REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté de génie de la construction

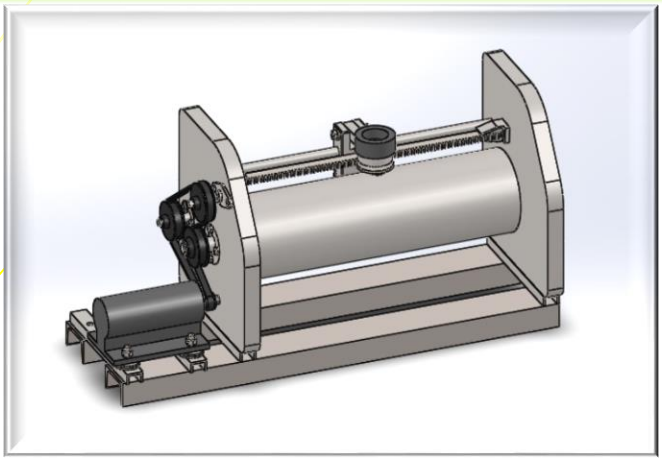
Département de génie mécanique

Mémoire de Fin D'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Mécanique
Option : Fabrication Mécanique et productique

Thème

Conception d'un dispositif de type abrasimètre par la méthode de l'analyse de la valeur



Proposé et dirigé par :

Mr LARBI . S

Réalisé par :

Mr : AMMAM Djamel

Mr : HAMIDI Yacine

PROMOTION 2015

Remerciements

Nous tenons en premier lieu à remercier dieu tout puissant, de nous avoir aidé et donner le courage pour arriver au terme de ce travail, et nos familles qui nous ont soutenus avec tous les moyens pour assurer notre réussite.

Nos remerciements les plus sincères vont à notre promoteur, **Mr S. LARBI** pour avoir bien voulu nous encadrer et pour ses précieux conseils et orientations. Nous le remercions d'avoir su partager son expérience et sa passion notamment dans le domaine de la fabrication mécanique. Aussi de nous avoir initié à l'analyse de la valeur.

Nos remerciements vont également à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin.

Nous remercions chaleureusement les membres du jury qui nous ferons l'honneur d'examiner notre travail.

SOMMAIRE

Introduction générale 1

Première partie

Chapitre I : Elément de tribologie

I. Historique 3
II. Introduction 3
III. Définition 4
IV. Système tribologique 4
V. Circuit tribologique 5
VI. Le concept de troisième corps 7
VI.1 Le triplet tribologique 7
VI.2 Le troisième corps 8
VI.3 Les mécanismes d'accommodation de la différence de vitesse 9
VII. Mécanismes d'endommagement des surfaces frottantes 10
a.Transformations Tribologiques Superficielles 10
b.Détachement de particules 10
VIII. Paramètres tribologiques 10
VIII.1 Les paramètres opérationnels 10
a. Mode de contact 11
b. La charge du contact 11
c. La vitesse de contact 11
d. Etat de surface 12
e. L'environnement 14
f. Matériaux 14
VIII.2 Les paramètres structuraux 14
VIII.3 Paramètre d'interaction 15
IX. Mesures tribométriques 15
X. Conclusion 16

Chapitre II : Le frottement

I. Introduction 17
II. Définition 17
III. Lois empiriques du frottement 18

IV. Comportement du coefficient de frottement 19
a. Vitesse de glissement 19
b. Chemin de glissement parcouru 20
c. Etat de surface 21
d. Nature des métaux 21
e. Charge normale appliquée 22
f. Température ambiante 22
V. Type de frottement 22
a. Frottement sec 22
b. Frottement hydrodynamique 23
c. Frottement onctueux 23
VI. Les coefficients de frottement 24
VI.1 Le frottement cinétique 25
VI.2 Le frottement statique 25
VII. Réduction du frottement et de l'usure 26
VII.1 Sur la conception technologique et géométrique 26
a. Réduction des pressions de contact et de vitesse 26
b. Refroidissement convenable des surfaces 27
c. Amélioration de l'état de surface 27
d. Réduction du risque de grippage 27
VII.2 Interposition d'un film lubrifiant 27
VIII. Caractéristiques du facteur de frottement 28
IX. Conclusion 29

Chapitre III : L'usure

I. Introduction 30
II. Définition 30
III. Le phénomène d'usure 30
IV. Classification de l'usure 31
V. Mécanismes d'usure 31
Causes 32
Effets 32
a. L'usure par transfert ou adhésion 32

b. L'usure par abrasion 33
c. L'usure par fatigue 34
d. L'usure par réactions tribochimique 35
VI. Autres paramètres caractéristiques de l'usure abrasive 35
VI.1 Paramètres de sollicitation 36
VI.2 Paramètres du processus d'abrasion 36
VII. Paramètres à prendre en compte 37
VIII. Lois d'usure 37
IX. Facteurs influant l'usure par abrasion 39
a. Paramètres dynamiques de sollicitation de l'abrasion 39
b. Influence de la dureté de l'abrasif 39
c. Granulométrie et forme de l'abrasif 39
d. Nature des matériaux 40
e. Influence de l'ambiance 40
f. Influence de la vitesse 40
X. Données et paramètres tribologiques 40
X.1 Taux d'usure 40
X.2 Valeur du produit P ×V 42
X.3 Densité d'énergie de frottement 44
XI. Conclusion 44

Deuxième partie

Chapitre I : L'analyse de la valeur

I. Introduction à l'analyse de la valeur 45
I.1 Historique de l'analyse de la valeur 46
II. Les concepts de bases de l'Analyse de la valeur 47
II.1 Principes 47
II.1.1 Le besoin 48
II.1.2 Les fonctions 48
II.1.3 Le produit 48
II.2 Utilisateur 48
II.3 Contrainte 49

III. Le concept de valeur 49
III.1 La notion de valeur 49
IV. Définition de l'analyse de la valeur 50
IV.1 Les caractéristiques de l'analyse de la valeur 51
IV.2 Les acteurs 52
V. Mode opératoire 53
V.1 Phase 1 : Orientation de l'action 53
V.2 Phase 2 : Recherche de l'information 54
V.3 Phase 3 : Analyse des coûts et des fonctions 54
V.3 .1 Analyser le besoin 54
V.3.2 Déterminer le profil de vie du système 55
V.3.3 Démarche méthodique de l'analyse fonctionnelle 55
V.3.3.1 Méthodologie 55
1. Recenser les fonctions 55
A : Les fonctions de service 56
B : Les fonctions techniques 56
1. La méthode intuitive 57
2. L'étude d'environnement 57
3. Analyse séquentielle 59
a. Caractériser et quantifier les fonctions 59
• Les critères d'appréciation : 59
• Les niveaux de chaque critère : 59
• La flexibilité de chaque niveau : 59
• Le taux d'échange associé 60
• Recherche des fonctions techniques : 60
• Diagramme des flux : 60
b. Ordonner les fonctions 61
• Méthode FAST 62
2. Hiérarchiser les fonctions 64
A. L'échelle de hiérarchisation des fonctions 64
B. La méthode du tri croisé 65
3. Valoriser les fonctions 66
4. Synthétiser les fonctions 66

V.3.4 Rédaction du cahier des charges fonctionnelles..... 66
a. Objet du C.D.C.F. 67
b. Eléments constitutifs du C.D.C.F 68
c. Comment établir le C.D.C.F..... 69
1. Définition du sujet traité. 69
2. Sélection et formation du groupe. 70
3. Validation du besoin et analyse fonctionnelle 70
4. Rédaction proprement dite du C.D.C.F..... 70
5. Rédaction d'annexes informatives éventuelles..... 70
6. Validation par le groupe de la rédaction du C.D.C.F. 70
7. Approbation par le décideur. 70
d. Caractérisation du C.D.C.F. en fonction de ses différents cas d'utilisation 70
V.4 Phase 4 : Recherche d'idées et de voies de solutions..... 73
V.5 Phase 5 : Etude et évaluation des solutions 73
V.6 Phase 6 : Bilan prévisionnel et proposition de choix..... 74
V.7 Réalisation – Suivi – Bilan 74
VI. Avantages et inconvénients de l'analyse de la valeur 75
VI.1 Avantages 75
VI.2 Inconvénients..... 75
VII. Conclusion..... 75

Chapitre II : Application de la méthode

I. Phase1 : Orientation de l'action 76
I.1 L'objet de l'étude 76
I.2 Objectif..... 77
I.3 Le groupe de travail..... 77
II. Phase 2 : Recherche d'information 78
II.1 Présentation de la norme ISO 4694 78
II.2 Domaine d'application 79
II.3 Schéma de l'appareil présenté par la norme 80
III. Phase 3 : Analyse fonctionnelle 81
III. Cahier des charges du besoin..... 81

III.2 Recensement des fonctions de service 82
a. Méthode intuitive 82
b. Relation avec les éléments de l'environnement 82
c. Analyse séquentielle 84
1. Phase de la vie de l'abrasimètre 84
1.1 Préparation du dispositif à l'essai 86
1.2 Dispositif effectuant l'essai 86
1.3 Dispositif au repos 87
2. Récapitulation des fonctions recensées 88
2.1 Fonctions de services 88
2.2 Fonctions de contrainte 88
III.3 Recherche des fonctions techniques 89
III.4 Arborescence des fonctions de la phase 90
III.5 Les fonctions techniques 91
1. Eléments internes et externes 91
F1 : Fixer le dispositif : 91
F2 : Transmettre la vitesse de rotation au cylindre : 92
F3 : Transmettre la vitesse de rotation a l'éprouvette : 92
F4 : Transmettre la vitesse de translation a l'éprouvette : 92
F5 : Appliquer la charge : 92
F6 : Mesurer les données : 92
IV. Phase 4. Recherche d'idées et voies de solutions 92
IV.1 Fonction 1 : Fixer le dispositif : 93
IV.1.1 Solution N°1 (Figure II.1.1) 93
Nomenclature : 93
Principe de fonctionnement 93
IV.1.2 Solution N°2 (Figure II.1.2) 95
Nomenclature : 95
Principe de fonctionnement 95
IV.2 Fonction 2 : Transmettre la vitesse de rotation au cylindre 97
IV.2.1 Groupe N°1 : guider l'arbre de transmission 97
IV.2.1.1 Solution N°1 (Figure II.2.1.1) : 97
Nomenclature : 97

Principe de fonctionnement : 97
IV.2.2 Groupe N°2 : lier l'arbre au cylindre : 99
IV.2.2.1 Solution N°1 (Figure II.2.2.1) : 99
Nomenclature : 99
Principe de fonctionnement : 99
IV.2.2.2 Solution N°2 (Figure II.2.2.2) : 101
Nomenclature : 101
Principe de fonctionnement : 101
IV.2.2.3 Solution N°3 (Figure II.2.2.3) : 103
Nomenclature : 103
Principe de fonctionnement : 103
IV.2.2.4 Solution N°4 (Figure II.2.2.4) : 105
Nomenclature : 105
Principe de fonctionnement : 105
IV.2.3 Groupe N°3 : transmission de mouvement de rotation par le moteur 107
IV.2.3.1 Solution N°1 (Figure II.2.3.1) 107
Nomenclature : 107
Principe de fonctionnement : 107
IV.2.3.2 Solution N°2 (Figure II.2.3.2) : 109
Nomenclature : 109
Principe de fonctionnement : 109
IV.3 Fonction 3 : Transmettre la vitesse de rotation a l'éprouvette : 111
IV.3.1 Groupe N°1 : Transmission du mouvement de rotation à la broche porte l'éprouvette :..... 111
IV.3.1.1 Solution N°1 (figure II.3.1.1) : 111
Nomenclature : 111
Principe de fonctionnement : 111
IV.3.1.2 Solution N°2 (Figure II.3.1.2) : 113
Nomenclature : 113
Principe de fonctionnement : 113
IV.3.2 Groupe N°2 : Guider la broche porte éprouvette : 115
IV.3.2.1 Solution N°1 (Figure II.3.2.1) : 115
Nomenclature : 115
Principe de fonctionnement : 115

IV.3.3 Groupe N°3 : Fixation de l'éprouvette : 117
IV.3.3.1 Solution N°1 (Figure II.3.3.1) : 117
Nomenclature : 117
Principe de fonctionnement : 117
IV.3.3.2 Solution N°2 (Figure II.3.3.2) : 119
Nomenclature : 119
Principe de fonctionnement : 119
IV.3.3.3 Solution N°3 (Figure II.3.3.3) : 121
Nomenclature : 121
Principe de fonctionnement : 121
IV.4 Fonction 4 : Transmettre la vitesse de translation à l'éprouvette 123
IV.4.1 Solution N°1 (Figure II.4.1) : 123
Nomenclature : 123
Principe de fonctionnement : 123
IV.4.2 Solution N°2 (Figure II.4.2) : 125
Nomenclature : 125
Principe de fonctionnement : 125
IV.5 Fonction5 : Appliquer la charge : 127
IV.5.1 Solution N°1 (Figure II.5.1) : 127
Nomenclature : 127
Principe de fonctionnement : 127
V. Phase 5 : Etude et évaluation des solutions 129
V.1 Fonction 1 : Fixation du dispositif 129
V.1.1 Solution N°1 (Figure II.1.1) 129
1. Avantages 129
2. Inconvénients 129
V.1.2 Solution N°2 (Figure II.1.2) 129
1. Avantages 129
2. Inconvénients 129
V.1.3 Décision 129
V.2 : fonction 2 : Transmettre la vitesse de rotation au cylindre 130
V.2.1 Groupe 1 : Guidage de l'arbre (Figure II.2.1.1) 130
V.2.2 Groupe 2 : Liaison arbre/cylindre 130

V.2.2.1 Solution N°1 (Figure II.2.2.1) 130
1. Avantages 130
2. Inconvénients 130
V.2.2.2 Solution N°2 (Figure II.2.2.2) 130
1. Avantages 130
2. Inconvénients 130
V.2.2.3 Solution N°3 (Figure II.2.2.3) 130
1. Avantages 130
2. Inconvénients 130
V.2.2.4 Solution N°4 (figure II.2.2.4) 130
1. Avantages 130
2. Inconvénients 131
V.2.5 Décision 131
V.2.3 Groupe 3 : Transmission du mouvement de rotation par le moteur 131
V.2.3.1 Solution N°1 (Figure II.2.3.1) 131
1. Avantages 131
2. Inconvénients 131
V.2.3.2 Solution N°2 (Figure II.2.3.2) 131
1. Avantages 131
2. Inconvénients 131
V.2.3.3 Décision 131
V.3 Fonction 3 : Transmettre la vitesse de rotation a l'éprouvette : 132
V.3.1 Groupe N°1 : Transmission du mouvement de rotation a l'éprouvette : 132
V.3.1.1 Solution N°1 (Figure II.31.1) 132
1. Avantages 132
2. Inconvénients 132
V.3.1.2 Solution N°2 (Figure II.3.1.2) 132
1. Avantages 132
2. Inconvénients 132
V.3.1.3 Décision 132
V.3.2 Groupe N°2 : Guidage de la broche porte éprouvette 132
V.3.3 Groupe N°3 : Fixation de l'éprouvette : 133
V.3.3.1 Solution N°1 (Figure II.3.3.1) 133

1. Avantages 133
2. Inconvénients 133
V.3.3.2 Solution N°2 (Figure II.3.3.2) 133
1. Avantages 133
2. Inconvénients 133
V.3.3.3 Solution N°3 (Figure II.3.3.3) 133
1. Avantages 133
2. Inconvénients 133
V.3.3.4 Décision 133
V.4 Fonction 4 : Transmettre la vitesse de translation à l'éprouvette : 133
V.4.1 Solution N°1 (Figure II.4.1) 133
1. Avantages 133
2. Inconvénients 133
V.4.2 Solution N°2 (Figure II.4.2) 134
1. Avantages 134
2. Inconvénients 134
V.4.3 Décision 134
V.5 Fonction 5 : Application de la charge 134
VI. (Phase 6) : Bilan prévisionnel 134
VI.1 Récapitulatif des fonctions retenues 134
F 1 : Fixation du dispositif 134
F 2 : Transmettre la vitesse de rotation au cylindre : 134
F 3 : Transmettre la vitesse de rotation a l'éprouvette : 135
F 4 : Transmettre la vitesse de translation à l'éprouvette : 135
F 5 : Appliquer la charge : 135
VI.2 Choix du matériau 135
VI.3 Solution finale 135

Conclusion générale 136
Références bibliographiques 137

Liste des figures

PREMIERE PARTIE

Chapitre I : Eléments de tribologie

Figure I.1 : structure du système tribologique 5

Figure I.2 : Représentation schématique de circuit tribologique dans le cas d'un contact entre deux solides 6

Figure I.3 : Représentation schématique du triplet tribologique 8

Figure I.4 : Représentation schématique des mécanismes d'accommodation de la différence de vitesse entre les premiers corps 9

Figure I.5 Vue théorique en coupe d'une surface 12

Chapitre II : Le frottement

Figure II.1 Gravures illustrant les expériences de Léonard de Vinci [12]. 19

Figure II.2 Contact entre deux surfaces rugueuses [12] 19

Figure II.3 Influence de la vitesse sur le coefficient de frottement 20

Figure II.4 Evolution du frottement avec la distance de glissement. 21

Figure II.5 Variation du coefficient de frottement μ en fonction de la charge normale N 22

Figure II.6 Frottement statique 24

Figure II.7 Frottement cinétique 24

Chapitre III : L'usure

Figure III.1 La perte de poids en fonction du temps 31

Figure III.2 Phénomènes élémentaires de l'usure adhésive 32

Figure III.3 Phénomènes élémentaires de l'usure abrasive à deux et trois corps 33

Figure III.4 Phénomène de l'usure par fatigue 35

Figure III.5Influence de la dureté de l'abrasif 39

Figure III.6 : Graphe « pression/vitesse de glissement » limite pour différents matériaux en frottement sec à température ambiante (contact conforme ; antagoniste acier pour fer et bronze frittés 43

DEUXIEME PARTIE

Chapitre I: Analyse de la valeur

Figure I.1 Graphe d'association 58
Figure I.2 Principe de construction d'un diagramme de flux 61
Figure I.3 Les questions de la méthode FAST 62
Figure I.4 Forme générale d'un diagramme FAST orienté 63
Figure I.5 Lescture d'un diagramme FAST 64
Figure I.6 Rôle du C.D.C.F 67
Figure I.7 Schéma d'élaboration du C.D.C.F 72

Chapitre II: Application de la méthode

Figure II.1. Schéma de l'abrasimétre 80
Figure II.2 Relation de l'abrasimétre avec les éléments extérieurs 83
Figure II.3 Diagramme des phases de la vie du dispositif 85
Figure II.4 Relation avec l'environnement : Préparer l'essai 86
Figure II.5 Relation avec l'environnement : Dispositif effectuantl'essai 87
Figure II.6 Relation avec l'environnement : Dispositif au repos 87
Figure II.7 Relation avec l'environnement 89
Figure II.8 Phase de fonctionnement du dispositif 90
Figure II.1.1 Solution N° 1 : fixation du dispositif 94
Figure II.1.2 Solution N° 2 : Fixation du dispositif 96
Figure II.2.1.1 Solution N° 1 : Fixation du dispositifGuidage de l'arbre 98
Figure II.2.2.1 Solution N° 1 : Liaison arbre cylindre 100
Figure II.2.2.2 Solution N° 2 : Liaison arbre cylindre 102
Figure II.2.2.3 Solution N° 3 : Liaison arbre cylindre 104
Figure II.2.2.4 Solution N° 4 : Liaison arbre cylindre 106
Figure II.2.3.1 Solution N° 1 : Transmission de rotation par le moteur 108
Figure II.2.3.2 Solution N° 2 : Transmission de rotation par le moteur 110

Figure II.3.1.1 Solution N° 1 : Transmission de mouvement de rotation à la broche..... 112
Figure II.3.1.2 Solution N° 2 : Transmission de mouvement de rotation à l'éprouvette 114
Figure II.3.2.1 Solution N° 1 : Guidage de la broche porte éprouvette 116
Figure II.3.3.1 Solution N° 1 : Fixation de l'éprouvette 118
Figure II.3.3.2 Solution N° 2 : Fixation de l'éprouvette 120
Figure II.3.3.3 Solution N° 3 : Fixation de l'éprouvette 122
Figure II.4.1. Solution N° 1 : Transmission de la translation à l'éprouvette 124
Figure II.4.2. Solution N° 2 : Transmission de la translation à l'éprouvette 126
Figure II.5.1. Solution N° 1 : Application de la charge 128

Liste des tableaux

PREMIERE PARTIE

Chapitre I : Eléments de tribologie

Tableau I.1 Principaux élémentaire relatifs à une situation tribologique 5
Tableau I.2 Constituants structuraux des tribosystèmes 15

Chapitre II : Le frottement

Tableau II.1 Valeurs approximatives de coefficientde frottement statique pour des surfaces sèches 26

DEUXIEME PARTIE

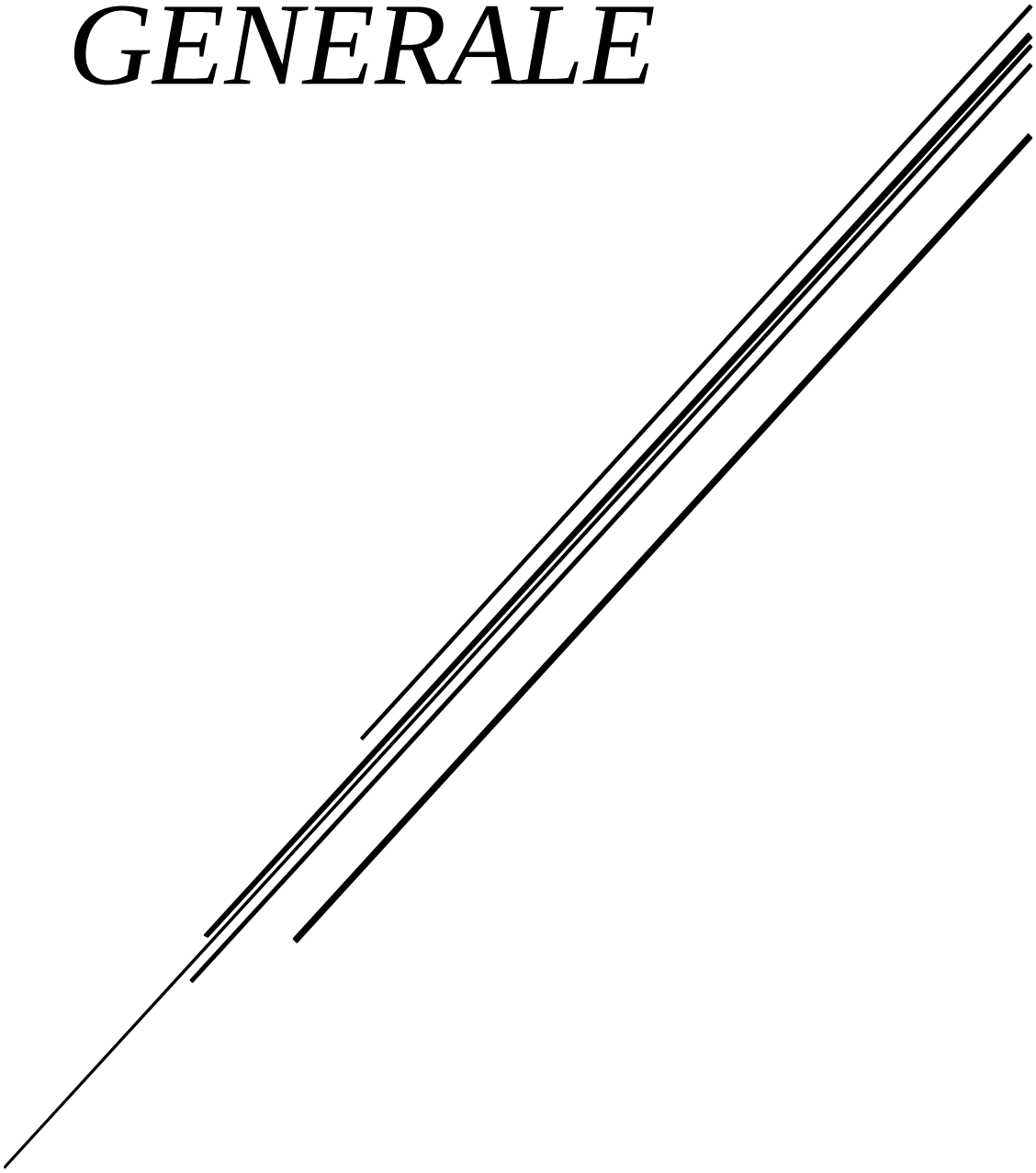
Chapitre I : Analyse de la valeur

Tableau I.1 Echelle de hiérrchisation des fonctions 65
Tableau I.2 Tris croisés concernant les fonctions 65

Chapitre II : Application de la méthode

Tableau II.1 Membres du groupe de travail 78
Tableau II.2 Relations des éléments extérieurs avec l'abrasimétre 84
Tableau II.3 etapes de la vie du dispositif 85
Tableau II.4 Fonctions principale et secondaires 91

INTRODUCTION GENERALE



Introduction générale

Selon la plupart des glossaires et définitions appartenant à la littérature technique spécialisée, l'usure correspond à la « perte progressive de matière de la surface active d'un corps, par suite du mouvement relatif d'un autre corps sur cette surface ».

Du point de vue du mécanicien, la notion d'usure est beaucoup moins restrictive car elle s'applique plus généralement à tout évènement conduisant à une perte de fonction des composants ou systèmes, ce point de vue corroborant d'ailleurs les définitions plus communes qui associent à l'usure la détérioration due à l'usage.

La perte de fonction correspond aux dysfonctionnements qui peuvent résulter :

— des évolutions dimensionnelles, géométriques des pièces, telles que l'accroissement des jeux dû à une perte de cote (dégradation de la précision...) ou au contraire, le colmatage des interfaces par l'accumulation de débris (blocage, coincement...) ;

— des phénomènes de dégradation des surfaces (rayures, sillons, cavités, excroissances...) dont l'influence peut être dommageable à plusieurs égards : déficience d'une étanchéité, altération des propriétés mécaniques des composants ou encore détérioration de l'aspect...

Ceci étant, l'usure est un phénomène redoutable qui fait peur aux industriels, car les pertes qu'il engendre peuvent entraîner la mort de l'entreprise puisque la survie de celle-ci est remise en cause.

Pour faire face à ce phénomène omniprésent et minimiser ses conséquences dévastatrices, les chercheurs de tout temps ont mis au point des remèdes et des techniques qui ont pour but la protection des équipements et le prolongement de leur durée de vie.

Pour permettre au laboratoire de mécanique de travailler dans ce sens, il nous a été proposé dans le cadre de l'exécution de notre mémoire de fin d'études, la conception d'un banc d'essai de type abrasimètre reproduisant les conditions réelles de travail de pièces en laboratoire.

Dès lors des outils scientifiques d'aide à la conception sont plus que jamais nécessaire, pour la circonstance.

L’analyse de la valeur est parmi ces outils, dont le principe repose sur la recherche méthodique et systématique des solutions les plus adaptées. L’efficacité de la méthode est confirmée par des grandes entreprises de renommée mondiale, même si elle tarde à prendre de l’ampleur dans notre pays.

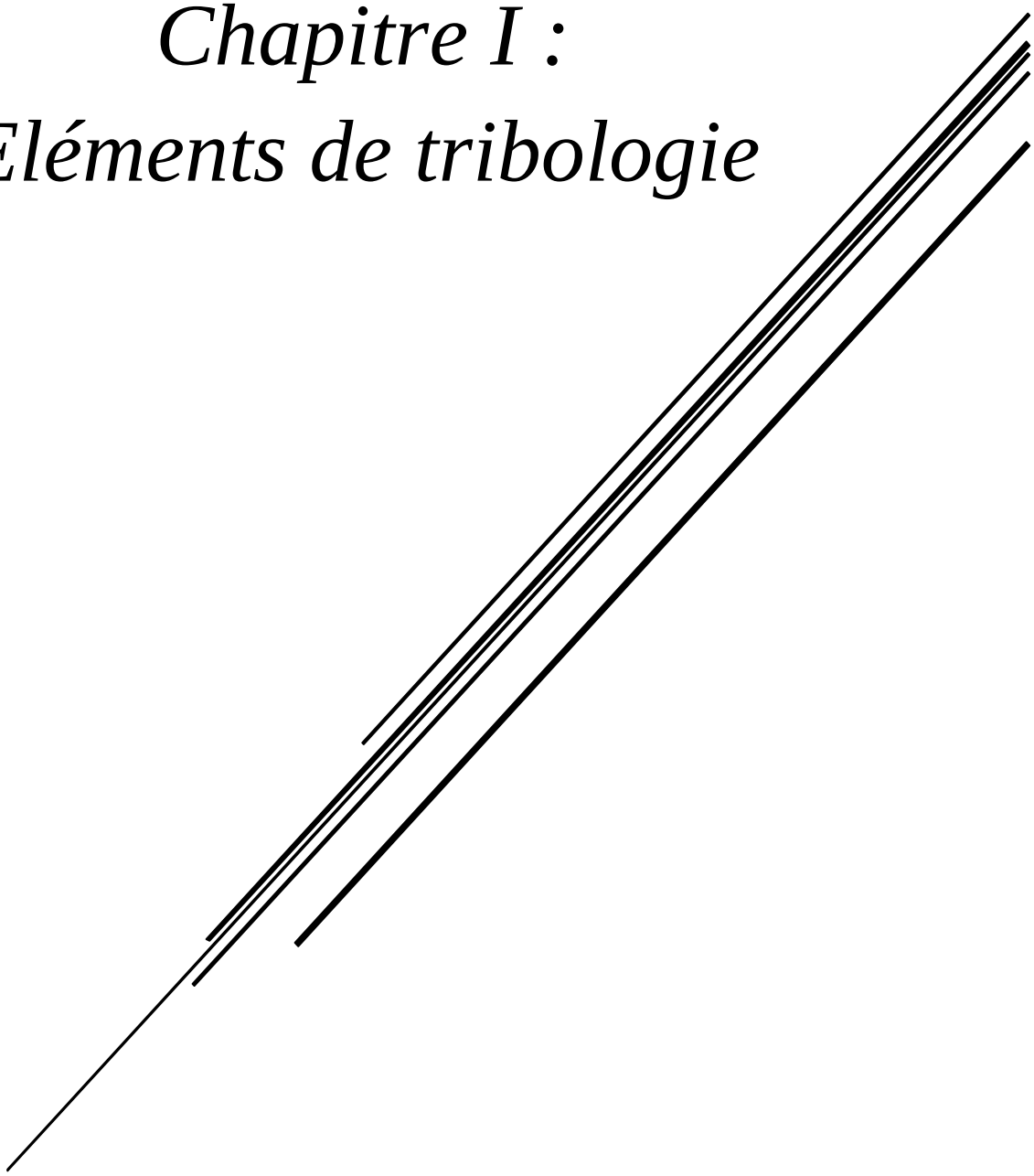
Pour se faire nous avons subdivisé notre étude en deux grandes parties. La première partie consiste à définir la tribologie, le système tribologique et l’expérimentation en tribologie. La deuxième partie est subdivisé en deux chapitre le premier consiste à définir toutes les phases de la méthode de l’analyse de la valeur avec une approche détaillée des outils utilisés tel que les tableaux et les graphes d’analyse. Dans le deuxième chapitre nous mettons en application toutes les étapes de la méthode pour la conception du dispositif abrasimètre.

Une fois l’étude soigneusement établie, nous avons abouti à un premier modèle de conception que nous proposerons au demandeur du produit pour approbation et nous terminons ce travail par une conclusion générale.

PREMIERE PARTIE

Chapitre I :

Eléments de tribologie



I. Historique

Le nom tribologie a été créé en Angleterre ; il a été utilisé pour la première fois dans le rapport présenté le 23 novembre 1965 au Minister of State for Education and Science et publié en février 1966. Notons que la notion de frottement a été définie dans les études remarquables de Léonard de Vinci. Il étudie les principes et élabore, en 1508, deux énoncés :

-Le premier stipule que la force de frottement est proportionnelle à la charge, la charge signifiant ici la force qui comprime l'une contre l'autre les deux surfaces.

- Le second énoncé mentionne que la force de frottement est indépendante de l'aire de contact.

En 1699 Guillaume Amontons tire les mêmes conclusions que de Vinci et fait une troisième découverte : le frottement ne dépend pas de la vitesse. Aux 15,16 et 17eme siècles, Charles de Coulomb a abouti lui aussi aux même conclusions. Le frottement fait intervenir de nombreux phénomènes, mais de façon simple on peut le définir comme étant l'action qui tend à s'opposer au déplacement relatif de deux solides en contact. De même l'usure, qui peut prendre de très nombreuses formes, correspond à la détérioration des surfaces au cours de leur utilisation.

II. Introduction

Au début du vingtième siècle, la tribologie s'appuyait sur l'étude des volumes, avec une domination des concepts de la mécanique permettant d'établir des lois de comportement.
Au milieu du vingtième siècle, la tribologie s'est tournée vers l'étude des surfaces grâce aux concepts de la physique des surfaces. Depuis une vingtaine d'années, la recherche en tribologie porte sur l'étude de la dynamique des interfaces avec la prise de conscience du rôle fondamental des éléments inter faciaux dans un contact.
Les phénomènes de frottement ne sont pas décrits par des propriétés intrinsèques des matériaux, ce qui rend leur prédiction particulièrement délicate. En outre, le frottement et l'usure sont des phénomènes indépendants. Il est en effet possible de concevoir des systèmes à usure faible et frottement élevé (freins) ou à usure forte et frottement faible (usinage). Enfin, l'introduction de la notion de contact à trois corps, qui s'articule autour des concepts de triplet tribologique, de circuit tribologique et de mécanisme d'accommodation de vitesse, a permis une meilleure compréhension des mécanismes de frottement et d'usure.[1].[2]

III. Définition

La tribologie est la science qui étudie l'ensemble des phénomènes qui ont lieu lorsque des corps en contact sont mis en mouvement relatif. 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 traduisent par une perte de matière et la lubrification qui consiste à interposer un fluide entre les deux corps en contact. C'est une science pluridisciplinaire faisant intervenir des notions de mécanique, de physicochimie et de science des matériaux en général.

Le mot tribologie, construit à partir des racines grecques tribein (frotter) et logos (parole, étude ou science), a été proposé en 1968 par G. Salomon pour désigner la science qui étudie l'ensemble des phénomènes qui ont lieu lorsque deux corps en contact sont animés de mouvements relatifs. La tribologie est ainsi une branche de la mécanique qui concerne le frottement, l'usure et la lubrification des surfaces de contact entre deux solides. [3]

IV. Système tribologique

Un système tribologique ou (tribosystème) est un ensemble composé d'éléments en interaction statique ou dynamique organisé selon le but : transmission d'énergie, étanchéité dynamique ou statique, freinage, guidage…

L'analyse tribologique d'un ensemble ou sous-ensemble mécanique consiste à introduire un certain nombre d'éléments en s'appuyant sur l'organigramme qui suit :

- identification des contacts et des fonctions qu'ils ont assurées.
- extraction pour chaque contact, des paramètres fonctionnels ou des variables opérationnelles caractérisant son fonctionnement.
- identification des effets dont la manifestation est la plus préalable.
- détection des processus pouvant conduire à l'endommagement des surfaces en contact.

Dans le cas le plus général, un contact tribologique est composé de quatre éléments principaux comme il peut être présenté en Figure I.1

- deux solides correspondant aux corps contact.
- le milieu interracial ou 3^{éme} corps,
- l'environnement.

Dans le Tableau I.1, on représente dans la première colonne les principaux paramètres définissant une situation et précisant les conditions initiales de l'expérimentation ou de l'utilisation. La deuxième colonne se rapporte aux phénomènes les plus communément

observés, décrits et commentés dans la littérature. Quant à la troisième colonne, elle décrit les processus qui contribuent aux endommagements des surfaces lors contact [4]

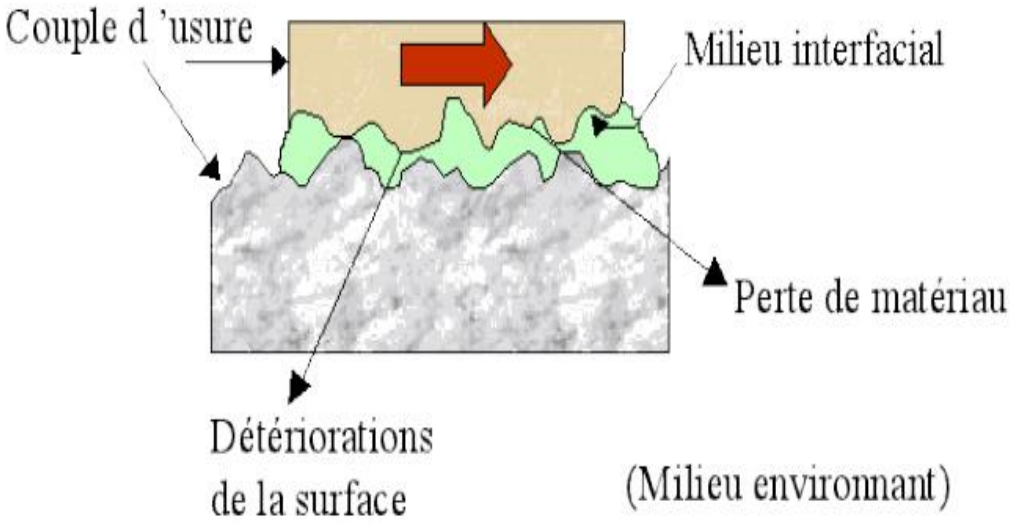


Figure I.1 : structure du système tribologique. [4]

Variables opérationnelles	Phénomènes observés	Processus d'usure
Mode de contact	Résistance au déplacement	Adhésion
Etat de surface	Vibration	abrasion
Charge	Phénomène thermique	Erosion(cavitation)
Vitesse	Transformation superficielle	Déformation
Ambiance (lubrification)	Transformation structurale	Fatigue de contact (fretting)
Matériaux	Perte de masse	Corrosion

Tableau I.1 Principaux éléments relatifs à une situation tribologique

V. Circuit tribologique

Au cours du frottement, les particules du troisième corps sont constamment en mouvement et sont soumises à des gradients de vitesse. Cette circulation de matière à l'intérieur et à l'extérieur du contact est définie sous le terme de **circuit tribologique**, concept proposé par Y. Berthier [5] [6] pour compléter celui des mécanismes d'accommodation des vitesses et comprendre la relation entre le troisième corps et l'usure dans un contact donné. Il s'agit d'une

représentation en deux dimensions des débits de troisième corps dans un contact élémentaire Figure I.2.

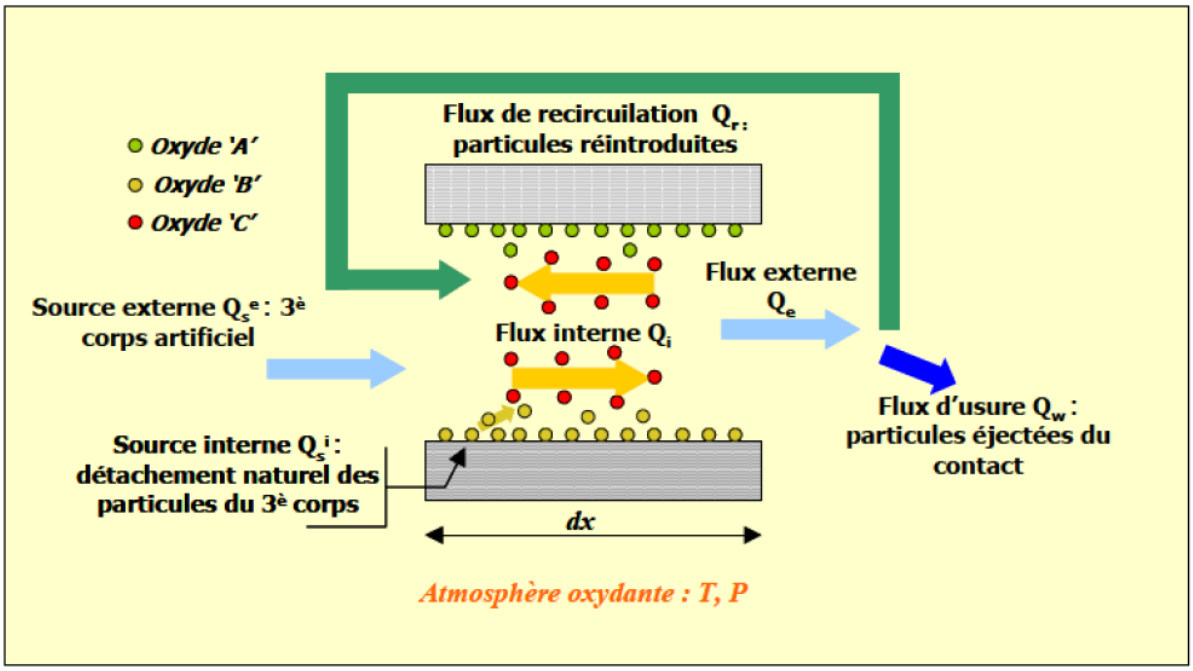


Figure I.2 Représentation schématique de circuit tribologique dans le cas d'un contact entre deux solides. [7]

Suivant les mécanismes de dégradation de surface qui seront décrits dans le paragraphe suivant, des particules peuvent se détacher des premiers corps du fait de leur dégradation. Il s'agit d'une source interne qui conduit à la formation d'un troisième corps naturel dans le contact (débit source interne). L'introduction d'un troisième corps artificiel (lubrifiant solide ou liquide) correspond à une source externe (débit source externe). Ces particules de troisième corps peuvent rester piégées dans le contact ou bien être évacuées hors du contact. On parlera alors de débit interne et externe. Le débit interne représente la circulation du troisième corps dans le contact.

Le débit externe est le débit de troisième corps qui s'échappe du contact. Il se divise en deux composantes : un débit de recirculation lorsque les particules sont réintroduites dans le contact et un débit d'usure lorsque les particules sont définitivement perdues pour le contact et ne participent plus à l'accommodation de vitesse.

