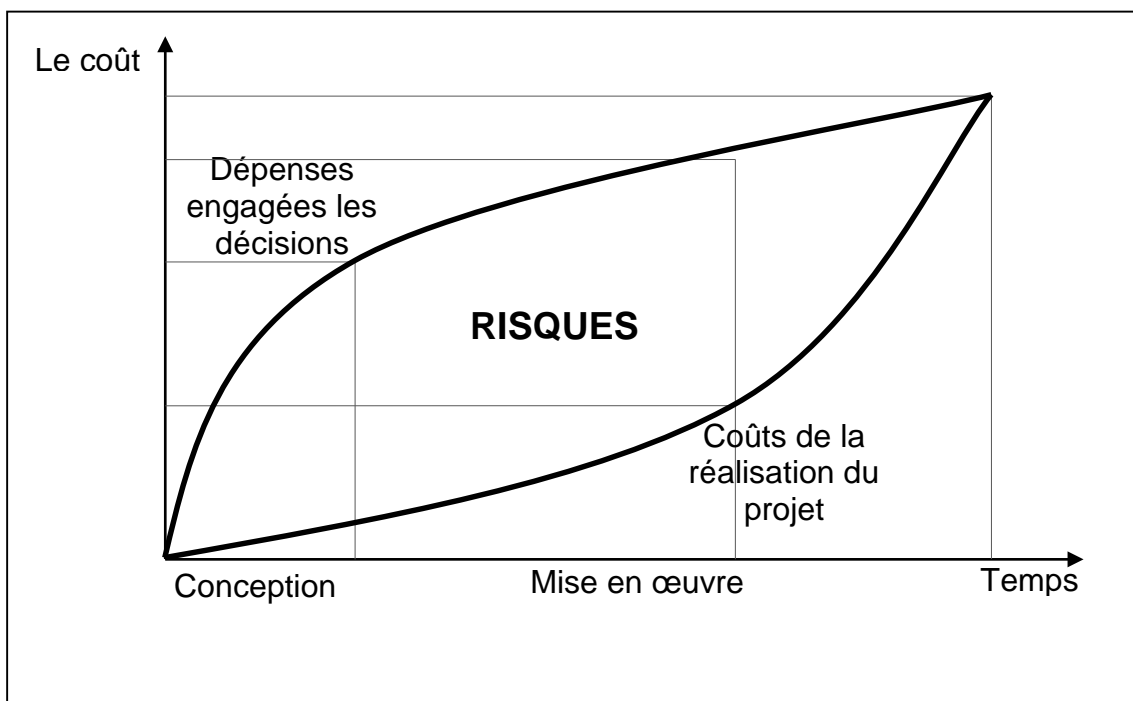


Figure 3.1 : L'analyse de la valeur dans un projet.

## 6. Les démarches de l'analyse de la valeur

La démarche normalisée NF X50 153 propose un plan de travail en sept phases.

### 6.1. L'orientation de l'action

La première phase, l'orientation de l'action, est déterminante. Elle concerne principalement le décideur, porteur du projet. Il va définir le cadre de l'action envisagée, en renseignant particulièrement sur :

L'objet de l'étude : en spécifiant les causes qui ont déclenché cette étude.

Les objectifs et moyens : on définira les grandes lignes concernant les résultats attendus, les moyens concerneront en particulier le choix de l'animateur, les membres du groupe de travail et leurs missions.

### 6.2. La recherche d'information

Cette phase a pour objectif de recenser et communiquer toutes les informations nécessaires au bon fonctionnement du groupe de travail.

Les informations concernent :

- Des aspects techniques, économiques, commerciaux.
- L'environnement ou fonctionnera le produit à concevoir.

### 6.3. Analyse des fonctions et des coûts

L'analyse fonctionnelle est une méthode systématique d'expression des besoins qu'un produit, un système ou un processus doit rencontrer pour satisfaire un utilisateur. Elle tient compte de l'usage et des contraintes imposées par le cahier des charges fonctionnel.

#### 6.3.1. Le cahier des charges fonctionnel

La norme NF50-150 le définit de la manière suivante : « document par lequel le demandeur exprime son besoin (ou celui qu'il est chargé de traduire) en termes de fonctions de service et de contraintes. Pour chacune d'elles sont définis des critères d'appréciation et leurs niveaux. Chacun de ces niveaux doit être assorti d'une flexibilité ».

Autrement dit, il s'agit d'un document définissant un-ou des- résultat(s) voulu(s) par le demandeur et non un produit précis pour l'obtenir. C'est le concepteur-réalisateur qui proposera un produit pour atteindre ce ou ces résultat(s). Les rôles respectifs du demandeur et du concepteur-réalisateur sont alors différenciés.

#### 6.3.2. Recenser les fonctions

La recherche des fonctions s'effectue en étudiant les relations du futur produit avec son environnement. Elle se fait selon une méthodologie axée sur le recensement exhaustif des fonctions : ne pas oublier, ne pas inventer de faux services. Chaque fonction devra être

formulée par un verbe à l'infinitif suivi d'un ou plusieurs compléments. Pour cela, on se sert des étapes suivantes :

- La recherche intuitive.
- Les relations avec les éléments et l'environnement.
- L'analyse séquentielle.

### **6.3.3. Caractériser les fonctions**

Cette étape consiste à classer les fonctions recensées en fonctions de service et en fonctions techniques, en s'appuyant sur les critères suivants :

Les critères d'appréciation :

Ce critère est retenu pour comprendre la manière dont une fonction est remplie ou une contrainte respectée, il doit être accompagné d'une échelle permettant de situer son niveau, par exemple : le temps de mise en œuvre, la consommation,...etc.

Un niveau est repéré dans l'échelle adoptée pour un critère d'appréciation d'une fonction, il est généralement une valeur chiffrée.

La flexibilité : c'est la tolérance par rapport à la valeur du niveau demandé.

### **6.3.4. Ordonner les fonctions**

Il s'agit d'ordonner les fonctions recensées par le groupe de travail, sur un axe pourquoi / comment, en utilisant la représentation FAST (Function Analysis System Technic), qui permet la description des fonctions sous forme d'un diagramme suivant un enchaînement logique en répondant aux questions : Pourquoi, comment, quand ?

### **6.3.5. Hiérarchiser les fonctions**

Il est possible de hiérarchiser les fonctions soit en associant directement un coefficient à chaque fonction, soit en comparant chaque fonction à toutes les autres en jugeant si elle est plus ou moins importante.

Deux outils permettent de hiérarchiser les fonctions :

#### **❖ L'échelle de hiérarchisation des fonctions :**

Cette méthode est basée sur la représentation du poids de chaque fonction en le hiérarchisant suivant les cinq (5) niveaux d'importance :

K	Importance
1	Utile
2	Nécessaire
3	Important
4	Très important
5	Importance vitale

**Tableau 1.** Echelle de hiérarchisation des fonctions.

Ensuite, on continue par la démarche suivante :

- Totaliser pour l'ensemble des fonctions les poids obtenus ;
- Calculer pour chaque fonction le pourcentage de répartition obtenus ;
- Représenter ces pourcentages sur un histogramme. [20].

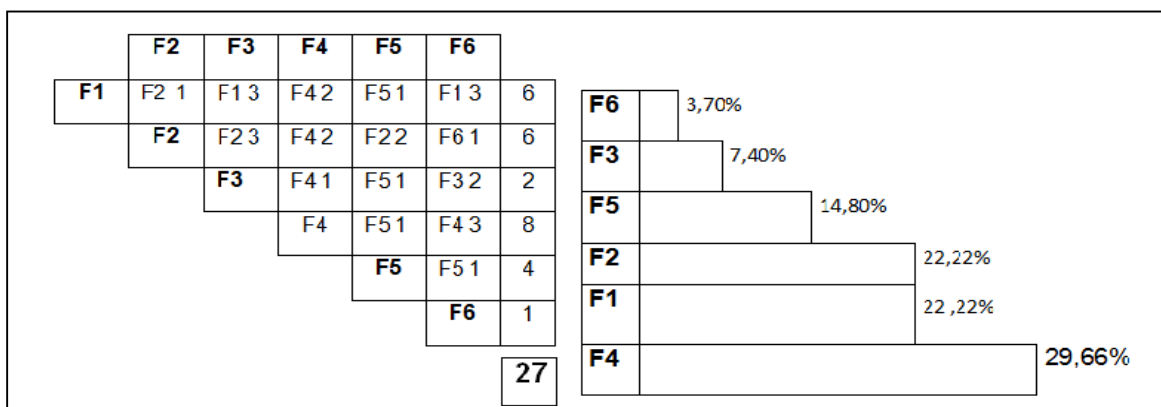
❖ **La méthode du tri croisé**

Comme la méthode précédente, il représente le poids de chaque fonction en appliquant la démarche suivante :

- Comparer les fonctions deux à deux ;
- Faire configurer dans la case correspondante la fonction qui domine l'autre avec une note de 1 à 3 :

- Note 1 : fonction à peine importante,
- Note 2 : fonction plus importante,
- Note 3 : fonction beaucoup importante.

- Totaliser le nombre de points obtenus par chaque fonction ;
- Calculer le pourcentage de répartition obtenu ;
- Représenter ces pourcentages sur un histogramme.



**Tableau 3.1.** Exemple de tableau de détermination relative des fonctions par la méthode du tri croisé.

### 6.3.6. Valoriser les fonctions

Il s'agit de présenter de manière synthétique les résultats de l'analyse fonctionnelle en transférant les coûts de revient des tâches sur les fonctions des services associées. Le principe est de dresser un tableau à partir duquel le cahier des charges fonctionnel du produit sera élaboré :

- Lister les fonctions du produit en abscisse ;
- Lister les composantes du produit en ordonnée ;
- Calculer le cout de chaque fonction. Cette répartition, d'abord en pourcentage puis en valeur réelle, se fait en proportion du rôle que joue chaque composante dans chaque fonction.

### 6.4. La recherche d'idées et voies de solutions

La recherche des voies de solutions est une étape importante dans la méthode de l'analyse de la valeur, il s'agit de trouver le plus grand nombre possible de solutions pour chaque fonction.

### 6.5. L'étude et l'évaluation des solutions

En ce qui concerne l'étude des solutions, il s'agit d'aller au-delà des propositions du groupe de travail. Il faut arriver à un niveau de définition des solutions qui permet une évaluation financière.

On doit donc être en mesure de définir un prototype esthétique et fonctionnel, voire de réaliser une déclinaison sur un prototype industrialisable.

Si la fabrication de plusieurs prototypes n'est pas envisageable pour des critères de coûts ou de délais, on pourra concevoir d'autres objets intermédiaires (des maquettes, des images virtuelles ou autres) permettant de réaliser une évaluation des solutions. [5].

### 6.6. Le bilan prévisionnel et proposition de choix

Dans cette étape, on dresse un bilan prévisionnel des solutions en s'appuyant sur la démarche suivante :

- ❖ Regroupement des solutions retenues et élaboration d'un bilan prévisionnel intégrant :
  - Les critères de sélection retenus.
  - Les niveaux atteints ou estimés par chaque solution au regard des besoins exprimés par le commanditaire dans le cahier des charges fonctionnel.
  - Le chiffre précis des couts de chacune des solutions.
  - La liste détaillée des avantages et inconvénients de chaque solution.
  - Les conditions d'application.
- ❖ Présentation au demandeur.
- ❖ Sélection d'une solution finale à réaliser. [5].

### 6.7. Le suivi de la réalisation

La finalité de cette phase est la mise en œuvre et l'ajustement de la solution retenue.

Cette phase est souvent négligée car on arrive au terme du projet, le produit est commercialisé ou presque. Les membres du groupe de travail ne sont plus mobilisés et l'animateur, s'il est externe à l'entreprise, n'est plus présent.

Cette phase est pourtant un moment privilégié pour s'assurer que :

- les décisions sont suivies d'effets, au niveau de la réalisation des produits,
- que les impacts prévus auprès des différents services sont réels.

On montrera en particulier la richesse méthodologique au niveau des décisions à prendre en compte pendant la mise en œuvre.

Cette phase est donc décisive pour la pérennité de la démarche d'analyse de la valeur dans une entreprise.

La mise en œuvre et l'ajustement de la solution retenue nécessite la démarche suivante :

- La mise en place de la solution retenue sous la responsabilité des services opérationnels.
- La mise en place des moyens de contrôle adaptés au suivi.
- L'identification des écarts entre la réalisation et la prévision
- Les ajustements et reprises éventuels de l'étude
- Le bilan final. [5].

## 7. Principes à respecter

- Bien clarifier les objectifs et les enjeux.
- Penser et gérer efficacement le temps de l'action.
- S'appuyer sur un groupe de travail et un animateur.
- Impliquer les personnes et motiver le groupe.
- Questionner et utiliser judicieusement l'information.
- Raisonner en termes de finalités et fonctions.
- Bien comprendre l'environnement.
- Systématiquement estimer, chiffrer, mesurer.
- Stimuler la créativité des personnes.
- Evaluer et valider les propositions.
- Penser aussi à la conduite de projet.
- Viser l'apprentissage du changement. [5].

## 8. Avantages et inconvénients de la méthode

### 8.1. Avantages

L'analyse de la valeur ;

- Permet d'améliorer une situation existante et de concevoir un nouveau produit.
- Constitue une approche transversale.
- Fournit une aide efficace à l'entreprise pour ;
  - Optimiser ses compétences et ses ressources.

- Adapter sa stratégie industrielle et commerciale aux exigences concurrentielles de son marché.
- Améliorer la qualité d'un produit sans en augmenter le cout ou, d'en diminuer le cout sans réduire le niveau des services rendus. [4].

**8.2. Inconvénients**

- Est une méthode très analytique, assez lourde à mettre en œuvre.
- Nécessite une forte implication des acteurs.
- Nécessite une bonne maitrise de la part de l'animateur [4].

**9. Quelques exemples d'application**

Statiquement, lors d'une action d'analyse de la valeur appliquée à la conception de produit, les gains obtenus sur les couts sont de l'ordre de 15 à 40%, parfois plus, avec des améliorations fortes des performances du produit, et une augmentation importante de la valeur perçue par le client.

L'investissement que représente l'étude de l'analyse de la valeur a généralement un retour compris entre 10 et 100, voire plus.

Voici deux exemples simples mettant en valeur les gains obtenus, les améliorations du produit vues par le client, et les conséquences pour l'entreprise en matière de gestion des composantes.

❖ **Exemple 1 :**

Le tableau suivant montre un exemple d'application :

Produit étudiés	Critères d'évaluation	Avant	Après
Equipement de levage  Série environ 200 à 300 par mois  Cout de l'action : environ 10000 F	Prix de vente	650 F	1000 F
	Part d'achats	48%	43%
	Temps de fabrication	3 heures	½ heur
	Marge sur couts variables	10%	50%
	Nombre de composante	32	18
	Amélioration		+ de sécurité + de confort +d'ergonomie +de compacité +de gestion

**Tableau 3.2 :** Application sur un équipement de levage

## ❖ Exemple 2 :

Produit étudiés	Critères d'évaluation	Avant	Après
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Armoires modulaires pour machines industrielles</li> <li>• Séries environ 100 par mois</li> <li>• Coût de l'action : environ 70 kF</li> </ul>	Prix de vente	9000 F	5500 F
	Part d'achats	25%	22%
	Temps de fabrication	12 heures	7 heures
	Marge sur coûts variables	35%	40%
	Volume de vente	Risque très fort de perte du marché	+20%
	Améliorations		<ul style="list-style-type: none"> <li>- de délai de fabrication</li> <li>+ de qualité</li> <li>- de transport</li> <li>+ de réactivité</li> <li>+ de modularité</li> </ul>

**Tableau 3.3 :** Application sur armoires modulaires pour machines industrielles

## ❖ Exemple 3 :

Analyse de la valeur chez un marchand de soupe

Une société de production de la soupe produit 16 millions sachets de potage par an. Or, après l'application de la méthode de l'analyse de la valeur, la société arrivée à une production de 42 millions de sachets par ans après trois ans seulement. La nouvelle présentation n'avait pas posé de problème.

L'opération a permis d'encaisser toutes les hausses en période d'inflation, sans augmenter le prix de vente du produit et d'obtenir cependant un bénéfice important. En réalité, si on tient compte des hausses, ce bénéfice a été de 24 à 25%.

## 10. Conclusion

L'utilisateur final d'un système ou d'un produit n'est satisfait que si le ce dernier correspond parfaitement à ses besoins. Les paramètres à prendre en compte pour satisfaire l'attente d'un utilisateur sont interdépendants, parfois complexes, et souvent différents de ceux d'un autre utilisateur (besoins fondamentaux, psychologiques, esthétiques ...).

Dès lors, nous mesurons toute la difficulté de traduire concrètement les besoins des utilisateurs en une solution unique, surtout que s'ajoutent trois grands vecteurs : l'association des technologies de pointe ; l'ouverture aux marchés mondiaux, la puissance des supports d'information.

Cette approche a eu pour objectif de mettre en place des concepts et méthodologies nouvelles au travers de colloques et manifestations. On peut dire que l'analyse de valeur se propose de répondre avec rigueur aux attentes légitimes des entreprises et des services.

Les bénéfices de l'application de l'AV s'étendent bien plus largement que le seul projet traité, les retombées se mesurent généralement par des résultats économiques et commerciaux, par une ouverture et un décloisonnement des services et des spécialités de l'entreprise, une diffusion de l'approche client, et des capacités de communication transversales dans l'entreprise, qui fait travailler les individus et les groupes non en baroudeurs protégeant leurs prérogatives, mais en véritable synergie.

*Chapitre IV*

**Application de  
l'analyse de la valeur**

## Introduction

Dans le cadre de ses activités de recherche, le laboratoire de mécanique, structures et énergétique (LMSE), spécialisé dans le domaine de la caractérisation du comportement statique et dynamique des matériaux, a décidé de se lancer dans le domaine de la tribologie. Pour cela, il nous a été demandé de faire une étude d'amélioration du banc d'essai d'usure (tribomètre) existant, en lui incorporant une enceinte thermique. Ce banc réalisé par des étudiants dans le cadre de leur projet de fin d'études ne répond pas aux objectifs attendus, à cause de quelques défauts qui sont apparus durant son utilisation. Dans ce chapitre, nous présentons l'application de la méthode analyse de la valeur en vue d'apporter des améliorations au tribomètre pion sur disque existant au laboratoire LMSE et par la même occasion l'équiper d'une enceinte thermique pour les essais de frottement à chaud. La méthode est ci-dessus déroulée dans toutes ses étapes de conception jusqu'à la solution finale

### 1. L'orientation de l'action

#### 1.1. L'objet de l'étude :

Dans le cadre de la préparation de notre projet de fin d'études, le laboratoire de mécanique des structures et énergétique (LMSE) nous a proposé d'apporter une amélioration au tribomètre conçu par les étudiants : S.MEZDAD et H.MANE de la promotion 2010 et dirigés par M<sup>r</sup> S.DJEBALI pour satisfaire les besoins du laboratoire, en lui incorporant une enceinte thermique.

Donc notre rôle consiste à trouver des solutions adéquates aux fonctions de service du banc conformes au cahier des charges fonctionnel (C.D.C.F), qui nous a été imposé par le donneur d'ordre (demandeur).

Les solutions et les systèmes à concevoir doivent être :

- Simples et compréhensibles.
- Faciles à utiliser.
- Les systèmes, les dispositifs et les pièces qui les forment doivent être économiquement dans les limites des moyens du laboratoire de mécanique, structures et énergétique (LMSE), pour les acquérir ou les usiner.
- Les solutions à prendre en considération doivent être cohérentes du point de vue fonctionnel.

Nous prendrons aussi en considération les moyens disponibles dans les ateliers du département de génie mécanique (G.M) pour la concrétisation du projet dans sa phase de réalisation.

#### 1.2. L'objectif :

L'objectif de cette étude est d'améliorer le banc d'essai d'usure (tribomètre) qui fera l'objet d'une éventuelle réalisation, permettant au laboratoire de mécanique structures et énergétique (LMSE) d'entamer les essais sur des matériaux donnés.

Ce banc aidera les étudiants et les spécialistes, à travers les essais, les analyses et les recherches, à pénétrer dans ce domaine passionnant et élargir l'éventail de leurs connaissances en ayant la

possibilité d'étudier les frottement sous différentes températures, et surtout apporter une aide précieuse aux entreprises pour mieux faire face aux problèmes qui découlent de ce phénomène ubuesque.

### 1.3. Le groupe de travail :

Le groupe de travail est constitué de 6 à 10 éléments au maximum. C'est un groupe d'experts maîtrisant parfaitement la méthode de l'analyse de la valeur. Il doit être cohérent et complet dans le sens où chaque membre dans le domaine qu'il maîtrise, apporte ce dont on a besoin pour cerner le sujet, donc de participer à l'évolution de l'étude.

Paradoxalement, on n'est pas des experts et pas assez nombreux, mais des étudiants qui ont la chance de découvrir cet outil d'aide à la conception et nous initier à son application dans le cadre du projet de fin d'étude.

Le tableau représentatif du groupe de travail qui collabore pour cette recherche :

Nom et Prénom	Rôle	Fonction	Spécialité
M <sup>r</sup> S. LARBI	Animateur	Enseignant	Comportement des métaux
M <sup>r</sup> S. DJEBALI	Membre	Enseignant	Construction mécanique
M <sup>r</sup> A.BILEK	Membre	Enseignant	Analyse des contraintes
M <sup>r</sup> M.BELDI	Membre	Doctorant	Analyse des contraintes
M <sup>r</sup> L.MOKHEBI	Membre	Etudiant	Construction mécanique
M <sup>r</sup> R.NAIT ALI	Membre	Etudiant	Construction mécanique

**Tableau 4.1** : Membre du groupe d'analyse de la valeur.

## 2. La recherche d'information

Cette phase a pour objectif de recenser et communiquer toutes les informations nécessaires sur les bancs d'essai d'usure (tribomètres), ce qui nous permettra de proposer plusieurs solutions.

Selon notre recherche, nous avons trouvé deux organismes au niveau national possédant ce genre de banc d'essai :

Le premier se trouve au Laboratoire de Mécanique de l'Université de Constantine, constitué d'un ensemble d'organes comme l'indique la figure 4.1.



