

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique

BADJI MOKHTAR –ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR –ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Faculté des sciences de l'ingénieur

Département de génie mécanique

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de **MAGISTER**

**Etude de l'endommagement et de la fiabilité
des engrenages à dentures droites
en polyamide 66**

Option

Mécanique de la rupture

Par

Walid GHALLOUDJ

(Ingénieur en construction Mécanique)

Directeur de mémoire :

K. CHAOUI

Pr. U. ANNABA

Devant le jury :

Président:

Nassereddine Zeghib

Pr. U. ANNABA

Examineur:

Mohamed Lamine Farès

Pr. U. ANNABA

Examineur:

Abdelaziz Amirat

Mc. U. ANNABA

ANNABA 2008

Remerciements

Le travail présenté dans ce manuscrit a été réalisé dans le cadre d'une préparation du diplôme de magistère au sein du Laboratoire de Recherche Mécanique des Matériaux et Maintenance Industrielle "LR3MI" de l'université d'Annaba dirigé par le Professeur K. Chaoui.

Je tiens tout d'abord à remercier mon encadreur Kamel CHAOUI Professeur au département de Génie Mécanique de l'Université d'Annaba pour son aide scientifique et matérielle et surtout pour son suivi régulier et son assistance jusqu'à la fin de cette recherche, ainsi que pour les encouragements qu'il n'a cessé d'apporter à mes travaux durant cette période.

J'adresse aussi mes vifs remerciements à Monsieur Nacer Eddine ZEGHIB, Professeur au département de Mécanique à l'Université d'Annaba d'avoir accepté de présider mon jury de soutenance.

Je remercie également Monsieur Abdelaziz AMIRAT Maître de conférence au département de Mécanique à l'Université d'Annaba d'avoir pris le soin d'examiner ce travail et me faire l'honneur de participer au jury.

Je remercie profondément Monsieur Mohamed Lamine FARES Professeur au département de Métallurgie à l'Université d'Annaba d'avoir pris le soin d'examiner ce travail et me faire l'honneur de participer au jury.

Mes remerciements vont aussi tout particulièrement à l'ensemble des membres du laboratoire "LR3MI" et du département mécanique. Leur contribution a été essentielle dans la réalisation de ce travail.

Un très grand merci à toute ma famille pour son soutien constant et chaleureux pendant toutes ces années d'études et pour son intérêt dans l'avancement de mon travail.

Je remercie toute ma promo, notamment mes amis Rahim, Lotfi, Latifa, Wahid, Mounir, Smail, Fatiha.

Je remercie vivement mes chères amies Youcef Amin MASMOUDI, djamel Zelmati, Ayad Amar, Rafik Sari, Mouhamed hassani pour leur soutien.

Je remercie enfin toutes les personnes qui par un sourire ou une parole bienveillante, m'ont permis de garder le moral tout au long de ces années de formation.

Résumé :

Les engrenages occupent une place spéciale dans les systèmes mécaniques. C'est la façon la plus économique pour transmettre de la puissance et un mouvement de rotation dans des conditions uniformes. L'importance de l'engrenage, comme élément mécanique nécessaire et idéal, est démontrée par la vaste gamme qu'on trouve dans toutes les industries. La performance des engrenages en plastiques telles que le téréphtalate polyacetal (POM) et le polyamide (PA) est liée à leur capacité à résister l'usure. Les polyamides sont utilisés comme matériaux pour engrenages en plastique moulé par injection. Les engrenages en plastique ont plusieurs avantages en comparaison avec les engrenages en métal, telles que le poids léger, le bruit réduit, et le degré de liberté élevé dans la géométrie des engrenages.

L'objectif de ce travail étant d'étudier l'usure des roues dentées en polyamide « PA66 », l'investigation concerne la détermination de l'évolution de cette usure dans un contact sec, lubrifié à l'eau, lubrifié à un mélange d'eau et de détergent à base de phosphate. L'influence de l'environnement d'essai sur le comportement d'usure des engrenages, indique que l'air (usure à sec) provoque une usure moindre par rapport à l'eau et au mélange eau avec détergent. Dans les contacts avec lubrifiant, l'usure revient au fait qu'il existe une absorption remarquable sur les pignons en PA, chose qui est absente dans les contacts non lubrifiés (à sec). Les résultats collectés indiquent qu'il existe une réelle influence sur la durée de vie des engrenages en service. Les résultats obtenus de l'approche expérimentale ont servi à une étude de fiabilité par le logiciel Phiméca dans le cadre d'un couplage mécano-fiabiliste.

Abstract:

The gears occupy a special place in the mechanical systems. This is the most economical way to transmit power and a motion under uniform conditions. The importance of gear, as a necessary and mechanical ideal, is demonstrated by the wide range applications found in all industries. The performance of plastic gears such as polyacetal terephthalate (POM) and polyamide (PA) is linked to their ability to resist wear. The polyamides are used as materials for plastic moulded gears by injection. The plastic gears have several advantages compared with metal gear, such as lightweight, low-noise, and the high degree of freedom in the geometry of gear.

The objective of this work is to study the wear sprockets polyamide "PA66", the investigation concerns the determination of the evolution of this wear in a dry contact, lubricated with water, lubricated with a mixture water and detergent-based phosphate. The influence of the test environment on the behaviour of wear gear, said that the air (wear dry) causes less wear compared with water and mix water with detergent. In contacts with lubricant, wear back to the fact that there is a remarkable absorption on the pinion in PA, something which is absent in non-lubricated contacts (dry). The results collected indicate that there is a real influence on the life of gears in service. The results of the experimental approach were used in a study of reliability software Phimeca through a coupling reliability-mechanical.

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Ordres de grandeur des structures cristallines	12
Tableau 1.2 : Influence de l'humidité relative HR sur la température de transition vitreuse.....	13
Tableau 1.3 : Valeurs de T_g et de T_f pour différents polymères	21
Tableau 1.4 : Comparaison de l'absorption de solvants par le PA 6, PA6-6, PA6-10, PA11...	25
Tableau 2.1 : Caractéristiques dimensionnelles des engrenages cylindriques à denture droite.	35
Tableau 2.2: Propositions de couple de matériaux pour la construction d'engrenage en PA66	41
Tableau 2.3 : Valeurs des coefficients d'usure K pour différents matériaux glissant sur l'acier	49
Tableau 3.1 : Propriétés mécaniques et thermiques du PA66	51
Tableau 3.2 : Caractéristiques géométriques des pignons	52
Tableau 3.3 : Avantages et limitations des engrenages en plastique	52
Tableau 5.1 : Ordre de grandeur de probabilités cibles en construction	79
Tableau 5.2 : Liste des variables aléatoires	86

Liste des figures

Figure 1.1 : Illustration des différents états de la matière	6
Figure 1.2 : Evolution du module d'élasticité d'un polymère amorphe en fonction de la température	7
Figure 1.3 : Interpénétration de structure en pelote	8
Figure 1.4 : formes isotactiques, syndiotactiques et atactiques des chaînes polymères	9
Figure 1.5 : Schématisation de l'organisation en lamelles cristallines formées des repliements des chaînes macromoléculaires	10
Figure 1.6 : Microstructure d'un sphérolite de polymère semi cristalline	11
Figure 1.7 : Représentation schématique de différents types de macromolécules.....	15
Figure 1.8 : Comportement mécanique (courbes contrainte-déformation) de différents types de matériaux polymères	16
Figure 1.9 : Description moléculaire de différents comportements mécaniques des matériaux polymères	17
Figure 1.10 : Répartition globale des origines d'avarie de pièces à base de polymères	17
Figure 1.11 : Répartition globale des modes de défaillance en service de pièces à base de polymères	18
Figure 1.12 : Paramètres influant sur les propriétés des pièces finies en matière plastique...	19
Figure 1.13 : influence de la masse moléculaire sur la cristallinité et le module élastique pour des échantillons de polyamide 6 massifs	20
Figure 1.14: courbes contrainte-déformation, issues d'essais de traction réalisés à différentes températures, pour un thermoplastique semi-cristallin (PA66 sec)	21
Figure 1.15 : courbes contrainte-déformation (essais de traction) en fonction des différentes états d'humidité (sec, standard et saturé) du PA66	22
Figure 1.16 : Absorption d'humidité (% en masse) en fonction de l'humidité relative (%) de l'air ambiant pour plusieurs polyamides non chargés	23
Figure 1.17 : Arbre de la chimie du sel nylon 66	26
Figure 1.18 : Représentation schématique des liaisons hydrogène (en pointillé) entre les chaînes de PA66	27
Figure 1.19 : Schémas de la maille unitaire du PA66	28
Figure 1.20 : représente le schéma d'une presse à injection	31
Figure 2.1 : développante de cercle.....	32
Figure 2.2 : Paramètres d'engrènement.....	33
Figure 2.3 : Conditions de contact à l'engagement et au déengagement	33
Figure 2.4 : Caractérisation géométrique des engrenages cylindriques à denture droite.....	34
Figure 2.5 : Modèle de Lewis	36
Figure 2.6 : Effort de contact de deux cylindres.....	37
Figure 2.7 : Surface de contact et distribution de pression elliptique	38
Figure 2.8 : pression superficielle de contact.....	38
Figure 2.9 : Représentation graphique de la vitesse en fonction de la contrainte pour les applications courantes des engrenages.....	40
Figure 2.10 : Pertes relatives par usure	42
Figure 2.11 : Evolution de l'usure en fonction du temps.....	43
Figure 2.12 : Représentation schématique des éléments d'un système tribologique	43
Figure 2.13 : Classement des processus d'usure en fonction du mouvement des corps mis en Jeu	44
Figure 2.14 : Usure par adhésion. (a) volume arraché	45
Figure 2.15 : mécanismes d'usure par abrasion	46

Figure 2.16 : Évolution de l'abrasion en fonction de la taille des particules.....	47
Figure 2.17 : Usure par fatigue. (a) Amorçage, (b) Propagation, (c) Génération d'un débris	48
Figure 3.1 : Pignon en PA66 avant essai (a), pignon usé dans les conditions de service (b)...	51
Figure 3.2 : Mécanisme d'engrenage : « banc d'essais »	53
Figure 3.3 : Représentation schématique du banc d'essais	53
Figure 3.4 : Instrument de mesure d'usure : balance électronique (a), pied à module (b), microscope optique (c)	55
Figure 3.5 : Schéma de niveaux mesurés suivant la profondeur de dent (a), Changement des profils des dents (b)	56
Figure 4.1 : Pignon usé en PA66 après 3 millions de cycle pour le cas d'eau	59
Figure 4.2 : Evolution de l'usure en fonction du nombre de cycles pour le cas d'eau (Fig1)	60
Figure 4.3 : Evolution de l'usure en fonction du nombre de cycles pour le cas d'eau (Fig2)	60
Figure 4.4 : Evolution de l'usure en fonction du nombre de cycles pour le cas d'un mélange eau et détergeant	61
Figure 4.5 : Evolution de l'usure en fonction du nombre de cycles pour le cas à sec	61
Figure 4.6 : Teneur en eau en fonction du temps pour PA66 exposé à 50% HR, à 23°C	62
Figure 4.7 : Teneur en eau en fonction du temps pour PA 66 et PA 612 immergés dans l'eau à 23°C	63
Figure 4.8 : Micrographie de surface de PA 66 usée dans l'eau obtenue par MEB	64
Figure 4.9 : Micrographie de surface de PA 66 usée obtenue par SEM : (a) à sec, (b) condition de lubrification à huile.....	64
Figure 4.10 : Comparaison de l'évolution de l'usure en fonction du nombre de cycles pour les trois milieux limite à 3.10^6 cycles	65
Figure 4.11 : Taux spécifiques d'usure des engrenages en PA66	66
Figure 4.12 : Evolution de l'usure en fonction du nombre de cycles pour la dent du point d'injection : cas de l'eau (Fig 1)	67
Figure 4.13 : Evolution de l'usure en fonction du nombre de cycles pour la dent du point d'injection : cas de l'eau (Fig 2)	68
Figure 4.14 : Evolution de l'usure en fonction du nombre de cycles pour la dent du point d'injection : cas d'un mélange d'eau et détergent	68
Figure 4.15 : Evolution de l'usure en fonction du nombre de cycles pour la dent du point d'injection : cas a sec	69
Figure 4.16 : Evolution de l'usure en fonction du nombre de cycles pour le cas d'eau (Pignon 1) à différents niveaux	70
Figure 4.17 : Evolution de l'usure en fonction du nombre de cycles pour le cas d'eau (Pignon 2) à différents niveaux	71
Figure 4.18 : Evolution de l'usure en fonction du nombre de cycles pour le cas d'un mélange eau et détergeant à différents niveaux.....	72
Figure 4.19 : Evolution de l'usure en fonction du nombre de cycles pour le cas à sec à différents niveaux	73
Figure 4.20 : Profils de dents d'engrenage usés : (a) en acier, (b) en polyamide	74
Figure 4.21 : différentes forme d'usure des dents	75
Figure 5.1 : Organigramme de l'analyse fiabiliste des systèmes mécaniques	80
Figure 5.2 : Transformation isoprobabiliste $T_i(x_j)$	82
Figure 5.3 : Marge de fiabilité et indice de Cornell	83

Figure 5.4 : <i>Importance des variables dans la fiabilité des engrenages en PA 66</i>	87
Figure 5.5 : <i>Evolution de l'indice de fiabilité en fonction de la puissance pour différentes vitesses de rotation</i>	88
Figure 5.6 : <i>Evolution de l'indice de fiabilité en fonction de la puissance pour différentes largeurs de dents</i>	88
Figure 6.7 : <i>Evolution de l'indice de fiabilité en fonction de la puissance pour différents angles de pression (alfa)</i>	89
Figure 5.8 : <i>Evolution de l'indice de fiabilité en fonction de la puissance pour différents modules d'élasticité</i>	89
Figure 5.9 : <i>Evolution de l'indice de fiabilité en fonction de la charge pour différentes distances de glissement (sur une seule dent)</i>	90

Sommaire

Liste des figures	i
Liste des tableaux	iv
Liste des abréviations	vi
Introduction générale	1

Chapitre 1 : Etude bibliographique

1.1. Introduction	3
1.2. Classification des polymères	3
1.2.1. Point de vue thermomécanique	4
1.2.1.1. Les thermoplastiques (TP)	4
1.2.1.2. Thermodurcissables (TD)	4
1.2.1.3. Les élastomères	5
1.2.2. Principaux types des polymères selon l'importance économique	5
1.2.3. Point de vue de la structure physique	6
1.2.3.1 Polymère amorphe	6
1.2.3.2. Polymère semi-cristalline	8
1.3. Structure et Morphologie des polymères semi-cristallins	9
1.3.1. Régularité de la chaîne macromoléculaire	9
1.3.2. Organisation en lamelles	10
1.3.3. ... puis en sphérolites	10
1.3.1.3.1. Phase amorphe inter-sphérolitique	10
1.4. Caractéristiques des matériaux semi-cristallins	12
1.4.1. Le taux de cristallinité	12
1.4.2. La température de transition vitreuse	13
1.4.3. Mobilité moléculaire dans les polymères	13
1.5. Caractéristiques générales des matériaux polymères	14
1.5.1. Principes de structure	14
1.5.2. Domaines d'état et zones de transition.....	15
1.5.3. Comportement mécaniques des polymères	15
1.5.3.1 Propriétés mécaniques	16
1.6. Causes de défaillances de pièces à base de polyméries	17
1.7. Paramètres influençant le mode de rupture des polymères	19
1.7.1. Paramètres structuraux	19
1.7.1.1. Influence de la nature des polymères	19
1.7.1.2. Influence de la structure chimique du polymère	19
1.7.1.2.1. Taille des groupements chimiques	19
1.7.1.2.2. Masse moléculaire	19
1.7.2. Environnement	20
1.7.2.1. Influence de la température	20
1.7.2.3. Influence de l'environnement chimique	22
a) Absorption d'eau	22
b) Agents chimiques	23
1.7.3. Contraintes internes	24
1.7.4. Influence de la géométrie des pièces	24
1.8. Matériau Polyamide PA66	25
1.8.1. Introduction	25
1.8.2. Synthèse du polymère et conditionnement	25

1.8.2.1. Synthèse des intermédiaires du Polyamide 66	25
1.8.2.2. La synthèse du Polyamide 66	26
1.8.3. Structure	27
1.9. Propriétés	28
1.9.1. Propriétés physiques	28
1.9.2. Propriétés mécaniques	29
1.9.3. Caractéristiques électriques	29
1.9.4. Propriétés chimiques	29
1.9.4.1. Résistance aux produits chimiques	29
1.10. Procédé de fabrication des pièces plastiques	30
1.10.1. Moulage par injection	30
1.10.1.1. La presse à injection	31
1.10.1.2. Le moule	31

Chapitre 2 : Caractéristiques des engrenages et usure des polyamides

2.1. Etude théorique	32
2.1.1. Introduction	32
2.1.2. Profil de la denture	32
2.1.3. Principe de l'engrènement	32
2.1.4. Classement des engrenages	33
2.2. Etude des engrenages parallèles à dentures droites	34
2.2.1. Caractérisation des engrenages cylindriques à denture droite	34
2.3. Résistance à la rupture	35
2.3.1. Calcul à la flexion	35
2.3.2. Méthode de Lewis	35
2.3.3. Contrainte maximale de la flexion	36
2.3.4. Pression superficielle	37
2.3.5. Contrainte de surface	39
2.4. Conception des engrenages	39
2.4.1. Matériaux en contact	40
2.5. Élément de tribologie	41
2.5.1. Introduction	41
2.5.2. Frottement	41
2.5.3. Lubrification	42
2.5.4. Usure	42
2.6. Principaux modes d'usure	45
2.6.1. Usure par adhérence	45
2.6.2. Usure par abrasion	46
2.6.3. Usure par fatigue	47
2.7. Classement des modèles d'usure proposé	48
2.7.1. Evaluation de l'usure	48

Chapitre 3 : Mise au point d'un banc d'essais d'usure de pignons en polyamide

3.1. Introduction	50
3.2. Matériau	50
3.3. Banc d'essai	52
3.4. Instrument de mesure	54
3.4.1. Mesures directes	55
3.5. Conditions d'essais	56

Chapitre 4 : Résultats et discussion

4.1. Introduction	58
4.2. Résultats et discussion	58
4.2.1. Influence de l'eau sur la morphologie des polyamides	62
4.2.2. Comparaison des résultats pour les trois milieux	65
4.2.3. Tau d'usure	66
4.2.4. Cas particulier	67

Chapitre 5 : Étude de la fiabilité des engrenages en polyamide

5.1. Introduction	76
5.2. Fiabilité des structures	76
5.2.1. Concept de la fiabilité	76
5.3. Probabilité de défaillance	78
5.4. Approche fiabiliste en mécanique	80
5.4.1. Incertitudes dans le modèle mécano-fiabiliste	81
5.5. Méthodes de calcul de la fiabilité	81
5.5.1. Indice de fiabilité de Hasofer & Lind	81
5.5.2. Méthode de l'indice de Cornell	83
5.6. Modèle mécanique	84
5.7. Modèle de fiabilité	85
5.8. Résultat et discussion	86
5.9. Conclusion	91

Conclusion générale	92
----------------------------------	----

Références bibliographiques	94
--	----

Liste des abréviations

Abréviation	Nom du matériau
ABS	Acrylonitrile-butadiène-styrène
EP	Époxyde, époxy
PA	Polyamide
PAI	Polyamidimide
PB	Polybutène
PBT	Poly(butylène téréphtalate)
PC	Polycarbonate
PE	Polyéthylène
PEBD	Polyéthylène basse densité
PEEK	Polyétheréthercétone
PEHD	Polyéthylène haute densité
PEI	Polyétherimide
PEK	Polyéthercétone
PET	Poly(éthylène téréphtalate)
PF	Phénol-formaldéhyde
PI	Polyimide
PMMA	Poly(méthacrylate de méthyle)
PMMI	Poly(<i>N</i> -méthyl méthacrylimide)
POM	Poly(oxyméthylène), polyformaldéhyde
PP	Polypropylène
PPE	Poly(phénylène éther)
PPO	Poly (oxyde de phénylène)
PPS	Poly(sulfure de phénylène)
PS	Polystyrène
PSU	Polysulfone
PTFE	Polytétrafluoroéthylène
PVC	Poly(chlorure de vinyle)
SAN	Styrène-acrylonitrile
SI	Silicone
UP	Polyester insaturé

Introduction générale

Aujourd'hui les engrenages occupent une place spéciale dans les systèmes mécaniques. C'est la façon la plus économique pour transmettre de la puissance et un mouvement de rotation dans des conditions uniformes. Comme les exigences sont vastes et avec des difficultés variées, les engrenages sont très complexes et d'une grande diversité.

Nous utilisons dans cette étude, des pignons en polyamide (PA66) qui sont fabriqués selon le procédé de moulage par injection. Les polyamides (PA) sont des polymères semi-cristallins, plus connus sous le terme générique de Nylon, et ont connu un développement rapide car les premiers polymères obtenus sous forme semi-cristalline, possédaient une température d'utilisation élevée et de bonnes propriétés mécaniques.

Généralement, les PA sont utilisés comme matériaux pour engrenages en plastique moulé par injection. Les engrenages en plastique ont plusieurs avantages en comparaison avec les engrenages en métal, telles que le poids léger, le bruit réduit, et le degré de liberté élevé dans la géométrie des engrenages. La performance des engrenages en plastique est liée à leur capacité et à leur résistance à l'usure.

Les polyamides offrent la plus large plage de températures de service et la plus forte résistance à la fatigue de tous les thermoplastiques destinés à cet usage, qualités qui justifient leur emploi quasi universel dans les engrenages non métalliques. La principale incitation à l'utilisation des engrenages en plastique à la place de ceux en métaux, repose sur l'avantage économique considérable apporté par le procédé de moulage par injection. Au surplus, les cames, coussinets, rochets, ressorts, arbres d'entraînement et autres composants d'engrenage peuvent être réalisés en éléments intégrés par un simple moulage qui supprime les coûteuses opérations de fabrication et d'assemblage.

L'objectif de cette étude est d'établir l'usure des pignons en polyamide (PA 66) de lave linge à usage domestique. Aussi, cet objectif est élargi à la définition de l'effet de l'eau et le détergent à base de phosphate sur le comportement à l'usure.

Cette étude vise à traiter deux parties :

Dans une première partie bibliographique

- Le chapitre 1 est un rappel sur les polymères semi-cristallins en général. Il contient aussi une description détaillée du polyamide 66, tels que la mise en œuvre, applications et procédés de fabrication des pièces en matières plastiques.
- Le chapitre 2 englobe un rappel de quelques caractéristiques des engrenages cylindriques à dentures droites et leurs modèles de calcul, en passant par une généralité sur les principaux modes d'usure.

Dans la seconde partie expérimentale

- Le chapitre 3 porte sur la présentation des caractéristiques mécaniques, thermiques, géométriques des pignons en PA 66, tous les détails concernant le banc d'essai, conditions expérimentales et différentes méthodes de mesure.
- Le chapitre 4 présente les résultats d'essai d'usure réalisés dans trois milieux différents notamment ; air, eau, et mélange eau et détergent.
- Dans la dernière partie relative à l'introduction de la fiabilité dans le dimensionnement des engrenages en PA 66, les paramètres obtenus de l'approche expérimentale ont servi à une étude de fiabilité par le logiciel Phiméca dans le cadre d'un couplage mécano-fiabiliste.

1.1. Introduction

Les polymères sont des matériaux à molécules géantes résultant de l'assemblage de molécules élémentaires appelées monomères. Les chaînes obtenues par la répétition de ces monomères vont avoir des tailles et des masses molaires très importantes, typiquement supérieures à 10^4 g/mol, masse à partir de laquelle les polymères vont donner un matériau au sens mécanique du terme. Les polymères sont dans l'ensemble peu denses, compte tenu de leur origine organique et par suite de la présence d'éléments constitutifs légers (Carbone, Oxygène, Hydrogène, Azote). La liaison covalente des carbones est à la base de la notion de polymère. Il s'agit d'une liaison forte d'environ 100 à 450 kJ/mol (438 kJ/mol pour la liaison carbone-carbone). Par conséquent, les polymères possèdent une élasticité élevée dans le sens de la chaîne macromoléculaire [1].

Un matériau polymère est un mélange contenant une matière de base, susceptible d'être moulée ou qui a été moulée. La matière de base est en général un mélange de macromolécules ou hauts polymères organiques ou semi-organiques à caractère résineux ; résultant le plus souvent d'une réaction naturelle ou artificielle de polycondensation ou de polymérisation (c'est à-dire de plusieurs molécules d'un composé pour former une grosse molécule) [2].

Un polymère est un enchaînement de motifs organiques identiques appelés monomères. Le monomère est une suite d'atomes de carbone reliés entre eux et combinés à d'autres éléments (hydrogène, azote, fluor, silicium, chlore, oxygène...). On distingue les homopolymères, répétition d'une unique structure moléculaire et les copolymères, répétition de plusieurs structures différentes [3].

Les polymères, appelés aussi matières plastiques ou simplement plastiques, sont des matériaux organiques composés essentiellement d'atomes de carbone et d'hydrogène. Le terme polymère est plutôt réservé pour définir le matériau obtenu de manière naturelle ou par synthèse organique. Le terme plastique souligne plus fortement le caractère de matériau de synthèse fini (à partir duquel des pièces sont produites selon des technologies spécifiques) ; il définit moins la structure du matériau et les réactions requises pour son élaboration. L'appellation matériau polymère est une combinaison des définitions d'un plastique et d'un polymère [4].

1.2. Classification des polymères

On peut classer les matériaux polymères suivant différents critères. Selon leur origine, on distingue les polymères naturels, c'est-à-dire trouvés en l'état dans la nature (ex : acide hyaluronique extrait de crêtes de coq), les polymères artificiels ou régénérés, obtenus par modification chimique d'un polymère naturel (ex : latex, collagène réticulé, etc.) et les polymères synthétiques, entièrement fabriqués par l'homme à partir de petites molécules réactives, appelées monomères.

Selon leur mise en oeuvre et leur comportement mécanique, les polymères peuvent être classés en polymères thermoplastiques, thermodurcissables ou élastomères.

On peut aussi examiner le matériau en s'intéressant à sa structure physique ou à sa structure chimique : dans le premier cas, les notions de matériau semi-cristallins et de matériau amorphe sont introduites ; dans le second, c'est la structure moléculaire en chaîne d'atome qui est à prendre en considération [6]. Sosiac_doucelboucel@hotmail.com

1.2.1. Point de vue thermomécanique

1.2.1.1. Les thermoplastiques (TP)

Les polymères thermoplastiques (aussi appelés thermoplastes) forment le groupe le plus important parmi les polymères synthétiques [7]. Ils sont constitués de macromolécules de taille limitée, linéaires ou ramifiées. L'adjectif thermoplastique vient à l'origine du fait que ce type de polymère passe de l'état rigide à l'état malléable par une faible élévation de la température. Ce processus est théoriquement entièrement réversible, et peut donc être répété un grand nombre de fois sans modification de la structure et sans altération des propriétés. De ce fait, ces polymères sont faciles à mettre en oeuvre et leur recyclage ne pose généralement pas de problèmes. Actuellement on regroupe sous le terme thermoplastique tous les polymères dont la cohésion latérale n'est assurée que par des liaisons secondaires (Van der Waals, hydrogène, etc.). De ce fait, ces polymères sont sensibles à la température, mais aussi aux solvants [8]. Ces matériaux se distinguent par leur structure, soit *amorphe*, soit *semi-cristallins* [6].

La majorité des thermoplastiques courant ramollissent ou fondent dans une plage de températures sise entre 80 et 225 °C par contre en général un thermodurcissable durcit et prend forme sous l'effet de la chaleur ou de la lumière [9].

Les thermoplastiques représentent 80% des matières plastiques consommées en Europe en 2000 soit plus de 35 millions de tonnes ! Avant transformation, ils sont sous forme de granulés ou de poudres dans un état chimique stable et définitif car il n'y a pas de modification chimique lors de la mise en forme. Les granulés sont chauffés puis moulés par injection et le matériau broyé est réutilisable [10].

Dans la suite de ce travail, nous nous intéresserons qu'à des polymères thermoplastiques.

1.2.1.2. Thermodurcissables (TD)

Les thermodurcissables sont des polymères réticulés, c'est-à-dire constitués d'un réseau tridimensionnel de macromolécules liées entre elles. Ces matériaux sont amorphes et caractérisés par une température de transition vitreuse T_g . Le taux final de réticulation du matériau dépendra des conditions de transformation [6].

Les thermodurcissables sont, contrairement aux thermoplastiques et en raison de leur structure, le plus souvent rigides. Elles sont stables même à des températures relativement élevées et présentent en générales une bonne tenue vis-à-vis de milieux agressifs. Elles ne sont pas fusibles puisque, même si les liaisons physiques peuvent être éliminés sous un apport de chaleur, les liaisons chimiques sont conservées et excluent le glissement des chaînes les unes par rapport aux autres. Les thermodurcissables, ne peuvent jamais revenir à l'état initial quand leur température a été augmentée : ils sont transformés irréversiblement.

En effet la nature chimique du produit initial fait qu'à température constante, et surtout au-dessus de sa température de transition vitreuse, une transformation chimique se produit qui s'élève de façon irréversible cette transition vitreuse [9].

Les thermodurcissables représentent 20% des matières plastiques consommées en Europe en 2000 soit environ 10 millions de tonnes. Les principaux représentants de la famille des thermodurcissables sont les polyesters insaturés (UP), les époxydes (EP), les phénoplastes (phénol-formaldéhyde PF, notamment), les aminoplastes, les acrylates et les silicones (SI).

Ces matières trouvent des applications, en particulier après renforcement par des fibres, pour l'élaboration d'équipements industriels et sportifs, mais aussi dans la construction aéronautique et d'engins spatiaux. Au départ, les thermodurcissables se présentent sous forme

de poudres ou de résines qui subissent une transformation chimique au cours de leur chauffage, de leur refroidissement ou par l'action de durcisseurs [9].

Le comportement des thermodurcissables implique l'utilisation des méthodologies de mise en forme fondamentales différentes de celles des thermoplastiques. Tandis que la mise en forme des thermoplastiques correspond à un procédé physique, c'est-à-dire basé sur les processus de fusion et de refroidissement, la transformation des thermodurcissables consiste en une réaction chimique, appelé réticulation. La production des matériaux finis consiste donc en une élaboration selon un procédé essentiellement chimique et une mise en forme selon des processus physiques [4].

La véritable distinction entre les *polymères thermoplastiques* et les *polymères thermodurcissables* provient du fait que dans le premier cas, les macromolécules restent chimiquement séparées les unes des autres après la mise en œuvre, ce qui permet un remoulage à discrétion, par contre dans le second cas, des petites molécules ou chaînes linéaires sont réticulées pendant le durcissement. Elles sont toutes reliées entre elles par des liaisons primaires et stables. L'échantillon forme ainsi une seule super-macromolécule (un réseau trois dimensions) et il ne peut être remoulé. Comme conséquence pratique de cette différence, un thermodurcissable peut se gonfler, mais ne se dissout dans aucun solvant [9].

1.2.1.3. Les élastomères

Les élastomères sont des composés macromoléculaires dont les propriétés sont étroitement liées à leur nature chimique et au caractère aléatoire de la distribution des chaînes moléculaires. Le caoutchouc naturel et les caoutchoucs synthétiques (matériaux polymère faiblement réticulés) appartiennent à cette famille.

Le comportement mécanique des élastomères est basé sur une grande déformabilité du réseau polymère, points d'ancrage et enchevêtrement comprise. Cette déformabilité est caractérisée par une extension possible des chaînes et par la capacité d'un retour à l'état initial rapide après suppression de la sollicitation. La déformation des élastomères est beaucoup plus grande que celles des thermoplastiques usuels et des matières thermodurcissables. L'allongement peut s'élever jusqu'à quelque centaines de pour-cent (avec par exemple des allongements réversibles jusqu'à 1000 % de leur longueur initiale). Au cours de la déformation, les chaînes s'ordonnent davantage. Il s'ensuit une diminution de l'entropie, ce qui explique l'échauffement des élastomères à l'allongement [4].

Les élastomères thermoplastiques appartiennent à une nouvelle catégorie de polymères qui allient la déformabilité des élastomères à la recyclabilité des thermoplastiques [10]. Les élastomères thermoplastiques diffèrent essentiellement des élastomères conventionnels, réticulés en ce sens que les points d'interconnexion du réseau ne sont pas covalents, mais des liens physiques formés, par exemple à partir de segments de chaîne cristallisés. Ces matériaux peuvent fondre sous un apport de chaleur. Ceci autorise une transformation thermoplastique et représente un avantage au niveau du coût de production [4].

1.2.2. Principaux types des polymères selon l'importance économique

Les matières plastiques importantes à l'échelle industrielle correspondent à 30 ou 40 types de polymères différents, proposés selon 13 000 combinaisons et sous 25 000 marques commerciales environ. En fonction de leurs applications, de leur prix et des quantités produites, on peut les répartir en trois groupes. Cette distinction n'est pas toujours simple, ces trois groupes se recouvrant dans certains cas [5].

Les plastiques standard, encore appelés plastiques de commodité, comprennent les thermoplastiques de grande diffusion comme le poly(chlorure de vinyle) (PVC), le polyéthylène (PE), le Polypropylène (PP) et les polymères à base de styrène (PS, PS-I).

Techniques, nobles ou technoplastiques possèdent de meilleures propriétés mécaniques, thermiques et électriques que les plastiques standards. Ils peuvent être employés dans des structures soumises à de fortes sollicitations et sont capables de résister à des charges élevées. Ce groupe est constitué des polyamides (PA), du poly(oxyméthylène) (POM), du Polycarbonate (PC), du Poly(téréphtalate d'éthylène) (PET), du Poly (teréphtalate de butylène) (PBT), des copolymères à base de styrène (ABS, ASN, SAN) ainsi que des mélange PC+ABS et PC+PBT.

Les plastiques de spécialité ou de haute performance sont des plastiques techniques présentant d'excellentes propriétés, qui les rendent notamment utilisables à haute température. Leur mise en forme requiert généralement l'emploi d'équipements spéciaux. On peut citer les polyamides aromatiques, les polysulfones (PSU, PPSU), les polyaryléthercétones (PEK, PEEK, PEEKK), les polyimides (PI, PAI, PEI), Poly (sulfure de phénylène) PPS, les polymères à cristaux liquides (LCP) et les polymères fluorés (PTFE...) [4,9].

Le développement des plastiques a été essentiellement favorisé par quatre facteurs :

- amélioration de la qualité,
- progrès des techniques de mise en forme,
- poursuite de la baisse des prix,
- élévation et élargissement du niveau des connaissances.

1.2.3. Point de vue de la structure physique

La matière se présente essentiellement sous deux états: l'état amorphe et l'état cristallin.

1.2.3.1 Polymère amorphe

Les zones dites 'amorphes' correspondent à une structure comparable à celle des liquides caractérisée par l'absence d'ordre à grande distance. Il n'y a pas de distance constante entre les macromolécules et aucune régularité dans l'arrangement et l'orientation, et ceci en raison de la structure et de la disposition aléatoire des chaînes individuelles.

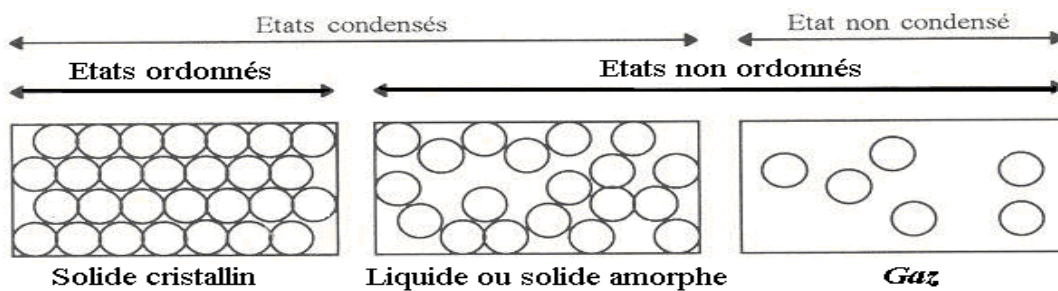


Figure 1.1 : illustration des différents états de la matière [6]

Les macromolécules peuvent former des points d'enchevêtrement physiques qui sont inévitables à partir d'une certaine longueur des chaînes moléculaires, très souvent atteinte dans les polymères commerciaux. La longueur des segments entre les enchevêtrements est en général suffisamment grande pour que les segments se comportent comme des chaînes individuelles. Les segments de chaînes sont capables de créer une certaine mobilité moléculaire si des espaces libres sont régulièrement distribués dans tout le volume du matériau. Ces espaces constituent le volume libre du matériau qui détermine la mobilité des macromolécules et l'aptitude du polymère à changer de conformation [11].