Dans cette approche, l'usure n'est pas relative à la dégradation des premiers corps (ce qui correspondrait au débit interne de troisième corps. Elle est ici représentée par la sortie des particules hors du contact, qui deviennent alors des particules (débris) d'usure. Tant que les particules restent dans le contact, elles peuvent avoir un rôle actif à jouer (support de charge, accommodation des vitesses,…). [8]

VI. Le concept de troisième corps

Ce concept a été introduit par Godet dans les années 1970 puis des notions liées à ce concept ont été développé par Berthier. Ils ont créé ce concept mécanique de façon à faire un parallèle entre la théorie de la lubrification et l'action des particules sur le frottement qui peut parfois être assimilée a de la lubrification solide. En effet, ils ont observé que la production de particules dans un contact n'était pas toujours néfaste pour les surfaces mais qu'elle pouvait leur permettre d'être protégées par la circulation de ces particules.

D'après le concept du troisième corps, l'usure n'est donc pas définie comme le mécanisme de détachement des particules mais elle est plutôt décrite comme le processus qui comprend [10]

- le détachement des particules ;
- leur action dans le contact ;
- et enfin, l'éjection de ces particules du contact, puisque c'est lors de cette éjection que l 'usure des surfaces va réellement se produire.

Pour conceptualiser ce troisième corps, différentes notions sont utilisées et décrites par la suite, il s'agit du triplet tribologique dans lequel s'inscrit le troisième corps, des mécanismes d'accommodation de la différence de vitesse ainsi que des débits de troisième corps. A travers ces différentes notions, nous allons voir qu'il est parfois nécessaire pour un matériau de sacrifier sa surface afin de sauvegarder son volume.

VI.1 Le triplet tribologique

Le triplet tribologique est compose de trois éléments distincts qui constituent le contact et qui sont : le système mécanique, les premiers corps et le troisième corps

Figure I.3.

Le système mécanique comprend le contact en mouvement relatif. A l'échelle d'un laboratoire, ce système peut être un tribomètre pion-disque. A l'échelle industrielle, il peut s'agir d'une cage de laminage ou bien encore d'un contact roue-rail (boggie-voie) dans le cas du déplacement d'un train. Il intervient, au sens physico-chimique, par l'environnement qu'il impose et mécaniquement, par l'équilibre des forces internes et externes qu'il subit. Sur la Figure I.3, nous pouvons voir que le système mécanique est représenté par la combinaison d'un ressort et d'un amortisseur. Ce système intervient donc à travers la raideur mécanique qu'il impose au contact. Par conséquent, le tribomètre impose sa signature au comportement tribologique des matériaux. [9]

Les premiers corps sont les matériaux qui bordent le contact. Ils interviennent par leur géométrie et leurs propriétés thermoplastiques et physico-chimiques, qui, pour les sollicitations transmises par le système mécanique, conduisent à leurs déformations qui vont alors définir les zones élémentaires de contact. L'intervention des matériaux est alors indirecte car elle s'effectue via la géométrie des premiers corps. En revanche, leur action est directe sur les zones élémentaires de contact ou cette fois les matériaux répondent aux sollicitations tribologiques telles que la force normale et le déplacement imposé à travers leur déformation, leur usure.

Enfin, le troisième corps est défini comme le volume de matière qui sépare les premiers corps.

Les premiers corps et le troisième corps interviendront dans le concept tribologique en termes de sites d'accommodation.

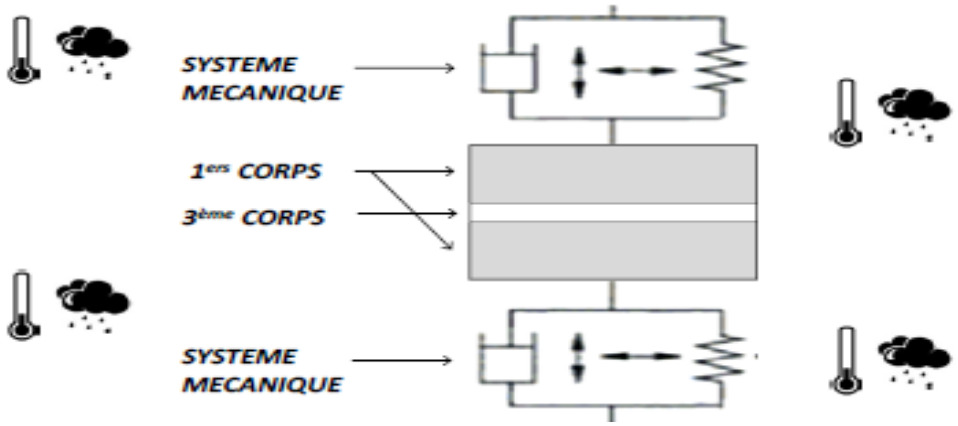


Figure 3 :

Figure I.3 Représentation schématique du triplet tribologique. [9]

VI.2 Le troisième corps

Dans le concept élaboré par l'équipe de Godet, d'un point de vue matériau, le troisième corps est défini comme la zone où la composition chimique est différente de celle des constituants des premiers corps. D'un point de vue cinématique, le troisième corps est défini comme l'épaisseur dans laquelle la différence de vitesse entre les premiers corps est accommodée, ce qui met en avant son caractère lubrifiant.

Le troisième corps a quatre fonctions principales qui sont :

- La transmission de la charge normale aux premiers corps.
- L'accommodation de la différence de vitesse entre les premiers corps.

- La séparation des premiers corps, afin d'éviter leur interaction directe ce qui contribue à la diminution de leur dégradation ;
- La transformation de l'énergie cinétique en chaleur, qui est ensuite dissipée via les premiers corps ou via le débit de troisième corps.

VI.3 Les mécanismes d'accommodation de la différence de vitesse

Dans le concept du troisième corps, il existe donc une différence de vitesse entre les deux premiers corps qui doit être accommodée au niveau du contact. Pour décrire cette accommodation, Berthier et al. a défini la notion de mécanisme d'accommodation, qui se définit comme la combinaison d'un site et d'un mode d'accommodation. Il existe 6 sites et 4 modes d'accommodation de la différence de vitesse qui sont donnes sur la Figure I.4.

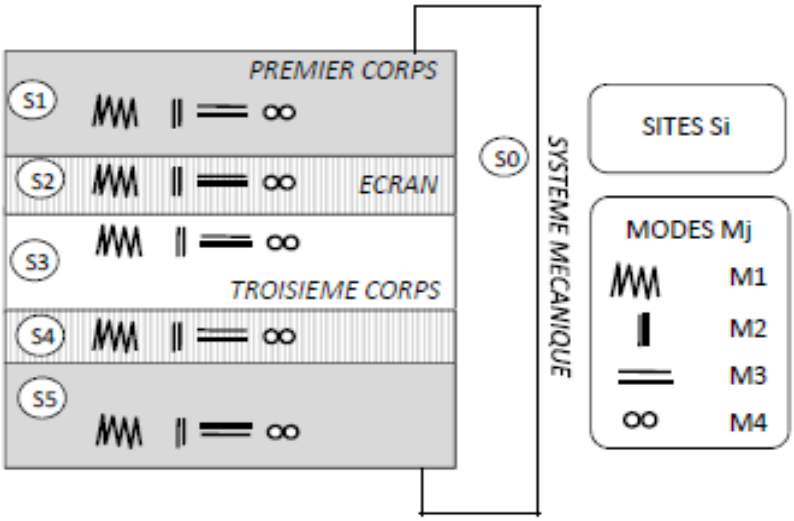


Figure I.4 : Représentation schématique des mécanismes d'accommodation de la différence de vitesse entre les premiers corps. [9]

Un site d'accommodation S représente le point dans l'espace, ou le lieu, où la différence de vitesse entre les premiers corps est accommodée, c'est-à-dire où le gradient de vitesse est pris en charge. Les 6 sites sont :

- S0 : le système mécanique.
- S1 et S5 : les premiers corps.
- S2 et S4 : les écrans.
- S3 : le troisième corps.

VII. Mécanismes d'endommagement des surfaces frottantes

Les premiers corps réagissent aux contraintes locales selon deux types de comportements : des transformations microstructurales et des détachements de particules.

a. Transformations Tribologiques Superficielles

Sous l'effet des sollicitations mécaniques et thermiques, les premiers corps subissent des modifications de leurs propriétés superficielles, conduisant à des transformations de phase et des modifications structurales. L'ampleur de ces changements dépend de la pression (pression hydrostatique et la pression du contact local) et les déformations induites par la température. Ces changements sont connus sous le nom '**Transformations Tribologiques Superficielles'** (Tribologically a Transformed Structures) ou TTS.

b. Détachement de particules

L'apparition de TTS entraîne une modification du champ de contraintes et des déformations admissibles par le matériau, conduisant à un détachement de particules par '**fragilisation**' des surfaces du matériau (particules dont la taille varie de quelques nanomètres à quelques micromètres). Les mécanismes d'usure tels que l'abrasion, l'adhésion etc., peuvent être considérés comme des '**réponses spécifiques**' alimentant le troisième corps.

VIII. Paramètres tribologiques

Pour caractériser une situation tribologique, il importe dans un premier temps, d'identifier les différents contacts et d'extraire les variables opérationnelles qui définissent le fonctionnement de chaque contact.

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 des modes de lubrification.

VIII.1 Les paramètres opérationnels

Ils caractérisent les conditions fonctionnelles du tribosystème. Ce sont, dans la plupart des cas, des variables indépendantes qui peuvent être modifiées pour les tests. Les principaux paramètres opérationnels sont : mode de contact, la charge de contact, la vitesse de contact ; état de surface, l'environnement et le matériau.

a. Mode de contact

Il s'agit de définir la nature et la géométrie du contact. Ces informations participeront à l'évaluation du champ de contraintes imposé au contact. Par nature du contact on entend la définition générale de ce qui constitue le contact : solide/solide, liquide/solide, liquide +

particules/solide, liquide + vapeur/solide...
La géométrie du contact caractérise la forme des surfaces qui limitent les solides au voisinage de la zone de contact. On définit trois types de contact :

- les contacts de type ponctuel,
- les contacts linéiques,
- les contacts surfaciques.

b. La charge du contact

Il s'agit de déterminer le torseur dynamique, c'est-à-dire l'ensemble des forces et moments auquel est soumis le contact. La charge et la manière dont elle est appliquée permettent d'évaluer la nature et le niveau des contraintes auxquelles les couches superficielles sont soumises. La connaissance du champ de contrainte en profondeur est nécessaire pour justifier quantitativement la nature, la qualité et l'épaisseur des traitements ou revêtements de surface, pour évaluer les risques de fatigue de contact… La plage de variation

24 des charges mises en œuvre en génie mécanique est extrêmement large allant du milli newton au méga newton.

c. La vitesse de contact

Ce paramètre consiste à préciser les différents éléments du torseur cinématique (ensemble des vitesses et moments cinétiques) appliqué au contact, c'est-à-dire la nature et la cinématique du mouvement. Suivant l'orientation des composantes de ce torseur au niveau du contact, le déplacement pourra s'effectuer en roulement, glissement ou pivotement.

La vitesse contribue à l'énergie dissipée dans le contact. Elle est aussi l'un des facteurs intervenant dans l'évaluation de la durée de vie des surfaces, combinée au temps de fonctionnement, elle permet le calcul de la distance à parcourir.

d. Etat de surface

Par définition, la surface d'un corps est le lieu des points séparant ce corps du milieu environnant. Elle correspond donc à une discontinuité dans l'aménagement périodique des atomes de celui-ci.

En surface, le nombre de plus proches voisins est différent de ce qu'il est en volume. On parle aussi d'interface solide-gaz, solide-liquide, solide-solide.

La notion d'état de surface comprend :

- l'état physico-chimique (nature, structure, texture des couches superficielles)
- l'état géométrique (ensemble des écarts géométriques de la surface réelle par rapport à la surface géométrique idéale).

Les surfaces présentent des défauts géométriques de différents ordres :

- ordres macroscopiques liés à des écarts de grande amplitude dus généralement aux défauts géométriques de la machine génératrice (écart de forme du 1^{er} et 2^{nd} ordre),
- ordres microscopiques liés à des écarts de faibles amplitudes dus à l'outil de coupe, aux grains abrasifs, aux particules de sablage ou grenaillage, aux vibrations de la machine ou encore aux piqûres de corrosion (rugosité, écarts de forme de $3^{ème}$ et $4^{ème}$ ordre).

En réalité, le terme surface représente une couche d'épaisseur comprise entre 10^{-2} et 10^{-6} mm. La composition chimique et les propriétés mécaniques de cette zone peuvent être très différentes de celles du cœur du matériau. La surface peut être recouverte de films contaminant (gaz adsorbés, produits organiques), d'oxydes et dans le cas de métaux, peut être écrouie. La présence de ces écrans va modifier le comportement tribologiques des corps en contact Figure I.5.

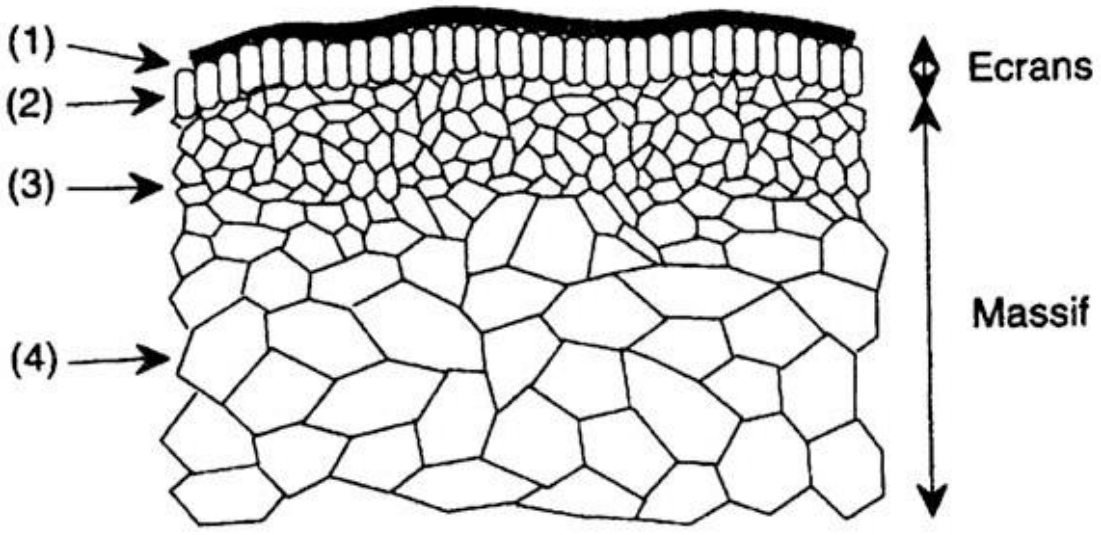


Figure I.5 Vue théorique en coupe d'une surface

La surface est donc l'endroit le plus perturbé d'une pièce. La zone (1) est un film de contamination (0,3 à 3 nm) constitués de couches absorbées. La zone (2) est un film d'oxydes (1 à 10 μm). La zone(3) est une zone mécaniquement perturbée (1 à 50 μm) de structure écrouie ou structure de couche de diffusion. La zone (4) partant de 100 μm est le matériau massif. Lorsque l'usure est limitée à l'enlèvement des films de surface, elle est appelée « usure douce ». Ces écrans détruits peuvent êtres reconstitués par réaction avec l'environnement. Lorsque l'usure s'étend au massif, elle est appelée usure « destructrice » ou « sévère ».

Les surfaces de contact de deux corps frottant peuvent ne pas jouer des rôles symétriques. Par exemple, dans le cas du glissement d'un pion sur un disque : un point de la surface de contact du pion est constamment sollicité, alors qu'un point de la piste du disque ne l'est qu'au passage du pion. Les distances cinématiques sont alors différentes.

L'exposition au champ de contraintes développées dans le pion et le disque ne sera pas la même, et effets de fatigue vont être différents. Les usures du pion et du disque différeront également ainsi que les coefficients de frottement. Par exemple, pour des conditions expérimentales identiques, un pion de cuivre frottant sur un disque d'alumine présente un coefficient de frottement type Coulomb de 0,2 qui s'élève jusqu'à 1,5 lorsque le pion est en alumine et le disque en cuivre.

Le contact peut être selon les géométries des corps :

- ponctuel (sphère/sphère, sphère /plan,…)
- linéaire (cylindre/plan)
- surfacique (rotule dans sphère)
- conformel (cylindre/cylindre) ou contraformel (cylindre dans cylindre creux).

Le contact statique entre deux solides ne s'effectue donc pas sur la surface apparente commune aux deux solides, mais sur un ensemble de zones discrètes (aussi appelées aspérités) dont la somme des aires donne la surface réelle de contact. Dans le cas d'un frottement de glissement, les zones de contact sont sans cesse renouvelées. Le rapport aire réelle sur aire apparente peut varier de façon significative : il est alors plus facile de raisonner en terme de force appliquée plutôt que de pression.

La surface réelle de contact est sensible à la charge appliquée. De nombreuses études se sont intéressées à la variation de l'aire réelle de contact en fonction du mode de déformation

des aspérités : élastiques pour le modèle d'Archard (années 50), élasto-plastiques pour le modèle de Greenwood-Williamson (années 60). Plus récemment, Robbe-Valloire & al. ont publié un modèle intégrant les déformations élastiques, élasto-plastiques mais aussi totalement plastiques des aspérités.

e. L'environnement

Il s'agit de préciser le milieu dans lequel évolue le contact. Ce milieu intervient sur le comportement tribologique du système par :

- sa nature : liquide ou gaz, composition chimique,
- sa température, son débit éventuel,
- ses propriétés mécaniques et physiques qui interviennent dans le comportement mécanique du contact, dans l'énergie mise en jeu et dans sa dissipation,
- ses propriétés chimiques : la réactivité du milieu ambiant avec les matériaux constituant les solides en contact est à l'origine de la création ou de la destruction des films superficiels dont la présence modifie considérablement le comportement du contact ; un environnement oxydant favorise la formation ou le maintien de films, un milieu neutre limite leur durée, un milieu réducteur la diminue.

f. Matériaux

Bien que les caractéristiques de frottement ne soient pas une propriété intrinsèque des matériaux, ceux-ci peuvent intervenir d'une manière décisive dans le comportement général du système tant par leurs propriétés mécaniques que physicochimiques

VIII.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 :

- Les éléments (1) et (2).
- L'interface (3^{eme} corps, lubrifiant, graisse, sable/eau)
- L'environnement (air, huile, poussière)

Une distinction doit être faite entre les systèmes ouverts qui permettent l'écoulement et les systèmes fermés dont les composants sont soumis aux processus de frottement et usure de manière continue.

Tribosystéme	**Elément(1)**	**Elément(2)**	**Interface(3)**	**Environnement(4)**	**De système**
Boit de vitesse	**Engrenage**	**Engrenage**	**Lubrifiant**	**Air**	**fermé**
Roue/ rail	Roue	Rail	3^{eme}corps	Air	Ouvert
Glissière	Billes	Support	Graisse	Air	Ouvert
Roulement	Pneu	Cage	Lubrifiant	Huile	Fermé
Pneu/route	Pneu	Sol	Sable. eau	Poussière	Ouvert
Oulin	Roue	Cage	Minerais	Air	Ouvert

Tableau I.2 Constituants structuraux des tribosystèmes

VIII.3 Paramètre d'interaction

Ils caractérisent l'action des paramètres opérationnels sur les composants des tribosystèmes, ainsi que le mode de contact (distribution des contraintes de contact) ou le type de lubrifiant pour un couple de matériaux donnés. Ces conditions peuvent être associées aux processus de frottement et d'usure (adhésion, abrasion, …). Les forces d'interactions entre les surfaces en contact en dépendent, de manière complexe, de la nature physico-chimique et des énergies des surfaces. Les contraintes de contact dépendent de la géométrie du contact, de l'élasticité, viscoélasticité, plasticité ou dureté des matériaux et de la force externe statique ou dynamique. Les modes de déformations au contact sont gouvernés par topographie (état de rugosité) des surfaces.

IX. Mesures tribométriques

Le coefficient de frottement **μ** avec la condition statique **μs** ou dynamique **μd**, au glissement, ou bien en roulement est dans ce cas **μr**.

La perte de masse **Δw**, la perte de volume **Δv** déterminée par l'enregistrement de variation géométrique mais souvent par une corrélation entre la masse spécifique et la perte de masse mesurée.

L'énergie de frottement **E*f***.

Le taux d'usure **k**.

Le produit **P*V.**

Les formules et explications nécessaires à ces paramètres sont données dans le chapitre usure.

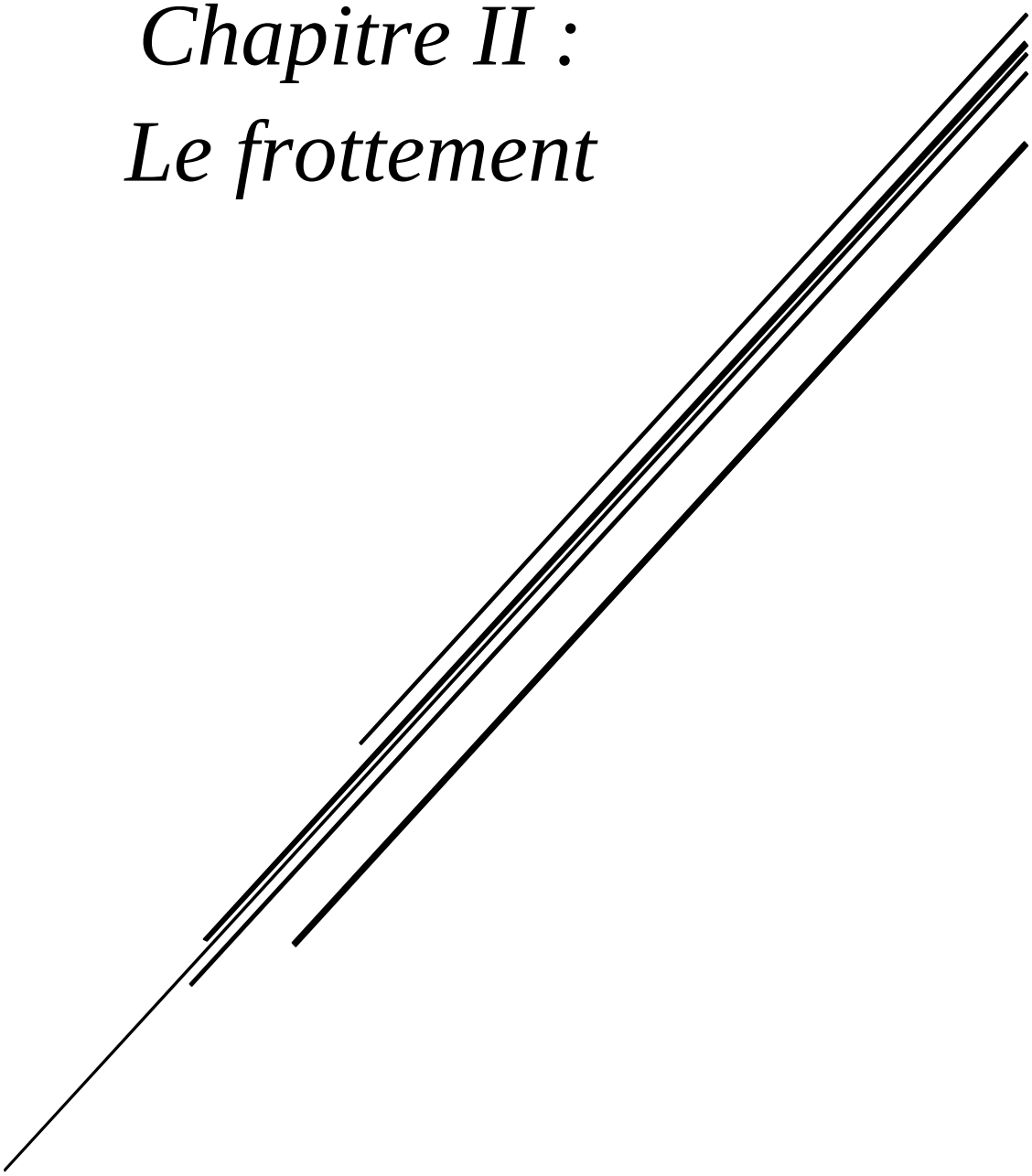
X. Conclusion

La tribologie est une science très vaste. Elle intéresse tous les domaines d'activité car l'univers technique qui nous environne est essentiellement régi par des contacts. La tribologie permet d'étudié, comprendre et d'apporter des solutions pour les problèmes liés à l'usure et le frottement en s'appuyant sur les évolutions des techniques industrielles et des théories scientifiques et à l'aide des dispositifs expérimentaux très variés pour crées de nouvelles techniques et moyens qui permet un bon fonctionnement dans les contact mécaniques.la tribologie entre en jeu de façon significative dans des nombreux domaines industriels (conservation d'énergie, productivité, développements et fabrication de nouveaux équipements), elle intervient dans les systèmes vivants (les articulations humaines).

PREMIERE PARTIE

Chapitre II :

Le frottement



I. Introduction

On peut considérer que tous les aspects presque de nos vies sont affectés par les phénomènes de frottement, que ce soit de manières positive ou négative. Nous tenons en compte comme évident les effets positifs. Nous nous ne rendons pas compte de l'importance du frottement dans la vie quotidienne. C'est le cas pour des actions comme démarrer, arrêter, faire tourner une voiture, fixer des pièces, tenir un objet dans la main…etc.

Avec le frottement, il existe l'usure, qui est un vaste domaine couvert par la tribologie.

L'usure des surfaces frottantes qui en résulte se traduit, le plus souvent en cours de fonctionnement, par une élévation de température, des modifications géométriques et dimensionnelles, des transformations physico-chimiques ou encore par des enlèvements de matière. Par ses aspects, le frottement et l'usure sont des phénomènes complexes dont l'étude nécessite de multiples approches.

On est toujours intéressé à réduire, voire supprimer l'usure afin de prolonger la durée de fonctionnement et la fiabilité des machines et des mécanismes.

Ce n'est, toutefois, que depuis peu de temps que des études spécifiques et approfondies sur l'usure sont entreprises. En effet, l'usure est toujours liée au frottement.

II. 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. [10]

- 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. Pour d'autres

normes le frottement se résume à l'action agissant contre le mouvement relatif de corps en contact.

III. Lois empiriques du frottement

Les premiers travaux que l'on connaît sur le frottement sont ceux de Léonard de Vinci au début du 16ème siècle [11]. Mais, il faut attendre 200 ans pour que ces travaux aient un statut académique. En effet, Amontons, en 1699, puis Coulomb, en 1780, ont été les premiers à formuler les lois du frottement solide que nous connaissons actuellement.

Les lois d'Amontons se résument en deux postulats :

- La force de frottement ***Ft*** est proportionnelle à la charge normale appliquée Fn.
- La force de frottement ***Ft*** est indépendante de la surface apparente de contact.

La première loi d'Amontons montre qu'il n'y aura pas de glissement entre deux solides en contact, tant que la force tangentielle Ft, nécessaire pour déplacer le solide, est inférieure à une force minimale ***Fs***. Lorsque la force tangentielle atteint cette valeur seuil, le solide glisse.

$$Fs = \mu s \; Fn \qquad \text{(II.1)}$$

μs est appelé coefficient de frottement statique.

Une fois le solide mis en mouvement, une force ***Fd*** est nécessaire pour maintenir le glissement à vitesse constante. L'expérience montre que cette force est également proportionnelle à la charge normale appliquée :

$$Fd = \mu d \; Fn \qquad \text{(II.2)}$$

μd définit le coefficient de frottement dynamique. μd est généralement plus petit que μs.

$$\mu d \leq \mu s \qquad \text{(II.3)}$$

Selon la deuxième loi, l'aire apparente de contact n'influe pas sur la force de frottement *Ft*. En reprenant les expériences de Léonard de Vinci (Figure II.1), Amontons a constaté empiriquement que quel que soit la surface glissante d'un bloc, son frottement est uniquement proportionnel à son poids [12].

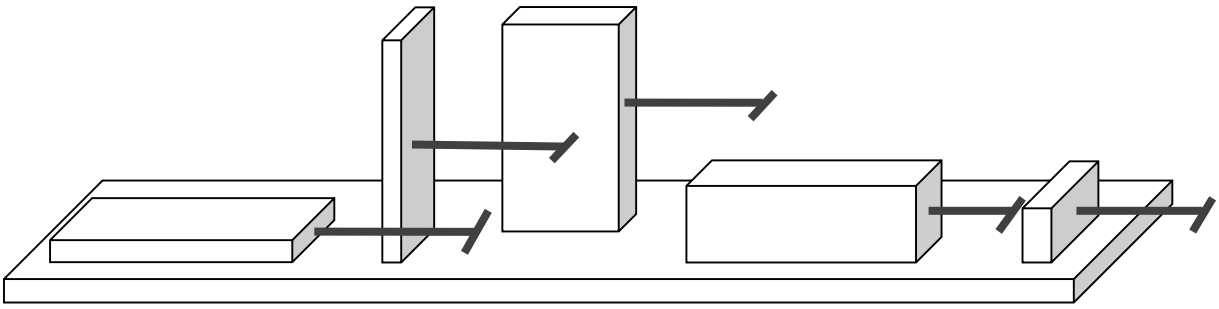


Figure II.1 Gravures illustrant les expériences de Léonard de Vinci [12].

Ce résultat très contre-intuitif a défié l'imagination des scientifiques plusieurs siècles avant que Bowden et Tabor [13] dans les années 50, proposent une explication tenant compte de l'effet de la rugosité des surfaces en contact (Figure II.2), paramètre non considéré dans la théorie d'Amontons –Coulomb.

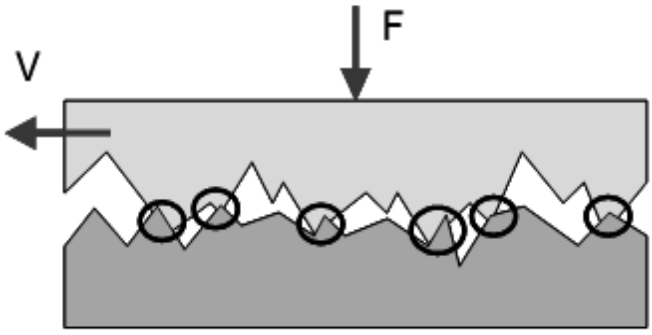


Figure II.2 Contact entre deux surfaces rugueuses [12]

IV. Comportement du coefficient de frottement

Le coefficient de frottement dynamique, dans un glissement à sec (sans lubrification), est affecté par un nombre de paramètres plus important que le coefficient de frottement statique et a peu de signification sans une définition précise des conditions de frottement. [14]
Les principaux paramètres qui interviennent sont :

a. Vitesse de glissement

La valeur du coefficient de frottement est généralement différente à l'arrêt que lorsque les corps glissent l'un sur l'autre. On distingue :

- Le coefficient de frottement statique (à l'arrêt) μ0.
- Le coefficient de frottement dynamique (avec glissement) μ.

Dans le cas de métaux secs, le coefficient de frottement dynamique est généralement plus petit qu'à l'arrêt (**Figure II.3**, courbe (1)) ; il atteint rapidement la valeur dynamique lorsque la vitesse dépasse quelques cm/s. A très grande vitesse, plus de 150m/s, le coefficient de frottement des métaux diminue fortement, il peut tomber jusqu'à 0.02, parce que le métal fond dans les zones de contact et forme un film lubrifiant.

Certains matériaux non métalliques présentent au contraire une augmentation du frottement avec la vitesse, courbe (2) de la **Figure II.3**.

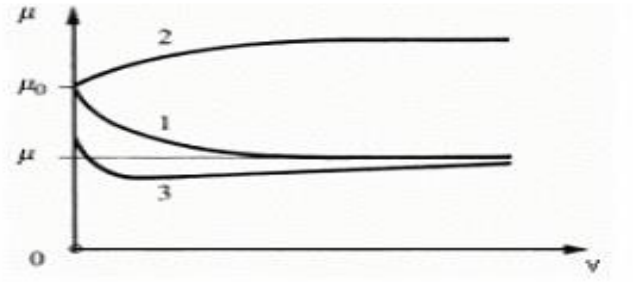


Figure II.3 Influence de la vitesse sur le coefficient de frottement

La différence entre le coefficient de frottement dynamique et le frottement statique est plus marquée avec les polymères qu'avec les métaux.

Si les surfaces sont abondamment lubrifiées en régime de frottement mixte, courbe(3) de la même figure, le coefficient de frottement statique est plus bas qu'en régime sec et diminue relativement moins avec le glissement, puis il augmente lentement du fait du cisaillement du liquide ou de la graisse.

On est habituellement intéressé par le frottement à des petites valeurs de vitesse 0,5m/s pour éviter l'échauffement et l'usure.

b. Chemin de glissement parcouru

La **Figure II.4** représente l'allure de l'évolution du coefficient de frottement dynamique de surfaces techniques sèches avec le chemin de glissement.

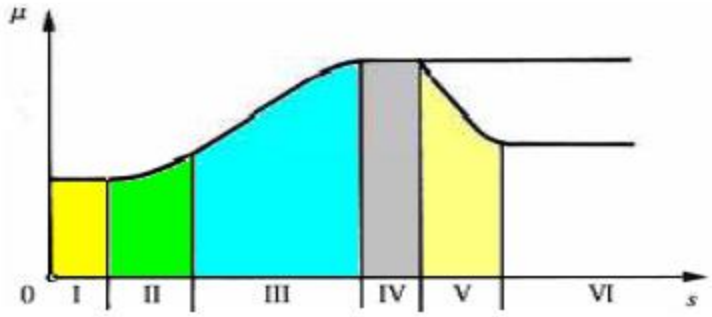


Figure II.4 Evolution du frottement avec la distance de glissement.

I : Les surfaces sont initialement propres, le frottement résulte principalement de phénomènes de labourage et de déformation.

II : Le frottement commence à croître lentement à cause de petits arrachages de matière.
Avec des surfaces lubrifiées, le stade I persiste longtemps et le stade II peut faire défaut.
III : Le coefficient de frottement croît parce que les débris d'usure entre les surfaces s'incrustent dans l'une ou l'autre des surfaces en provoquant un intense labourage.
IV : Le coefficient de frottement se stabilise lorsque le nombre de nouveaux débris d'usure est égal au nombre de débris qui quittent la surface.
V : On observe parfois qu'un matériau dur se polit lorsqu'il frotte contre une surface tendre. Le coefficient de frottement diminue parce que le labourage est moins intense.
VI : Si les deux surfaces se polissent et que les débris d'usure sont enlevés ou assez profondément incrustés dans la surface tendre pour ne pas rayer la surface dure, le coefficient de frottement prend une valeur constante de fin de rodage. Ces stades dépendent des matériaux, des conditions expérimentales, de la contamination des surfaces et des conditions ambiantes.

c. Etat de surface

Le coefficient de frottement est relativement grand lorsque les surfaces sont trèsrugueuses.

d. Nature des métaux

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.

e. Charge normale appliquée

La **Figure II.5** donne un exemple de la variation du coefficient de frottement μ 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.

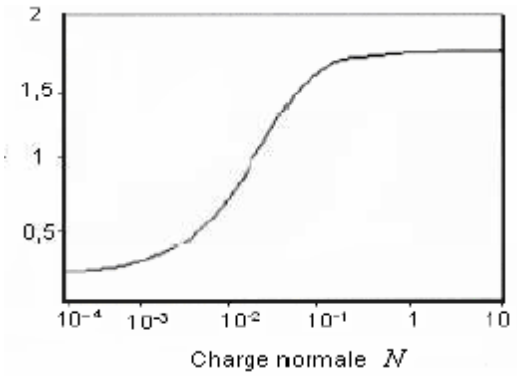


Figure II.5 Variation du coefficient de frottement μ en fonction de la charge normale N

Avec l'augmentation de la charge appliquée, le film d'oxyde (1à10nm) qui joue un rôle critique dans le contact glissant est progressivement détruit, entraînant un eaugmentation progressive du coefficient de frottement qui se stabilise à une valeur correspondant au contact métal-métal.

f. Température ambiante

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 de là.

V. Type de frottement

Il existe trois types de frottement :

a. Frottement sec

Le frottement sec désigne l'ensemble des phénomènes qui naissent dans la zone de contact entre deux corps, en l'absence de lubrification, et qui s'opposent au glissement de ces corps. S'il y a glissement relatif entre les deux corps en contact, on parle du frottement

dynamique, sinon le frottement est dit statique. La compréhension des mécanismes entrant enjeu est restée longtemps très lacunaire, malgré l'intérêt porté à ce problème depuis déjà de nombreuses années. Ce n'est que ces dernières décennies, grâce à l'accumulation de données expérimentales et de résultats théoriques, que des progrès importants ont été faits [12].

Cependant, des progrès importants ont été réalisés à la suite des travaux de Holm en 1938, qui montrent que les aspérités en contact se déforment plastiquement et peuvent se souder, ainsi la force de frottement est directement reliée aux contraintes de cisaillement des jonctions formées. Le modèle de Bowden et Tabor [13] suppose que le frottement sec entre deux surfaces rugueuses est dû essentiellement à deux processus physiques fondamentaux : le cisaillement des micro-jonctions adhésives formées au niveau des points de contact et le labourage des surfaces par les aspérités. La force du frottement sec est ainsi la somme d'une force de cisaillement due à l'adhésion et d'une force de déformation due au labourage [13, 15].

$$F_t = F_{ad} + F_{def} \qquad \text{(II.4)}$$

b. Frottement hydrodynamique

Les surfaces en mouvement relatif ne sont pas en contact par leurs aspérités parce qu'elles sont séparées par un épais film de lubrifiant. Le coefficient de frottement est faible et ce type de frottement est indiqué pour l'utilisation à haute vitesse ou lorsque la force normale est élevée [16].

c. Frottement onctueux

C'est un frottement de niveau intermédiaire entre le frottement sec et hydrodynamique : le film du liquide absorbé en surface ou formé par réaction chimique est de faible épaisseur. Le degré d'adhérence de ce film avec la surface détermine son efficacité. Ce régime offre un coefficient de frottement plus faible que le régime sec [16].

VI. Les coefficients de frottement

Deux types de frottement de surface

Lorsqu'il y a deux objets en contact, il y a du frottement de surface. Par contre, on peut définir deux types de frottement : statique et cinétique [17].

Statique : Force de frottement agissant sur un **objet immobile** par rapport à la surface de contact.

Symbole: $\vec{f}_s$

Unite (Newton): $[\vec{f}_s] = N$

$\vec{a} = 0$ $\vec{v} = 0$

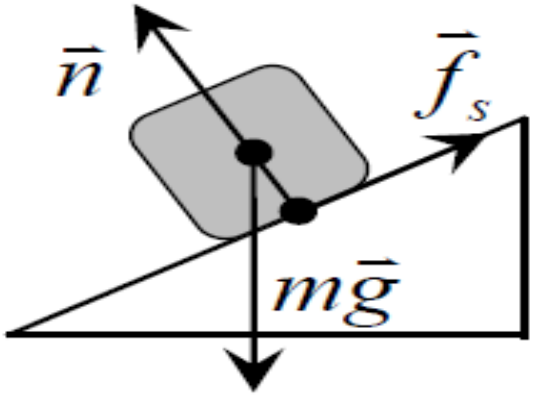


Figure II.6 Frottement statique

Cinétique : Force de frottement agissant sur un **objet en mouvement** par rapport à la surface de contact.

Symbole : $\vec{f}_c$

Unité (Newton) : $[\vec{f}_c] = N$

$\vec{a} = 0$ ou $\vec{a} \neq 0$

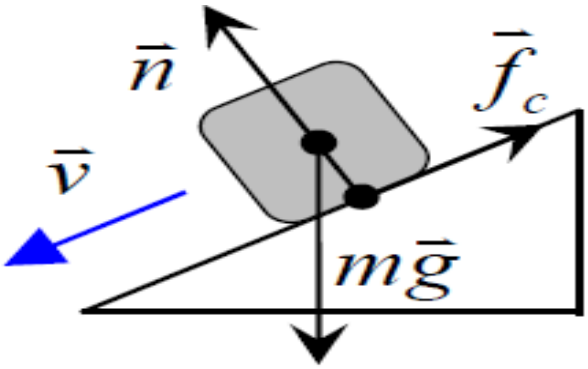


Figure II.7 Frottement cinétique

VI.1 Le frottement cinétique

Expérimentalement, le **frottement cinétique** est **proportionnel** à la **force normale** *n* appliquée par l'objet qui produit le frottement et aux deux types de surfaces en contact.
Plus la force normale sera grande, plus le frottement cinétique sera grand. Ce frottement s'applique seulement si l'**objet** subissant le frottement est en **mouvement par rapport** à sa **surface** de contact :

$$f_c = \mu_c \, n \qquad \text{(II.5)}$$

Où f_c : Force de friction cinétique (N).
μ_c : Coefficient de frottement cinétique (pas d'unité).
n : Force normale (N).

VI.2 Le frottement statique

Lorsque l'**objet** est **immobile par rapport** à la **surface**, il y a un **frottement statique**. Cependant, cette force ne possède pas toujours le même module. Elle s'ajuste afin de respecter la 2ième loi de Newton :

$\sum \vec{F} = m\vec{a} \rightarrow \quad f_s - \sum F_{\text{parallèle à la surface}} = 0$ (Accélération égale zéro, car l'objet reste immobile)
Le rôle du frottement statique est d'annuler l'action des autres forces voulant provoquer un mouvement parallèle à la surface de contact jusqu'à une valeur limite $f_{s\,max}$:

$$f_{s\,max} = \mu_s \, n \qquad \text{(II.6)}$$

ou f_{smax} : Force de frottement statique maximale (N).
Les coefficients de frottement dépendent de la nature des surfaces en contact et de conditions, *humide ou sec.*

Le Tableau II.1 donne des valeurs approximatives de coefficient de frottement statique pour des surfaces sèches. Le coefficient de frottement cinétique est environ 25% plus faible.

.