**Figure 4.1 :** Tribomètre de type pion/disque (Laboratoire de Mécanique de l'Université de Constantine)

❖ Quelques spécifications techniques :

- Vitesse de rotation du disque 10 à 200 tr/min
- Vitesse linéaire équivalente 20 à 420 mm/s
- Rayon de piste 20 mm
- charge maximale 40 N
- Dimension du disque 50 mm de diamètre et 10 mm d'épaisseur
- Dimension du pion 4 mm de diamètre et 20 mm de longueur
- vitesse de rotation maximale du moteur est 4000 tr/min

Le deuxième se trouve au laboratoire de mécanique des structures et énergétique (LMSE) de notre université. (Figure 4.2).



**Figure 4.2 :** Tribomètre de type pion/disque (Laboratoire de Mécanique structures et Energétique de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou).

❖ Quelques spécifications techniques :

- Rayon de piste variable
- charge maximale 30 N
- Dimension du disque 80 mm de diamètre et 6 mm d'épaisseur
- Section du pion 36 mm<sup>2</sup>
- Longueur du pion 15 mm
- Vitesse de rotation : 1500 tr/min.

D'après les informations recueillies sur le web, ces bancs d'essai sont fabriqués par des entreprises spécialisées à la commande. Des sites présentent uniquement des photos de produits finis commercialisés ou des schémas synoptiques sans autres précisions au niveau fonctionnel et solutions technologiques.

Les informations que nous avons réussi à récolter sur le tribomètre, d'après notre recherche sont les suivantes :

- Le tribomètre pion/disque est un instrument de laboratoire qui permet d'étudier le frottement et l'usure relatifs à des combinaisons de couple de matériaux bien déterminés.

- Le disque est entraîné par un moteur électrique avec un variateur de vitesse en mouvement rotatif.
- Le pion est positionné et maintenu immobile sur le disque, il frotte sur la surface plane de ce dernier. L'effort normal dans le contact est appliqué par le pion.
- Un capteur placé sur le porte pion qui transmet les données à un appareil de traitement de données (chaîne d'acquisition).
- Les efforts normal et tangentiel sont mesurés avec des instruments particuliers.

### 3. Analyse des fonctions et des coûts

L'analyse fonctionnelle consiste dans une première étape à définir les fonctions que l'utilisateur réclame d'un produit, en seconde étape on procédera à la recherche des fonctions techniques internes au produit et nécessaires à la réalisation des fonctions de service réclamées par le demandeur.

L'analyse fonctionnelle est l'étape la plus importante dans la conception d'un produit.

Cette phase nous permet de recenser les fonctions principales sur lesquelles nous nous baserons pour satisfaire le cahier des charges fonctionnel (C.D.C.F) que le laboratoire LMSE attend.

#### 3.1. Le cahier des charges fonctionnel

- Concevoir un banc d'essai d'usure vertical ou horizontal.
- Banc à mouvement rotatif.
- Nature de l'essai : usure.
- L'essai est réalisé sur des couples de matériaux bien déterminés.
- Type de contact pion/disque
- Prévoir un système de mesure de l'effort tangentiel ( $F_T$ ) et l'effort normal ( $F_N$ ) Indépendants au cours d'une opération de frottement de glissement.
- Utiliser des capteurs de types extensométriques pour détecter les variations des déformations.
- Prévoir une enceinte thermique pour réaliser des essais en température.
- Prévoir la mesure et la régulation de la température.
- Entraînement par moteur électrique avec possibilité de variation de la vitesse.
- Vitesse linéaire maximale  $V_{max} = 5$  m/s.
- Charge maximale appliquée 30 N.
- Travail à sec.
- Système de fixation de l'éprouvette cylindrique et du pion.
- Système d'application de la charge.
- Prévoir une chaîne d'acquisition des données.
- Guidage de la broche avec des roulements.
- Amortissement des vibrations.
- Recours minimum à la sous-traitance.
- Solutions simples, faisables avec les moyens du département de génie mécanique.

### 3.2. Analyse fonctionnelle

Pour mieux cerner les fonctions que doit satisfaire notre tribomètre, nous aborderons leur recensement par les trois étapes suivantes :

#### 3.2.1. Recherche intuitive :

En s'appuyant sur nos intuitions, nous répondrons à certaines questions en rapport avec le fonctionnement et l'utilité du banc, ainsi que les tâches qu'il doit remplir afin de faciliter le travail de l'utilisateur :

Pourquoi concevoir un tribomètre avec une enceinte thermique ?

Toujours en se fiant à notre intuition et notre imagination, les réponses que nous pouvons donner à cette question : le banc d'essai d'usure est conçu pour effectuer des essais d'usure sous différentes températures, afin de mesurer le coefficient de frottement. Mais comment ?

- Générer un mouvement rotatif du disque.
- Appliquer et maintenir une charge constante durant l'essai.
- Avoir la possibilité de changer la vitesse de rotation du disque.
- Avoir la possibilité de réaliser un essai à une température voulue.
- Mesurer et maintenir constante la température voulue durant l'essai.
- mesurer les efforts ( $F_N$ ) et ( $F_T$ ) (normal, tangentiel) indépendamment l'un de l'autre.
- fixer le banc au sol.

#### 3.2.2. Relation avec les éléments extérieurs et l'environnement :

Cette étape consiste à identifier le milieu extérieur au banc, c'est-à-dire tout ce qui est en contact physique ou virtuel avec ce dernier, et qui sont :

- L'opérateur (la main, l'œil).
- L'air et lumière.
- La poussière.
- L'énergie électrique.
- Matériels d'entretien.
- La chaîne de mesure.
- Le régulateur de température.
- Le variateur de vitesse.
- Le pion.
- Le disque.
- Le sol.

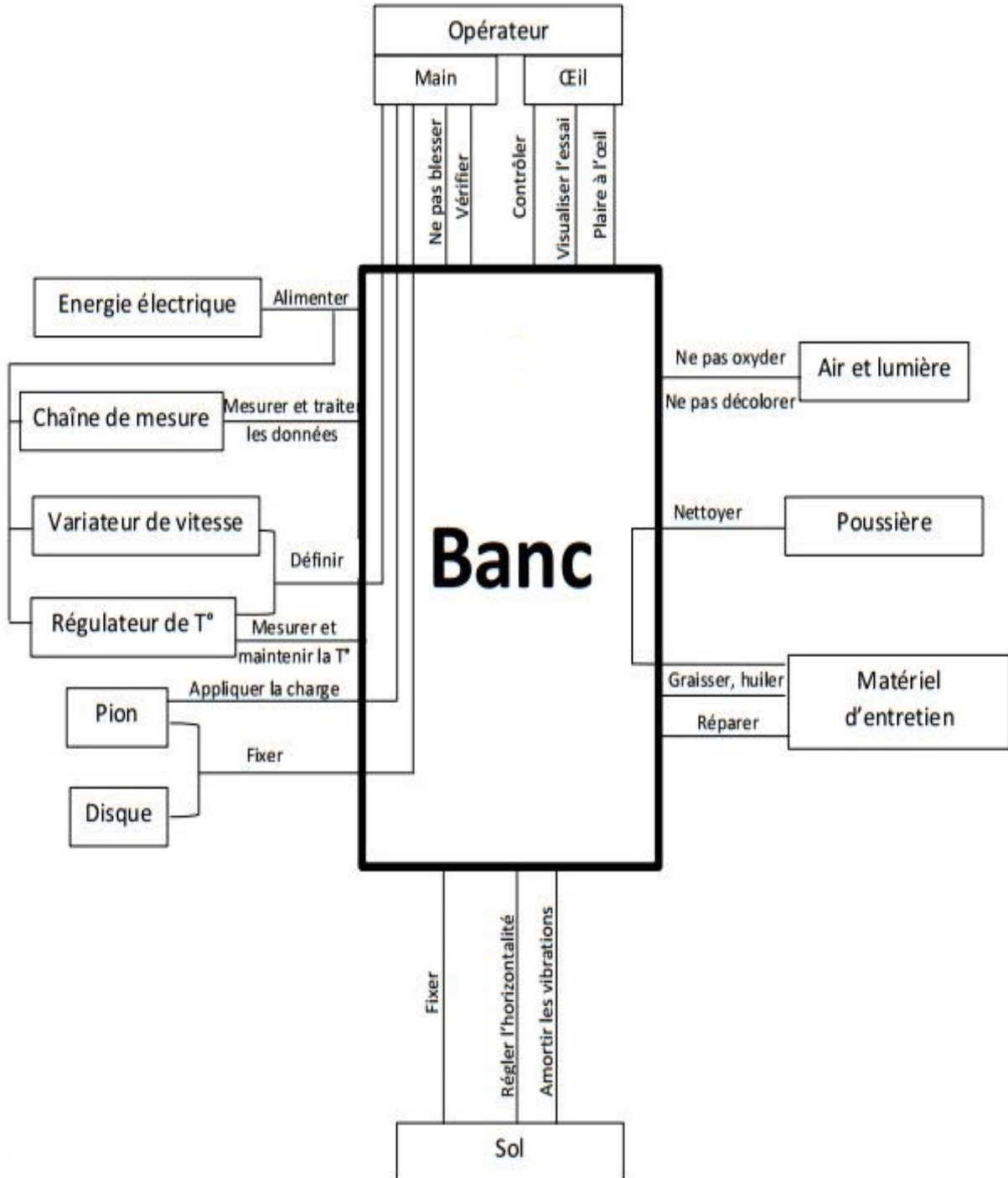
Les relations qui existent entre le banc et son environnement sont résumées dans le tableau suivant :

Éléments extérieurs		Relations avec le banc
L'opérateur	la main	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fixer le banc sur la table.</li> <li>• Vérifier le banc avant l'essai.</li> <li>• Fixer les éprouvettes (disque, pion).</li> <li>• Définir la vitesse de rotation du disque.</li> <li>• Définir la température de l'essai.</li> <li>• Ne pas blesser l'opérateur.</li> <li>• Appliquer la charge.</li> </ul>
	l'œil	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contrôler, visualiser les dispositifs et les systèmes du banc avant l'essai.</li> <li>• Visualiser l'essai.</li> <li>• Plaire à l'œil.</li> </ul>
L'air et la lumière		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ne pas oxyder ou décolorer le banc.</li> </ul>
La poussière		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ne pas laisser la poussière s'infiltrer entre les surfaces de contact du disque et du pion.</li> </ul>
Les vibrations		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Amortir les vibrations durant l'essai.</li> </ul>
Matériels d'entretien		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nettoyer le banc (brosser, essuyer).</li> <li>• Graisser, huiler.</li> <li>• Réparer les parties défectueuses du banc.</li> </ul>
L'énergie électrique		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alimenter le moteur électrique.</li> <li>• Alimenter l'enceinte thermique.</li> <li>• Alimenter le régulateur de température.</li> <li>• Alimenter le variateur de vitesse.</li> <li>• Alimenter la chaîne de mesure.</li> </ul>
La chaîne de mesure		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mesurer les efforts N et T.</li> <li>• Acquérir et traiter les données.</li> </ul>
Le régulateur de température		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mesurer la température à l'intérieur de l'enceinte.</li> <li>• Maintenir la température appliquée durant tout l'essai.</li> </ul>
Le variateur de vitesse		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Changer la vitesse de rotation du moteur.</li> </ul>
Le disque		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Doit être fixé sur l'arbre de broche.</li> <li>• Doit être à l'intérieur de l'enceinte thermique.</li> <li>• Doit être soumis à un mouvement de rotation.</li> </ul>
Le pion.		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Doit être fixé sur le porte-pion.</li> <li>• Doit être positionné et maintenu immobile sur le disque durant l'essai.</li> <li>• Doit avoir uniquement la translation horizontale.</li> <li>• Doit translater entre l'intérieur et l'extérieur de l'enceinte thermique.</li> </ul>

Le sol	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fixer le banc au sol</li> <li>• Régler l'horizontalité du banc.</li> </ul>
--------	---

**Tableau 4.2 :** Tableau des liaisons entre le banc et son environnement.

Le tableau 6 peut être représenté par le schéma suivant :



**Figure 4.3 :** Relations du banc avec l'environnement (schéma d'ensemble)

### 3.2.3. Analyse séquentielle

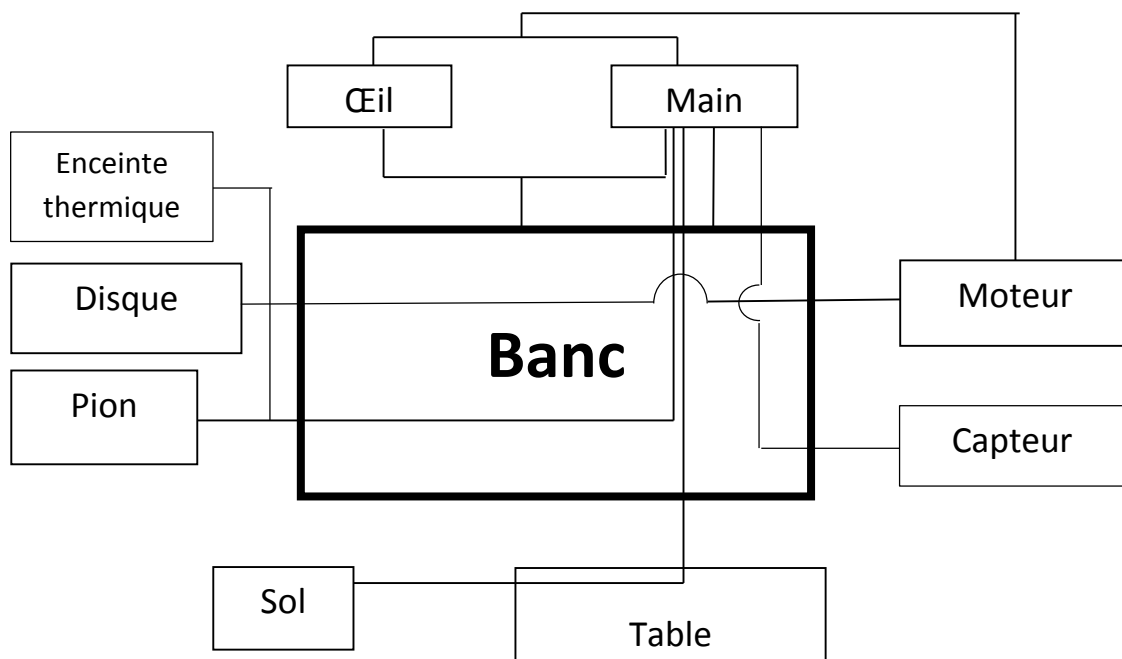
Cette étape consiste à analyser la vie du produit dans toutes ses étapes, elle complète l'étape précédente.

Etape de la vie du banc	Durée
Préparation du banc à l'essai	10%
Banc en fonctionnement	20%
Banc au repos	70%

**Tableau 4.3** : Phases de vie du banc.

- **Préparation du banc à l'essai**

- Vérifier la mise à niveau du banc
- Etalonner le capteur.
- Fixer le disque.
- Fixer le pion.
- Chauffer l'enceinte thermique.
- Fixer la température.



**Figure 4.4** : Préparation du banc.

- **Banc en fonctionnement**
- Réaliser le contact pion/disque.
- Appliquer la charge au contact.
- Mesurer les efforts N et T.
- Mesurer la température.
- Acquérir et traiter les données.
- Visualiser l'essai.

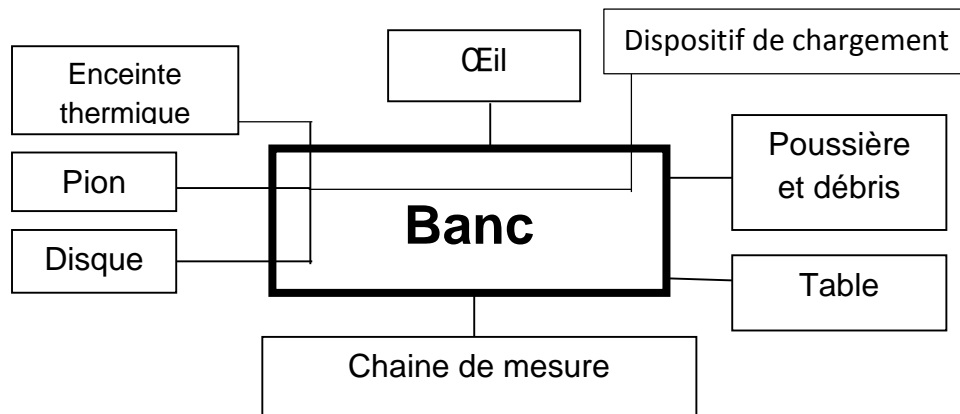


Figure 4.5 : Banc en fonctionnement

- **Banc au repos**
- Nettoyer le banc
- Entretenir le banc (graisse, huile, réparation)
- Ne pas se décolorer par la lumière
- Ne pas s'oxyder par l'air

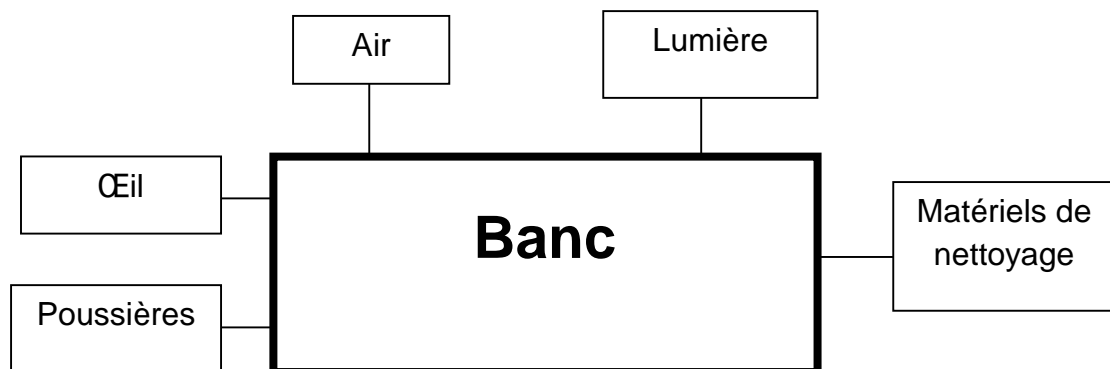
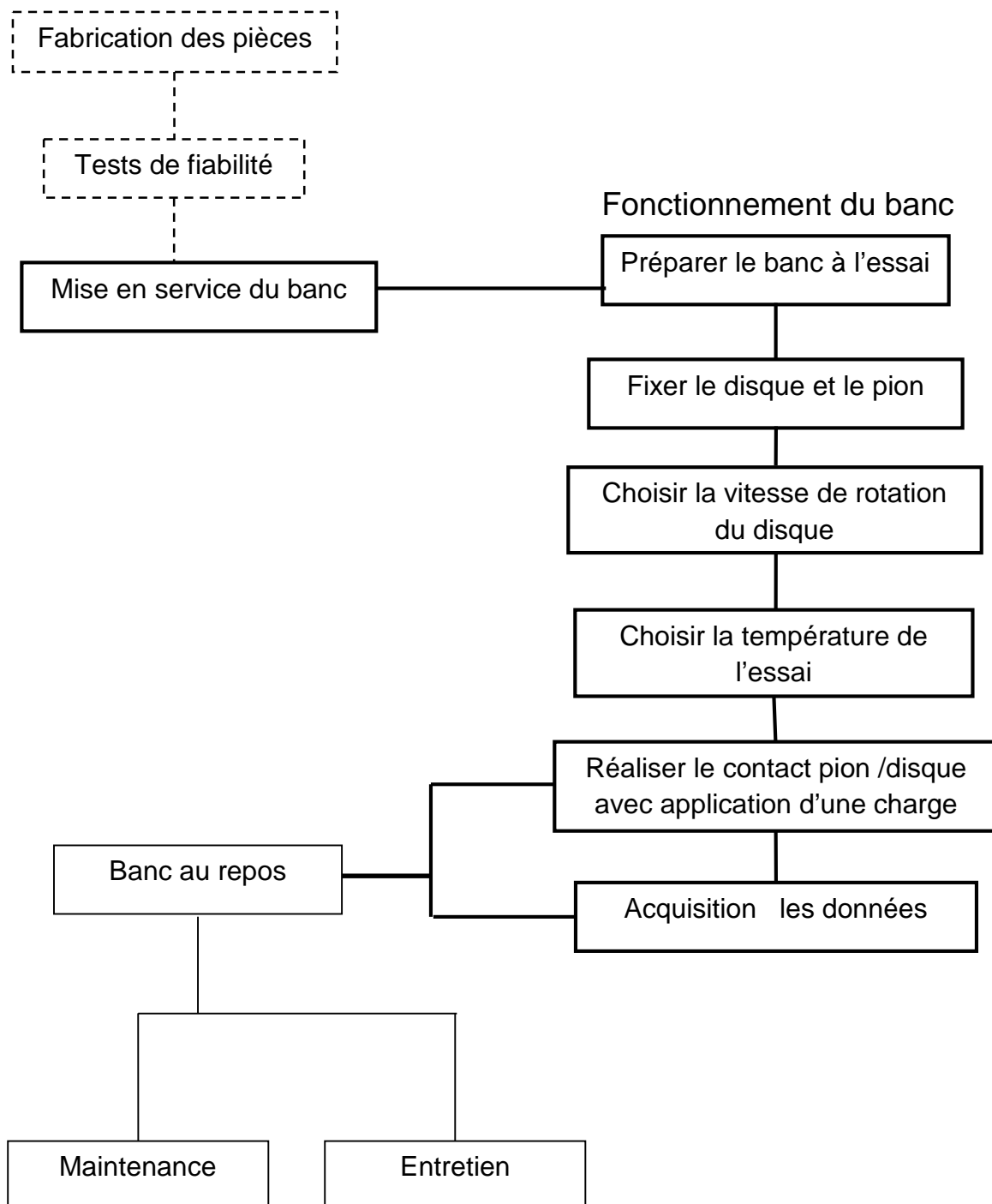


Figure 4.6 : Banc au repos

Le diagramme suivant illustre toutes les étapes de la vie du banc.



**Figure 4.7 :** Diagramme des phases de la vie du banc

### 3.3. Caractériser les fonctions

#### 3.3.1. Fonctions de service

- Réaliser des essais sous différentes températures.
- Mesurer les efforts normal et tangentiel.
- Déterminer le coefficient de frottement.
- Déterminer le taux d'usure.