Les matériaux amorphes ne sont pas caractérisés par une température de fusion T_f mais par une température de transition vitreuse T_g séparant le domaine dans lequel le matériau est solide et rigide (état vitreux) de celui où le matériau est à l'état caoutchoutique. Cette température caractéristique définit donc le domaine d'utilisation en température du matériau. Il s'illustre généralement par un faible retrait et une bonne stabilité dimensionnelle (PS, SAN, ABS, CA, PMMA, PC, PPO, PSU, PVC) [6].

Toujours d'un point de vue mécanique, on a une forte diminution du module d'élasticité lorsque le polymère passe de son domaine vitreux à son domaine surfondu (Fig. 1.2a). La chute la plus importante, correspond à ce qu'on appelle la transition vitreuse. La transition vitreuse est donc un paramètre très important de l'étude des polymères amorphes et semi-cristallins. Ceci autant à cause des mouvements moléculaires qu'elle induit que par l'aspect mécanique général du matériau étudié [1].

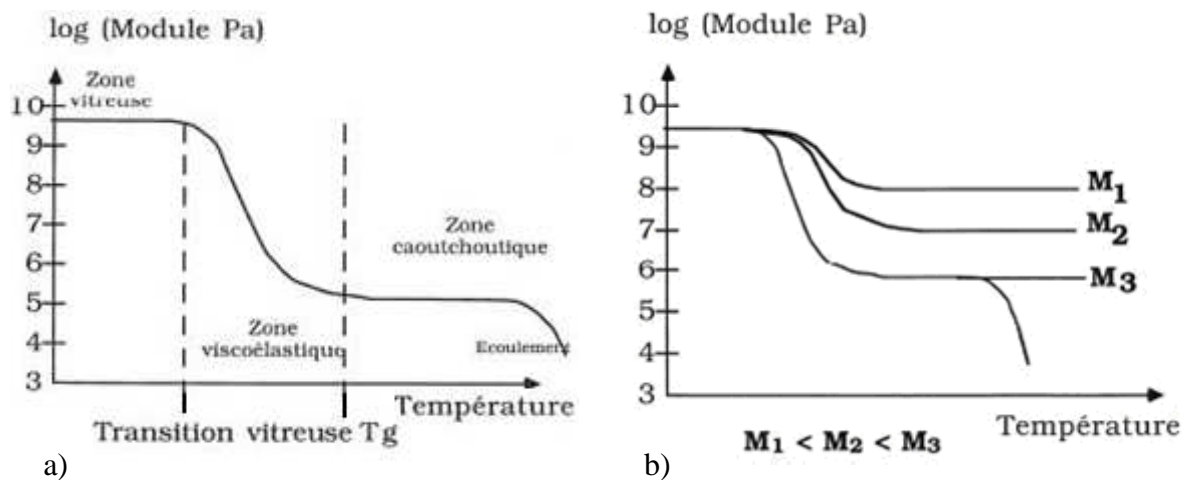


Figure 1.2 : Evolution du module d'élasticité d'un polymère amorphe en fonction de la température : a) macromolécules monodimensionnelles ; b) polymères réticulés avec différentes valeurs de la masse molaire entre nœuds [1]

La masse molaire influence sur la longueur du plateau caoutchoutique.

Dans les polymères amorphes, les macromolécules adoptent une conformation de type pelote statistique à l'état liquide, mais aussi après refroidissement jusqu'à l'état vitreux. La taille des pelotes est quasi identique, que le matériau soit à l'état liquide ou à l'état vitreux, ou que les macromolécules soient dissoutes dans un solvant chimiquement inertes. La masse volumique d'une macromolécule individuelle dans la conformation du type pelote est approximativement égale à un centième de celle du polymère à l'état solide. Les macromolécules dans la conformation de types pelote statistique peuvent, selon les conditions auxquelles elles sont soumises, s'entrelacer, s'enchevêtrer, mais aussi créer des nœuds chimiques (réticulation) à certain endroits (Fig. 1.3). Les segments de chaînes peuvent comporter jusqu'à 1000 atomes entre deux nœuds du réseau d'un élastomère faiblement réticulé, jusqu'à 20 atomes environ pour une matière thermdurcie fortement réticulée [4].

Les nœuds du réseau sont permanents et on observe simplement deux types de comportement (Fig. 1.2b) : vitreux au-dessous de T_g , et caoutchoutique au-dessus. Le niveau du plateau caoutchoutique est plus élevé lorsque le réseau est plus dense.

La formation de nœuds ou de point d'enchevêtrements est inévitable à partir d'une certaine longueur des chaînes moléculaires, c'est-à-dire à partir d'un certain nombre d'unités monomères dans la macromolécule (environ 270 pour le PE et 680 pour le PS) les enchevêtrements sont largement conservés lors de la solidification (vitrification) des

polymères amorphes, ils perturbent et retardent l'arrangement des chaînes dans les zones cristallines pendant la cristallisation. Les enchevêtrements sont aussi à l'origine de l'augmentation de la viscosité de la matière fondue lors d'un écoulement [4].

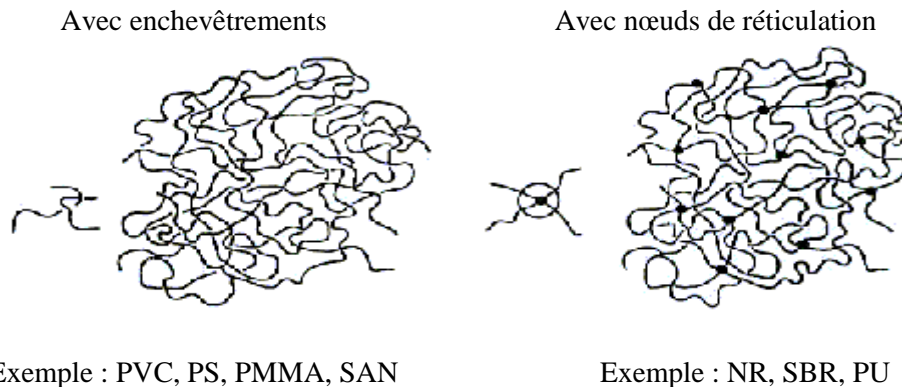


Figure 1.3 : *Interpénétration de structure en pelote. Thermoplastique amorphe non réticulés avec enchevêtrement (à gauche) et élastomère peu réticulés avec nœuds de réticulation (à droite)*

La viscosité des matières amorphes liquide augmente au cours du refroidissement. Les segments de chaînes ne peuvent plus se mouvoir librement. Pour cela, ils ont besoin d'espaces libres, d'une taille approximativement égale à celle d'un atome, régulièrement distribués dans tout le volume du matériau. Ces espaces constituent le volume libre du matériau.

Le volume libre, calculé à partir de la masse volumique à l'état solide et à l'état liquide, équivaut à environ 2.5 % du volume total, au niveau de la transition vitreuse. Les macromolécules peuvent se mouvoir plus librement, seulement lorsque le volume libre est supérieur à 2.5 %. La libre rotation autour des liaisons simples C-C devient alors possible. Le volume libre détermine la mobilité des macromolécules et l'aptitude des polymères à se ramollir [4].

1.2.3.2. Polymère semi-cristalline

L'état solide cristallin, état ordonné dans lequel les atomes, ions ou molécules, sont répartis de façon périodique suivant les trois directions de l'espace [8]. Dans un polymère cristallisé les molécules sont serrées les unes contre les autres et parfaitement ordonnées dans des lamelles cristallines. Généralement les polymères semi-cristallins présentent une alternance de plaquettes de phase amorphe et de phase cristalline appelée structure lamellaire.

L'état semi-cristallin correspond à un arrangement local de segments de chaînes parallèles les uns aux autres, dans un état cristallin qui ne modifie que très peu la topologie des pelotes statistiques. Cette organisation semi-cristalline des polymères combine des régions amorphes, caractéristiques d'un état désordonné, et des régions cristallines, caractéristiques cette fois d'un état ordonné [13].

Les matériaux semi-cristallins sont caractérisés par une température de fusion T_f précise. Ils possèdent généralement une bonne tenue chimique et à la fatigue dynamique, un bon écoulement, un faible coefficient de frottement et une moindre déformation en température (PA, POM, PTFE, PP, PET, PBT) [6].

L'aptitude des polymères à cristalliser, c'est-à-dire la capacité des chaînes à s'arranger régulièrement et parallèlement, dépend de leur structure chimique. Les chaînes moléculaires qui cristallisent le mieux sont les chaînes non ramifiées, sans ou avec si possible peu de groupement latéraux volumineux, ou alors dans ce cas régulièrement répartis le long du squelette. Le PA, le PE et le PTFE sont des exemples de polymères possédant une structure

crystalline. Un certain nombre de plastiques techniques cristallisent mal ou pas du tout, à cause de substituant irrégulièrement répartis et/ou relativement volumineux.

Les thermodurcissables et la plupart des élastomères ne peuvent pas cristalliser à cause de leur structure moléculaire [4].

La cristallisation va dépendre de la méthode de préparation du polymère ainsi que du type de chaîne formée. En effet, le polymère cristallisera plus facilement en cas de refroidissement lent après polymérisation. D'autre part, des chaînes peu ramifiées et ayant des groupements latéraux peu encombrants conduiront à des matériaux plus cristallins. Les polymères ne cristallisent jamais totalement (taux de cristallinité de 100%) pour différentes raisons :

- la présence d'irrégularités structurales (ramification,...)
- la lenteur des réarrangements conformationnels.
- la présence d'enchevêtrements qui s'opposent à la cristallisation [13].

1.3. Structure et Morphologie des polymères semi-cristallins

1.3.1. Régularité de la chaîne macromoléculaire

Un polymère est formé à partir d'un fondu. Il est constitué de chaînes organiques polymérisées, c'est à dire de chaînes organiques de grande taille appelées chaînes macromoléculaires qui va s'organiser de façon plus ou moins aléatoire au cours de l'élaboration du polymère (refroidissement à partir du fondu). Pour qu'un polymère cristallise, il est nécessaire que sa chaîne macromoléculaire montre une forte régularité, mais aussi que sa cinétique de cristallisation ne soit pas trop lente. Les polymères cristallisables auront une configuration régulière (isotactique ou syndiotactique) ainsi qu'une conformation globale régulière (zigzag planaire ou hélice pour les polymères thermoplastiques). A l'inverse, les chaînes macromoléculaires composées d'une configuration atactique, ainsi que celles formant une conformation de pelote statistique ne pourront pas cristalliser et resteront à l'état amorphe [14].

Les séquences *isotactiques*, où le groupement latéral est toujours du même côté, les séquences *syndiotactiques*, où le groupement latéral est alternativement situé d'un côté puis de l'autre de la chaîne, et enfin les séquences *atactiques* pour lesquelles il n'y a pas d'ordre dans le placement des groupes latéraux (Fig. 1.4) [1].

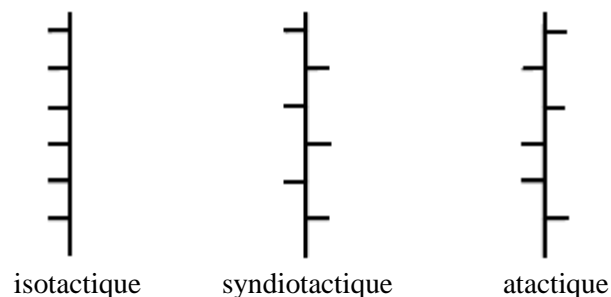


Figure 1.4 : formes isotactiques, syndiotactiques et atactiques des chaînes polymères (verticalement la chaîne carboné et horizontalement les groupes latéraux)

Cependant, les chaînes macromoléculaires ne sont jamais rigoureusement régulières, et la moindre irrégularité dans l'enchaînement des motifs monomères composant la chaîne, ou la présence d'une ramification par exemple, va avoir pour effet de modifier, de limiter, voire d'empêcher la cristallisation [14].

1.3.2. Organisation en lamelles

Lors de la cristallisation, les chaînes macromoléculaires régulières, qui peuvent mesurer quelques micromètres de longueur, s'organisent et se replient pour former des lamelles (figure 1.5). L'épaisseur et la régularité des lamelles dépendent des conditions de cristallisation mais aussi de la rigidité de la chaîne, des ramifications, et des défauts d'enchevêtrement. Ces imperfections favorisent les connexions entre lamelles : elles sont reliées par des morceaux des chaînes macromoléculaires appartenant à d'autres lamelles : ces pontages sont appelés chaînes liens. Parfois, la chaîne macromoléculaire est mal repliée et forme des repliements. A la périphérie des lamelles, les chaînes liens, les repliements, les bouts de chaînes et les impuretés ne peuvent pas cristalliser et vont former une phase amorphe appelée phase amorphe interlamellaire [14].

On appelle longue période L la somme des épaisseurs d'une lamelle cristallisée (l_c) et de la phase amorphe inter-lamellaire (l_a) : $L = l_c + l_a$ (Fig. 1.5). Cette structure lamellaire dont l'épaisseur L est de l'ordre de la dizaine de nanomètres, est bien spécifique des composés macromoléculaires.

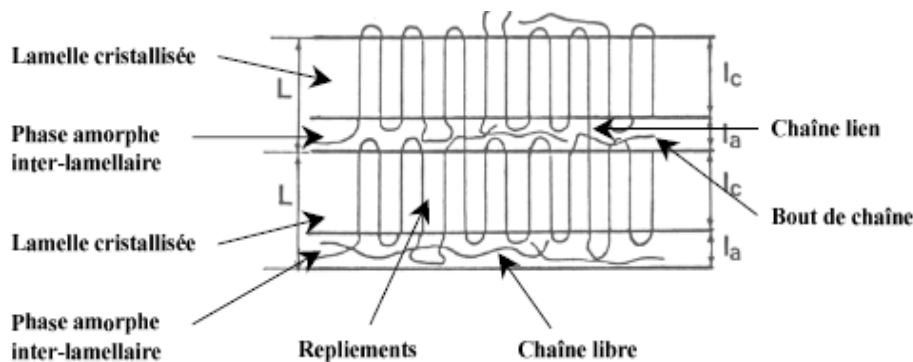


Figure 1.5 : Schématisation de l'organisation en lamelles cristallines formées des repliements des chaînes macromoléculaires.

Les lamelles sont séparées par une phase amorphe inter-lamellaire composée de chaînes liens, de chaînes libres, de bouts de chaînes et de tout ce qui n'a pas pu cristalliser [14].

Les lamelles ont la possibilité de s'organiser en une superstructure cristalline nommée sphérolite (Fig. 1.6) [1].

1.3.3. ... puis en sphérolites

Simultanément à leur formation et à leur croissance, les lamelles peuvent s'organiser pour donner naissance à des sphérolites. Les sphérolites sont généralement de forme sphérique dont la taille peut varier du micromètre au millimètre. Ils sont formés de lamelles qui croissent à partir d'un centre pour occuper tout l'espace offert. L'enveloppe sphérique des sphérolites lors de leur croissance est modifiée lorsqu'ils finissent par se toucher. Ils présentent finalement un contour d'aspect polygonal (Fig. 1.6) [14].

Les tailles et orientations des sphérolites dépendent de l'élaboration, en particulier de la vitesse de refroidissement ou des processus de mise en oeuvre tels que l'étirage (drawing) ou le laminage (rolling).

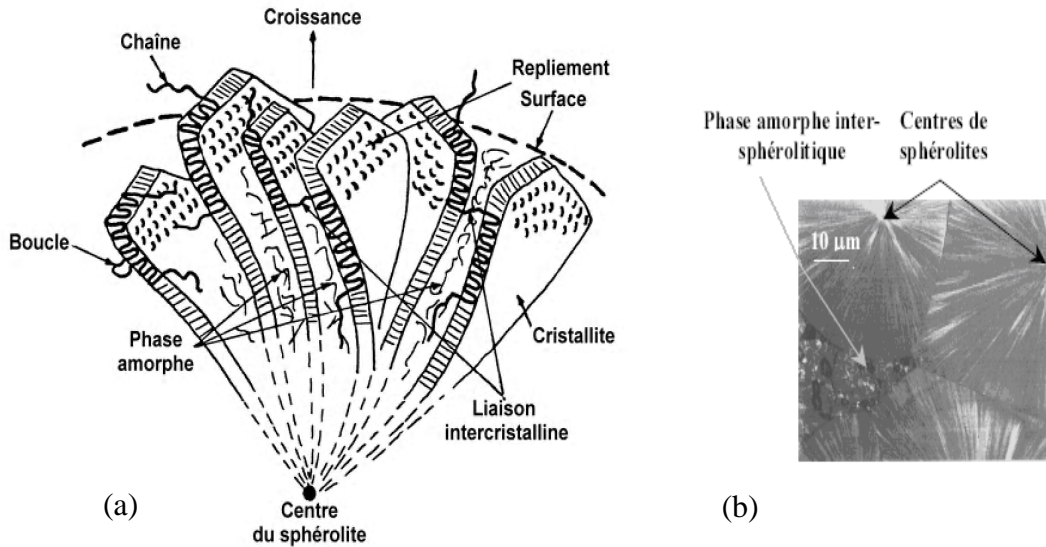


Figure 1.6 : Microstructure d'un sphérolite de polymère semi cristalline. (a) Représentation schématique d'une unité morphologique sphérolitique et (b) Image de sphérolites observé par microscopie optique en transmission en lumière polarisée [11, 14]

Au cours de la croissance, les sphérolites présentent une symétrie sphérique. Lorsqu'ils entrent en contact, leur enveloppe externe finit par devenir polygonale. Entre les sphérolites subsiste une phase amorphe inter-sphérolitique composée de chaînes non cristallisées et d'impuretés [14].

Bien que les sphérolites soient une superstructure cristalline, elles ne sont pas elles-mêmes totalement cristallines. Il y a toujours une phase amorphe présente, notamment entre les lamelles constituant les sphérolites [1].

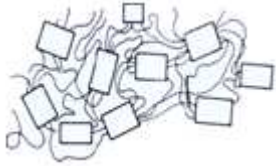
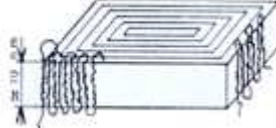

1.3.1.3.1. Phase amorphe inter-sphérolitique

Comme pour l'espace inter-lamellaire, l'espace inter-sphérolitique contient tout ce qui n'a pas pu cristalliser : chaînes liens, bouts de chaînes, additifs, imperfections, impuretés. Il existe alors deux principaux domaines constitués de phase amorphe dans les polymères semi-cristallins : le domaine inter-lamellaire et le domaine inter-sphérolitique. Ces deux domaines sont identifiables sur les figures 1.5 et 1.6 [14].

La complexité de l'étude de la cristallisation provient du fait que la morphologie des polymères semicristallins dépend d'un grand nombre de paramètres externes. Même si les échelles de structure paraissent bien définies, cette morphologie est particulière car elle tient compte, entre autre, de l'histoire thermique du matériau (temps de cristallisation, mode de refroidissement et distribution moléculaire du polymère) [13].

La structure cristalline des polymères peut être décrite à plusieurs échelles. Le Tableau 1.1 présente un récapitulatif des ordres de grandeur des dimensions de ces structures cristallines [13].

Tableau 1.1: Ordres de grandeur des structures cristallines

Echelles	Structures
0.1-1 Nanomètre	 Chaîne macromoléculaire
10 Nanomètres	 Lamelle cristalline
1 Micron	 Sphérolites

1.4. Caractéristiques des matériaux semi-cristallins

1.4.1. Le taux de cristallinité

Dans un polymère, la quantité de matière cristallisée par rapport à l'ensemble de la matière représente le taux de cristallinité du polymère. Elle peut être défini en masse (x_c) ou en volume (v_c) de la façon suivante :

$$x_c = \frac{M_c}{M_{tot}} \quad (1.1)$$

et

$$v_c = \frac{V_c}{V_{tot}} \quad (1.2)$$

Où M_c est la masse de la phase cristalline, M_{tot} est la masse totale de l'échantillon, V_c est le volume de la phase cristalline, V_{tot} est le volume total de l'échantillon. Le taux de cristallinité peut varier pour un même polymère et dépend principalement de la méthode de cristallisation employée, de la cinétique de cristallisation et de la quantité d'additifs introduite [14].

Ce taux de cristallinité est influencé non seulement par la structure moléculaire de l'échantillon, mais aussi par les traitements thermiques qu'il a subis. L'influence du taux de cristallinité sur les propriétés physiques et mécaniques des polymères synthétiques est extrêmement importante.

Le taux de cristallinité d'un matériau modifiera son comportement notamment sous l'effet de la chaleur. En effet, les chaînes moléculaires sont plus liées dans un matériau cristallin, et donc, la température de fusion est supérieure. On distingue d'ailleurs une température de transition correspondant à la température de recouvrance structurale des zones amorphes d'un polymère (elle est appelée température de transition vitreuse) de la température de fusion des zones cristallisées, plus élevée, nommée température de fusion. Nous allons voir que les états moléculaires, macromoléculaires et supramoléculaires d'un polymère jouent sur ses propriétés thermomécaniques par l'intermédiaire de ce que l'on nomme la mobilité moléculaire [1].

1.4.2. La température de transition vitreuse

La température de transition vitreuse, caractéristique des phases amorphes, marque la transition entre l'état vitreux, état figé hors d'équilibre thermodynamique, et l'état caoutchoutique (vers un comportement fluide) [15].

D'une manière générale, le caractère désordonné de la phase amorphe lui confère un certain degré de liberté. L'amplitude de ces mouvements va fortement dépendre de la température et connaît généralement deux régimes. Il est possible de définir une température, appelé température de transition vitreuse (T_g), qui délimite ces deux régimes. En dessous de T_g , l'agitation thermique est insuffisante pour permettre le mouvement dans la phase amorphe, elle est à l'état vitreux. Au-dessus de T_g , l'agitation thermique est suffisante pour permettre un mouvement interne de la phase amorphe : elle est à l'état caoutchoutique. La notion de température de transition vitreuse est essentielle pour comprendre le comportement mécanique des polymères semi-cristallins. Au-dessus de T_g , les polymères semi-cristallins se déforment beaucoup car leur phase amorphe à l'état caoutchoutique permet d'accommoder des déformations de grande amplitude. Par contre, en dessous de T_g , la phase amorphe se déforme très peu et peut alors être plus fragile que la phase cristalline [14].

La flexibilité des chaînes, la taille et la polarisabilité des groupes latéraux, la masse molaire ou encore l'humidité sont des paramètres qui affectent la détermination de la température de transition vitreuse ("glass transition", T_g) [15].

Tableau 1.2 : Influence de l'humidité relative HR sur la température de transition vitreuse. (Evaluation d'après des mesures DSC¹ et DMTA²) [15]

PA66	sec	50% HR	100% HR
Température de transition vitreuse, T_g	$46^{\circ}\text{C}^1 - 66^{\circ}\text{C}^2$	$16^{\circ}\text{C}^1 - 35^{\circ}\text{C}^2$	$-37^{\circ}\text{C}^1 - -15^{\circ}\text{C}^2$

Le domaine de transition étant assez large et proche de l'ambiante, l'humidité relative (HR) et la température sont des paramètres indispensables à prendre en compte (Tab. 1.2).

Empiriquement, la température de transition vitreuse peut être calculée à l'aide d'une méthode de contributions de groupes, ou encore déduite de la température de fusion par la relation : $T_g/T_f = 2/3$ (Van Krevelen, 1990). Expérimentalement, la méthode de détermination (DSC, DMTA) ainsi que les conditions expérimentales influent sur la valeur relevée d'où les grandes disparités d'un auteur à l'autre (Tab 1.2).

1.4.3. Mobilité moléculaire dans les polymères

Supposons que l'on sollicite mécaniquement un polymère. Celui-ci revient à l'équilibre grâce à la présence de mouvements moléculaires dus à l'agitation thermique. Ces mouvements sont de différents types, classés selon la taille des chaînes qu'ils font intervenir. Classés par ordre croissant, on a successivement :

- les mouvements locaux
- les mouvements coopératifs
- les reptations de chaînes

Ces mouvements sont importants pour la compréhension des caractères plastiques et élastiques de polymères [1].

Les mouvements locaux correspondent aux déplacements des groupes latéraux susceptibles d'être présents sur les unités structurales monomériques. Ces mouvements demandent peu d'énergie, et seront donc actifs à basse température.

Les mouvements coopératifs sont des mouvements mettant en jeu quelques unités structurales successives. Le changement de conformation d'une liaison entre deux unités structurales va engendrer une déformation des liaisons (angle de liaison) sur plusieurs unités successives. Ces mouvements peuvent mettre en jeu 4 à 5 unités structurales dont les liaisons seront perturbées.

Enfin, *les reptations de chaînes*, correspondent aux mouvements des chaînes macromoléculaires les unes par rapport aux autres. Ce type de mouvement qui met en jeu de très nombreuses molécules, nécessite une énergie importante. Ces mouvements n'existent pas dans les phases cristallines. Dans les zones cristallines, la mobilité n'est possible qu'au delà de la température de fusion. Nous verrons que ces mobilités possibles sont associées aux diverses transitions (en température et en fréquence) observables par des méthodes électriques et mécaniques [1].

1.5. Caractéristiques générales des matériaux polymères

1.5.1. Principes de structure

Sous les termes matériaux polymères, matières plastiques sont définis, de façon générale, les matériaux constitués essentiellement d'enchaînements macromoléculaires organiques relativement simples. Les macromolécules réunissent un grand nombre d'unités monomères, associées sous forme de chaînes et qui confèrent généralement une périodicité à l'ensemble. Le nombre d'unités monomères formant une macromolécule est si grand que le fait d'éliminer ou d'ajouter une unité ne modifie pas de façon significative les propriétés ou qualités du matériau polymère résultant. Le nombre d'atomes constitutifs des macromolécules est le plus souvent supérieur à 1 000, les masses molaires varient généralement de 10^4 à 10^7 g/mol [4].

Une macromolécule correspond à un enchaînement d'une multitude de monomères liés par l'association des atomes dans une macromolécule ; ceci est dû à des forces de cohésion chimiques. Les macromolécules peuvent être liées physiquement ou chimiquement les unes aux autres.

L'association des atomes dans une macromolécule est due à des forces de cohésion chimiques. Les macromolécules peuvent être liées physiquement les unes aux autres. On parle de macromolécules réticulées lorsque les molécules sont associées entre elles chimiquement. Il y a toujours, en complément des liaisons chimiques, des liaisons physiques qui maintiennent mutuellement les chaînes macromoléculaires dans l'assemblage et qui agissent entre les segments d'une macromolécule. Les macromolécules, dans la conformation de type pelote, s'interpénètrent, de sorte que les enchevêtrements et les nœuds sont inévitables. Les forces de cohésion chimiques sont jusqu'à 10^3 fois plus résistantes que les forces de cohésion physique. Alors que les liaisons physiques peuvent être détruites sous l'effet de la chaleur, d'un solvant ou de sollicitations mécaniques de façon réversible, la rupture des liaisons chimiques est plus difficile. La scission d'une liaison chimique est irréversible. Si les liaisons physiques seulement sont éliminées mais les liaisons chimiques conservées, le matériau conserve sa nature [4].

La figure 1.7 présente schématiquement différents types de macromolécules. De gauche à droite, la macromolécule apparaît linéaire non ramifiée, ramifiée, réticulée et enchevêtrée.

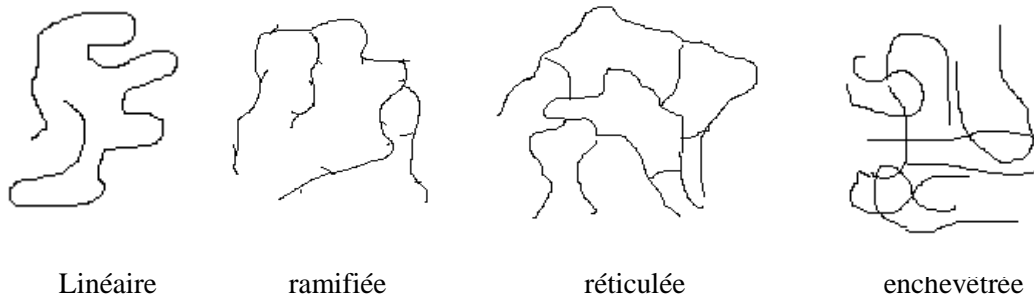


Figure 1.7 : Représentation schématique de différents types de macromolécules [3]

Les matières thermoplastiques, sont constituées de macromolécules linéaires ou ramifiées, liées entre elles physiquement. Ces matières sont solides à température ambiante.

1.5.2. Domaines d'état et zones de transition

La notion de domaine d'état exprime le fait que les propriétés d'un matériau varient peu dans un certain domaine de température, dans les conditions de mise en forme ou d'usage. Les propriétés du matériau peuvent être suffisamment bien définies dans un tel domaine. Cette remarque est valable aussi bien pour les grandeurs mesurables que pour les caractéristiques moléculaires et structurales. Pour les plastiques, on peut distinguer les états fondamentaux suivants :

- état vitreux ou d'élasticité d'origine énergétique, ou état solide,
- état caoutchoutique ou d'élasticité d'origine entropique,
- état fondu ou liquide, ou écoulement.

Entre ces différents domaines d'état, il existe des zones de transition, qui s'étendent sur un certain domaine de température :

- Zone de transition vitreuse (zone de ramollissement ou de vitrification),
- Zone de fusion ou de fluidification.

Il est bien connu que d'autres transitions au sein d'un polymère peuvent exister selon la nature de celui-ci, nous avons rapporté ici les transitions les plus classiques associées aux polymères.

De plus, certains événements qui peuvent se produire dans le même domaine d'état ne peuvent pas être qualifiés uniquement comme des transitions de phase. Entre autres, on trouve les phénomènes de relaxation secondaire qui sont la preuve d'une mobilité moléculaire localisée. Cependant ces phénomènes traduisent aussi le passage d'un état thermodynamique où ces mouvements sont très peu probables à un autre dans lequel ils deviennent possibles. Les phénomènes de relaxation, avec leur caractère bien particulier [3].

1.5.3. Comportement mécaniques des polymères

Les propriétés des matériaux polymères sont beaucoup plus sensibles que celles des métaux aux influences extérieures, tel que la température, la durée, l'intensité et le type de chargement, les radiations ultraviolets, et les agents chimiques. Le concepteur de pièces en matières plastiques est donc souvent obligé de prendre également en compte les problèmes de déformation dans le calcul de leur résistance [4].

Le comportement spécifique des matériaux polymères est lié au fait que les macromolécules ne réagissent pas toujours instantanément à l'application d'une sollicitation. Les différentes chaînes moléculaires constitutives tentent de répartir les contraintes imposées en se réarrangeant physiquement jusqu'à atteindre une position d'équilibre.

L'influence des contraintes internes, des orientations et du taux de cristallinité peut être décelée lorsque le matériau est soumis à une sollicitation ultérieure, par exemple une température élevée. Pratiquement le *temps* et la *température* comptent les paramètres les plus importants dans l'analyse du comportement mécanique du matériau.

Si la sollicitation appliquée est trop rapide par rapport à la capacité de réarrangement des molécules, les matériaux polymères ont un comportement rigide et fragile. Si les chaînes moléculaires ont suffisamment de temps pour atteindre une position d'équilibre correspondant aux contraintes subies, les matériaux polymères présentent un comportement souple et ductile. Pour une même application, les matériaux polymères peuvent donc se comporter de façon fragile ou ductile, selon les conditions de température et de vitesse de sollicitation.

Le comportement fragile d'un matériau polymère est lié à l'incapacité des macromolécules à se réarranger dans un intervalle de temps adéquat, lorsqu'elles sont soumises à une sollicitation rapide ou à basse température. Un matériau polymère présente, au contraire un comportement ductile s'il est soumis à une sollicitation lente ou à une température plus élevée. En raison de leur structure réticulée, le comportement des matières thermodurcissables tend à être fragile, en particulier à température ambiante. Les thermoplastiques, notamment les semi-cristallins, ont en général un comportement ductile. Il existe également un certain nombre de thermoplastiques fragiles ; ce sont par exemple les polymères amorphes tels que le polystyrène (PS) et le copolymère styrène-acrylonitrile (SAN). Les élastomères sont à classer parmi les polymères ductiles [4].

La figure 1.8 Donne une vue générale des différents comportements mécaniques des matériaux polymères [4].

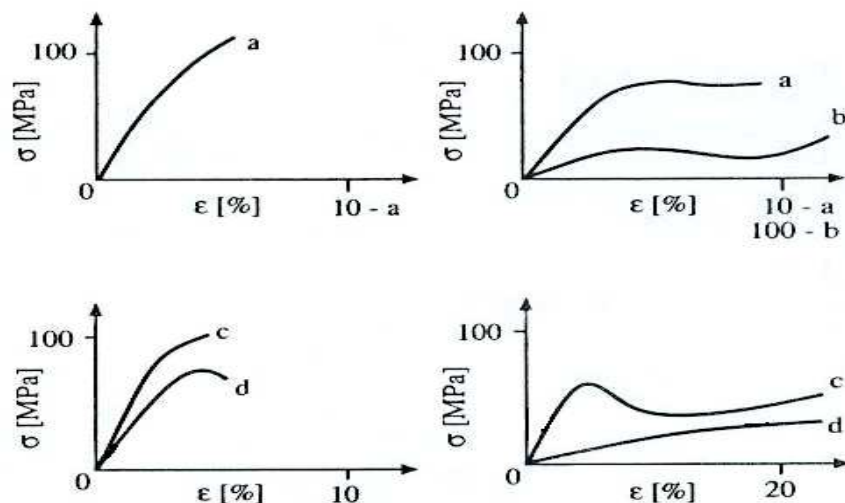


Figure 1.8 : Comportement mécanique (courbes contrainte-déformation) de différents types de matériaux polymères : [polymère réticules (a : thermodurcissable, b : élastomère) ; polymère non réticules, linéaires c : thermoplastique amorphe, d : thermoplastique semi-cristallin]

1.5.3.1 Propriétés mécaniques

Le comportement mécanique d'un matériau est caractérisé par sa déformation sous l'action de sollicitations extérieures. Pour les plastiques, on peut distinguer trois types de comportement, qui sont toutefois généralement connexes et peuvent se superposer:

- déformation élastique (instantanée, totalement réversible),
- déformation viscoélastique ou de relaxation (dépendant du temps réversible),

- déformation visqueuse (dépendant du temps, irréversible).

La figure 1.9 Donne une représentation des mécanismes moléculaires réagissant les trois types de comportement mécanique des matériaux polymères.

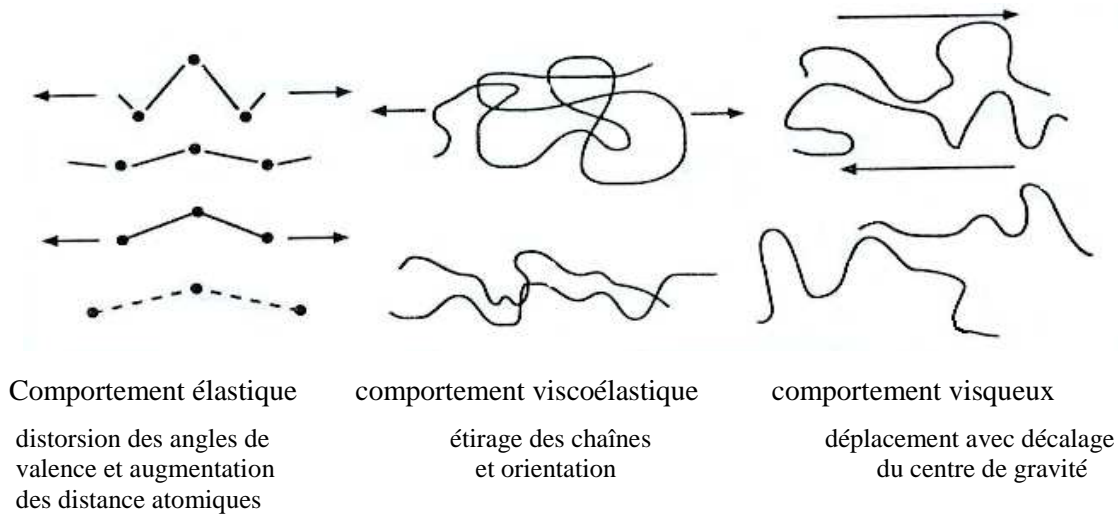


Figure 1.9 : Description moléculaire de différents comportements mécaniques des matériaux polymères [4]

La déformation purement élastique est associée à une modification instantanée des distances inter atomiques et à une distorsion des angles de valence entre les liaisons chimiques fortes. Le comportement visqueux résulte de la mobilité réduite des chaînes les unes par rapport aux autres et correspond à des mouvements avec décalage de leur centre de gravité. Pour la déformation viscoélastique ou de relaxation, qui dépend du temps, les molécules ou les groupes de molécules ont certain temps, par l'intermédiaire d'un réarrangement moléculaire, une déformation correspond à la contrainte appliquée.