Surface en contact	μs	μc
Acier sur acier (sec)	0.60	0.40
Acier sur acier (visqueux)	0.1	0.05
Acier sur bois	0.2 à 0.6	-
Acier sur glace	0.04	-
Aluminium sur aluminium	1.10	-
Aluminium sur acier	0.61	0.47
Bois sur bois	0.25 à 0.50	-
Câble en acier sur polie en acier	0.20	0.15
Caoutchouc sur acier	0.40	0.30
Caoutchouc sur béton	0.50 à 0.90	-
Caoutchouc sur glace	0.05 à 0.30	-
Pneus en bon état sur pavage sec	0.90	0.80
Pneus usés sur pavage humide	0.10 à 0.20	0.05 à 0.12
Téflon sur téflon	0.04	-
Téflon sur acier	0.04	0.04

Tableau II.1 Valeurs approximatives de coefficient de frottement statique pour des surfaces sèches.

VII. Réduction du frottement et de l'usure

Maîtriser la grandeur et l'effet du frottement sur le comportement des pièces en contact entraînera une protection contre l'usure adhésive générée de ce contact. Pour réduire le frottement on peut ainsi agir soit :

VII.1 Sur la conception technologique et géométrique

Elle consiste à diminuer les échauffements inter-faciaux et à veiller sur les concepts technologiques suivants :

a. Réduction des pressions de contact et de vitesse

La pression de contact entre les pièces ainsi que leur vitesse de fonctionnement influent beaucoup sur l'usure, il croît avec ces deux paramètres.

b. Refroidissement convenable des surfaces

Il peut s'effectuer soit par :

- Le choix des matériaux thermo-conducteurs.
- Le choix des pièces favorisant la dissipation de la chaleur (l'augmentation du volume, donc de la masse, permet de diminuer l'échauffement).
- L'emploi d'un fluide réfrigérant qui peut être le lubrifiant (graissage par circuit d'huile avec refroidissement de celle-ci).

c. Amélioration de l'état de surface

Soit par des procédés mécaniques (rectification, rodage, polissage etc.) ou par des procédés chimiques et thermiques (revêtement de surface, durcissement etc.).

d. Réduction du risque de grippage

Elle est obtenue indépendamment du refroidissement, par le choix des deux matériaux en contact, ne pouvant pas se soucier

La réduction de l'usure est obtenue par l'emploi de métaux durs, compacts, à structure fine, par certains traitements de surface tels que cémentation et trempe, nitruration, sulfinisation ainsi que l'amélioration des états de surfaces (rectification, rodage, polissage etc.).

VII.2 Interposition d'un film lubrifiant

La deuxième possibilité de protéger les deux surfaces antagonistes contre l'usure adhésive est l'interposition entre les deux surfaces d'un filin lubrifiant ou autolubrifiant à faible résistance au cisaillement. Le film peut être (dépôts superficiels) :

- un métal mou (Sn, Cu, In) déposé en faible épaisseur sur un substrat très dur (coussinets minces, garnitures d'antifriction etc..),
- des sels métalliques autolubrifiants tels que les sulfures, les chlores, les phosphates apportés soit par traitement de surface (sulfinisation) soit par formation in situ, par action d'additive extrême pression incorporée dans le lubrifiant (additifs soufrés, chlorés et phosphorés essentiellement),
- des composés possédant une structure favorables, se cisaillant facilement par clivage tels que graphite, bisulfure de molybdène (MoS_2),

- des matières plastiques, tels que les matériaux stratifiés (permaly, céleron, textolite), ce sont des matériaux constitués de couches de papier, tissu, bois, etc., imprégnés de résine synthétique, fortement comprimés et agglomérés par polymérisation ou polycondensation de la résine. Le nylon et le rilsan sont des résines synthétiques possédant une grande résistance mécanique, une grande résistance à l'usure, un faible coefficient de frottement, une marche silencieuse. Le téflon (polytétrafluoréthylène) possède un faible coefficient de frottement, une grande résistance à l'usure, une grande inertie chimique et une résistance à la chaleur et au froid.

VIII. Caractéristiques du facteur de frottement

Léonard de Vinci, Amonton puis Coulomb ont exprimé les lois de base générale caractérisant le frottement, qu'ils ont exprimé de la manière suivante :

- La force de frottement est proportionnelle à la charge normale ;
- La force de frottement est indépendante de l'aire apparente de contact ;
- La force de frottement est indépendante de la vitesse de glissement ;
- Le facteur de frottement est indépendant de la charge ;
- Le facteur de frottement dépend de l'état de surface ;
- Le facteur de frottement dépend de l'environnement.

Ces lois sont assez bien vérifiées en première approximation et peuvent s'utiliser pour un premier dimensionnement des composants. Il est néanmoins souvent constaté, lorsque la plage de variation des paramètres devient importante, que ces lois ne sont plus représentatives du comportement des matériaux. Il convient alors de mettre en œuvre des lois de frottement plus complexes.

D'une manière générale, on observe que le facteur de frottement a tendance à décroitre lorsque la vitesse de glissement augmente. Selon [18], la variation du facteur de frottement avec la charge présente une tendance inverse.

Il présente une valeur sensiblement constante pour les faibles valeurs de charge, un domaine de croissance, et une stabilisation à forte charge.

IX. Conclusion

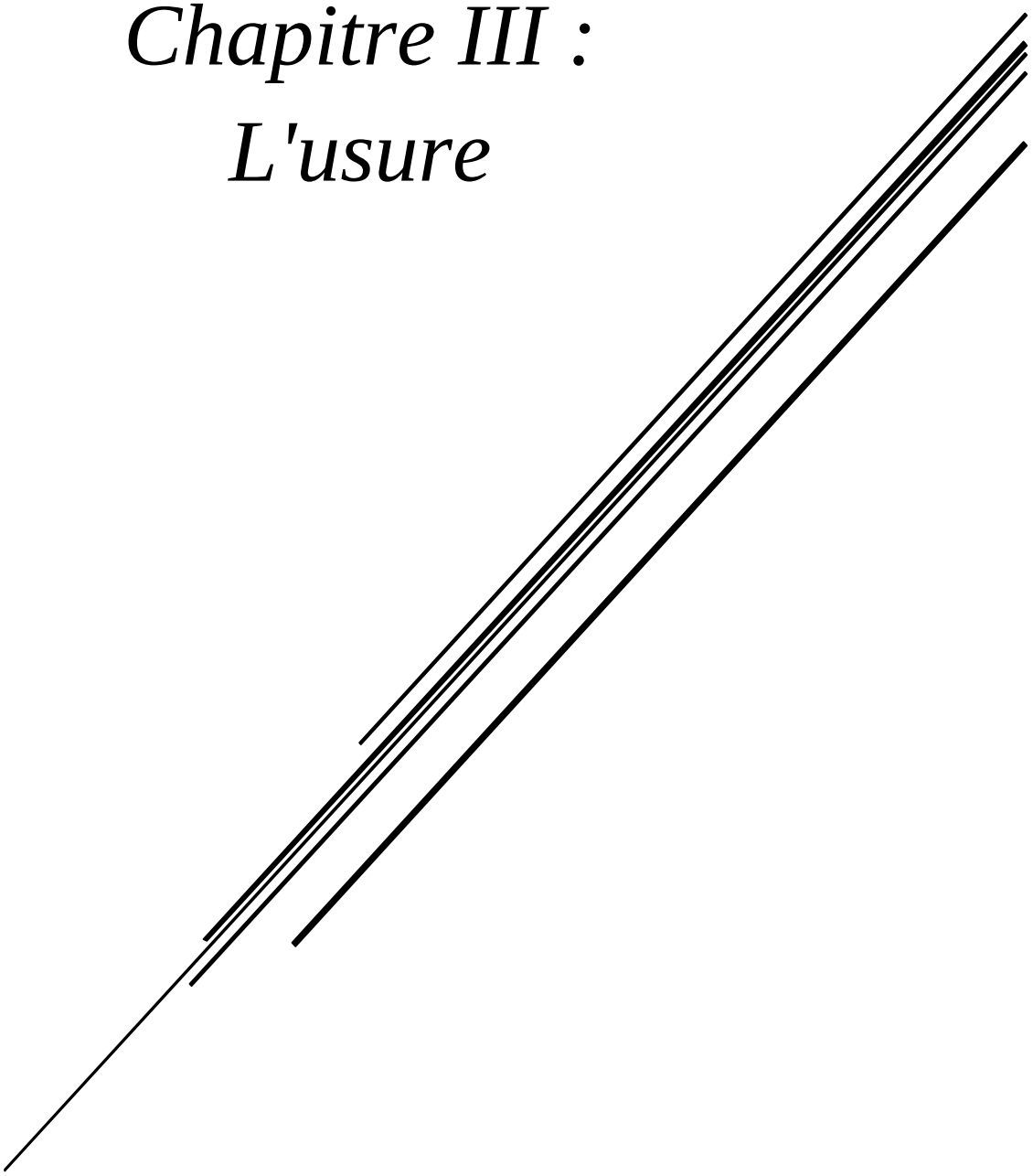
Le coefficient de frottement est bien établi, mais légèrement mal compris. C'est un paramètre commode et utile pour la construction, mais le soin devrait être pris en lui attribuant une signification fondamentale. Pour des centaines d'années, les coefficients de frottement ont atteint beaucoup d'objectifs utiles, comme faciliter la conception des machines et des bâtiments, amélioration des dispositifs pour la sûreté (comme freins, pneus,…), et amélioration du processus industriel.

Les données statiques et cinétiques du coefficient de frottement énuméré dans les tables ne devraient pas être appliquées aux situations considérablement différentes de celles employées pour les obtenir. Les caractéristiques du comportement du frottement, tels que le rodage et la stabilité de la force de frottement, peut-être plus important pour la conception et l'optimisation des machines que la valeur moyenne seule du coefficient de frottement.

PREMIERE PARTIE

Chapitre III :

L'usure



I. Introduction

La définition de l'usure est un problème difficile et sujet à discussion. Elle est souvent définie par la perte de matière ou de fonction d'un mécanisme suite à une détérioration due au frottement. Il n'existe pas d'unité standard de l'usure : l'unité la plus souvent utilisée est le taux d'usure généralement exprimé par la masse perdue rapportée à la distance parcourue ou à la surface de contact. Ce taux d'usure peut être inadapté dans plusieurs cas à cause de la diversité des mécanismes, des sollicitations et des mécanismes de dégradation.

II. Définition

L'usure est la perte progressive de matériau due à l'interaction de surfaces en mouvement relatif (l'une par rapport à l'autre).

L'usure correspondant à l'ensemble des phénomènes conduisant à des pertes de masse ou à des évolutions géométriques significatives du contact pouvant s'accompagner d'effets secondaires liés au jeu dans le mécanisme en mouvement, à la perte de cote, à l'émission de débris, à l'endommagement de surfaces.

L'usure est généralement combattue à cause de ses effets négatifs, mais elle présente aussi des aspects favorables. L'affûtage d'un outil, la finition d'une surface par rectification, l'écriture de la craie sur le tableau ou du crayon sur le papier sont des exemples d'usures abrasives utiles.

III. Le phénomène d'usure

La détérioration d'une matière produit des déchets. Qu'on appelle l'usure, c'est la conséquence du frottement et se produit au niveau de la zone de contact.

Les paramètres qui influent sur le taux d'usure sont : [18]

- La force de contact,
- Les conditions opératoires : la charge, la température, la vitesse, la pression,
- L'aire de contact,
- L'état physico-chimique des surfaces frottantes (la rugosité, les couche d'oxydes),
- Les propriétés mécaniques des matériaux (dureté),
- L'absence ou la présence d'un lubrifiant.

IV. Classification de l'usure

- Selon la quantité du matériau perdue par un élément actif d'un tribosystème on distingue :
- l'usure douce ou ultra douce : le système s'use, les surfaces restent lisses et les dimensions des particules sont de l'ordre du micromètre.
- l'usure sévère : la durée de système est faible, les surfaces des corps sont profondément modifiées et les particules d'usure sont d'usure sont taille pouvant dépasser 100 μm.
- l'usure catastrophique : la durée de vie est très réduite.

A titre d'information, on présente en Figure III.1la perte de poids en fonction du temps

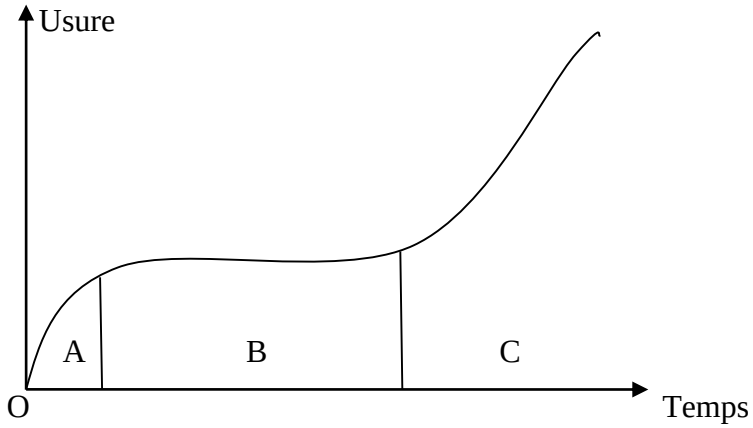


Figure III.1 La perte de poids en fonction du temps

0A- usure rapide (rodage). **AB**- utilisation normale de la machine.
BC- destruction des éléments de la machine [19].

V. Mécanismes d'usure

L'usure est un ensemble complexe des phénomènes difficiles à interpréter, amenant une émission des débris avec perte de masse, de côtes, de forme, et s'accompagnant des transformations physiques et chimiques des surfaces.

On distingue généralement quatre mécanismes d'usure.

- Adhésion, formation de jonctions adhésives puis arrachement de métal.
- Abrasion ou labourage par des aspérités ou des particules abrasives.
- Délaminage, croissance de fissures sous la surface suivie d'une rupture par fatigue.
- Réactions tribochimique ou enlèvement de matière oxydée.

Causes

Les principaux facteurs d'usure sont :

- La nature des matériaux en contact
- Les conditions de fonctionnement (pression, température, lubrification, ambiance corrosive, etc.)

Effets

Le frottement est la cause principale de l'usure qui entraine les effets suivant :

- Altération dimensionnelle des pièces ;
- Augmentation des jeux de fonctionnement ;
- Dégradation des caractéristiques superficielles ;

a. L'usure par transfert ou adhésion

L'usure adhésive se caractérise par un transfert de débris d'un des deux antagonistes vers l'autre soit par un mécanisme d'origine purement mécanique, soit suite à une réaction physico-chimique. Pour le transfert mécanique, plusieurs hypothèses ont été développées. Les micro-aspérités présentes dans le contact peuvent conduire à la diminution des zones en contact et générer aux jonctions des énergies très élevées qui peuvent favoriser les réactions physico-chimiques (micro soudage des aspérités en contact).

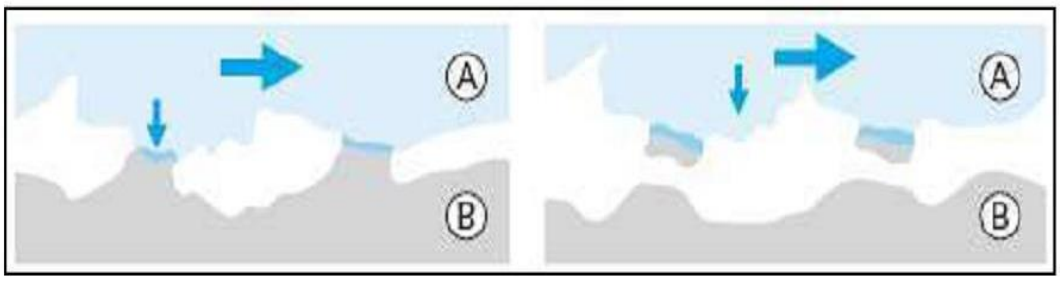


Figure III.2 Phénomènes élémentaires de l'usure adhésive [8]

Lors du frottement, il existe entre les matériaux antagonistes une multitude de micro contacts qui supportent l'ensemble de la charge normale. En effet, dans ces régions, une constriction des lignes de forces engendre des concentrations de contraintes et l'augmentation de la température (températures flashes). L'évolution de ces aspérités dépend des conditions de sollicitations et de l'environnement.

Un équilibre est atteint dès que l'adhérence des films de transfert est supérieure à la force de frottement. Sinon, les contraintes de cisaillement générées provoquent la rupture à l'interface surface/film transféré et forme des débris. Ces derniers peuvent être progressivement évacués du contact en laissant une surface très réactive siège d'un nouveau processus de dégradation. Si les débris restent piégés dans le contact, les aires réelles de contact s'accroissent et assurent un rôle de portance (effet de séparation des antagonistes, les débris supportent les pressions, l'usure et le coefficient de frottement sont moindres).

b. L'usure par abrasion

L'agent principal de ce phénomène est le contact entre les aspérités des deux surfaces. Cette usure correspond au déplacement ou à enlèvement de matière par celles-ci.

Cet enlèvement se produit soit lorsque l'un des matériaux est plus dur soit lorsque des particules dures et de formes anguleuses introduites intentionnellement (polissage) ou formées par réaction chimique à partir des débris d'usure (tribo-chimie) se trouvent entre les surfaces de glissement .Il se produit alors un déplacement de matière dû aux parties dures et la dégradation de surface se manifeste par polissage, des griffures ou des sillons accompagnés ou non d'émission de fins débris, copeaux ou écailles Figure III.3.[20**]**

L'abrasion est un phénomène de dégradation superficielle se rapportant aussi bien l'outil que le produit de mise en forme la dureté et le taux de consolidation de la structure par écrouissage sont des facteurs importants qui limitent l'user abrasive sous réserve que les matériaux conserve une capacité de déformation plastique sans excès de fragilité. [21]

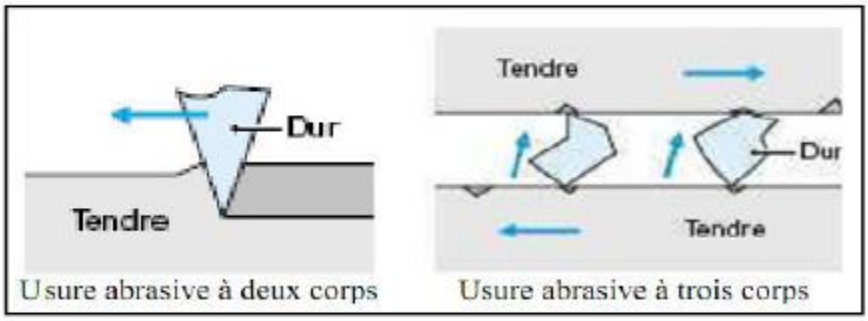


Figure III.3 Phénomènes élémentaires de l'usure abrasive à deux et trois corps

L'usure peut résulter des protubérances d'une des pièces ou des particules qui circulent dans l'interface. On peut distinguer deux modes d'usure par abrasion :

- l'**abrasion à deux corps**, dans laquelle la pièce la plus dure « lime », « râpe » la plus tendre,
- l'**abrasion à trois corps**, dans laquelle des éléments plus durs que les pièces en présence s'incrustent dans la pièce la moins dure.

La perte de matière dépend à la fois du matériau usé et de l'abrasif et l'aspect des sillons fournit de précieuses indications :

- s'ils sont brillants et très peu profonds, les aspérités de la pièce antagoniste ont raclé les couches d'oxydes,
- s'ils sont isolés, et brusquement interrompus, des particules dures introduites entre les surfaces se sont plus ou moins incrustées,
- s'ils sont ininterrompus et rayent la pièce dure, des particules abrasives sont enchâssées dans la pièce tendre.
- s'ils sont ininterrompus et marquent la pièce tendre, la pièce antagoniste plus dure est trop rugueuse.

c. L'usure par fatigue

L'usure par fatigue est lente et habituellement masquée par l'abrasion ou l'adhésion. Induit par le frottement de roulement ou de roulement avec glissement sous fortes charges répétées, on la rencontre essentiellement dans les engranges et les et les roulements dont elle constitue le mode normal de destruction.

Une longue phase de vieillissement précède les accidents visibles. Une pièce peut être atteinte irrémédiablement tout en gardant jusqu'au dernier moment une apparence intacte.

Ce phénomène dépond des paramètres géométriques et mécaniques du contact, de la structure métallurgique des surfaces (contraintes résiduelles, dureté superficielle, etc.…), du lubrifiant et de la compatibilité chimique des matériaux antagonistes. [19]

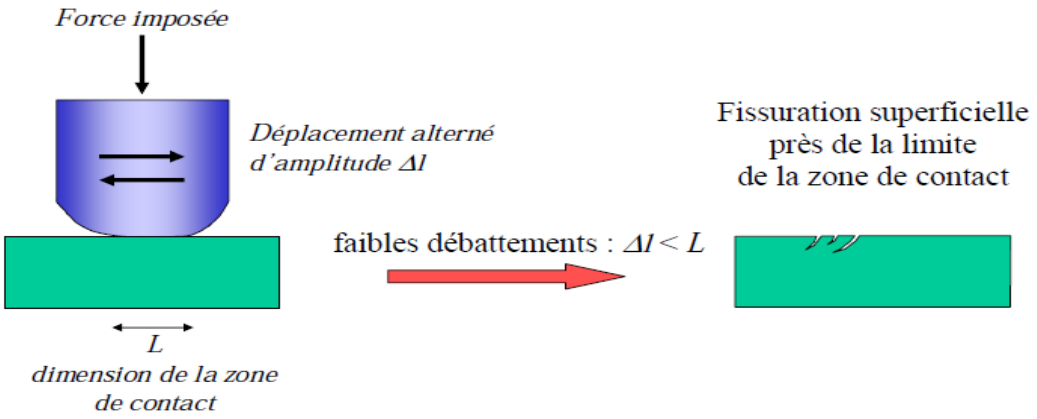


Figure III.4 Phénomène de l'usure par fatigue

d. L'usure par réactions tribochimique

C'est un système à trois composantes, où interviennent la réactivité chimique entre les surfaces, la réactivité chimique avec le milieu environnant et la réactivité physico-chimique avec les débris. Ce type de dégradation résulte d'une seule ou de plusieurs réactions chimiques sous l'effet d'agent corrosif (environnement, lubrifiant) et des contraintes mécaniques pendant le frottement.

Suivant l'état structural superficiel, il se crée des oxydes réactionnels dépendant de l'environnement. Suite au frottement entre les surfaces, la rupture des aspérités qui s'oxydent, forme des débris en général très stables et très durs. Ces derniers jouent alors un rôle abrasif et viennent dégrader les surfaces antagonistes et donc entretenir l'usure. Par contre, il est possible de rencontrer une configuration moins agressive par la formation de films d'oxydes adhérents à la surface d'un des antagonistes et suffisamment résistants au cisaillement pour jouer un rôle protecteur.

VI. Autres paramètres caractéristiques de l'usure abrasive

En plus de la configuration mécanique du contact, l'usure abrasive dépend de plusieurs paramètres de sollicitation. L'identification et les critères de l'usure abrasive sont basés sur :

- les paramètres de sollicitation : fortes ou faibles contraintes,
- les caractéristiques du milieu : corps abrasif et ambiance.

VI.1 Paramètres de sollicitation

La sollicitation d'un contact est caractérisée par la pression de contact et la vitesse de glissement relative surfaces / granulat abrasif.

On considère les trois grandes classes suivantes de sollicitations :

- abrasion sous très fortes sollicitations : fortes à très fortes contraintes et très fortes concentrations de contraintes, avec chocs éventuels d'intensité élevée. Cette sollicitation est aussi appelée abrasion au gougeage,

- abrasion sous fortes sollicitations : fortes contraintes et fortes concentrations de contraintes, chocs éventuels d'intensité limitée. Cette classe est souvent désignée par abrasion au meulage,

- abrasion sous faibles sollicitations : faibles contraintes et faibles concentration de contraintes, chocs éventuels accidentels.

VI.2 Paramètres du processus d'abrasion

Les acteurs des processus d'abrasion sont essentiellement :

- le corps abrasif : l'usure abrasive dépend fortement de la dureté, de la géométrie, de la résistance à l'usure et du mode de fragmentation des abrasifs. En effet, la dureté est importante puisqu'elle détermine l'aptitude physique du grain à rayer un matériau plus tendre. En revanche, la forme du grain a une influence évidente sur son agressivité en combinaison avec sa dureté. Mais également sa résistance à la rupture qui pourra favoriser l'arrondissement du grain ou au contraire la création de nouvelles arêtes vives selon le mode de fragmentation,
- l'environnement : l'environnement comprend essentiellement l'humidité et la corrosivité du milieu. Les effets de l'humidité sont négligeables dès que la vitesse d'usure est importante et concerne un volume du matériau supérieur à celui qui est susceptible d'être modifié par une oxydation ou un échauffement superficiel. En revanche, si l'intensité de l'usure est faible (abrasion sous faibles charges ou avec des grains fins ou sphériques), les propriétés du milieu et de la couche superficielle sont très influentes,

En milieu chimiquement très agressif, la corrosion peut se superposer à l'abrasion, dont les effets de coupe sont susceptibles de détruire la couche passive éventuelle, la vitesse

d'usure dépend alors de la rapidité de passivation du métal dans le milieu et de l'intensité d'abrasion [22].

- la température : la température peut influencer la résistance à l'usure abrasive et suivant ses effets une diminution ou augmentation de la résistance. Une température élevée favorisera l'oxydation ou la corrosion, dans certains cas une couche d'oxyde bien adhérente au métal de base peut le protéger de l'abrasion. Un certain nombre d'aciers réfractaires montrent une bonne résistance combinée à l'abrasion corrosion et leur domaine d'utilisation en température.

VII. Paramètres à prendre en compte

Les paramètres de l'usure, ou variables opératoires, sont nombreux et il apparaît nécessaire de bien les connaître pour une analyse précise d'un problème tribologique. Les principaux sont :

- les caractéristiques du mouvement relatif entre les corps composant le mécanisme : cinématique, vitesse, amplitude...
- la charge normale appliquée.
- le mode de contact (surfacique ou ponctuel).
- l'environnement (atmosphère, température...).

VIII. Lois d'usure

Dans de nombreuses situations industrielles, les utilisateurs et les concepteurs désirent disposer de lois d'usure afin de prédire le comportement et la durée de vie d'un système. Cette question est très délicate car les lois permettant de décrire quantitativement l'usure sont très imprécises et peu fiables. Ces approches sont par ailleurs en général très fortement critiquées par les scientifiques qui peuvent mettre en avant de nombreux contre-exemples. Malgré cela, il est utile de disposer de certaines lois que l'on sait être imprécises mais qui permettent néanmoins d'analyser des situations de façon très grossière.

Dans ce sens, Archard exprime, pour une configuration d'usure adhésive, en glissement, une relation entre le volume usé et des quantités caractéristiques du contact :

$$\boldsymbol{V = \frac{k\,.\,\|Fn\|\,.L}{H}} \qquad \text{(III.1)}$$

Où $\boldsymbol{V}$: volume usé,

k : coefficient d'usure sans dimension,

$\|Fn\|$: module de la force normale de contacte,

L : longueur glissée

H : dureté

Le coefficient *k* est différent pour chacun des corps en présence. Il dépend des conditions géométriques et thermodynamiques lors du contact.

Il a été montré que la loi d'Archard peut être étendue à d'autres mécanismes, en glissement dominant. Moyennant une redéfinition de certains paramètres, l'équation précédente peut s'écrire :

$$V = K.W \qquad \text{(III.2)}$$

Où K : est égal à $\frac{k}{H}$

W : est égal à $\|Fn\| . L$

Wa la dimension d'un travail. Par convention, il est appelé "travail d'usure".

Dans le cas où la force normale de contact varie au cours du temps (par exemple, dans une situation d'impacts-glissements, $\|Fn\|$ présente de très fortes variations de courte durée lors des chocs), la définition de W devient :

$$W = \int_{T0}^{T1} \|Fn\| . \|Vt\| . dt \qquad \text{(III.3)}$$

Où W : travail d'usure

$\|Fn\|$: module de force normale au cours du contact,

$\|Vt\|$: module de la vitesse de glissement au cours du contact

T_0 : instant de début du calcul,

T_1 : instant de fin du calcul,

De ce lieu-là, après avoir fait des changements nécessaire avec les lois usuelles de la mécanique, il est possible de définir une "puissance d'usure" en posant

$$P = \|Fn\| . \|Vt\| \qquad \text{(III.4)}$$

Où ***P*** : puissance d'usure.

IX. Facteurs influant l'usure par abrasion

a. Paramètres dynamiques de sollicitation de l'abrasion

La sollicitation dynamique est caractérise par la charge, la pression ou les contraintes exercées ainsi que par la nature et la forme des particules abrasives, le volume d'usure par abrasion croit linéairement avec la charge appliquée et avec la distance parcouru, le coefficient de proportionnalité dépend de la dureté des surfaces et de la géométrie des aspérités ou des grains abrasifs.

b. Influence de la dureté de l'abrasif

Elle détermine l'aptitude physique du grain abrasif à rayer un matériau plus tendre **[**23**]**. Le rapport dureté de l'abrasif (Ha) sur la dureté du matériau (Hm) est également un paramètre important (figure III.5). L'abrasion est faible pour des rapports : Ha \ Hm ‹ 0,7 - 1 ,1 et augmente fortement dans fourchette (0 ,7- 1,7) pour se stabiliser pour des valeurs de Ha \Hm ›1,7 **[**24**]**.

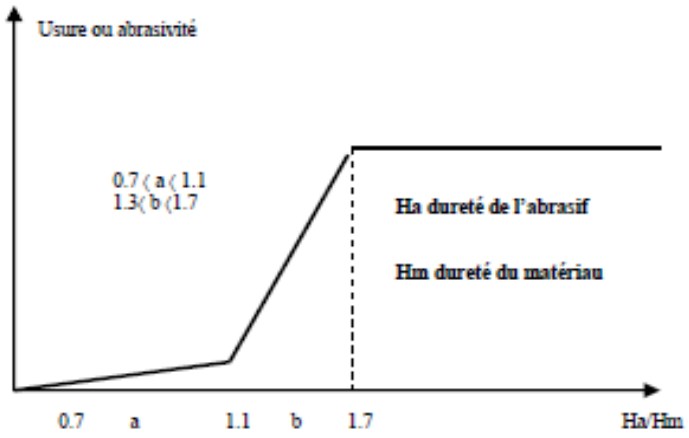


Figure III.5 Influence de la dureté de l'abrasif

c. Granulométrie et forme de l'abrasif

La granulométrie influe beaucoup sur le phénomène d'usure. On peut observer généralement une croissance rapide de l'usure avec le diamètre du grain, puis une stabilisation à partir d'une dimension critique généralement voisine de 100µm.

d. Nature des matériaux

Les plus importants à prendre en considération sont la dureté et la microstructure des matériaux.

Pour des métaux purs l'usure est inversement la dureté est plus complexe [25].

e. Influence de l'ambiance

La nature de l'ambiance et la température joue un rôle complexe dans l'abrasion par les modifications qu'elles peuvent apporter au niveau de l'abrasif (agglomération des particules par exemple), de la surface exposée (oxydation, corrosion, refroidissement) et des caractéristiques des contacts (modification du coefficient de frottement, création éventuelle d'un film protecteur). Cependant le rôle joué par l'ambiance est généralement moins accentué lorsque la vitesse d'usure mécanique est élevée [25].

f. Influence de la vitesse

La perte de masse augmente légèrement avec la vitesse d'abrasion. Cet accroissement est attribué à une baisse des caractéristiques mécaniques sous l'effet de l'échauffement provenant de l'accroissement de la vitesse [26].

X. Données et paramètres tribologiques

X.1 Taux d'usure

Selon la norme DIN EN 50321, l'usure peut être caractérisée par n'importe quel changement de longueur, volume de ou masse et être normalisée selon les conditions de sollicitation, de vie ou de débit. Dans cet esprit la norme DIN EN 50324 (ASTM G99) définit le taux d'usure comme « le volume perdu divisé par la charge normale et la distance »

Le taux d'usure ***k*** (ou rapport de proportionnalité, voir DIN EN 50321) est dérivé de la loi d'Archard, en éliminant la dureté comme paramètre, et suppose que la perte de volume **V** est proportionnelle à la charge normale **FN** et à la distance de glissement **L** parcourue. [27]

$$V = k\ V\ F_N \qquad \text{(III.5)}$$

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

Les différentes écoles tribologiques ne soulignent toujours que la notion de taux d'usure pose divers problèmes et doit être précisée pour chaque mécanisme d'usure.

Toutefois le taux d'usure est aujourd'hui utilisé couramment dans le monde entier et décrit l'évolution du niveau d'usure d'un couple de matériaux avec la sollicitation. Il faut toutefois noter que le taux d'usure ne traduit pas directement une propriété intrinsèque des matériaux en contact ou du tribosystème.

En ce qui concerne la quantification de l'usure, il faut bien admettre que l'application de lois ou de modèles d'usure à l'usage général est très limitée, en général par manque de connaissance des propriétés des matériaux et de leur évolution avec la température ; mais la modélisation de l'usure ou la prévision d'un taux d'usure sont des sciences qui débutent.

Quoi qu'il en soit, pour une application industrielle, l'usure et le frottement restent les deux grandeurs les plus déterminantes de par leurs implications économiques ; la connaissance de la nature exacte des différents mécanismes d'usure contribuant à un taux d'usure est un problème moins important. Demeurent deux questions :

• Comment peut-on alors intégrer le taux d'usure dans une approche industrielle ou technique et écarter les réserves des scientifiques ?

• Comment valoriser par leur utilisation les dizaines de milliers de résultats tribologiques obtenus chaque année ?

Il n'y a aucun doute, 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.

Le taux d'usure volumétrique kV s'exprime le plus souvent en mm3/(N·m) et se calcule à partir du volume d'usure ou de la perte de volume (ou de masse), de la charge normale et de la distance de glissement parcourue. Ces trois valeurs sont parfois difficiles à déterminer ou simplement à connaître. Notons que certains auteurs l'expriment en mm2/kgf ou en mm2/N

D'autres utilisateurs raisonnent un peu différemment. Par exemple, dans l'industrie des systèmes de freinage, on définit le taux d'usure comme la perte de matière en masse ou en volume par mégajoule (MJ) d'énergie dissipée par le couple de matériaux, ce qui revient à supposer que le volume perdu est proportionnel à la densité d'énergie de frottement apparente

e_f^*, c'est-à-dire en première approximation que le taux d'usure k est proportionnel au coefficient de frottement μ, soit :

$$k = e_f^* \mu \qquad \text{(III.6)}$$

X.2 Valeur du produit P ×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 **PV** sont fréquemment utilisées dans les fiches des producteurs de matériaux pour préciser les limites d'utilisation des matériaux et couples de matériaux. La valeur pv en MPa. m/s (pour les anglo-saxons en psi. ft/min) 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 valeur **PV** multipliée par le coefficient de frottement **: PVμ (W/mm2**), détermine la puissance dissipée sous forme de chaleur (énergie de frottement) sur l'aire apparente de contact A(Friction Power Intensity) ; cette énergie est évacuée principalement par conduction thermique, uniformément dans les deux corps, une faible partie étant véhiculée par le lubrifiant. Elle correspond à la puissance thermique générée par frottement et la température de volume des pièces en est une fonction croissante.

L'effet de la pression et de la vitesse ne dépend pas que de la valeur de leur produit : quand l'une de ces grandeurs dépasse une valeur limite, il peut y avoir transition d'un mode d'usure douce (*k* faible) à un mode d'usure sévère (*k* élevé) figure III.6, car les matériaux ou le lubrifiant ne peuvent plus supporter les sollicitations thermiques ou mécaniques « répondent » par un changement de mécanisme d'usure qui peut aller jusqu'au grippage :

• La **pression de contact** détermine directement la sollicitation mécanique de la pièce (effet de plastification locale, fatigue...) et de ses couches superficielles (rupture des films superficiels...) : 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 (transitions 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...).

Les températures éclair des surfaces sont peu prises en compte, car difficiles à calculer par manque de données sur les grandeurs thermo physiques, et leur évolution avec la température **T**, et sur la micro géométrie des aspérités des pièces. Elles ont toute fois une forte influence en frottement sec où l'augmentation de la vitesse amène la température de surface des pièces à des valeurs proches de la température de fusion ou de transition vitreuse du matériau (polymère).

Les domaines d'usure (douce ou sévère) des matériaux sont donc définis par des graphes dans le plan (p, v) (voir figure III.6) : on note que la nature du matériau modifie largement la valeur limite du produit PV à prendre en considération :

- les matériaux présentés dans la figure III.6 possèdent tous un domaine de faible taux d'usure, mais pour des valeurs de p et v sensiblement différentes ;
- en dehors de ce domaine, le taux d'usure dépend fortement de la valeur du produit PV et il importe de le déterminer si on souhaite travailler dans ce domaine.

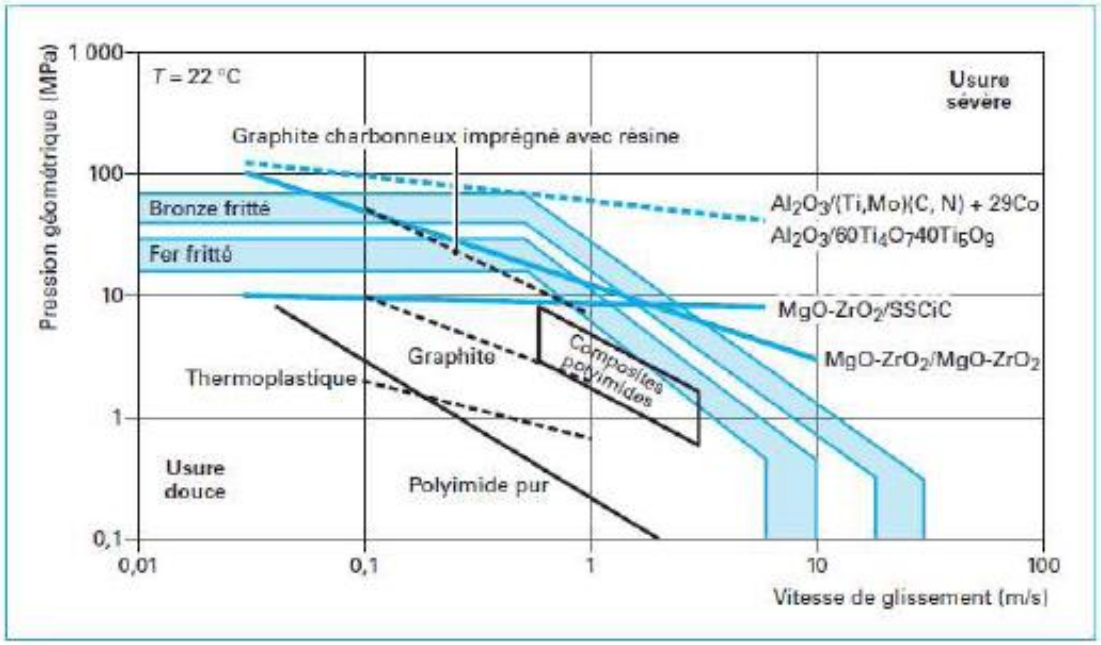


Figure III.6 Graphe « pression/vitesse de glissement » limite pour différents matériaux en frottement sec à température ambiante (contact conforme ; antagoniste acier pour fer et bronze frittés **[27].**

X.3 Densité d'énergie de frottement

Le modèle initialement développé par Fleischer utilise des formules simples.
La perte énergétique $\mathbf{E}_f$ dûe au frottement s'écrit :

$$E_f = \mu F_N L \qquad \text{(III.7)}$$

Avec μ coefficient de frottement de Coulomb
Le produit μF_N représente la force de frottement. La grande similitude entre la formule (1) (expression de l'usure) et la formule (2) (expression de l'énergie de frottement) est évidente ; elle a conduit Fleischer à introduire le paramètre e_f^* de densité d'énergie de frottement apparente et à supposer que le volume d'usure est proportionnel à l'énergie de frottement par :

$$e_f^* = \frac{Ef}{V} = \frac{\mu}{K} \qquad \text{(III.3)}$$

La densité d'énergie de frottement apparente e_f^* correspond au potentiel d'énergie total contenu dans un tribosystème.