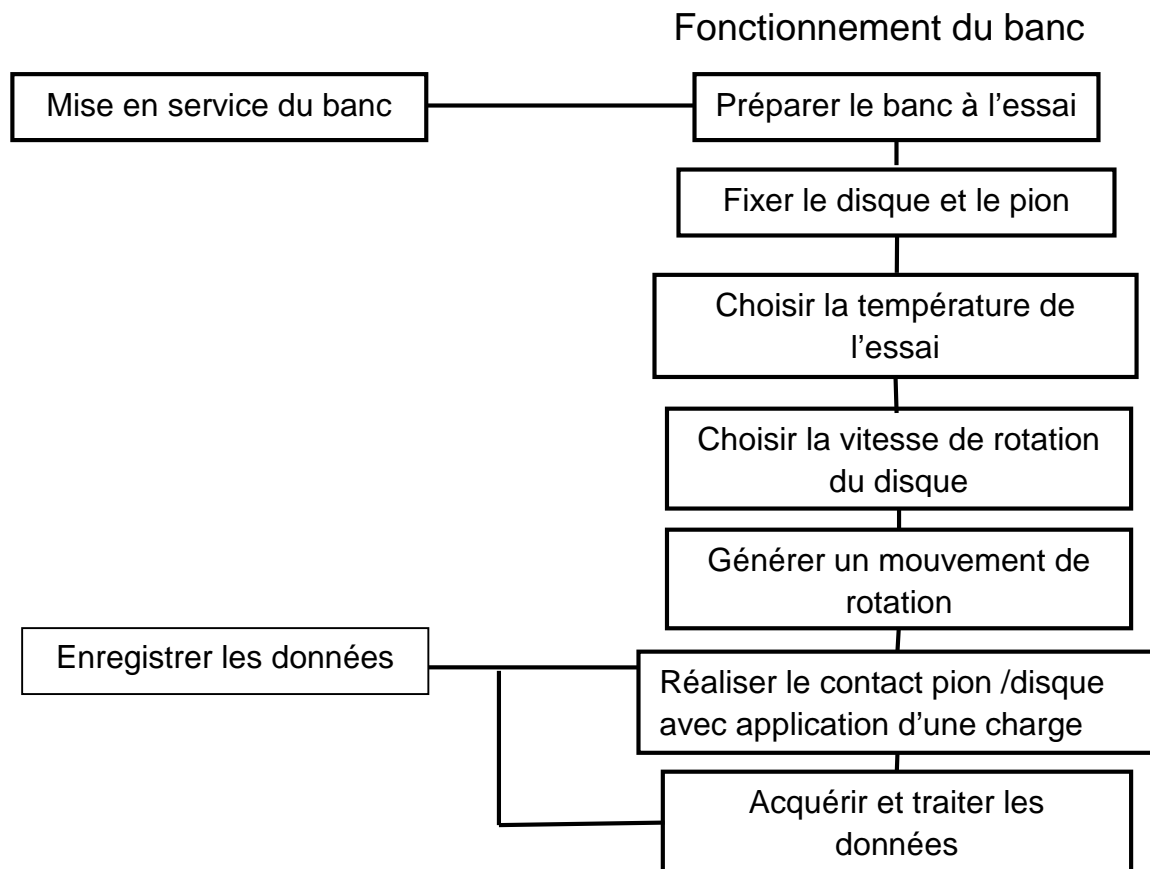
### 3.3.2. Fonctions de contraintes

- Protéger les équipements électriques d'une éventuelle surcharge.
- Amortir les vibrations.
- S'adapter à l'environnement.
- Ne pas blesser l'opérateur (absence de bavures, d'arêtes, ...).
- Ne pas gêner la vision.
- Nettoyer le banc
- Entretenir le banc (graisse, huile, réparation)
- Protéger le banc de la poussière
- Etre facile d'utilisation

### 3.3.3. Recherche des fonctions techniques

Les fonctions techniques sont les actions internes au produit, entre ses constituants. Donc pour chercher les fonctions techniques il faut déterminer les constituants internes au produit.

Pour cette raison notre étude se concentre uniquement sur la période de mise en service du banc puisque c'est elle qui nous renseigne le plus sur les fonctions que doit remplir le banc, donc de déterminer les éléments internes qui participeront à l'accomplissement des différentes fonctions de service du banc.



**Figure 4.8** : Phase de fonctionnement du banc

### 3.4. Arborescence des fonctions de la phase

Cette étape permet d'ordonner les fonctions, on distingue :

- les fonctions principales
- les fonctions secondaires.

Le tableau suivant illustre l'ordre des fonctions recensées pour le banc :

Fonctions principaux	Fonctions secondaires
<b>F1</b> : Fixer le banc au sol	<b>F1.1</b> : Fixer la table au sol <b>F1.2</b> : Fixer le banc sur la table <b>F1.3</b> : Régler l'horizontalité de la table <b>F1.4</b> : Amortir les vibrations
<b>F2</b> : Transmettre le mouvement de rotation au disque.	<b>F2.1</b> : Générer un mouvement de rotation <b>F2.2</b> : Entraîner le système de guidage du disque par un dispositif de liaison. <b>F2.3</b> : Assurer le guidage en rotation de l'arbre de broche <b>F2.4</b> : Assurer la fixation du disque <b>F2.5</b> : Choisir la vitesse de rotation
<b>F3</b> : Appliquer la charge et la maintenir constant	<b>F3.1</b> : Fixer le pion <b>F3.2</b> : Guidage du coulisseau porte-capteur. <b>F3.3</b> : Appliquer la charge
<b>F4</b> : Appliquer et maintenir la température voulue.	<b>F4.1</b> : Isoler l'enceinte thermique. <b>F4.2</b> : Ouvrir et fermer l'enceinte thermique. <b>F4.3</b> : Chauffer l'enceinte. <b>F4.4</b> : Réguler la température.

F5 : Mesurer et acquérir les données	<p><b>F5.1</b> : Mesurer les efforts <math>F_N</math> et <math>F_T</math>.</p> <p><b>F5.2</b> : Mesurer la température.</p> <p><b>F5.3</b> : Acquérir et traiter les données.</p>
--------------------------------------	---

**Tableau 4.4** : L'ordre des fonctions recensées.

### 3.5. Les fonctions techniques

Pour satisfaire les fonctions de service du banc, il faut prévoir des dispositifs adéquats et cohérents. Alors, pour chaque fonction de service nous déterminons des éléments internes qui doivent la satisfaire.

#### 3.5.1. Éléments internes et externes au banc

##### Fonction 1 : Fixer le banc au sol

- Un bâti
- Une table
- Un dispositif d'amortissement
- Une semelle

##### Fonction 2 : Transmettre le mouvement de rotation au disque

- Un moteur électrique avec un variateur de vitesse
- Un dispositif de transmission de mouvement du moteur à la broche
- Un dispositif de guidage du disque en rotation
- Un dispositif de fixation du disque

##### Fonction 3 : Appliquer la charge et la maintenir constante

- Un dispositif de fixation du pion
- Un dispositif de fixation du porte pion.
- Un dispositif de chargement
- Un dispositif de guidage du porte pion.

##### Fonction 4 : Appliquer et maintenir la température voulue.

- Une enceinte isolée thermiquement.
- Dispositif d'ouverture et de fermeture de l'enceinte.
- Prévoir un élément chauffant.
- Un régulateur de température.

### Fonction 5 : Mesurer les données

- Un capteur
- Une chaîne d'acquisition
- Un miro ordinateur
- Un logiciel de traitement des données

## 4. La recherche d'idées et de voies de solutions

Comme il a été défini dans le troisième chapitre, l'objectif de cette étape est de trouver le plus grand nombre de solutions pour chaque fonction à satisfaire.

Maintenant que le cahier des charges du besoin (CDCB) est formulé par des fonctions de service, nous passons à la recherche des solutions cohérentes du point de vue fonctionnel et conforme au cahier des charges du besoin (CDCB).

Dans cette phase, nous nous sommes appuyés sur la méthode de **BRAINSTORMING**, qui repose sur la participation de tous les éléments du groupe. Chaque élément propose des idées, des solutions et même des remarques afin de trouver les solutions adéquates.

### 4.1. Fonction 1 : Fixer la table au sol :

Cette fonction principale regroupe les fonctions techniques suivantes :

**F1.1** : Fixer la table au sol.

**F1.2** : Fixer le banc sur la table.

**F1.3** : Régler l'horizontalité de la table.

**F1.4** : Amortir les vibrations.

#### 4.1.1. Solution n°01 (Figure 4.9)

##### ❖ Nomenclature du dispositif :

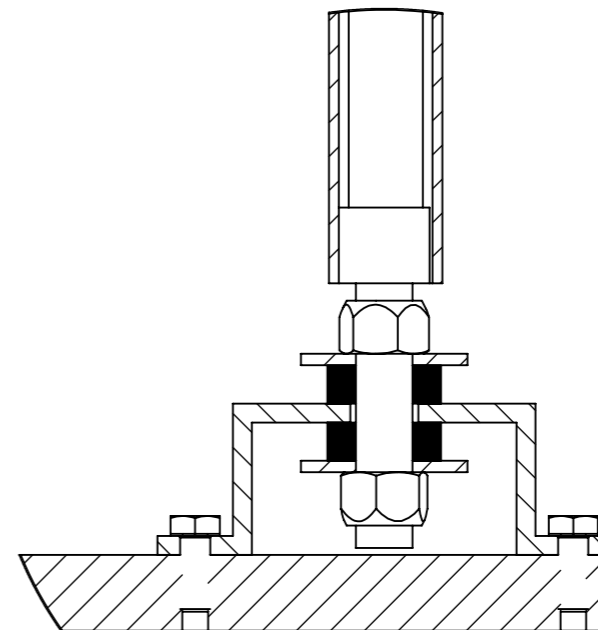
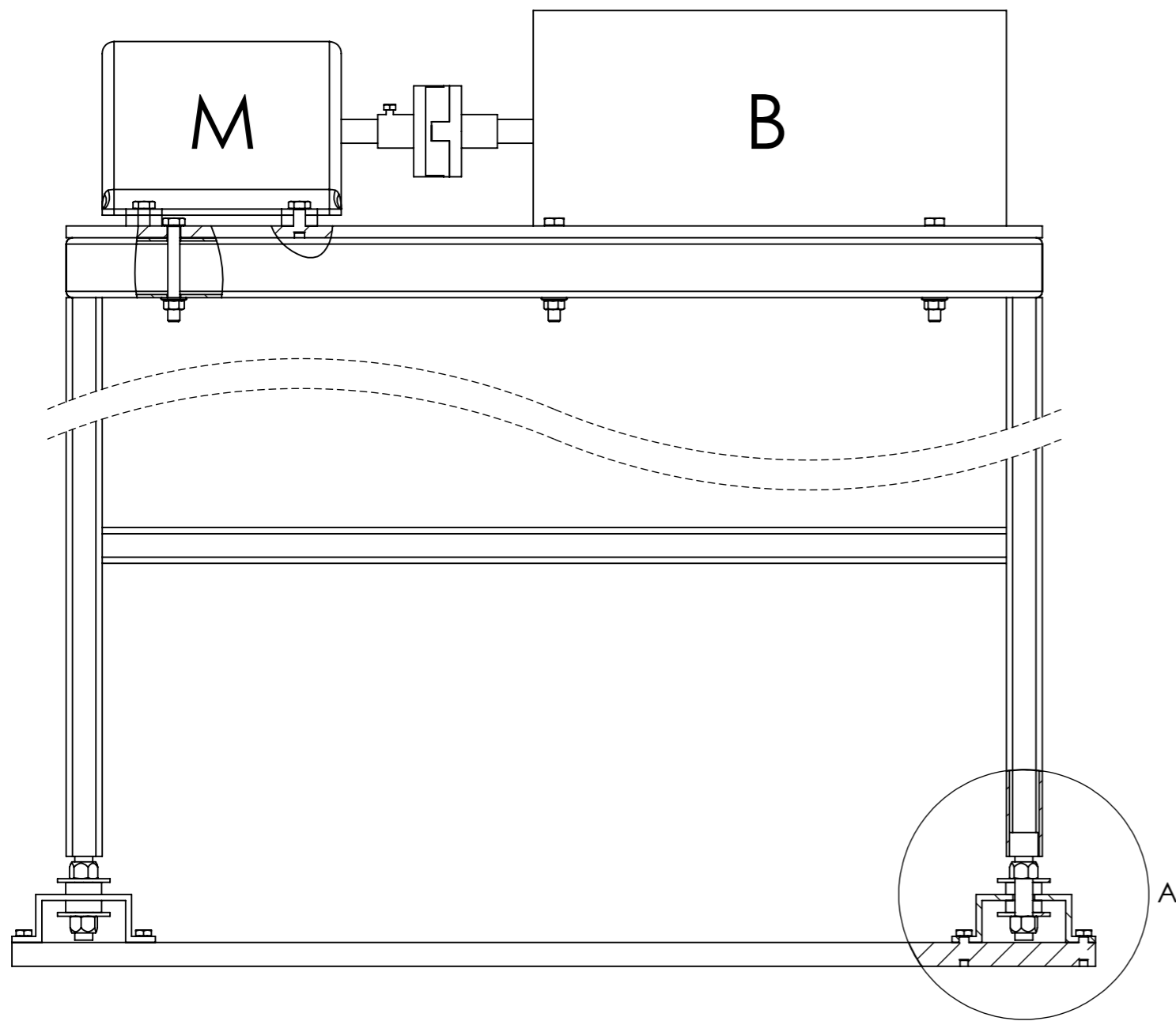
1. Semelle.
2. Support.
3. Vis de réglage.
4. Ecrou.
5. Rondelle.
6. Polymère.
7. Vis.
8. Table.
9. Semelle.
10. Cale de réglage en hauteur du moteur (en polymère).
11. Moteur.
12. Bâti.
13. Arbre de broche.
14. Accouplement.

##### ❖ Principe de fonctionnement :

Le bâti (12) et le moteur (11) sont fixés sur la semelle (9) qui est elle-même fixée horizontalement sur la table (8) par des boulons.

Pour régler le moteur en hauteur, nous avons prévu des cales de réglage (10) en élastomère afin d'assurer également l'amortissement des vibrations.

La fixation de la table au sol se fait avec une semelle (1) sur laquelle sera fixé le support (2) avec les vis (7). Dans ce dernier on introduit la vis de réglage (3) qui sera guidée par les écrous (4) et les rondelles (5) afin d'assurer le réglage de l'horizontalité de la table.



DÉTAIL A  
ECHELLE 1 : 2

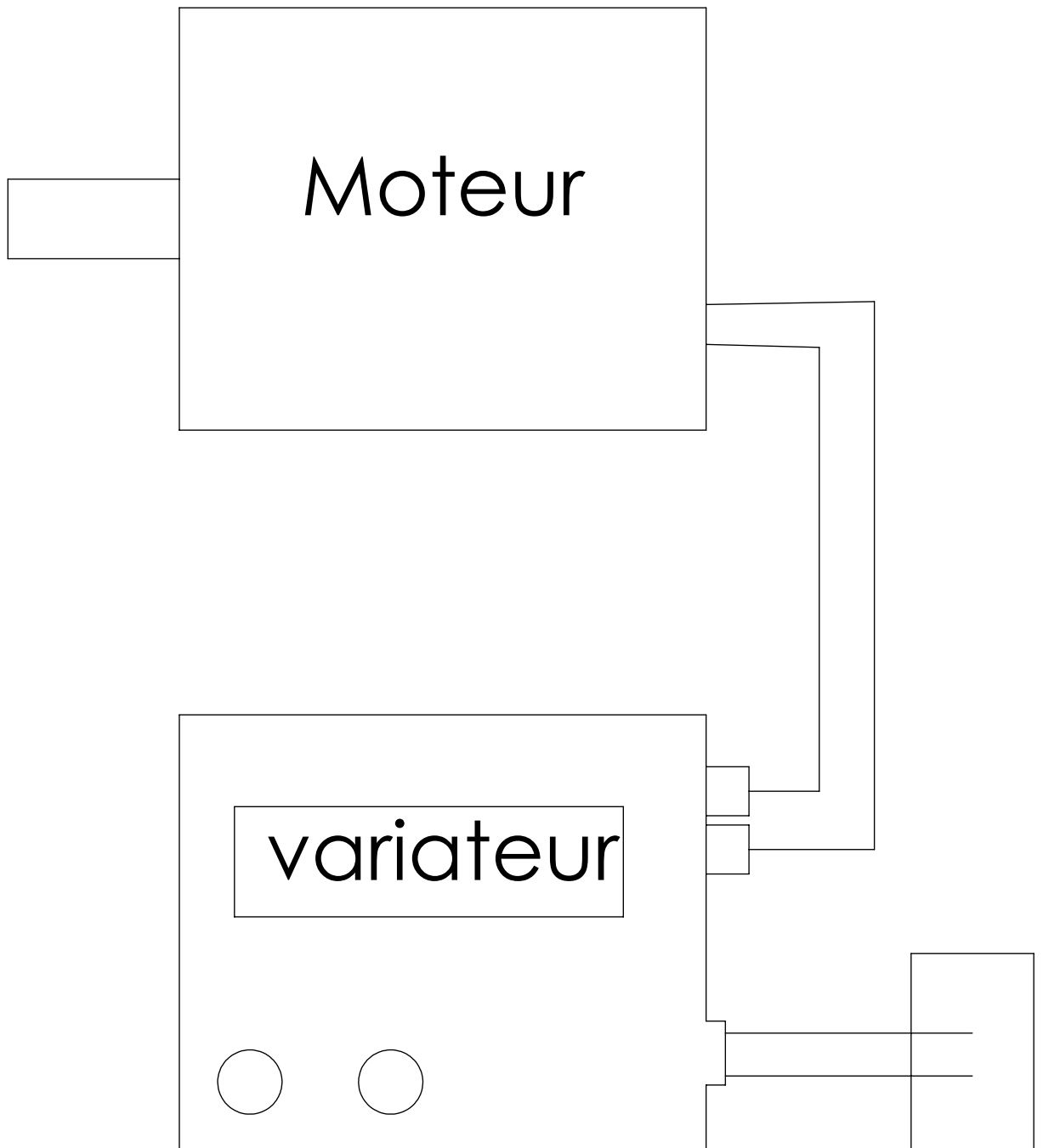
Figure 4.9: Fonction 1 : Solution 1 : Fixer le banc au sol

## 4.2. Fonction 2 : Transmettre le mouvement de rotation au disque

Cette fonction principale est réalisée avec quatre groupes de fonctions techniques :

### 4.2.1. Groupe N°1 : Générer le mouvement et choisir la vitesse de rotation (Figure 4.10)

- **F2.1** : Générer un mouvement de rotation.
- **F2.2** : Choisir la vitesse de rotation.



**Figure 10:** Fonction 1: Groupe 1: Solution 1:  
Générer le mouvement et choisir la vitesse de rotation

#### 4.2.2. Groupe N°2 : Entraîner le système de guidage du disque par un dispositif de liaison

- **F2.3** : Entraîner le système de guidage du disque par un dispositif de liaison.

##### 4.2.2.1. Solution N°1 (Figure 4.11)

###### ❖ Nomenclature du dispositif :

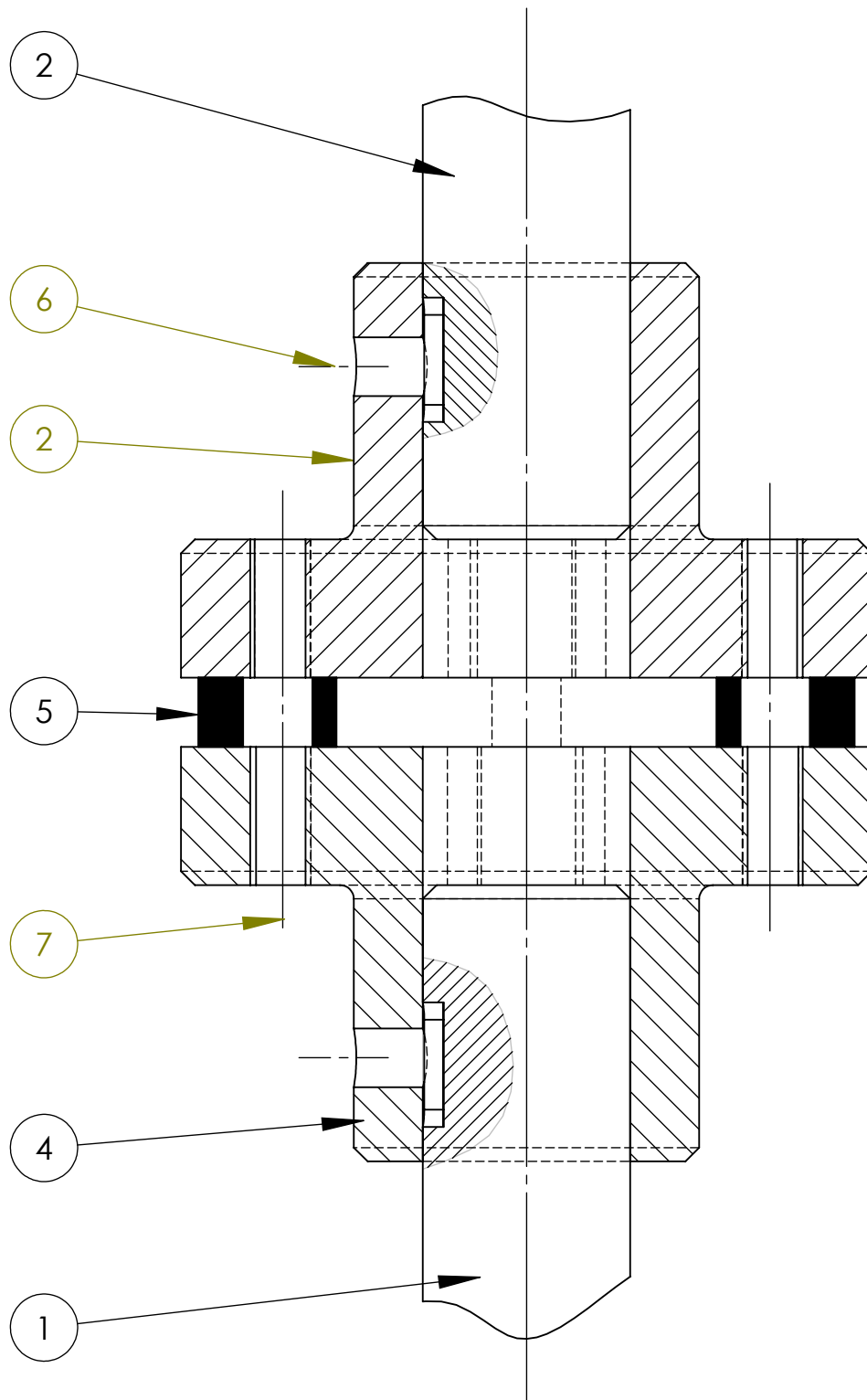
1. Arbre moteur
2. Arbre de broche.
3. Manchon
4. Manchon
5. Joint élastique
6. Vis de pression
7. Boulon

###### ❖ Principe de fonctionnement :

Le mouvement de rotation qui arrive de l'arbre moteur (1) est transmis à la broche porte éprouvette (2) grâce à des vis de pression (6).