1.6. Causes de défaillances de pièces à base de polymériques

D'après une étude menée au CETIM (Centre Technique des Industries Mécaniques) entre 1994 et 1998 sur les pièces expertisées à base de polymères, il apparaît que les causes liées à des problèmes de fabrication arrivent en tête (Fig. 1.10) [16].

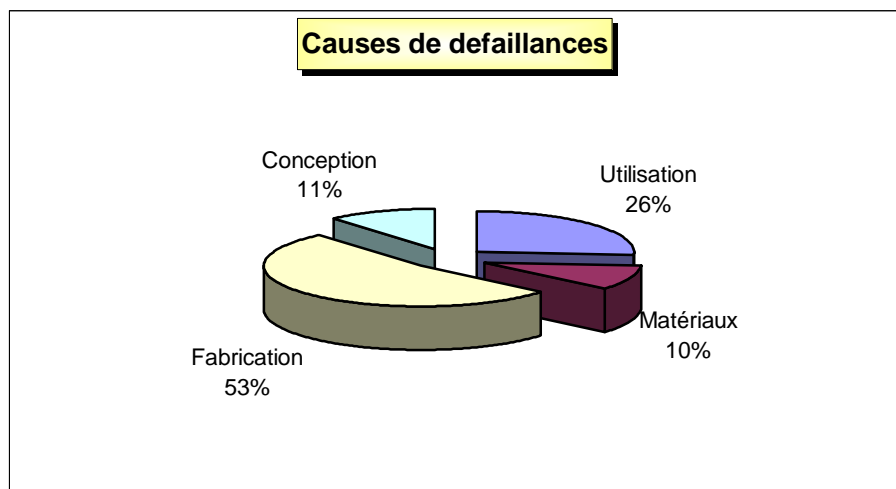


Figure 1.10 : Répartition globale des origines d'avarie de pièces à base de polymères

Ceci résulte de plusieurs origines

La standardisation des matériaux est limitée (la notion de matériaux de référence à base de polymères est récente). L'un des avantages tant apprécié des polymères de pouvoir réaliser une pièce en même temps que le matériau tend à élargir la palette des ingrédients constituant les pièces (matrice de base, additifs divers, charges et renforts). Malheureusement, le transformateur a rarement accès à la formulation et n'a pas toujours la capacité de contrôler les éventuels écarts de composition qui peuvent intervenir sur la qualité de la pièce moulée la maîtrise des procédés de transformation n'est pas toujours optimisée d'autant plus qu'on ne connaît pas toujours l'influence des divers paramètres de fabrication sur la tenue dans le temps des pièces par exemple [16].

Les autres origines possibles sont :

le matériau: la pièce peut être bien conçue, le procédé de transformation peut être bien paramétré par rapport au matériau initialement défini. Néanmoins, si la composition (variation des charges et additifs... par exemple) et/ou la qualité du matériau fourni (grade différent, ajout de rebroyé par exemple) évoluent, les propriétés finales de la pièce transformée ne seront pas celles attendues et des défaillances prématurées pourront se produire.

la conception: des défaillances peuvent résulter d'un mauvais dimensionnement des pièces (hypothèses de calcul inadéquates, cahier des charges imprécis...).

l'utilisation: une modification des conditions de fonctionnement par rapport à ce qui a été défini par le cahier des charges, des opérations de maintenance inadaptées aux produits. pourront conduire à des ruptures inattendues [16].

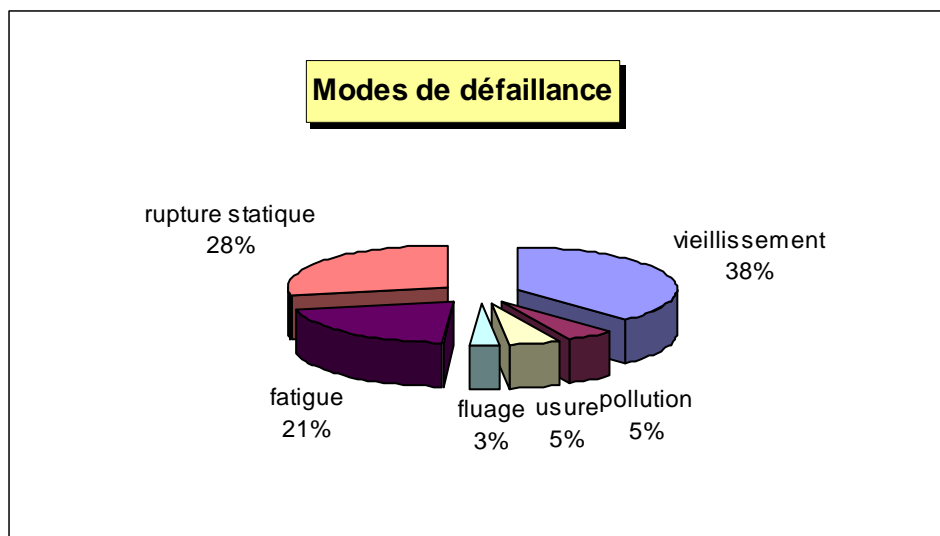


Figure 1.11 : Répartition globale des modes de défaillance en service de pièces à base de polymères

La figure 1.11 apporte un éclairage particulier sur les origines possibles des défaillances constatées en service. On constate qu'elles se répartissent selon deux grandes familles: ruptures mécaniques résultant des contraintes mécaniques appliquées en service : 52 %. Si la part des ruptures due à des sur contraintes est importante (entraînant des ruptures de type statique), un nombre non négligeable de défaillances découle de l'application répétée (fatigue mécanique) ou maintenue dans le temps (fluage) de contraintes inférieures à la résistance statique du matériau, ruptures résultant des conditions d'environnement (humidité, température, contact avec des produits chimiques, ultraviolets, ozone...) 38 % [16].

1.7. Paramètres influençant le mode de rupture des polymères

La structure chimique et la morphologie déterminent directement les propriétés d'un matériau. Les conditions de mise en forme, les influences extérieures (chaleur, produit chimique agressifs...) et les effets du vieillissement, qui dépendent du temps, peuvent influencer de manière considérable tant la structure physique que la structure chimique du matériau et donc la qualité des produits finie (Fig. 1.12). la production de pièces en matière plastique doit prendre en compte, à part égale, les conditions de fabrication, les caractéristiques propres du matériau, le type de sollicitation et les conditions d'utilisation, ainsi que les interactions entre ces différents critères [4].

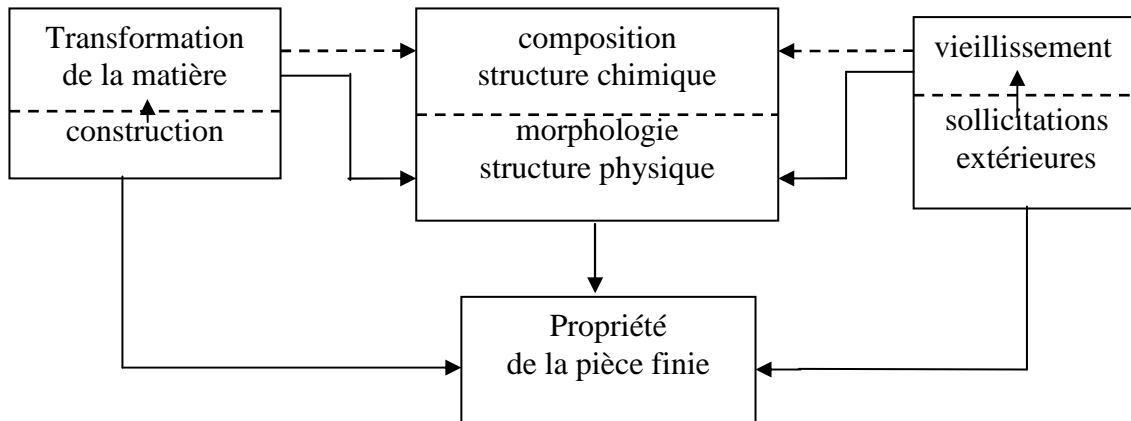


Figure 1.12 : Paramètres influant sur les propriétés des pièces finies en matière plastique

1.7.1. Paramètres structuraux

1.7.1.1. Influence de la nature des polymères

Les trois grandes familles de polymère (thermodurcissables, thermoplastiques et élastomères) se différencient par leur capacité plus ou moins grande à se déformer selon la configuration de leur arrangement macromoléculaire [16]. La résistance mécanique des polymères qui dépend surtout de l'intensité des liaisons secondaires intercaténares et de la rigidité des chaînes varie de manière considérable avec la température, et les températures de transition vitreuse (T_g) et de fusion (T_f) sont des paramètres importants qui conditionnent les possibilités d'emploi et de mise en forme des polymères [17].

1.7.1.2. Influence de la structure chimique du polymère

1.7.1.2.1. Taille des groupements chimiques

La taille des éléments ou groupements chimiques composant le polymère va avoir une influence sur la mobilité des chaînes macromoléculaires. Plus ces éléments ou groupements d'éléments sont petits, plus mobile est la structure du polymère. Ceci explique pourquoi le polyéthylène composé de liaisons C-H est très flexible, résistant au choc et possède une grande capacité à se déformer [16].

1.7.1.2.2. Masse moléculaire

Le comportement ductile d'un polymère est fortement dépendant de sa masse moléculaire. L'allongement avant rupture des matériaux ductiles apparaît d'autant plus important que la masse moléculaire est grande, avec un effet prépondérant vers les masses moyennes [18].

Lorsque la masse moléculaire en nombre M_n augmente, la longueur des chaînes moléculaires croît, ce qui génère une diminution de la mobilité moléculaire ; la formation des

crystallites devient plus difficile. Pour des valeurs croissantes de la masse moléculaire, la proportion des zones cristallines décroît donc en faveur des zones amorphes. La masse volumique diminue puisqu'un arrangement moléculaire cristallin représente l'état de densité la plus élevée. Les liaisons secondaires intermoléculaires agissent de façon optimale dans les structures cristallines. Une diminution de la cristallinité causée par l'augmentation de la masse moléculaire entraîne par conséquent une diminution du module élastique [18]. La figure 1.13 présente des résultats trouvés dans la littérature qui vérifient ces assertions pour du polyamide 6 massif.

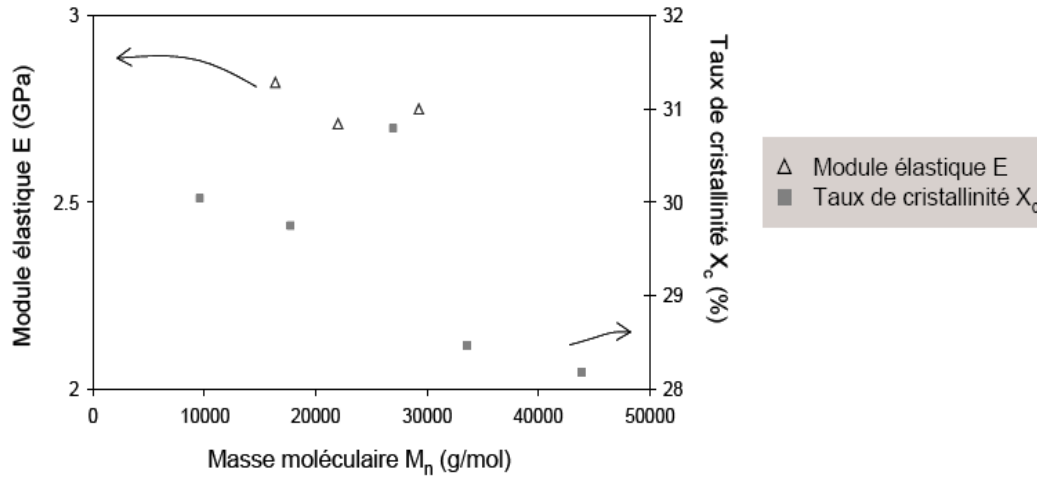


Figure 1.13 : influence de la masse moléculaire sur la cristallinité et le module élastique pour des échantillons de polyamide 6 massifs [18]

Généralement on peut dire que plus la masse moléculaire est faible, plus le comportement à rupture a tendance à être fragile [16].

1.7.2. Environnement

1.7.2.1. Influence de la température

Ce qui différencie fondamentalement les matériaux polymères des matériaux métalliques, au-delà des différences structurelles, est leur plus forte sensibilité aux facteurs temps et température. Ainsi une structure plastique bien dimensionnée peut se rompre (parfois rapidement) si les paramètres temps et/ou température est d'autant plus rapidement que la température est élevée [16]. La température d'utilisation maximale en service dépend des conditions environnantes [21; 26].

La température a une grande influence sur les propriétés mécaniques du polymère. La résistance mécanique d'un polymère linéaire diminue avec l'augmentation de la température. La température de décomposition se situe, à quelques exceptions près seulement (fibres d'aramide par exemple), au-delà de la température de fusion des cristallites [4].

$$\text{température de transition vitreuse} < \text{température de cristallisation} < \text{température de fusion} < \text{température de décomposition thermique}$$

Le tableau 1.3 illustre les valeurs de température de transition vitreuse et de température de fusion pour différents polymères

Tableau 1.3 : Valeurs de T_g et de T_f pour différents polymères [4]

Polymère	Humidité [%]	T_g [°C]	T_f [°C]
PE		-125	135
POM		-65	178
PET		80	255
PA6	sec 0.2	78	223
	std 3.0	28	223
	sat 8.0	-8	223
PA 46	sec 0.2	94	287
	std 3.5	31	287
	sat 9.7	-10	287
PA 66	sec 0.2	90	264
	std 2.7	39	264
	sat 8.5	-6	264
PA 66/6	sec 0.2	81	243
	std 2.7	29	243
	sat 7.4	-6	243

Sec : échantillon sec, en sortie de moulage: taux d'humidité $\leq 0,2\%$

Std : échantillon d'humidité standard (conditionné dans une atmosphère de référence, à 23 °C et 50% d'humidité relative, jusqu'à équilibre)

Sat : échantillon saturé (conditionné dans l'eau jusqu'à saturation)

Selon la température à laquelle il est soumis, un matériau polymère peut présenter des comportements mécaniques, c'est-à-dire des courbes contrainte-déformation, différentes.

La figure 1.14 illustre l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation de polymère semi-cristallin (PA66) à différentes températures [4].

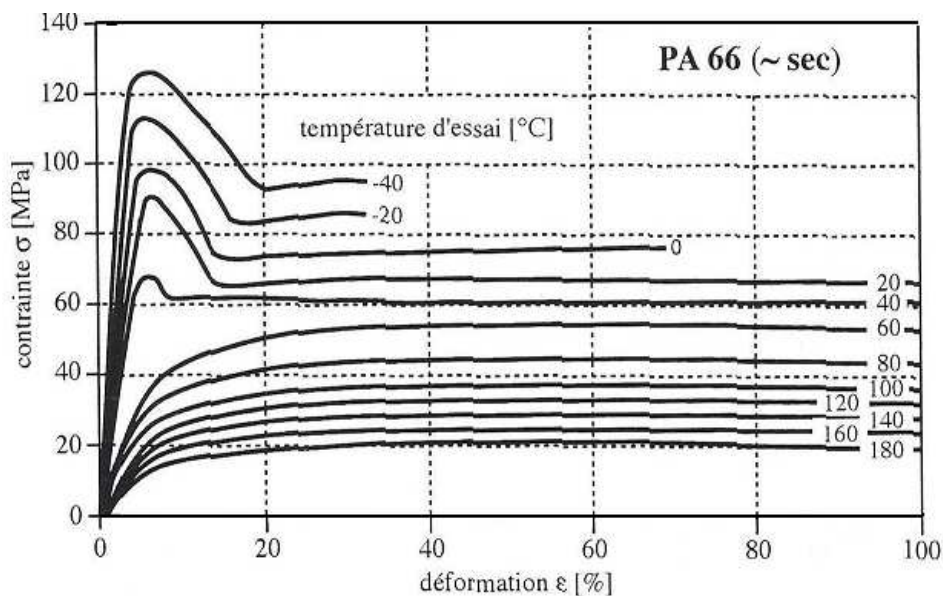


Figure 1.14: courbes contrainte-déformation, issues d'essais de traction réalisés à différentes températures, pour un thermoplastique semi-cristallin (PA66 sec). vitesse d'essais = 1mm/min

1.7.2.3. Influence de l'environnement chimique

Le comportement à la rupture des polymères thermoplastiques est fortement dépendant de l'environnement chimique. Le couplage (contraintes mécaniques-produits chimiques) peut favoriser le développement précoce de microcraquelures (fissuration sous contrainte en environnement chimique, appelée Environmental Stress Cracking ESC en anglais) qui vont conduire à une rupture rapide de type fragile [14,16].

a) Absorption d'eau

La présence d'eau dans un polyamide semi-cristallin, comme le nylon 66, peut affecter la morphologie du polyamide. Ce phénomène est connu sous le nom de cristallisation secondaire: un des effets de la plastification est de diminuer la température de transition vitreuse T_g , d'augmenter la mobilité moléculaire dans la phase amorphe et d'induire une réorientation des chaînes conduisant à la recristallisation. L'absorption d'eau se décompose en plusieurs étapes. L'eau diffuse dans les zones amorphes, agit comme plastifiant et diminue T_g . Ceci est dû à la rupture des liaisons hydrogène entre les chaînes polyamide au profit de liaisons hydrogène entre les groupements amides et les molécules d'eau augmentant la mobilité des macromolécules. La diffusion de l'eau au sein des régions amorphes intercrystallites provoque un gonflement de la matrice amorphe et une augmentation de la périodicité des cristallites. Quant à la diffusion à l'extérieur des piles de cristallites, elle provoque elle aussi une diminution de T_g , du module d'Young E et fait cristalliser le polymère (Fig. 1.15) [18].

Contrairement à la résistance et la rigidité, la ténacité augmente proportionnellement à la teneur en eau, du moins jusqu'à des taux voisins de l'humidité atmosphérique. Les propriétés des polyamides doivent donc toujours être données accompagnées du taux d'humidité de l'échantillon au moment de l'étude [4].

La figure 1.16 présente l'évolution du diagramme contrainte-allongement du polyamide 66 en fonction de l'humidité. Cette figure illustre l'influence de l'humidité sur les propriétés mécaniques du polyamide 66.

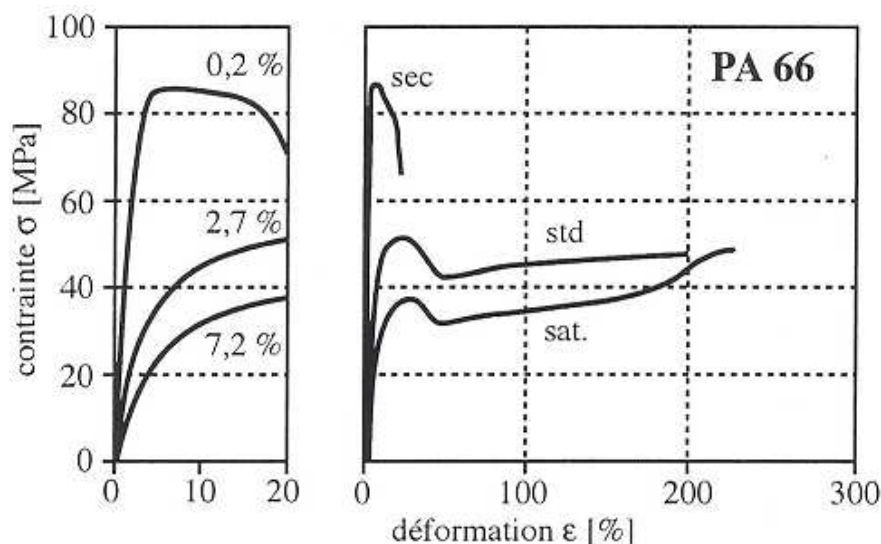


Figure 1.15 : courbes contrainte-déformation (essais de traction) en fonction des différents états d'humidité (sec, standard et saturé) du PA66 [4.18]

La polycondensation correspond à un équilibre réactionnel. Dans un sens, la réaction de polymérisation se produit, avec une libération de molécules d'eau. Dans le sens inverse, il y a hydrolyse des chaînes macromoléculaires par incorporation de molécules d'eau. Ceci détruit

partiellement la cohésion du matériau en augmentant la mobilité moléculaire, ce qui diminue fortement les propriétés mécaniques [20].

En effet, pour un polyamide, la quantité d'eau absorbée sera d'autant plus grande que la proportion de groupements amides sera élevée, c'est à dire. que le nombre d'atomes de carbone entre deux groupements amides sera faible.

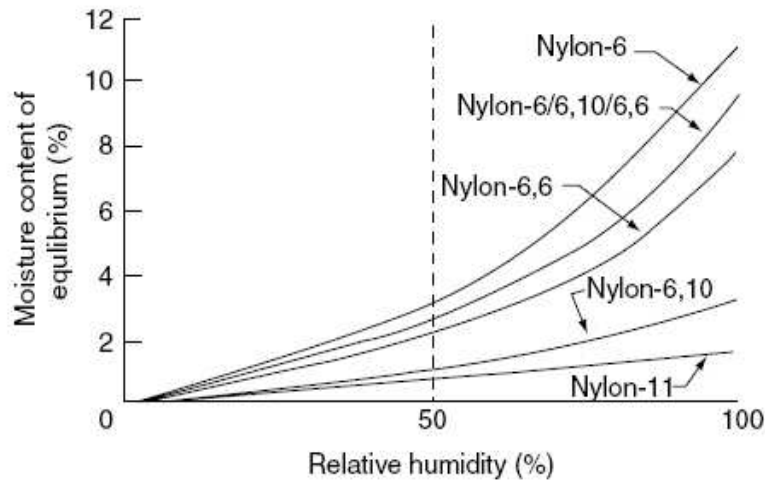


Figure 1.16 : Absorption d'humidité (% en masse) en fonction de l'humidité relative (%) de l'air ambiant pour plusieurs polyamides non chargés [20; 25]

Le polyamide est un polymère très hygroscopique et reprend jusqu'à 10 % d'humidité. L'eau diffuse principalement dans les phases amorphes. Les deux conséquences de cette diffusion sont : l'hydrolyse des segments de chaînes intercrystallites (ou molécules liens) et la plastification du polyamide [18].

b) Agents chimiques

Les polyamides présentent une bonne résistance à l'action d'un grand nombre de substances chimiques tels que les huiles, hydrocarbures, esters, éthers, cétones, ou aldéhydes ainsi qu'à l'eau salée. En général, les polyamides sont plus résistants aux bases qu'aux acides.

Deux paramètres principaux gouvernent la relation polyamide/solvant : la proportion de phase cristalline, puisque la pénétration du solvant sera facilitée dans les phases amorphes moins organisées, mais surtout la capacité qu'aura le solvant à détruire les liaisons hydrogène responsables de la cohésion des PA dans les parties cristallines comme amorphes [23].

Les solvants susceptibles de gonfler ou détruire les PA sont donc ceux contenant un ion H^+ capable de concurrencer l'hydrogène du groupe amide lié au groupe carboxyle. Ainsi, les polyamides seront plus sensibles aux alcools (phénol, crésol), hydrocarbures aromatiques ou halogénés, acides minéraux forts, eau, ou aux solutions concentrées de sels dont les cations peuvent former des complexes relativement stables avec les groupements amides (K, Li, $ZnCl_2$...). Le tableau 1.4 ci-dessous donne les valeurs d'absorption de différents solvants pour les PA6, PA6-6, PA6-10, PA11 en (%).

Tableau 1.4 : Comparaison de l'absorption de solvants par le PA 6, PA6-6, PA6-10, PA11

Nylon	PA 6	PA6-6	PA6-10	PA11
Eau	11	9	4	1.8
methyl alcool	19	14	16	9.5
Ethyl alcool	17	12	13	10.5
n-Propyl alcool	18	12	17	--
n-Butyl alcool	16	9	17	--
Benzyl alcool	55	38	40	--
Ethylene glycol	13	10	4	--
Glycerol	3	2	2	--
Chloroforme	34	27	40	33
Acétone	4	2	5	4.5
benzène	1	1	1	7.5
toluene	1	1	3	6.8
cyclohexane	1	1	1	1

Outre la température et la présence ou non de contraintes qui peuvent accélérer l'absorption d'un solvant donné, la nature elle-même du polyamide joue un rôle (fréquence des groupes amides).

1.7.3. Contraintes internes

Les contraintes internes sont définies comme des contraintes existées dans une pièce même sans que celle-ci soit soumise à l'action de force extérieure. La somme des forces et des moments qui caractérise les contraintes internes doit être nulle, c'est-à-dire que les contraintes internes se trouvent dans un état d'équilibre statique. Ces contraintes préexistantes dans le matériau, Grâce à la capacité de relaxation des matériaux polymère ils sont plus ou moins importants, en fonction du temps et de la température. Pour les matériaux sensible à l'absorption d'eau, qui peut diffuser et jouer le rôle de plastifiant, les contraintes internes dépendent en plus du taux d'humidité [4].

Les contraintes internes sont d'origine mécanique, thermique, ou métallurgique. On les retrouve à l'échelle macroscopique ou microscopique.

Les contraintes internes sont les plus fortes, juste après leur apparition et donc les plus dangereuses pour les pièces finies. Le fait que les contraintes internes conduisent ou non à des processus de rupture dépend de la résultante des sollicitations extérieures et des contraintes internes qui relaxent au cours du temps. Aucune rupture ne se produit si la somme des contraintes subies par la pièce durant toute sa durée de vie reste, à tout moment, inférieure à la résistance en fluage ou à la durabilité du matériau.

1.7.4. Influence de la géométrie des pièces

Si la géométrie est telle que des concentrations localisées de contraintes existent à la surface (angle vif, défauts superficiels, entaille...) ou dans la masse (présence de bulles, lignes de soudure...), la pièce peut se casser de manière fragile. L'amplification des contraintes est d'autant plus grande que le rayon en fond d'entaille est petit [16].

1.8. Matériau Polyamide PA66

1.8.1. Introduction

L'histoire de la recherche et du développement du nylon 66 est bien connue. Tout d'abord, grâce aux brochures et autres documents publiés par Du Pont [15].

En septembre 1931, le chimiste américain *Wallace Carothers* a fait part à la communauté scientifique de ses recherches dans les laboratoires de DuPont Compagnie sur les molécules "géantes" appelées polymères. Le Nylon ou la "fibre miracle", plus connu alors sous le nom de "66", un numéro dérivé de sa structure moléculaire, était né [8].

Entre l'invention de nylon et sa commercialisation, il s'écoulera une période de cinq ans pendant laquelle les chercheurs hésitent encore sur la formulation chimique : ils abandonnent le polyester au profit des polyamides, certainement à cause de leur bonne tenue en température. En 1935, via la polycondensation, le polyamide 66 (PA66) est mis au point.

En 1938 le Polyamide 6 est découvert en Allemagne et, un peu plus tard, le Polyamide 11 sera mis au point en France [15].

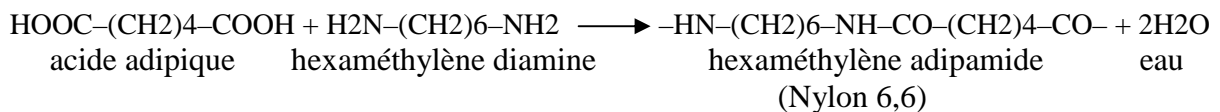
La nomenclature des polyamides aliphatiques linéaires est identifiée par des nombres indiquant le nombre respectif d'atomes de carbone présents dans leurs monomères. Deux nombres séparés par un tiret sont utilisés quand les polymères résultent de la condensation d'une diamine avec un diacide, le premier chiffre caractérisant le nombre d'atomes de carbone séparant les atomes d'azote de la diamine, le second correspondant au nombre total d'atomes de carbone présents dans le diacide [20].

Nous nous intéresserons plus particulièrement au polyamide 66, également appelé poly(hexaméthylène adipamide), en présentant successivement son mode de synthèse, sa structure moléculaire, ainsi que ses principales propriétés.

1.8.2. Synthèse du polymère et conditionnement

La synthèse du Polyamide 66 ou poly (hexaméthylène adipamide) est souvent décrite en deux étapes : tout d'abord la synthèse des intermédiaires, les monomères, et, ensuite, la phase de polymérisation en elle même.

En schématisant, le polyamide 66 est le résultat de la polycondensation d'une diamine et d'un diacide :



Les deux chiffres "6-6" correspondent au nombre d'atomes de carbone que comportent respectivement les constituants de base : la diamine et le diacide [15].

1.8.2.1. Synthèse des intermédiaires du Polyamide 66

Les voies de synthèse des intermédiaires, l'hexaméthylènediamine (HMD) et l'acide adipique, sont multiples. L'arborescence la plus couramment utilisée de la chimie du nylon 66 se construit à partir des produits d'origine pétrolière (butadiène, cyclohexane), de gaz naturel, d'ammoniac et d'acide nitrique (Fig. 1.17) [23].

L'acide adipique est synthétisé à partir d'un mélange de cyclohexanol/cyclohexanone obtenu par l'oxydation sous air du cyclohexane et l'HMD via hydrogénation d'un adiponitrile dérivé d'un acide adipique.

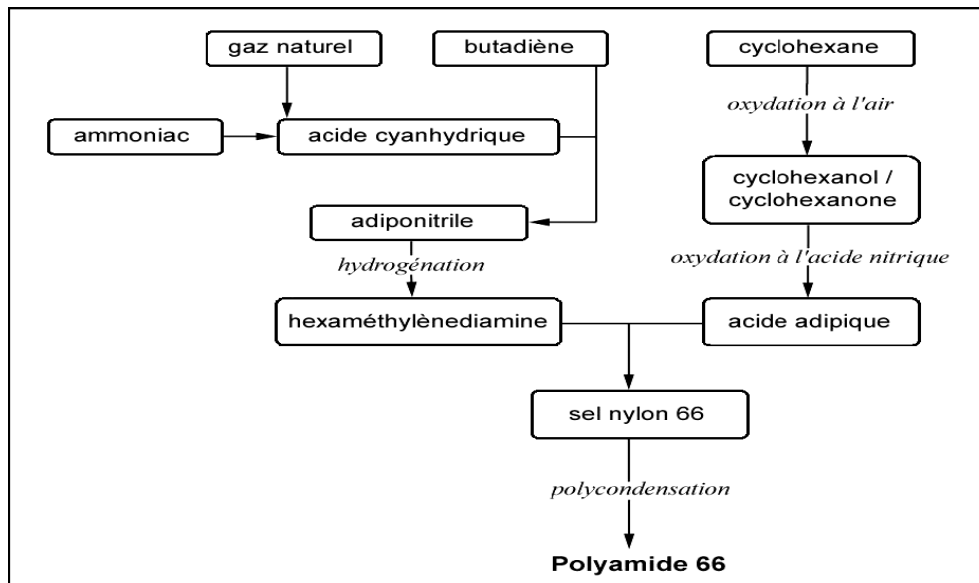


Figure 1.17 : Arbre de la chimie du sel nylon 66 [15,23]

1.8.2.2. La synthèse du Polyamide 66

Une fois les intermédiaires obtenus, ils sont transformés sous forme de sel nylon 66, l'adipate d'hexaméthylènediamine : ${}^+\text{H}_3\text{N}-(\text{CH}_2)_6-\text{NH}_3^+$, ${}^-\text{OOC}-(\text{CH}_2)_4-\text{COO}^-$. La stoechiométrie est alors contrôlée précisément à travers une mesure du pH. En outre, la diamine étant assez volatile, la valeur de pH de référence est stabilisée aux environs de 7,6.

Le sel est homogénéisé et dosé, en régulant pression et température, pour obtenir la concentration souhaitée. La solution est conditionnée à une température d'environ 210 °C sous une pression de 1,7 MPa, de sorte à faire désorber une importante quantité d'eau : c'est l'étape de prépolymérisation. Ensuite, la pression est abaissée à la pression atmosphérique et la température est portée à 265 °C (au-dessus de la température de fusion) ; là, une quantité supplémentaire d'eau va s'évaporer, permettant ainsi de passer de ce que l'on appelle le "prépolymère" au polymère proprement dit. L'ajout de matifiant, tel que le dioxyde de titane, est effectué à ce stade [15].

La polycondensation consiste à abaisser la teneur en eau ; le polymère évolue alors vers des viscosités croissantes. Le malaxage de la masse réactionnelle vient faciliter la séparation de la phase vapeur du polymère liquide. Les paramètres de contrôle du degré de polymérisation sont la température, la concentration d'eau dissoute et le temps de séjour.

Le polymère est ensuite entraîné, par surpression de gaz inerte, sous forme de ruban, hors de l'autoclave. Les rubans sont trempés (dans l'eau), coupés sous forme de granulés, séchés, et stockés à l'abri de l'humidité.

Aucun catalyseur n'est absolument nécessaire pour la polymérisation du nylon 66, mais, néanmoins, certains catalyseurs sont parfois utilisés tels que carbonates, oxydes, halogénures métalliques, acides forts et litharge (solution d'oxyde de plomb, soude caustique et soufre). D'autre part, la réaction amine/acide, pour se produire, nécessite une température élevée, mais peut se produire en phase solide, en dessous la température de fusion [15].

1.8.3. Structure

Les premières études sur la structure cristalline de PA66 commencent avec *Fuller, Baker et Paper*. Ils déterminent l'unité de répétition de l'axe de la chaîne macromoléculaire et montrent que les macromolécules adoptent une conformation en zigzag planaire [15].

Les liaisons hydrogène sont présentes dans la plupart des macromolécules d'origine biologique ; ainsi, la structure des polyamides présente des analogies avec celle de la soie. Dans le polyamide 66, les liaisons hydrogène s'établissent entre les atomes d'hydrogène et d'oxygène de deux chaînes adjacentes (Fig. 1.18).

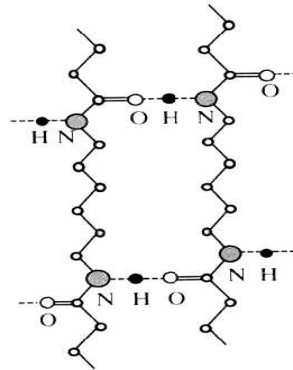


Figure 1.18 : Représentation schématique des liaisons hydrogène (en pointillé) entre les chaînes de PA66 [7]

La liaison Hydrogène et sensibilité à l'eau

La molécule de poly(hexaméthylène adipamide) est une molécule linéaire, sans encombrement stérique particulier, ce qui lui confère une bonne flexibilité. Les polyamides possèdent la particularité de créer un sous-réseau d'interactions inter-chaînes relativement fortes : entre les groupements carbonyle et NH s'établissent des ponts hydrogène. La présence de ces groupements, fortement polaires, est par ailleurs responsable de la forte sensibilité des polyamides à l'humidité : la molécule d'eau ayant tendance à diffuser dans la phase amorphe et à y créer des interactions hydrogène. *Puffr et Sebenda* donnent une représentation générale de la configuration spatiale de l'eau dans les polyamides. D'un point de vue morphologique, l'eau absorbée se différencie suivant la nature de la liaison qu'elle forme avec les groupements amides accessibles [15].

La structure cristalline du PA66, initialement identifiée par *Bunn et Garner*, consiste en une structure sous forme de feuillets. Les différences dans les nombres d'unités éthyliques influencent les propriétés des différents polyamides.

Différentes études ont permis d'identifier les trois principaux polymorphismes du PA66 : α , β et γ , qui coexistent dans divers quantités, selon les conditions de fabrication. La structure la plus stable est la phase α , qui se compose des feuillets planaires de molécules empilées les unes sur les autres et reliées par des liaisons hydrogène. Les molécules sont arrangées dans une conformation en zigzag complètement étendue, selon une maille cristallographique triclinique, dont l'axe cristallographique c coïncide avec l'axe de la chaîne carbonée (Fig. 1.19) [7].

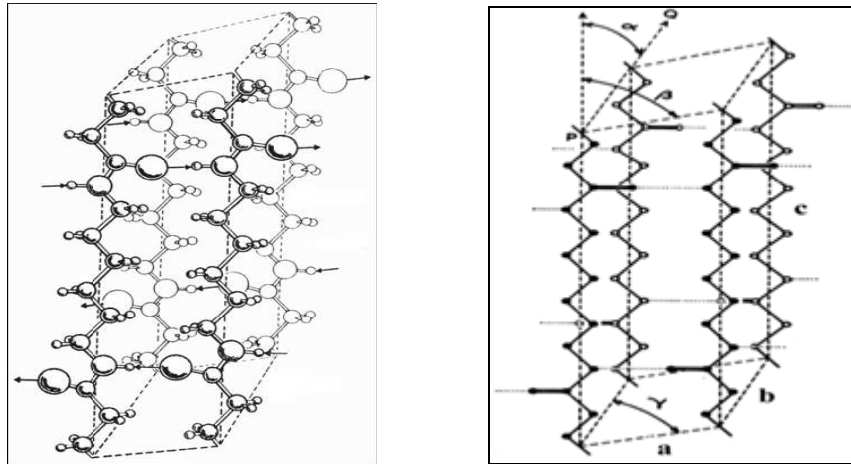


Figure 1.9 : Schémas de la maille unitaire du PA66. (a) Les liaisons hydrogène sont matérialisées par des flèches. (b) $a = 4.9\text{Å}$, $b = 5.4\text{Å}$, $c = 17.2\text{Å}$, $\alpha = 48.5^\circ$, $\beta = 77.0^\circ$ et $\gamma = 63.5^\circ$ [7,9]

Du repliement des chaînes à la cristallisation.