XI. Conclusion

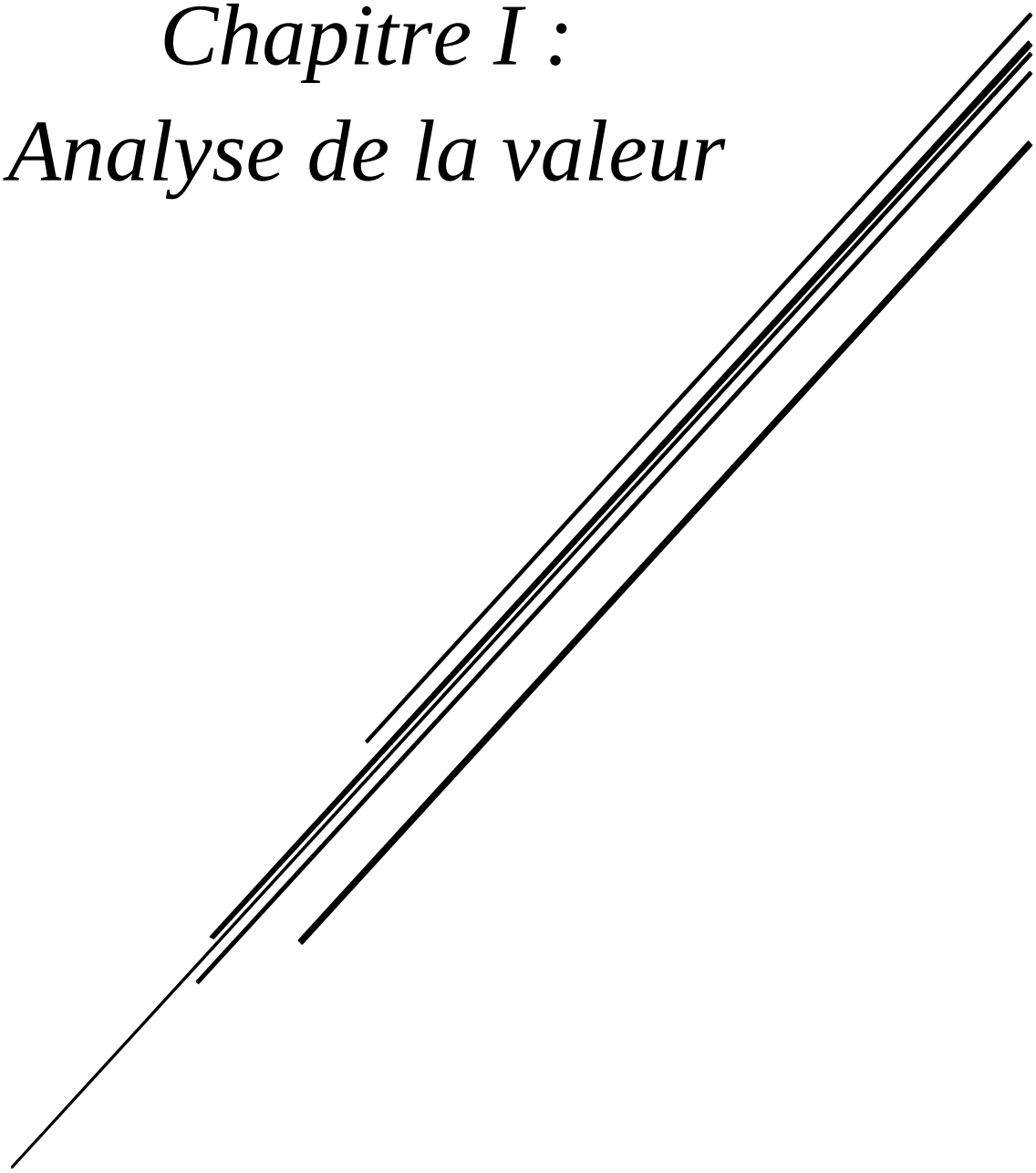
Il est clair que le phénomène d'usure des pièces mécanique frottantes dépond de plusieurs paramètres tels que la charge, la vitesse de glissement, l'état des surfaces en contact, la répartition des pressions, le milieu de fonctionnement…

Ces paramètres ont fait l'objet de plusieurs études expérimentales mais le problème reste entier à ce jour.

DEUXIEME PARTIE

Chapitre I :

Analyse de la valeur



I. Introduction à l'analyse de la valeur

Nous ne devons jamais nous estimer satisfait des objets, des réalisations qui nous entourent et des solutions matérielles ou immatérielles que nous apportons normalement à nos problèmes.

L'habitude et la paresse intellectuelle, naturelle de la plupart d'entre nous, font que nous ne songeons pas à remettre en cause des solutions qui sont devenues pour nous des évidences, si en outre nous sommes les auteurs de certaines d'entre elles.

Tous les produits que traite l'entreprise, aussi petits soient-il sont obtenus soit par hasard soit par l'inspiration, sinon avec des solutions ou des améliorations simples, parfois longues et difficiles à trouver. Ces solutions se heurtent à des conventions, et à des réalisations habituelles ! Ajouter à cela que l'on tient rarement un raisonnement systématique ou une analyse en termes de fonctions ou encore moins un effort d'imagination créatrice.

Mais si l'on adopte cette étude, qui à chaque étape du raisonnement et de la recherche est éclairée, guidée par des chiffrages, des analyses de coût et des bilans comparatifs de solutions, on a de fortes chances de trouver des dispositifs sensiblement plus économiques que les précédents, tout aussi satisfaisants qu'eux voir d'avantage.

L'analyse de la valeur est cette recherche méthodique et systématique des solutions les plus économiques capables de remplir des fonctions utiles.

Ainsi l'analyse de la valeur, étudie sous l'aspect de leurs fonctions et leurs coûts les moyens qui permettent à l'homme de satisfaire directement ou indirectement ses besoins et ses désirs, de sorte que pour elles la réalisation d'une fiche électrique, d'un avion, d'une fusée d'un service de nettoyage de locaux, sont des problèmes dans une certaine mesure comparables.

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 minima, qu'il s'agisse de produits existants 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.

I.1 Historique de l'analyse de la valeur

L'analyse de la valeur (AV) est une méthode née aux États-Unis juste à la fin de la Seconde Guerre mondiale grâce aux efforts de M. Lawrence Delos Miles, ingénieur à la General Electric, qui devait résoudre un problème de pénurie de matériaux nobles. Miles découvre alors que dans un produit, ce qui compte c'est la fonction qu'il exerce, quelle que soit la solution utilisée pour satisfaire cette fonction. À partir de ce constat, il cherche des solutions créatives permettant de réaliser des économies, et pour ce faire il cherche des solutions de produit qui répondent uniquement au besoin pour lequel le produit existe. Elle a été beaucoup améliorée au Japon avant d'être importée dans les années 1960 en Europe, via les filiales des entreprises américaines. C'est une méthode rationnelle d'optimisation d'un produit (ou d'un procédé, ou d'un processus).

En 1978, une Association française pour l'analyse de la valeur (AFAV) est constituée en France, rassemblant les divers praticiens de la méthode. Des normes (X 50.150 à X 50.153) sont établies et éditées en 1985. L'une d'entre elle, portant sur le Cahier des charges fonctionnelles (CdCF) mérite une attention toute particulière dans la mesure où la Commission Centrale des Marchés (pour les marchés publics) et les spécialistes de la qualité totale recommandent désormais officiellement l'usage de ce CdCF.

Depuis 1999, une nouvelle norme européenne (NF EN 12973) propose un élargissement de la perspective des approches "Valeur" avec notamment la promotion du MANAGEMENT PAR LA VALEUR. Dans le même temps des certifications européennes ont été mises en place pour les animateurs et formateurs dans ces disciplines.

DEUX FINALITES DE L'ANALYSE DE LA VALEUR

VALUE ANALYSIS : Modification d'un produit existant

VALUE ENGINEERING : conception d'un nouveau produit

Les organismes officiels ont également codifié ces techniques et les ont traduites sous forme de normes :

Normes de base européennes et françaises

•NF EN 1325-1 (Novembre 1996) - Vocabulaire du Management par la Valeur, de l'Analyse de la Valeur et de l'Analyse Fonctionnelle - Partie 1 : Analyse de la Valeur et Analyse Fonctionnelle. Remplace la norme NF X 50-150, d'août 1990

• NF EN 12973 - Management par la valeur - Principes ; Mise en œuvre ; Outils (Juillet 2000)

Normes outils françaises

•NF X 50-100 (Décembre 1996) - Analyse Fonctionnelle ; Caractéristiques fondamentales

•FD X 50-101 (Décembre 1995) - Analyse Fonctionnelle - L'Analyse Fonctionnelle outil interdisciplinaire de compétitivité

•NF X 50-15 (Décembre 1991) - Analyse de la Valeur, Analyse Fonctionnelle- Expression fonctionnelle du besoin et cahier des charges fonctionnel

•NF X 50-152 (Août 1990) - Analyse de la valeur ; Caractéristiques fondamentales (révisée en 2007)

•NF X 50-153 (Mai 1985) - Analyse de la valeur ; Recommandations pour sa mise en œuvre (révisé en 2009)

•XP X 50-155 (Décembre 1997) - Management par la Valeur ; Coût Global

II. Les concepts de bases de l'Analyse de la valeur

II.1 Principes

L'analyse de la valeur repose sur trois (03) concepts fondamentaux :

- **Besoin** : Problème posé ?
- **Fonction** : Comment répondre au Problème ?
- **Produit** : Réponse Effective au problème.

L'analyse de la valeur permet une systématique de résolution de problèmes ; c'est une méthode organisée, à caractère économique, visant à ne laisser subsister dans un produit que le juste nécessaire afin de pouvoir répondre, au niveau de sa fonctionnalité au besoin réellement exprimé.

II.1.1 Le besoin

Le besoin se définit par : Nécessité ou désir éprouvé par un utilisateur.
C'est en fait ce besoin de l'utilisateur qui est à l'origine de l'intention, pour le producteur, de concevoir et réaliser un produit. Ce besoin doit être caractérisé, traduit, sous forme de fonctions à remplir par le produit ou service.
Ce besoin peut être exprimé ou implicite, avoué ou inavoué, latent ou potentiel.

II.1.2 Les fonctions

Action d'un produit ou de l'un de ses constituants.

En AV, une fonction s'exprime normalement par un verbe et un nom pris comme complément.

Les fonctions d'un produit permettent de satisfaire les besoins multiples de l'utilisateur. Elles expriment ce pour quoi le produit a été réalisé. L'appréciation des fonctions d'un produit est par nature contingente, dépendante de l'utilisateur, de son contexte culturel, instrumental, temporel. On distingue généralement :

- les fonctions de service.
- les fonctions techniques.

L'objectif de l'analyse de la valeur consiste donc à bien cerner et valoriser les fonctions de service, en limitant autant que possible le poids des fonctions techniques.

II.1.3 Le produit

Résultat d'activités ou de processus.

Le terme "produit" peut inclure des services, des matériels, des produits fabriqués ; il peut être matériel ou immatériel. Il répond à un besoin identifié des consommateurs.

II.2 Utilisateur

Toute personne ou entité pour laquelle le produit est conçu et qui exploite au moins l'une de ses fonctions à un moment quelconque de son cycle de vie.

Il faut souligner d'emblée que l'utilisateur est la plupart du temps un groupe cible de personnes et qu'il faudra donc savoir déterminer la bonne typologie des utilisateurs réels ou

potentiels. Il importe de cerner au mieux les besoins de cet utilisateur, personne ou entité, de caractériser sa demande selon différents critères d'appréciation du service attendu, ce qui conduit à l'élaboration du cahier des charges fonctionnel (CdCF).

II.3 Contrainte [34]

Caractéristique, effet ou disposition de conception qui est rendu obligatoire ou a été interdit pour quelque raison que ce soit.

Il s'agit donc de restrictions résultant de l'entreprise (investissement, délai,...), de la réglementation (normes, lois, règlements,...) ou de l'environnement (écologie, institution,...) et qui a pour effet de limiter le choix des solutions.

Cette limitation à la liberté de choix du concepteur est l'affirmation d'un constat de lucidité : on ne peut pas tout changer à la fois. En d'autres termes, la démarche AV s'inscrit dans une perspective de réalisme qui implique une parfaite connaissance de certaines données incontournables de l'environnement et de l'économie.

III. Le concept de valeur

III.1 La notion de valeur

Relation entre d'une part la contribution d'une fonction à la satisfaction du besoin et d'autre part le coût de cette fonction.

Cette notion de Valeur recoupe celle plus intuitive de rapport entre le service rendu par un produit et le coût d'obtention (ou de production) de ce produit. Elle peut aussi s'assimiler, dans certaines circonstances, au rapport "Qualité / Prix".

La notion de Valeur est importante car sa perception et son estimation, par un acteur donné dans un contexte donné, motive et détermine la décision de l'acteur en question d'acquérir le bien ou le service proposé.

$$Valeur = \frac{Satisfaction\ du\ besoin}{Coût}$$

La définition de la valeur est souvent réduite à la notion de prix de vente. Dans les faits, la notion de valeur recouvre cependant des notions plus subjectives. La notion de valeur apparaît lorsqu'une personne, pour effectuer un choix, utilise un critère de relation entre la satisfaction du besoin, les contraintes et les dépenses induites. Ainsi parle-t-on de rapport qualité/prix mais bien d'autres critères existent :

• **la valeur d'usage :** qui est à travers l'acte d'achat, la réponse d'un client à un besoin d'utilisation (l'entreprise ne vend un produit qu'à la condition que sa valeur d'usage perçue par l'utilisateur soit grande. Il est donc impératif qu'elle connaisse le besoin de l'utilisateur, et les dépenses qu'il est prêt à associer à la satisfaction de ce besoin),

• **la valeur d'utilité :** liée directement à l'utilisation que l'utilisateur va avoir du produit, dans un contexte donné,

• **la valeur de rareté :** qui peut être fonction des circonstances d'utilisation du produit comme de la simple concurrence sur le marché,

• **la valeur d'échange :** qui correspond essentiellement au prix d'achat et à la perception qu'en a l'acheteur, mais peut également comporter une notion plus large liée, par exemple, à la revente du bien,

• **la valeur d'estime :** liée au plaisir ressenti par l'utilisateur lors de l'utilisation, voire de la simple possession, du produit.

Toutes ces notions, extrêmement relatives, sont en général liées au contexte, à l'environnement, aux personnes considérées... En définitive, pour l'utilisateur, la valeur est issue des performances (utilité, estime, rareté...) du produit et doit être mise en balance avec les dépenses (coûts) issus à la fois de la conception, de la production et de la distribution du produit mais également aux charges qui peuvent survenir tout au long du cycle d'usage du produit, sous une forme ou sous une autre : monétaires (entretien par exemple), ergonomiques énergétiques...

IV. Définition de l'analyse de la valeur

La norme NF X 50 – 150 donne la définition suivante de l'AV : « Méthode de compétitivité, organisée et créatrice, visant la satisfaction du besoin de l'utilisateur par une démarche spécifique de conception à la fois fonctionnelle, économique et pluridisciplinaire »

Le souci de l'économie, le calage strict sur le besoin et le marché, l'analyse fonctionnelle, l'approche pluridisciplinaire de la conception et le travail de groupe, la mobilisation efficace de

l'information et la créativité sont au cœur de la méthode. L'analyse de la valeur, par sa démarche, ses concepts et ses outils, constitue une approche systémique de l'évaluation et de la conception des produits et services. Méthode originale de conduite de projet, elle facilite par là même l'obtention d'une efficacité globale et déployée bien à propos.

L'analyse de la valeur est une méthode d'investigation qui ne laisse rien dans l'ombre et qui implique un croisement de multiples regards sur le produit, sur le besoin de l'utilisateur, sur les coûts, sur les contraintes de l'environnement, sur le marché et donc sur la valeur de ce produit.

L'analyse de la valeur s'applique tout autant à la reconception de produits existants que la conception de produits nouveaux. Elle s'applique aussi bien à des produits matériels qu'à des services immatériels (analyse de la valeur administrative). Elle peut traiter le produit en tant que tel, mais aussi le procédé de fabrication du produit. Elle s'intéresse tout autant à des produits unitaires simples qu'à de vastes systèmes complexes.

L'Analyse de la Valeur, c'est :

• une technique pour évaluer la relation entre les coûts et la réalisation des fonctions de produits ou de services concrets ;

• une procédure structurée et une technique de créativité qui a pour objectif le remaniement d'un « produit » afin que celui-ci soit optimal du point de vue des coûts, de la réalisation des fonctions et de la qualité.

L'Analyse des Valeurs ne vise pas uniquement à réduire les coûts. La méthode a pour but d'éliminer de façon systématique tous les coûts qui n'apportent pas de plus-value au produit, au processus ou au service. La valeur du produit se voit ainsi accrue.

IV.1 Les caractéristiques de l'analyse de la valeur

L'analyse de la valeur se distingue des autres méthodes par quatre caractéristiques fondamentales :

• **L'Analyse fonctionnelle** : Dans la mesure où l'analyse de la valeur repose sur la notion de fonctions, l'analyse fonctionnelle est le cœur de la méthode. Le produit correspondant au besoin du client est défini en termes de fonctions. Ces fonctions sont valorisées afin de

déterminer la valeur qui est définie comme le rapport entre la satisfaction du client et le coût du produit.

• **Le plan de travail** : Pour mener à bien une étude d'analyse de la valeur, il est nécessaire de respecter un plan de travail strict. Ce plan de travail comporte sept phases distinctes qui seront présentées au paragraphe « Mode opératoire ».

• **Le travail de groupe** : C'est un groupe pluridisciplinaire de 3 à 10 personnes qui est la véritable structure opérationnelle de l'action AV.

• **L'approche économique globale** : L'analyse de la valeur est un processus de travail dont l'objectif est de trouver le compromis optimal entre le coût et les fonctions d'un produit, tout en assurant un niveau de qualité nécessaire et suffisant.

IV.2 Les acteurs

Il y dans la démarche AV quatre acteurs principaux :

• **Le décideur :** C'est en quelque sorte le maître d'ouvrage du projet. C'est lui qui initie le projet et prend les décisions finales.

• **Le groupe de travail :** C'est un groupe pluridisciplinaire (3 à10 personnes), rassemblant toutes les compétences complémentaires concernées par le produit. Ainsi, le groupe dispose à tout moment des réponses pertinentes aux différentes questions qu'il se pose. Il permet d'utiliser un langage commun et d'appliquer une méthode de travail pour l'élaboration d'un objectif commun.

• **L'animateur :** C'est une personne expérimentée et garante de la méthode AV. Il doit répondre aux qualités suivantes : compétence, expérience d'un décideur, autorité, dynamisme, relations humaines, esprit coopératif,... Il est chargé d'orienter les acteurs vers un raisonnement fonctionnel et indépendant de toutes solutions techniques (pas d'à priori de conception).

• **Les services opérationnels :** Ce sont tous les services concernés par le projet. Ils interviendront en fonction de l'avancement du projet.

V. Mode opératoire

Le plan de travail comprend 7 phases qui doivent être scrupuleusement respectées conformément à la norme NF X 50-152. La démarche est progressive et prend en compte les résultats issus de la phase amont. Une action AV se déroule à raison d'une réunion par semaine ou par quinzaine. Un compte rendu rédigé à chaque séance permet de conserver en mémoire ce qui a été fait et décidé. De plus, il informe le décideur sur l'évolution de l'étude.

1. Orientation de l'étude
2. Recherche d'informations
3. Analyse fonctionnelle
4. Recherche de solutions
5. Etude et évaluation des solutions
6. Bilan prévisionnel et proposition de choix
7. Suivi de réalisation

V.1 Phase 1 : Orientation de l'action

Elle est la phase de concertation entre le décideur et l'animateur. Ils passent en revue l'objet de l'étude (besoin à satisfaire) et les causes originelles de son déclenchement. Ils examinent les objectifs (performance, coût,...) et les enjeux économiques (gains financiers, accession à un nouveau marché, ...) fixés par le demandeur. Ils précisent les limites du système à étudier. Ils constituent le groupe de travail et vérifient l'adéquation entre les ressources allouées (compétences, aptitudes) et la nature de l'étude. Ils estiment le budget nécessaire pour assurer l'action AV ainsi que le planning prévisionnel.

A l'issue des travaux, un dossier regroupant les éléments étudiés est soumis à l'approbation du demandeur :

- définition du sujet,
- objet et causes de son déclenchement,
- objectifs et enjeux économiques,
- limites du système,
- moyens associés (budget, ressources),
- planning.

Ce dossier est contractuel. L'animateur le présente au groupe de travail une fois qu'il a été validé.

V.2 Phase 2 : Recherche de l'information

La recherche de l'information est réalisée par le groupe de travail, qui recense les facteurs économiques, techniques, commerciaux et sociaux qui entrent en jeu dans l'environnement de l'étude.

Les données proviennent de deux sources :

• la première, interne, est issue des études réalisées par l'organisme, de la documentation des données techniques et des dossiers antérieurs,

• la seconde, externe, est accessible auprès des organismes professionnels et des banques de données.

Le groupe de travail évalue la pertinence des données, identifie la source et contrôle la validité actuelle. Puis les informations sont synthétisées et diffusées.

Au cours des phases 3 à 5, les intervenants sont susceptibles de demander un complément d'informations à des experts n'appartenant pas au groupe de travail pluridisciplinaire.

V.3 Phase 3 : Analyse des coûts et des fonctions

D'après la norme AFNOR NF X 50-151, l'analyse fonctionnelle est une « démarche qui consiste à rechercher, ordonner, caractériser, hiérarchiser et/ou valoriser les fonctions du produit attendu par l'utilisateur ».

Ces différentes fonctions sont formalisées au sein du cahier des charges fonctionnelles (CDCF).

Cette phase de l'étude comporte plusieurs étapes.

V.3 .1 Analyser le besoin

S'il n'a pas été clairement explicité dans la phase 1, il est important d'exprimer le besoin. Il s'agit d'expliciter l'exigence fondamentale qui justifie la conception, ou la reconception d'un produit. Pour cela, il est essentiel de se poser les trois questions suivantes :

• A qui rend-il service ?

• Sur quoi agit-il ?

• Dans quel but ?

On doit ensuite contrôler la validité du besoin en exprimant le but et les raisons qui lui ont donné naissance, et en recherchant les cas d'évolution susceptibles de rendre le besoin obsolète.

V.3.2 Déterminer le profil de vie du système

Il convient dans un premier temps de rechercher l'information nécessaire pour identifier les différentes phases du cycle de vie du produit depuis son stockage jusqu'à son retrait de service, en passant par son utilisation pure. Pour chaque situation, il est recommandé de lister les éléments, personnes, matériels, matières qui constituent l'environnement du produit. Les activités qui suivent doivent être réalisées pour chacune des phases du cycle de vie du produit.

V.3.3 Démarche méthodique de l'analyse fonctionnelle

V.3.3.1 Méthodologie

L'analyse fonctionnelle s'effectue en plusieurs étapes :

- recenser les fonctions
- les caractériser
- les ordonnancer
- les valoriser
- les synthétiser en les formalisant dans le cahier des charges fonctionnel.

1. Recenser les fonctions

La recherche des fonctions s'effectue en étudiant les relations du futur produit ou système avec son environnement. Elle s'effectue selon une méthodologie axée sur le recensement exhaustif des fonctions : ne pas en oublier, ne pas inventer de faux services. Chaque fonction devra être exprimée exclusivement en termes de finalité et être formulée par un verbe à l'infinitif suivi d'un ou plusieurs compléments. Il faut distinguer les fonctions de service des fonctions techniques.

A : Les fonctions de service

Elles se déclinent en deux catégories.

• Les fonctions principales

Pour chaque phase du cycle de vie, il s'agit d'identifier les relations créées par l'objet entre deux ou plusieurs éléments de son milieu d'utilisation. Il faut ensuite exprimer le but de chaque relation créée, chaque but détermine ainsi une fonction principale.

• Les fonctions contraintes

Pour chaque position d'utilisation, il s'agit de définir les contraintes imposées au produit par son milieu extérieur d'utilisation. Cela revient à identifier les relations entre l'objet et un élément du milieu extérieur (EMU).

B : Les fonctions techniques

Chronologiquement, elles ne sont identifiées qu'une fois les fonctions de service clairement exprimées. Elles sont issues de solutions techniques pressenties. L'architecture du système est composée d'éléments existants plus ou moins standardisés : le projet consiste alors à les organiser de façon nouvelle ou créer des relations nouvelles entre ces éléments.

Dans le cas du système voiture, par exemple, on sait qu'il y aura un sous-système Carrosserie, un sous-système Motorisation, un autre de Transmission. Renault arrive ainsi à décomposer une voiture en 17 sous-ensembles.

Ces fonctions de service vont alors être relayées par des fonctions techniques reliant les diverses solutions techniques pressenties. Les fonctions techniques reflètent l'organisation entre les différentes voies de solutions.

Pour cela, trois outils permettent de recenser les fonctions :

- la méthode intuitive
- l’étude d’environnement
- l’analyse séquentielle

1. La méthode intuitive

Il s'agit de s'appuyer sur l'intuition ou encore de motiver l'imagination pour éventuellement définir les fonctions principales et secondaires qui doivent être assurées par un produit .Si on prend l'exemple d'un stylo, on se pose la question « à quoi sert un stylo ?» à écrire bien sûr, nous cherchons à exprimer cela sous forme d'une fonction, c'est à dire par un verbe suivi d'un complément : ''tracer un trait'' il doit aussi ''s'accrocher à la poche'' ce sont là deux fonctions de services, la première est principale pour laquelle le produit a été créé. La seconde est une fonction complémentaire.

2. L'étude d'environnement

Elle s'appuie sur le fait que qu'un produit est en contact permanent avec son environnement. Par conséquent, le produit doit s'adapter à son environnement, c'est à dire satisfaire certaines fonctions par rapport à cet environnement.

Il importe par ailleurs d'identifier dans quelles circonstances le produit peut être utilisé : circonstances habituelles, occasionnelles ou exceptionnelle.

Afin de réaliser une étude d'environnement, il importe de distinguer les quatre familles suivantes :

- **Les personnes :**

Elles peuvent être celles qui utilisent le produit, mais il peut s'agir de personnes dont la présence est occasionnelle. Par exemple, l'acheteur du produit peut ne pas être l'utilisateur et pourtant des fonctions sont à satisfaire vis-à-vis des deux.

- **Les éléments physiques :**

Ils sont nombreux comme le sol, les murs et les objets environnants…etc.

- **Les éléments immatériels :**

Il peut s'agir de règlements, de normes ou de directives.

- **L'ambiance :**

Elle peut regrouper des éléments tels que les températures, l'hygrométrie, les intempéries, le bruit ou les poussières etc.

Cette méthode consiste à :

- Rechercher les conditions d'adaptation du produit par rapport à une des familles et de ses composantes et réciproquement.
- Rechercher les conditions d'interaction entre une composante d'une famille de produit et une autre composante (de la même famille ou d'une autre famille).
- Matérialiser ces conditions à l'aide des graphes d'associations ou « graphes d'association » (figure IV.1) qui sont constitués par l'ensemble des éléments du milieu environnant, et qui sont en relation avec le produit pendant son cycle de vie.

Ces graphes représentent le produit au centre et les différentes composantes de l'environnement à la périphérie. Les différents milieux extérieurs conduisent donc à identifier de nombreuses fonctions.

Chaque association d'un objet d'étude, avec un ou deux milieux, donne une fonction possible que le groupe retiendra ou non.

Une fonction est retenue si l'on s'engage à rechercher des solutions afférentes, donc à y mettre les moyens financiers associés.

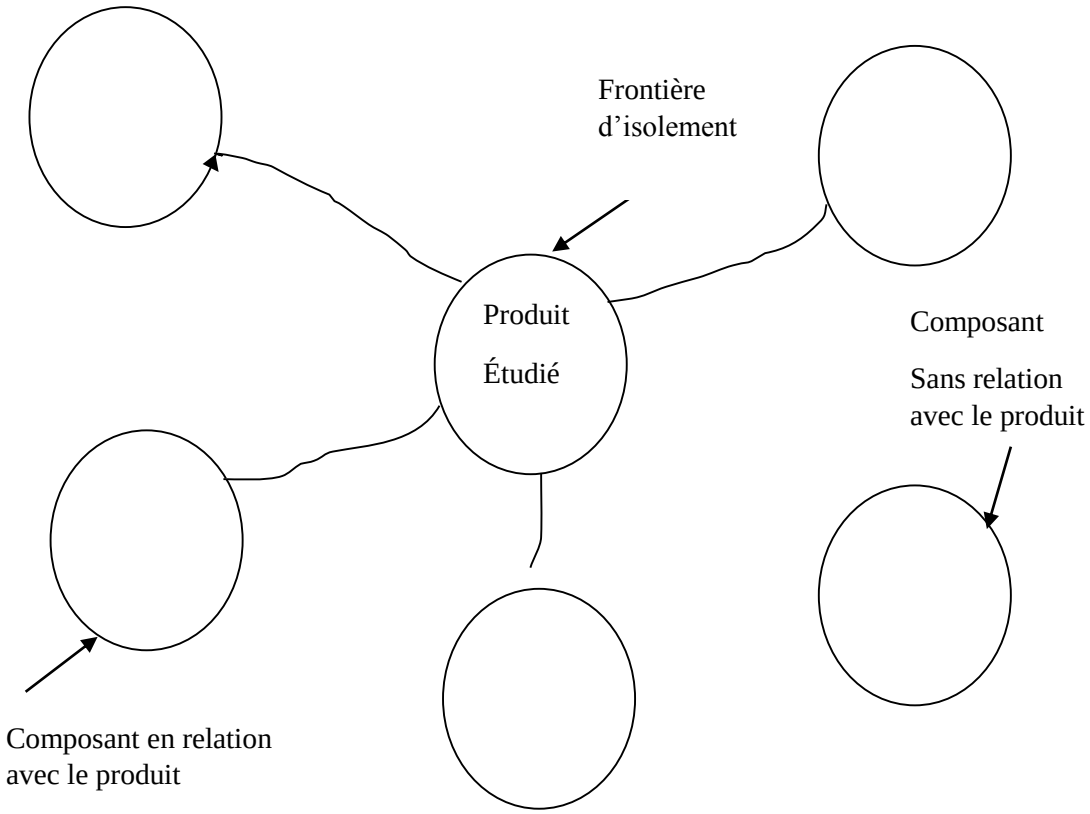


Figure I.1 Graphe d'association

3. Analyse séquentielle

Elle consiste à examiner toutes les étapes de la vie d'un produit avant, pendant et après utilisation. Elle complète la méthode précédente dans le sens où elle fait apparaître de nouveaux éléments qui ont été oubliés antérieurement. Ainsi donc, pour chaque étape de la vie du produit il est défini tout élément en contact avec le produit, ensuite la fonction qu'il doit satisfaire vis à vis de celui-ci.

a. Caractériser et quantifier les fonctions

Une fois les fonctions identifiées, il faut définir les critères qui nous permettront d'effectuer le choix d'une solution technique : la caractérisation des fonctions. Cela consiste à énoncer pour chaque fonction de service :

• Les critères d'appréciation :

Caractère retenu pour apprécier la manière dont une fonction est remplie ou une contrainte respectée.

• Les niveaux de chaque critère :

Grandeur repérée dans l'échelle adoptée pour un critère d'appréciation d'une fonction. Cette grandeur peut être celle recherchée en tant qu'objectif ou celle atteinte par une solution proposée. Le niveau quantifie le critère et représente ainsi la performance attendue du service à rendre.

• La flexibilité de chaque niveau :

Ensemble d'indications exprimées par le demandeur sur les possibilités de moduler le niveau recherché pour un critère d'appréciation

Le niveau d'un critère est généralement une valeur chiffrée pour les critères « objectifs » et une référence pour les critères « subjectifs ». Il permet de représenter le poids de chaque fonction. La flexibilité (notée F) est la tolérance par rapport à la valeur du niveau demandé.

On distingue 4 classes de flexibilité :

F0 : flexibilité nulle, niveau impératif

F1 : flexibilité faible, niveau peu négociable

F2 : flexibilité bonne, niveau négociable

F3 : flexibilité forte, niveau négociable

• Le taux d'échange associé

Rapport déclaré acceptable par le demandeur entre la variation du prix (ou du coût) et la variation correspondante du niveau d'un critère d'appréciation ou entre les variations de niveau de deux critères d'appréciation.

Il s'agit de se préparer à négocier une variation de performances par rapport au besoin initial. Pour chaque couple critère/niveaux de satisfaction, on fixera alors un taux d'échange.

- **Recherche des fonctions techniques :**

La recherche des fonctions technique est justifiée par l'obligation de construire le produit. Lorsque le concepteur-réalisateur choisit une solution globale, il détermine les fonctions techniques parfois appelées fonctions internes.

- **Diagramme des flux :**

Le diagramme des flux est un graphe qui permet de montrer le cheminement des divers flux de matière, d'actions mécaniques et de mouvements liés aux fonctions, à travers des éléments constitutifs d'un produit.

L'étude de ces différents flux permet d'appréhender les fonctions techniques et d'apprécier le nombre de composants qui participent à chacune d'entre–elles. D'une manière générale, le tracé d'un diagramme des flux pour un produit donné (Figure IV.2) s'effectue en trois étapes :

- Disposer les éléments constitutifs du produit en relation de contact.
- Disposer les milieux extérieurs.
- Tracer les différents flux.

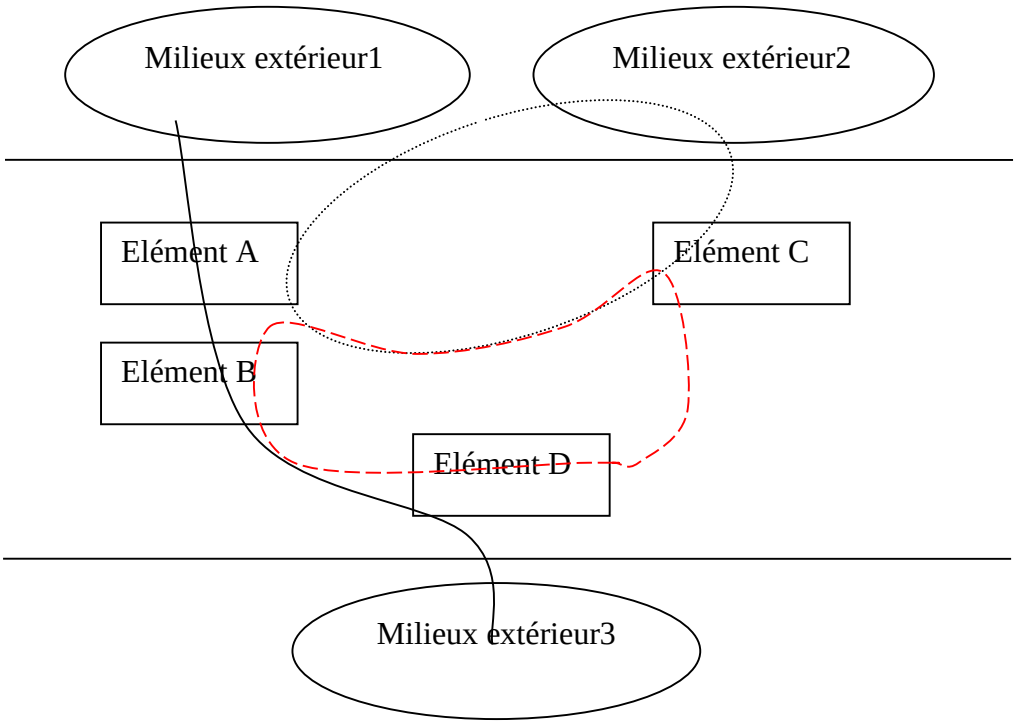


Figure I.2 Principe de construction d'un diagramme de flux

____ : Flux ouverts : Relation entre les milieux extérieurs et les différents éléments composants

Flux bouclés :

……: Internes : ne concernent que les éléments du produit.

------- : Externes : relation entre quelques éléments et un ou plusieurs milieux extérieurs.

Ainsi en reprenant les différents flux, nous pouvant exprimer les fonctions techniques et les fonctions de service auxquelles elles aboutissent.

b. Ordonner les fonctions

Les fonctions identifiées précédemment ont été notées sans respecter un ordre particulier. Il est important d'établir une décomposition logique entre ces diverses fonctions.

Le groupe de travail créera ainsi le diagramme fonctionnel qui ordonne les fonctions identifiées, vérifie la logique fonctionnelle, contrôle l'exhaustivité du recensement des fonctions et sert de support à la recherche de nouvelles fonctions.

Les débats suscités au sein du groupe de travail pendant la construction du diagramme fonctionnel, et surtout pour obtenir un consensus, permettent de clarifier la situation et augmentent l'efficience du groupe.

Nous nous proposons de mettre en relation l'organisation fonctionnelle traduite sous la forme d'un diagramme FAST (Functional Analysis Système Téchnique)

- **Méthode FAST**

La méthode FAST est un outil graphique qui permet de détailler les fonctions techniques et les solutions associées. Organisé de la gauche vers la droite, partant d'une fonction de service, le diagramme FAST recense toutes les fonctions techniques et pour finir il présente les solutions technologiques définies.

Il est basé sur une méthode interrogative : pour chaque fonction technique indiquée dans un rectangle on doit pouvoir trouver autour les réponses aux questions définies ci-dessous.

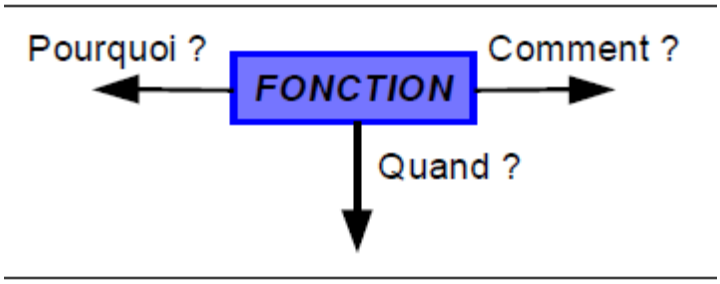


Figure I.3 : les questions de la méthode FAST

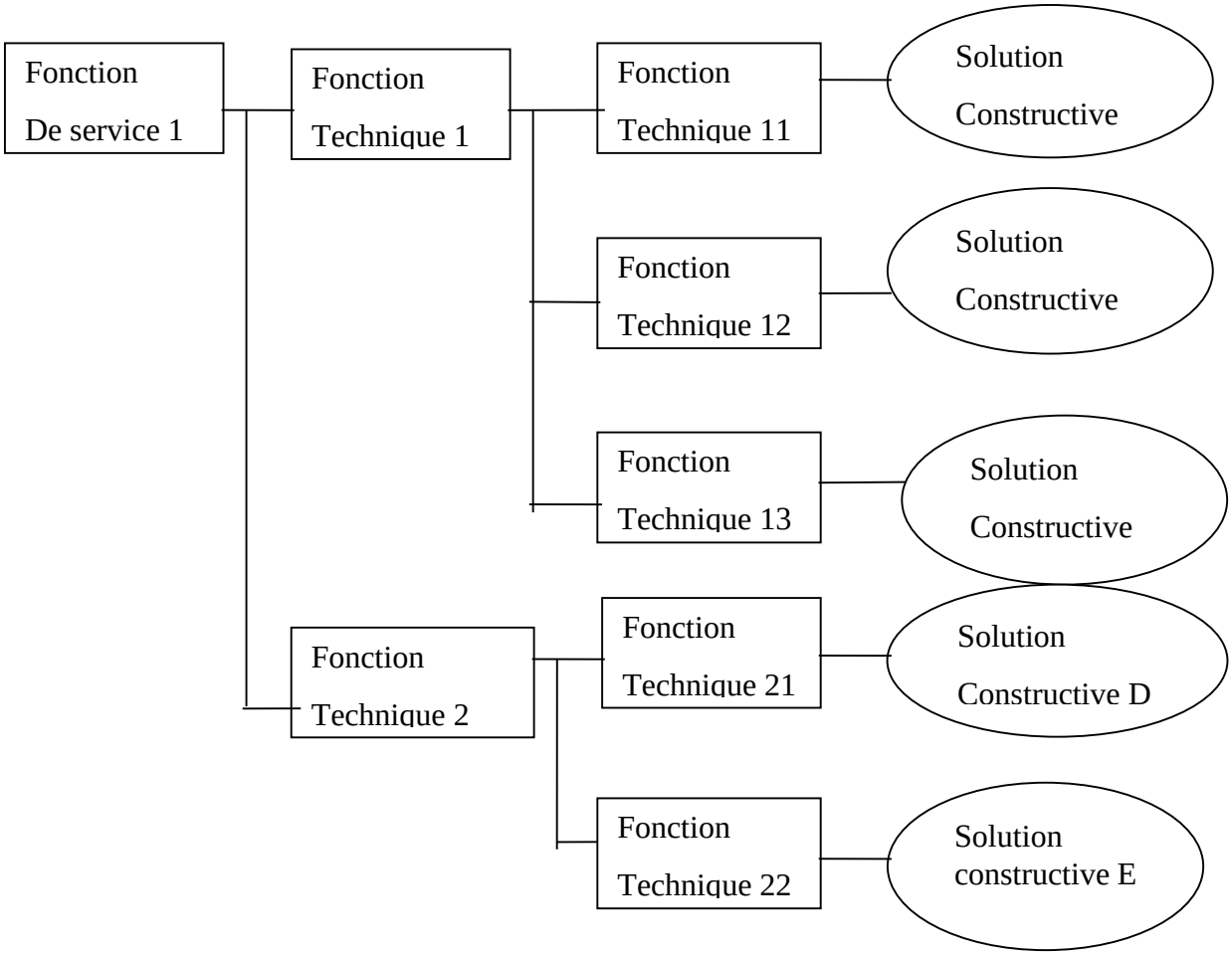


Figure I.4 forme générale d'un diagramme FAST orienté (description d'un produit existant)

A partir d'une fonction (Figure IV.4), la méthode FAST permet de répondre, suivant la norme NF X 50-153, aux trois questions suivantes :

- pourquoi cette fonction doit-elle être assurée ?
- comment cette fonction doit-elle être assurée ?
- Quand cette fonction doit-elle être assurée ?

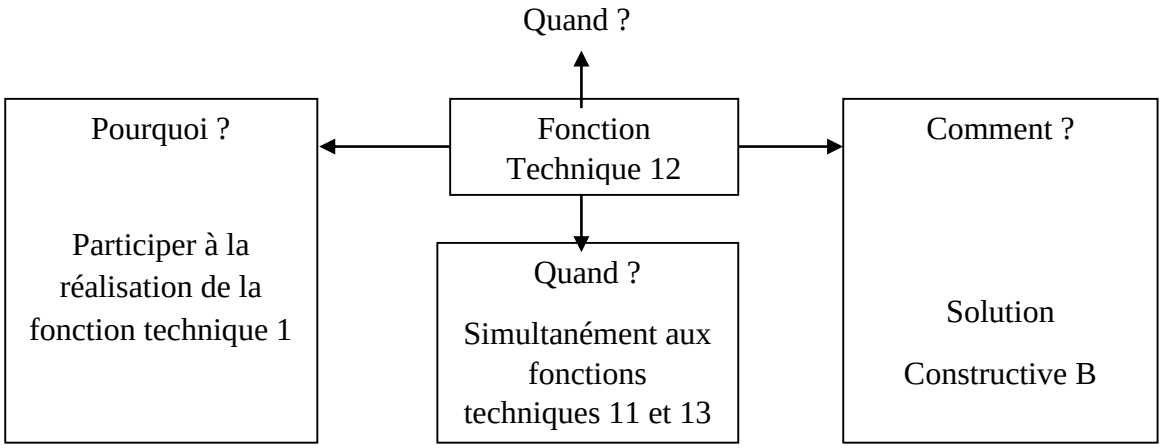


Figure I.5 Lecture d'un diagramme FAST

Les questions :

- **Pourquoi ?** Permet de remonter vers les fonctions les plus élevées.
- **Comment ?** Permet de descendre vers les fonctions les plus basses.
- **Quand ?** Permet de descendre vers les fonctions devant être satisfaites simultanément. (On les dispose sur le diagramme à la même verticale).