Les manchons (3) et (4) sont bloqués en translation par quatre boulons (7)

Pour assurer l'élasticité de l'accouplement et minimiser les vibrations on utilise un joint élastique (5).



**Figure 4.11:** Fonction 2 : Groupe 2 : Solution N°1 :  
 Entraîner le système de guidage du disque par un  
 dispositif de liaison

#### 4.2.2.2. Solution N°2 (Figure 4.12)

##### ❖ Nomenclature du dispositif :

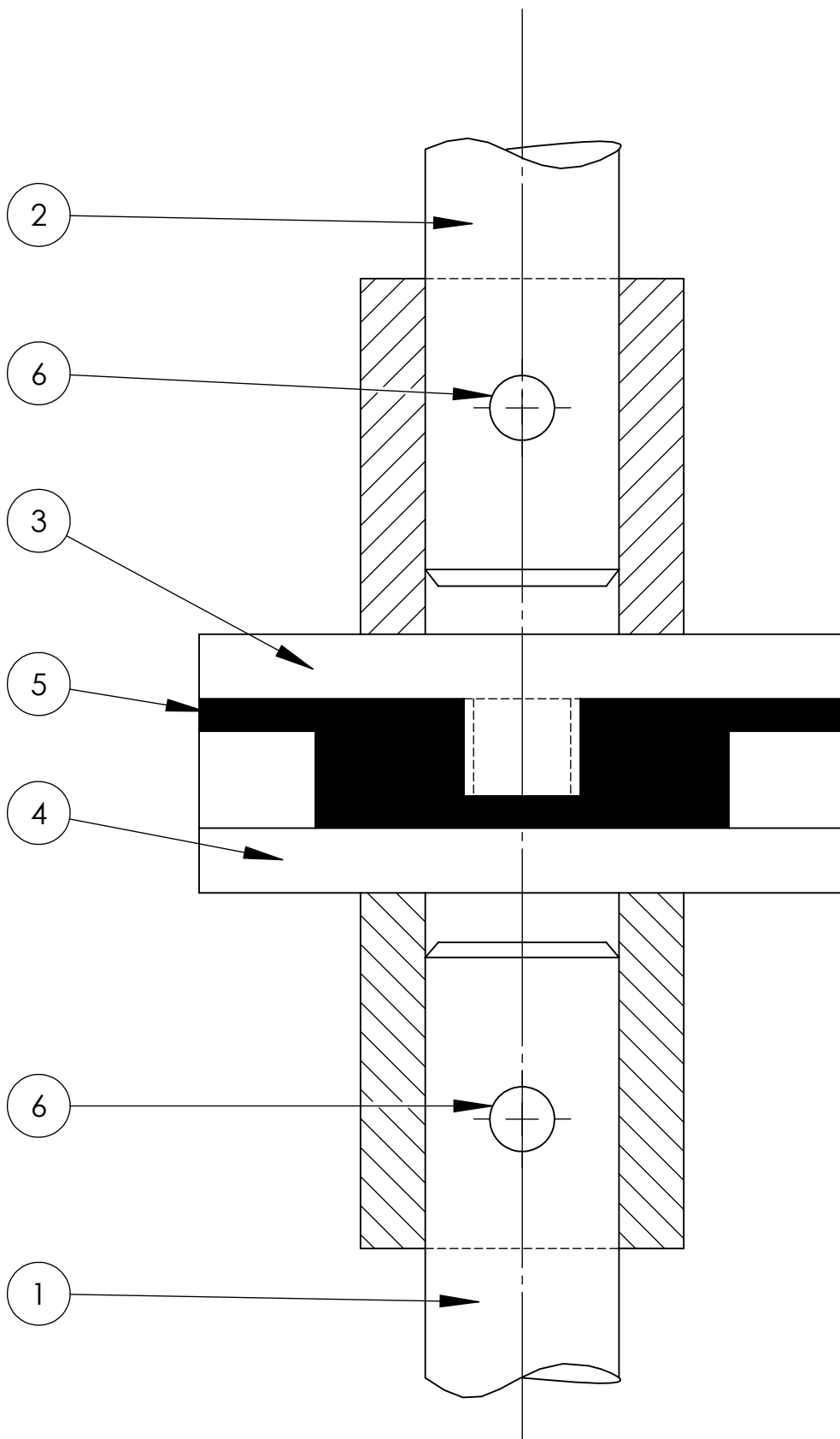
1. Arbre moteur.
2. Arbre de broche.
3. Manchon.
4. Manchon.
5. Joint élastomère.
6. Goupille.

##### ❖ Principe de fonctionnement :

Le mouvement de rotation qui arrive de l'arbre moteur (1) est transmis à la broche porte éprouvette (2) par l'intermédiaire des goupilles (6).

Les manchons (3) et (4) sont bloqués en translation par les deux goupilles (6).

L'élastomère (3) assure l'élasticité de l'accouplement, minimise les vibrations et corrige l'angle d'inclinaison entre les deux manchons et par conséquent l'arbre du moteur (1) et la broche porte éprouvette (2).



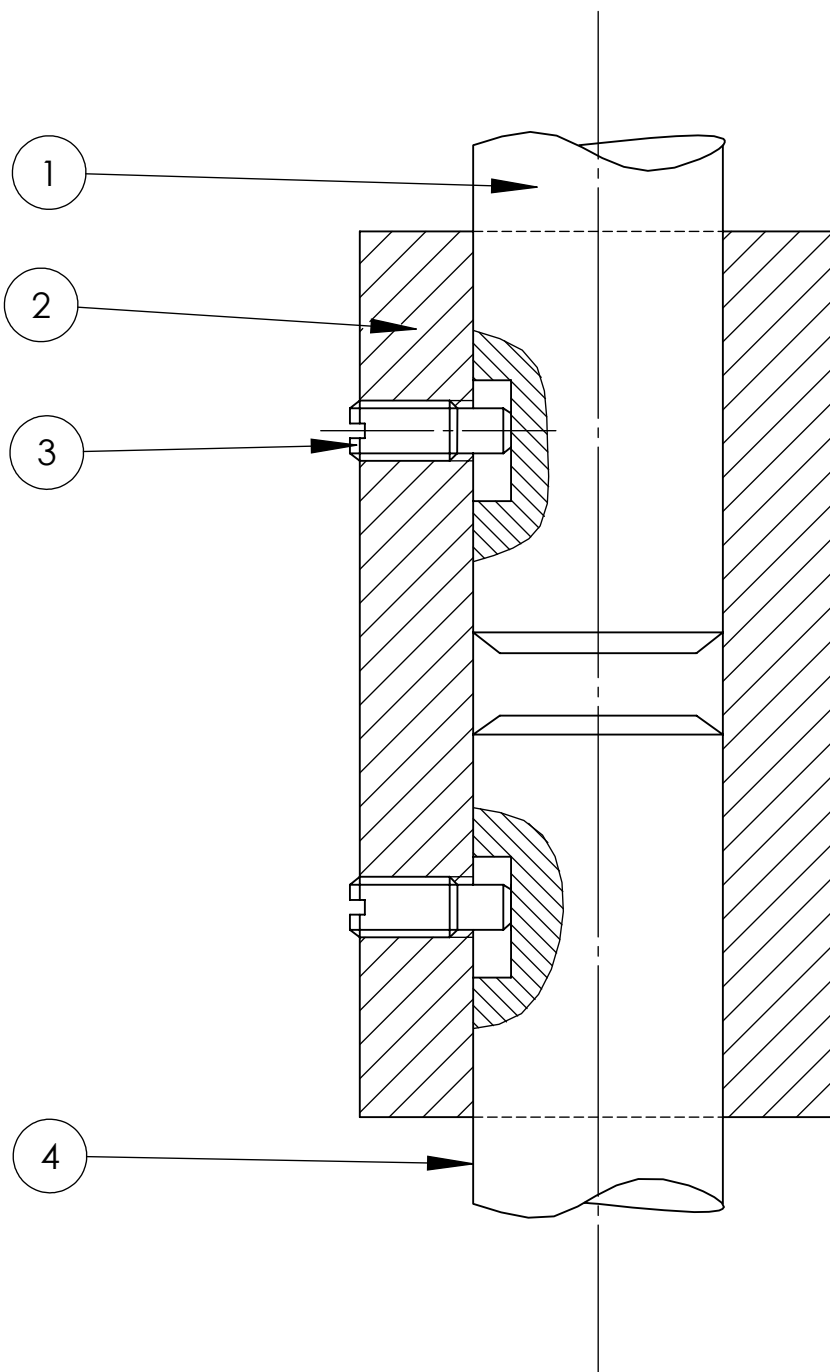
**Figure 4.12:** Fonction 2 : Groupe 2 : Solution N°2 :  
 Entraîner le système de guidage du disque par un  
 dispositif de liaison

**4.2.2.3. Solution N°3 (Figure 4.13)****❖ Nomenclature du dispositif :**

1. Arbre de broche.
2. Joint rigide.
3. Vis de pression.
4. Arbre moteur.

**❖ Principe de fonctionnement :**

Le mouvement de rotation est transmis de l'arbre moteur (4) à l'arbre de broche (1) grâce au joint rigide (2) et aux vis de pression (3).



**Figure 4.13:** Fonction 2 : Groupe 2 : Solution N°3 :  
Entraîner le système de guidage du disque par un  
dispositif de liaison

### 4.2.3. Groupe N°3 : Guider l'arbre de broche en rotation

- **F2.4** : Assurer le guidage en rotation de l'arbre de broche

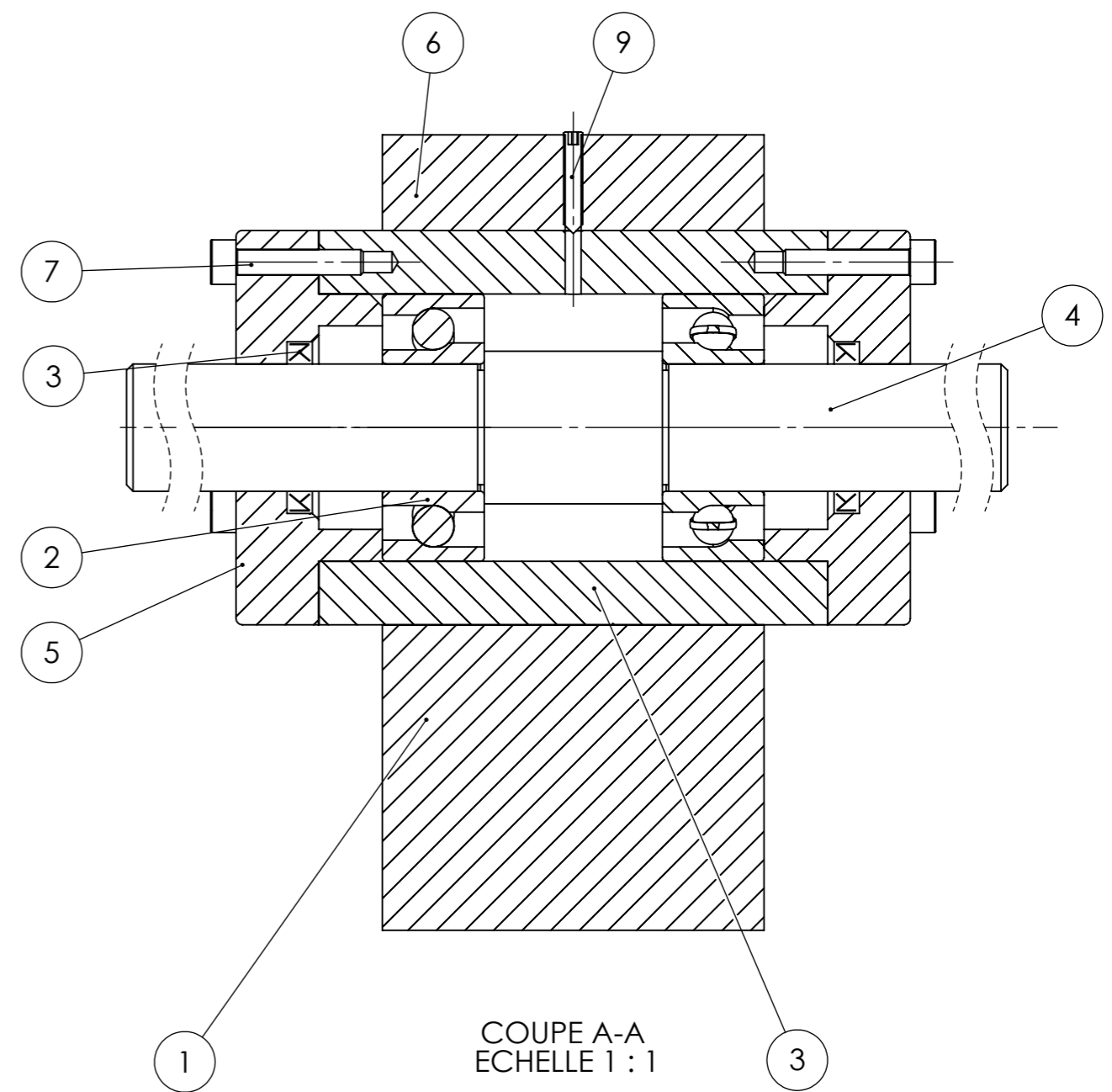
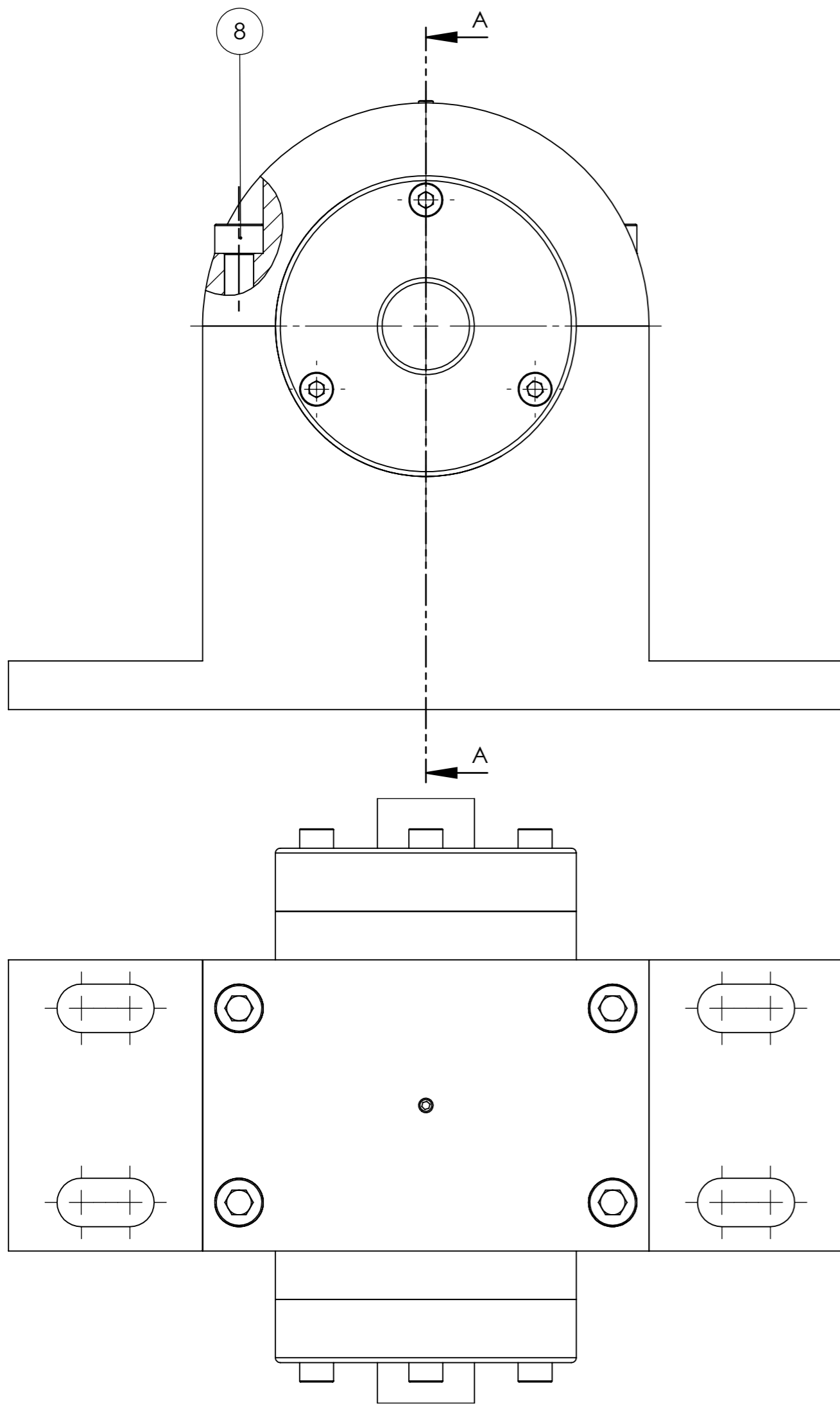
#### 4.2.3.1. Solution N°1 (Figure 4.14)

##### ❖ Nomenclature du dispositif :

1. Support de broche.
2. Roulement à billes à contact radial.
3. Joint torique.
4. Arbre de broche.
5. Couvercle.
6. Support de broche (partie supérieure).
7. Vis.
8. Vis.
9. Vis de graissage.

##### ❖ Principe de fonctionnement :

Le mouvement de rotation est transmis de l'arbre moteur vers l'arbre de broche (1). Ce dernier est guidé en rotation par des roulements à billes à contact radial (3).



Fonction 2 : Groupe 3 : Solution 1  
Assurer le guidage en rotation de l'arbre de broche

#### 4.2.4. Groupe N°4 : Fixation du disque sur la broche porte éprouvette

- **F2.5** : Assurer la fixation du disque.

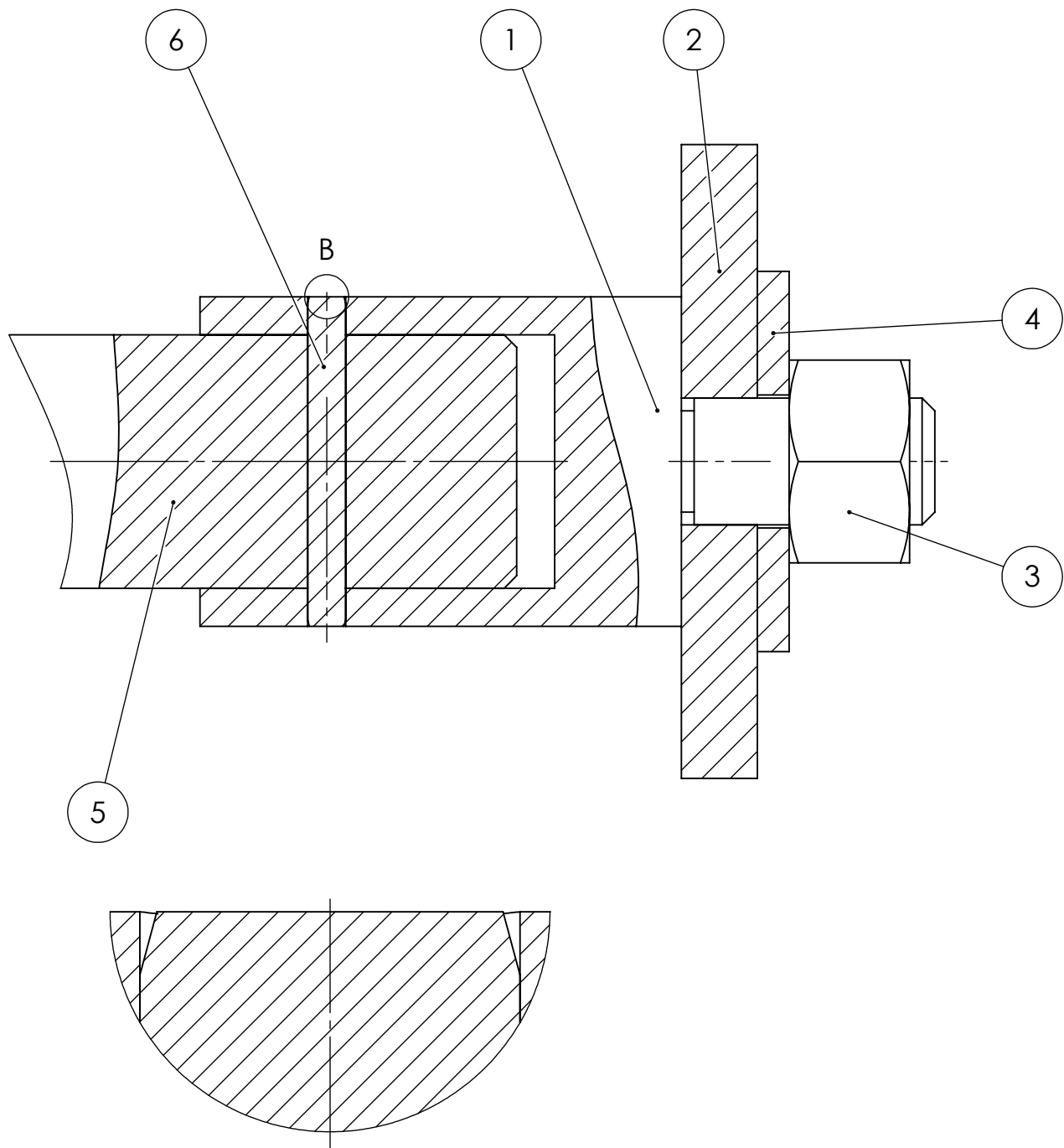
##### 4.2.4.1. Solution N°1 (Figure 4.15)

###### ❖ Nomenclature du dispositif :

1. Porte éprouvette.
2. Disque.
3. Ecrou.
4. Rondelle.
5. Arbre de broche.
6. Goupille.

###### ❖ Principe de fonctionnement :

Le disque (2) étant fixé sur le nez de broche (1) à l'aide de l'écrou (3), l'arbre de broche (5) transmet le mouvement de rotation par l'intermédiaire de la goupille (6).