La macromolécule de poly(hexaméthylène adipamide), en dépit de sa longueur et de la relative complexité de son architecture, peut, sous un certain nombre de conditions thermodynamiquement favorables, former des arrangements tridimensionnels réguliers que l'on qualifie de domaines cristallins ou cristallites.

Il y a cristallisation partielle du polymère : localement les chaînes se replient et s'orientent parallèlement les unes aux autres, liées par des forces intermoléculaires de Van der Waals ou des ponts hydrogène. La distribution dans l'espace des groupements amine et carbonyle de la macromolécule va influencer la structure et la stabilité des phases cristallines du polymère.

Une particularité des polymères semi-cristallins est leur aptitude à initier une cristallisation à haute température. En fournissant l'énergie calorifique nécessaire à la mobilité des macromolécules, on favorise le repliement de chaînes, d'où la cristallisation. Ce phénomène est évalué en mesurant le retrait du matériau sous air chaud.

Les zones ordonnées ou cristallines représentent entre 20 et 50 % du matériau. La phase amorphe constituée de portions de chaînes désordonnées gouverne certaines propriétés mécaniques des polymères, comme la contrainte à la rupture par exemple [15].

1.9. Propriétés

1.9.1. Propriétés physiques

Les nylons sont des matériaux solides, possédant une grande résistance à la traction et une bonne résistance à l'abrasion. Grâce à leur grande cristallinité, ils possèdent des points de fusion qui sont considérablement plus élevés que ceux de la plupart des autres matières thermoplastiques. Cependant la destruction de la cristallinité par le remplacement du groupement $-\text{NH}$ modifie tout à fait le comportement du polymère. Contrairement à la majorité des matières thermoplastiques, les nylons présentent très peu de fluage [24].

1.9.2. Propriétés mécaniques

La structure semi cristalline de la plupart des nylons commerciaux donne une de haute résistance (de traction, flexion, compression, et cisaillement) en raison de la cristallinité et du bonne dureté (résistance aux chocs) dues principalement à leurs structures amorphes. Les propriétés du nylon sont affectées par le type du nylon, du poids moléculaire, de la teneur en humidité, de la température, et de la présence des additifs. La force (Strength) et le module (rigidité) sont accrus en augmentant la densité des groupes amide et de la cristallinité dans les nylons aliphatiques ; la résistance aux chocs et l'allongement, cependant, sont diminuées. Nylon-6 ayant une cristallinité inférieure que nylon-6,6 a une résistance aux chocs plus élevée et une résistance à la traction légèrement réduite. Le poids moléculaire croissant donne la résistance aux chocs accrus sans avoir un effet significatif sur la résistance à la traction. L'humidité croissante pour nylon-6 et nylon-6,6 donne également une augmentation régulière de résistance aux chocs en raison de la plastification croissante, bien qu'aux températures très basses l'humidité puisse fragiliser le nylon. Pour les nylons qui absorbent des quantités inférieures de l'eau, les effets sur des propriétés sont moins [25].

1.9.3. Caractéristiques électriques

On utilise très largement les résines polyamide pour la fabrication de pièces électromécaniques à cause de leurs bonnes caractéristiques mécaniques, de leur résistance chimique, de leur tenue à la chaleur, et de leur résistance au feu. Cette combinaison de caractéristiques fait que le polyamide est transformé en bobines, connecteurs, blocs terminaux et isolation secondaire très résistante pour fils et câbles. Les pièces en résines polyamide sont en général utilisées sous des voltages et des fréquences respectivement inférieurs à 600 volts et 400 Hertz. Les pertes de puissance s'accroissent avec les augmentations de température, de fréquence et d'humidité ambiante.

D'importantes pertes de puissance se produisent quelquefois dans des applications électroniques comme les puissants émetteurs de micro-ondes, lorsque les fréquences sont très élevées et la température assez haute [21].

1.9.4. Propriétés chimiques

1.9.4.1. Résistance aux produits chimiques

Les PA ont une bonne résistance au contact d'un grand nombre de produits chimiques courants. La résistance chimique des résines polyamides, aussi bien envers les produits minéraux qu'envers les produits organiques, est exceptionnelle. Elles ne sont pas attaquées ni par les lubrifiants, ni par les huiles ou graisses, ni par les hydrocarbures aliphatiques ou aromatiques (y compris les carburants usuels) et n'ont aucun effet sur ces produits. C'est d'ailleurs pour cette raison que leurs applications dans les industries automobiles et aéronautiques sont innombrables. Dans bien des cas la combinaison résistance aux huiles et tenue à la chaleur a permis d'utiliser le polyamide, à des températures élevées dans des conditions réelles de service. Il est toujours essentiel, malgré tout, de procéder à des essais de résistance chimique individuelle avec les huiles ou graisses que l'on prévoit d'utiliser.

Les polyamides sont aussi résistants à une variété de produits comme laques et peinture, cosmétiques, détergents, aérosols et produits alimentaires y compris les graisses animales et végétales. Elles sont évidemment très utilisées pour l'emballage de ces produits.

Les résines polyamide résistent à toute une variété de produits chimiques organiques comme les aldéhydes, les cétones, les alcools monohydroxyles, la plupart des esters et de nombreux composés chlorés aliphatiques et aromatiques. Certains de ces produits seront absorbés par le polyamide en quantité limitée avec variation dimensionnelle correspondante.

Les propriétés physiques n'en sont généralement pas affectées bien que quelques matières comme les alcools puissent dans une certaine mesure plastifier le polyamide, avec perte de résistance au seuil et à la traction ainsi que de rigidité et accroissement de l'allongement et de la tenue au choc. Les membres d'une même famille organique sont d'autant moins absorbés que le nombre d'atomes de carbone est plus élevé [21].

Les hydrocarbures partiellement halogénés comme le chlorure de méthyle, et le chlorure d'éthylène sont absorbés en quantité limitée se traduisant par un effet de plastification du polyamide semblable à celui provoqué par l'absorption d'eau.

Les produits chimiques organiques qui affectent les polyamides le font en général par solubilisation partielle. L'acide formique et les phénols sont de puissants solvants et on les utilise pour cette raison dans certains procédés de collage. L'acide trichloracétique et quelques alcools fluorés ont une action similaire. Il ne faut utiliser les polyamides au contact des acides organiques qu'avec précaution. L'acide acétique attaque lentement le polyamide et les acides plus forts ont un effet plus rapide. Les acides gras supérieurs, comme l'acide stéarique, ne posent pas de problèmes.

Le polyamide résiste à de nombreux composés minéraux. A l'encontre de la plupart des métaux, il n'est pas affecté par la corrosion électrolytique au voisinage de l'eau salée ou de certaines atmosphères industrielles. Les résines polyamides résistent à des concentrations basiques élevées et sont même utilisées dans les batteries alcalines.

Certains sels attaquent le polyamide, soit par réaction acide soit par effet de solubilisation. On sait que les sels tels que: le thiocyanate de calcium, le chlorure de calcium, le thiocyanate de potassium et le chlorure de zinc, sont connus pour avoir une action dissolvante particulièrement à des concentrations fortes (50 à 80%) et à des températures élevées.

Les résines polyamide résistent à l'eau chaude et à la vapeur. C'est pour cette raison que le polyamide est très utilisé dans des applications telles que: mélangeurs d'eau chaude, engrenages et paniers de transport, équipements pour le transport d'eau chaude, et pièces exposées à la vapeur, comme lors d'un cycle de stérilisation [21].

1.10. Procédé de fabrication des pièces plastiques

1.10.1. Moulage par injection

La transformation des polyamides en «pièces» se fait via un certain nombre de procédés de mise en œuvre, le moulage par injection étant le plus utilisé. Les autres techniques comprennent: l'extrusion, l'usinage et le soufflage [21].

La plupart des pièces en thermoplastique technique sont fabriquées selon le procédé de moulage par injection. Le procédé est très simple dans son principe. Les résines thermoplastiques telles que les acétals, les polyesters thermoplastiques, les polyamides, livrées sous forme de granulés, sont séchés lorsque c'est nécessaire, fondues, injectées sous pression dans un moule puis refroidies. Le moule est ensuite ouvert, les pièces enlevées, le moule refermé et le cycle est repris [27].

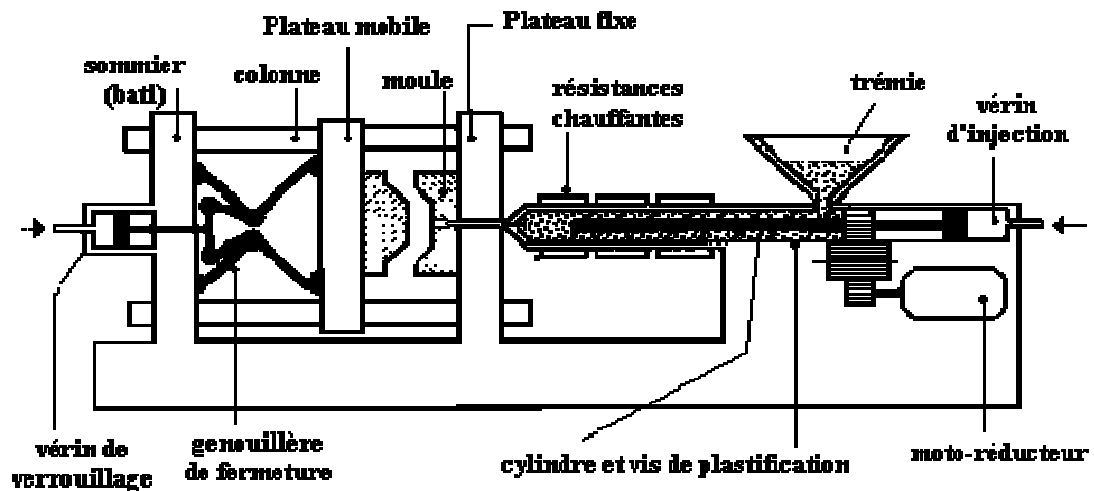


Figure 1.20 : représente le schéma d'une presse à injection

1.10.1.1. La presse à injection

Les fonctions du système de plastification et d'injection consistent à fondre la matière plastique et à l'injecter dans le moule. La vitesse d'injection et la pression atteinte dans le moule sont contrôlées par le système hydraulique de la presse. Les pressions d'injection varient de 35 à 140 MPa. Les températures de la matière s'échelonnent depuis approximativement 215°C pour le DELRIN jusqu'à environ 300°C pour certains polyamides ZYTEL et polyesters RYNITE renforcés de fibre de verre [26].

1.10.1.2. Le moule

La conception du moule influence de manière décisive la qualité et l'économie de la pièce injectée. L'aspect de la pièce sa résistance mécanique, sa ténacité, ses cotes, sa forme et son coût dépendent de la qualité du moule.

La durée totale du cycle de moulage peut varier de deux secondes à plusieurs minutes, et concerner un nombre de pièces allant de l'unité à plusieurs dizaines, éjectées à chaque ouverture du moule. La rapidité du cycle de moulage peut se trouver restreinte par la capacité de transfert thermique du moule, sauf lorsque le temps d'ouverture – fermeture – éjection ou la capacité de plastification de la machine sont limités [26].

2.1. Etude théorique

2.1.1. Introduction

Les engrenages ont pour fonction de transmettre une puissance d'un arbre en rotation à un autre arbre tournant à une vitesse généralement différente, les deux vitesses restant dans un rapport constant.

Les solutions concurrentes sont :

Transmission par accouplement, les arbres devant être dans le prolongement l'un de l'autre,
Transmission par friction : roues de friction, courroies plates ou courroies trapézoïdales sur poulies,

Transmission par courroie crantée sur poulies ou par chaîne sur roues.

Pour un prix de revient modéré, les engrenages ont pour avantages un excellent rendement et un encombrement plutôt faible.

L'engrènement est un phénomène connu depuis plusieurs siècles, les moulins à vent utilisaient des engrenages en bois assez perfectionnés, et les mécanismes d'horlogerie ont utilisé très tôt les roues dentées. Le développement des moteurs thermiques et électriques a provoqué un fort développement de ce type de transmission.

Un *engrenage* est un ensemble de deux roues dentées complémentaires, chacune en liaison (pivot ou glissière) par rapport à un support (souvent le bâti). La petite roue se nomme le *pignon*, la grande roue extérieure s'appelle la *roue*, la grande roue intérieure s'appelle la *couronne*. L'une des roues peut avoir un rayon infini, elle s'appelle alors une *crémaillère* [28].

2.1.2. Profil de la denture

Le profil des dents est dans presque tous les cas une courbe dite en développante de cercle. C'est le profil le plus utilisé. Cette courbe est obtenue comme dans la figure 2.1, en développant un cercle appelé cercle de base [29].

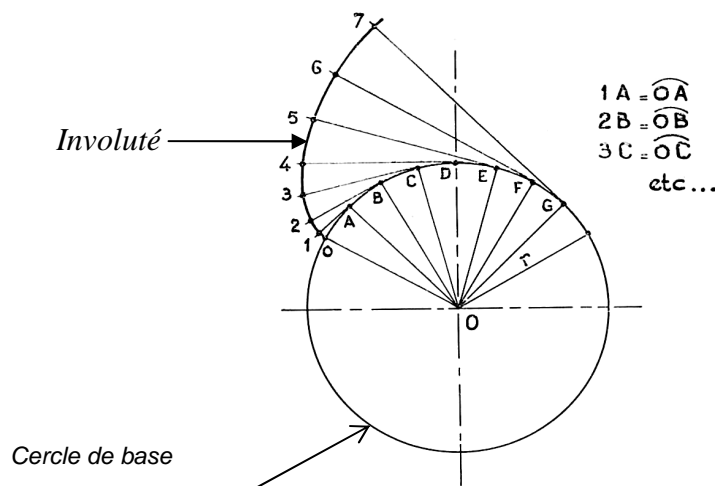


Figure 2.1 : développante de cercle

2.1.3. Principe de l'engrènement

Si deux cercles de base munis de courbes en développante de cercle sont espacés d'un entraxe Δ , on constate que pendant l'engrènement, les deux développantes restent en contact

suivant une droite appelée ligne d'action inclinée d'un angle α par rapport à la tangente commune à deux cercles appelés cercles primitifs (Fig. 2.2).

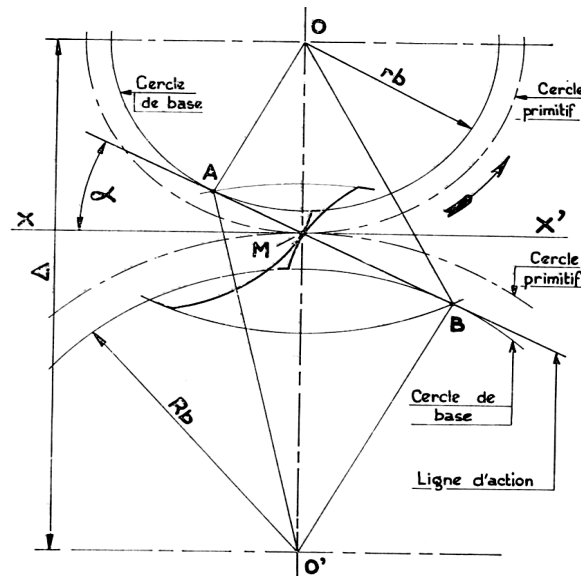


Figure 2.2 : Paramètres d'engrènement

L'engrènement est équivalent à un entraînement entre deux roues de friction de diamètres respectifs les diamètres des cercles primitifs.

On peut montrer que si r est le rayon primitif, on a la relation :

$$r_b = r \cdot \cos \alpha \quad (2.1)$$

Cet angle α est appelé angle de pression et vaut dans le cas général 20° . Il peut cependant varier (15° à 30°), ce qui permet de définir des dentures spécifiques pour certaines applications [29].

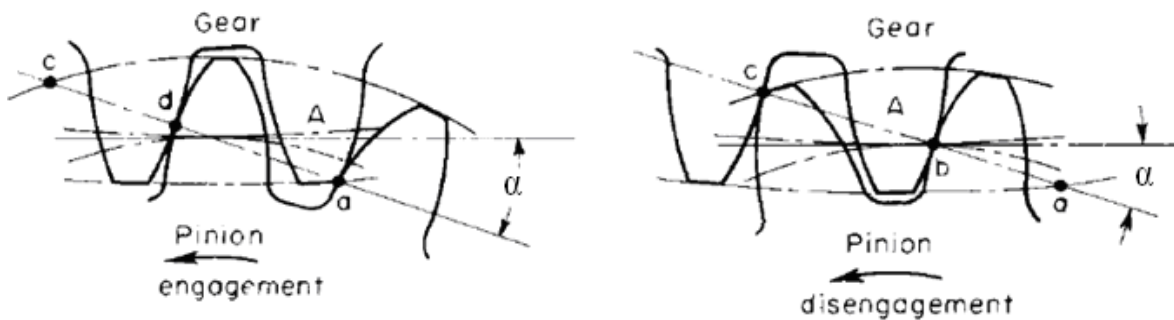


Figure 2.3 : Conditions de contact à l'engagement et au déengagement [30]

2.1.4. Classement des engrenages

Le rôle principal des engrenages est d'assurer la transmission de puissance avec un mouvement de rotation d'un arbre à un autre, avec un rapport moyen de vitesses angulaires constant. Selon les positionnements relatifs des arbres trois classes majeures d'engrenages peuvent être distinguées.

- les engrenages à axes parallèles. Ce type est nommé aussi cylindrique. Les deux arbres sont parallèles. Diverses catégories sont distinguées selon la géométrie des dents suivant la génératrice. On trouve les dentures droites, les dentures hélicoïdales, etc....

- les engrenages à axes concourants. Ce type est nommé aussi conique. Les deux arbres sont tels que leurs axes de rotation se coupent. Selon la géométrie des dents, on distingue les sous-catégories des:

- dents droites, les génératrices passent par le point de concours des axes de rotation,
- dents hélicoïdales,
- dents spirales, engendrées par des segments rectilignes s'appuyant sur une courbe directrice.

- les engrenages à axes quelconque. Ces engrenages sont nommés gauches. Les axes des arbres n'ont pas de point commun et occupent une position relative quelconque. Dans cette catégorie se retrouvent par exemple les dents hypoïdes [31].

2.2. Etude des engrenages parallèles à dents droites

On appelle denture droite une denture dont les dents sont parallèles à l'axe de rotation de l'engrenage. C'est la denture la plus économique et la plus facile à réaliser.

2.2.1. Caractérisation des engrenages cylindriques à denture droite

Sur la (Fig. 2.4) sont représentées pour des roues cylindriques à denture droite les grandeurs suivantes :

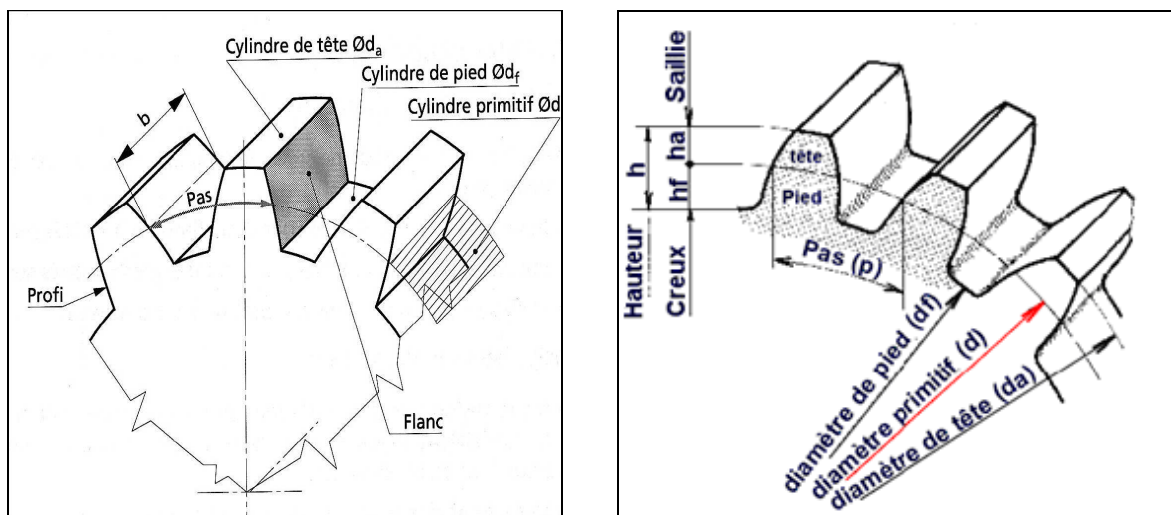


Figure 2.4 : Caractérisation géométrique des engrenages cylindriques à denture droite [28]

Cylindre primitif de fonctionnement ; diamètre primitif d : cylindre décrit par l'axe instantané de rotation du mouvement relatif de la roue conjuguée par rapport à la roue considérée. La section droite du cylindre primitif donne le cercle primitif de diamètre d .

Cylindre de tête ; diamètre de tête d_a : cylindre enveloppe du sommet des dents. La section droite du cylindre de tête donne le cercle de tête de diamètre d_a .

Cylindre de pied ; diamètre de pied d_f : cylindre enveloppe du fond des dents. La section droite du cylindre de pied donne le cercle de pied de diamètre d_f .

Saillie h_a : distance radiale entre le cylindre de tête et le cylindre primitif.

Creux h_f : distance radiale entre le cylindre de pied et le cylindre primitif.

Hauteur de dent h : distance radiale entre le cylindre de tête et le cylindre de pied.

Flanc : portion de surface d'une dent comprise entre le cylindre de tête et le cylindre de pied.

Profil : section d'un flanc par un plan normal à l'axe.

Pas : longueur d'un arc de cercle primitif compris entre deux profils consécutifs.

Largeur de denture b : largeur de la partie dentée d'une roue mesurée suivant une génératrice du cylindre primitif.

Entraxe entre deux roues a : plus courte distance entre les axes des deux roues.

Cercle de base : cercle permettant d'obtenir le profil en développante de cercle des dents.

Ligne d'action : normale commune à deux profils de dents conjuguées, en leur point de contact. Cette ligne est fixe pour les engrenages à développante de cercle.

Angle de pression α : angle de la ligne d'action avec la tangente aux cercles primitifs ($\alpha = 20^\circ$ pour une denture normalisée).

Module m : valeur permettant de définir les caractéristiques dimensionnelles de la roue dentée. C'est le rapport entre le diamètre primitif et le nombre de dents.

On définit une roue cylindrique à denture droite à l'aide du nombre de dents Z et du module m [28]. Les autres dimensions sont liées par les relations ci-dessous :

Tableau 2.1 : Caractéristiques dimensionnelles des engrenages cylindriques à denture droite

Désignation	Symbole	Formule
Diamètre primitif	d	$d = m.z$
Diamètre de tête	d_a	$d_a = d + 2m$
Diamètre de pied	d_f	$d_f = d - 2,5m$
Saillie	h_a	$h_a = m$
Creux	h_f	$h_f = 1,25 m$
Hauteur de dent	h	$h = 2,25 m$
Pas	p	$p = \pi m$
Largeur de denture	b	$b = km \ (5 \leq k \leq 16)$
Entraxe	a	$a = (d_1 + d_2)/2$

2.3. Résistance à la rupture

2.3.1 Calcul à la flexion

Il existe plusieurs modèles de calcul de denture à la flexion, qui diffèrent par point d'application de l'effort entre les dents, ainsi que par les simplifications admises [31].

C'est Lewis, en 1893, qui a analysé les dentures droites symétriques par la théorie des poutres, en inscrivant dans celles-ci une parabole d'isocontraintes représentant une poutre d'égale résistance. L'extrémité de celle-ci se trouve à l'intersection de la ligne d'action avec l'axe de symétrie de la dent. Lewis propose que la section de contrainte superficielle maximale, ou la section critique, se situe au point de tangence de la parabole avec le profil de la dent. Suite à cette hypothèse, la contrainte en tension se calcule comme pour une poutre en flexion, avec un encastrement à la section critique, sollicitée par la composante dans la direction normale à la ligne de symétrie de la dent de la force appliquée sur la dent [32].

2.3.2. Méthode de Lewis

On utilise la méthode simplifiée de Lewis qui a comme hypothèse de base :

- Charge normale $W (F_n)$ est appliquée au sommet de la dent (Fig. 2.5).
- Il n'y a qu'un seul couple de dent au sommet.
- La composante radiale est négligée
- La charge est uniformément distribuée sur la largeur de contact

- Les forces de friction sont négligées.
- La concentration des contraintes est négligée.
- La composante de flexion W est seule considérée et prise égale, pour simplification, à l'effort tangentiel W_t [31; 33].

En réalité

$$W = F_t \cos \alpha_a \quad (2.2)$$

α_a étant l'angle d'incidence de la développante au sommet, ce que donne :

$$W = F_t \cos \alpha_a / \cos \alpha \quad (2.3)$$

α étant l'angle d'incidence ou de pression

Donc

$$W \cong F_t \quad (2.4)$$

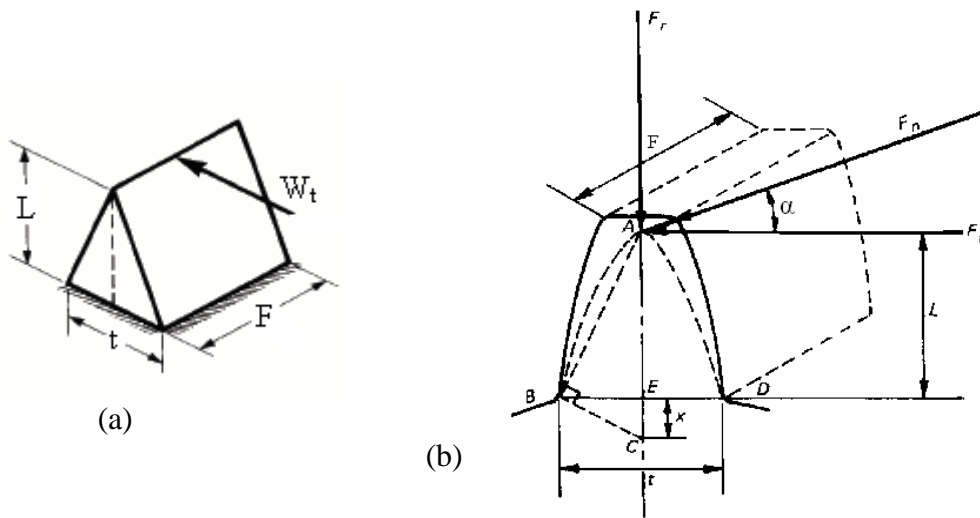


Figure 2.5 : Modèle de Lewis [30; 31]

$W (F_n)$: Force normale au profil de la dent

$$W = \sqrt{(W_t)^2 + (W_r)^2} \quad (2.5)$$

$$W_r = W_t \tan \alpha \quad (2.6)$$

$$W_t = \frac{2.T}{D_p} \quad (2.7)$$

$$T = 9550 \cdot \frac{P}{n} \quad (2.8)$$

2.3.3. Contrainte maximale de la flexion (approche recommandée par AGMA)

La Contrainte de flexion atteint son maximum au pied de la dent, elle a comme valeur :

$$\sigma = \frac{W_t \cdot P_d}{F \cdot J} K_S \cdot K_0 \cdot K_m \cdot K_v \quad (2.9)$$

Avec :

T : couple (N.m)

n : vitesse de rotation (tr/min)

P : puissance (KW)

$W_t (F_t)$: force tangentielle

$K_s (C_s)$: facteur de dimension

$K_0 (C_0)$: facteur de surcharge

$K_m (C_m)$: facteur de distribution de la charge

$K_v (C_v)$: facteur dynamique

P_d : pas diamétral = Z_2/D_p

D_p : diamètre primitif = $m.Z_2$

Z_2 : nombre de dents

$F (b)$: largeur de denture (mm)

$J (I)$: facteur géométrique [30; 31 ; 34].

2.3.4. Pression superficielle

La valeur de la pression de contact sur les flancs des dents a une grande signification pour la durée de vie [32]. Le temps allant du début de la mise en service jusqu'à l'apparition de piqûre est une mesure de durée de vie.

La figure 2.6b, présentes deux dents en contact et qui peuvent être assimilées en première approximation à deux cylindres d'une largeur F et de diamètre d_1 et d_2 .

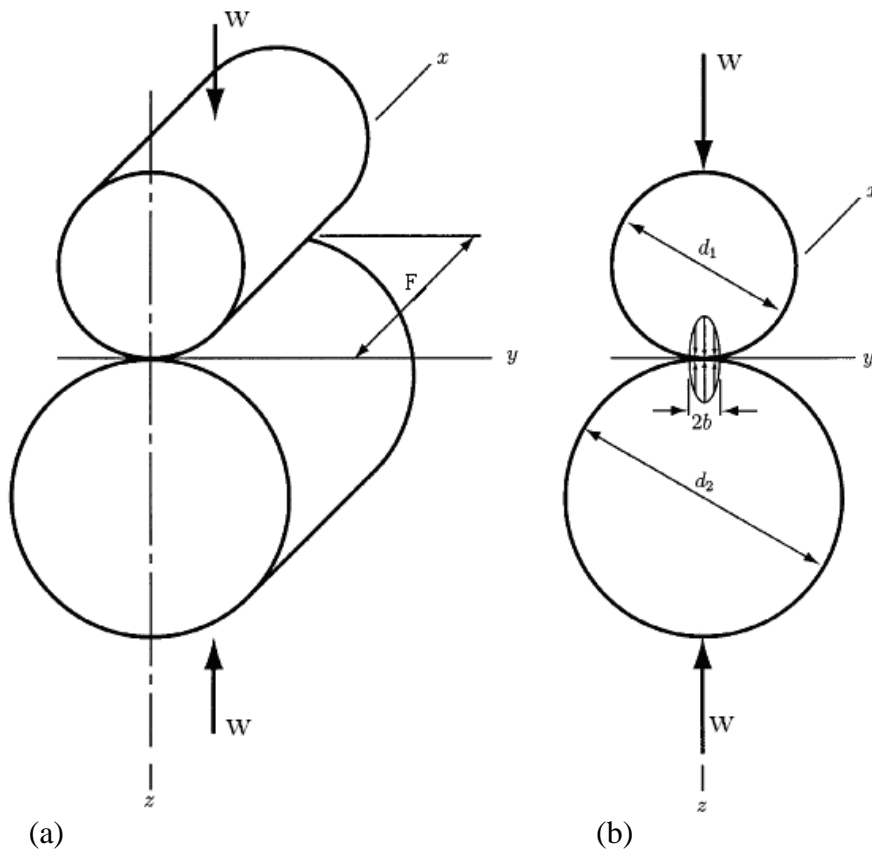


Figure 2.6 : Effort de contact de deux cylindres. (a) Cylindres en contact; (b) distribution de pression de contact [34]

La force W provoque entre les galets une surface d'écrasement ainsi qu'une pression superficielle de contact σ_H , la surface d'écrasement est un rectangle d'une surface ($F.2b$) (Fig. 1.7) ou le maximum de la pression superficielle est au milieu.

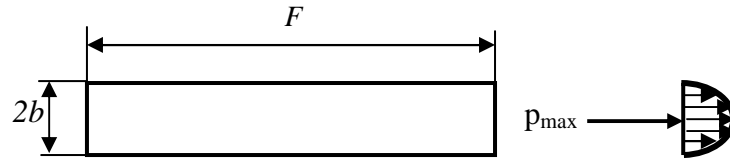


Figure 2.7 : Surface de contact et distribution de pression elliptique [32]

On peut observer un phénomène similaire entre les dents d'un engrenage (Fig. 2.8). Pour éviter l'usure prématurée des dents, il est nécessaire que la pression superficielle de contact ne dépasse pas les limites admissibles [31].

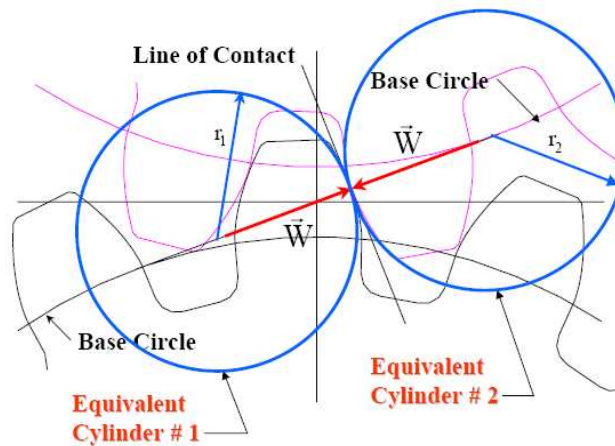
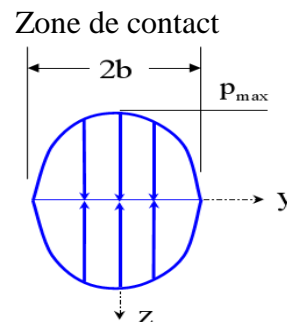


Figure 2.8 : pression superficielle de contact [8]

La pression superficielle est maximale au milieu ; figure 2.6 b, c'est-à-dire au point de contact géométrique [36]. Ce maximum que nous appellerons la pression d'Hertz σ_H .

$$b = \left[\frac{2W_t}{\pi F \cos \alpha} \frac{\frac{1-\mu_g^2}{E_g} + \frac{1-\mu_p^2}{E_p}}{\frac{R_v+1}{R_v} \frac{1}{\sin \alpha} \left(\frac{1}{D_p} \right)} \right]^{1/2}$$



b : demi-longueur de contact

la pression maximale sur les dents est :

$$p_{\max} = \frac{-2.W}{\pi.F.b} \tag{2.10}$$

Dans le cas de fonctionnement à sec en utilise les contraintes de surface pour le contact dent avec dent [30; 31 ; 34].

2.3.5. Contrainte de surface

$$\sigma_H = |p_{\max}| = C_p \sqrt{\frac{W_t \cdot C_o \cdot C_m \cdot C_s \cdot C_f}{C_v \cdot F \cdot D_p \cdot I}} \quad (2.11)$$

C_p : coefficient élastique

C_f : facteur d'état de la surface

$$C_p = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{1-\mu_p^2}{E_p} + \frac{1-\mu_g^2}{E_g} \right) \pi}} \quad (2.12)$$

μ_p et μ_g : Coefficient de Poisson des engrenages

E_p et E_g : module d'élasticité des engrenages

$$I = \frac{\cos \alpha \sin \alpha}{2} \frac{R_v}{R_v + 1} \quad (2.13)$$

R_v : le rapport de transmission entre les deux engrenages [35; 36].

$$R_v = \frac{Z_g}{Z_p} = \frac{D_g}{D_p} \quad (2.14)$$

2.4. Conception des engrenages

Pour utiliser avec succès l'application du POM et du PA dans les engrenages, il est important de connaître les caractéristiques de performance de ces résines et de mettre en oeuvre les informations qui vont suivre sur la conception des engrenages [26].

La démarche essentielle dans la conception des engrenages est la détermination de la contrainte admissible sur les dents. La réalisation d'engrenage prototypes est onéreuse et longue, aussi une erreur dans le choix initial de la contrainte de flexion des dents peut-elle se révéler coûteuse. Pour un matériau donné, la contrainte admissible dépend d'un certain nombre de facteurs, dont notamment les suivants:

- Durée totale de service.
- Fonctionnement intermittent ou continu.
- Environnement: température, humidité, solvants, produits chimiques, etc.
- Modification du diamètre et de la distance entre centres avec la température et l'humidité.
- Vitesse de la ligne d'angle.
- Pas diamétral (dimension de la denture) et forme des dents.

- Précision du profil des dents, angle d'hélice, diamètre primitif, etc.
- Matériaux au contact, y compris le poli de surface et la dureté.
- Nature de la lubrification.

Le choix de la valeur correcte de la contrainte se fera au mieux sur la base d'applications antérieures satisfaisantes et de nature analogue. La figure 2.9 représente graphiquement un certain nombre d'applications réussies en POM et en PA, en termes de vitesse périphérique et de contrainte de flexion sur les dents. Notons que toutes ces applications correspondent à des environnements intérieurs et à la température ambiante. Pour des fonctionnements aux températures élevées, la contrainte admissible doit être rectifiée. L'endurance à la fatigue se trouve réduite au fur et à mesure que s'élève la température, il faut par conséquent tenir compte de cette influence. Le vieillissement thermique doit être pris en considération dans tous les cas où l'on rencontre des températures très élevées [26].