2. Hiérarchiser les fonctions

Il faut pouvoir indiquer aux futurs prestataires, les services essentiels sur lesquels il faudra concentrer leurs savoirs faire ; pour cela, 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 de leur importance relatives.

Deux outils permettent de hiérarchiser les fonctions :

- L'échelle de hiérarchisation des fonctions.
- La méthode du tri croisé.

A. L’échelle de hiérarchisation des fonctions

Outils permettant de représenter le poids de chaque fonction en la hiérarchisant en fonction des cinq niveaux d'importance suivants

K	Importance
1	Utile
2	Nécessaire
3	Importante
4	Très importante
5	Importance vitale

Tableau I.1 Echelle de hiérarchisation des fonctions

Ensuite continuer la démarche suivante :

- Totaliser pour l'ensemble des fonctions les points obtenus.

- Calculer pour chaque fonction le pourcentage de répartition obtenu.

- Représenter ces pourcentages sur un histogramme.

B. La méthode du tri croisé

Comme l'outil précédent il permet de représenter le poids de chaque fonction

- **Démarche méthodologique :**

Chacune des cases de tableau correspond à une comparaison de deux fonctions. Pour chaque comparaison, il faut noter la fonction qui est la plus importante, et y ajouter un chiffre entre 1 et 3, permettant de pondérer cette importance (1 = un peu plus important, 3 = beaucoup plus important).

Une fois le tableau entièrement rempli, il faut comptabiliser le nombre de points obtenus pour chaque fonction et reporter le résultat dans la colonne de droite.

Exemple :

	B	C	D	E	F	G	H	
A								
	B							
		C						
			D					
				E				
					F			
						G		
							H	

Tableau I.2 Tris croisés concernant les fonctions

3. Valoriser les fonctions

Il s'agit de présenter de manière synthétique les résultats de l'analyse fonctionnelle (fonction, coût et valeur) en transférant les coûts de revient des tâches sur les fonctions de services associés.

- Le principe est de dresser un tableau sur lequel on doit :
- Lister les fonctions du produit en abscisse.
- Lister les composantes du produit en ordonnée.
- Calculer le coût des composantes et le repartir sur les fonctions afin d'avoir le coût 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.

4. Synthétiser les fonctions

Il s'agit de caractériser et valoriser les fonctions à travers un tableau récapitulatif à partir duquel le cahier des charges fonctionnel est réalisé.

V.3.4 Rédaction du cahier des charges fonctionnelles

La rédaction du cahier des charges fonctionnel (CdCF) permet la synthèse des travaux effectués précédemment. Selon la norme NF X 50 -151, le CdCF est le « Document par lequel le demandeur exprime son besoin en terme de fonctions de services. Pour chacune d'elles sont définis des critères d'appréciations et leur niveaux ; chacun de ces niveaux est assorti d'une flexibilité ».

Le demandeur est le premier responsable des coûts. Il précède dans cette responsabilité le concepteur-réalisateur qui propose la solution permettant d'atteindre le niveau d'exigence spécifié.

En d'autres termes le C.D.C.F va servir de base de dialogue contractuelle entre le demandeur d'une part et concepteur-réalisateur du produit d'autre part. La qualité d'un produit dépend donc de la qualité de la demande qui est exprimée en termes d'obligation, de résultat et de finalité.

a. Objet du C.D.C.F.

Le C.D.C.F n'est pas une fin en soi, mais un maillon de première importance pour élaborer un produit compétitif dans un climat de bonnes relations.

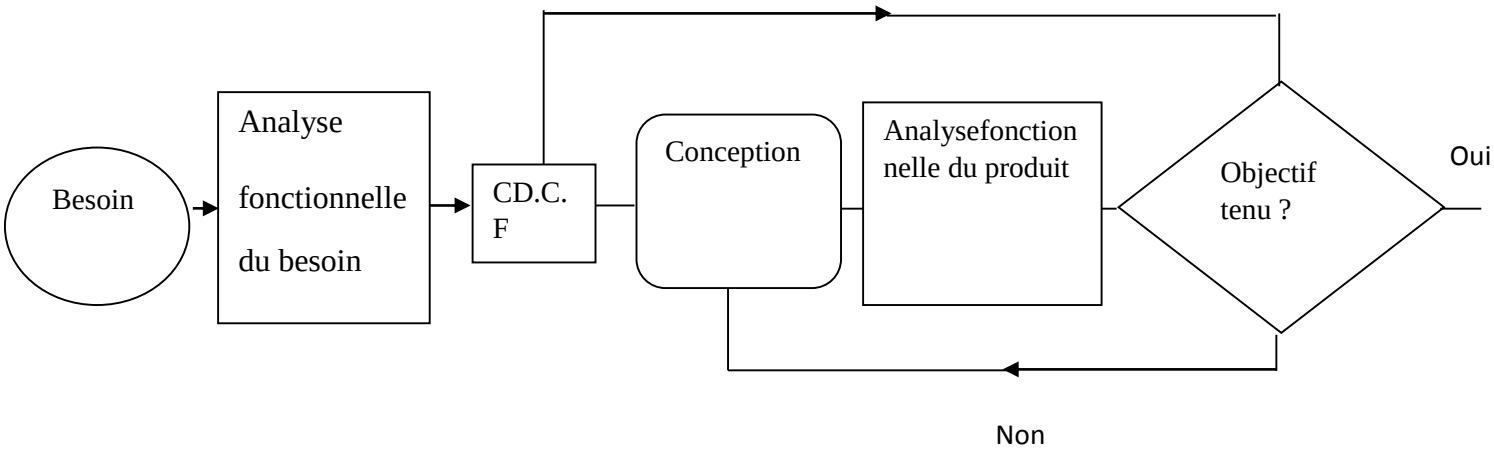


Figure I.6 Rôle du C.D.C.F

Dans le cahier des charges, la demande est trop souvent exprimée en termes de solutions et de moyens de réalisation. De ce fait, la liberté du concepteur se trouve restreinte, et les chances d'obtenir un produit optimisé et novateur se trouvent généralement réduites. Lorsqu'il est introduit normalement, le cahier des charges fonctionnel, a l'avantage de définir le produit à réaliser en termes de besoins et de services attendus. Il autorise, et même favorise, les initiatives du concepteur pour trouver les meilleures solutions et donne au demandeur les moyens de ses choix et de ses décisions. C'est ainsi que la norme X50-151 recommande d'adjoindre au C.D.C.F un appel à variante et un cadre de réponse technique pour les concepteurs-réalisateurs.

La rédaction du C.D.C.F. impose un effort accru de réflexion et de précision vis-à-vis du besoin à satisfaire. Sa formulation n'est pas immédiate, elle nécessite l'élaboration d'une analyse fonctionnelle sérieuse et un effort de quantification des performances souvent inhabituel. C'est tout simplement le prix à payer pour satisfaire ses clients.

b. Eléments constitutifs du C.D.C.F

- Les principaux éléments constitutifs du C.D.C.F. sont :
- La présentation générale du problème.
- L'expression fonctionnelle du besoin.
- L'appel à variante.
- Le cadre de réponse.
- Les annexes.
    - La présentation générale du problème comprend :
- L'origine de la demande : d'où et de qui vient l'attente ?
- Le produit et son marché : synthèse de la formulation du besoin, situation du marché, espérance de vie commerciale …
- Le contexte du projet, les objectifs : programme, limites de l'étude, études sur des sujets voisins, suites prévues, personnes concernées, caractère confidentiel s'il y a lieu.
- Le profil du produit : quand le produit sera utilisé et comment il sera utilisé durant cette période (facteur d'utilisation).
- Pour un travail de groupe efficace et pour une meilleure communication.
    - L'expression fonctionnelle du besoin :

Résultat de la démarche d'analyse fonctionnelle, il constitue l'essentiel du C.D.C.F. et fournit une référence pour les deux parties en présence ; à ce titre rien ne doit être omis ou superflu.

- Phase du cycle d'utilisation et identification de son environnement : lorsque dans les situations successives de son cycle d'utilisation, un produit est situé dans des environnements différents et/ou doit assurer des services différents, l'énoncé du besoin sera facilité par des analyses distinctes à ces différentes phases, correspondant en fait à des "utilisations" ou ‘’utilisateurs différents’’.
- Enoncé des fonctions de service et des contraintes : pour une expression complète du besoin, il est souvent utile au demandeur de faire connaître l'importance relative qu'il accorde aux différentes fonctions par un simple classement ou même une notation (hiérarchiser et valoriser).
- Caractérisation des fonctions de service et des contraintes : le C.D.CF. contiendra pour chacune des fonctions énoncées :

    - Leurs critères d'appréciation,

- Les niveaux des critères d'appréciation et ce qui les caractérise (résultats attendus).

L'absence d'une flexibilité pour les niveaux des critères d'appréciation peut conduire le rédacteur du C.D.C.F. à spécifier des niveaux surévalués, ce qui serait à l'encontre de l'optimisation recherchée.

- L'appel à variante :

S'il y a lieu, il peut être demandé à chacun des concepteurs pressentis, au-delà d'une proposition répondant à l'expression fonctionnelle, une ou plusieurs autres propositions répondant à sa propre perception du besoin. Cette ouverture stimule l'innovation et peut permettre de sonder des voies plus ambitieuses.

- Le cadre de réponse :

Il est imposé aux concepteurs-réalisateurs dans le cas d'offres multiples afin de faciliter le dépouillement de ces derniers. La présentation fonctionnelle utilisée par le demandeur pour décrire les besoins sera reprise par le concepteur pour présenter sa proposition. Ce cadre de réponse porte sur chaque fonction et sur l'ensemble du produit.

c. Comment établir le C.D.C.F

Le C.D.C.F est utilisé non seulement lorsque le demandeur et le concepteur-réalisateur appartiennent à des organismes commercialement différents, mais aussi lorsqu'ils appartiennent à la même entreprise.

Son élaboration nécessite la mise en place, chez le demandeur, d'une structure de travail analogue à celle mise en place pour une action d'analyse de la valeur. Les compétences des participants au groupe de travail portent sur la définition du besoin, l'utilisation du produit, son approvisionnement, sa diffusion, sa maintenance, son stockage etc.…

Le processus d'élaboration du C.D.C.F. peut être décomposé en sept étapes :

1. Définition du sujet traité.

Cette phase s'effectue chez le demandeur sous le contrôle du décideur, l'un des premiers objectifs est de situer le projet dans son contexte général et le produit recherché par rapport au système auquel il doit s'intégrer afin de délimiter le sujet à traiter.

2. **Sélection et formation du groupe - première recherche de l'information.**
3. **Validation du besoin et analyse fonctionnelle** : c'est la phase essentielle dans la mise en œuvre de la démarche. Elle comporte :

- la validation du besoin qui consiste à vérifier avant de débuter l'analyse fonctionnelle du besoin, que celui-ci est clairement identifié, correctement formulé, et apprécier sa stabilité dans le temps en fonction de l'horizon fixé.

- l'analyse fonctionnelle qui comprend le recensement et l'ordonnancement des fonctions de service et des contraintes, avec les critères d'appréciation, leur niveau et leur flexibilité, leur hiérarchisation et leur valorisation.

On ne considère pas, bien sûr, deux fonctions techniques qui seraient reliées à une seule solution.

4. **Rédaction proprement dite du C.D.C.F.**
5. **Rédaction d'annexes informatives éventuelles.**

elles peuvent contenir, par exemple, des documents explicitant les conditions prévues de mise en œuvre et d'utilisation du produit, les procédures de maintenances, les infrastructures existantes ou possibles, les systèmes d'essais et de mesures existants, etc…., nécessaires à la compréhension du C.D.C.F.

6. **Validation par le groupe de la rédaction du C.D.C.F.**
7. **Approbation par le décideur.**

d. Caractérisation du C.D.C.F. en fonction de ses différents cas d'utilisation

Le C.D.C.F. est un document qui s'enrichit progressivement au cours de la création du produit depuis la "saisie du besoin" jusqu'au lancement du "développement".

Les éditions successives ont entre elles un rapport de filiation, chacune apportant les éléments propres à chaque phase (tableau IV.7) la dernière de ces éditions conduit, une fois retenues les principales fonctions techniques, au document contractuel dont le rôle est d'exprimer les exigences techniques du demandeur relatives au produit.

Phase 1 : saisie du besoin.

Cette phase a pour objectif l'expression, par le demandeur du besoin à satisfaire.

Elle aboutit à un projet de C.D.C.F. qui, par la décision de prospection de la faisabilité, devient la première édition externe du C.D.C.F.

Phase 2 : prospection de faisabilité.

Chacun des concepteurs- réalisateurs consultés doit présenter un avant-projet, en tracer les grandes lignes.

Le demandeur, qui a fait une réflexion interne, exploite les réponses reçues et procède à l'affinement de son besoin. Il le traduit par une deuxième édition externe du C.D.C.F.

Phase 3 : Pré développement.

Cette phase a pour but d'étudier les voies reconnues comme possibles en fin de phase précédente pour retenir celle qui sera développée.

Les concepteurs réalisateurs, dans cette phase, étudient des options techniques et proposent au demandeur une ébauche de définition.

Le demandeur choisit, parmi les ébauches de définitions proposées, celle qu'il retient pour le développement. Il émet un nouveau document, contractuel celui-ci qui s'intègre à ce que l'on appelle parfois spécification ou spécification technique du besoin.

A la fin de ce processus vient le développement-industrialisation, production et la mise en service.

Processus d'élaboration du C.D.C.F

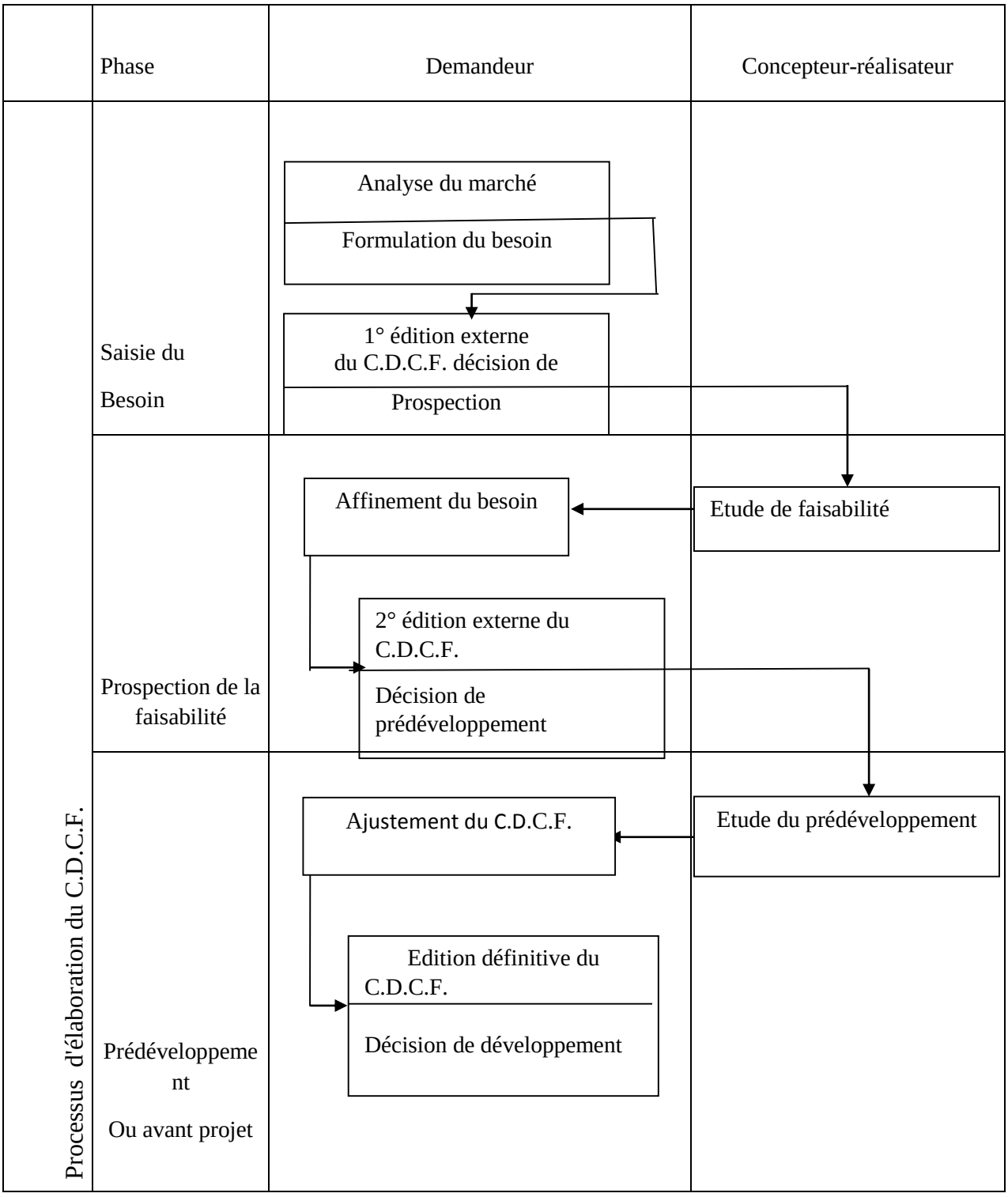


Figure I.7 Schéma d'élaboration du C.D.C.F

V.4 Phase 4 : Recherche d'idées et de voies de solutions

L'objectif de cette phase est de trouver le plus grand nombre d'idées de solutions pour chaque fonction à satisfaire. Pour mener à bien cette phase, le groupe de travail se réunit en séance de créativité. La pluridisciplinarité du groupe de travail doit permettre de trouver des voies de solutions originales et pertinentes. La représentation des différents services permet, à chaque instant, de prendre en compte les différents aspects de la vie du produit.

Cette phase nécessite une réelle dynamique de groupe et le respect des attitudes suivantes :

- **L'écoute** : acceptation de l'autre et de ses idées (pas de critique et d'autocensure du type : ça existe déjà, on l'a déjà fait, je vais peut-être dire une bêtise...) ;
- **La spontanéité de l'expression** : rien de ce qui est évoqué ne l'est par hasard ; aussi se doit-on de tout exprimer, aussi éloigné que cela puisse paraître de la problématique ;
- **L'association** : tout stimulus évoqué par un membre du groupe suscite chez les autres des évocations associatives.

D'une manière générale, il est d'abord important de chercher une solution globale au problème puis ensuite de se pencher sur chacune des fonctions de services. Dans cette phase de recherche, il faut faire un premier choix pour ne retenir que les solutions intéressantes et réalisables.

V.5 Phase 5 : Etude et évaluation des solutions

Dans cette phase, l'animateur transmet aux services opérationnels les voies ou les concepts de solutions retenues. Ceux-ci vont devoir les mettre en volume, les évaluer, les chiffrer. C'est la période de conception, de dessin, de recherche de fournisseurs, de réalisation de maquettes et d'essais…

En outre, ils veillent à minimiser le coût de cette étape en limitant la précision au juste nécessaire pour valider la faisabilité et la pondération des solutions.

Grâce à la démarche AV, les intervenants construisent une première série de solutions et peuvent sélectionner les propositions les plus pertinentes (solution = Performance / Coût).

Dans un second temps, grâce au critère itératif de la démarche, les intervenants se focalisent sur une ou plusieurs propositions retenues. Des techniques qualitatives et quantitatives et des outils d'aide à la décision sont utilisés pour évaluer les solutions. L'examen aboutit à une hiérarchisation objective des propositions qui amène la solution la plus adaptée en conséquence

de celles qui ne sont pas adaptées pour telle ou telle raison. Dans cette phase, les outils de simulation numérique (CAO, dimensionnement de structure par éléments finis, CFD, etc.) vont être d'un grand support.

V.6 Phase 6 : Bilan prévisionnel et proposition de choix

L'animateur regroupe les propositions retenues et dresse un bilan prévisionnel composé :

- du dossier contractuel établit en première instance,
- du Cahier des Charges Fonctionnel Besoin,
- des documents ayant servi à l'évaluation des solutions techniques,
- du récapitulatif budgétaire de l'action AV.

Pour chaque solution retenue, il est présenté :

- le niveau estimé et la flexibilité accordée pour chaque critère,
- l'évaluation économique et les règles appliquées (amortissements, fiscalités, ...)
- les avantages et les inconvénients,
- les menaces et les opportunités liées à l'environnement externe,
- les conditions à respecter pour réaliser l'opération.

L'animateur, assisté du groupe de travail, présente au décideur les propositions et remet les documents. Cet acte clôt la mission du groupe de travail.

Une fois que le décideur a choisi la solution, une étude de sûreté de fonctionnement (au moyen d'un outil appelé AMDEC) peut être peut être mise en œuvre.

V.7 Réalisation – Suivi – Bilan

C'est aux services opérationnels qu'incombe la tâche de réaliser, mettre en œuvre la solution retenue, assurer le lancement du produit. Une fois l'application réalisée, il est indispensable de réaliser un bilan pour le comparer au bilan prévisionnel de la phase 6 et aux objectifs définis en phase 1.

Généralement confiée à l'animateur ou à un chef de projet, cette phase nécessite un suivi rigoureux et constant des délais et du budget.

VI Avantages et inconvénients de l'analyse de la valeur

VI.1 Avantages

L'analyse de la valeur :

- Permet d'améliorer une situation existante mais aussi 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 coût ou d'en diminuer le coût sans réduire le niveau des services rendus.

VI.2 Inconvénients

- Méthode très analytique, assez lourde à mettre en œuvre
- Nécessite une forte implication des acteurs
- Nécessite une parfaite maîtrise de la part de l'animateur.

VII Conclusion

En conclusion, on peut avancer que l'analyse de la valeur est un ensemble de méthodes d'analyse fonctionnelle, d'étude et d'industrialisation applicable aux produits, aux services et autres moyens que nous créons, qui par son approche systématique et organisée, vise à leur faire remplir au moindre coût les fonctions réellement nécessaires à la satisfaction des besoins ou désirs pour lesquels ils sont créés.

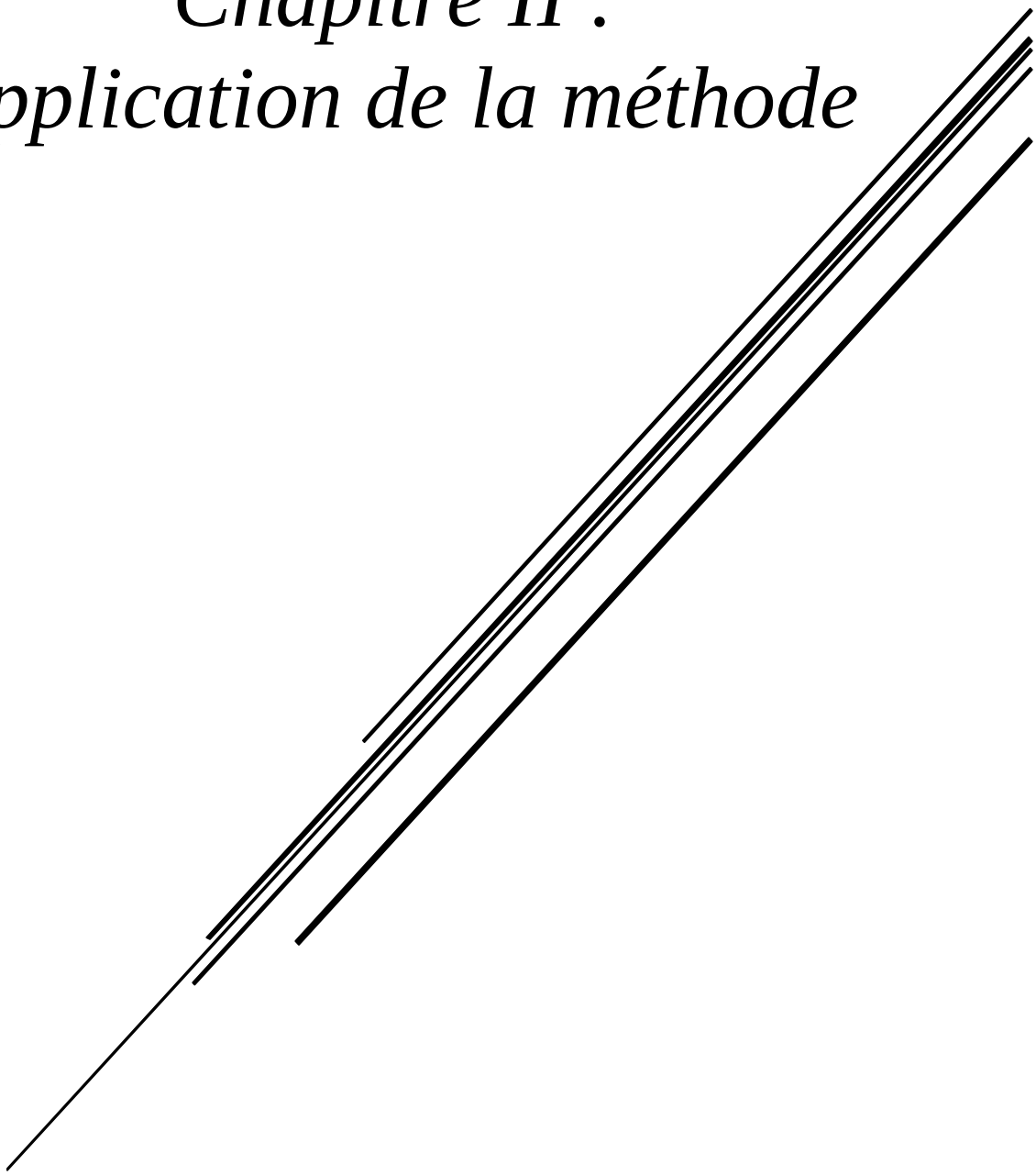
L'analyse de la valeur a pris un essor particulier dans les organisations, les P.M.E. avec les approches allégées. Tout un courant et une problématique se sont dégagés au niveau de la recherche sur des disciplines valeurs.

Cette approche a eu pour objectif de mettre en place des concepts et méthodologie nouvelle à travers des colloques et des manifestations.

DEUXIEME PARTIE

Chapitre II :

Application de la méthode



I. Phase1 : Orientation de l'action

I.1 L'objet de l'étude

Le laboratoire de mécanique des structures et énergétique qui est spécialiste dans le domaine des essais mécaniques, a bien décidé de se lancer dans le domaine de la tribologie : contact entre un couple de matériaux donné, dans des environnements bien précis. Pour cela, se procurer un appareil leur permettant d'entamer des études dans ce domaine, en particulier l'usure, est indispensable. A cet effet, il nous a été demandé de concevoir un dispositif abrasimètre pour étudier le comportement de certains matériaux.

Vu l'indisponibilité de ces dispositifs sur le marché national, donc à prix excessif, peu de laboratoires et entreprises en disposent. Selon les informations que nous avons recueillis ici et là, des essais d'usure ne se font que rarement dans notre pays, bien que des contrôles de qualité de pièce, se font largement en utilisant une multitude d'appareils, de méthodes, et ce, selon les moyens et le niveau de qualité visé.

Les essais qu'effectue le dispositif ne figurent pas dans le programme de formation national de la filière génie mécanique. Donc, il nous a été difficile d'effectuer des recherches, de récolter les informations, pour mieux cerner la problématique de notre étude.

Néanmoins le dispositif abrasimètre, que nous allons concevoir, doit être facile à fabriquer, à utiliser et économiquement moins cher.

Notre procédure consiste, donc à définir le besoin exprimé, le formuler sou forme de fonctions, ensuite apporter des réponses qui feront ou non l'objet de la solution finale (le produit). Celle-ci doit être logique et dans la mesure de la réalisation, c'est-à-dire, conforme au CDCF.

La solution finale doit être :

- Simple d'utilisation.
- Facile à manier.
- Les systèmes, les dispositifs ainsi que les différentes pièces doivent être économiquement dans les limites de demandeur pour les acquérir et les usiné.
- Les solutions à prendre en considération doivent être cohérentes du point de vue fonctionnel.

I.2 Objectif

L'objectif de cette étude est de concevoir un dispositif abrasimètre qui fera l'objet d'une éventuelle réalisation, permettant au laboratoire de mécanique d'entamer les essais sur des matériaux donnés.

Rappelons-nous, ces essais ne se font que rarement dans notre pays. Selon les recherches et les informations que nous avons recueillies, il semblerait qu'il y ait peu de laboratoires qui disposent de tels dispositifs. Et si on fait l'estimation des pertes qui en découlent de l'usure, on a bien intérêt à prendre au sérieux ce phénomène en le minimisant par des solutions adéquates.

Pour cette raison et d'autres, le demandeur veut doter son laboratoire d'un dispositif abrasimètre. Celui-ci, n'a aucunement l'intention de fabriquer pour les vendre.

Le demandeur nous a fait comprendre qu'il préfère un outil utilisant des pièces standards et normalisées disponibles sur le marché national, et que les systèmes soient simples à réaliser dans nos ateliers.

Ceci étant, ce dispositif aidera les étudiants, à travers les essais, les analyses et recherches, à pénétrer dans ce domaine passionnant et élargir l'éventail de leurs connaissances.

I.3 Le groupe de travail

Bien que le groupe de travail est constitué de personnes choisies pour leurs compétences et leurs expériences et / ou leurs responsabilités dans divers aspects du sujet analyse de la valeur. Pour des raisons de crédibilité, d'habilité et de performance. Ce groupe doit être cohérent et complet en ce sens que chaque membre dans le domaine qu'il maitrise, apporte son aide pour cerner le sujet et de participer à l'évolution de l'étude.

Toute fois nous nous estimons heureux d'avoir la chance de découvrir cet outil d'aide à la conception et de nous initier à son application dans le cadre du projet de fin d'étude.

Les membres du groupe de travail

Nom et prénom	Fonction
Mr S. LARBI	Enseignant
Mr Y. HAMIDI	Etudiant
Mr D. AMMAM	Etudiant

Tableau II.1 Membres du groupe de travail

II. Phase 2 : Recherche d'information

Cette étape est très importante puisque la récolte d'une somme considérable d'informations, nous permettra de faire le tour et d'élargir l'éventail des solutions possibles.

Cela consiste à apporter les informations nécessaires concernant ce dispositif. Pour qu'on puisse concevoir un tel outil. On est amené à avoir une très bonne connaissance du principe de l'essai, ainsi que suffisamment d'information sur le phénomène d'usure que nous avons présenté dans la première partie de ce travail.

L'information la plus importante pour nous est le document de la norme qui traite de la normalisation du dispositif abrasimètre, ainsi que la méthode d'effectuer l'essai. Cette norme est : ISO_4694.

II.1 Présentation de la norme ISO 4694

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (CEI) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

La tâche principale des comités techniques est d'élaborer les Normes internationales. Les projets de Normes internationales adoptés par les comités techniques sont soumis aux comités membres pour vote. Leur publication comme Normes internationales requiert l'approbation de 75 % au moins des comités membres votants.

L'ISO 4649 a été élaborée par le comité technique ISO/TC 45, Élastomères et produits à base d'élastomères, sous-comité SC 2, Essais et analyses.

II.2 Domaine d'application

La présente Norme internationale spécifie deux méthodes de détermination de la résistance du caoutchouc à l'abrasion à l'aide d'un dispositif à tambour tournant.

Les méthodes consistent à déterminer la perte de volume d'une éprouvette de caoutchouc soumise à une action abrasive par frottement sur une qualité spécifiée de toile abrasive. La méthode A utilisé une éprouvette fixe et la méthode B utilise une éprouvette tournante. Pour chaque méthode, le résultat peut être exprimé en perte de volume relative ou par un indice de résistance à l'abrasion.

Étant donné que des facteurs tels que la qualité de toile abrasive et l'adhésif utilisés dans la fabrication de la toile ainsi que la contamination et l'usure dues aux essais antérieurs entraînent des variations des valeurs absolues de la perte par abrasion, tous les essais sont comparatifs. Des essais avec des caoutchoucs de référence sont inclus pour que les résultats puissent être exprimés soit en perte de volume relative par rapport à une toile abrasive étalonnée, soit par un indice de résistance à l'abrasion par rapport à un caoutchouc de référence.

NOTE : L'utilisation de l'éprouvette tournante conduit souvent à une perte par abrasion plus uniforme dans la mesure où toute la surface de l'éprouvette est en contact avec la toile abrasive pendant toute la durée de l'essai. Cependant, il existe une expérience considérable acquise en utilisant l'éprouvette fixe.

Ces deux méthodes d'essai conviennent aux essais comparatifs, de contrôle de la qualité, de conformité aux spécifications, aux besoins d'arbitrage et aux travaux de recherche et de développement. On ne peut déduire aucune relation entre les résultats de cet essai d'abrasion et les performances en service

II.3 Schéma de l'appareil présenté par la norme

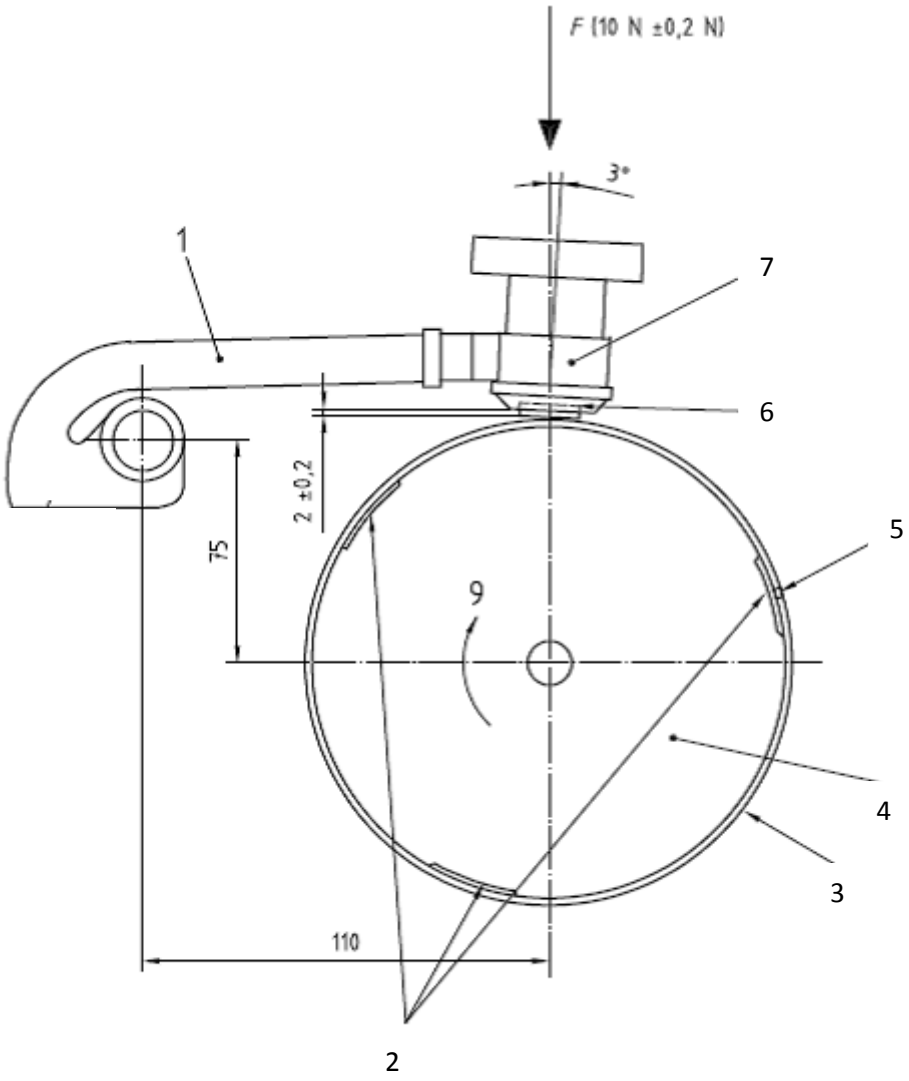


Figure II.1 Schéma de l'abrasimètre

Nomenclature

1. Bras porte broche
2. Papier adhésif double face
3. Papier abrasif
4. Cylindre
5. Joint
6. Eprouvette
7. Broche porte éprouvette

III. Phase 3 : Analyse fonctionnelle

L'idée que sous-entend l'analyse fonctionnelle est : la connaissance des fonctions découlant d'un besoin qui aide à mieux définir le produit qui satisfera ce besoin. Pour permettre cette connaissance, une démarche spécifique a été créée : l'analyse fonctionnelle.

L'avantage d'une approche par les fonctions est d'être exhaustif et progressive. Exhaustive puisque le besoin est décrit selon les différentes fonctions validées qui en découlent. Si une fonction manque, le but de 'AF est de la révéler. Progressive par itération, en précisant le besoin, en validant les fonctions obtenues, en recherchant au fur et à mesure de cette analyse des systèmes (produit existant ou concept de produit) ayant des fonctions correspondantes, l'AF va aider à définir le concept de solution adapté au besoin. Elle consiste à mettre en regard les fonctions du concept de produit et les fonctions associées au besoin.

III.1 Cahier des charges du besoin

- Concevoir un dispositif abrasimètre
- Dispositif à mouvement de rotation et translation
- Nature de l'essai : usure par abrasion
- L'essai est appliqué à des matériaux bien déterminés
- Eprouvette cylindrique
- Vitesse de rotation de cylindre fixée : V= 40 tours/min
- Vitesse de rotation de l'éprouvette constante
- Vitesse d'avance par tour constante
- Charge appliqué est de 10 N
- Prévoir un système de fixation de l'éprouvette
- Système d'application de la charge
- Guidage du cylindre et la broche avec des roulements
- Recours minimum à la sous-traitance
- Solution simple, réalisable avec les moyens du département

III.2 Recensement des fonctions de service

Pour recenser les fonctions de service on applique les trois méthodes suivantes :

- Méthode intuitive
- Relation avec l'environnement
- Analyse séquentielle

a. Méthode intuitive

Cette méthode stipule que pour déterminer les fonctions principales et secondaires d'un produit il suffit de s'appuyer sur l'intuition ou encore l'imagination en se posant des questions en rapport avec le fonctionnement et l'utilité de mécanisme : Pourquoi le concevoir ? A qui il sert ?

La réponse que nous pouvons fournir à cette question est : le dispositif abrasimètre est conçu afin d'effectuer des essais de résistance à l'abrasion. Mais comment peut-il les effectuer ? Ainsi donc il doit :

- Générer un mouvement de rotation du cylindre
- Mouvement de rotation de l'éprouvette
- Mouvement de translation de l'éprouvette
- Réaliser le contact entre le cylindre et l'éprouvette
- Applique une charge

b. Relation avec les éléments de l'environnement

Nous continuons le recensement des fonctions avec la deuxième méthode qui est la relation avec les éléments de l'environnement en identifiant le milieu extérieur du produit, c'est-à-dire tout ce qui est en contact physique ou virtuel avec lui.

Il s'agit pour chaque phase du cycle de vie du produit de dresser la liste exhaustive des éléments du milieu environnant (éléments humains, physiques, énergétiques, d'ambiance…) appelés aussi inter-acteurs qui se trouve en situation d'interagir avec lui.

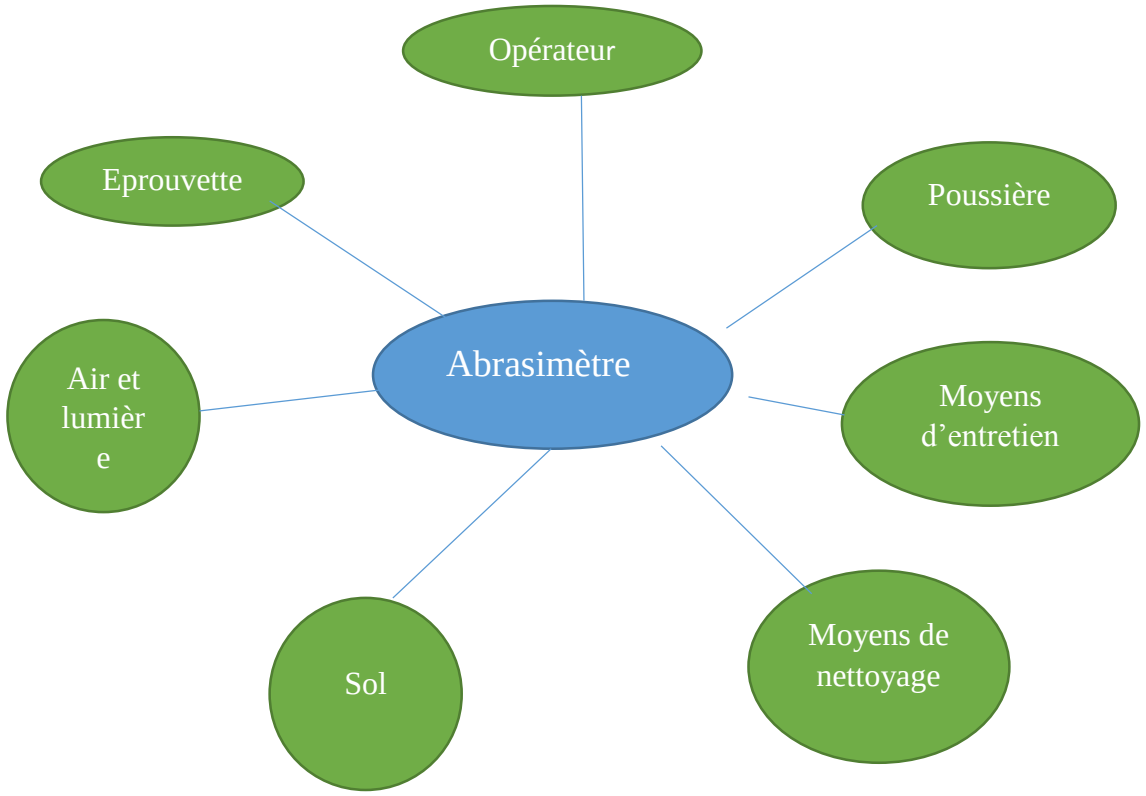


Figure II.2 Relation de l'abrasimètre avec les éléments extérieurs

Le produit est représenté au milieu autour duquel on a figuré les éléments qui sont en contact physique ou virtuel avec lui. On a représenté les liaisons avec des traits.