DÉTAIL B  
ECHELLE 20 : 1

**Figure 4.15:** Fonction 2: Groupe 4: Solution 1:  
Assurer la fixation du disque

#### 4.2.4.2. Solution N°2 (Figure 4.16)

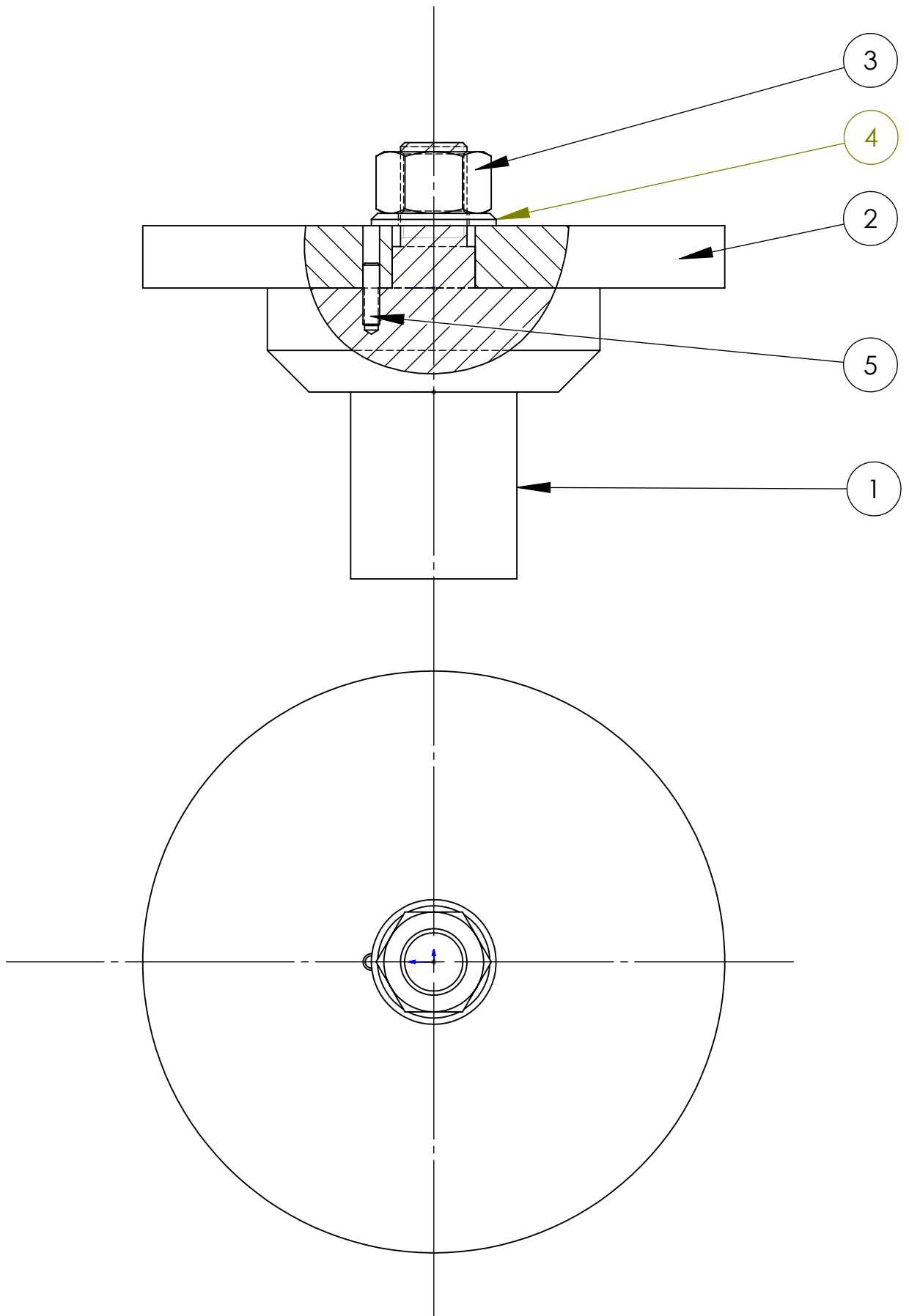
##### ❖ Nomenclature du dispositif :

1. Arbre de broche.
2. Disque.
3. Ecrou.
4. Rondelle élastique.
5. Ergot.

##### ❖ Principe de fonctionnement :

Le disque (1) est monté sur la broche porte éprouvette (2). Il est centré sur le bout de la broche et fixé à cette dernière à l'aide de la vis (5).

L'ergot (4) qui est monté avec serrage sur la broche porte éprouvette (2) empêche l'éprouvette (1) de tourner durant l'essai sous l'action d'un couple résistant supérieur au couple de serrage.



**Figure 4.16:** Fonction 2: Groupe 4: Solution 2:  
Assurer la fixation du disque

#### 4.2.4.3. Solution N°3 (Figure 4.17)

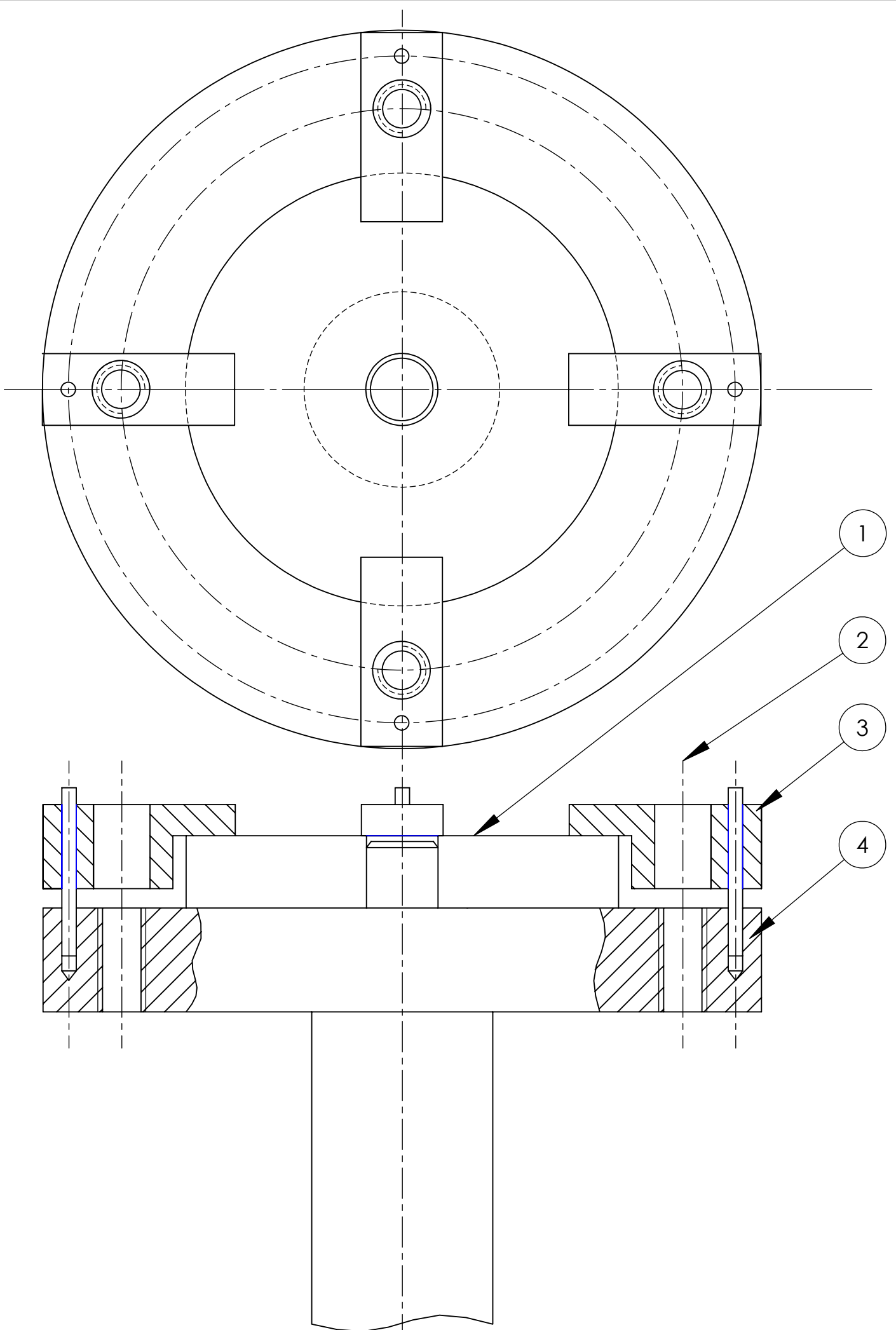
##### ❖ Nomenclature du dispositif :

1. Disque.
2. Vis.
3. Bride.
4. Arbre de broche.
5. Doigt de guidage.

##### ❖ Principe de fonctionnement :

Le disque (1) est centré sur la broche porte éprouvette (4) et maintenu en position par les brides (3), qui le plaquent sur la broche (4).

Les brides (3) sont guidées par les doigts de guidage (5).



**Figure 4.17:** Fonction 2: Groupe 4: Solution 3:  
Assurer la fixation du disque

### 4.3. Fonction 3 : Appliquer la charge et la maintenir constante

Cette fonction principale est réalisée avec deux groupes de fonctions techniques :

#### 4.3.1. Groupe N°1 : Fixation du pion (Figure 4.18)

- **F3.1** : Fixer le pion.

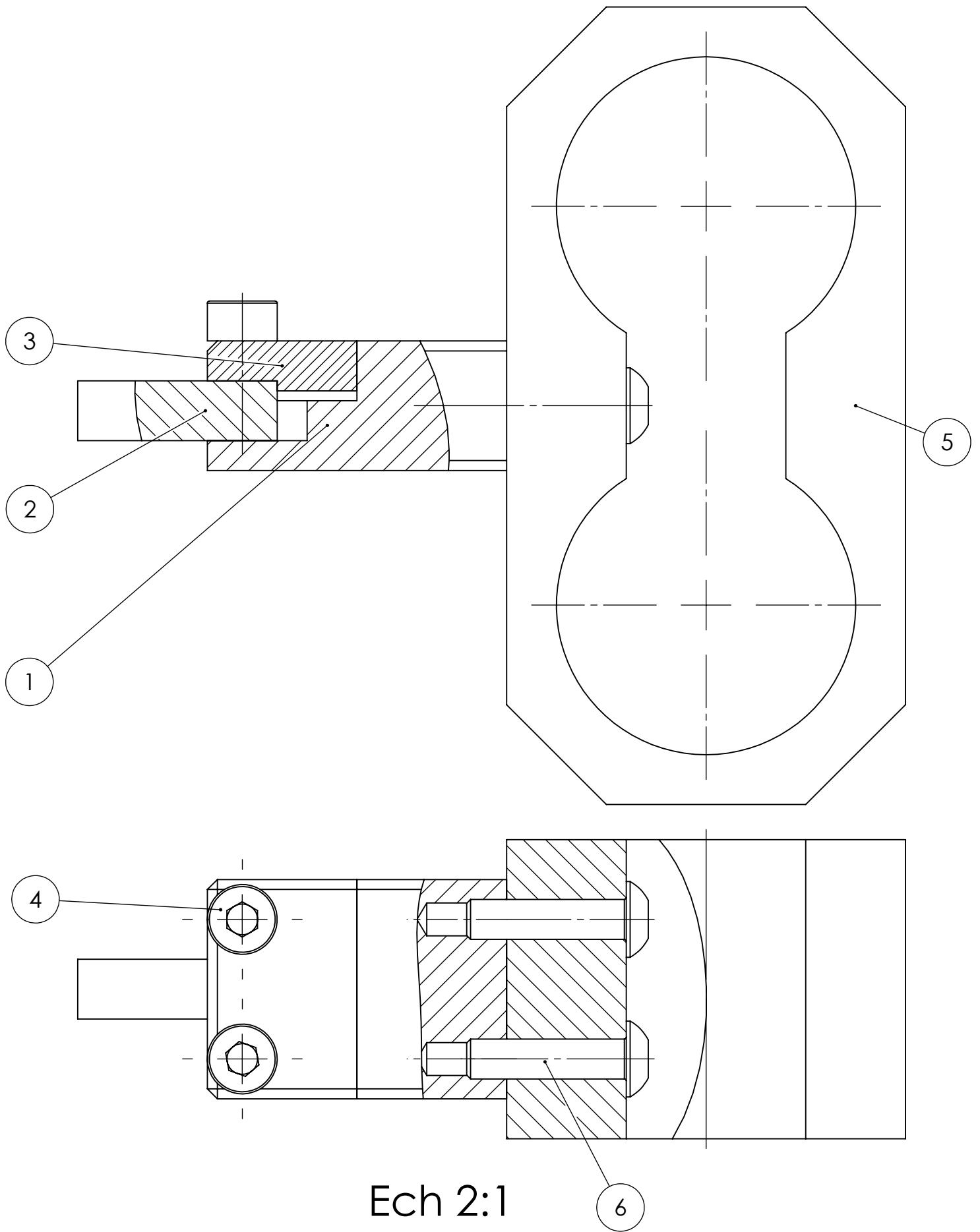
##### 4.3.1.1. Solution N°1 :

###### ❖ Nomenclature du dispositif :

1. Support porte-pion.
2. Pion.
3. Bride.
4. Vis CHC.
5. Vis.
6. Capteur.

###### ❖ Principe de fonctionnement :

La bride (3) serre le pion (2) sur le support porte-pion (1) à l'aide de vis CHC (4), le support (1) est lui-même monté sur le capteur (6) avec des vis (5).



**Figure 4.18:** Fonction 3: Groupe 1: Solution 1:  
Fixer le pion

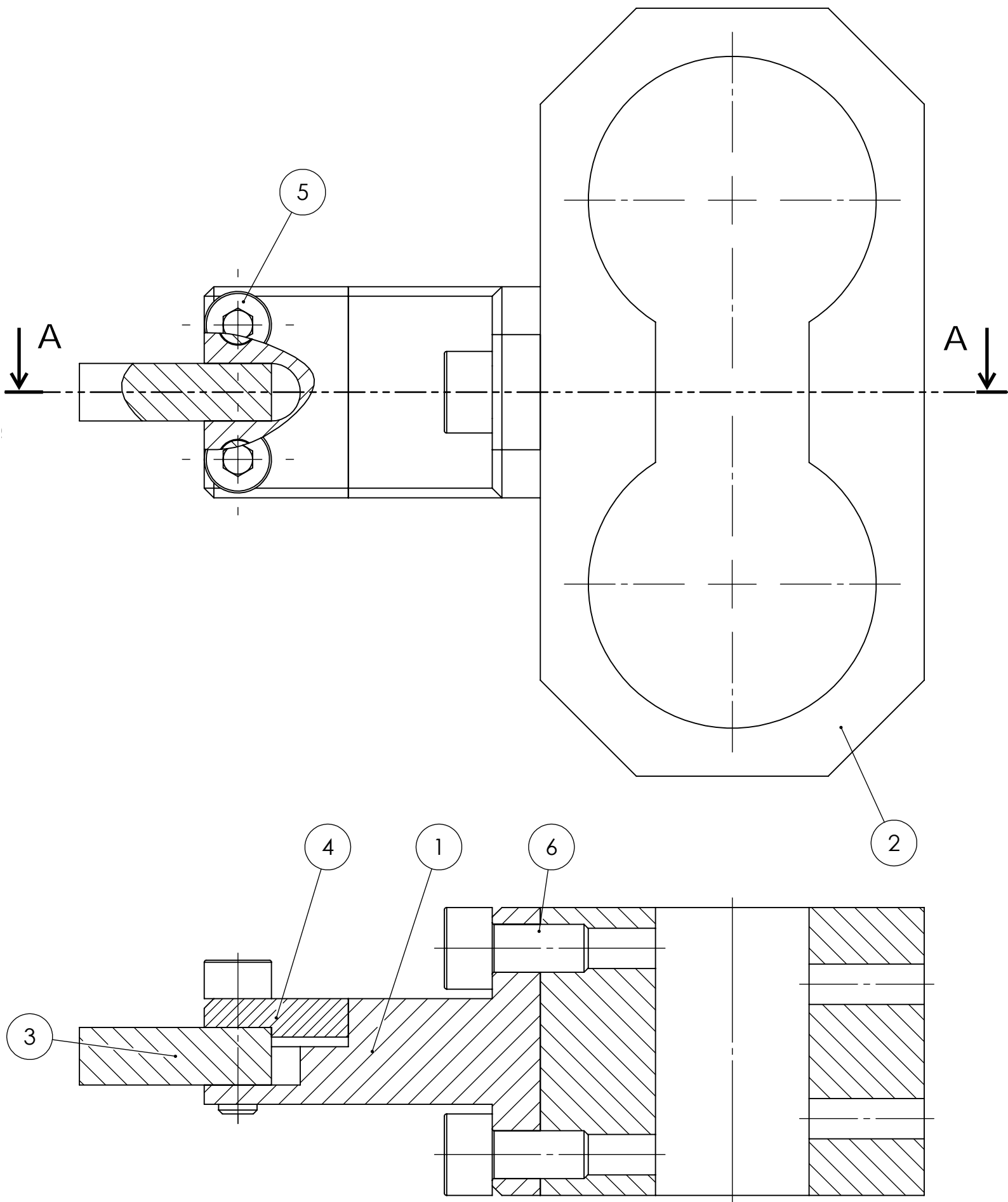
#### 4.3.1.2. Solution N°2 (Figure 4.19)

❖ **Nomenclature du dispositif :**

1. Support porte-pion.
2. Capteur.
3. Pion.
4. Bride.
5. Vis.
6. Vis.

❖ **Principe de fonctionnement :**

La bride (4) serre le pion (3) sur le support porte-pion (1) à l'aide de vis (5), le support (1) est lui-même monté sur le capteur (2) avec des vis (6).



**Figure 4.19:** Fonction 3: Groupe 1: Solution 2:  
Fixer le pion

### 4.3.2. Groupe N°2 : Application de la charge :

- **F3.2** : Guidage du coulisseau porte-capteur.
- **F3.3** : Appliquer la charge.