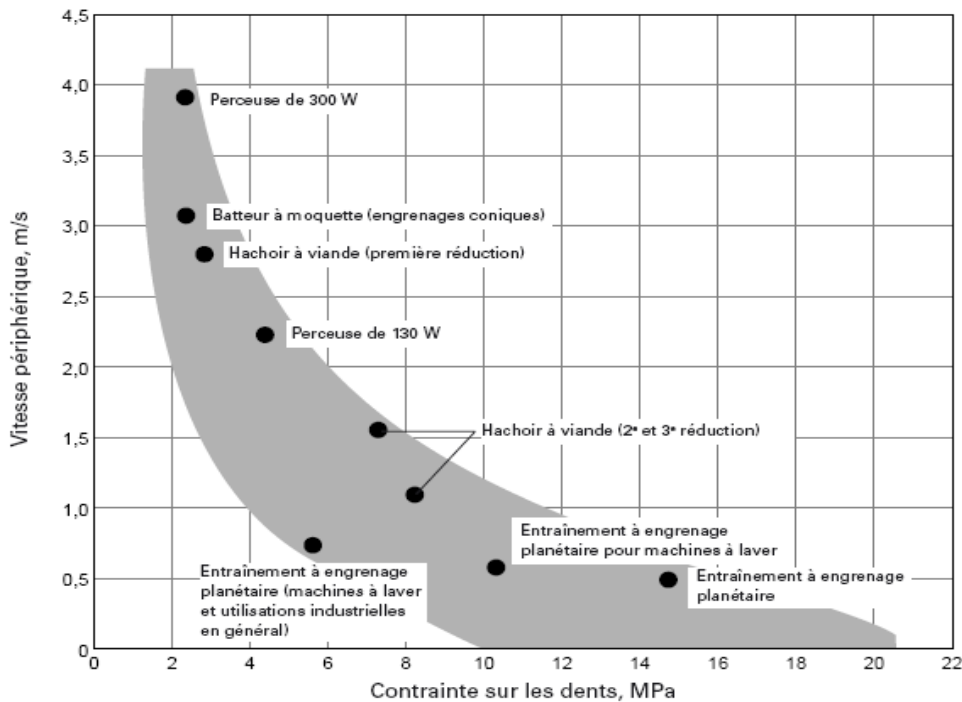


Figure 2.9: Représentation graphique de la vitesse en fonction de la contrainte pour les applications courantes des engrenages

2.4.1. Matériaux en contact

Dans de nombreux cas on peut réduire notablement l'usure en associant un engrenage en POM à une roue en polyamide PA. Cette combinaison est particulièrement efficace quand on exige une durée de vie prolongée. Elle présente en outre l'avantage considérable de ne pas exiger de lubrification au moment du montage.

Les engrenages associant les plastiques aux métaux peuvent donner de meilleurs résultats et permettre une usure moindre que les engrenages plastique sur plastique. Toutefois cette supériorité n'est effective que si l'engrenage métallique est pourvu d'une surface trempée [26].

Tableau 2.2: Propositions de couple de matériaux pour la construction d'engrenage en PA 66

Roue menante	Roue menée	
PA 66	PA 66	Utilisation très répandue dans les applications légères et moyennes.
Acier trempé	PA 66	Recommandé pour les applications à forte charge et forte vitesse. Présente la meilleure absorption du son et des chocs et la plus longue durée d'usure.
PA 66	POM 100, 500, 900	Association présentant le coefficient de frottement et l'usure les plus faibles en comparaison avec l'un ou l'autre de ces matériaux travaillant sur l'acier ou sur lui-même. Vivement recommandée pour les applications de puissance modérée. La meilleure quand aucune lubrification n'est possible. L'un ou l'autre de ces matériaux est utilisable pour la roue menante. Toutefois, la meilleure stabilité dimensionnelle du DELRIN le désigne logiquement pour l'engrenage de plus grande dimension.

2.5. Élément de tribologie

2.5.1. Introduction

La tribologie est définie comme la science et la technologie des surfaces qui interagissent dans un mouvement relatif. Ce terme fut utilisé pour la première fois en 1960 par un comité du gouvernement britannique et concerne en fait l'étude du frottement, de la lubrification et de l'usure. C'est un domaine multidisciplinaire dont l'importance est considérable pour la conservation de l'énergie et de la matière. En 1986, *E. Rabinowicz* estimait que 6% du produit national brut était perdu en raison d'une mauvaise connaissance ou d'une mauvaise application de la tribologie il est alors aisé d'imaginer l'impact économique que peut procurer une amélioration, même minime, dans ce domaine. Mais les problèmes ne sont désormais plus confinés dans l'industrie aéronautique ou de l'automobile. Avec le développement de l'information et des moyens de communication, les scientifiques sont désormais confrontés à des systèmes miniaturisés et la compréhension des questions tribologiques s'avère essentielle.

Après un bref historique, nous étudierons les mécanismes de frottement, de lubrification et d'usure en insistant plus particulièrement sur les différents types d'usure.

2.5.2. Frottement

Le frottement correspond à la résistance au mouvement relatif d'un corps sur un autre. Pour déplacer un solide sur une surface plane, une force supérieure ou égale à la force de frottement qui agit parallèlement à la surface et dans le sens opposé du mouvement est nécessaire [26]. Le coefficient de frottement noté μ , est le facteur de proportionnalité entre la force de frottement et la charge normale W d'où :

$$\mu = F / W \quad (2.15)$$

Le coefficient de frottement dépend :

- ✚ De facteurs mécaniques : force normale, vitesse de déplacement ;
- ✚ De facteurs chimiques : humidité, oxydants ;
- ✚ Des propriétés des matériaux : dureté, plasticité, énergie de surface... .

2.5.3. Lubrification

La lubrification est le processus qui permet de diminuer le frottement et l'usure entre les surfaces de deux solides. Il n'existe pas un processus unique de lubrification et de nombreux facteurs tels que la rugosité des surfaces, la géométrie des corps en contact. Les propriétés du lubrifiant, la température et les vitesses de glissement vont intervenir.

Dans la lubrification hydrodynamique les surfaces sont séparées par un film de fluide généralement épais. La pression hydrostatique dans le film entraîne seulement une petite déformation élastique des surfaces qui pourront être considérées comme rigides en première approximation. Le contact est dit conforme car les deux surfaces ont des dimensions très voisines et elles sont séparées par un espace qui s'étend sur une surface importante.

Dans la lubrification élastohydrodynamique, les pressions locales sont importantes et le film lubrifiant est si mince que la déformation élastique des surfaces ne pourra pas être négligée. Les contacts sont dits non-conformes car ils ont lieu sur une zone très localisée.

Sous des pressions élevées ou pour des vitesses de glissement très faibles, les forces hydrodynamiques sont insuffisantes pour maintenir un film entre les deux surfaces et une interaction considérable a lieu entre les aspérités. Certains lubrifiants pourront être adsorbés sur la surface du solide et gêner de façon significative le contact entre les aspérités. La lubrification est dite par adsorption [37].

Les lubrifiants servent :

- ✚ À réduire le frottement requis pour initier ou maintenir le mouvement entre les surfaces en contact ;
- ✚ À minimiser l'usure des surfaces en contact ;
- ✚ À contrôler, dans des limites raisonnables, les élévations de température engendrées par le frottement ;
- ✚ A évacuer les débris d'usure.

Ils sont nombreux et prennent la forme de solides, liquides ou gaz.

2.5.4. Usure

Il est généralement admis que les pertes économiques par usure représentent de 6 à 10 % du Produit National Brut des pays industrialisés. L'importance relative des différents modes d'usure est la suivante (Fig. 2.10).

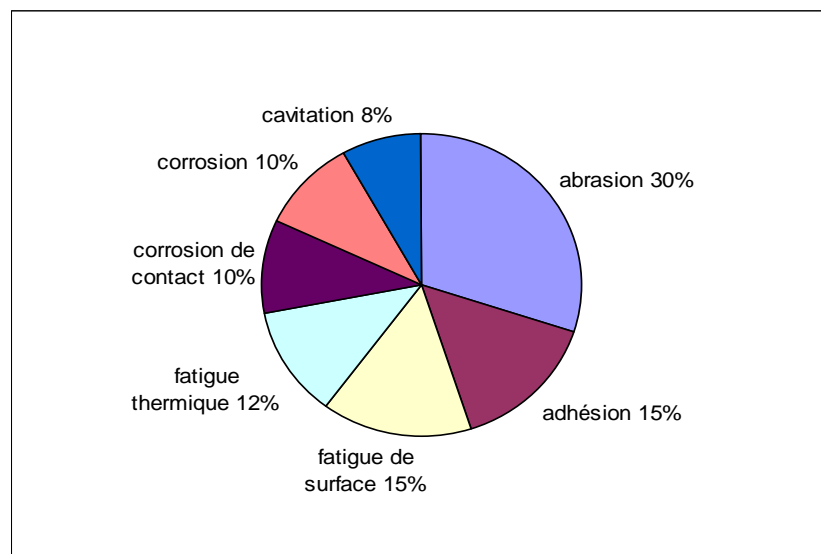


Figure 2.10 : Pertes relatives par usure

L'usure est un phénomène complexe et il n'y a pas une définition unique en tribologie. L'usure peut néanmoins être définie comme la perte ou le déplacement non désiré de matière à la surface d'un solide en mouvement relatif ou en contact avec une autre substance [38].

L'usure d'un matériau peut avoir plusieurs origines (diffusion atomique, adhésion.. .) et être influencée par de nombreux paramètres. Ce phénomène est constitué de trois étapes (Fig. 2.11) reliées les unes aux autres et qui se déroulent sur des points de contact individuels soient l'interaction des surfaces, les changements dans la couche de surface et l'endommagement des surfaces. Il faut garder à l'esprit que ce n'est pas une propriété intrinsèque du matériau. L'usure dépend tout autant des conditions mécaniques et thermiques imposées par le contact que des matériaux en contact [37].

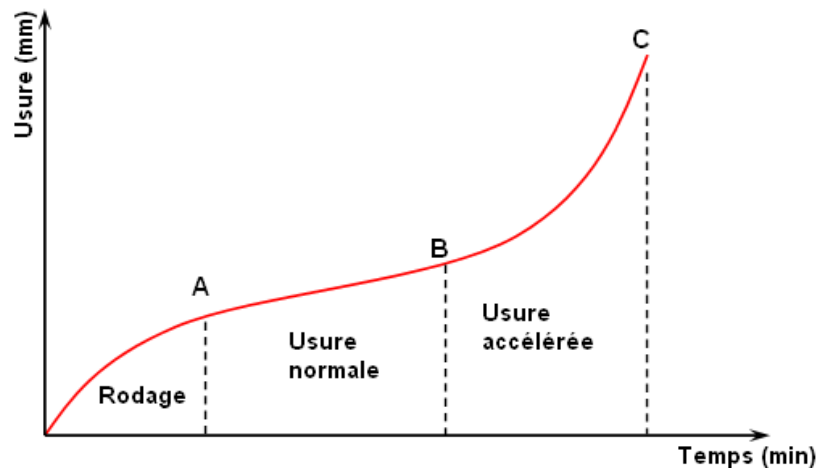


Figure 2.11 : Evolution de l'usure en fonction du temps

En général, une pièce subit tout au long de sa vie trois étapes d'usure :

- Rodage : usure rapide avec une vitesse d'usure régulièrement décroissante,
- Marche normale : durée de vie (usure faible et constante),
- Vieillessement et mort : vitesse d'usure croissante.

Un système tribologique est composé de quatre éléments (Fig. 2.12) :

- ✚ Le matériau étudié,
- ✚ Le matériau antagoniste c'est-à-dire contre lequel il s'use,
- ✚ Les éléments à l'interface,
- ✚ L'environnement (température, humidité, lubrifiant).

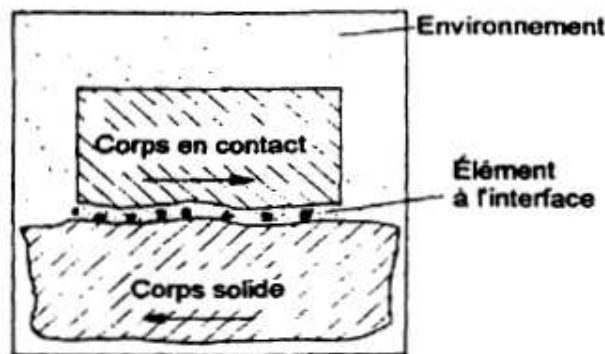


Figure 2.12 : Représentation schématique des éléments d'un système tribologique

D'autre part, nous devons distinguer l'usure douce et l'usure sévère :

- L'usure douce survient généralement sous des faibles charges, leurs débris sont constitués de fines particules qui font quelques dizaines de nanomètres. Il n'y a pas de déformation sous la surface du matériau.

- L'usure sévère apparaît lorsque des pressions plus fortes sont appliquées. Il y a une déformation plastique au-dessous de la surface. Les débris obtenus ont une taille plus importante, de l'ordre de 1 mm^2 . Il est intéressant de remarquer la rapidité de transition d'un mode à l'autre lorsque la charge appliquée est accrue.

E. Rabinowicz a répertorié quatre mécanismes d'usure fondamentaux :

- ❖ L'adhésion,
- ❖ L'abrasion,
- ❖ La fatigue de surface,
- ❖ La réaction tribochimique.

L'usure adhésive se rencontre lorsque des surfaces glissent l'une contre l'autre. Les fortes pressions entre les aspérités en contact résultent d'une déformation plastique. Il y a formation et destruction des jonctions interfaciales mais aussi transfert de matière d'une surface à l'autre.

L'usure abrasive est la conséquence d'un déplacement de matière dû à la présence des particules dures comme par exemple de la silice, de quartz ou d'autres éléments. Il y a formation de bourrelets ou de copeaux.

La fatigue de surface est caractérisée par la formation de fissures et par l'écaillage du matériau dus à un chargement cyclique.

La réaction tribochimique correspond à la réaction des surfaces des solides avec l'environnement qui peut être liquide ou gazeux. Elle résulte de l'enlèvement de la matière et des produits de réaction chimique provenant des surfaces en contact. L'usure tribochimique est fortement influencée par les cinétiques de formation des couches en surface ainsi que par la ductilité, la force et l'adhésion du substrat.

Il est aussi possible de différencier les types d'usure en fonction du mouvement relatif entre les éléments du système tribologique comme le montre la Figure 2.13. On distingue alors l'usure par glissement, par roulement, par impact, par érosion et par petits débattements (mouvements alternatifs de faible amplitude et de haute fréquence).

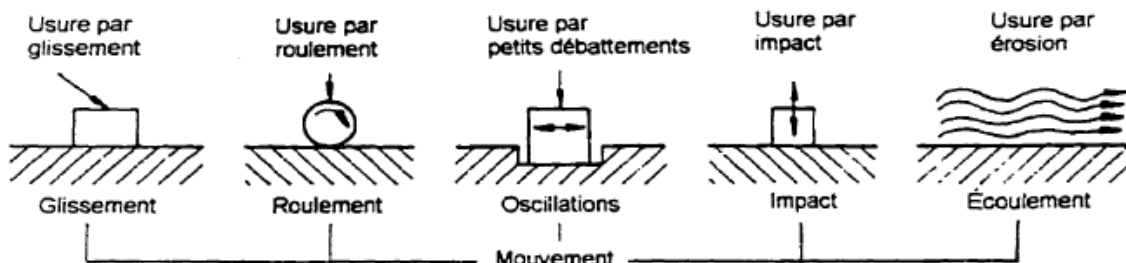


Figure 2.13 : Classement des processus d'usure en fonction du mouvement des corps mis en jeu

D'autres descriptions des processus d'usure s'appuient sur l'état physique du corps antagoniste ou sur l'angle d'action. Il n'y a donc pas une seule classification et le lecteur pourra se reporter à la référence pour de plus amples informations [37].

2.6. Principaux modes d'usure

2.6.1. Usure par adhérence

Cette forme d'usure apparaît lorsque deux surfaces glissent l'une sur l'autre. L'usure par adhérence est associée à la formation de points de contact entre les surfaces des corps en glissement au niveau notamment de la rugosité du contact. Le chargement normal à la surface est supporté par l'écrasement et la plastification des aspérités, ce qui forme des jonctions adhésives. L'origine de cette adhésion est de nature physique par la solubilité possible des matériaux. Si le mouvement est rapide ou effectuée sous forte pression, l'énergie dégagée au contact peut être suffisante pour faire apparaître des températures "flash", provoquant ainsi une véritable soudure des deux matériaux. La résistance mécanique qui apparaît est due à l'énergie qu'il faut apporter pour vaincre ces liaisons. Cette énergie sera alors dissipée sous forme de chaleur au contact favorisant l'entretien du mécanisme d'adhésion. La rupture de la jonction peut présenter deux cas. Si sa contrainte de cisaillement est faible devant la limite de rupture alors le contact est simplement rompu. Dans le cas où l'effort pour cisiller la jonction est plus important que la plus petite des limites à la rupture des deux matériaux du contact, il y a alors arrachement d'un morceau de matière et transfert de celui-ci sur le matériau le plus "dur" (Fig. 2.14).

L'usure par adhésion se manifeste par le transfert et le dépôt du matériau le plus tendre sur l'autre. Ainsi, plusieurs paramètres influent directement sur l'usure par adhérence. Une dureté élevée (ou limite d'élasticité) permet de minimiser l'interpénétration des aspérités dans le corps le plus mou et de favoriser un cisaillement simple sans arrachement de matière [38].

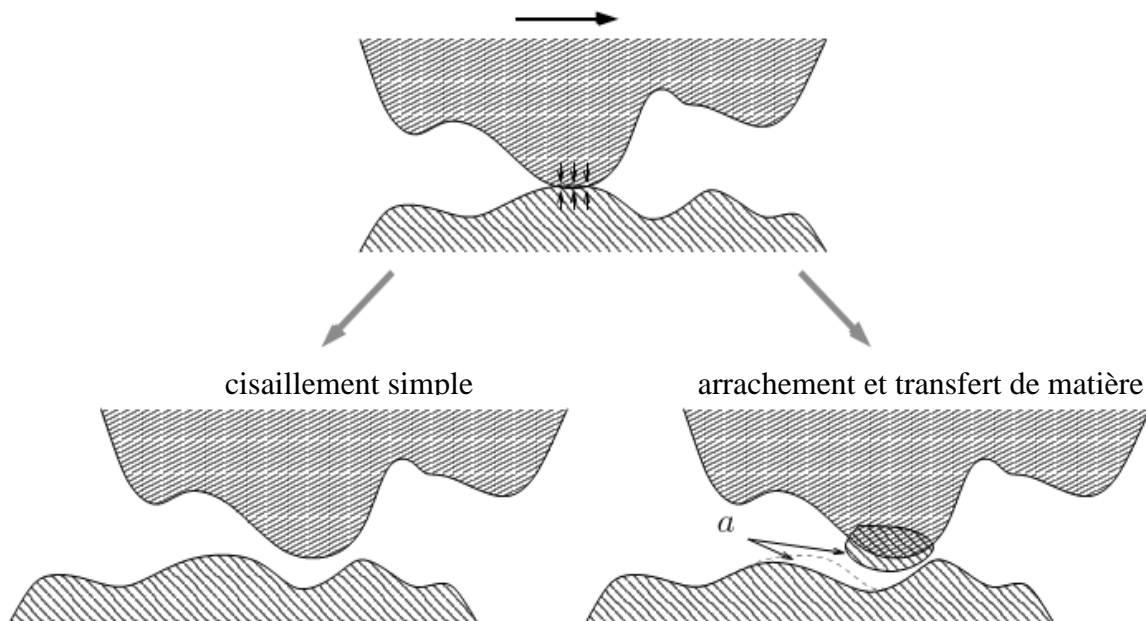


Figure 2.14 : Usure par adhésion. (a) volume arraché

2.6.2. Usure par abrasion

L'usure par abrasion d'un corps est provoquée par le glissement à sa surface d'un autre corps. Sous l'effet de la force normale appliquée entre ces deux corps, les « agents d'abrasion », qui peuvent être, soit des aspérités de l'autre corps, soit des particules plus ou

moins libres engendrées par l'un des deux corps ou étrangèrès aux deux l'indentent et enlèvent des particules en se déplaçant.

Ces agents d'abrasion peuvent être de diverses natures, et liés ou non à l'un des deux corps. Suivant les cas, on distinguera deux cas distincts :

- ❖ Si les particules dures qui constituent l'abrasif sont fixées à la surface du corps antagoniste et qu'elles se déplacent à la surface du corps étudié sans rouler, on parlera d'*abrasion deux corps*.
- ❖ Si maintenant ces particules sont indépendantes des deux surfaces en mouvement relatif et qu'elles sont libres d'indenter ces deux surfaces, animées d'un mouvement de translation et de rotation, c'est de l'*abrasion trois corps*.

La figure 2.15 présente ces deux types de mécanismes d'usure.

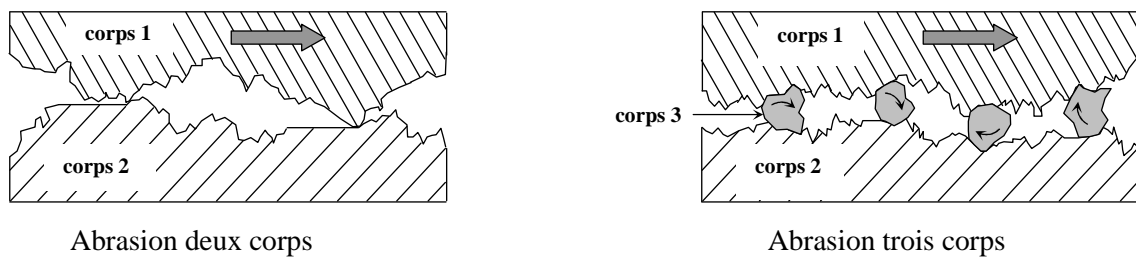


Figure 2.15 : mécanismes d'usure par abrasion

Malgré la différence de cinématique des aspérités ou particules responsables de l'abrasion, *Misra* et *Finnie* ont montré expérimentalement une grande similitude notamment de l'influence sur la vitesse d'abrasion de chacun des paramètres. De l'abrasion deux corps à l'abrasion trois corps, la vitesse d'usure diminue d'un ordre de grandeur, ceci venant du fait que dans le cas de l'abrasion trois corps, les particules ayant la possibilité de rouler provoquent une usure moindre [38].

Les particules responsables de l'abrasion ont en général une taille comprise entre 5 et 500 μm . La Figure 2.16 montre que lorsque les particules sont petites, l'abrasion augmente avec augmentation de la taille des particules.

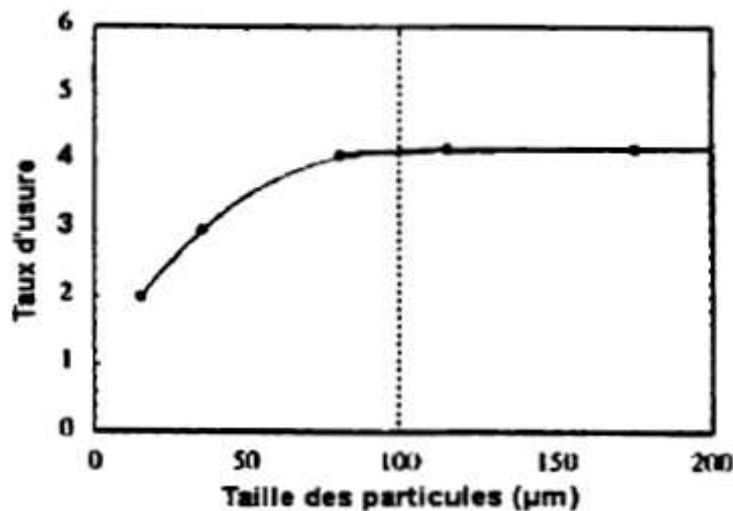


Figure 2.16 : Évolution de l'abrasion en fonction de la taille des particules

Au-dessus de la taille critique, soit 100 μm , la vitesse d'usure est pratiquement indépendante d'une augmentation de la taille des particules. *R. Gahlin* ont regroupé plusieurs explications pour ce phénomène mais l'évaluation de la taille des particules reste difficile car ce sont rarement des sphères. Les mécanismes fondamentaux de l'abrasion dans ce cas sont reliés uniquement à la déformation plastique et à la rupture fragile [37].

2.6.3. Usure par fatigue

La fatigue est le phénomène de formation et de propagation de fissures sous l'action répétée d'efforts alternes "pitting". Le mécanisme de fatigue commence par la formation d'une fissure en surface qui plonge dans la matière. Puis sous l'action répétée du corps frottant, cette fissure se propage en profondeur et parallèlement à la surface pour ensuite remonter. Alors, un morceau de matière se détache et provoque un fragment d'usure appelle "écaillage" (Fig. 2.17). Ce fragment peut à son tour donner naissance à de l'abrasion à trois corps ou de l'érosion [38].

Il est important de noter que ce type d'usure ne nécessite pas obligatoirement un contact physique des deux matériaux. En effet, un film lubrifiant peut transmettre la charge appliquée à la surface du solide et ainsi provoquer des tensions.

La fatigue peut être aussi de nature thermique par un cyclage répétitif de chauffage (dilatation) et refroidissement (contraction) provoquant un faïençage par accumulation de déformations plastiques et par dislocation des grains.

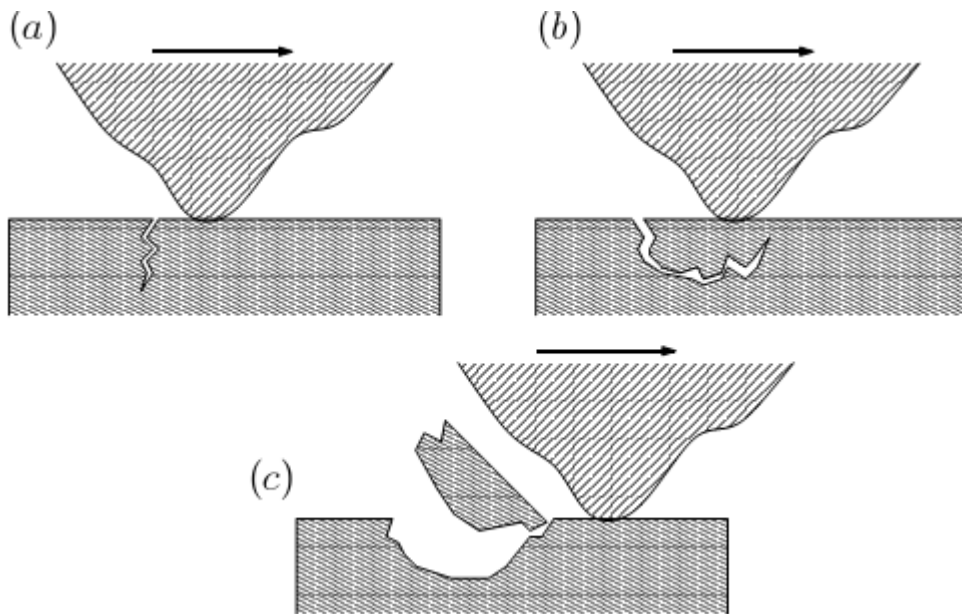


Figure 2.17 : Usure par fatigue. (a) Amorçage, (b) Propagation (pitting), (c) Génération d'un débris (écaillage)

2.7. Classement des modèles d'usure proposé

Les auteurs ont dénombré plus de 300 lois relatives au frottement et à l'usure sur une période allant de 1947 à 1992. Ils remarquent que beaucoup de lois sont dérivées des méthodes de la mécanique des solides en incluant les propriétés des matériaux, des quantités thermodynamiques ou bien encore des variables supposées fondamentales pour les auteurs de ces lois. Ils arrivent à un classement chronologique de ces lois en trois catégories :

- ❖ Les lois à caractère empirique ont vu le jour entre les années 1950 et 1970. Elles Prennent en compte principalement des paramètres relatifs aux conditions de tests. Il est impossible de transposer de telles lois à d'autres essais que ceux pour lesquels elles ont été établies.
- ❖ Les lois basées sur la mécanique du contact sont apparues principalement entre les années 1970 et 1980. Certaines d'entre elles tiennent compte des propriétés des matériaux un des précurseurs les plus connus est J.F. Archard.
- ❖ Enfin, les lois basées sur les mécanismes d'endommagement se sont développées depuis les années 1980. Elles incluent les mécanismes des dislocations, les propriétés en fatigue, la rupture en cisaillement [39].

2.7.1. Evaluation de l'usure

De nombreux auteurs [40] ont proposé des modèles pour décrire et évaluer l'usure. En 1953, J.F. Archard établit expérimentalement une relation permettant d'estimer le volume de matériau usé V dans le cas d'un contact glissant à vitesse constante et pour des matériaux de dureté très différente :

$$V = K \frac{F.S}{H} \quad (2.16)$$

Où

V : volume de matière perdu exprimé en mm^3 ,

K : coefficient d'usure (mm^3/Nm),

S : distance de glissement (m),

F : charge normale appliquée en (N),

H : dureté du matériau (N/m^2).

D'un point local sur une interaction de la surface, l'équation d'usure d'archard peut être exprimée comme :

$$\frac{h}{s} = k.p \quad (2.17)$$

où h représente la profondeur de l'usure au point et p est la pression locale. Si on suppose que le rapport h/s est le taux d'usure, à tout moment, c'est-à-dire dh/ds , k et p ne dépendent pas de s , l'équation (2) sera:

$$\frac{dh}{ds} = k.p \quad (2.18)$$

ou

$$\frac{dh}{dt} = k.p.v \quad (2.19)$$

L'équation d'Archard généralisée peut être exprimée pour un point local sur une des surfaces en contact avec des engrenages comme suit :

$$h_p = \int_0^s k.p.ds \quad (2.20)$$

Les solutions pour réduire l'usure portent donc sur un choix pertinent du matériau usité offrant un coefficient d'usure K le plus faible possible. Il faut choisir des couples de matériaux n'offrant aucune possibilité de filiation cristalline résistante comme l'argent non oxyde, le cadmium, l'étain ou le plomb pour l'acier. A l'inverse, la combinaison d'aluminium et de l'acier est catastrophique. Leurs fortes compatibilités entraînent des coefficients de frottement dynamiques et statiques supérieurs à 1. Les traitements thermiques et les

traitements de surface peuvent aussi limiter l'adhésion comme le polissage : le matériau le plus dur doit être le mieux poli pour ne pas abraser l'autre, mais aussi pour limiter la déformation des aspérités [38].

Tableau 2.3 : Valeurs des coefficients d'usure K pour différents matériaux glissant sur l'acier

Matériau	Coefficient d'usure K
Acier doux	$5,5 \times 10^{-5}$
Acier doux sur acier doux	7.0×10^{-3}
Acier a outils	$1,3 \times 10^{-4}$
Acier inoxydable	$1,7 \times 10^{-5}$
Cuivre	$3,7 \times 10^{-5}$
Bronze	6.0×10^{-4}
Téflon	$2,5 \times 10^{-5}$
PPMA	7.0×10^{-6}
Polyéthylène	$1,3 \times 10^{-7}$

En conclusion, l'équation d'Archard implique que si K est constant pour un système de glissement donné, alors le volume de matériaux perdu sera proportionnel à la distance de glissement, et la vitesse d'usure augmente proportionnellement avec la charge normale ce qui est vérifié expérimentalement pour plusieurs systèmes. Cette équation est pertinente pour des contacts plastiques mais elle ne peut s'appliquer aux cas où les contacts sont élastiques.

La loi d'Archard est applicable dans de nombreuses situations par exemple dans le cas d'usure par abrasion ou par adhésion, soit avec lubrification ou sans.

3.1. Introduction

Aujourd'hui les engrenages occupent une place spéciale dans les systèmes mécaniques. C'est la façon la plus économique pour transmettre de la puissance et un mouvement de rotation dans des conditions uniformes. Comme les exigences sont vastes et avec des difficultés variées, les engrenages sont très complexes et d'une grande diversité. L'importance de l'engrenage, comme élément mécanique nécessaire et idéal, est démontrée par la vaste gamme qu'on trouve dans toutes les industries. Le développement des nouvelles technologies, comme l'électronique, a remplacé quelques applications de l'engrenage, mais il reste toujours un élément mécanique dont l'utilisation croît continuellement.

La résine acétal DELRIN (POM) et le polyamide ZYTEL (PA) sont employés dans le monde entier à la réalisation d'une très grande diversité d'engrenages. Ils offrent la plus large plage de températures de service et la plus forte résistance à la fatigue de tous les thermoplastiques destinés à cet usage, qualités qui justifient leur emploi quasi universel dans les engrenages non métalliques. La principale incitation à l'utilisation des engrenages en plastique à la place de ceux en métaux, repose sur l'avantage économique considérable apporté par le procédé de moulage par injection. Au surplus, les cames, coussinets, rochets, ressorts, arbres d'entraînement et autres composants d'engrenage peuvent être réalisés en éléments intégrés par un simple moulage qui supprime les coûteuses opérations de fabrication et d'assemblage. Les tolérances admises pour les engrenages plastiques sont, dans certains cas, moins rigoureuses que celles des engrenages métalliques, car leur résilience propre permet à la dent d'effacer de légères erreurs de pas et de profil.

Cette même résilience permet d'amortir l'énergie des chocs et des secousses. L'emploi de polyamide pour la surface de denture des pignons de chaînes de distribution de moteurs en est un exemple éclatant. La durée de vie de la chaîne se trouve dans ce cas prolongée.

3.2. Matériau

Nous utilisons dans cette étude, des pignons en polyamide (PA66) qui sont fabriqués selon le procédé de moulage par injection. Les polyamides (PA) sont des polymères semi-cristallins, plus connus sous le terme générique de Nylon, et ont connu un développement rapide car les premiers polymères obtenus sous forme semi-cristalline, possédaient une température d'utilisation élevée et de bonnes propriétés mécaniques. La figure 3.1, représente les pignons d'essais en PA 66.

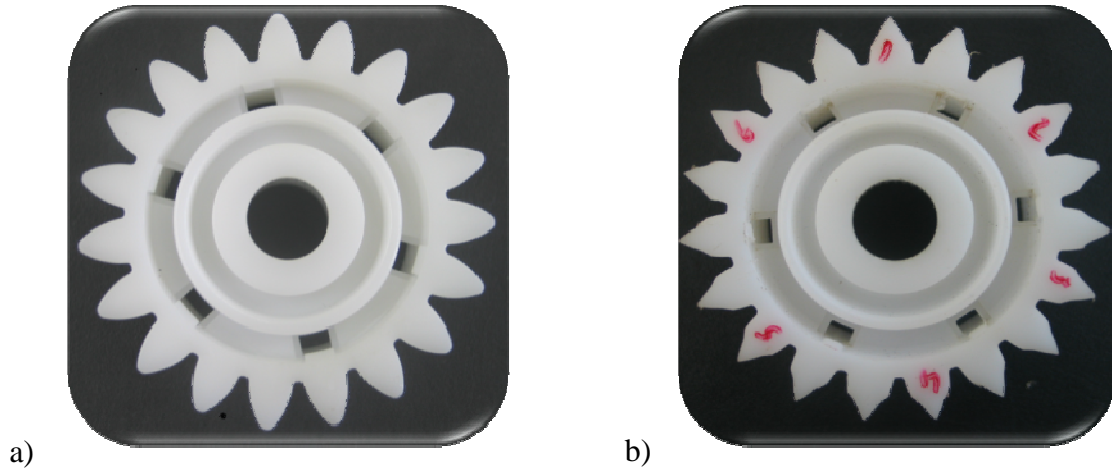


Figure 3.1 : Pignon en PA66 avant essai (a), pignon usé dans les conditions de service (b)

Les propriétés mécaniques, thermiques et les caractéristiques géométriques de pignon en question sont présentées dans les tableaux 1 et 2, respectivement [41; 42].

Tableau 3.1 : Propriétés mécaniques et thermiques du PA66

Propriété	
Masse volumique (g/cm ³)	1.14
Module de Young (MPa)	2800-3200
Absorption d'eau à 23 °C et 100 % HR	
• après 24 h (%)	1.5
• à saturation (%)	8.5
Résistance à la traction (MPa)	70-90
allongement à la rupture (%)	>30
Coefficient de Poisson	0.38-0.41
Coefficient de frottement	0.2-0.3
Ténacité (MPa m ^{1/2})	2.5-3.0
Température de transition vitreuse (°C)	45-57
Température de ramollissement (°C)	240
Température de fusion (°C)	264
Chaleur massique (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	1670
Conductivité thermique a 23°C (W m ⁻¹ K ⁻¹)	0.25
Température d'utilisation (min/max) (°C)	(-30) -180

Tableau 3.2 : Caractéristiques géométriques des pignons

Caractéristiques	Pignon
Angle de pression (deg)	20°
Module (mm)	3
Nombre de dents	19
Diamètre primitif (mm)	57
Diamètre de tête (mm)	63
Diamètre de pied (mm)	49.5
Hauteur de dent (mm)	8
Pas (mm)	9.42
Largeur de denture (mm)	15

Les engrenages en plastique ont plusieurs avantages en comparaison avec les engrenages en métal, telles que le poids léger, le bruit réduit, et le degré de liberté élevé dans la géométrie des engrenages. Leurs champs d'application, cependant, sont plutôt limités à la transmission de rotation, puisque le couple d'engrènement est faible [43].