La recherche des conditions d'interactions nous aide à repérer les couples d'éléments mis en jeu et de définir ainsi toutes les fonctions et contraintes.

Pour ce faire on vérifie l'interaction de chaque élément du milieu extérieur ainsi que le produit lui-même avec tous les autres éléments avec qui il est en contact direct ou intermédiaire, on obtient alors le tableau II.2.

Opérateur	• Fixer le dispositif au sol • Effectuer les vérifications avant l'essai • Fixer l'éprouvette • Appliquer la charger au contact
Eprouvette	• Doit être fixée sur la broche • Doit être soumise aux mouvements de rotation et translation
Moyens de nettoyage	• Brosser, débarrasser le dispositif des débris
Moyens d'entretien	• Réparer les pièces défectueuses
Sol	• Assurer la fixation • Amortir les vibrations
Air et lumière	• Ne pas oxyder le dispositif • Ne pas décolorer le dispositif

Tableau II.2 Relations des éléments extérieurs avec l'abrasimètre

c. Analyse séquentielle

1. Phase de la vie de l'abrasimètre

Elle consiste à examiner toutes les étapes de la vie du produit, avant, pendant et après l'utilisation. La recherche séquentielle fait apparaître de nouveaux éléments extérieurs si ceux-ci ont été oubliés auparavant.

Dans notre cas, nous pourrons considérer les étapes mentionnées dans le tableau II.3.

Etapes de la vie du dispositif	**durée**
1. Préparation de dispositif à l'essai 2. Dispositif effectuant l'essai 3. Dispositif au repos	20% 30% 70%

Tableau II.3 Etapes de la vie du dispositif

Toutes les étapes de la vie du dispositif peuvent être détaillées à l'aide d'un diagramme.

Figure II.3

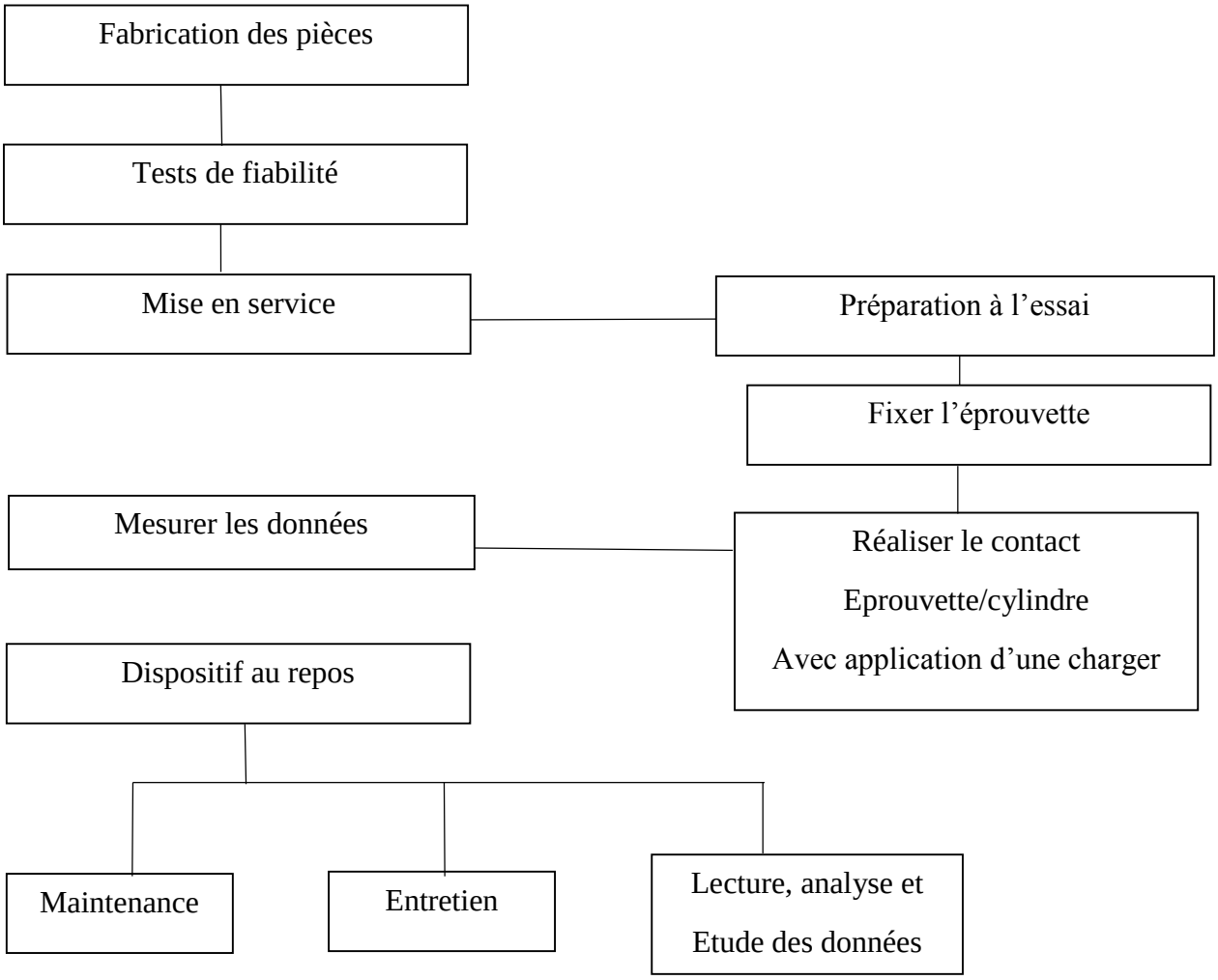


Figure II.3 Diagramme des phases de la vie du dispositif

1.1 Préparation du dispositif à l'essai

- Fixer le dispositif au sol
- Vérifier l'horizontalité
- Fixer l'éprouvette
- Transmettre le mouvement de rotation au cylindre
- Transmettre les mouvements de translation et de rotation

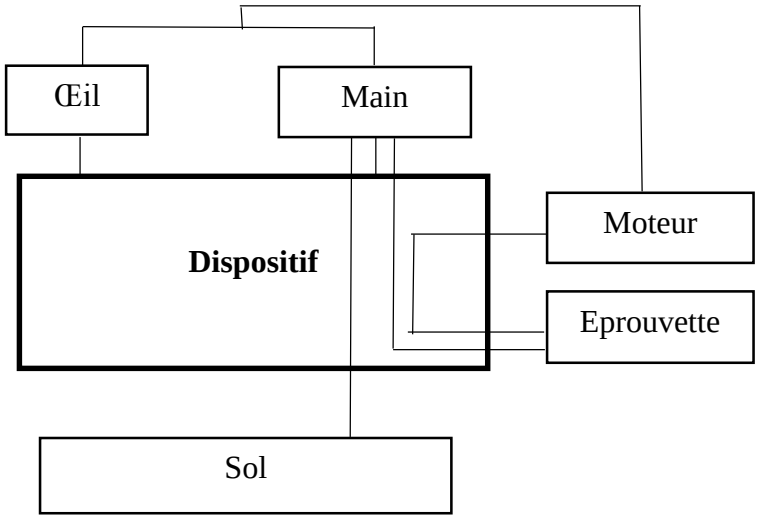


Figure II.4 Relations avec l'environnement : Préparer l'essai

1.2 Dispositif effectuant l'essai

- Réaliser le contact cylindre éprouvette
- Appliquer une charge
- Démarrer l'essai
- Visualiser l'essai

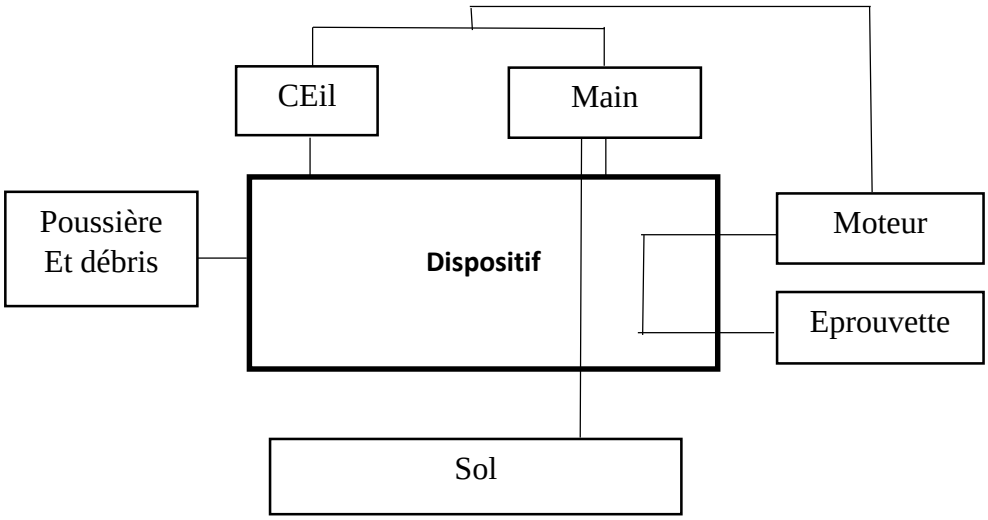


Figure II.5 Relations avec l'environnement : Dispositif effectuant l'essai

1.3 Dispositif au repos

- Nettoyer le dispositif
- Entretenir le dispositif
- Ne pas se décolorer par la lumière
- Ne pas s'oxyder par l'air

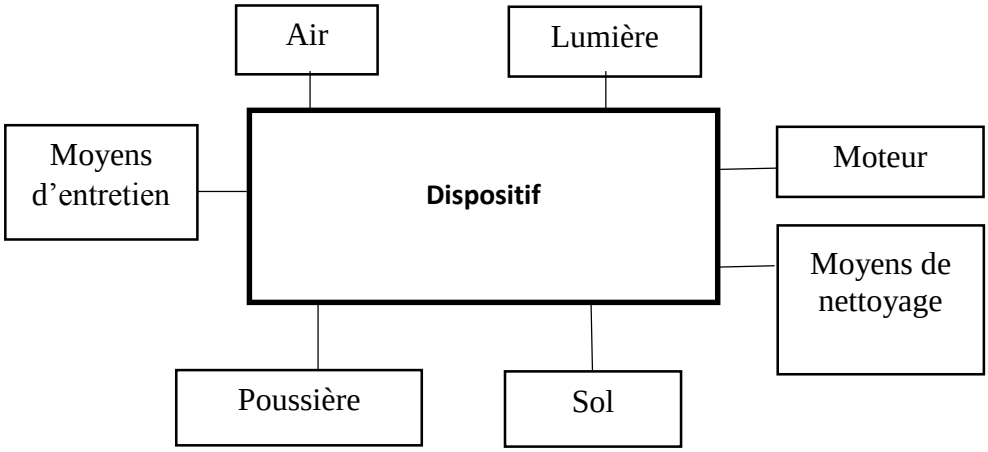


Figure II.6 Relations avec l'environnement : Dispositif au repos

Cette méthode nous a révélé un élément qui a été oublié dans les analyses précédentes. Le moteur. La relation de celui-ci avec le dispositif, nous donne une fonction de service : « transmettre la vitesse de rotation à l'éprouvette et au cylindre ».

2. Récapitulation des fonctions recensées

2.1 Fonctions de services

- Fixer le dispositif au sol
- Fixer l'éprouvette
- Transmettre les mouvements de rotation et de translation à l'éprouvette
- Transmettre la vitesse de rotation au cylindre
- Appliquer une charge au contact cylindre/ éprouvette

2.2 Fonctions de contrainte

- Protéger le moteur d'une éventuelle surcharge
- Amortir les vibrations
- S'adapter à l'environnement
- Ne pas blesser l'opérateur
- Ne pas gêner
- Résister aux intempéries (corrosion)
- Nettoyer le dispositif
- Entretenir le dispositif

Les relations des éléments extérieurs est le produit sont matérialisées à l'aide du graphe d'environnement ci-dessous

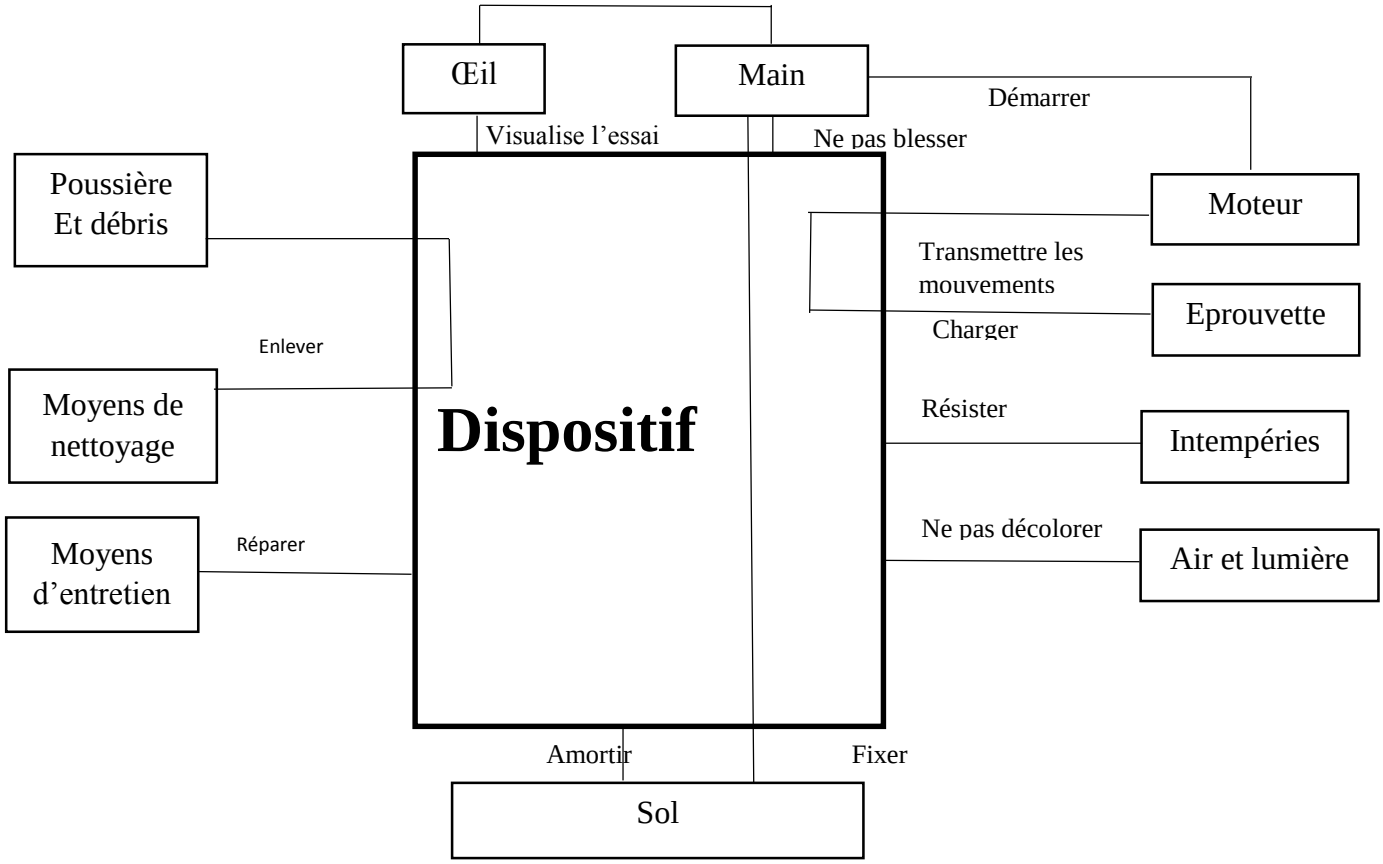


Figure II.7 Relations avec l'environnement

III.3 Recherche des fonctions techniques

Les fonctions techniques sont les actions internes au produit, entre ses constituants. Pour les déterminer nous allons nous appuyer sur la (Figure II.7).

Pour rechercher les fonctions techniques, il nous faut déterminer les constituants internes au produit. Ces constituants sont représentés par des rectangles internes à l'intérieur du grand rectangle qui correspond au produit.

Pour qu'il y ait fonction, il faut qu'un élément soit en contact physique avec celui qui le fait agir et celui sur lequel il agit. Ces contacts physiques sont repérés par des traits.

Pour cette raison, nous étudierons uniquement la période de mise en service du dispositif puisque c'est elle qui nous renseigne le plus sur les fonctions que doit satisfaire le dispositif, donc de déterminer les éléments internes qui participeront à l'accomplissement des différentes fonctions de services du dispositif (Figure II.8).

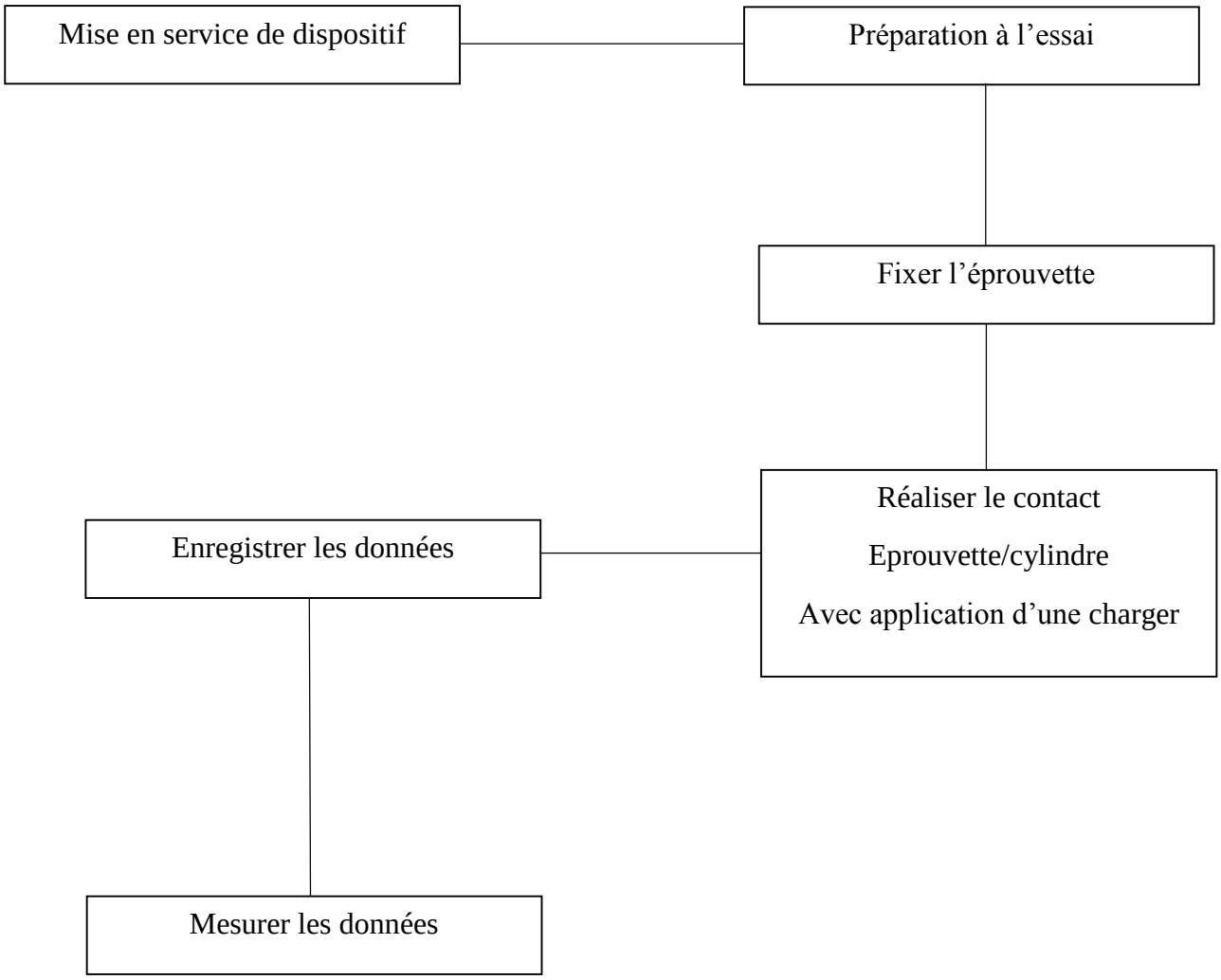


Figure II.8 Phase de fonctionnement du dispositif

III.4 Arborescence des fonctions de la phase

L'arborescence des fonctions permet d'ordonnancer les fonctions en distinguant les fonctions principales et secondaires.

Le tableau II.4 illustre l'ordre des fonctions recensées pour l'abrasimètre :

Fonctions principale	**Fonctions secondaires**
F1 : fixer le dispositif	**F1.1 :** être flexible **F1.2 :** régler l'horizontalité **F1.3 :** amortir les vibrations
F2 : transmettre la vitesse de rotation au cylindre	**F2.1 :** guider l'arbre de transmission **F2.2 :** lier l'arbre au cylindre **F2.3** : le moteur transmet le mouvement de rotation
F3 : transmettre la vitesse de rotation à l'éprouvette	**F3.1** : guider la broche porte éprouvette **F3.2** : fixer l'éprouvette **F3.3** : guider la transmission du mouvement de rotation
F4 : transmettre la vitesse de translation à l'éprouvette	**F4.1 :** système de transmission de mouvement de translation à l'éprouvette **F4.2** : guider la transmission de translation à l'éprouvette
F5 : appliquer la charge	**F5.1** : fixer la charge **F5.2 :** réaliser le contact cylindre/éprouvette
F6 : mesurer les données	**F6.1 :** pondérer la perte de masse

Tableau II.4 fonctions principales et secondaires

III.5 Les fonctions techniques

Pour satisfaire les fonctions de service. Il faut prévoir les pièces adéquates. Donc pour chaque fonction nous déterminerons les éléments internes qui peuvent la satisfaire.

1. Eléments internes et externes

F1 : Fixer le dispositif :

- Un bâti
- Une table
- Un support
- Des pieds

F2 : Transmettre la vitesse de rotation au cylindre :

- Le moteur transmet la vitesse de rotation au cylindre
- Un dispositif de transmission de la vitesse de rotation au cylindre
- Un dispositif de guidage de cylindre en rotation

F3 : Transmettre la vitesse de rotation a l'éprouvette :

- Le moteur transmet la vitesse de rotation à l'éprouvette
- Un dispositif de transmission de la vitesse de rotation à l'éprouvette
- Une broche réceptrice
- Un dispositif de guidage de l'éprouvette en rotation
- Un dispositif de fixation de l'éprouvette

F4 : Transmettre la vitesse de translation a l'éprouvette :

- Un dispositif de transmission de la vitesse de translation à l'éprouvette
- Un dispositif récepteur
- Un dispositif de guidage en translation de l'éprouvette

F5 : Appliquer la charge :

- Un dispositif d'application de la charge
- Possibilité de changer la position

F6 : Mesurer les données :

- Une balance de précision pour pondérer la perte de masse

IV. Phase 4. Recherche d'idées et voies de solutions

Comme il a été déjà défini dans la première partie, l'objectif de cette étape est de trouver le plus grand nombre d'idées et de solutions pour chaque fonction à satisfaire.

Maintenant que le cahier des charges du besoin est formulé, il doit permettre de proposer des idées, des vois de solutions pour ensuite passer à la concrétisation du produit. Avec l'approche donnée par l'arbre fonctionnel, on peut dire que nous avons centré le produit.

On utilise la méthode de **BRAINSTROMING** à fin de trouver les solutions adéquates. C'est une technique de créativité en groupe permettant de produire le plus d'idées possibles, dans un minimum de temps sur un thème donné.

Cette technique est utilisé dans la plupart des étapes de la résolution de problèmes, notamment pour :

- Recenser les problèmes à étudier lors du lancement d'un projet ou pendant son déroulement.
- Déterminer les causes possibles du problème étudié.
- Trouver toutes les solutions ou éléments de solution possibles.

IV.1 Fonction 1 : Fixer le dispositif :

Cette fonction regroupe les fonctions techniques suivantes :

- F1.1 : fixer le moteur avec système d'amortissement
- F1.2 : fixer la table de moteur sur la semelle.

IV.1.1 Solution N°1 (Figure II.1.1)

Nomenclature :

1. Support
2. Moteur
3. Poutre
4. Traverse
5. Vis
6. Boulon
7. Rondelle en élastomère

Principe de fonctionnement

La semelle se compose de deux poutres (3) en forme de (U) sur lesquelles nous installons quatre traverses (4) aussi en forme de (U), deux pour fixer le moteur (2) et une pour chacun des deux supports (1). Des rondelles en élastomère (7) sont prévues entre le moteur et les traverses pour amortir les vibrations.

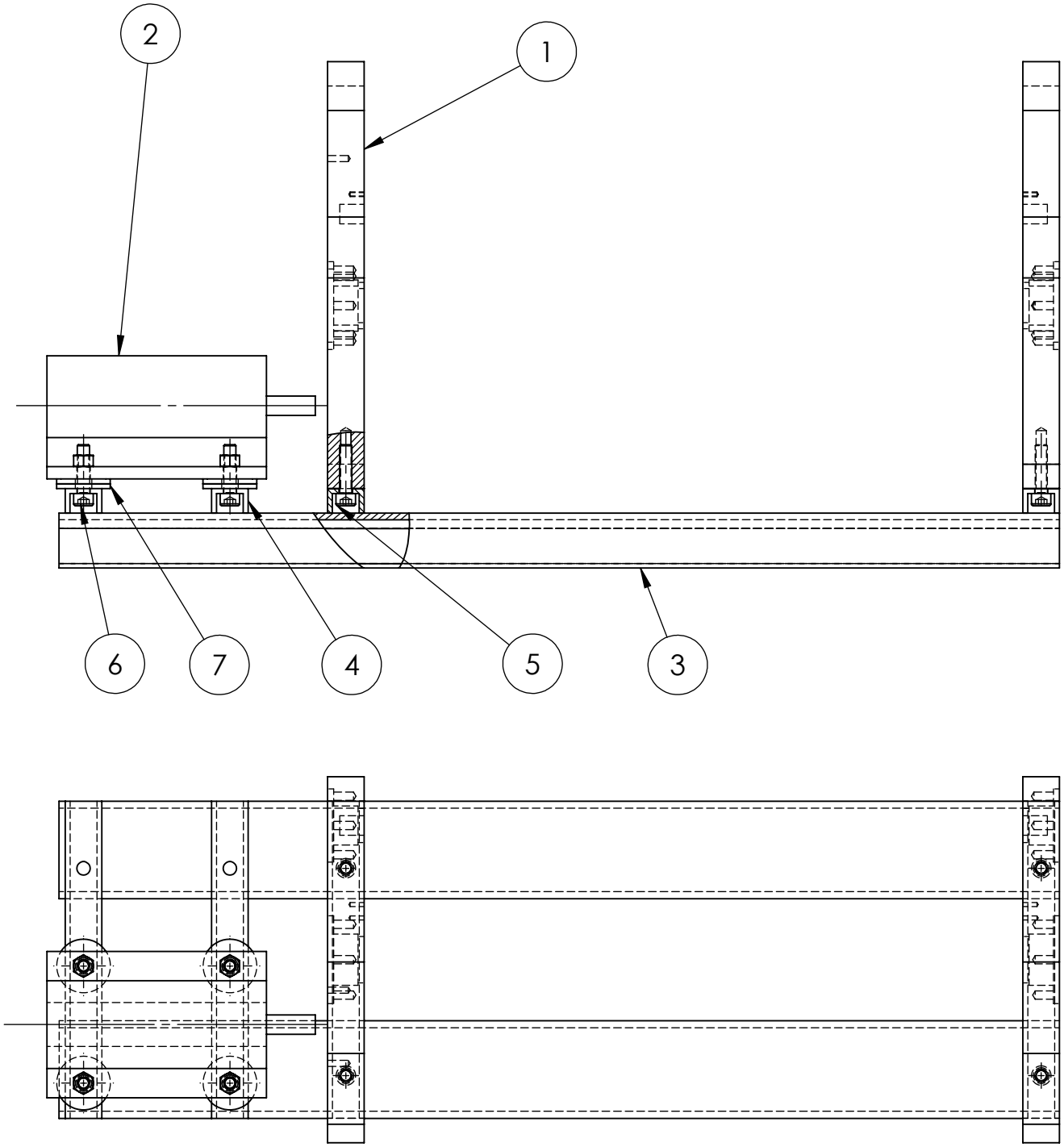


Figure II.1.1 Solution N° 1 : fixation du dispositif

IV.1.2 Solution N°2 (Figure II.1.2)

Nomenclature :

1. Support
2. Semelle
3. Moteur
4. Boulon
5. Rondelles en élastomère
6. Vis
7. Pieds en plastique

Principe de fonctionnement

La semelle (2) est faite d'une plaque en acier, les supports (1) sont fixés à la semelle avec des vis (6). Des rondelles en élastomères sont prévues entre le moteur et la semelle pour amortir les vibrations. La semelle s'appuie sur quatre pieds en plastique (7).

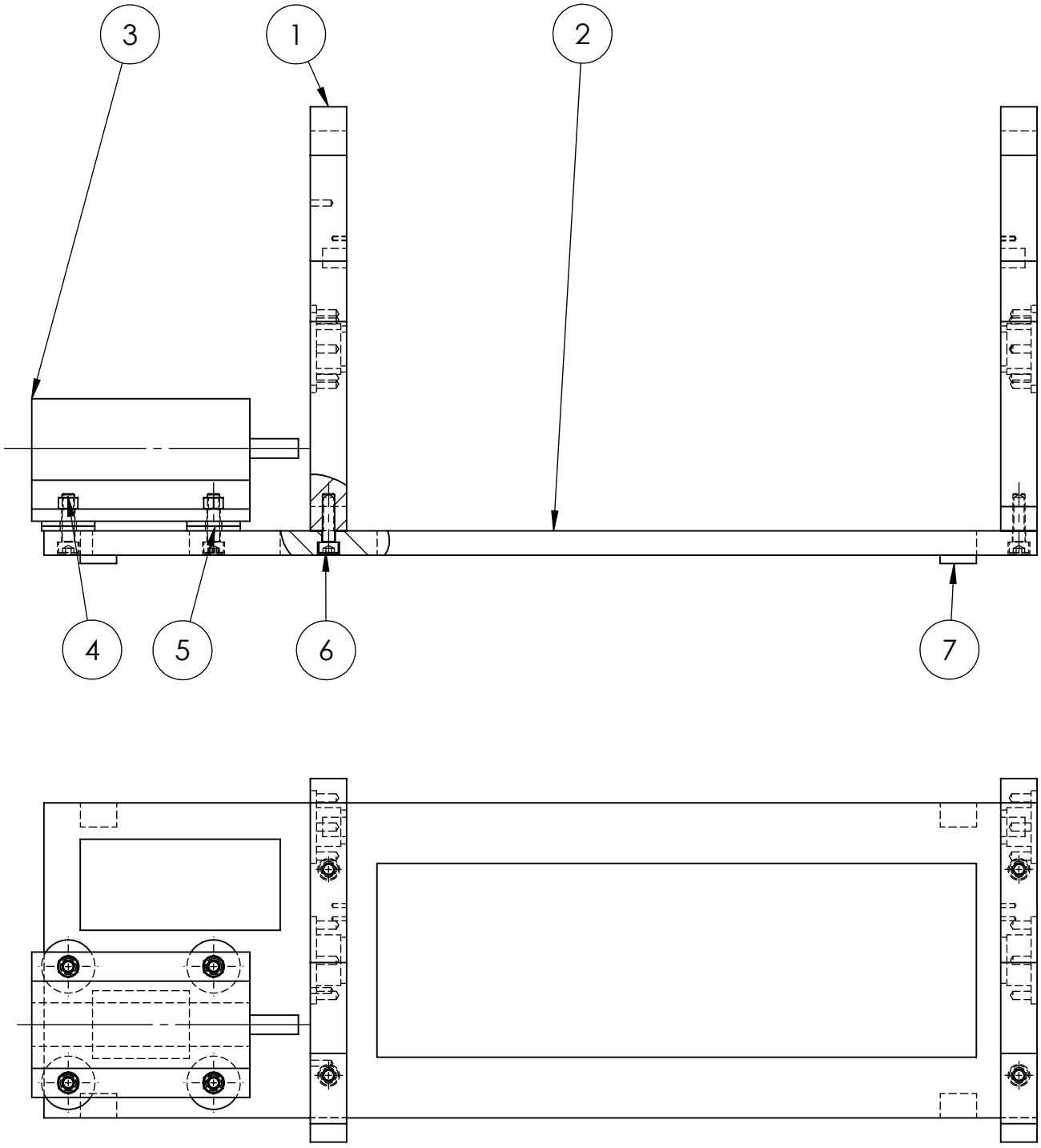


Figure II.1.2 : Solution N° 2 Fixation du dispositif

IV.2 Fonction 2 : Transmettre la vitesse de rotation au cylindre

Cette fonction regroupe trois groupes de fonctions techniques suivantes :

Groupe N°1 : guidage de l'arbre de transmission

- F2.1 : l'arbre de transmission est guidé en rotation

Groupe N°2 : réaliser la liaison de l'arbre avec le cylindre

- F2.2 : l'arbre et le cylindre sont liés

Groupe N°3 : transmission de mouvement de rotation par le moteur

- F2.3 : le moteur transmet le mouvement de rotation au dispositif de transmission
- F2.4 : le dispositif de transmission transmet le mouvement de rotation au cylindre

IV.2.1 Groupe N°1 : guider l'arbre de transmission

IV.2.1.1 Solution N°1 (Figure II.2.1.1) :

Nomenclature :

1. Support
2. Arbre
3. Roulement
4. Couvercle
5. Vis
6. Circlips

Principe de fonctionnement :

Le mouvement de rotation est transmis par le moteur vers l'arbre (2). Ce dernier est guidé en rotation par deux roulements à billes à contact oblique (3). Les bagues intérieures des roulements sont montées avec serrage sur l'arbre (2) et les bagues extérieures sont montées avec jeu sur les supports (1).

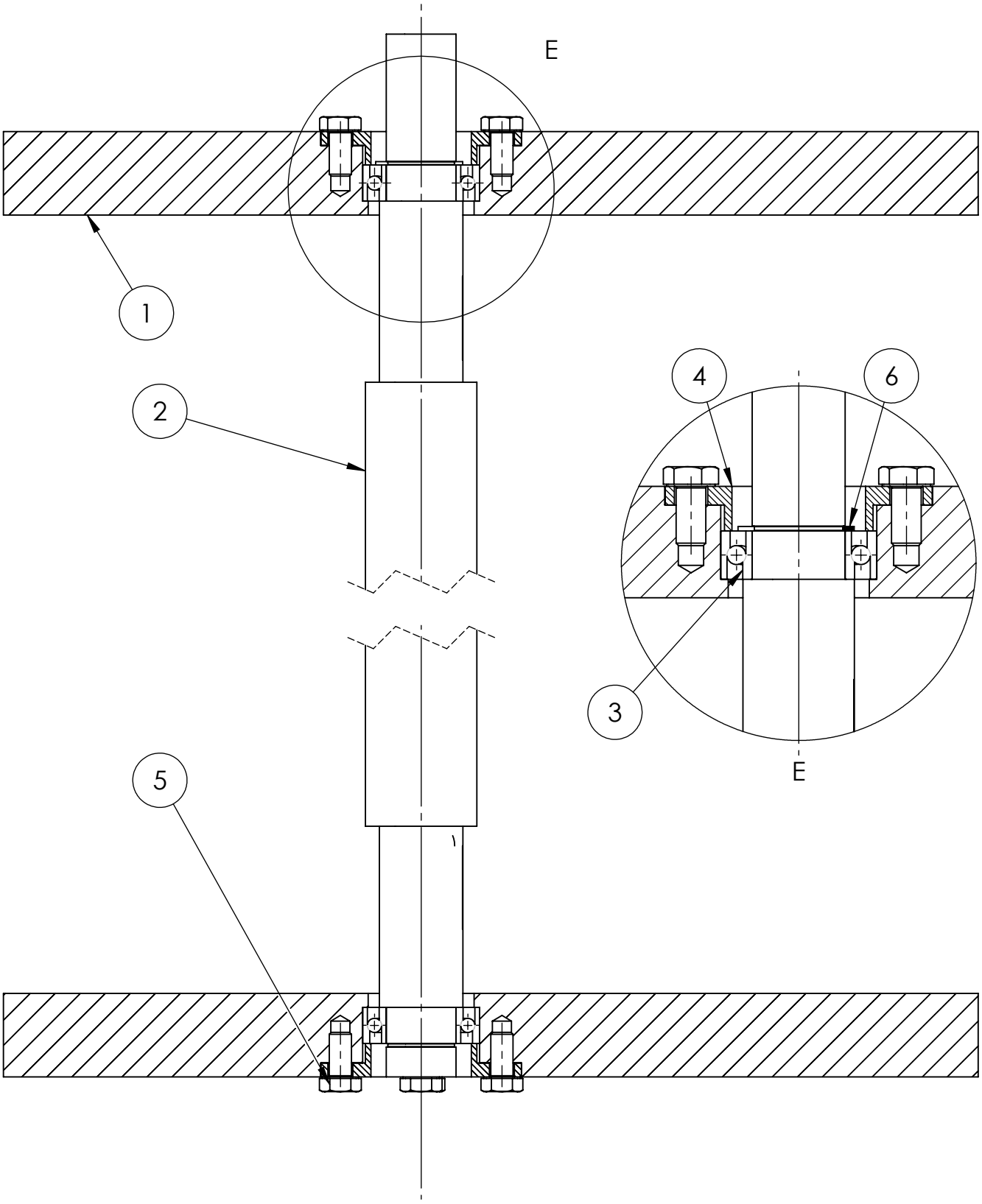


Figure II.2.1.1: Solution NÁ 1 : Guidage de l'arbre

IV.2.2 Groupe N°2 : lier l'arbre au cylindre :

IV.2.2.1 Solution N°1 (Figure II.2.2.1) :

Nomenclature :

1. Arbre
2. Roue de centrage
3. Cylindre
4. Vis

Principe de fonctionnement :

L'arbre (1) est lié à la roue de centrage (2), avec les cannelures présentes sur l'arbre (1) aux roues de transmission (2). Le cylindre (3) est lié à la roue de centrage avec six vis (4).

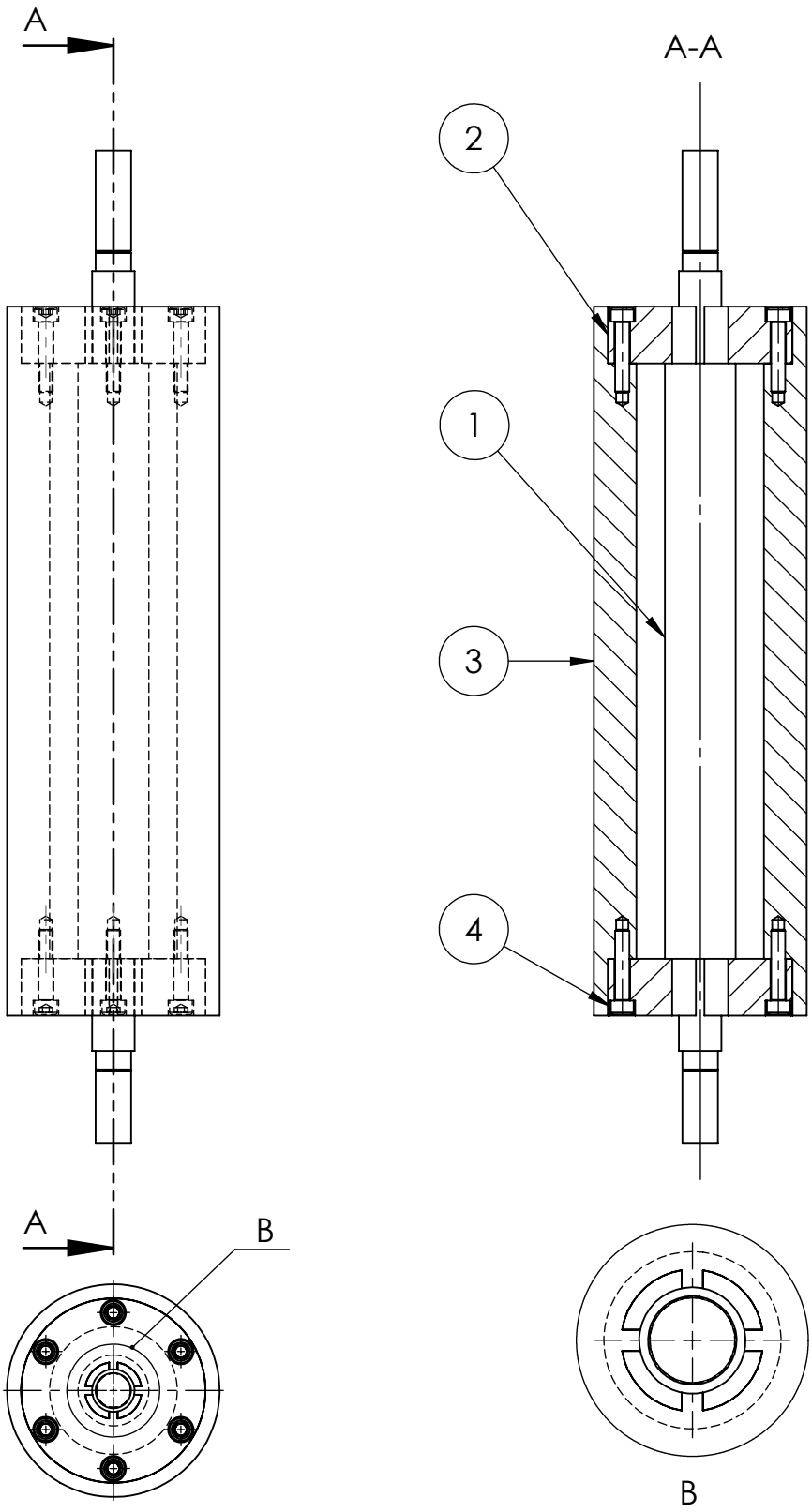


Figure II.2.2.1: Solution NÁ 1 : Liaison arbre cylindre

IV.2.2.2 Solution N°2 (Figure II.2.2.2) :

Nomenclature :

1. Arbre
2. Clavette
3. Roue de centrage
4. Cylindre
5. Vis

Principe de fonctionnement :

L'arbre (1) est lié à la roue de centrage (3), avec les clavettes .Le cylindre (4) est lié aux roues de centrage avec six vis (5).