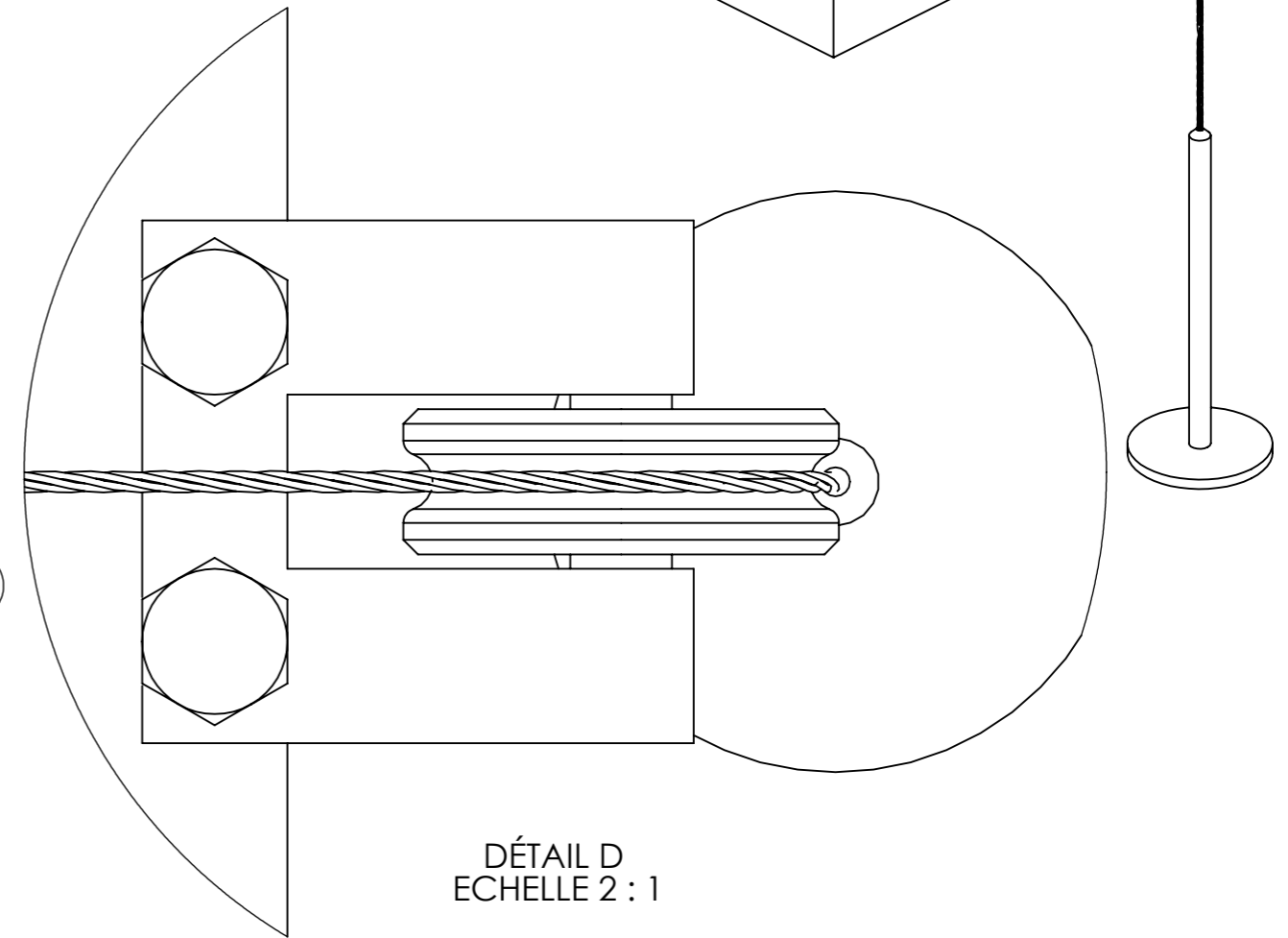
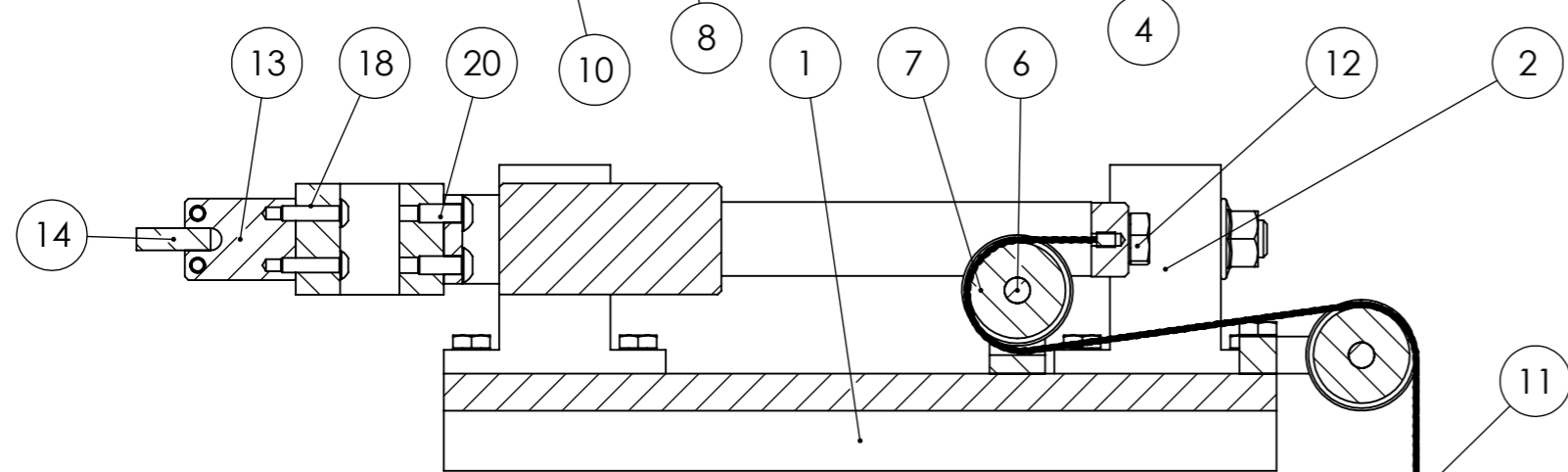
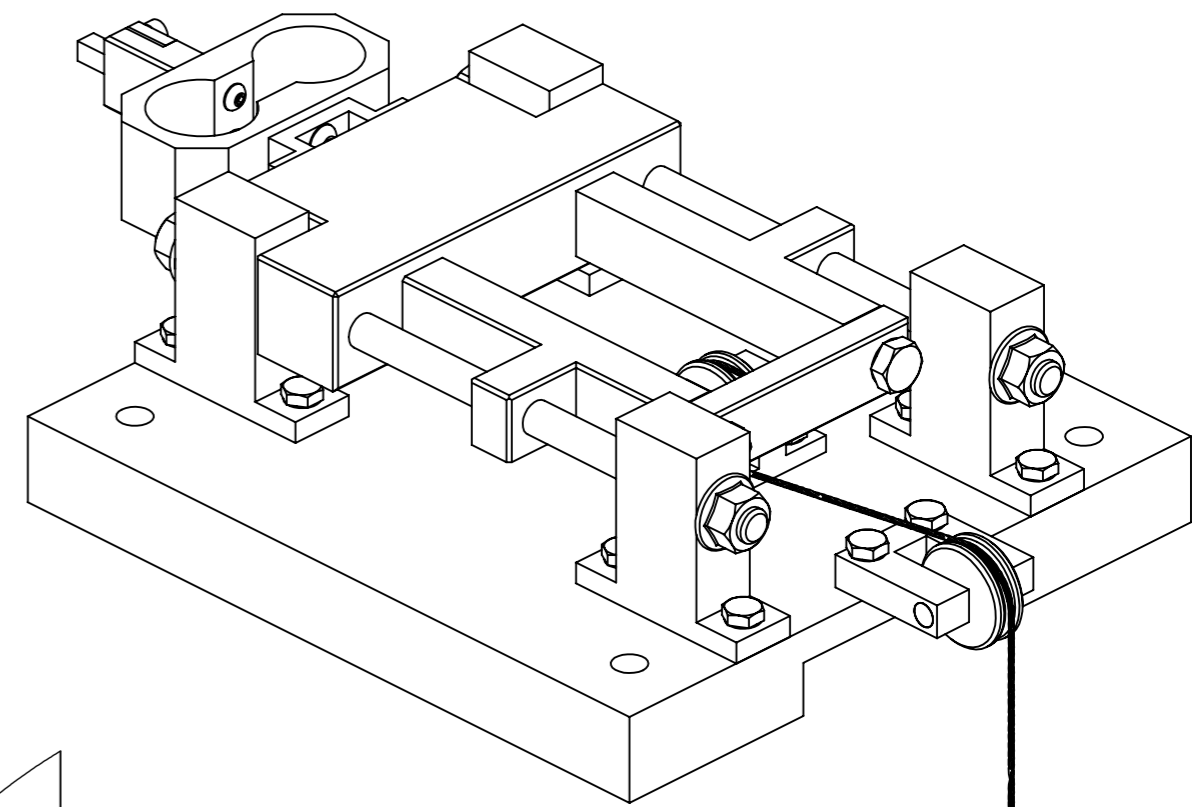
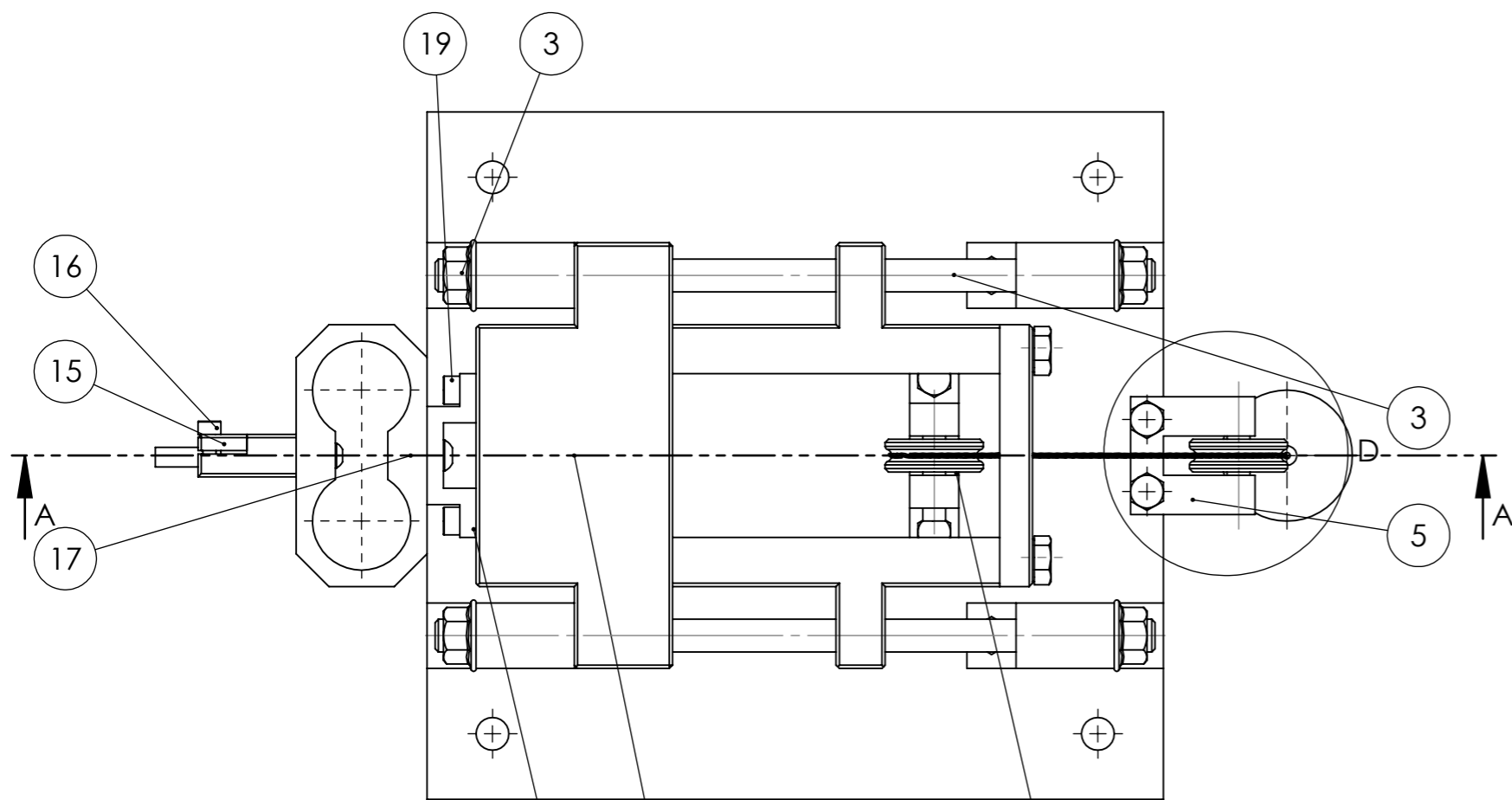
#### 4.3.2.1. Solution N°1 (Figure 4.20)

##### ❖ Nomenclature du dispositif :

1. Bâti.
2. Support de tige.
3. Ecrou
4. Support de poulie.
5. Support de poulie.
6. Axe de poulie.
7. Poulie.
8. Coulisseau.
9. Tige glissière.
10. Porte-capteur.
11. Câble.
12. Vis.
13. Bloc.
14. Pion.
15. Bride.
16. Vis de serrage du pion.
17. Capteur.
18. Vis.
19. Vis.
20. Vis.
21. Palette de chargement.
22. Axe de poulie.

##### ❖ Principe de fonctionnement :

Le coulisseau (8), auquel sont fixés le capteur et le porte-pion, est monté sur les tiges glissières (9), après chargement, le câble (11), orienté par les poulies (7), procure à celui-ci un mouvement de translation.



COUPE A-A  
ECHELLE 1 : 2

DÉTAIL D  
ECHELLE 2 : 1

**Figure 4.20:** Fonction 3: Groupe 2: Solution 1:  
Appliquer la charge et la maintenir constante

#### 4.3.2.2. Solution N°2 (Figure 4.21)

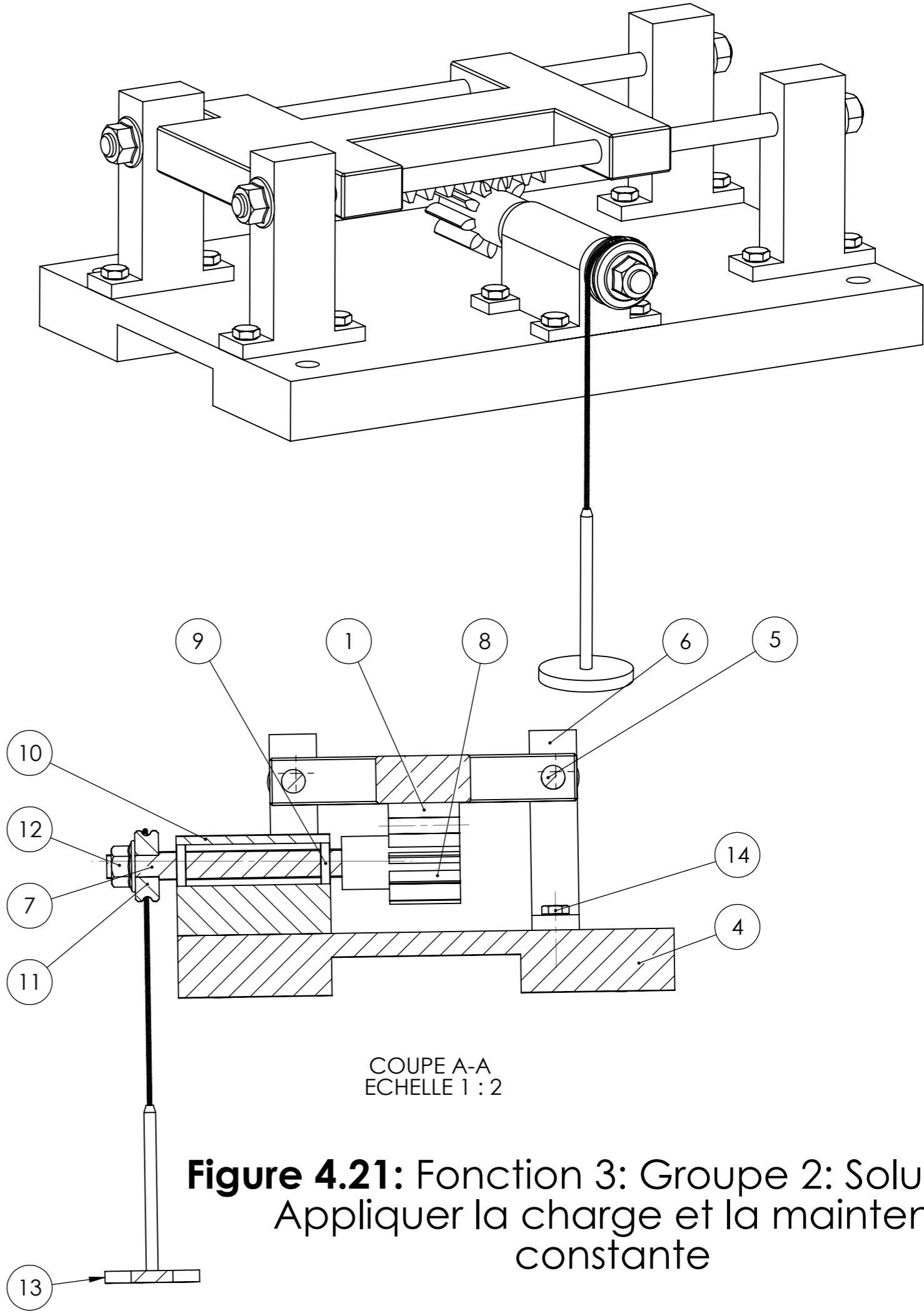
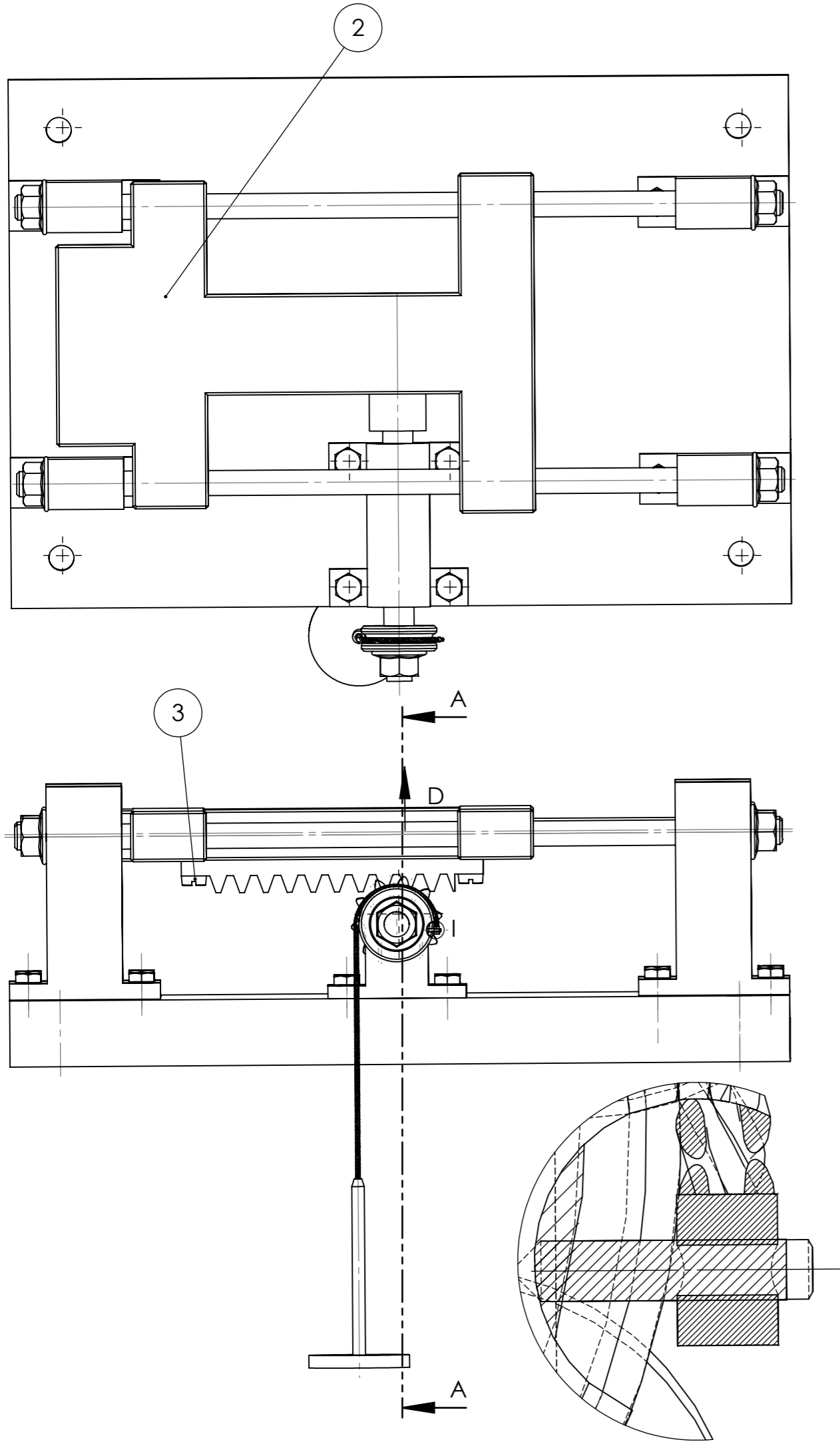
##### ❖ Nomenclature du dispositif :

1. Crémaillère.
2. Coulisseau.
3. Vis.
4. Bâti.
5. Tige glissière.
6. Support de tige.
7. Arbre.
8. Pignon.
9. Roulement.
10. Palier.
11. Poulie.
12. Ecrou.
13. Palette de chargement.
14. Vis.

##### ❖ Principe de fonctionnement :

Après chargement, Le câble enroulé sur la poulie (11) lui procure un mouvement de rotation. Celle-ci le transmet au pignon (8) qui, par l'intermédiaire de son engrainement avec la crémaillère (1), génère un mouvement de translation au coulisseau (2) guidé sur les tiges (5).

Le bloc capteur/porte-capteur est fixé sur le coulisseau ce qui assure l'application de l'effort sur le disque.



**Figure 4.21:** Fonction 3: Groupe 2: Solution 2:  
 Appliquer la charge et la maintenir constante

#### 4.4. Fonction 4 : Appliquer et maintenir la température voulue

Cette fonction principale est réalisée avec trois groupes de fonctions techniques :

##### 4.4.1. Groupe N°1 : Isoler l'enceinte thermique

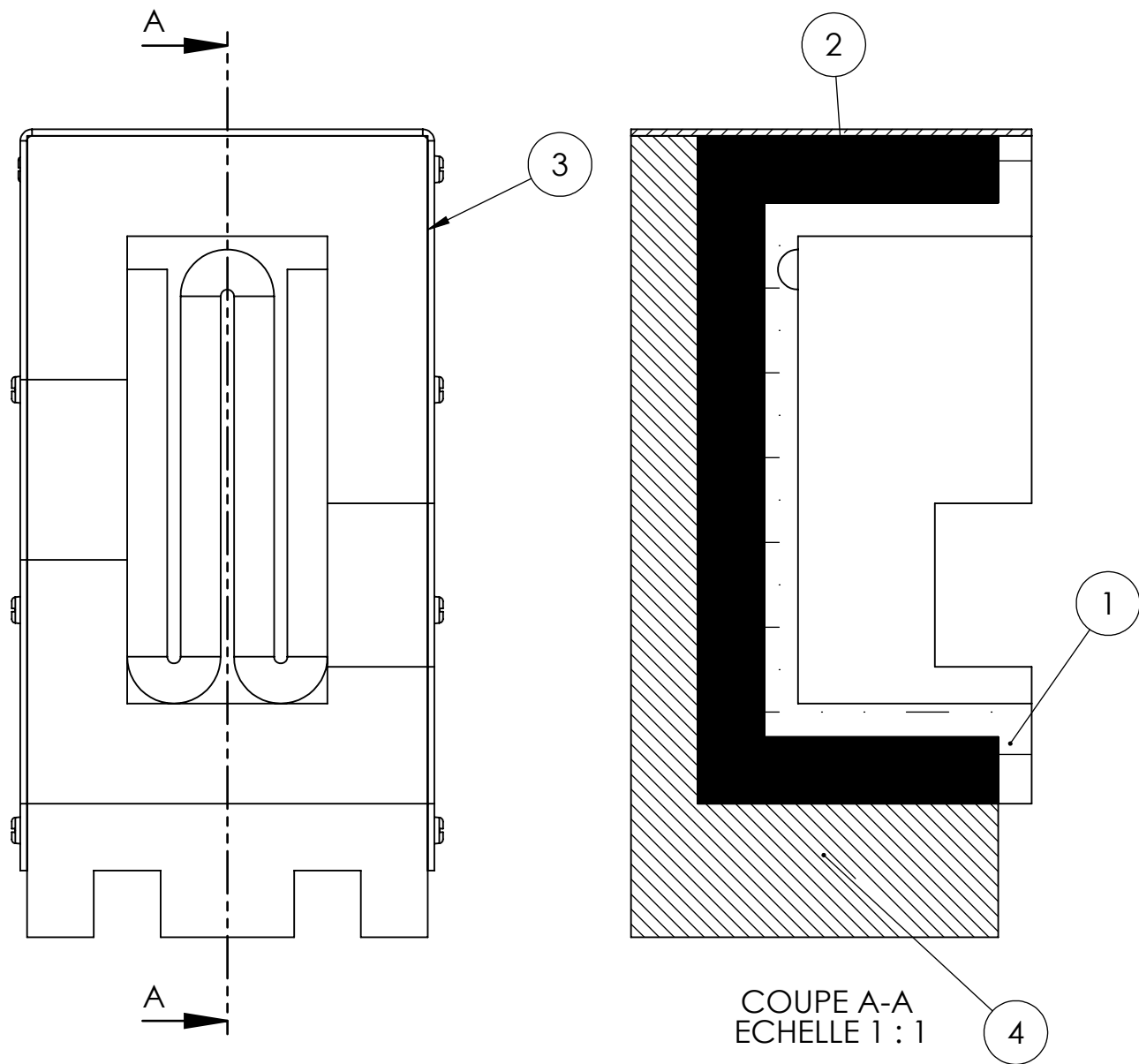
###### 4.4.1.1. Solution N°1 (Figure 4.22)

❖ **Nomenclature du dispositif :**

1. Brique réfractaire.
2. Laine de verre.
3. Tôle.
4. Support.

❖ **Principe de fonctionnement :**

La brique réfractaire (1) empêche le transfert de chaleur par rayonnement, le peu de chaleur qui passe par conduction est absorbé par la laine de verre.