Le tableau 3.3 résume les avantages et les limitations des engrenages en plastique.

Tableau 3.3 : Avantages et limitations des engrenages en plastique

Avantages	Limitations
Economie du moulage par injection	Capacité à supporter les charges
Combinaison des fonctions	Température de l'environnement
Pas d'opérations après usinage ni d'ébavurage	Coefficient de dilatation thermique plus élevé
Réduction du poids	Moindre stabilité dimensionnelle
Fonctionnement avec peu ou pas de lubrifiant	Précision de fabrication
Amortissement des chocs et vibrations	
Plus faible niveau sonore	
Résistance à la corrosion	

Le ZYTEL (PA66) et le DELRIN (POM) ont de faibles coefficients de frottement et de bonnes caractéristiques d'usure, qui leur permettent de fonctionner avec peu ou pas de lubrifiant. Ils peuvent également fonctionner dans des environnements qui seraient néfastes aux engrenages métalliques [26].

3.3. Banc d'essai

Les essais sont effectués sur une machine à laver, tournant dans les deux sens. Les pignons utilisés sont en polyamide du type PA66. Cette machine réalise les conditions de fonctionnement du contact entre les dents de l'engrenage. Le mécanisme d'engrènement est constitué d'un ensemble de roues dentées de différentes tailles. Une vis sans fin en acier alimentée par un moteur électrique (1), transmet le mouvement de rotation à la denture hélicoïdale (2). Ceci permet de transmettre le mouvement de rotation au pignon en question

c'est-à-dire, la roue à denture droite (4) qui fait tourner le tambour (grande roue). Pour pouvoir procéder à ce travail en fait, il semble intéressant de se rendre compte aux conditions et régimes de fonctionnement qui peuvent nous permettre d'y mettre le point (Fig. 3.2 et 3.3).

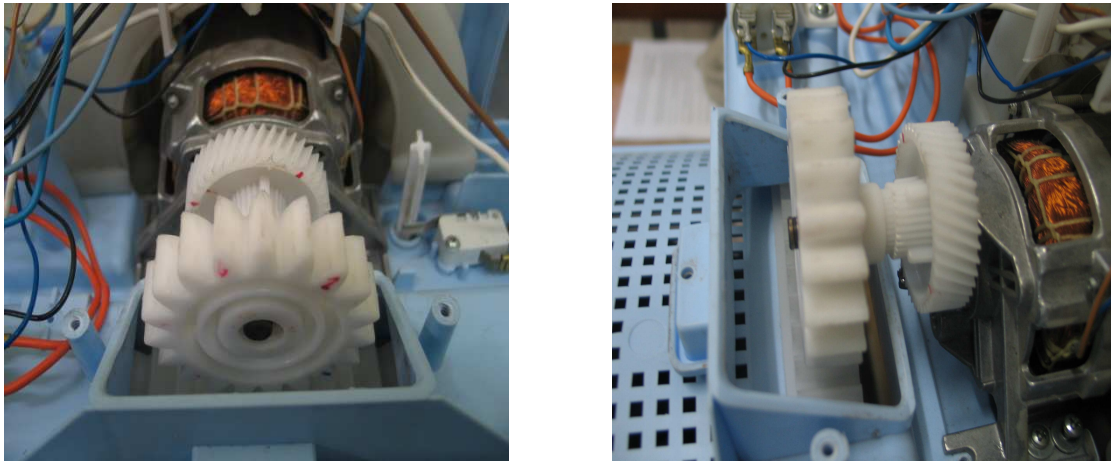


Figure 3.2 : Mécanisme d'engrenage : « banc d'essais »

D'ailleurs, lors du fonctionnement et lorsque la cuve de la machine contient de l'eau, la grande roue en rotation emmène à son tour, de petites quantités d'eau via un phénomène dit barbotage, d'où un contact lubrifié entre la roue et le pignon.

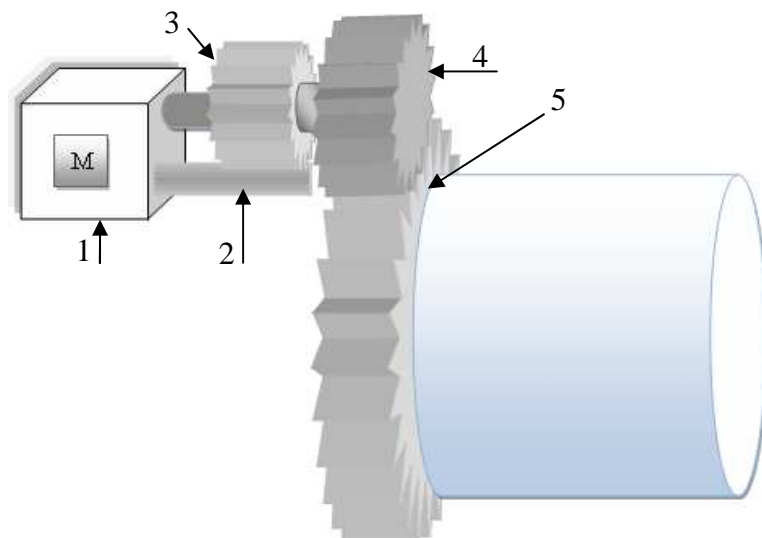


Figure 3.3 : Représentation schématique du banc d'essais

3.4. Instrument de mesure

Différentes approches ont été employées pour déterminer des quantités d'usure, qualitativement et quantitativement. Une vue sur la littérature technique et sur des normes éditées reliées à l'usure des surfaces en contact indique l'envergure des techniques utilisées.

La quantité d'usure influence également le choix de la méthode de mesure. Si les grandes quantités d'usure sont expérimentées, alors des approches relativement simples et peu coûteuses de mesure, telles que le changement de volume ou la détermination de changement de masse, sont habituellement conduites avec succès. Autrement dit, si les taux d'usure très petits sont expérimentés, il vient que des techniques plus sensibles et plus coûteuses sont indispensables pour évaluer les changements réels de la masse ou du volume.

Les endommagements par usure qui mène à la perte substantielle de la matière, sont peut-être la situation la plus franche à décrire quantitativement. La perte par usure peut être déterminée en mesurant le changement de la masse ou de la dimension. Le contrôle des dimensions d'une pièce est une approche normale qui sert à estimer la quantité d'usure produite [44].

Pour mesurer les pertes de cotes causées par l'usure sous l'effet de contacte des dents, nous disposons de trois instruments de mesure : une balance électronique d'une précision 10^{-2} g et de portée maximale de 2000 g, un pied à module conçu pour la mesure des profils des dents d'engrenages à denture droite. Ce dernier est un instrument de mesure à double lecture, c'est-à-dire mesurant la profondeur et l'épaisseur des dents, et ayant une précision de $5 \cdot 10^{-2}$ mm. Et un microscope optique doté d'un appareil à photos nous permettant de suivre l'évolution de l'usure (Fig. 3.4).

Il n'existe pas d'unité standard de l'usure ; l'unité la plus souvent utilisée étant 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 de sollicitation et des mécanismes de dégradation [45].

L'usure est habituellement mesurée en perte de poids. Cependant, puisque la détermination de volume d'usure est généralement la manière très en cours pour décrire l'influence d'usure, la perte de poids est convertie en volume d'usure en divisant par la densité. Cette manière de mesure s'avère très utile bien qu'elle puisse permettre une comparaison d'usure des matériaux ayant différentes densités et également un calcul facile des taux d'usure [43].

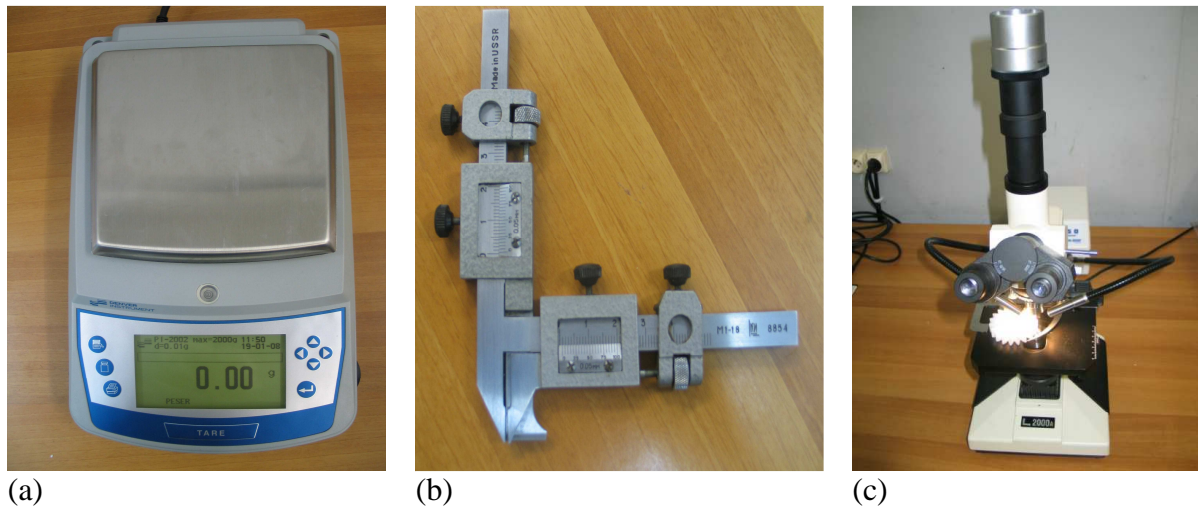


Figure 3.4 : Instrument de mesure d'usure : balance électronique (a), pied à module (b), microscope optique (c)

Cependant, beaucoup de polymères, notamment le polyamide 66 (PA66 ou nylon 66), absorbent des quantités significatives de l'eau, qui peuvent être partiellement enlevées par échauffement. Puisque les engrenages peuvent atteindre des températures environ de 80 °C dans la zone de contact, une perte significative du poids due à l'enlèvement de l'eau peut être prévue. Ainsi, la mesure d'usure par perte de poids n'est peut-être pas considérée une méthode fiable, particulièrement pour des matériaux ayant un taux d'absorption de l'eau bien élevé [46].

Ainsi, un engrenage PA66 non renforcée pesant 100 g pourrait contenir 2 g d'eau d'absorption à l'équilibre, mais un engrenage composée avec seulement 55% PA66 dans les mêmes conditions contiendra seulement 1.1 g, si le contenu d'humidité d'équilibre est 2% [46].

3.4.1. Mesures directes

Les incertitudes de la mesure d'usure par balance électronique (perte de poids) et par pied à module (perte de cotes) ont pour but de mener à bien la recherche d'une méthode plus fiable. La mesure directe des changements du profil de dent a l'avantage d'offrir le potentiel de caractériser l'usure d'une manière qualitative aussi bien que quantitative, c'est-à-dire, pour déterminer où se produit sur une dent la plus grande usure. Ainsi, si l'usure est importante à la tête et nulle au dessous de la ligne du diamètre primitif de la dent, la méthode de mesure par « perte de cote » pourrait être plus efficace qu'en mesurant par balance électronique [46].

Cependant, le changement dimensionnel dû à l'humidité serait un problème, mais ceci semblerait avoir moins d'influence que le changement du poids. Nelson cite une expansion linéaire seulement de 0.15% quand la teneur en eau est augmentée par le poids de 1%.

L'utilité de la méthode des pertes de poids est élucidée par le fait que les mesures se font pour la totalité de tout un pignon (masse de pignon est beaucoup plus grande que la

masse des dents), par contre la méthode de mesure dimensionnelle caractérise uniquement une seule dent à la fois [46].

3.5. Conditions d'essais

A cette expérience, nous tentons de suivre régulièrement le comportement et l'évolution de l'usure au niveau des profils des dents d'engrenage, en fonction du nombre de cycles parcouru dans le temps. Les mesures sont relevées sur le pignon dans la mi-largeur des dents en disposant de 4 niveaux choisis suivant ses profondeurs (Fig. 3.5a).

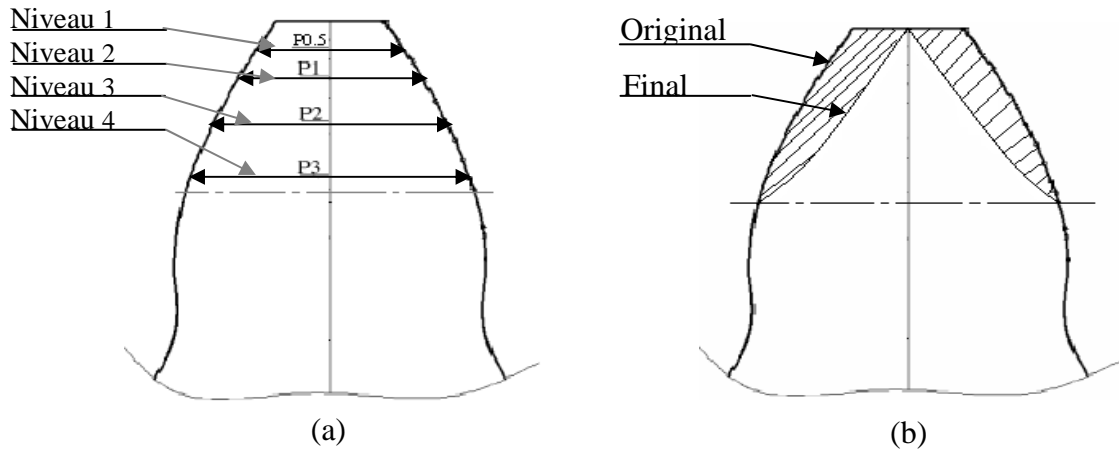


Figure 3.5 : Schéma de niveaux mesurés suivant la profondeur de dent (a), Changement des profils des dents (b)

D'autre part, nous nous proposons de prendre des mesures pour les dents se situant entre les trous dans le pignon (Fig. 3.1), il s'agit donc d'avoir 6 dents à mesurer. L'objectif de ce choix, étant de pouvoir obtenir des mesures bien précises en tenant compte de la possibilité d'avoir des profils d'usure différents pour les 6 dents.

Les éprouvettes d'essai utilisées sont des roues dentées en polyamide. Elles doivent être complètement nettoyées et séchées avant chaque mesure. Cette opération permet d'éliminer les particules d'usure, ainsi que les mesures des pertes de cotes se font chaque 250.000 cycle. Nous réalisons cette expérience en mettant en évidence les trois régimes de fonctionnement qu'entraîne la machine, tels que : lavage, rinçage et séchage. A cet effet, nous travaillons dans 3 milieux différents : dans l'eau, dans l'eau avec détergent et à sec. Le détergent contient les composants suivants :

- Moins de 5 % : tensio-actifs non-ionique, savon,
- De 5% à moins de 15% : tensio-actifs anioniques, agents de blanchiment,
- De 15% à moins de 30% : phosphates,
- Contient également : enzymes, parfum, activateur, carbonate, silicate, azurant optique.

En ce qui concerne les conditions de fonctionnement de la machine, nous exerçons sur le tambour qui constitue lui-même la grande roue, une charge statique de 3 kg avec une vitesse de rotation constante de 250 tr/min pour pignon.

Les essais sont employés à la température ambiante (25 ± 3 °C) en atmosphère (humidité relative : $60\pm 10\%$). En analysant les surfaces d'usure à l'aide d'un microscope, nous nous assurons qu'aucun liquide ne soit présent sur ces surfaces. Une fois les surfaces sont vérifiées, nous pouvons peser le pignon et prendre les mesures par le pied à module afin d'évaluer l'évolution de l'usure. En outre, il est important que chaque pignon doive être préparé de la même façon.

Les quantités d'eau de robinet sont de 12 litres et doivent être renouvelées chaque jour tout en évitant l'accumulation des particules d'usure qui pourraient éventuellement s'introduire entre surfaces de contact.

4.1. Introduction

Généralement, les polyamides sont utilisés comme matériaux pour engrenages moulés par injection. Toutefois, leur utilisation dans des conditions de haute température est limitée en raison de leur faible température de fusion (environ 264 °C) par rapport aux aciers. Par conséquent, le développement d'un engrenage en plastique pouvant être utilisé jusqu'à une température d'environ 180 °C et avec une capacité de charge supérieure à celles des engrenages en polyamide, est nécessaire. Dans la littérature, la performance des engrenages en plastique telles que le téréphtalate polyacetal (POM), de polybutylène (PB), le polyimide (PI), et le polyamide (PA) est liée à leur capacité et à leur résistance à l'usure.

L'usure est un phénomène complexe auquel contribuent simultanément les propriétés mécaniques, physico-chimiques et topographiques des surfaces dans un contexte de sollicitations souvent multiples (mécaniques, thermiques, chimiques...). La dégradation surfacique souvent associée à une perte de matière non contrôlée (contrairement aux processus d'usinage ou de polissage par exemple), est un enjeu clé dans le contexte actuel où la réduction des pertes énergétiques est une préoccupation majeure. Par exemple, le remplacement de pièces mécaniques usées entraîne de nouvelles fabrications, de la maintenance ...etc. donc des dépenses énergétiques supplémentaires et des pertes économiques.

L'occurrence d'un type particulier d'usure dépend de beaucoup de facteurs, qui incluent la géométrie des surfaces, la nature de la rugosité extérieure, la charge appliquée, le roulement et vitesses de glissement. D'autres facteurs importants qui influencent l'usure sont la température environnementale, l'humidité, et les conditions chimiques, comme les propriétés mécaniques, thermiques, chimiques, et métallurgiques de couche extérieure des matériaux. En outre, l'usure est fortement influencée par les propriétés physiques, thermique, et chimiques du lubrifiant, le régime de la lubrification [47].

4.2. Résultats et discussion

Dans ce qui suit, nous nous intéressons à l'analyse des résultats expérimentaux obtenus au moyen d'un mécanisme qui joue le rôle d'un banc d'essai, et qui permet la continuité et régularité de fonctionnement.

Les mesures des pertes de cotes présentées ci-dessous, montrent l'évolution de l'usure localisée dans les dents des pignons, en fonction de nombre de cycles. Il faut signaler que l'engrènement entre le pignon et la grande roue ne s'effectue pas de façon complète, c'est-à-dire que le contact des profils est situé dans la zone appelée saillie. Cet engrènement incomplet utilisé fréquemment dans les engrenages en polymère, a pour objectif d'obtenir un espace qui permet de refroidir la zone de contact, car dans tous les cas, quand deux engrenages en plastique sont en mouvement l'un avec l'autre, il faut soigneusement prévoir une méthode d'évacuation de la chaleur. La dissipation thermique dépend de la conception d'ensemble du système et nécessite une attention particulière quand les deux matériaux sont de bons isolants thermiques [48; 49]. En revanche, lorsque les engrenages en plastique engrènent avec des roues métalliques, la dissipation de chaleur est meilleure et permet de

transmettre des couples plus élevés. Egalement, il est bien évident que les engrenages associant les plastiques aux métaux peuvent donner de meilleurs résultats et permettre une usure moindre que les engrenages plastique sur plastique. Toutefois, cette supériorité n'est effective que si l'engrenage métallique est pourvu d'une surface trempée [26].



Figure 4.1 : Pignon usé en PA66 après 3 millions de cycle pour le cas d'eau

Les résultats de mesure obtenus pour les différents milieux sont comparés. Ainsi, les mesures relevées au quatre niveaux choisis suivant la profondeur de dent (voir Fig. 3.5a) sont présentées graphiquement.

Les figures ci-dessous présentent respectivement l'évolution de l'usure en fonction du nombre de cycles dans les milieux : eau, eau plus détergeant et à sec. Nous constatons que l'évolution de l'usure croît par l'augmentation du nombre de cycles tout en faisant apparaître deux étapes différentes. La première représente une usure rapide dite : période de rodage, conduisant à l'élimination des aspérités des surfaces (rugosité) ce qui permettrait dans la plus part des mécanismes un fonctionnement bien escompté. La seconde représente la période d'usure normale, qui se traduit par une évolution lente et relativement uniforme. Durant cette étape et après un nombre important de cycles, les pignons deviennent inutilisables, car les têtes des dents usées sont aiguisées (Fig. 4.1) et causent un mauvais engrènement.

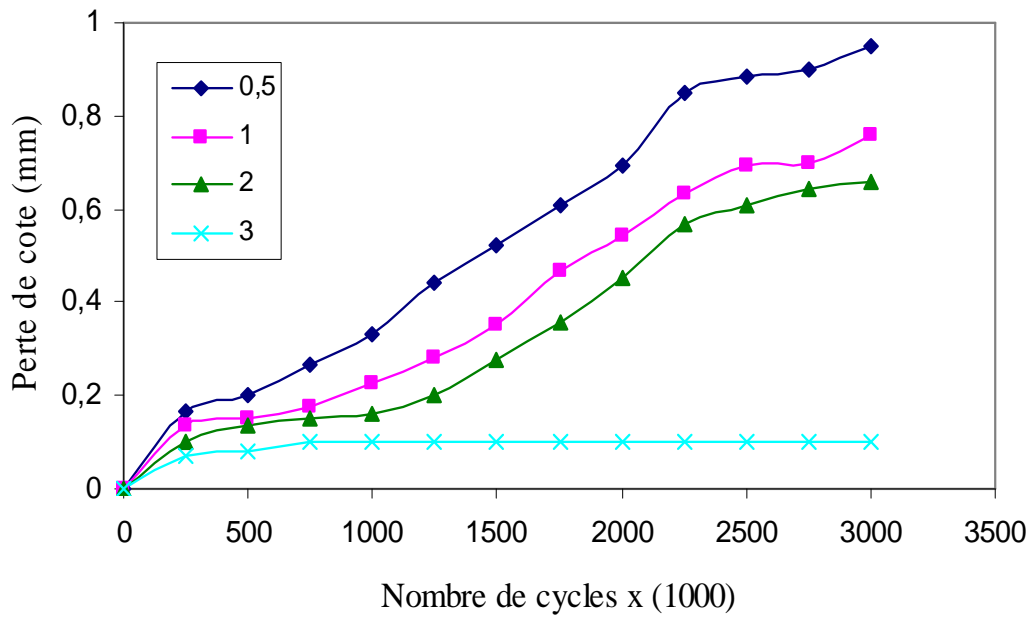


Figure 4.2 : Evolution de l'usure en fonction du nombre de cycles pour le cas d'eau (Pignon1)

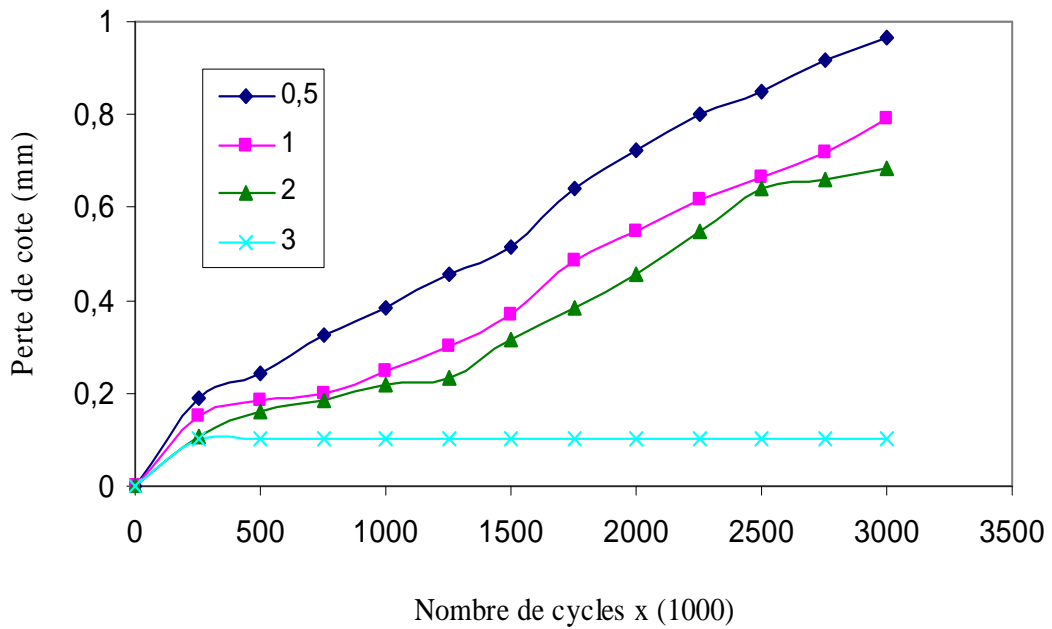


Figure 4.3 : Evolution de l'usure en fonction du nombre de cycles pour le cas d'eau (Pignon2)

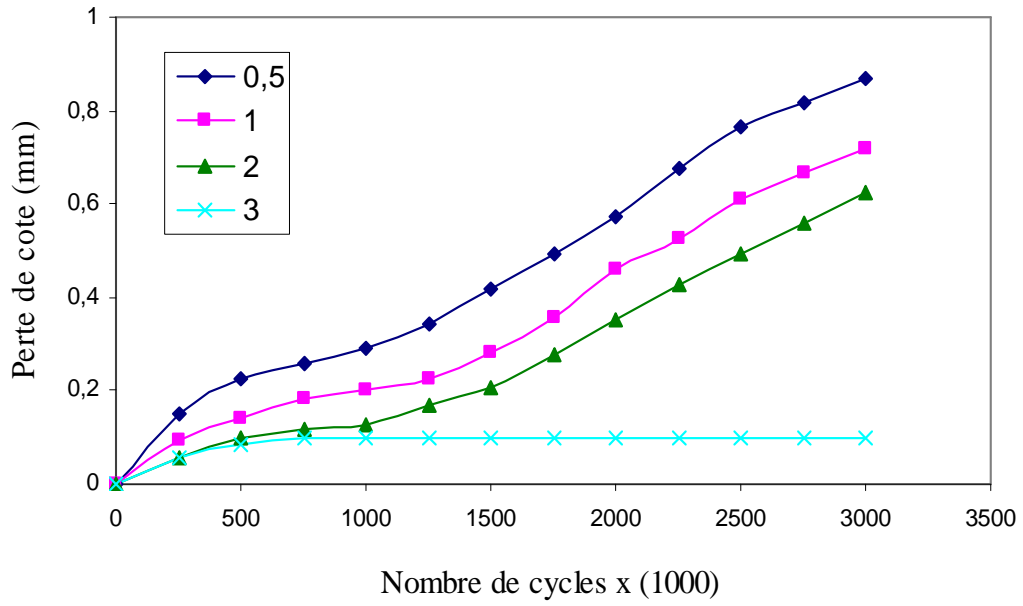


Figure 4.4 : Evolution de l'usure en fonction du nombre de cycles pour le cas d'un mélange eau et détergeant

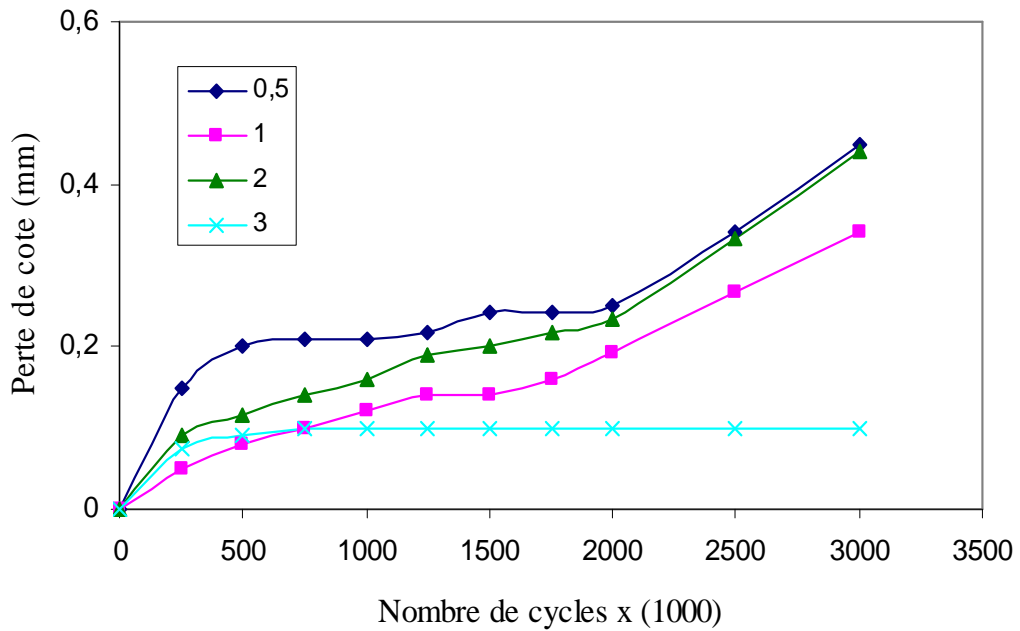


Figure 4.5 : Evolution de l'usure en fonction du nombre de cycles pour le cas à sec

Dans les figures (4.2, 4.3, 4.4) les mesures prises pour les quatre niveaux montrent que l'évolution de l'usure devient plus importante, quand le niveau est plus proche de la tête de dents (voir Fig. 3.5b). Le niveau très éloigné (3 mm) de la tête de dent ne montre l'accroissement des pertes de cotes que durant l'étape de rodage, ce qui implique qu'il n'y a pas de contact dans l'étape d'usure normale.

Dans la figure 4.5, l'évolution de l'usure au niveau des points de mesure est différente lorsqu'on la compare avec celles des figures (4.2, 4.3, 4.4) ceci paraît clairement au niveau des courbes pour 1 et 2 mm, de telle sorte que le point distant à 2 mm de la tête, a subi une usure importante qui est devenue plus proche à celle obtenue pour 0.5 mm.

4.2.1. Influence de l'eau sur la morphologie des polyamides

Les polyamides absorbent l'humidité de l'air. L'état d'équilibre pour les polyamides 66 est une teneur en eau de 2,8% dans une atmosphère à 50% d'humidité relative (HR) et de 8,5% à 100% d'humidité relative. Cette absorption d'eau agit comme un plastifiant sur les polyamides en diminuant leur résistance à la traction et leur rigidité mais augmentant l'allongement et la résistance au choc. Elle se traduit aussi par une variation dimensionnelle, accroissant les dimensions de 0,6% à 50% HR et de 2,6% à 100% HR pour PA 66. Ce processus est réversible, la résistance et la rigidité augmenteront avec réduction correspondante des dimensions pour des taux d'humidité moins élevés. Ces réactions sont toutefois assez lentes: à titre d'exemple il faut environ 125 jours à une éprouvette à l'état sec pour atteindre l'équilibre dans un milieu environnant à 50% HR [21].

Les diagrammes (4.6, 4.7) montrent la relation entre le taux d'absorption d'humidité et la durée d'exposition dans différents milieux environnants pour les polyamides.

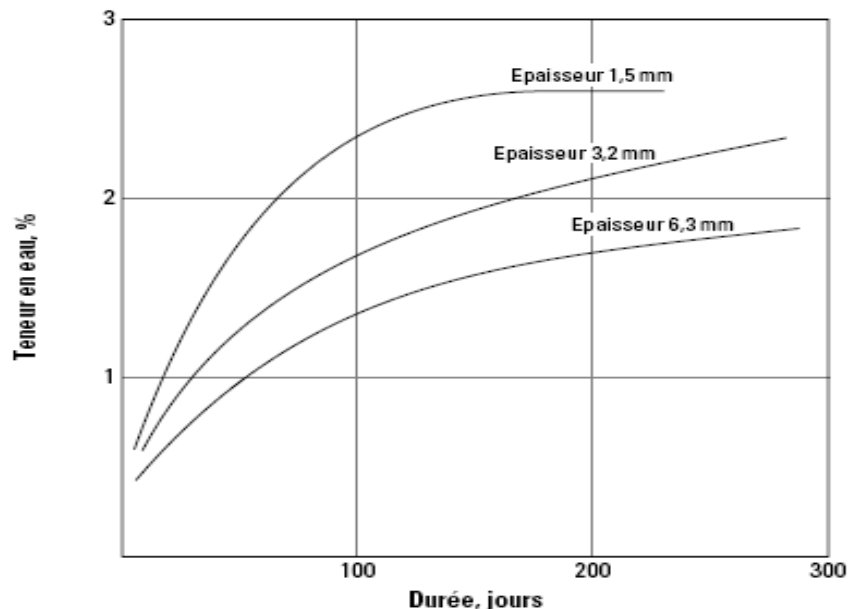


Figure 4.6 : Teneur en eau en fonction du temps pour PA66 exposé à 50% HR, à 23°C

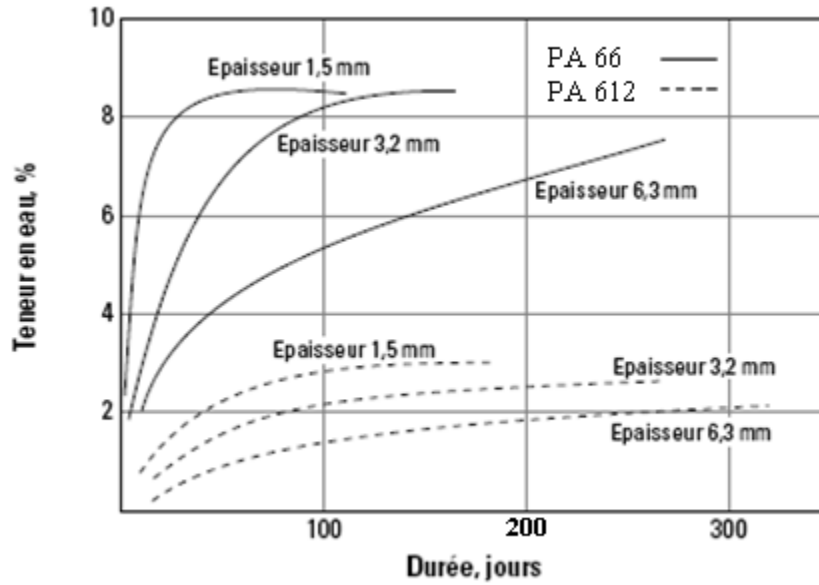


Figure 4.7 : Teneur en eau en fonction du temps pour PA 66 et PA 612 immergés dans l'eau à 23°C

Ces diagrammes mettent aussi en évidence l'influence de l'épaisseur sur le taux d'absorption. Les taux d'humidité à l'équilibre ne sont que très légèrement affectés par la température. Pratiquement, la teneur en eau à l'équilibre des pièces en polyamide sera par conséquent, la même qu'elles soient dans l'eau froide ou dans l'eau chaude [21].

La diffusion de petites molécules au sein du polymère (ou plastification) peut affecter la cristallinité et les propriétés mécaniques de ce polymère, voire le dégrader. Les polyamides étant réputés pour leur sensibilité à l'humidité ambiante, il est utile de comprendre les processus de diffusion de l'eau et son influence sur le comportement du matériau [18].

Les molécules d'eau répandent aisément dans le volume libre de la phase amorphe du polymère et fournissent le mouvement segmentaire dans le polymère. De ce fait, le gonflement se produit en raison de la pénétration des molécules d'eau dans les régions amorphes du polymère menant à une réduction des forces attractives entre les chaînes de polymère [50; 51], sachant que la partie amorphe est absolument plus grande que celle cristalline, ainsi que le degré de cristallisation de la plus part de polyamides est de 25 à 40 % [52]. La réduction de forces intermoléculaires engendre le déplacement matériel facile pendant le glissement et accroît le taux d'usure [49].

Les zones plastifiées ou gonflées sont clairement visibles dans toute la surface (Fig. 4.8). La molécule d'eau qui diffuse facilement dans la couche extérieure amorphe ayant pour résultat l'augmentation du taux spécifique d'usure [50].

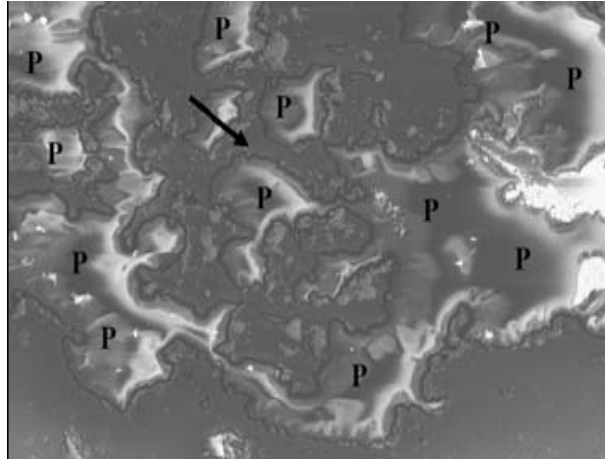


Figure 4.8 : Micrographie de surface de PA 66 usée dans l'eau obtenue par MEB

La flèche indique que la direction de glissement et les régions indiquées par la lettre P indiquent les zones plastifiées [50].