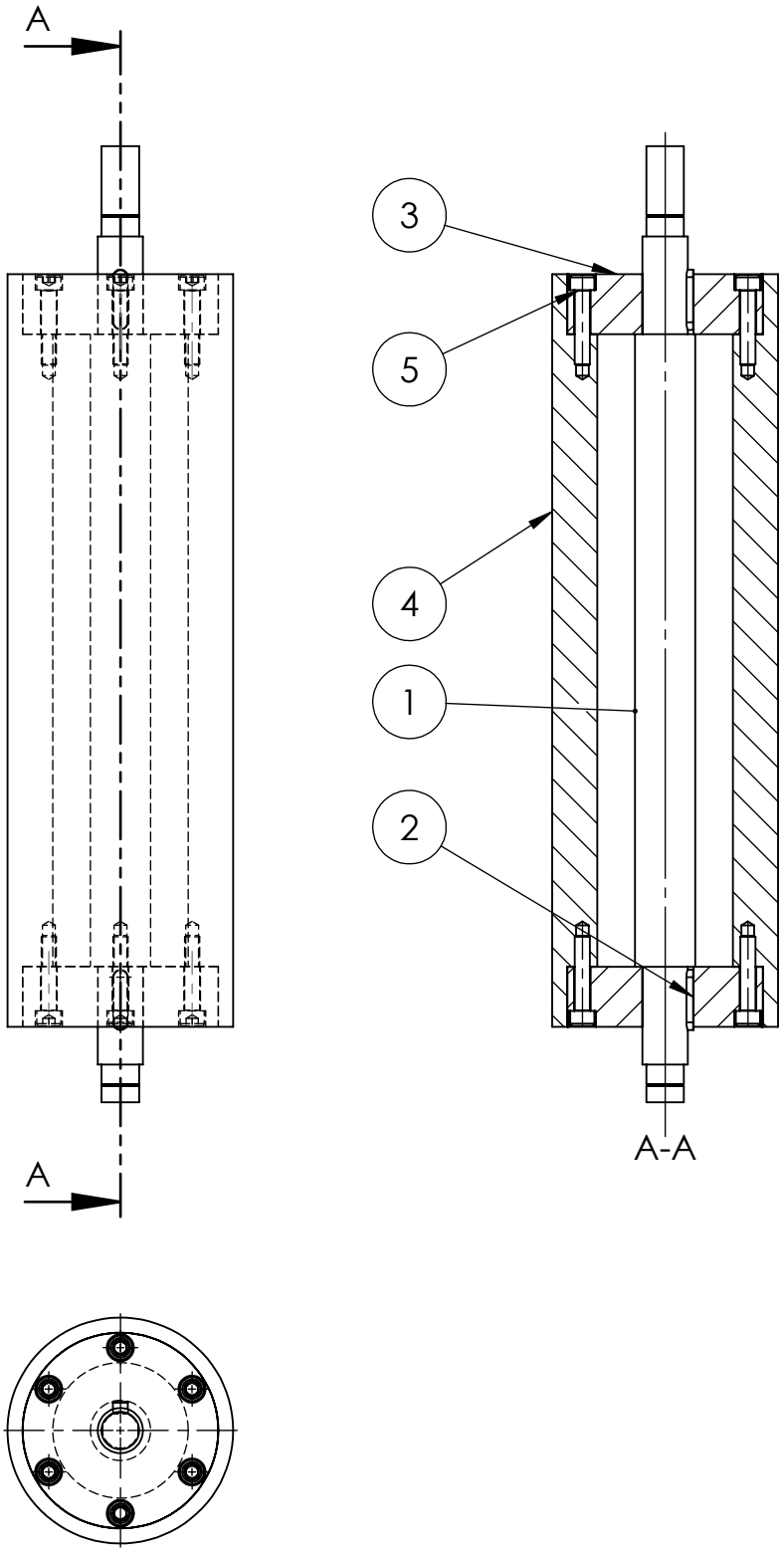


Figure II.2.2.2: Solution NÁ 2 : Liaison arbre cylindre

IV.2.2.3 Solution N°3 (Figure II.2.2.3) :

Nomenclature :

1. Arbre
2. Roue de centrage
3. Cylindre
4. Vis

Principe de fonctionnement :

L’arbre (1) est lié à la roue de centrage (2), avec les méplats présents sur l’arbre (1) aux roues de transmission (2). Le cylindre (3) est lié aux la roues de centrage avec six vis (4).

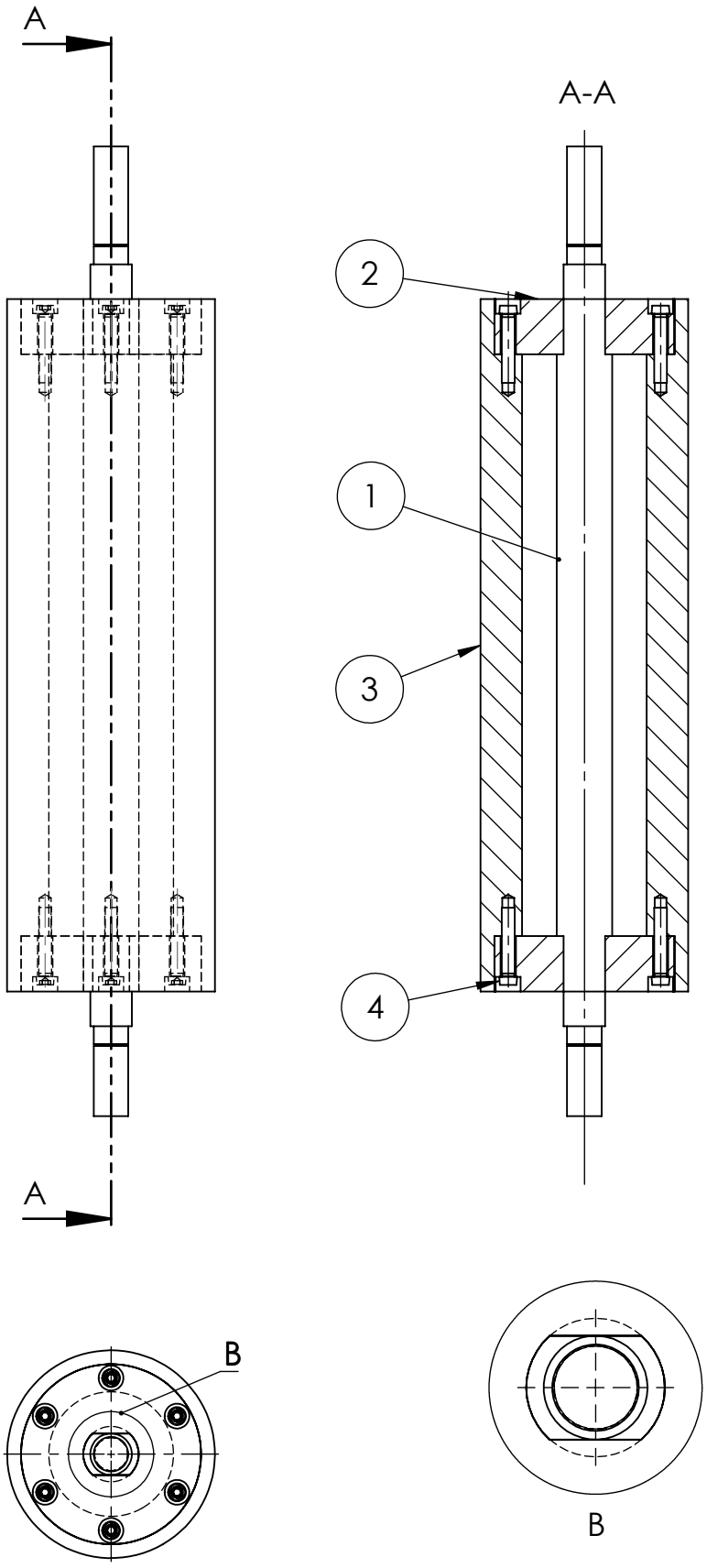


Figure II.2.2.3: Solution NÁ 3 : Liaison arbre cylindre

IV.2.2.4 Solution N°4 (Figure II.2.2.4) :

Nomenclature :

1. Arbre
2. Cylindre
3. Goupille
4. Clavette
5. Vis
6. Roue de centrage
7. Roue de centrage

Principe de fonctionnement :

L'arbre (1) est lié aux roues de centrage (6) et (7) d'un côté avec une clavette (4) et de l'autre avec la goupille (3), ce qui permet une liaison complète. Le cylindre (2) est lié aux roues de centrage avec six vis (6) et (7).

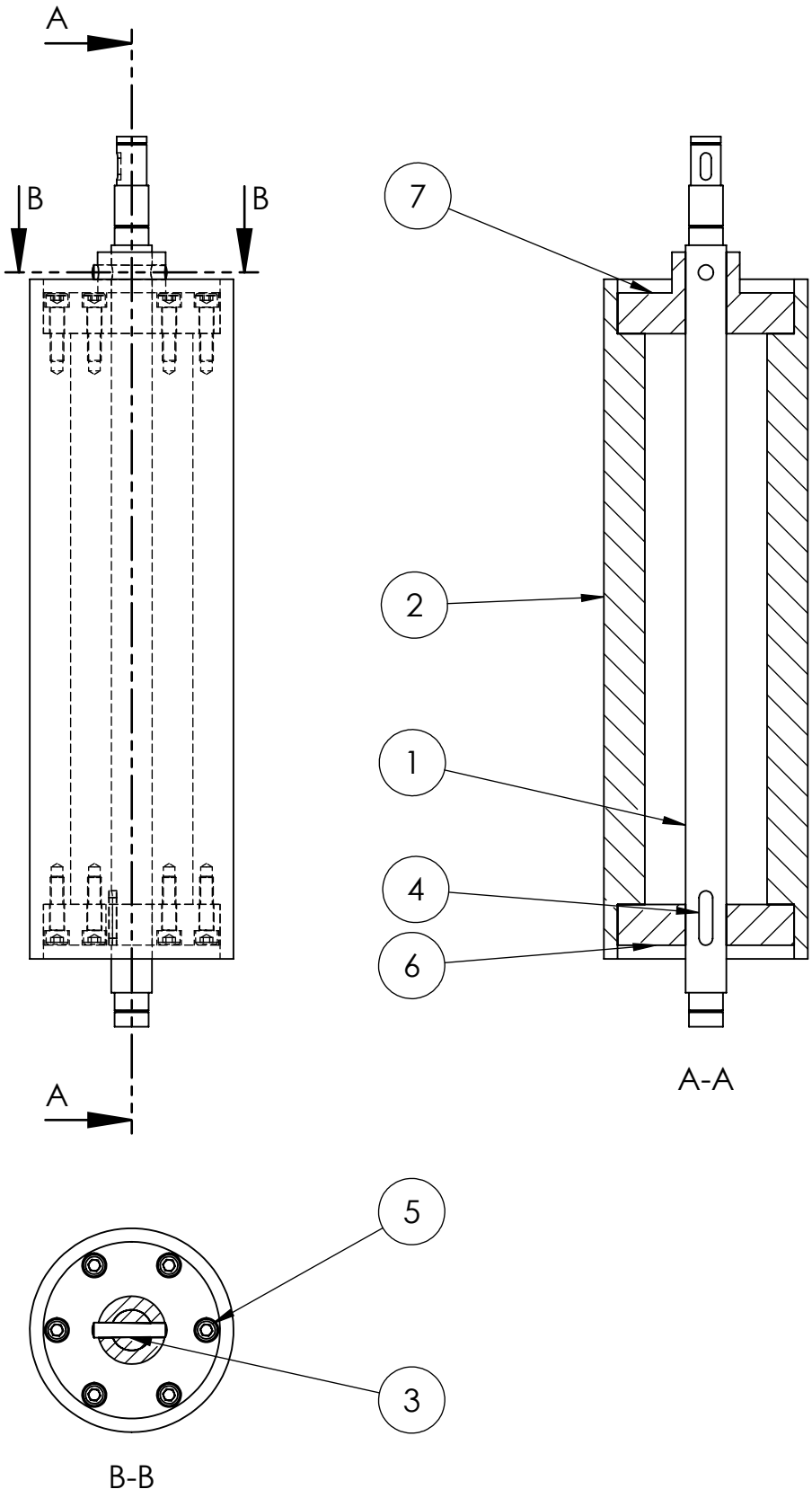


Fig II.2.2.4: Solution NÁ 4 : Liaison arbre cylindre

IV.2.3 Groupe N°3 : transmission de mouvement de rotation par le moteur

IV.2.3.1 Solution N°1 (Figure II.2.3.1)

Nomenclature :

1. Support
2. Arbre du cylindre
3. Arbre du moteur
4. Pignon
5. Roue dentée
6. Couvercle
7. Roulement
8. Circlips
9. Vis

Principe de fonctionnement :

Le mouvement de rotation qui arrive de l'arbre moteur (3) est transmet à l'arbre du cylindre (2), par l'intermédiaire de la transmission roue (5)/pignon (4).

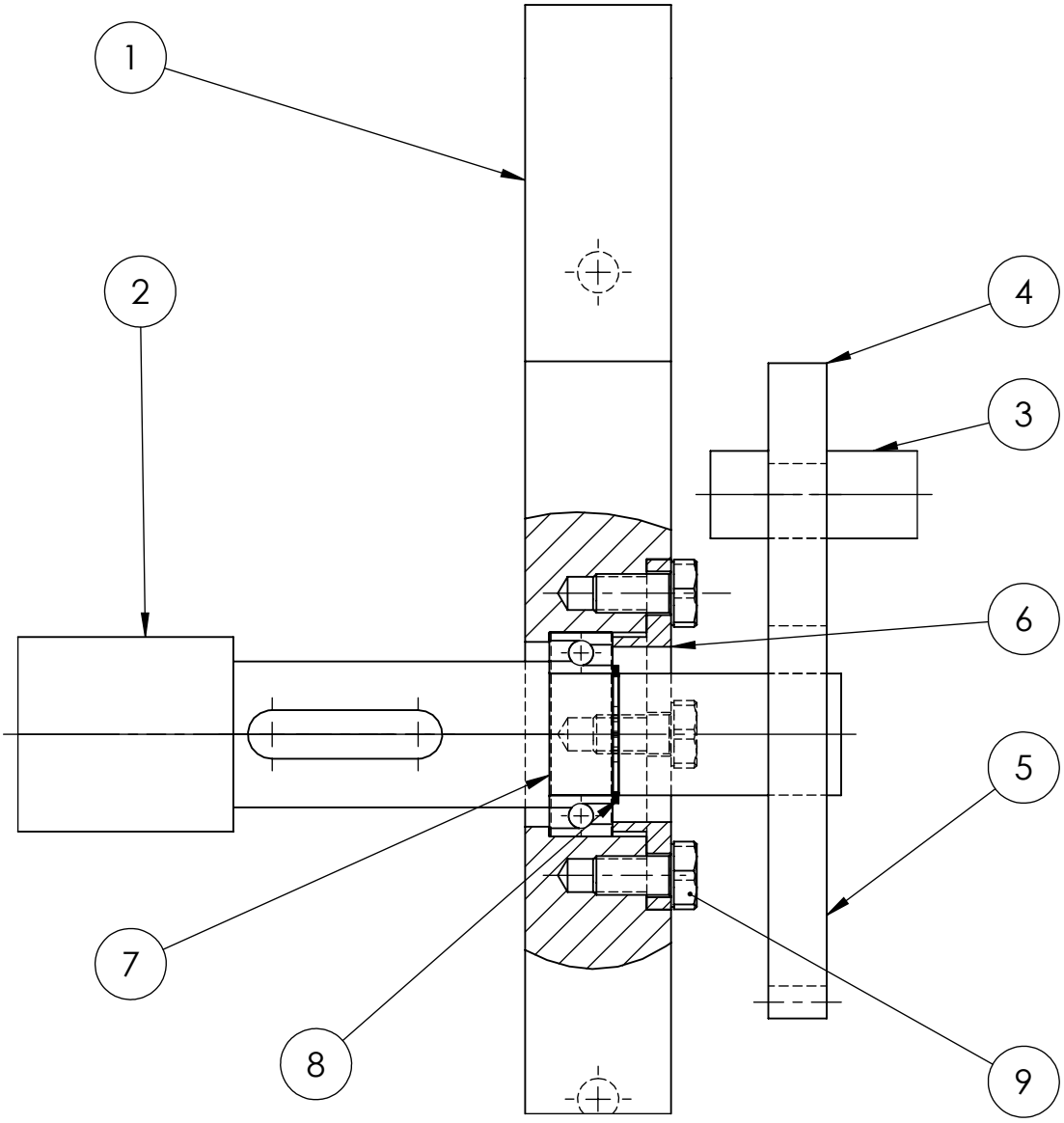


Figure II.2.3.1 Solution N°1 transmission de la rotation par le moteur

IV.2.3.2 Solution N°2 (Figure II.2.3.2) :

Nomenclature :

1. Support
2. Arbre du cylindre
3. Arbre du moteur
4. Poulie de l'arbre du cylindre
5. Poulie du moteur
6. Poulie de la tige filetée
7. Courroie
8. tendeur

Principe de fonctionnement :

Le mouvement de rotation qui arrive de l'arbre moteur (3) est transmet à l'aide de la courroie (7) et les poulies (4), (5) et (6). Le tendeur (8) est utilisé pour régler la tension

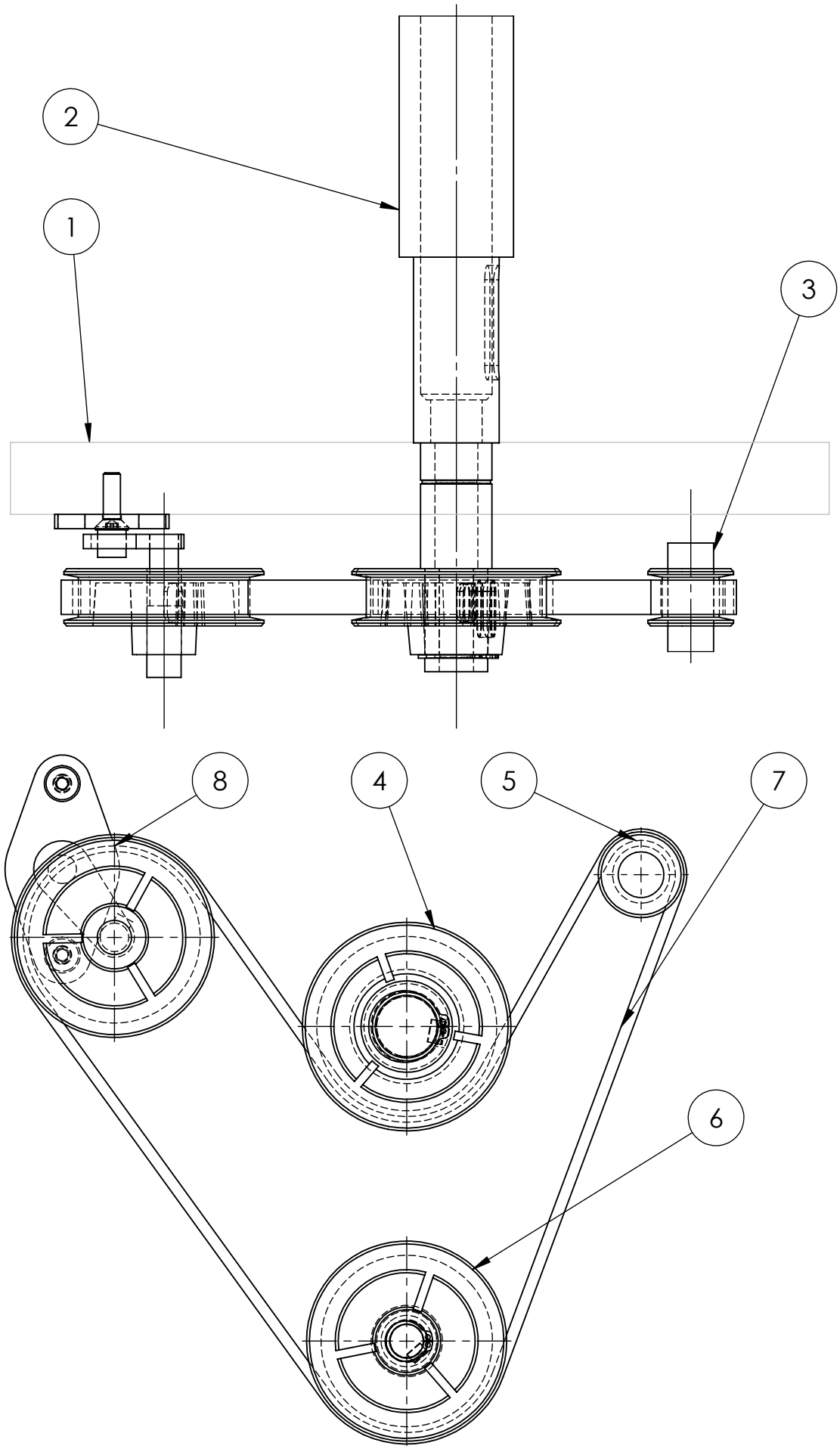


Figure II.2.3.2: Solution NÁ 2 : Transmission de la rotation par le moteur

IV.3 Fonction 3 : Transmettre la vitesse de rotation a l'éprouvette :

Cette fonction est réalisée avec trois groupes de fonctions techniques :

Groupe N°1 : transmission du mouvement de rotation a l'éprouvette :

- **F3.1 :** le dispositif de transmission transmet le mouvement de rotation à la broche porte éprouvette.
- **F3.2 :** le moteur transmet le mouvement de rotation.

Groupe N°2 : Guider la broche porte éprouvette :

- **F3.3 :** la broche porte éprouvette transmet le mouvement de rotation au dispositif de fixation de l'éprouvette.
- **F3.4 :** la broche porte éprouvette est guidée en rotation.

Groupe N°3 : Fixation de l'éprouvette :

- **F3.5 :** le dispositif de fixation de l'éprouvette transmet le mouvement de rotation à l'éprouvette.

IV.3.1 Groupe N°1 : Transmission du mouvement de rotation à la broche porte l'éprouvette :

IV.3.1.1 Solution N°1 (figure II.3.1.1) :

Nomenclature :

1. Broche porte éprouvette
2. Moteur
3. Butée à bille
4. Eprouvette
5. Bras porte broche
6. Collier
7. Goupille

Principe de fonctionnement :

Le moteur (2) est fixé directement sur la broche porte éprouvette (2). Celle-ci est guidée en rotation sur l'arbre (5) avec la butée à bille(3).

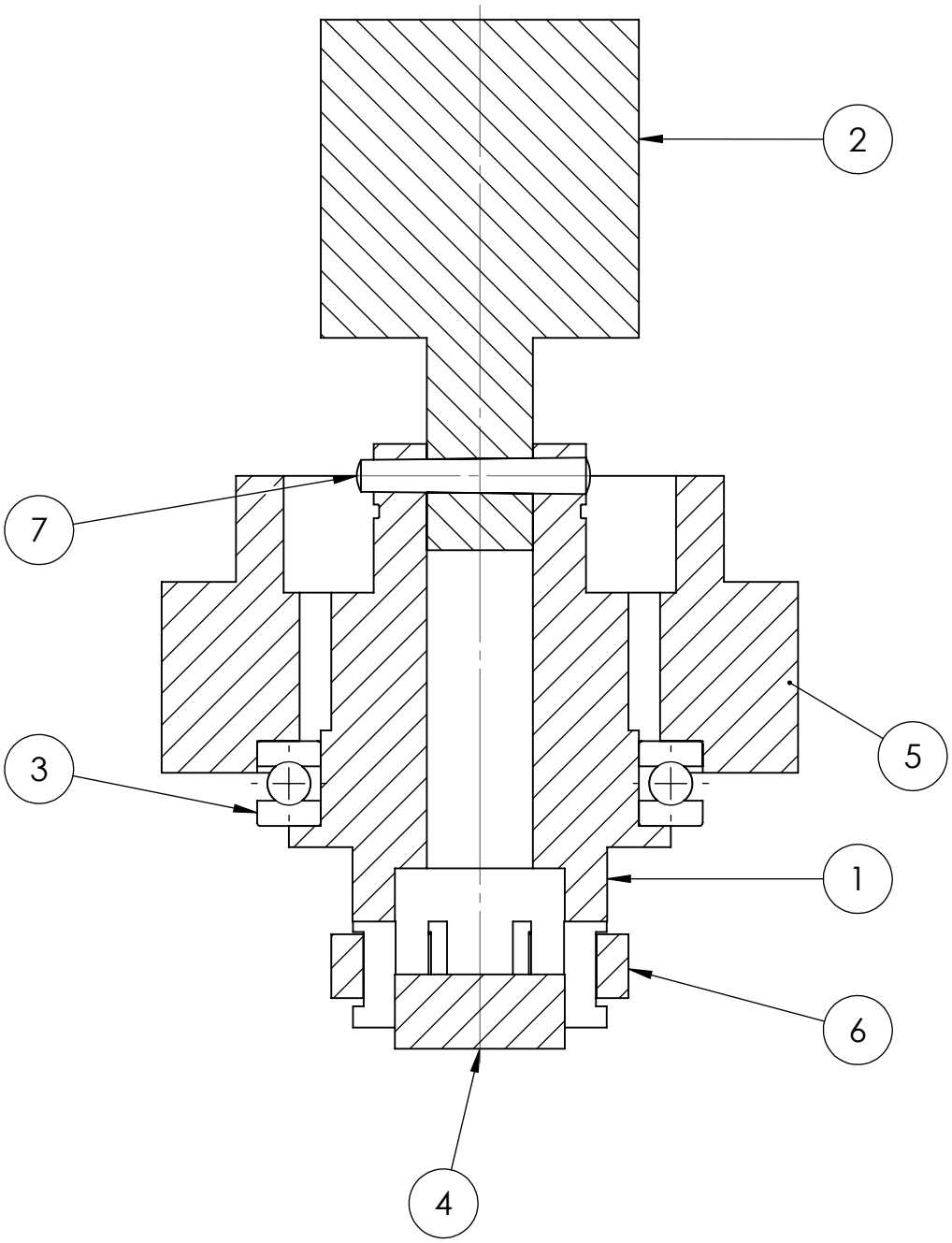


Figure II.3.1.1:Solution N°1: Transmission de mouvement de rotation à la broche

IV.3.1.2 Solution N°2 (Figure II.3.1.2) :

Nomenclature :

1. Support
2. Glissière
3. Traineau
4. Bras
5. Support crémaillère
6. Crémaillère
7. Pignon
8. Broche porte éprouvette
9. Boulon
10. Ecrou

Principe de fonctionnement :

Grâce à la translation de traineau (3) sur la glissière (2), le bras (4) qui est lié au traineau avec le boulon (9) translate aussi. La broche porte éprouvette (8) qui est guidé en rotation sur le bras (4), fais un mouvement de rotation grâce à la liaison pignon (7)/ crémaillère (6).

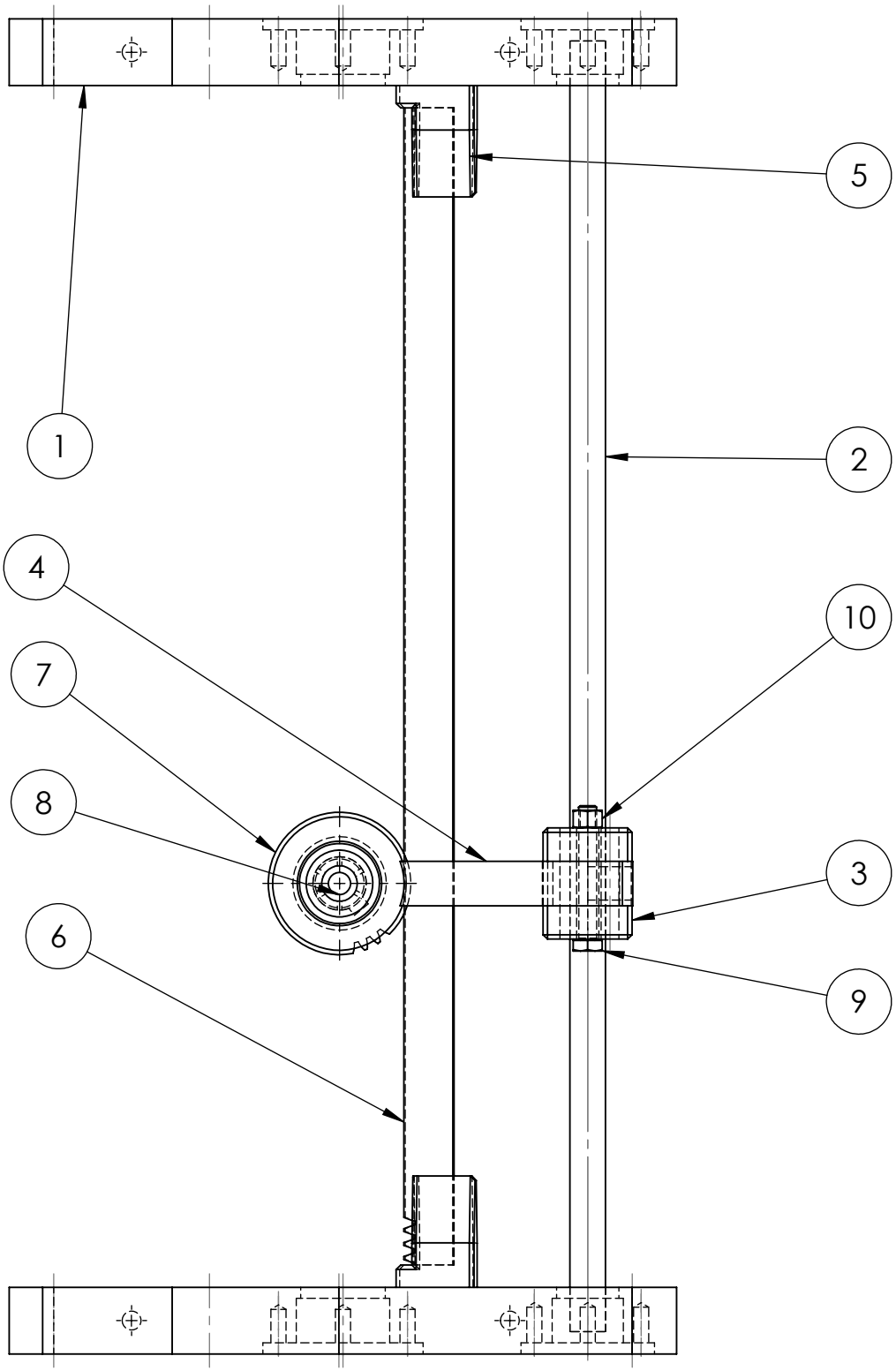


Figure II.3.1.2: Solution NÁ2: Transmission de mouvement de rotation ¨ L'®prouvette

IV.3.2 Groupe N°2 : Guider la broche porte éprouvette :

IV.3.2.1 Solution N°1 (Figure II.3.2.1) :

Nomenclature :

1. Bras
2. Broche porte éprouvette
3. Butée à bille
4. Roulement à bille
5. Eprouvette
6. Circlips

Principe de fonctionnement :

La broche porte éprouvette (2) est guidée en rotation sur le bras (1) avec la butée à bille (3) et le roulement à bille (4).

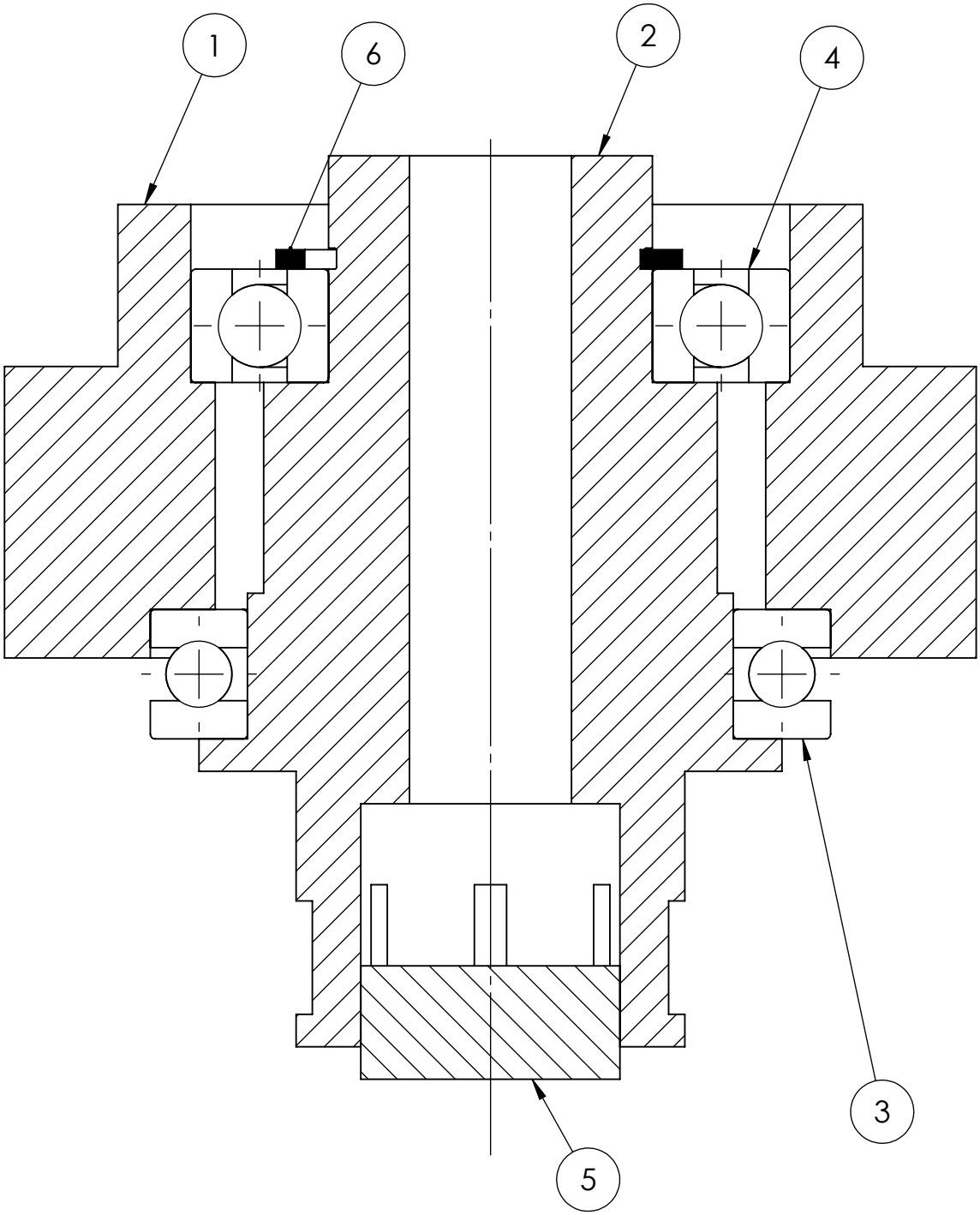


Figure II.3.2.1: Solution N° 1: Guidage de la broche porte éprouvette

IV.3.3 Groupe N°3 : Fixation de l'éprouvette :

IV.3.3.1 Solution N°1 (Figure II.3.3.1) :

Nomenclature :

1. Broche porte éprouvette
2. Mollette
3. Bras
4. Roulement
5. Eprouvette

Principe de fonctionnement :

Sous l'avancement de la mollette (2) la partie conique de la broche porte éprouvette (1) se déforme en exerçant une pression sur l'éprouvette (5).

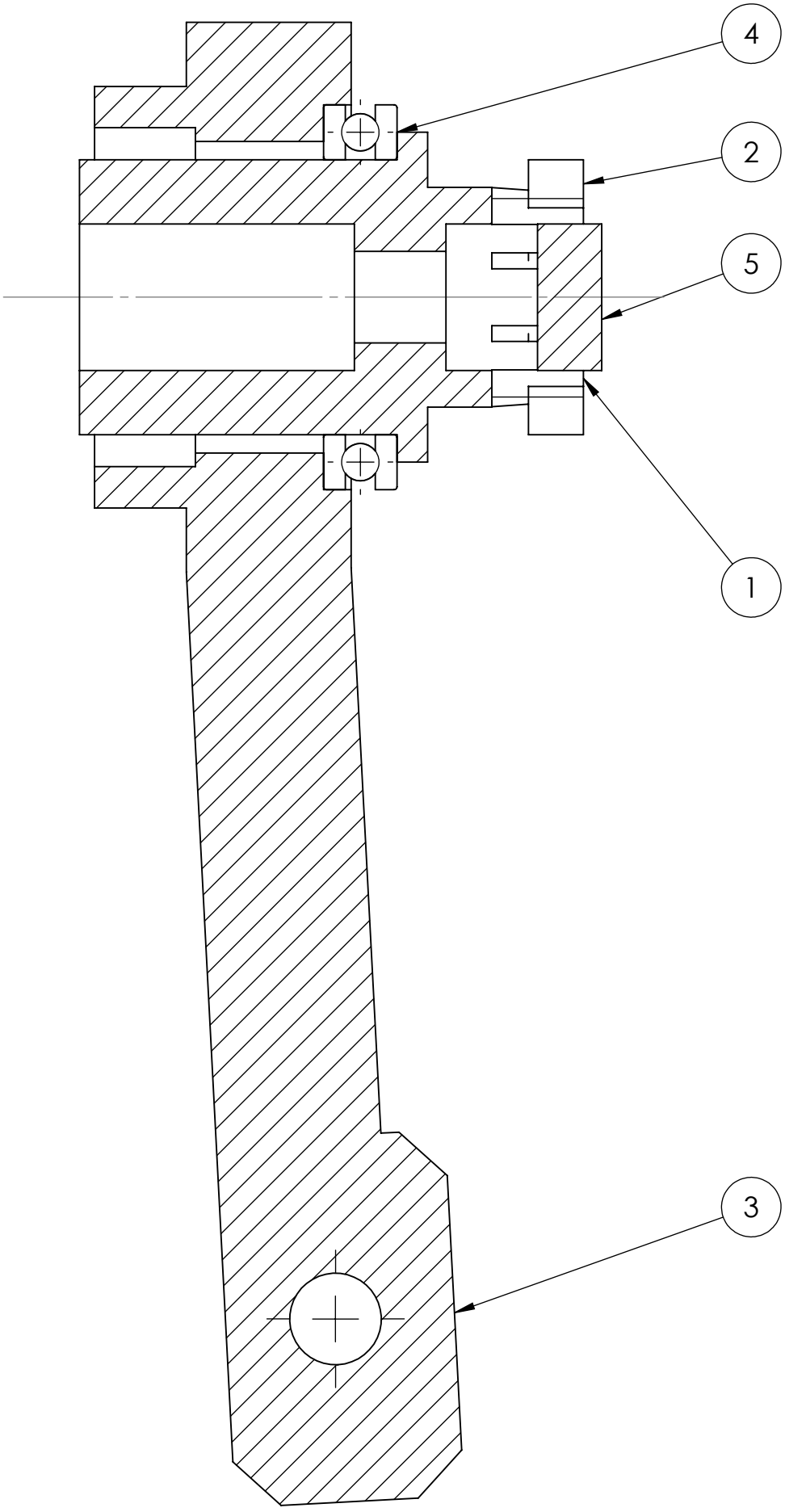


Figure II.3.3.1 : solution N°1 : Fixation de l'éprouvette

IV.3.3.2 Solution N°2 (Figure II.3.3.2) :

Nomenclature :

1. Broche porte éprouvette
2. Pince
3. Ecrou
4. Bras
5. Eprouvette

Principe de fonctionnement :

Sous l'avancement de l'écrou (3) la pince (2) exerce une pression sur les mors de la broche porte éprouvette (1), et cette dernière exerce une pression sur l'éprouvette (5).