**Figure 4.22:** Fonction 4: Groupe 1: Solution 1: Isoler l'enceinte thermique

#### 4.4.2. Groupe N°2 : Ouvrir et fermer l'enceinte thermique

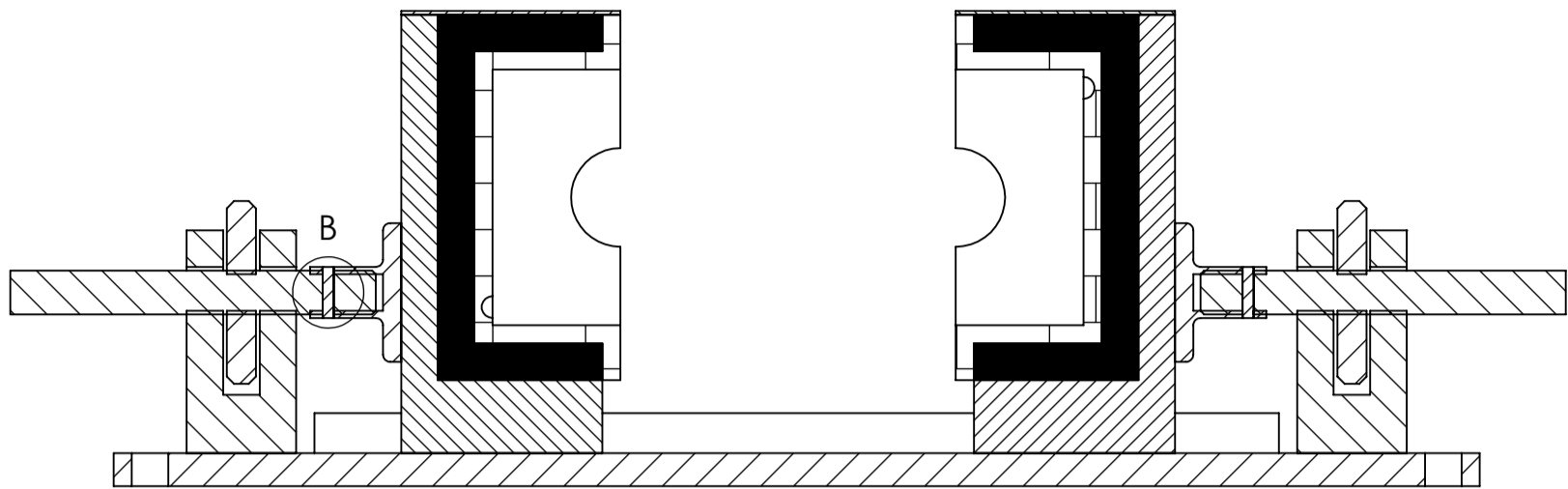
##### 4.4.2.1. Solution N°1 (Figure 4.23)

❖ **Nomenclature du dispositif :**

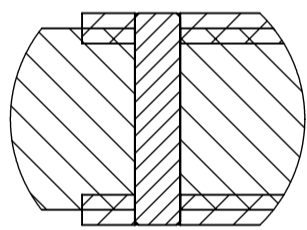
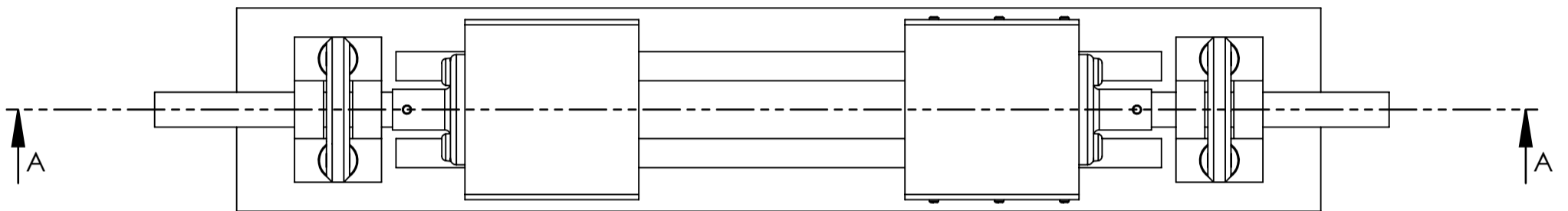
1. Enceinte thermique.
2. Support de tige
3. Erou.
4. Bâti.
5. Vis de serrage.
6. Tige glissière.

❖ **Principe de fonctionnement :**

L'enceinte thermique (1) est guidée en translation sur les tiges (6) manuellement. Après positionnement, on effectue le serrage avec les vis (5).



COUPE A-A  
EHELLE 1 : 2



DÉTAIL B  
EHELLE 2 : 1

**Figure 4.23:** Fonction 4: Groupe 2: Solution 1:  
Ouvrir et fermer l'enceinte thermique

#### 4.4.2.2. Solution N°2 (Figure 4.24)

##### ❖ Nomenclature du dispositif :

1. Support.
2. Goupille.
3. Support de l'enceinte.
4. Glissière.
5. Vis.
6. Appui.
7. Ecrou.
8. Tige filetée.

##### ❖ Principe de fonctionnement :

Les supports (3) sont guidés en translation sur les glissières (4) grâce aux tiges filetées (8) et aux écrous (7). Le serrage des tiges filetées au contact assure l'étanchéité de l'enceinte.

La longueur des tiges sera déterminée de façon à pouvoir ajuster la coaxialité de l'arbre avec le centre de l'enceinte.

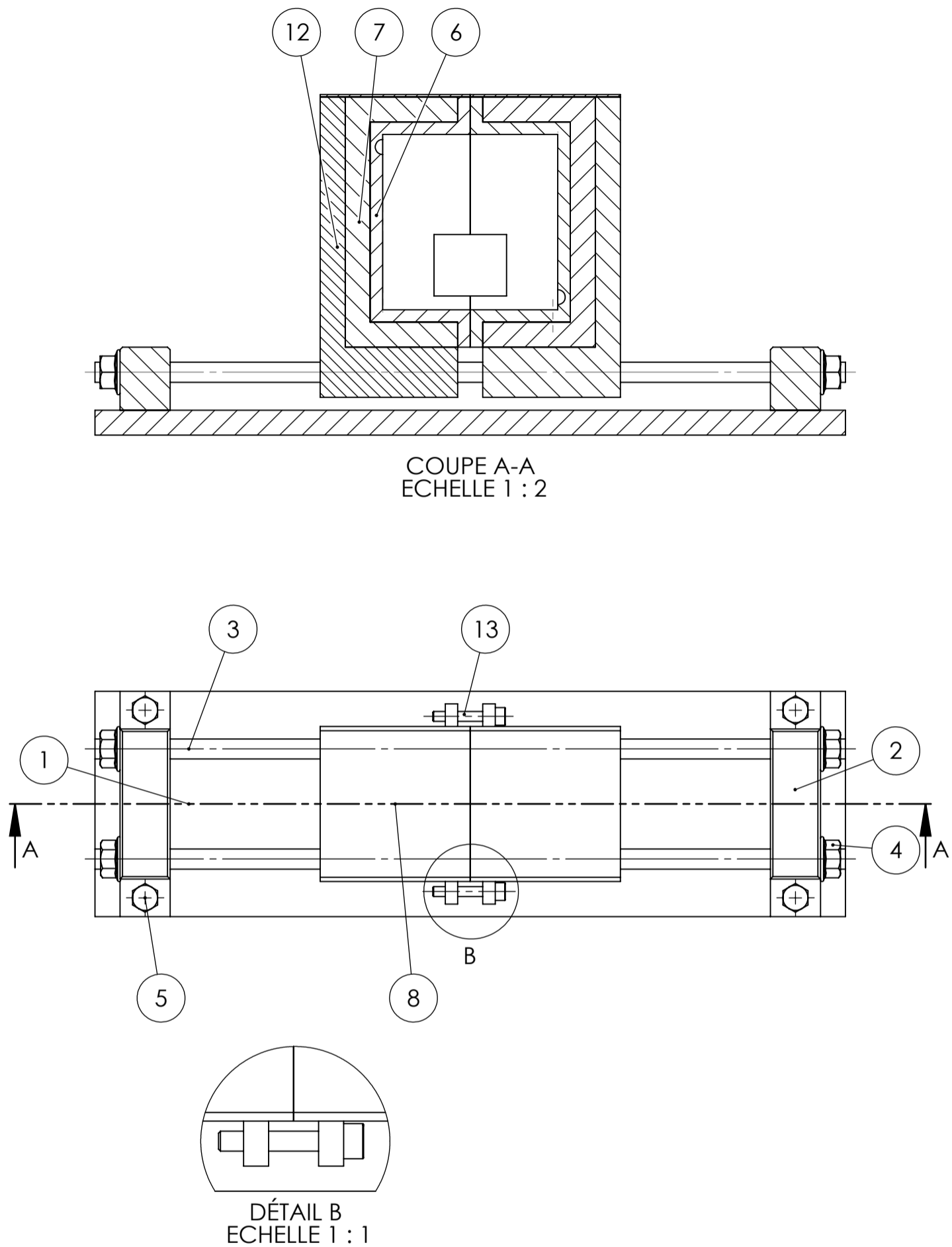


Figure 4.24: Fonction 4: Groupe 2: Solution 2:  
Ouvrir et fermer l'enceinte thermique

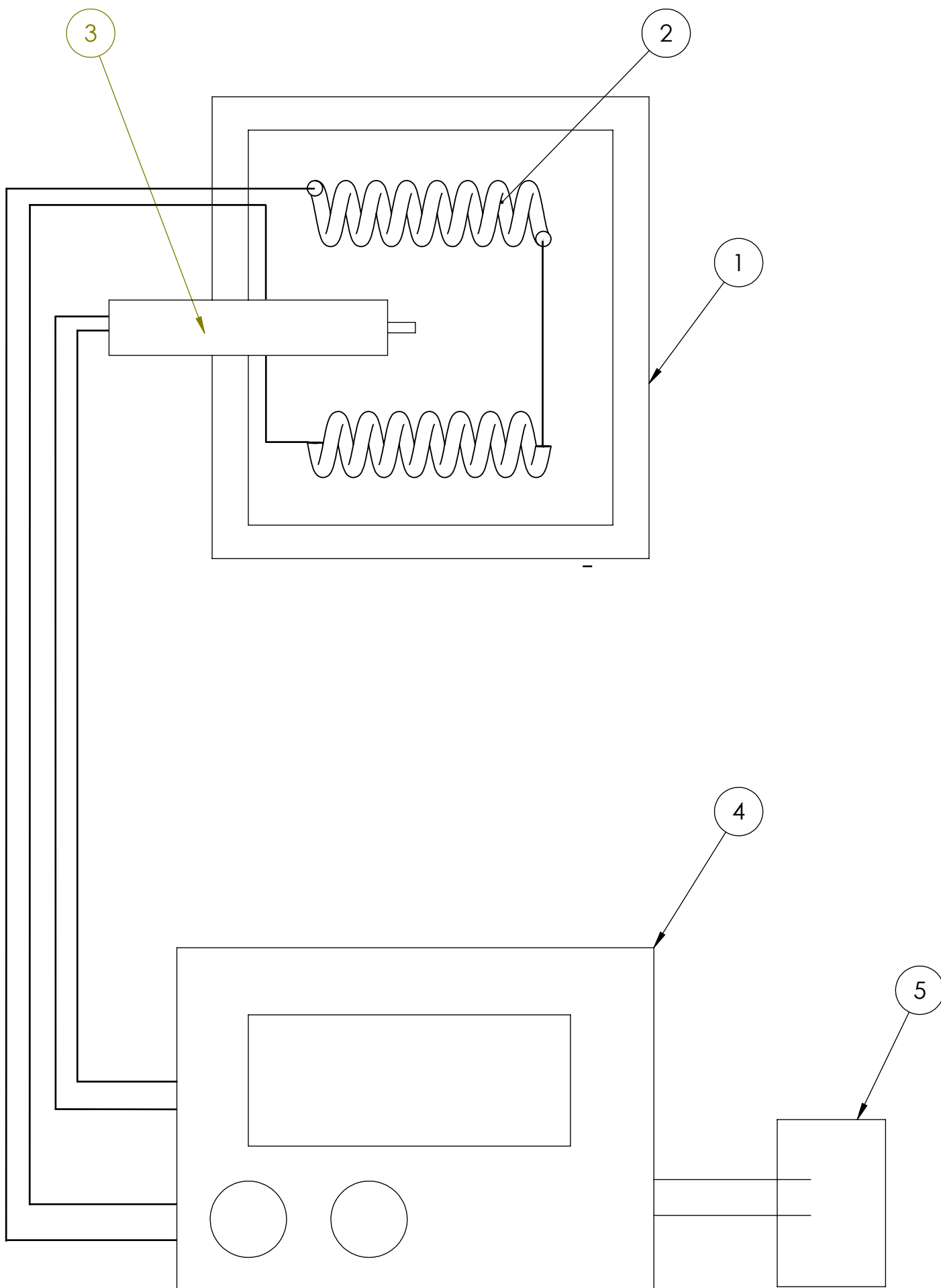
#### 4.4.3. Groupe N°3 : Chauffer l'enceinte et réguler la température

- **F4.3** : Chauffer l'enceinte thermique.
- **F4.4** : Réguler la température.

##### 4.4.3.1. Solution N°1 (Figure 4.25)

###### ❖ Nomenclature du dispositif :

1. Enceinte thermique.
2. Élément résistant.
3. Thermocouple.
4. Régulateur de température.



**Figure 4.25:** Fonction 4: Groupe 3: Solution 1: Chauffer l'enceinte et réguler la température

#### 4.5. Fonction 5 : Mesurer et acquérir les données (Figure 4.26)

- **F5.1** : Mesurer les efforts  $F_N$  et  $F_T$ .
- **F5.2** : Mesurer la température.
- **F5.3** : Acquérir et traiter les données.

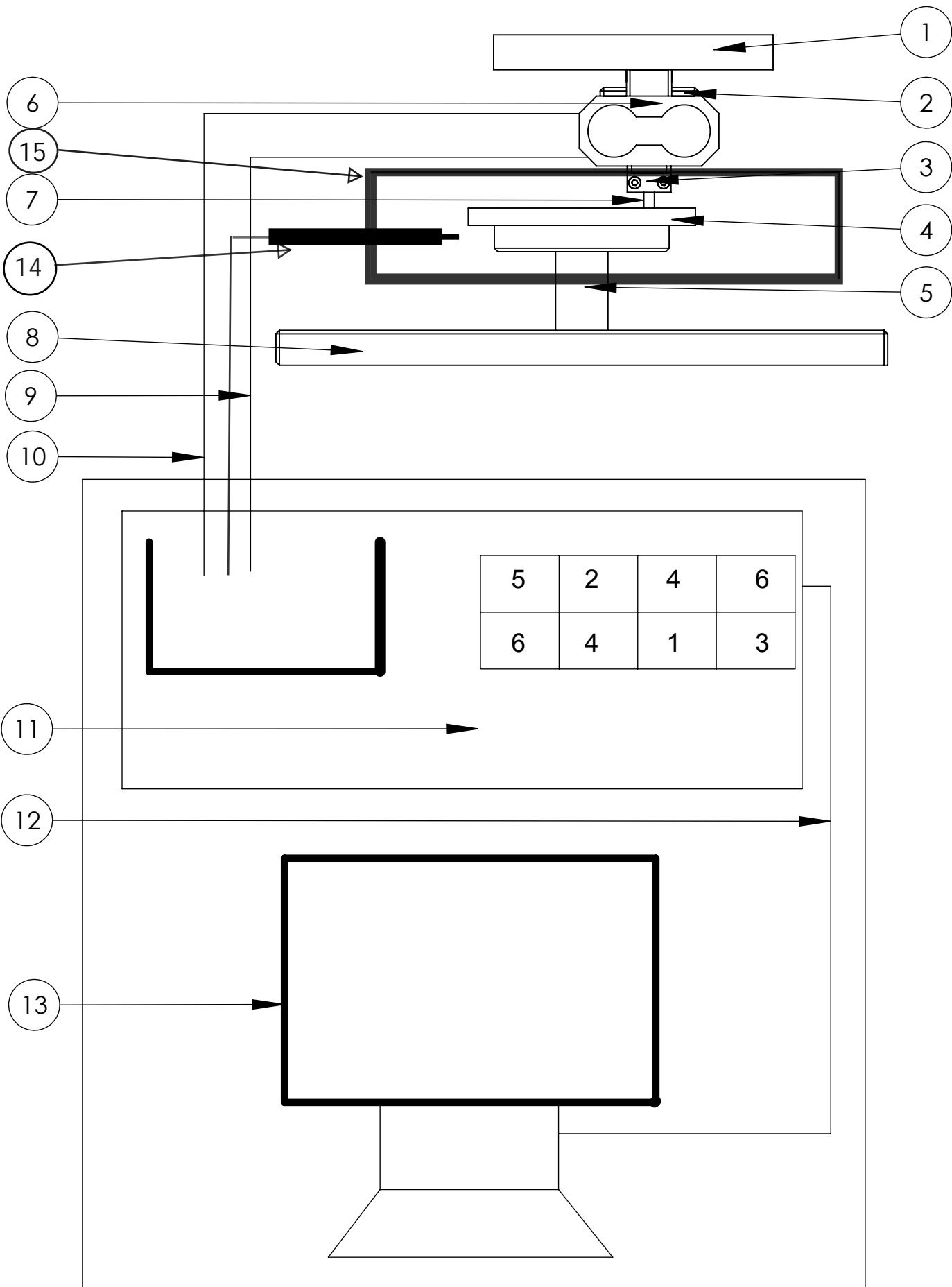
##### ❖ **Nomenclature du dispositif :**

1. Dispositif de chargement
2. Porte capteur
3. Porte pion
4. disque
5. Arbre de broche.
6. L'élément capteur
7. pion
8. Palier de roulements.
9. Fil des jauges (mesure T)
10. Fil des jauges (mesure N)
11. Chaîne d'acquisition
12. Câble
13. Micro-ordinateur.
14. Thermocouple.
15. Enceinte thermique.

##### ❖ **Principe de fonctionnement :**

Avec l'application de la charge au contact des deux éprouvettes (pion (7)/disque (4)), l'élément capteur (6) subit une déformation élastique, sous l'effet des efforts normal et tangentiel, cette déformation sera captée par les jauges extensométriques, collées judicieusement à des endroits bien précis sur l'élément capteur (6), sous forme d'un signal électrique enregistré par la chaîne d'acquisition (11). Les données ainsi recueillies seront transférées au micro-ordinateur (13) pour y être traitées.

La mesure de la température, quant à elle, se fait avec le thermocouple (14) qui sera introduit dans l'enceinte thermique (15). L'une de ses sorties sera branchée au régulateur de température, et l'autre vers la chaîne d'acquisition (11) qui transformera l'information pour l'afficher sur le micro-ordinateur (13).



**Figure 4.26:** Fonction 5:  
Mesurer et acquérir les données

## 5. Etude et évaluation des solutions

Les nombreuses idées qui sont apparues lors de la phase précédente vont amener à choisir une ou plusieurs solutions qui feront ensuite l'objet d'un choix définitif.

Cette étape consiste donc à l'étude de la faisabilité, conformité ou non des solutions par rapport aux critères exigés par le cahier des charges fonctionnelles.

Nous allons présenter ceci par une méthode très simple qui consiste à déterminer pour chaque solution proposée ses avantages et ses inconvénients.

### 5.1. Fonction 1 :

#### 5.1.1. Solution N°1 :

##### ❖ Inconvénients :

- Poids important.
- Risque d'instabilité de la table.
- Consommation importante de matière.

##### ❖ Avantages :

- Facile à réaliser.
- Facile à monter.
- Réglage de mise à niveau de banc facile.
- Espace de travail important

### 5.2. Fonction 2 :

#### 5.2.1. Groupe 1 : Générer le mouvement et choisir la vitesse de rotation

Pour cette fonction, il nous a été imposé d'utiliser un moteur électrique avec un variateur électronique de vitesse.

**Type du moteur :** Moteur triphasé asynchrone à cage d'écureuil.

- « ADK 71-4 » 220V/380V, 1.35A/0.87A.
- Puissance : 0,22 kW.
- $\cos(\varphi)$  : 0,7.
- $N= 1400$  tr/min.
- Fréquence :  $f= 50$ Hz.

**Type de variateur :** Variateur électronique.

- Puissance : 7,5 kW / 10 HP.
- 380/500 V.

## 5.2.2. Groupe 2 : Entraîner le système de guidage du disque par un dispositif de liaison

### 5.2.2.1. Solution N°1 :

#### ❖ Inconvénients :

- Difficulté dans la réalisation
- La clavette de l'arbre moteur est remplacée par une vis de pression
- Consommation de la matière
- Nombre important de pièces
- Difficulté d'aligner les deux arbres

#### ❖ Avantages :

- Amortissement des vibrations
- Transmission avec élasticité
- Facilité d'alignement des deux arbres
- Meilleure transmission du couple moteur

### 5.2.2.2. Solution N°2 :

#### ❖ Inconvénients :

- Difficulté dans la réalisation
- Consommation de la matière
- Nécessite l'usinage de l'arbre moteur

#### ❖ Avantages :

- Amortissement des vibrations
- Transmission avec élasticité
- Facilité dans le montage
- Correction de l'alignement des deux arbres
- Meilleure transmission du couple moteur
- Elle a donné satisfaction durant le fonctionnement du premier tribomètre réalisé.

### 5.2.2.3. Solution N°3 :

#### ❖ Inconvénients :

- Pas d'absorption des vibrations.
- Pas de compensation en coaxialité.

#### ❖ Avantages :

- Assure une bonne coaxialité.
- Facilité d'usinage.
- Facilité de montage.
- Consommation modérée de la matière.

### 5.2.2.4. Décision :

Conformément aux avantages et inconvénients de chaque solution et au cahier des charges du besoin, nous optons pour la solution N°2.

## 5.2.3. Groupe 3 : Assurer le guidage en rotation de l'arbre de broche

Le choix de guidage de l'arbre de broche avec des roulements est unique pour les raisons suivantes :

- Présence d'efforts axial et radial
- Grandes vitesses de rotation
- Guidage sans trop de frottement

#### 5.2.4. Groupe N°4 : Assurer la fixation du disque

##### 5.2.4.1. Solution N°1 :

###### ❖ Inconvénients :

- Utilisation supplémentaire de la matière.
- Volume encombrant.

###### ❖ Avantages :

- Facilement démontable en cas d'usure.
- Facile à usiner.
- Facilité de montage.
- La forme de l'éprouvette est simple.

##### 5.2.4.2. Solution N°2 :

###### ❖ Inconvénients :

- Obligation de changer l'arbre de broche après usure du filetage.
- L'ergot risque de se cisailer sous l'action d'un couple résistant important.
- Difficile à réaliser.

###### ❖ Avantages :

- La forme de l'éprouvette est simple.
- Simple à monter.
- Offre une section de travail importante.
- Possibilité de travail sur les deux surfaces de l'éprouvette.
- Faible consommation de la matière pour l'usinage de l'éprouvette.