Bin-Bin Jia, a étudié expérimentalement l'influence d'huile lubrifiante sur le comportement de l'usure de PA66. Il a obtenu des résultats qui montrent que le taux d'usure de PA 66 pour un contact lubrifié par de l'huile est plus grand que pour un frottement à sec, ce qui est le cas pour l'eau lubrifiante [53].

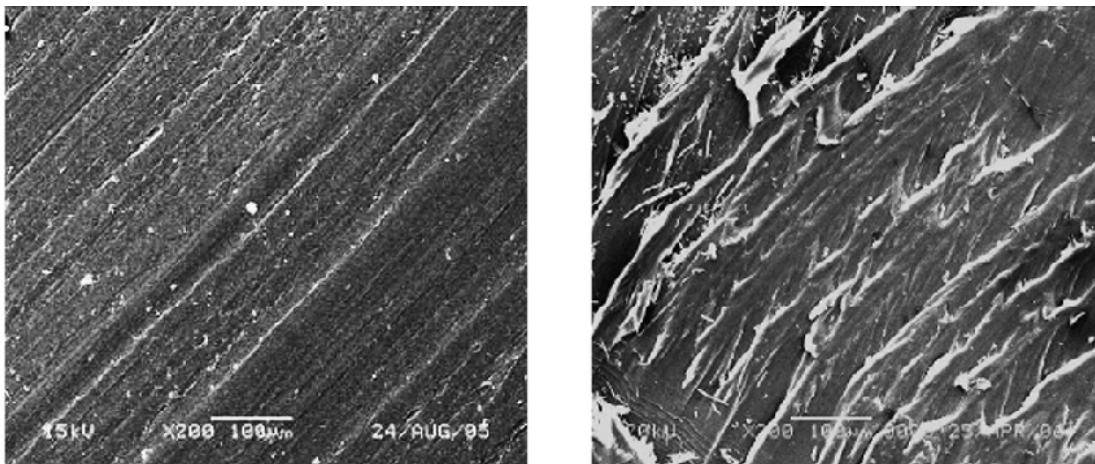


Figure 4.9 : Micrographie de surface de PA 66 usée obtenue par SEM : (a) à sec, (b) condition de lubrification à huile

Les micrographies de SEM des surfaces usées de PA66 dues au frottement sec et des conditions huile lubrifiant sont donnés dans Fig. 4.9. Il est observé que la surface usée à sec est caractérisée par des stries parallèles à la direction de frottement (Fig. 4.9a), la surface usée est lisse, les marques de la déformation plastique sont observées et aucun débris n'est trouvé dans ces cas (Fig. 4.9b) [53].

4.2.2. Comparaison des résultats pour les trois milieux

Pour bien illustrer l'évolution de l'usure pour les différents milieux, nous présentons les résultats de mesure par perte de poids afin de pouvoir les comparer dans les trois milieux.

L'aspect à reconnaître est que le rapport entre le volume d'usure et la dimension d'usure, telle que la profondeur ou la largeur, n'est pas nécessairement linéaire. C'est un aspect important à maintenir dans l'esprit en traitant des problèmes de technologie, puisque beaucoup de modèles pour des mécanismes d'usure sont formulés en termes de volume, d'où le même aspect pour la mesure d'usure par perte de poids [45].

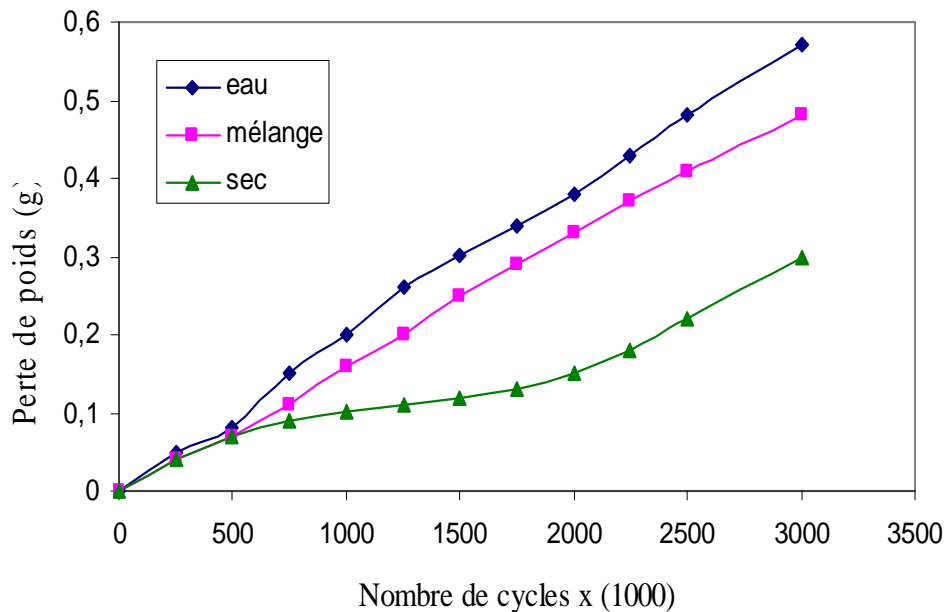


Figure 4.10 : Comparaison de l'évolution de l'usure en fonction du nombre de cycles pour les trois milieux limitée à $3 \cdot 10^6$ cycles

La figure 4.10 représente la comparaison des résultats de mesure dans les trois milieux dont le nombre de cycles est limité jusqu'à trois millions. Nous constatons que l'évolution de l'usure dans la période de rodage semble être la même. Quant à la période normale d'usure et dans le cas du milieu : eau plus détergeant, l'évolution des pertes de cotes est assez réduite par rapport à celle obtenue dans le milieu : eau, ce qui explique que le détergeant contient une certaine viscosité, malgré l'existence de bulles d'air (mousse), permettant de réduire les frottements dans le contact.

Dans le cas de fonctionnement : à sec, nous pouvons constater que les pertes de cotes sont très réduites devant les pertes d'autres milieux. Toutefois, lors du fonctionnement de la machine, la charge appliquée pour les trois milieux vaut 3 kg, mais lorsque nous rajoutons de l'eau (milieux : eau et eau + détergeant) et sachant que le poids (truc massif constitue la charge appliquée) pouvant absorber de l'eau, cette charge doit évidemment augmenter et devenir de 9 kg environ.

4.2.3. Taux d'usure

L'usure des matériaux plastiques est souvent due à une combinaison d'usure par adhérence et d'usure par abrasion. La part relative de chacune de ces causes pour une application déterminée dépend de nombreux paramètres et est pratiquement impossible à prévoir [21]. Une méthode de calcul traditionnelle pour déterminer l'usure a vu le jour, basée sur l'équation suivante:

$$V_w = kFs \tag{4.1}$$

où k et le taux spécifique d'usure, F effort normal et s la distance de glissement

Il faut cependant reconnaître qu'il est impossible, aussi bien pour le PA 66 que pour les autres plastiques, d'utiliser le facteur d'usure ainsi calculé pour anticiper le comportement de la matière dans une application pratique.

Si cette équation est mise au point pour des profils de dent, le taux spécifique d'usage peut être exprimé par :

$$k = hbd / 2TN \tag{4.2}$$

où h est la profondeur d'usure (comme mesuré dans les essais), b largeur de denture, d le diamètre primitif d'engrenage, T le couple de transmis, et N est le nombre de cycles correspondant à l'usure h [45].

Les résultats d'usure pour les essais d'engrenage de PA peuvent être rendus comme taux d'usure.

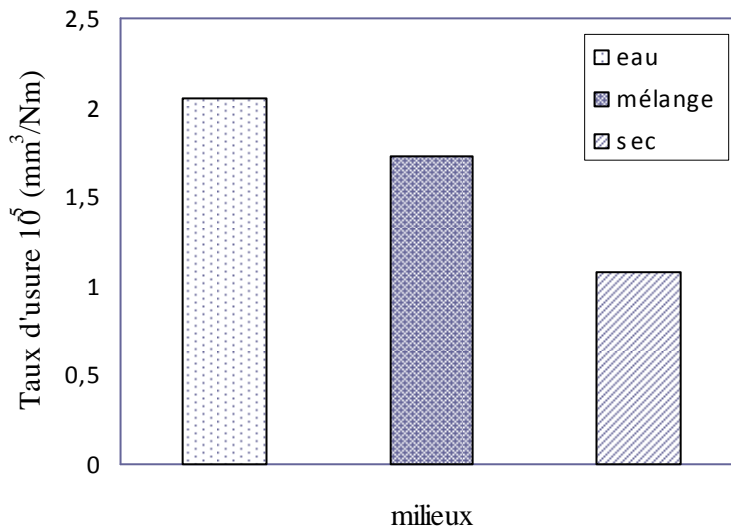


Figure 4.11 : Taux spécifiques d'usure des engrenages en PA66

Les taux spécifiques d'usure des engrenages de PA66 pour les 3 cas : à sec, mélange et dans l'eau lubrifiant sont montrés sur la figure 4.11. Là, nous constatons que le taux d'usure des engrenages de polyamide est d'autant plus grand pour le cas de l'eau que pour le cas de

contact à sec. Ainsi, le taux d'usure concernant le mélange est compris entre les deux taux déjà cités.

Dans les conditions de frottement sec, le coefficient de frottement de PA66 est de 0.6 environ. Quant aux conditions d'eau lubrifiant, le coefficient de frottement est en-dessous de 0.2, ce qui signifie que le coefficient de frottement de PA66 peut être réduit par un ordre de grandeur comparé à celui de frottement pour le cas à sec [55].

La chaleur générée par le frottement a l'effet significatif sur le comportement tribologique du contact polymère-polymère non lubrifié (à sec) [53,54]. D'autre part, la lubrification par eau sert à réduire la chaleur du frottement, autrement dit l'eau joue le rôle d'un lubrifiant réduisant évidemment la zone du contact d'une part, et sert à évacuer la chaleur par refroidissement [56]. Aussi, le lubrifiant par eau augmente le taux d'usure du fait que l'eau est absorbée par les surfaces que constituent les pièces en contact [53]. A noter que le coefficient de frottement sous la condition de l'eau lubrifiant est inférieure à celui dans la condition de frottement sec pour la même charge [56].

4.2.4. Cas particulier (point d'injection)

Les pignons utilisés dans cette expérience contiennent tous une dent subissant une usure significative très notable. Ceci pourrait s'expliquer par l'influence des défauts de formes engendrés lors de fabrication des pignons par l'opération de moulage par injection, sur le comportement du contact de cette dent. Les figures suivantes, représentent l'évolution de l'usure en fonction du nombre de cycles pour la dent concernée. On constate que les pertes de cotes ont évolué de façon plus considérable.

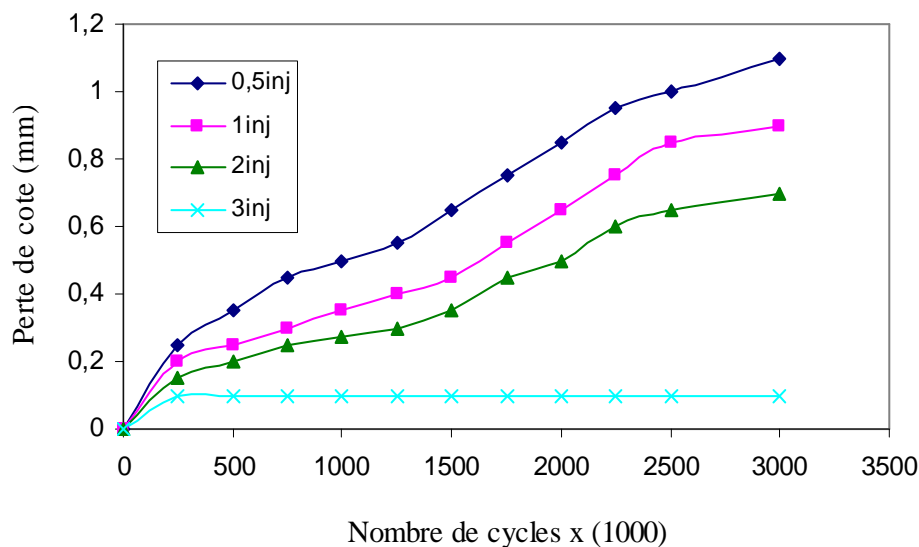


Figure 4.12 : Evolution de l'usure en fonction du nombre de cycles pour la dent du point d'injection : cas de l'eau (Pignon 1)

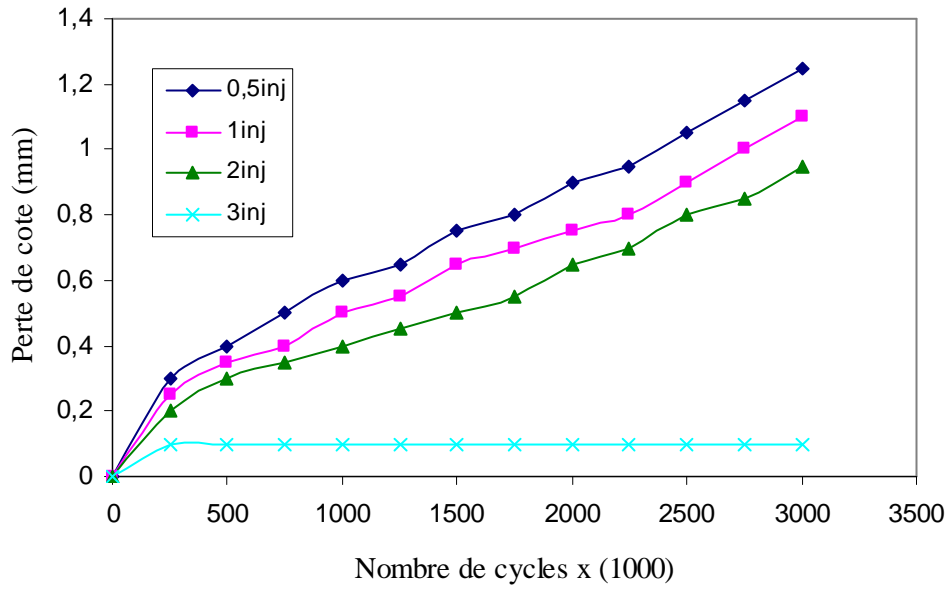


Figure 4.13 : Evolution de l'usure en fonction du nombre de cycles pour la dent du point d'injection : cas de l'eau (Pignon 2)

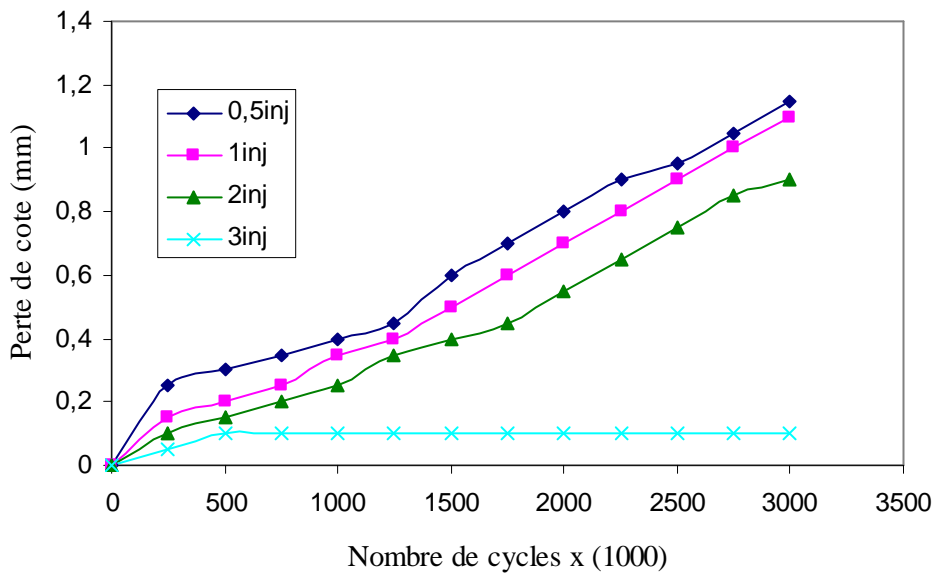


Figure 4.14 : Evolution de l'usure en fonction du nombre de cycles pour la dent du point d'injection : cas d'un mélange d'eau et détergent

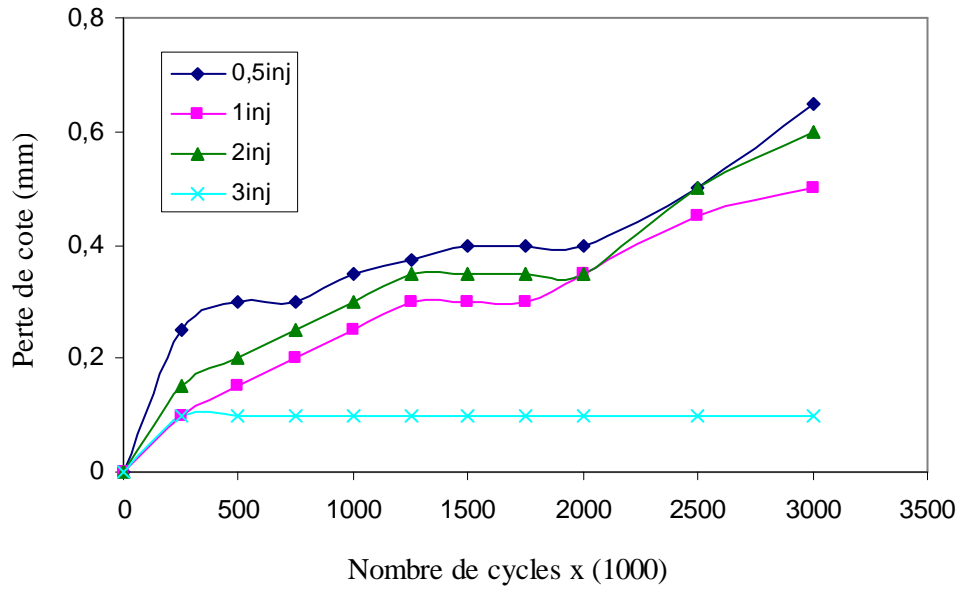


Figure 4.15 : Evolution de l'usure en fonction du nombre de cycles pour la dent du point d'injection : cas a sec

Pendant le moulage par injection, une couche dure est formée sur la surface due au refroidissement soudain de la fonte de polymère. Cette couche joue également un rôle important dans les caractéristiques de frottement pour PA66 d'autant plus que dans le cas des contacts secs [50].

• **Comparaison**

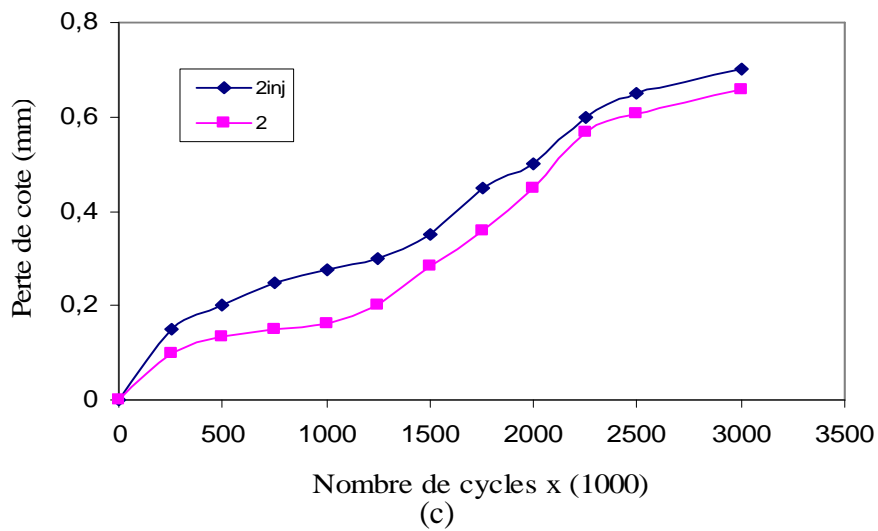
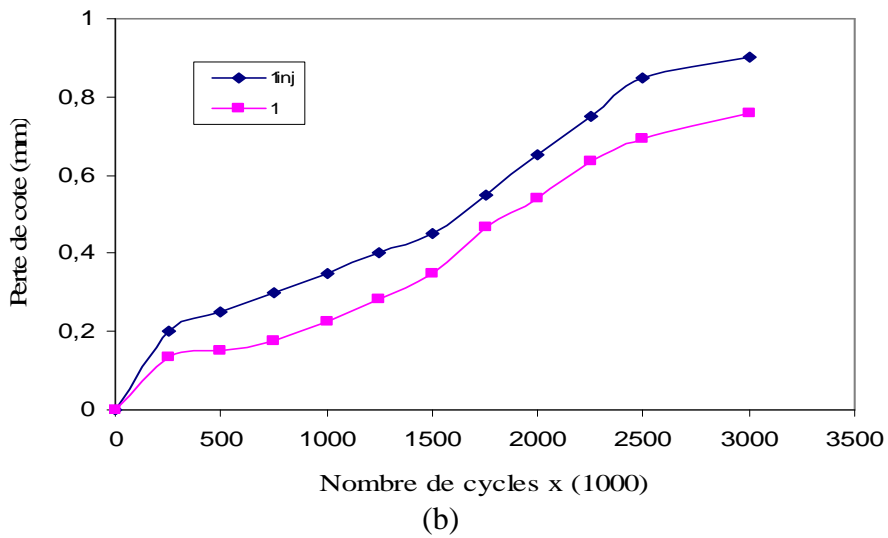
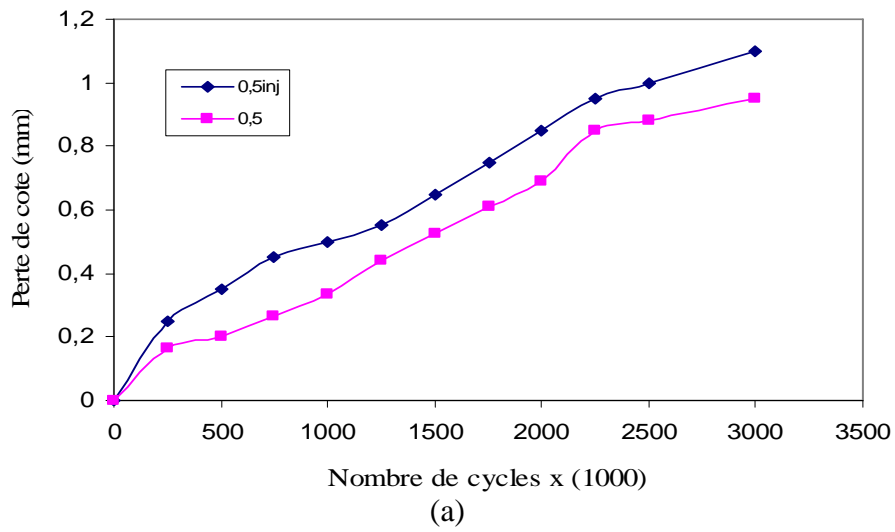
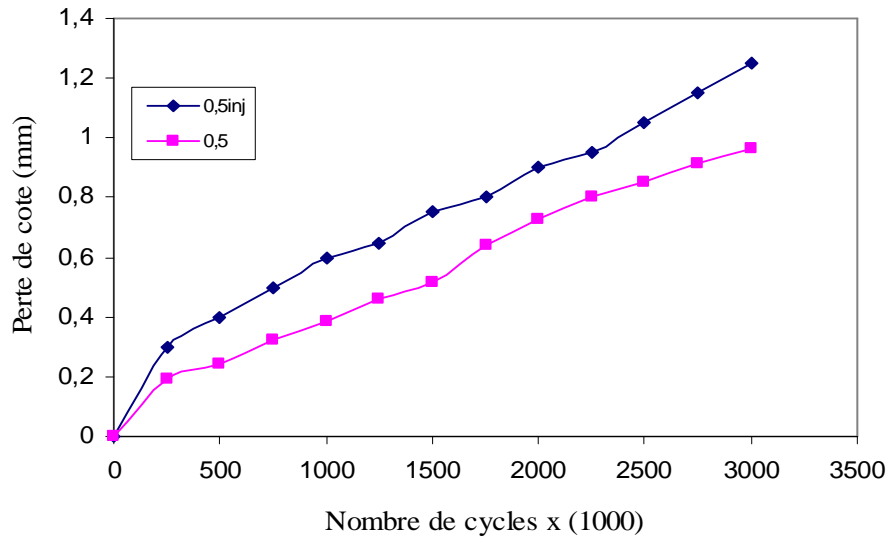
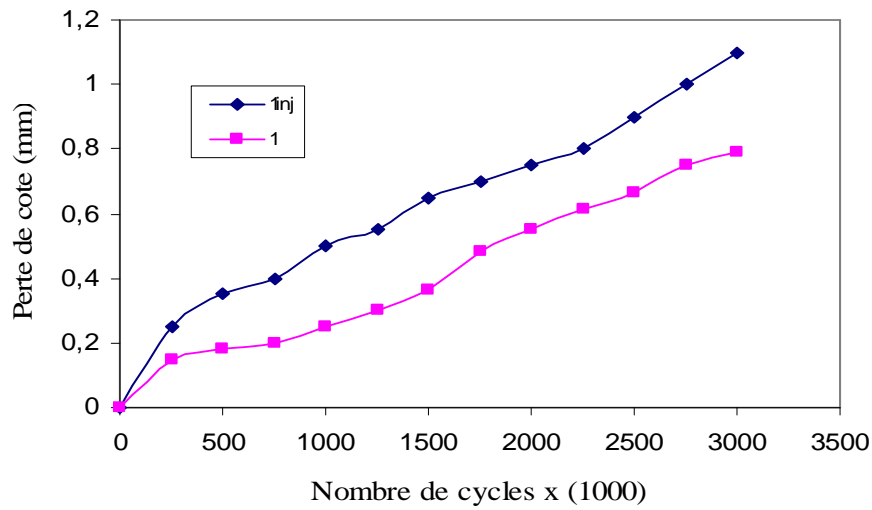


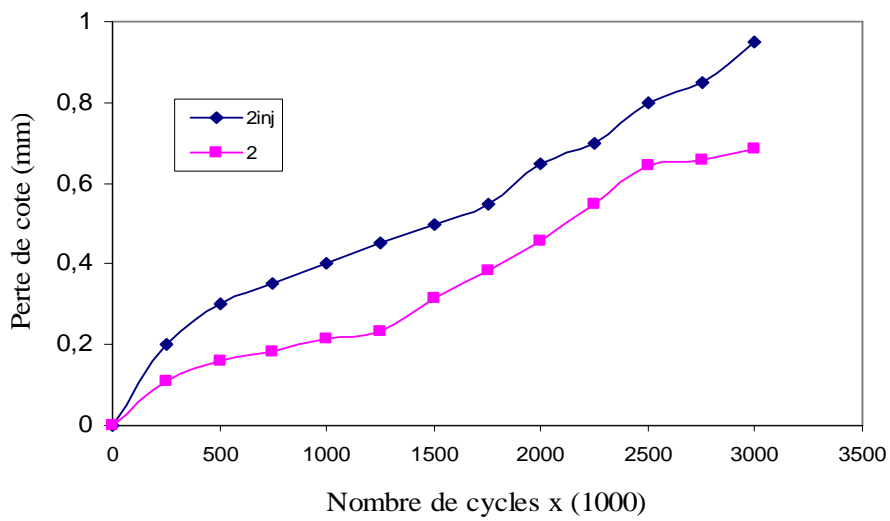
Figure 4.16 : Evolution de l'usure en fonction du nombre de cycles pour le cas d'eau (Pignon 1) à différents niveaux : (a) niveau 1, (b) niveau 2, (c) niveau 3



(a)

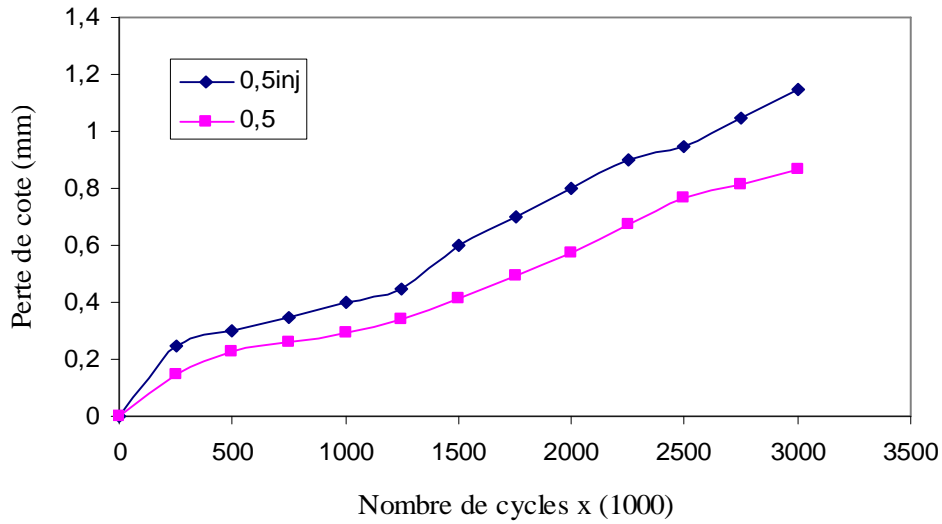


(b)

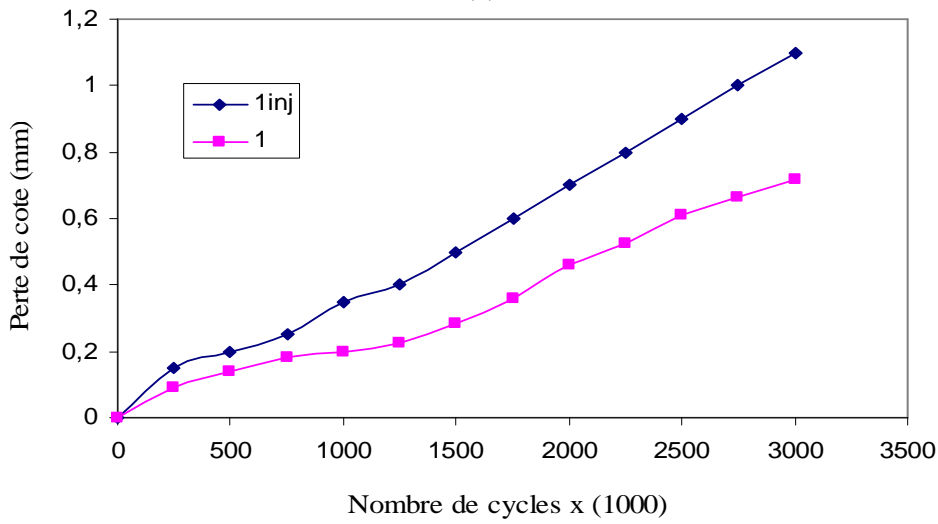


(c)

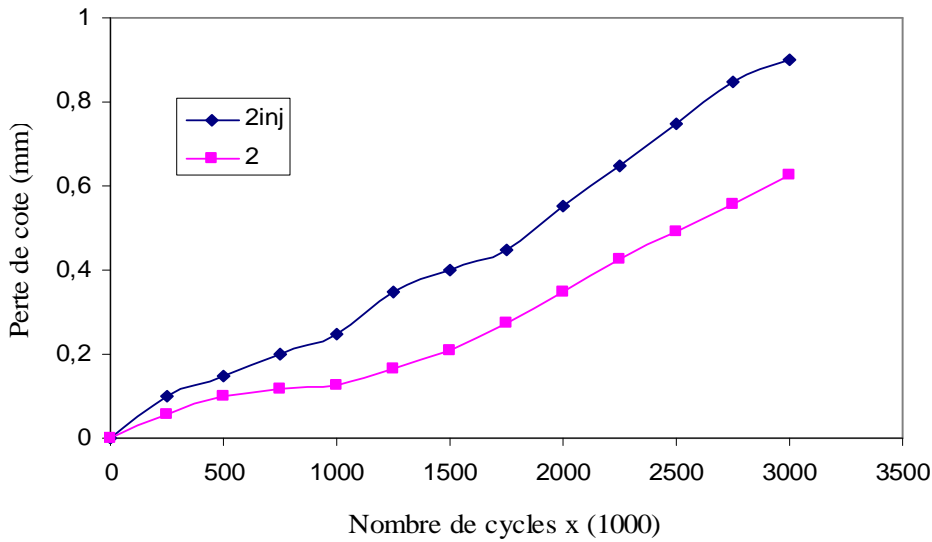
Figure 4.17 : Evolution de l'usure en fonction du nombre de cycles pour le cas d'eau (Pignon 2) à différents niveaux : (a) niveau 1, (b) niveau 2, (c) niveau 3



(a)



(b)



(c)

Figure 4.18: Evolution de l'usure en fonction du nombre de cycles pour le cas d'un mélange eau et détergent à différents niveaux: (a) niveau 1, (b) niveau 2, (c) niveau 3

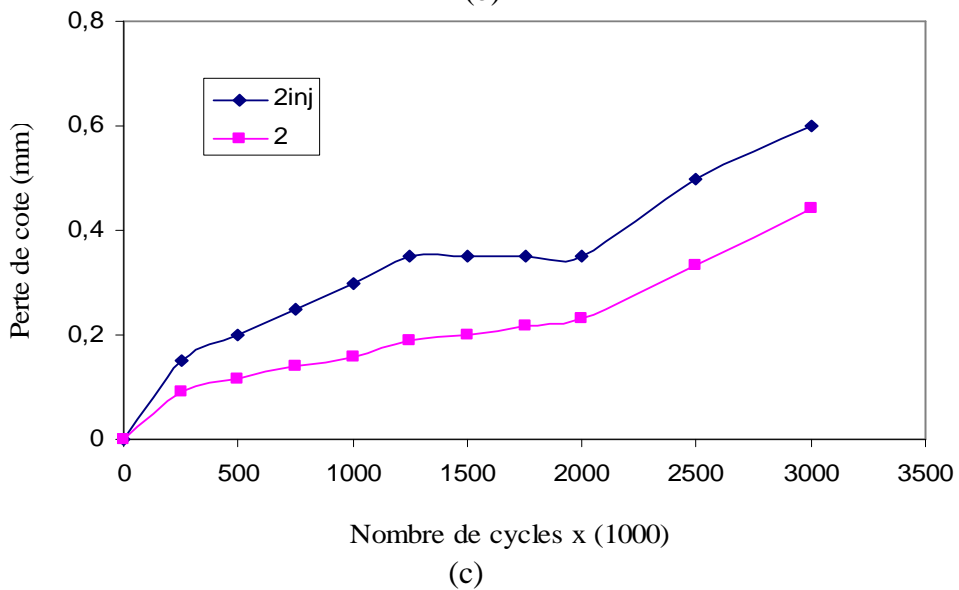
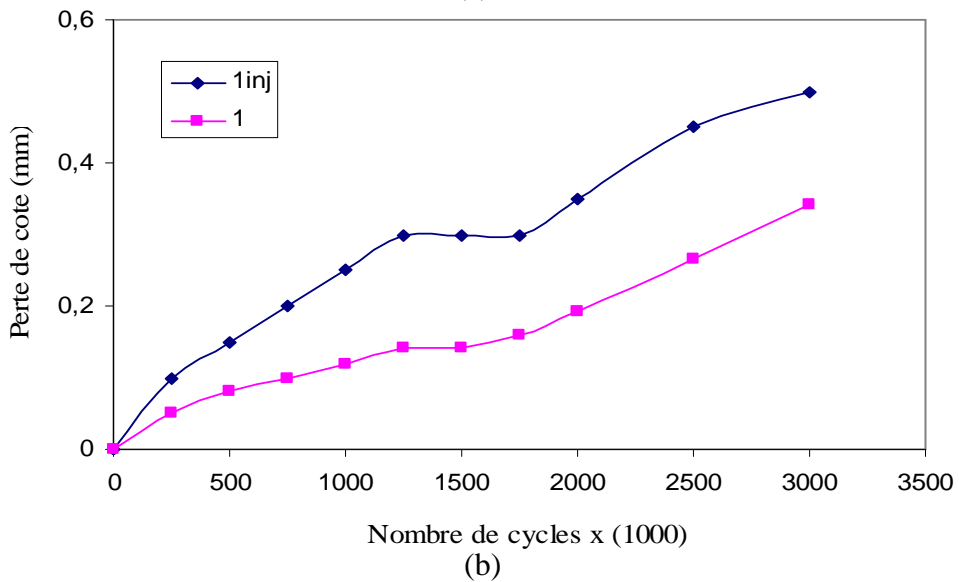
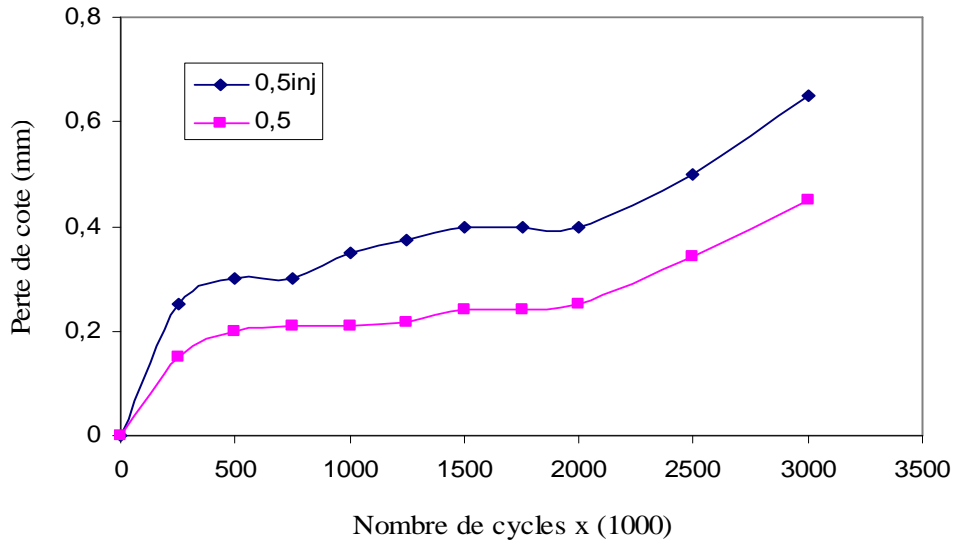


Figure 4.19 : Evolution de l'usure en fonction du nombre de cycles pour le cas à sec à différents niveaux:(a) niveau 1, (b) niveau 2, (c) niveau 3

Une comparaison s'avèrerait utile entre l'évolution de l'usure du cas particulier, c'est-à-dire la dent à partir de laquelle est injectée la matière fondue (polyamide) à mouler, et celles des autres dents, pour les trois cas étudiés (eau, mélange et à sec). Là, nous pouvons constater une usure plus apparente dans le cas particulier avec un écart maximal de 0.271 et un écart minimal de 0.024 environ, et ceci pour les différents niveaux de mesure.