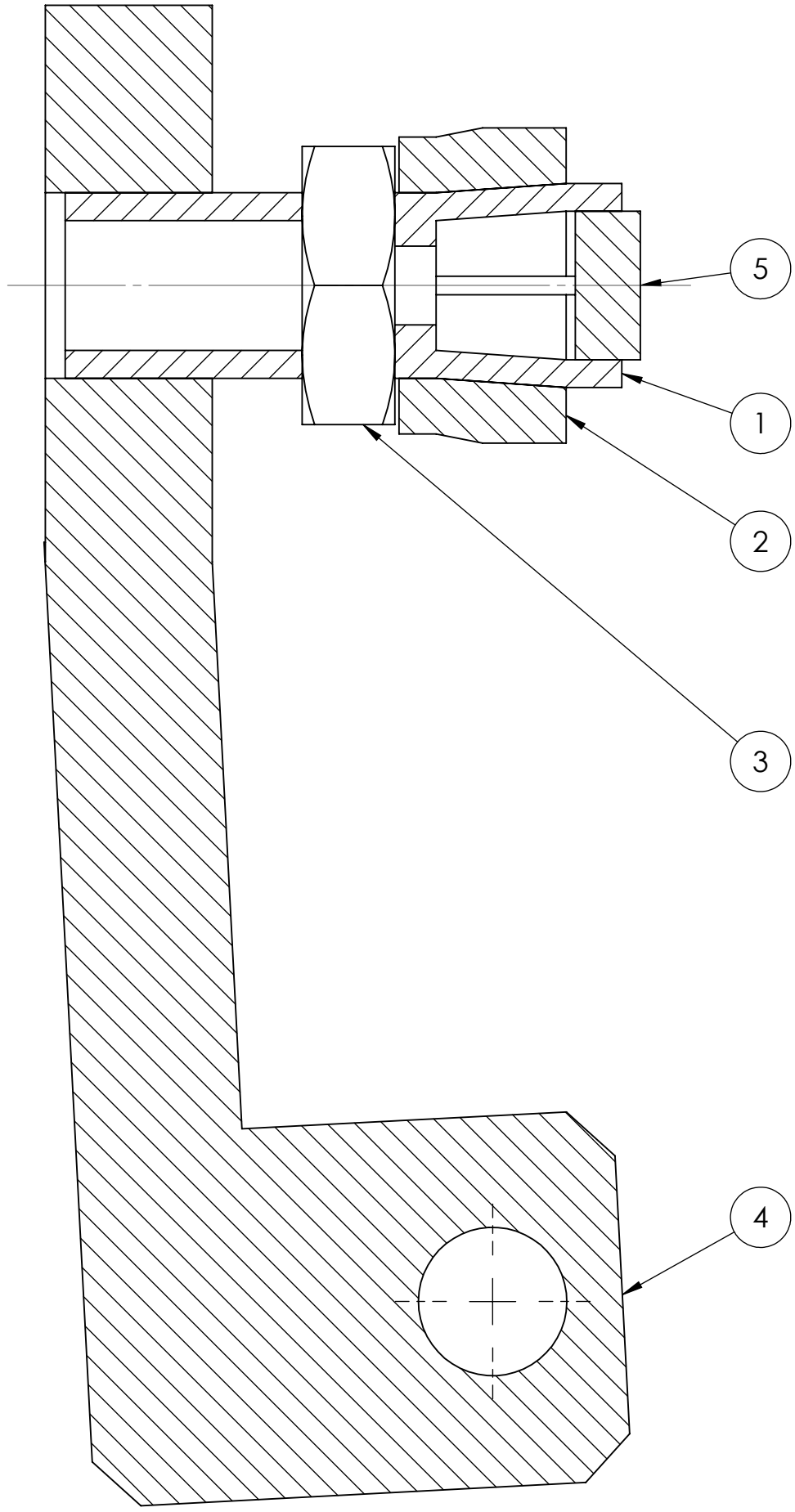


Figure II.3.3.2 : solution NÁ 2 :Fixation de l'®prouvette

IV.3.3.3 Solution N°3 (Figure II.3.3.3) :

Nomenclature :

1. Bras
2. Broche porte éprouvette
3. Butée à bille
4. Collier
5. Eprouvette
6. Boulon

Principe de fonctionnement :

Le serrage de l'éprouvette (5) sur la broche porte éprouvette (2) par un collier (4) qui exerce une pression sur l'éprouvette (5) en serrant les boulons (6).

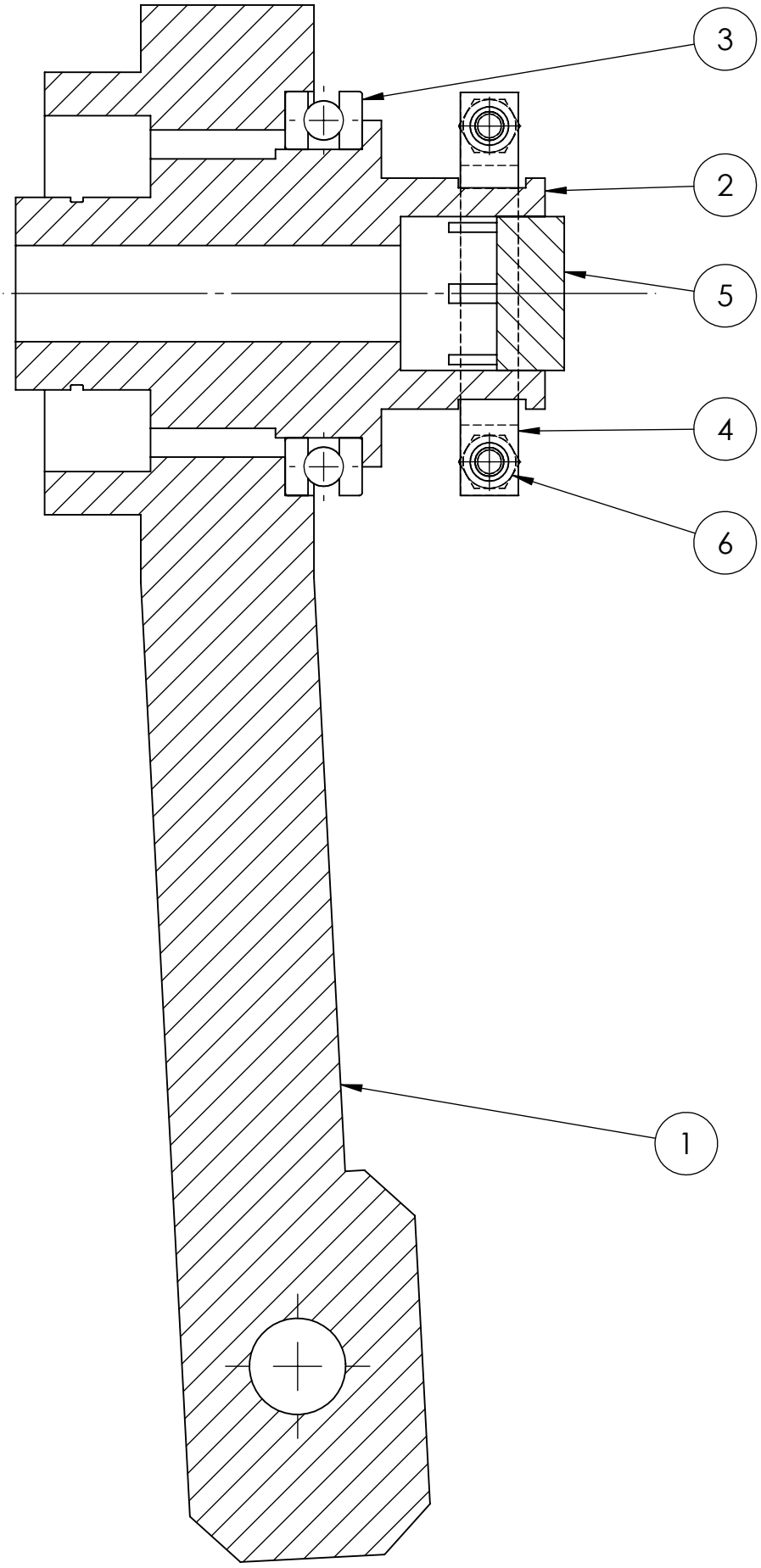


Figure II.3.3.3 : Solution N°3 : Fixation de l'éprouvette

IV.4 Fonction 4 : Transmettre la vitesse de translation à l'éprouvette

Cette fonction regroupe les fonctions techniques suivantes :

- F4.1 : système de transmission de mouvement de translation à l'éprouvette
- F4.2 : guider la transmission de translation à l'éprouvette

IV.4.1 Solution N°1 (Figure II.4.1) :

Nomenclature :

1. Support
2. Glissière
3. Bras
4. Traineau
5. Broche porte éprouvette
6. Eprouvette
7. Poulie
8. Support de la poulie
9. Axe de la poulie
10. Courroie
11. Plaque de fixation
12. Vis

Principe de fonctionnement :

Sous la rotation de la poulie (7) qui entraine la courroie (10) et la liaison faite avec le traineau (4) par la plaque de fixation (11) et les vis (12). Le traineau (4) glisse sur la glissière (2) ainsi on obtient la translation du bras (3) dans lequel la broche porte éprouvette (5) est guidée.

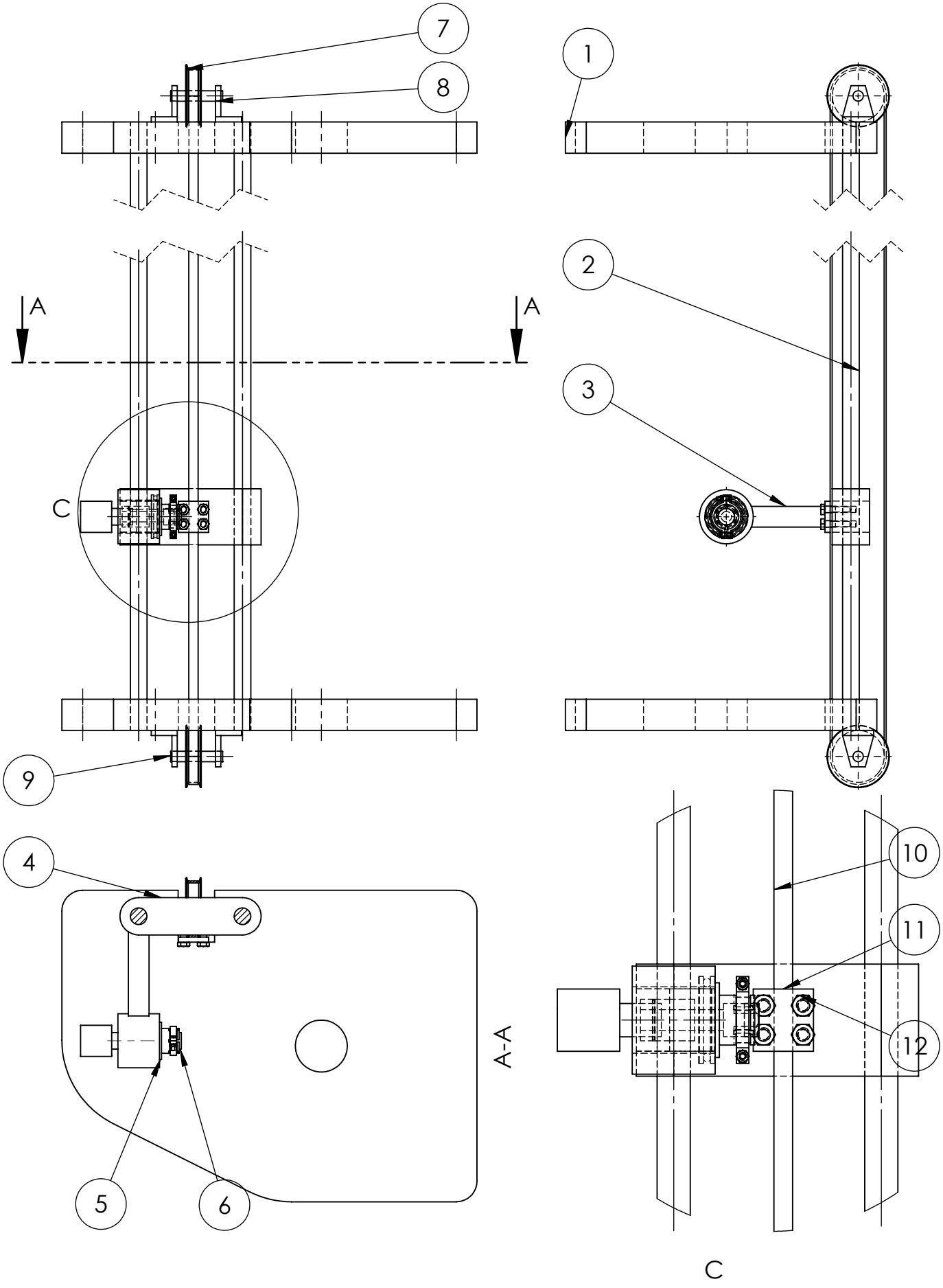


Figure II.4.1: Solution NÁ 1 : transmission de la translation ¨ l'®prouvette

IV.4.2 Solution N°2 (Figure II.4.2) :

Nomenclature :

1. Support
2. Eprouvette
3. Glissière
4. Tige filetée
5. Bras porte broche
6. Broche porte éprouvette
7. Traineau
8. Partie détachable du traineau
9. Boulon
10. Ecrou
11. Tige de raccordement

Principe de fonctionnement :

La tige filetée (4) reçoit le mouvement de rotation du moteur, et le traineau (7) est lié à la tige filetée (4) avec sa partie détachable (8) par les tiges de fixation (11). La rotation de la tige filetée (4) permet le glissement du traineau (7) sur la glissière (3). Ainsi la broche porte éprouvette (6) translate grâce au bras porte broche (5), qui lui-même est lié au traineau par le boulon (9).

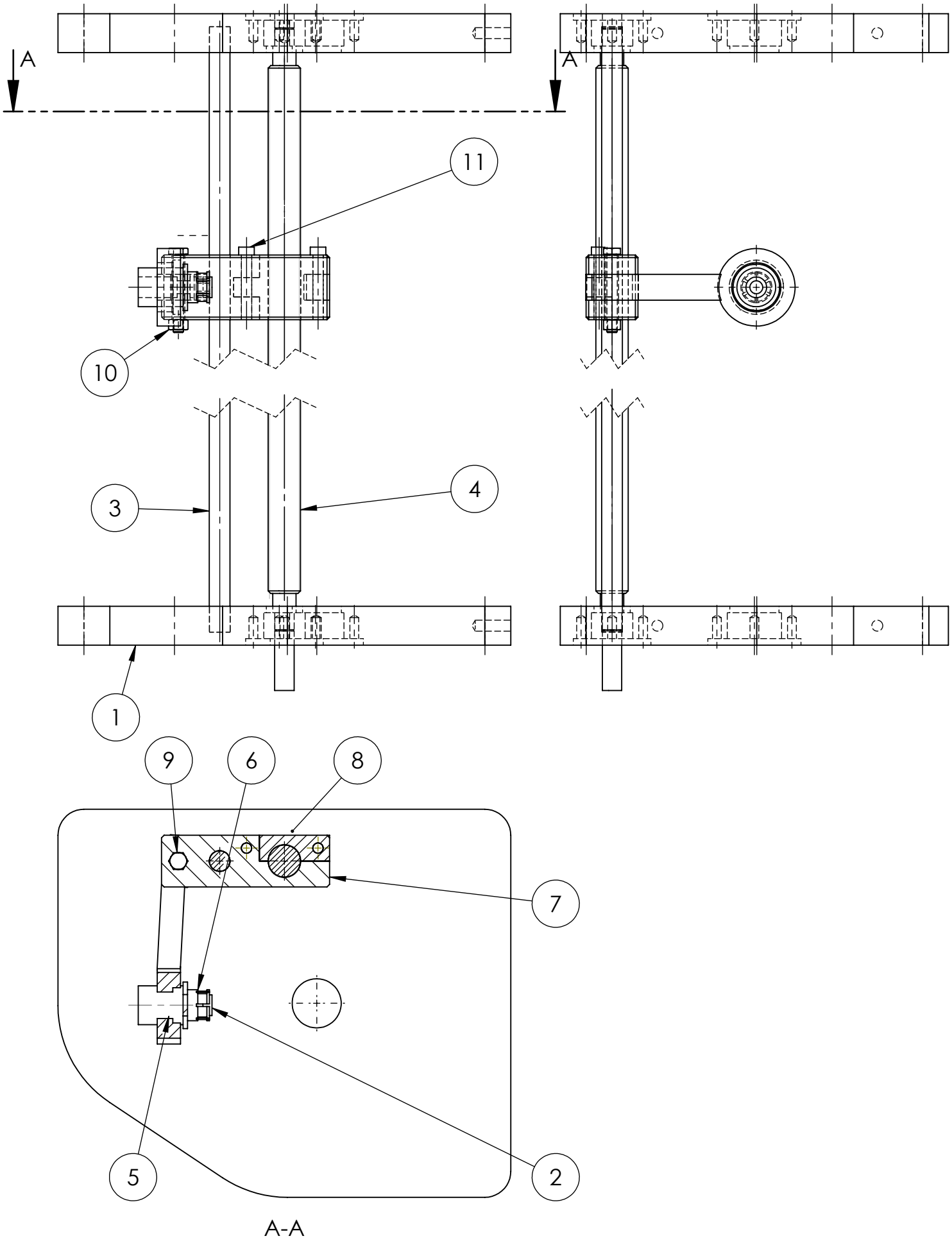


Figure II.4.2: Solution NÁ 2 : transmission de la translation a l'®prouvette

IV.5 Fonction5 : Appliquer la charge :

Cette fonction regroupe les fonctions techniques suivantes :

- F5.1 : fixer la charge
- F5.2 : réaliser le contact cylindre/éprouvette

IV.5.1 Solution N°1 (Figure II.5.1) :

Nomenclature :

1. Cylindre
2. Traineau
3. Eprouvette
4. Broche porte éprouvette
5. Bras porte broche
6. Poids
7. Boulon

Principe de fonctionnement :

La charge est appliqué par le poids (6) qui vient se positionner dans le logement usiné, donc sur le bras porte broche (5). Le contact entre l'éprouvette (3) et le cylindre (1) se réalise par le pivotement du bras (5) sur le traineau (2).

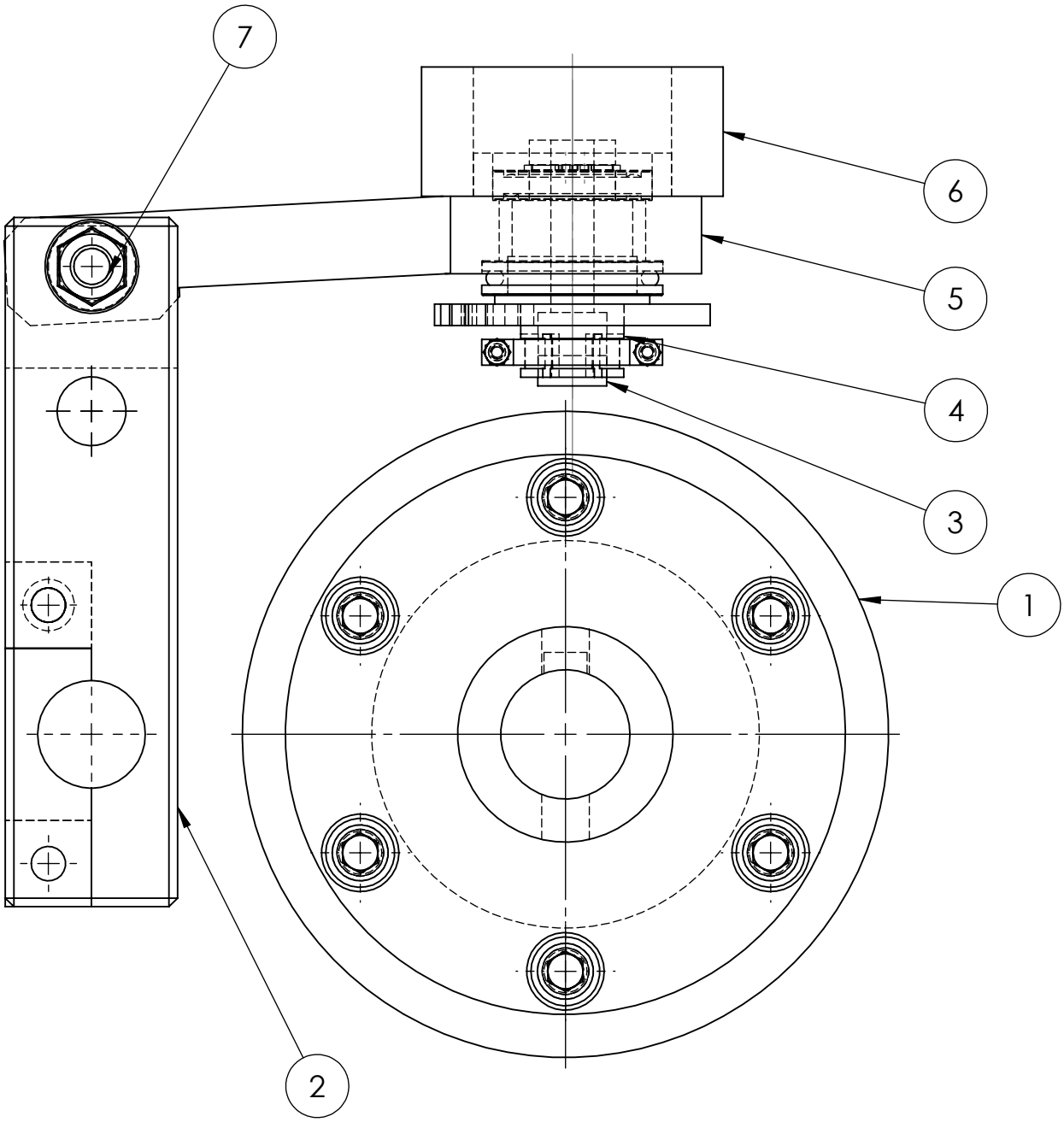


Figure II.5.1: Solution N°1: Application de la chargee

V. Phase 5 : Etude et évaluation des solutions

Les idées émises lors de la phase précédente, nous procurent un terrain de choix assez vaste dans lequel nous allons opérer pour effectuer un choix de solutions définitif.

Cette étape consiste donc en la prospection de la faisabilité, conformité ou non des solutions aux critères du cahier de charges du besoin.

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

V.1 Fonction 1 : Fixation du dispositif

V.1.1 Solution N°1 (Figure II.1.1)

1. **Avantages**
   - La semelle est plus légère
   - Facile à réaliser
2. **Inconvénients**
   - Difficulté dans l'assemblage, vue l'utilisation de la soudure pour assembler les poutres et les traverses.

V.1.2 Solution N°2 (Figure II.1.2)

1. **Avantages**
   - La semelle ce compose d'une seule plaque
   - Facile à réaliser
   - Facile à assembler
2. **Inconvénients**
   - Difficulté de trouver une plaque en acier d'une grande dimension
   - La plaque est plus lourde

V.1.3 Décision

Conformément aux avantages et inconvénients de chaque solution et au cahier des charges du besoin, nous optons pour la solution **N°1 (Figure II.1.1)**

V.2 : fonction 2 : Transmettre la vitesse de rotation au cylindre

V.2.1 Groupe 1 : Guidage de l'arbre **(Figure II.2.1.1)**

Pour raisons de présence d'effort axiaux et radiaux on présente la solution de guidage avec des roulements.

V.2.2 Groupe 2 : Liaison arbre/cylindre

V.2.2.1 Solution N°1 (Figure II.2.2.1)

1. **Avantages**
   - bonne transmission du couple moteur
2. **Inconvénients**
   - Difficulté dans la réalisation
   - Manque d'élasticité
   - Difficulté d'usinage des cannelures

V.2.2.2 Solution N°2 (Figure II.2.2.2)

1. **Avantages**
   - Facile à réaliser
2. **Inconvénients**
   - Manque d'élasticité

V.2.2.3 Solution N°3 (Figure II.2.2.3)

1. **Avantages**
   - Facile à réaliser
2. **Inconvénients**
   - Manque d'élasticité

V.2.2.4 Solution N°4 (figure II.2.2.4)

1. **Avantages**
   - Bonne transmission de couple moteur
   - Possibilité de protéger le moteur d'une éventuelle surcharge
   - Transmission avec élasticité

2. **Inconvénients**
    - Difficulté de montage

V.2.2.5 Décision

Conformément aux avantages et inconvénients de chaque solution et au cahier des charges du besoin, nous optons pour la solution **N°4 (Figure II.2.2.4)**

V.2.3 Groupe 3 : Transmission du mouvement de rotation par le moteur

V.2.3.1 Solution N°1 (Figure II.2.3.1)

1. **Avantages**
    - Bonne transmission de couple moteur
2. **Inconvénients**
    - Difficulté de montage
    - Difficulté d'obtenir le rapport de transmission voulue
    - Présence de vibrations

V.2.3.2 Solution N°2 (Figure II.2.3.2)

1. **Avantages**
    - Bonne transmission de couple moteur
    - Amortissement des vibrations
    - Possibilité de protéger le moteur d'une éventuelle surcharge
2. **Inconvénients**
    - Difficulté dans la réalisation
    - Nécessite un espace de montage plus grand

V.2.3.3 Décision

Conformément aux avantages et inconvénients de chaque solution et au cahier des charges du besoin, nous optons pour la solution **N°2 (Figure II.2.3.2)**

V.3 Fonction 3 : Transmettre la vitesse de rotation a l'éprouvette :

V.3.1 Groupe N°1 : Transmission du mouvement de rotation a l'éprouvette :

V.3.1.1 Solution N°1 (Figure II.31.1)

1. **Avantages**

- Bonne transmission de couple moteur
- Facile à réalisé

2. **Inconvénients**

- Nécessite l'utilisation d'un deuxième moteur
- La rotation de la broche est très faible
- Manque de place pour le montage

V.3.1.2 Solution N°2 (Figure II.3.1.2)

1. **Avantages**

- Bonne transmission de couple moteur
- Pas de moteur supplémentaire
- Bonne précision dans la vitesse de rotation

2. **Inconvénients**

- Utilisation de beaucoup de pièce
- Difficulté dans le montage

V.3.1.3 Décision

Conformément aux avantages et inconvénients de chaque solution et au cahier des charges du besoin, nous optons pour la solution **N°2 (Figure II.3.1.2)**

V.3.2 Groupe N°2 : Guidage de la broche porte éprouvette

Vue l'inclinaison de la broche avec un angle de 3°, ce qui engendre des efforts axiaux et radiaux nous proposons la solution d'un guidage par une butée à billes et un roulement. **(Figure II.3.2.1)**

V.3.3 Groupe N°3 : Fixation de l'éprouvette :

V.3.3.1 Solution N°1 (Figure II.3.3.1)

1. **Avantages**

- Bonne pression de serrage

2. **Inconvénients**

- Difficulté de réalisation
- Risque de desserrage au cours de fonctionnement

V.3.3.2 Solution N°2 (Figure II.3.3.2)

1. **Avantages**

- Bonne pression de serrage

2. **Inconvénients**

- Difficulté de réalisation
- Risque de desserrage au cours de fonctionnement

V.3.3.3 Solution N°3 (Figure II.3.3.3)

1. **Avantages**

- Bonne pression de serrage
- Facile à réaliser

2. **Inconvénients**

- Difficulté au cours de serrage du collier

V.3.3.4 Décision

Conformément aux avantages et inconvénients de chaque solution et au cahier des charges du besoin, nous optons pour la solution **N°3 (Figure II.3.3.3).**

V.4 Fonction 4 : Transmettre la vitesse de translation à l'éprouvette :

V.4.1 Solution N°1 (Figure II.4.1)

1. **Avantages**

- Facile dans le montage

2. **Inconvénients**

- Difficulté dans la réalisation

- Risque d'endommagement de la courroie au point de serrage avec le traineau
- Manque de précision
- Nécessite deux glissières

V.4.2 Solution N°2 (Figure II.4.2)

1. **Avantages**

- Facile dans le montage
- Bonne précision
- Utilisation d'une seule glissière

2. **Inconvénients**

- Difficulté dans la réalisation

V.4.3 Décision

Conformément aux avantages et inconvénients de chaque solution et au cahier des charges du besoin, nous optons pour la solution **N°2 (Figure II.4.2)**

V.5 Fonction 5 : Application de la charge

Le manque d'espace dans le dispositif et vue la position idéal sur le bras porte broche qui nous permet de positionner une charge directement au-dessus de la broche nous optons pour cette solution **(Figure II.5.1)**.

VI. (Phase 6) : Bilan prévisionnel

Dans cette phase nous dressons un bilan prévisionnel des solutions retenues, pour les présenter au demandeur.

VI.1 Récapitulatif des fonctions retenues

F1 : Fixation du dispositif

Pour cette fonction le choix s'est porté sur la solution **N°1 (Figure II.1.1)**

F 2 : Transmettre la vitesse de rotation au cylindre :

Groupe N°1 : guidage de l'arbre de transmission

Pour cette fonction le choix s'est porté sur la solution **N°1 (Figure II.2.1.1)**

Groupe N°2 : réaliser la liaison de l'arbre avec le cylindre

Pour cette fonction le choix s'est porté sur la solution **N°4 (Figure II.2.2.4)**

Groupe N°3 : transmission de mouvement de rotation par le moteur

Pour cette fonction le choix s'est porté sur la solution **N°2 (Figure II.2.3.2)**

F 3 : Transmettre la vitesse de rotation a l'éprouvette :

Groupe N°1 : transmission du mouvement de rotation a l'éprouvette :

Pour cette fonction le choix s'est porté sur la solution **N°2 (Figure II.3.1.2)**

Groupe N°2 : Guider la broche porte éprouvette :

Pour cette fonction le choix s'est porté sur la solution **N°1 (Figure II.3.2.1)**

Groupe N°3 : Fixation de l'éprouvette :

Pour cette fonction le choix s'est porté sur la solution **N°3 (Figure II.3.3.3)**

F 4 : Transmettre la vitesse de translation à l'éprouvette :

Pour cette fonction le choix s'est porté sur la solution **N°2 (Figure II.4.2)**

F5 : Appliquer la charge :

Pour cette fonction le choix s'est porté sur la solution **N°1 (Figure II.5.1)**

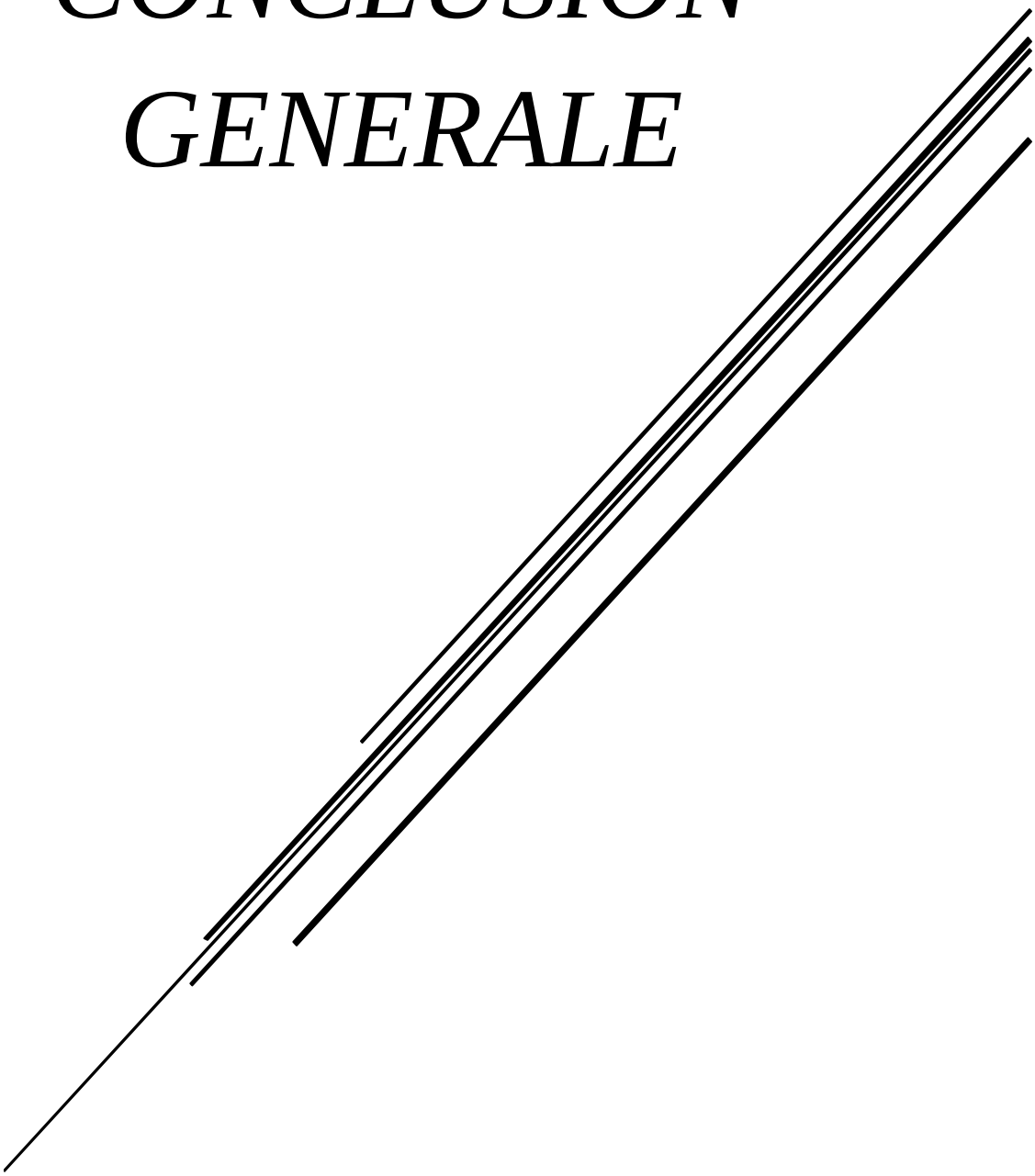
VI.2 Choix du matériau

L'acier (A60) moins cher, et plus disponible dans nos ateliers, nous le retenons pour la fabrication de la plupart des pièces du dispositif.

VI.3 Solution finale

A l'issue du bilan prévisionnel, les solutions retenues forment le dispositif abrasimètre représenté sur le dessin d'ensemble.

CONCLUSION GENERALE



Conclusion générale

La présente étude nous a permis, en premier lieu de faire la connaissance d'une méthode scientifique « l'analyse de la valeur » qui est incontournable dans l'acheminement d'une conception juste et organisée dont l'efficacité est confirmée à l'échelle mondiale. Malheureusement, l'analyse de la valeur est quasiment absente des programmes des formations universitaires de notre pays.

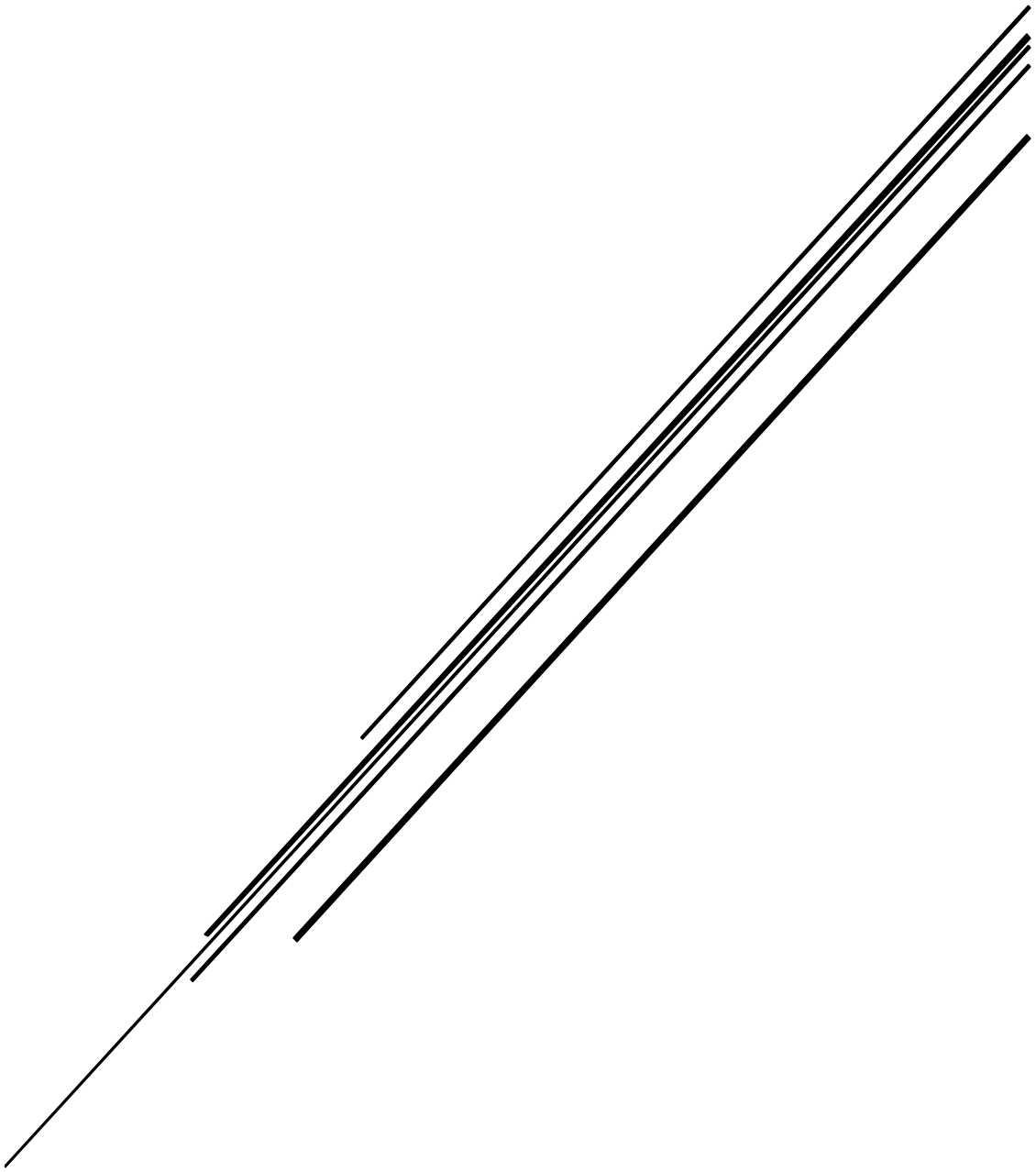
En outre nous avons découvert un autre domaine qui est la tribologie, en l'occurrence l'usure qui est un phénomène très complexe à cerner en raison de la multitude de paramètres qui l'influent.

Nous avons aussi fait nos premiers pas dans la dure réalité de la conception, dans le sens où, nous étions amenés à concevoir un dispositif abrasimètre qui nous est totalement méconnu auparavant. Ceci étant, nous avons effectué une recherche sur le principe de l'essai pour nous permettre d'imaginer des solutions adéquates, simples et réalisables dans les limites du cahier des charges que nous avons nous-même établi.

Nous espérons avoir apporté une étude qui servira de document de référence aux promotions d'étudiants qui vont suivre.

Enfin nous souhaitons vivement voir une finalisation de la présente étude, par un travail de continuité, afin d'aboutir à la réalisation du projet final.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] J.DENAPE, Y.BERTHIER, L.VINCENT, Wear particles life in a Sliding Contact under dry conditions: Third body Approach. Fundamentals of Tibology and Bridging the Gap Between Macro, Micro and Nanoscale, Nano Science Series II, volume 10, p. 393-411, 2001.

[2] M.GODET, L.VINCENT, Propriétés tribologiques Frottement Usure, Pratique des Matériaux Industriels, Chapitre 2.2.4, 1990.

[3] J. FRENE, La tribologie de l'antiquité à nos jours, Mécanique et Industrie, Vol. 2, p.263-282, 2001

[4] PRINCE (A.). – The constitutional diagrams of alloys: a bibliography. Inst. Metals

[5] Y. BERTHIER, Experimental evidence for friction and wear modelling, Wear139, p. 77-92, 1990

[6] S. DESCARTES, Y. BERTHIER, Rheology and flows of solid third bodies : background and application to a MoS 1.6 coating, Wear 252, p. 546-556, 2002

[7] A. S. ADAMOU, Comportement tribologique et réactivité de l'alliage 718 en atmosphère contrôlée et à haute température, Thèse doctorat, institut national polytechnique de Toulouse, 2005.

[8] M. DELQUÉ, Influence de la microstructure sur le comportement tribologique de dépôts composites projetés plasma, Ecole des Mines de Paris, 2007

[9] PAULINE LEPESANT, Mécanisme d'accommodation et débit de premier et troisième corps à haut température, Thèse doctorat, institut national polytechnique de Toulouse, p.15-19. 2013

[10] G. Zambelli, L. Vincent, Matériaux et contacts-une approche tribologique, Suisse, PUR (1998).

[11] D. DOWSON, History of Tribology, Longman, New York, 1979

[12] H. B. ABDELOUNIS, dynamique et vibroacoustique du contact rugueux: expérimentation et modélisation, thèse de doctorat, École Centrale de Lyon, 2010

[13] F. P. BOWDEN, D. TABOR, The Friction and Lubrication of Solids I, Clarendon Press, Oxford 1950

[14] A. ELHADI, Influence des paramètres mécaniques lors de L'endommagement par les phénomènes Tribologiques des couples des matériaux xc48/xc55 et A60/xc55, Mémoire magister, Université Med Boudiaf de Msila, 2006.

[15] G. ZAMBELLI, L. VINCENT, Matériaux et contacts, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1998

[16] N. KHANAFI-BENGHALEM, Étude des mécanismes d'usure et de frottement de deux aciers X12NiCrMoSi25-20 et le 25CrMo4 (Etude comparative), thèse de doctorat, université de SETIF, 2007

[17] Marc Séguin, Physique XXI Volume A Page 3 Note de cours rédigée par : Simon Vézina

[18] A. BENFOUGHAL, Analyse tribologique et thermique d'un matériau composite carbone-carbone dans un contact électrique, mémoire magister, université MENTOURI Constantine, 2010.

[19] Dieter Landolt, Traité des matériaux, 12 Corrosion et chimie des surfaces 1997, p.286.

[20] COMBRES (Y.) et CHAMPIN (B.). – Traitements thermiques des alliages de titane. M 1 335. Traité Matériaux métalliques, volume M4, 1995.

[21] Murray J. L., Phase Diagrams of Binary Titanium Alloys, ASM Int. Metal Park, Ohio (USA), 1987.

[22] Avery, H. S., Classification and precision of abrasion tests, Wear of Materials **(1977)**, ASME 1977.

[23] Torrance A. A., A three-dimentional cutting criterion for abrasion, Wear, 123 **(1988)**, p. 87-96.

[24] Finnie, A.M.A.L., A classification of three-body abrasive wear and design of a new tester. Wear, 60 **(1980)**, p. 111-121.

[25] Blanchard, P., Usure induite en petit débattement : transformation tribologique superficielle d'alliage de titane, Thèse ECL.

[26] Johnson K. L, The correlation of indentation experiments, J. Mech. Phys. Solids, vol. 18 **(1970)**, p. 115-126.

[27] M. WOYDT, technique de l'ingénieur, Application des données tribologiques des matériaux, BM 7 006.

[28] A ACHOUR, A LEKADRI

Conception d'un fauteuil roulant par la méthode analyse de la valeur, Thèse d'ingénieur, université M. MAMMERI de Tizi Ouzou 2004.

[29] Y ZEROUKHI, Y MESSADI

Application de la méthode analyse de la valeur pour la conception d'un banc d'essai d'usure, Mémoire de DEUA Fabrication mécanique, université M. MAMMERI de Tizi Ouzou. 2006

[30] Livre de normes. Edition AFNOR.

[31] Polycopie analyse de la valeur. Édition AFNOR.

[32] Livre de normes A. CHEVALIER. Édition 2004.

[33] Guide des sciences et technologies industrielles édition AFNOR Édition 2001.

[34] Ressources Internet :(www.afav.com) . Association française pour l'analyse de la valeur

www.sndl.cerist.dz