##### 5.2.4.3. Solution N°3 :

###### ❖ Inconvénients :

- Difficile à réaliser.
- Consommation de la matière pour l'usinage de la broche porte éprouvette.
- Nombre important de pièces.
- Section de travail réduite.

###### ❖ Avantages :

- Possibilité de travail sur les deux surfaces de l'éprouvette.
- La forme de l'éprouvette est simple.

##### 5.2.4.4. Décision :

Conformément aux avantages et inconvénients de chaque solution et au cahier des charges du besoin, nous optons pour la solution N°1.

### 5.3. Fonction 3 : Appliquer la charge et la maintenir constante

#### 5.3.1. Groupe 1 : Fixer le pion

##### 5.3.1.1. Solution N°1 :

###### ❖ Inconvénients :

- Difficulté de montage.
- Difficulté de fixation du pion.

###### ❖ Avantages :

- Facilité de réalisation.
- Consommation de matière réduite.

##### 5.3.1.2. Solution N°2 :

###### ❖ Inconvénients :

- Consommation de matière

###### ❖ Avantages :

- Facilité de réalisation.
- Facilité de montage.
- Aisance dans la fixation du pion.

##### 5.3.1.3. Décision :

Conformément aux avantages et inconvénients de chaque solution et au cahier des charges fonctionnelles, nous optons pour la solution N°2.

#### 5.3.2. Groupe 2 : Application de la charge

##### 5.3.2.1. Solution N°1 :

###### ❖ Inconvénients :

- Encombrant.
- Important volume de matière.
- Poids important.
- Nécessite un bon état de surface de quelques pièces.

###### ❖ Avantages :

- L'axe d'application de la charge coïncide avec le centre de la section du contact.
- Frottement réduit.
- Simple à usiner.
- L'effort appliqué sur le disque est le poids de la charge.
- Facilité d'étalonnage du capteur.
- Montage facile.
- Permet de maintenir la valeur de la charge constante durant l'essai.
- Possibilité de réaliser la majorité des pièces avec les moyens du département de Génie Mécanique.

##### 5.3.2.2. Solution N°2 :

###### ❖ Inconvénients :

- Difficulté d'usinage.

- Recours à l'achat du système de transmission.
- Génération d'un moment au niveau de la dent de l'engrenage.
- Nécessite un bon état de surface de quelques pièces.
- Montage difficile.
- ❖ **Avantages :**
- Nombre de pièces réduit.
- Permet de maintenir la valeur de la charge constante durant l'essai.
- Facilité d'application de la charge.

#### 5.3.2.3. Décision :

Conformément aux avantages et inconvénients de chaque solution et au cahier des charges fonctionnelles, nous optons pour la solution N°1.

### 5.4. Fonction 4 : Appliquer et maintenir la température voulue

#### 5.4.1. Groupe N°1 : Isoler l'enceinte thermique

Le choix de l'isolation de l'enceinte thermique ne comporte qu'une seule solution pour les raisons suivantes :

- Matériaux disponibles au niveau du laboratoire du département.
- Facilité de réalisation.
- La température maximale exigée n'est pas importante.

#### 5.4.2. Groupe N°2 : Ouvrir et fermer l'enceinte thermique

##### 5.4.2.1. Solution N°1 :

###### ❖ Inconvénients :

- Risque de flexion des tiges.
- Risque de dissipation de la chaleur (problème d'étanchéité).
- Nécessite un bon état de surface des tiges.
- Espace de manipulation insuffisant.

###### ❖ Avantages :

- Simple à usiner.
- Simple à manipuler.
- Consommation modérée de la matière.

##### 5.4.2.2. Solution N°2 :

###### ❖ Inconvénients :

- Nombre de pièce important.
- Consommation de la matière.

###### ❖ Avantages :

- Etanchéité assurée.
- Enceinte démontable, ce qui procure un large espace de travail.
- Précision de positionnement.
- Stable et rigide.

### 5.4.2.3. Décision :

Conformément aux avantages et inconvénients de chaque solution et au cahier des charges fonctionnelles, nous optons pour la solution N°2.

### 5.4.3. Groupe N°3 : Chauffer l'enceinte et réguler la température

Le choix du chauffage et de la régulation de la température ne comporte qu'une seule solution pour les raisons suivantes :

- Simple à réaliser.
- Matériel disponible sur le marché.
- Prix du matériel abordable.

**Type de variateur :** acim jouanin 48CSP2C.

### 5.5. Fonction 5 : Mesurer et acquérir les données

Le choix de la mesure et acquisition des données ne comporte qu'une seule solution pour les raisons suivantes :

- Il permet de mesurer simultanément les efforts  $F_N$  et  $F_T$ .
- Il permet d'éviter les interférences dans la mesure des efforts  $F_N$  et  $F_T$ .
- Il a déjà montré son efficacité dans des utilisations antérieures.
- Il a été imposé par le donneur d'ordre.

**Type de chaîne d'acquisition :** Carte ARDUINO avec amplificateur VISHAY MICROMESURE 2110B.

**Type du thermocouple :** thermocouple Copper-Nickel (Cuivre-Nickel) : BS4937 part 5 ANSI/MC96.1 type T. NF C 42-321. JISC 1602.

Intervalle de température :  $-185 < T^{\circ} < +300$ .

## 6. Bilan prévisionnel et proposition des choix :

Dans cette phase on dresse un bilan prévisionnel des solutions retenues.

### 6.1. Récapitulatif des solutions retenues :

#### F1 : Fixer le banc au sol

Pour cette fonction le choix est unique, c'est la solution de la **figure 4.9**.

#### F2 : Transmettre le mouvement de rotation au disque

➤ **Groupe 1 : Générer et mouvement de rotation et choisir la vitesse**

Pour cette fonction le choix est unique, c'est un moteur avec un variateur électronique de vitesse (**Figure 4.10**).

➤ **Groupe 2 : entraîner le système de guidage du disque par un dispositif de liaison**

Pour cette fonction le choix s'est porté sur la solution N°2 (**Figure 4.12**)

➤ **Groupe 3 : Assurer le guidage en rotation de l'arbre de broche**

Pour cette fonction le choix est unique, c'est le guidage par des roulements à billes à contact radial (**figure 4.14**).

➤ **Groupe 4 : Assurer la fixation du disque**

Pour cette fonction, le choix s'est porté sur la solution N°1 (**Figure 4.15**).

**F3 : Appliquer la charge et la maintenir constante**

➤ **Groupe 1 : Fixer le pion**

Pour cette fonction, le choix s'est porté sur la solution N°2 (**Figure 4.19**).

➤ **Groupe 2 : Appliquer la charge et la maintenir constante**

Pour cette fonction, le choix s'est porté sur la solution N°1 (**Figure 4.20**).

**F4 : Appliquer et maintenir la température voulue**

➤ **Groupe 1 : Isoler l'enceinte thermique**

Pour cette fonction la solution est unique, c'est celle de la **figure 4.22**.

➤ **Groupe 2 : Ouvrir et fermer l'enceinte thermique**

Pour cette fonction, le choix s'est porté sur la solution N°1 (**Figure 4.23**).

➤ **Groupe 3 : Chauffer l'enceinte mesurer et réguler la température**

Pour cette fonction le choix est unique, On utilise un fil résistant et un thermocouple reliés à un régulateur de température via un contacteur d'ouverture et fermeture du circuit électrique (**Figure 4.25**).

**F5 : Mesurer et acquérir les données**

Pour cette fonction le choix est unique, on utilise une chaîne d'acquisition reliée à un micro-ordinateur (**Figure 4.26**).

## 7. Le suivi de réalisation :

### 7.1. Solution finale

A l'issue du bilan prévisionnel, les solutions retenues forment le banc d'essai d'usure représenté sur la planche d'ensemble.

### 7.2. Le choix des matériaux

L'acier et l'aluminium sont les deux matériaux que nous retenons pour la réalisation du banc car ils coutent moins chers et ils sont disponibles dans l'atelier du département.

### 7.3. Le mode opératoire

Après la réalisation du banc et l'étalonnage du capteur, le mode opératoire est le suivant :

1. Vérifier l'horizontalité du banc.
2. Fixer le disque sur le nez de broche à l'aide d'un écrou.
3. Fixer le pion à l'aide de vis.
4. Rapprocher le pion du disque en poussant le dispositif de chargement.
5. Fermer l'enceinte thermique.
6. Chauffer l'enceinte à la température de l'essai.
7. Mettre en marche le moteur et choisir la vitesse de rotation.
8. Mettre en marche la chaîne d'acquisition des données.
9. Poser la masse sur le dispositif de chargement.

# *Conclusion générale*

Aussi loin que peut nous mener le progrès technologique, la recherche pour minimiser les conséquences de l'usure ne cessera probablement jamais. C'est ce qui a fait l'objet de ses recherches depuis la naissance de ses premières lois jusqu'à l'apparition de cette science de frottement qu'est la tribologie. Afin de continuer dans cette voie, il est nécessaire de disposer non seulement d'un large éventail de connaissances scientifiques, mais aussi du matériel nécessaire au bon échantillonnage des connaissances, ce qui est le cas des tribomètres.

Le présent travail nous a donc permis d'acquérir des connaissances aussi importantes que vitales pour un ingénieur en génie mécanique. En effet, non seulement nous avons acquis un important volume de connaissances sur la tribologie et l'usure, mais nous avons aussi eu la chance de pouvoir nous initier à l'analyse de la valeur, cet outil d'aide à la conception qui est des plus importants, et dont la renommée internationale confirme son efficacité. Malheureusement, l'analyse de la valeur est quasiment absente dans les programmes de formations universitaires et de l'industrie nationale : contrairement aux pays développés qui bénéficient largement des avantages de cette méthode.

Ce projet a été pour nous une grande occasion de faire notre premier pas dans le monde de la conception et d'entrevoir les défis que l'on peut y rencontrer, dans le sens où nous étions amenés à améliorer un banc d'essai d'usure qui nous était totalement méconnu auparavant. Aussi, il constitue pour nous une occasion de mettre en pratique les acquis de notre cursus sur le logiciel SolidWorks, et d'améliorer notre maîtrise de ce dernier, tout en réalisant son importance dans le domaine de la conception.

Enfin, nous espérons avoir atteint l'objectif que visait la proposition de ce thème, et d'avoir répondu aux besoins du demandeur tout en respectant les conditions du cahier des charges fonctionnelles. Nous espérons, par le futur, voir une continuité de ce travail par les étudiants des promotions à venir, qui se couronnera par la réalisation du tribomètre.

# *Bibliographie*

- [1] : Jean FRÊNE « La tribologie de l'antiquité à nos jours » National Tribology Conference, Laboratoire de Mécanique des Solides, Université de Poitier, 2003.
- [2] : Samir MEZDAD & Hend MANE « L'analyse de la valeur d'amélioration pour la conception d'un tribomètre » Thèse d'ingénieur, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2006.
- [3] : Abdelmalek ELHADI « Influence des paramètres mécanique lors de l'endommagement par les phénomènes tribologique des couples des matériaux XC48/XC55 et A60/XC55 » thèse magister, Université Med BOUDIAF de M'sila, 2006.
- [4] : A.OUADOURI & F.IBAZIZENE « Etude des phénomènes de dégradation de surface/Conception d'un banc d'essai de fretting » Thèse d'ingénieur, Université M.MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2007.
- [5] : Internet : [https://fr.wikibooks.org/wiki/Tribologie/Diverses\\_approches](https://fr.wikibooks.org/wiki/Tribologie/Diverses_approches)  
<http://fr.wikipedia.org>  
<http://fr.wikibooks.org>  
<http://www.encyclopedie-enligne.com>  
<http://www.yopdf.com>  
<http://www.osun.org>
- [6] : Lyes KIFOUCHE « Etude de l'effet de la dureté et de la charge sur le coefficient de frottement d'un tribosystème pion/disque » Thèse de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2011.
- [7] : Nabila CHEKIR « Validation d'un tribomètre pion/disque vertical » thèse de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015.
- [8] : Mathias WOYDT « Application des données tribologiques des matériaux » techniques de l'ingénieur BM 5-066.
- [9] : Michel CARTIER & Philippe KAPSA « Usure des contacts mécaniques – Eléments de tribologie » Techniques de l'ingénieur BM 5-066.
- [10] : Michel CARTIER & Philippe KAPSA « Usure des contacts mécanique – Problématique et définitions » techniques de l'ingénieur BM 5-065.
- [11] : Youcef KELLOUD « Etude des propriétés tribologique du composite polyester insaturé chargé de poudre de graphite en frottement avec un antagoniste en acier XC48 traité » thèse de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012.
- [12] : Groupe H.E.F « Guide d'emploi des traitements de surfaces appliqués aux problèmes de frottement » édition Technique & Documentation, 2000.
- [13] : Roger NEVEU « Usure, avaries et corrosion » Facteurs de Destruction des Matériels Industriels, édition 1978.
- [14] : I.LAKHTINE « Métallographie et traitements thermiques des matériaux » Quatrième édition, édition MIN-MOSCOU. Traduit en français par Valentin POLONSKI.

- [15] : Gilles PETITET « Contribution à la compréhension des mécanismes élémentaires d'usure douce des élastomères charges réticules » thèse doctorat, Ecole centrale de Lyon, 2003.
- [16] : Frottement et usure, technique de l'ingénieur référence internet 42464 2<sup>nd</sup> édition.
- [17] : Hans JORG, Erich Bergman & René Gras « Analyse et technologie des surfaces » Couches minces et tribologie.
- [18] : R.LEFEVRE « Graissage et tribotechnique tome 1 » édition TECHNIP. France 1982.
- [19] : ABDELHAMID Salim & TAGUENITESTANE Madjid « Mise au point et validation d'un tribomètre pion sur disque » thèse d'ingénieur, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2008.
- [20] : Gérard STEINMETZ « apport de la simulation numérique et de l'expérience pour la compréhension des phénomènes de frottement en emboutissage et hydroformage » thèse doctorat, Ecole Nationale Supérieure des mines de paris, 2005.

# *Annexes*

## 1. Jauges d'extensométrie

Les jauges de contraintes (ou jauges d'extensométrie) sont largement utilisées depuis de nombreuses années pour la mesure des déformations à la surface des structures, la pression, la force, l'accélération, le couple..., toute grandeur mécanique.

La jauge est un petit élément résistif (capteurs), il est fait d'un fil très fin enroulé selon une direction préférentielle et collé par l'entremise d'un support isolation. Lorsque la pièce est soumise au chargement, sa déformation est transmise à travers la colle et le support de la jauge.

### 1.1. Composantes d'une jauge

La figure suivante montre les différentes composantes d'une jauge d'extensométrie

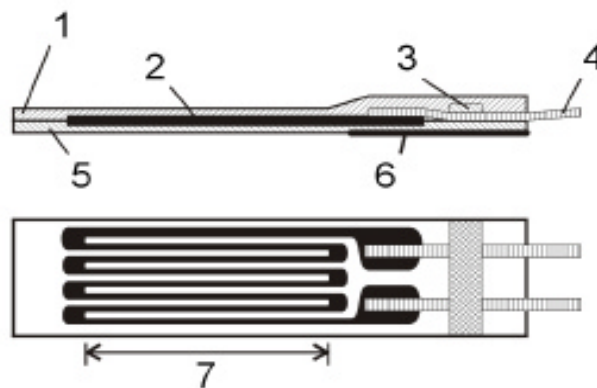


Figure 55 : Schéma d'une jauge de déformation

1. Couverture
2. Grille de mesure
3. Fixation des bandes de raccordement
4. Bandes de raccordement
5. Support
6. Raidisseur de la base
7. Longueur de la grille de mesure

### 1.2. Transducteur

Le transducteur est un pont de Wheatstone. Il assure la conversion de la grandeur intermédiaire (la résistance des jauges) en une grandeur électrique exploitable par la chaîne électronique de traitement.

### 1.3. Principe de fonctionnement d'une jauge

La jauge de contrainte repose sur le principe d'un fil que l'on déforme. Le fil, très fin, est placé préférentiellement longitudinalement par rapport à la déformation. En agissant par traction ou compression sur lui, il devient plus ou moins long par rapport à son état initial. Cette variation de longueur modifie la résistance électrique du fil.

La résistance d'un fil conducteur est définie par la loi de Pouillet :

$$R = \frac{\rho L}{s} \dots\dots\dots(25)$$

Où

R : La résistance électrique

$\rho$ : La résistivité du matériau

L : La longueur du fil

S : La section du fil

En prenant le logarithme népérien et la différentielle de chaque membre et en considérant que les paramètres varient très peu lors de la mesure, on obtient la relation

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta \rho}{\rho} - \frac{\Delta S}{S} \dots\dots\dots(26)$$

$$S = \frac{\pi D^2}{4} \dots\dots\dots(27)$$

D : diamètre du fil de la jauge

Donc :

$$\frac{\Delta S}{S} = 2 \frac{\Delta D}{D} \dots\dots\dots(28)$$

$$\frac{\Delta D}{D} = \nu \frac{\Delta L}{L} \rightarrow \frac{\Delta S}{S} = 2\nu \frac{\Delta L}{L} \dots\dots\dots(29)$$

Ou  $\nu$  est le coefficient de poisson.

Ce qui donne :

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} (1 + 2\nu) + \frac{\Delta \rho}{\rho} \dots\dots\dots(30)$$

La sensibilité de la jauge à une déformation est donc donnée par l'expression

$$\frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = (1 + 2\nu) + E \left( \frac{1 \cdot \Delta \rho / \rho}{E \cdot \Delta L / L} \right) \dots\dots\dots(31)$$

Le terme  $\frac{1}{E} \cdot \frac{\Delta \rho / \rho}{\Delta L / L}$  est appelé coefficient de piézorésistivité, noté  $\pi$ . On notera que ce coefficient n'a de sens que pour un matériau élastique linéaire.

Le terme  $\frac{\Delta R/R}{\Delta L/L}$  noté K est appelé facteur de jauge, généralement est de l'ordre de 2 pour les jauges semi-conductrices.

On aura donc

$$K = (1 + 2\nu) + E\pi \dots\dots\dots(32)$$

E : module de Young

Et enfin

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta L}{L} \dots \dots \dots (33)$$

### 1.4. Le pont de Wheatstone

Le pont de Wheatstone est un circuit qui permet de mesurer de façon très précise la valeur des résistances électriques.

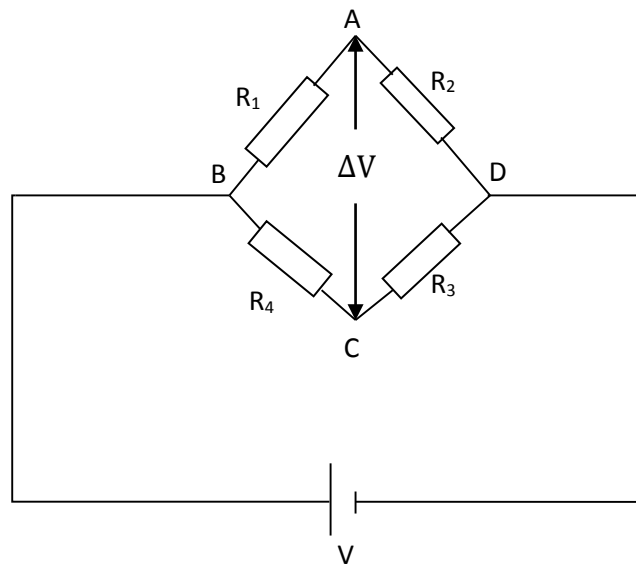


Figure 56 : le pont de Wheatstone

Pour de très faibles déformations du capteur, la sortie  $\Delta V$  est proportionnelle aux variations relatives  $\Delta R / R$  de chacune des résistances (jauges).

$$\frac{\Delta V}{V} = \left[ \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right] \dots \dots \dots (26)$$

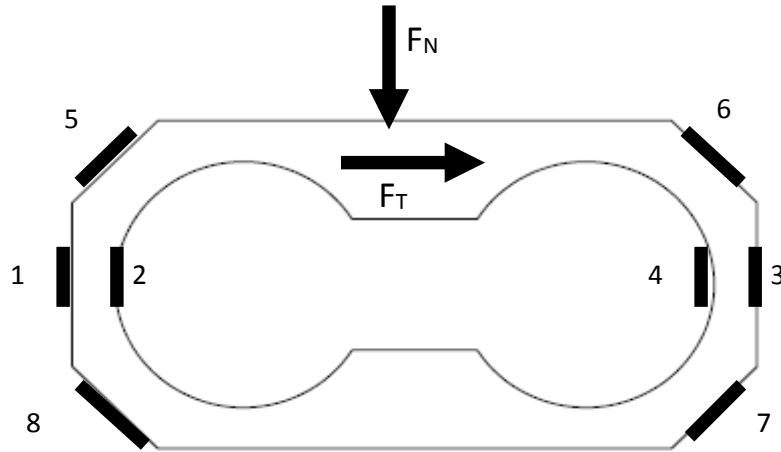
Dans notre étude, nous avons prévu deux capteurs qui nous permettent de mesurer simultanément les efforts normal et tangentiel.

### 1.5. Premier capteur

Pour ce capteur, on utilise deux ponts à quatre jauges qui sont fixées sur son corps

D'une manière à ce que l'effort normal n'aura pas d'influence sur la mesure de l'effort tangentiel et vice versa.

La figure suivante illustre la disposition des jauges sur l'élément capteur :



**Figure 57** : la disposition des jauges sur le premier capteur

- ❖ Les jauges utilisées pour mesurer l'effort normal sont ; 1, 2, 3 et 4. Sous l'effet de l'effort normal  $F_N$ , les jauges 1 et 3 vont se dilater, alors que les jauges 2 et 4 se compriment.
- ❖ Les jauges utilisées pour mesurer l'effort tangentiel sont ; 5, 6, 7 et 8. Sous l'effet de l'effort tangentiel  $F_T$ , les jauges 6 et 8 vont se dilater, alors que les jauges 5 et 7 se compriment.

## 2. Caractéristiques du moteur électrique

Taille	56 à 450 mm
Puissance	1.1 KW
Nombre de pôles	1, 4, 6, 8
Type	1.1-3000-B3
Degré de protection	IP55
Tension	220V
Fréquence	50 Hz et 60 Hz
Vitesse	2990 tr/min

**Tableau 9** : caractéristiques du moteur électrique

### 3. Les caractéristiques du variateur électronique de vitesse

Marque	IIITACHI
Type	L200-011NFE
Puissance	1.1 KW
Tension	220 V

**Tableau 10** : caractéristiques du variateur électronique du moteur