En ce qui concerne les mesures prises aux niveaux n°4 distant de 3 mm de la tête, nous n'avons pas eu à présenter une comparaison, du fait que l'évolution de l'usure n'est estimable que pendant le démarrage d'essai (rodage), ce qu'il s'agit en fait, d'avoir des courbes complètement superposées dont l'évolution de l'usure est presque nulle.

Du point de vue expérimental, pour un engrenage en acier, les pertes de cotes sont de plus en plus importantes, dans les profils de la racine par rapport à celles qui apparaissent à tête de la dent, mais elles sont très faibles au diamètre primitif [57], ce qui n'est plus le cas pour un engrenage en polyamide qui subit une usure importante dans la tête en comparaison avec celle de la racine de la dent (Fig. 4.20).

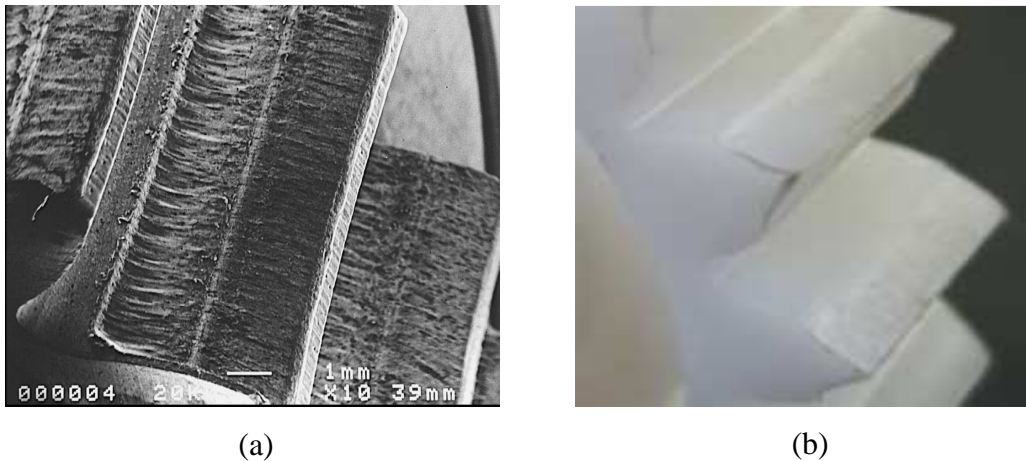


Figure 4.20 : Profils de dents d'engrenage usés : (a) en acier, (b) en polyamide

L'usure des polymères peut être due aux principaux mécanismes suivants : la déformation plastique, l'adhérence et l'abrasion. Le mécanisme de déformation implique la dissipation complète de l'énergie dans la zone de contact. Le mécanisme d'adhérence est responsable de la majeure partie d'usure du polymère, cette usure manifestée par le transfert et le dépôt du matériau d'une dent vers l'autre. Et est un résultat de la rupture des liaisons de faibles forces entre les chaînes de polymère [58]. Le mécanisme d'abrasion résulte lorsque la nature du mouvement trouvé dans le contact des dents est une combinaison du glissement et du roulement, ce qui favorise le processus d'abrasion, ce mécanisme se manifeste par deux voix : soit sous l'effet des aspérités des deux dents, ou sous l'effet du troisième corps qui est cause par l'arrachement de la matière.

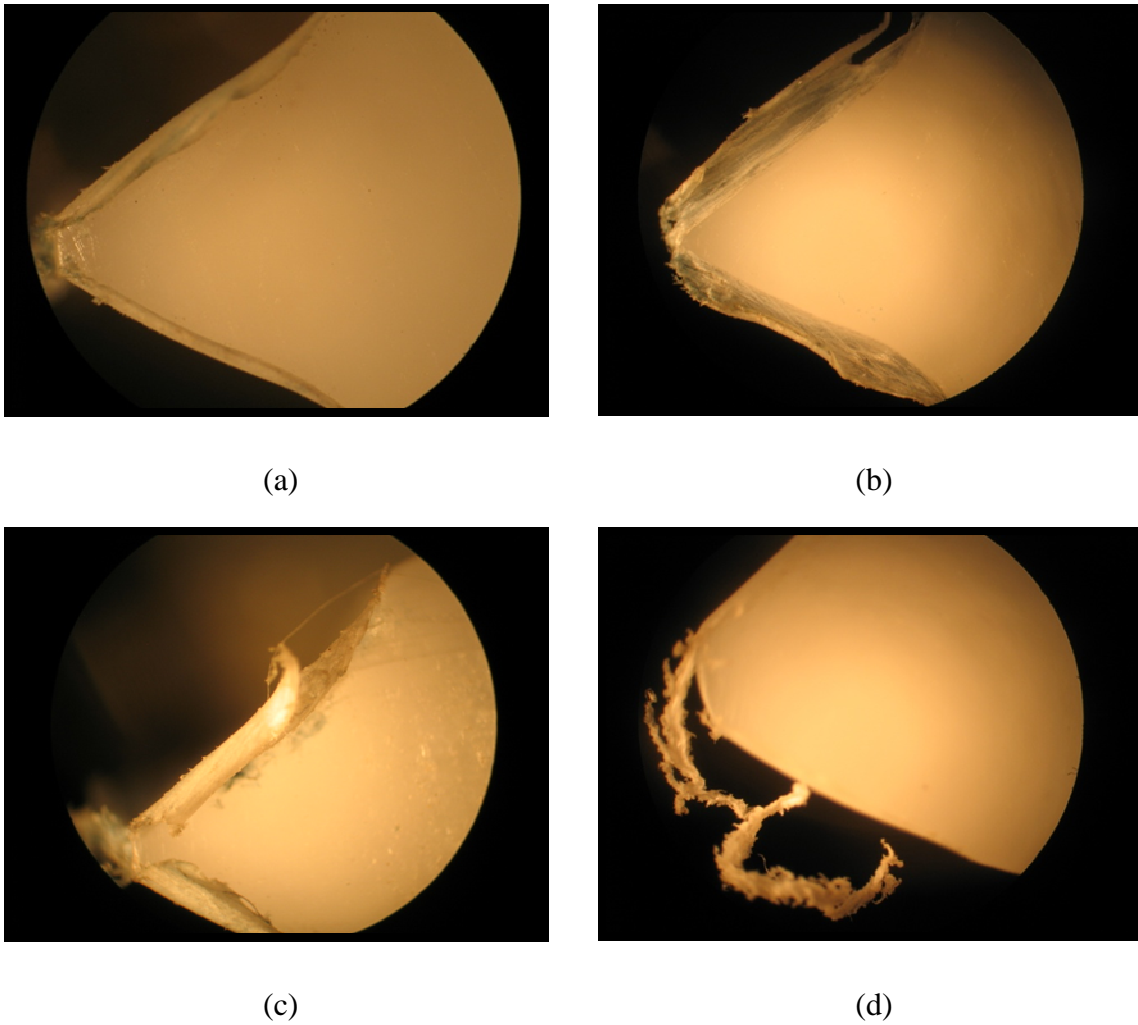


Figure 4.21 : différentes forme d'usure des dents

Les engrenages en contact secs ou lubrifiés sont presque toujours soumis à l'usure douce. L'usure des flancs des engrenages est toujours non uniforme (Fig. 4.21a) dû aux conditions variables de glissement et de roulement entre les dents d'engrenages agissantes l'une sur l'autre [59]. Ce qui favorise la modification du profil des dents de l'engrenage, par conséquence les changements de profil dus à l'usure peuvent être nocifs pour les conditions de contact.

5.1. Introduction

L'analyse de la fiabilité est un outil très intéressant pour la conception et la maintenance des structures. Elle a l'avantage de considérer la structure à travers deux points de vue : *coût* et *sûreté*. Au moyen des concepts de fiabilité, l'optimisation peut être effectuée sans perte de sécurité. Toutefois, l'analyse de la fiabilité nécessite un niveau élevé de compétence technique. Ce qui rend ces méthodes peu utilisées en industrie, elles sont réservées jusqu'à présent aux laboratoires de recherche spécialisés. Actuellement, les concepteurs commencent à sentir le besoin d'un outil simple et pratique pour examiner la fiabilité de leurs systèmes et installations mécaniques.

La fiabilité structurale apparaît de faible enjeu dans ce contexte, mais ce serait oublier que certaines catastrophes ne concernent pas uniquement une installation, mais également son environnement. C'est le cas par exemple des risques industriels induisant une pollution qu'il n'est pas possible de contenir, telles que les marées noires ou les pollutions radioactives. Ce serait également oublier la localisation de forts risques naturels tels que les séismes ou les inondations.

La conception et le dimensionnement des structures et la prévision de leur bon fonctionnement conduisent à la vérification de règles résultant de la connaissance physique, mécanique et experte des constructeurs. Elles traduisent, sous des formes plus ou moins complexes, la nécessité de limiter des variables de sollicitations telles que les contraintes et les déplacements [60].

Chaque règle représente un événement élémentaire et leurs enchaînements sont définis comme des scénarios de défaillance. La vérification d'une règle de dimensionnement traduit simplement la vérification d'un mode potentiel de défaillance parmi d'autres possibles.

La connaissance des variables entrant dans l'écriture d'un scénario de défaillance n'est, au mieux, qu'une connaissance statistique et nous admettons une représentation par variables aléatoires. L'objectif est alors d'évaluer une probabilité, celle de se trouver dans une situation de défaillance.

La défaillance se produit parce que la marge de sécurité est inférieure au niveau adéquat permettant de couvrir les incertitudes normales sur les charges et les résistances. La nature des erreurs humaines ou erreurs grossières diffère de ces phénomènes et des variabilités et des incertitudes normales des fabrications. Ainsi, différentes mesures de la sécurité sont requises pour le contrôle des risques induits par des erreurs.

5.2. Fiabilité des structures

5.2.1. Concept de la fiabilité

Il faut s'assurer que la maîtrise de l'incertain est suffisante pour que les risques soient bien évalués et restent acceptables. C'est l'objet des théories de la fiabilité.

Une définition technique de la fiabilité est donnée par l'AFNOR [61] : « *aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise dans des conditions données, pendant une durée donnée...le terme est aussi utilisé comme caractéristique désignant une probabilité de succès ou un pourcentage de succès* ».

Cette distinction montre l'intérêt d'une définition qualitative (aptitude) et d'une définition quantitative (probabilité) étroitement associées. Une telle définition tranche

immédiatement un débat possible en associant la maîtrise de l'incertain à une modélisation probabiliste.

La fiabilité peut être considérée comme un élément d'un ensemble plus vaste constituant la sûreté de fonctionnement qui se décline elle-même en fiabilité, en maintenabilité (aptitude d'un dispositif ou d'un bien à être maintenu ou rétabli en vue d'accomplir une mission requise), en disponibilité (aptitude d'un dispositif ou d'un bien à accomplir une mission requise à un instant donné) et, enfin, en sécurité (relative aux risques de dommages corporels, matériels et environnementaux liés au dispositif ou au bien considéré).

Dans l'analyse de la fiabilité des structures, les paramètres influents sont considérés comme des variables probabilisées et l'on calcule la probabilité de défaillance et des inspections, la durée de vie résiduelle, etc ... Le retour d'expérience et la connaissance des cinétiques de dégradation sont deux des conditions essentielles d'application de l'analyse de fiabilité des structures.

Le dimensionnement des structures est fondé sur une démarche réglementaire dans les calculs afin de respecter des marges importantes pour garantir leur intégrité. Ce dimensionnement ne permet pas d'évaluer le risque lié à la défaillance d'une structure, sa fiabilité, il donne généralement une marge volontairement pessimiste vis-à-vis des différents modes de ruine possibles et conduit le plus souvent à des surdimensionnements injustifiés, donc à des surcoûts. En outre, certains chargements peuvent être ignorés au moment de la conception et découverts seulement à l'exploitation.

La démarche probabiliste de fiabilité des structures, s'avère alors essentielle, le risque est évalué sous la forme d'une probabilité et non plus sous la forme d'un jugement binaire (le dimensionnement est acceptable ou non, l'exploitation peut être poursuivie ou non). Le calcul de cette probabilité permet de réduire le risque de défaillance par l'organisation des programmes de maintenance et d'inspection, de prolonger la durée d'exploitation en optimisant leur utilisation.

Pour chaque règle de dimensionnement, on définit un scénario de défaillance au moyen d'une fonction de performance $G(x_i) = R(x_i) - S(x_i)$ (x_i étant les variables aléatoires de base, $R(x_i)$ la résistance et $S(x_i)$ la sollicitation). L'inégalité $G(x_i) > 0$ indique l'état de sécurité, alors que $G(x_i) \leq 0$ traduit l'état de défaillance. La connaissance des variables entrant dans l'écriture d'un scénario de défaillance n'est souvent qu'une information statistique. L'objectif est alors d'évaluer une probabilité P_f , celle de se trouver dans une situation de défaillance. Dans le cadre de l'approximation du premier ordre, le calcul de P_f est équivalent à l'évaluation d'un indicateur appelé indice de fiabilité β . Cet indice est calculé par la résolution d'un problème d'optimisation sous limitations [61].

Quand le fonctionnement du système dépend de son état mécanique, il existe une interdépendance entre les rôles mécanique et fiabiliste des variables de conception, c'est le couplage mécano-fiabiliste.

5.3. Probabilité de défaillance

Le scénario de fonctionnement est la disponibilité d'une résistance supérieure à la sollicitation, i.e.:

$$G(r, s) = r - s > 0 \quad (5.1)$$

et le scénario de non fonctionnement, ou de défaillance, est alors:

$$G(r, s) = r - s \leq 0 \quad (5.2)$$

La mesure de la défaillance est alors la probabilité associée à l'événement $\{R - S \leq 0\}$, soit:

Probabilité de défaillance:

$$P_f = \text{Prob}(\{R - S \leq 0\}) \quad (5.3)$$

La fiabilité est, pour sa part, définie comme le complément de la probabilité de défaillance:

$$\text{Fiabilité} = 1 - P_f \quad (5.4)$$

R et S sont deux variables aléatoires caractérisées par une densité conjointe de probabilité notée $f_{R,S}(r, s)$.

La probabilité de défaillance P_f , associée à la marge Z , est le poids probabiliste de la partie de l'espace constituée par le domaine D_f :

$$z = r - s \leq 0 \quad (5.5)$$

$$P_f = \text{Prob}(R - S \leq 0) = \int_{r-s \leq 0} f_{R,S}(r, s) dr ds \quad (5.6)$$

Si les deux variables sont statistiquement indépendantes, alors la densité conjointe de probabilité est le produit des densités de chaque variable :

$$f_{R,S}(r, s) = f_R(r) f_S(s) \quad (5.7)$$

En construction, une probabilité de défaillance structurale engendrant un risque de 10^{-7} décès par an apparaît comme une valeur suffisamment forte pour motiver une attention particulière des concepteurs [61]. Ce n'est cependant pas le seul critère et le niveau de fiabilité dépend aussi d'une optimisation économique. Un niveau plus faible est tout à fait acceptable si les risques encourus restent dans des limites géométriques et temporelles strictes. Le tableau 5.1, souvent cité dans les documents concernant les constructions civiles, propose des valeurs d'objectif selon certaines situations en constructions, sans toutefois préciser clairement les durées de référence [62].

Tableau 5.1 : Ordre de grandeur de probabilités cibles en construction

Nombre moyen de personnes mises en danger	Conséquences économiques		
	Sans gravité	Graves	Très graves
Petit (<0,1)	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
Moyen	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
Grand (>0,1)	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}

Même si l'expression (5.6) peut paraître assez simple, son évaluation est extrêmement coûteuse en temps de calcul, car il s'agit d'une quantité très petite et car toute l'information nécessaire sur la densité conjointe de probabilité n'est pas disponible. Pour ces raisons, des méthodes plus efficaces ont été développées, elles sont connues sous le nom *FORM/SORM* (*First/Second Order Reliability Methods*). Ces méthodes se basent sur le calcul d'une certaine mesure de la fiabilité appelée *indice de fiabilité*, noté β , suivi par une approximation de la probabilité de défaillance. L'organigramme (Fig. 5.1) illustre la démarche du calcul fiabiliste. Après la collecte des informations disponibles sur le système, la première étape consiste à définir les modèles mécanique et probabiliste à utiliser dans l'analyse. Ces deux modèles sont complétés par la définition des scénarios de défaillance potentiels, pour former ce que nous appelons *le modèle mécano-fiabiliste*. A défaut d'intégration directe de la probabilité de défaillance (ce qui est très rare), des techniques de simulations de Monte Carlo peuvent être utilisées pourvu que le coût du calcul mécanique reste faible [63].

Dans les cas réels, le calcul de l'indice de fiabilité est un moyen efficace pour l'analyse des systèmes industriels. Le point de conception est obtenu par un algorithme d'optimisation particulier, permettant de piloter directement ou indirectement le modèle mécanique. A l'issue de cette étape, la probabilité recherchée est estimée soit par les techniques FORM/SORM, soit par des tirages d'importance au voisinage du point de conception.

En plus du niveau de fiabilité, la procédure permet au concepteur d'accéder aux facteurs d'importance des différents paramètres mécaniques et probabilistes. Ces informations sont essentielles pour l'optimisation du système en tenant compte des incertitudes aux différents niveaux de la conception, de la fabrication, de l'installation et de la maintenance.

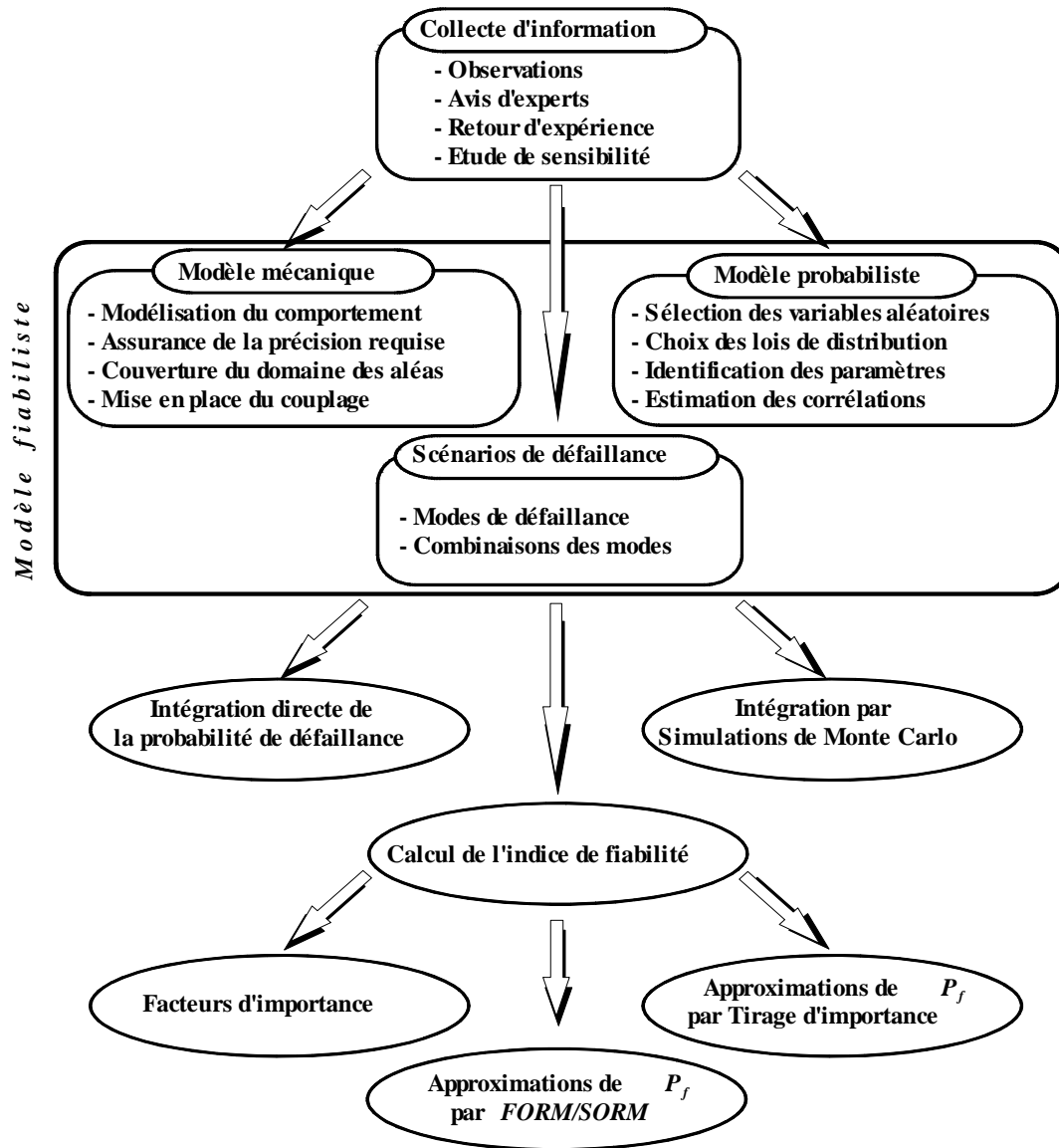


Figure 5.1 : Organigramme de l'analyse fiabiliste des systèmes mécaniques

5.4. Approche fiabiliste en mécanique

Une approche fiabiliste en mécanique est souvent mise en œuvre dans le cadre des contrôles de qualité. Ceux-ci permettent d'observer la dispersion de telle ou telle quantité, de rejeter des réalisations hors tolérance et de suivre leur variabilité. Les statistiques en sont l'outil essentiel et les modélisations par variables aléatoires s'appuient sur un retour d'expérience. L'approche fiabiliste du risque dans le dimensionnement, appliquée à des événements rares, ne permet pas (fort heureusement) un retour d'expériences sur la pièce ou le produit concerné. Elle n'est donc pas une prévision validée par un contrôle statistique.

Elle s'appuie tout d'abord sur une connaissance statistique de variables élémentaires (ou variables de base) entrant dans la modélisation mécanique.

Les variables de base intervenant dans l'équation de défaillance, sont des variables physiques:

- La géométrie;
- Les propriétés des matériaux, notamment les cinétiques de dégradation, les coefficients des lois de dégradation, la limite élastique et la résistance à la rupture;
- Les méthodes de maintenance, d'inspection et leur efficacité.

5.4.1. Incertitudes dans le modèle mécano-fiabiliste

Différents types de classement sont utilisés dans la littérature. Un premier niveau consiste à classer les incertitudes en aléatoires (ou intrinsèques) et en épistémiques. La première catégorie correspond au caractère inhérent (ou irréductible) alors que la deuxième traduit le caractère réductible, en cas d'acquisition de plus de données ou d'informations, d'une meilleure modélisation, ou d'une meilleure estimation des paramètres.

Une autre façon de classer les incertitudes consiste à les regrouper en deux catégories en fonction de leur rôle dans l'état de la structure :

Variabilités externes

Les variabilités qui n'affectent pas l'état interne de la structure sont appelées: *variabilités externes*. A titre d'exemple, nous pouvons citer les actions naturelles et les charges de fonctionnement.

Variabilités internes

Les variabilités qui modifient l'état interne de la structure sont appelées: *variabilités internes*. Dans cette catégorie, nous avons tous les paramètres intervenant dans le calcul de la rigidité:

- les propriétés des matériaux: module d'élasticité, coefficient de Poisson, masse volumique, coefficient de dilatation thermique, ...
- les paramètres géométriques: ils sont simples tels que les dimensions, ou composés tels que les aires et les inerties,
- les conditions aux limites et les liaisons internes.

5.5. Méthodes de calcul de la fiabilité

L'analyse fiabiliste des systèmes mécaniques fait intervenir différents niveaux de complexité d'ordre probabiliste et mécanique. La complexité du modèle probabiliste dépend des distributions des variables, de leurs limitations physiques et de leur interdépendance. La complexité du comportement mécanique découle des phénomènes transitoires et non linéaires. Le couplage des modèles mécaniques et probabilistes est donc une étape primordiale pour l'analyse des systèmes industriels. La qualité des résultats de l'analyse de la fiabilité dépend directement de la qualité des informations disponibles, une connaissance de plus en plus fine améliore les résultats, mais elle exige des développements spécifiques et des procédures adaptées. Pour réaliser le couplage mécano-fiabiliste, différentes approches sont possibles. Il est très difficile d'identifier une approche comme étant la meilleure; certaines approches nécessitent le calcul des gradients, d'autres sont plus générales mais plus coûteuses, ... etc. Dans cette étude, deux approches sont expliquées.

5.5.1. Indice de fiabilité de Hasofer & Lind

Dans l'optique de fournir une mesure représentative et invariante de la fiabilité, Hasofer et Lind [63] ont proposé de ne pas se placer dans l'espace des variables physiques mais d'effectuer un changement de variables et de se placer ainsi dans l'espace des variables gaussiennes centrées réduites (c'est-à-dire de moyennes nulles, d'écart-types unitaires) et statistiquement indépendantes. La transformation des variables x_j en variables normées u_i est écrite par:

$$u_i = T_i(x_j) \quad (5.8)$$

Cette transformation est nommée **transformation isoprobabiliste**, elle est illustrée sur la figure 5.2. Dans ce nouvel espace, la fonction d'état limite prend la forme :

$$G(x_i) = G(T_i^{-1}(u_j)) \equiv H(u_j) = 0 \quad (5.9)$$

La probabilité de défaillance s'écrit:

$$P_f = \int_{H(u) \leq 0} \phi_n(u) du_1 \cdots du_n \quad (5.10)$$

où $\phi_n(u)$ est la fonction de densité de la loi normale centrée réduite à n dimensions.

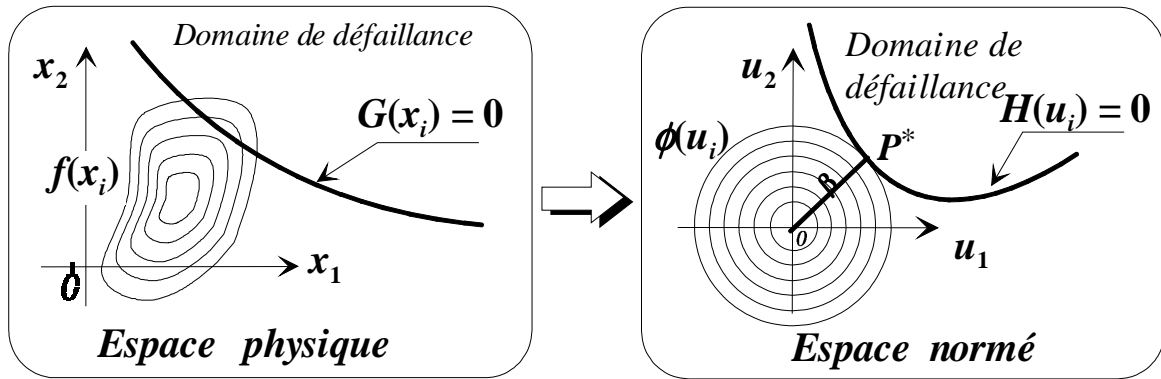


Figure 5.2 : Transformation isoprobabiliste $T_i(x_j)$

Selon la définition de Hasofer et Lind, l'indice de fiabilité β est la distance minimale entre l'origine et le domaine de défaillance $H(u_i) \leq 0$ dans l'espace normé. Cette distance définit un hyperplan tangent à la fonction d'état limite et un point P^* , dit *point de conception* ou *point de défaillance le plus probable* (Fig. 5.2).

Trouver β est donc un problème d'optimisation sous contrainte :

$$\beta = \min_{\{u\}} d(\{u\}) = \sqrt{\{u\}^t \{u\}} \quad (5.11)$$

sous la contrainte : $H(\{u\}) \leq 0$

La recherche du point P^* peut être effectuée par une méthode d'optimisation adaptée à la forme particulière du problème.

Une première approximation de P_f est obtenue en remplaçant l'état limite $H(u_i) = 0$ par un hyperplan tangent au point de conception P^* ; c'est la Méthode de Fiabilité du Premier Ordre, **FORM** (*First Order Reliability Method*). En tenant compte de la propriété de symétrie rotationnelle de la densité de probabilité standard, nous pouvons estimer cette probabilité par :

$$P_f \approx \Phi(-\beta) \quad (5.12)$$

où $\Phi(\cdot)$ est la fonction de répartition de Gauss. Le degré de précision de cette approximation est fonction de la non linéarité de l'état limite.

Pour déterminer l'importance des variables, nous devons évaluer les cosinus directeurs du vecteur unitaire normal à la fonction de performance dans l'espace normé. Le poids de chacune des variables aléatoires normées dans l'évaluation de l'indice de fiabilité s'écrit [63]:

$$\alpha_i = -\left. \frac{\partial \beta}{\partial u_i} \right|_{P^*} = -\frac{u_i^*}{\beta} \quad (5.13)$$

où α_i est le cosinus directeur de la variable u_i et P^* est le point de conception.

5.5.2. Méthode de l'indice de Cornell

Le principe de l'indice de fiabilité de Cornell (ou simplement: *indice de Cornell*) consiste à mesurer la distance entre le point moyen de la marge $G(x_i)$ et le point où la marge devient nulle (point de défaillance), cette distance est mesurée en nombre d'écart-types. En d'autres termes, pour évaluer la fiabilité, on détermine combien d'écart-types séparent l'état moyen de fonctionnement de celui de défaillance. Si m_G et σ_G représentent respectivement la moyenne et l'écart-type de la marge G (Fig. 5.3), l'indice de Cornell β_C s'écrit par:

$$\beta_C = \frac{m_G}{\sigma_G}$$

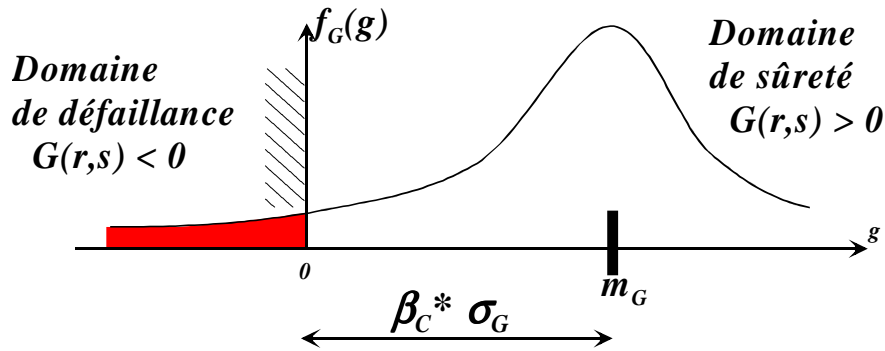


Figure 5.3 : Marge de fiabilité et indice de Cornell

Si la distribution de la marge suit une loi normale, la probabilité de défaillance est directement donnée par :

$$P_f = \Phi(-\beta_C) \quad (5.14)$$

où $\Phi(\cdot)$ est la loi de répartition normale centrée réduite. L'erreur dans cette expression augmente lorsque la marge s'éloigne de la loi normale.

Pour illustrer cet indice, prenons le cas de deux variables gaussiennes indépendantes R et S , de moyennes m_R et m_S , et d'écart-types σ_R et σ_S , respectivement. La marge de sécurité et ses paramètres sont donnés par:

$$\begin{aligned} G &= R - S \\ m_G &= m_R - m_S \\ \sigma_G &= \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \end{aligned} \quad (5.15)$$

L'indice de Cornell prend la forme:

$$\beta_C = \frac{m_R - m_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (5.16)$$

Dans ce cas, la probabilité $P_f = \Phi(-\beta_c)$ est exacte parce que la loi de G est également gaussienne.

Considérons maintenant le cas du même état limite écrit sous une autre forme:

$$G = 1 - \frac{S}{R} \quad (5.17)$$

La loi de G n'est plus normale et la relation $P_f \approx \Phi(-\beta_c)$ devient plus ou moins approximative. Dans ce cas, l'indice de Cornell donne seulement une mesure de la sécurité, qui n'est pas directement liée à la probabilité de défaillance du système [64].

5.6. Modèle mécanique

Le modèle mécanique est développé à partir du modèle proposé par Archard [59] où il a proposé un modèle de conception pour étudier le dimensionnement d'un engrenage. Lorsque deux dents sont en contact, il y a glissement et roulement. A cause de la forme des dents et du mécanisme de fonctionnement, le mouvement relatif engendre de l'usure, donc augmente le jeu entre les dents.

$$W = \sqrt{(W_t)^2 + (W_r)^2} \quad (5.18)$$

$$W_r = W_t \tan \alpha \quad (5.19)$$

$$T = 9550 \cdot \frac{P}{n} \quad (5.20)$$

$$W_t = \frac{2.T}{D_p} \quad (5.21)$$

Avec :

$W (F)$: Charge normale

$W_t (F_t)$: Charge tangentielle

$W_r (F_r)$: Charge radiale

T : couple (N.m)

n : vitesse de rotation (tr/min)

P : puissance (KW)

D_p : diamètre primitif = $m \cdot Z_2$

Z_2 : nombre de dents

$F (b)$: largeur de denture (mm)

Les modèles proposés par Archard sont les suivants :

Modèles d'Archard par perte de poids

$$V = K.F.S \quad (5.22)$$

Où

V est le volume de matière perdu exprimé en mm^3 , K le coefficient d'usure (mm^3/Nm), S la distance de glissement (m) et F la charge normale appliquée en (N).

Modèles d'Archard par perte de cote

D'un point local sur une interaction de la surface, l'équation d'usure d'Archard peut être exprimée comme :

$$\frac{h}{S} = k \cdot p \quad (5.23)$$

où h représente la profondeur de l'usure au point et p est la pression locale.

$$h_p = \int_0^s k \cdot p \cdot ds \quad (5.24)$$

La contrainte de surface engendre une contrainte de cisaillement sous la surface, ce qui cause une microfissure. Lorsque la charge est répétée, la microfissure se propage et arrache des particules de matière. Nous constatons ce phénomène surtout lorsque deux surfaces courbées sont en contact. A cause de la géométrie, les surfaces de contact sont très faibles; par conséquent, même lorsqu'une charge est peu élevée, les contraintes sont très élevées [31]. La pression engendrée est représentée par la formule suivante :

$$p = \sqrt{\frac{w}{\pi b D_p \sin \alpha} \left(\frac{u+1}{u} \right) \frac{2}{(1-\nu_p^2)/E_p + (1-\nu_g^2)/E_g}} \quad (5.25)$$

ν_p et ν_g : Coefficient de Poisson des engrenages (p : pignon, g : roue).

E_p et E_g : module d'élasticité des engrenages

u le rapport de transmission entre les deux engrenages

$$u = \frac{Z_g}{Z_p} = \frac{D_g}{D_p} \quad (5.26)$$

5.7. Modèle de fiabilité

Dans cette section, le modèle probabiliste, devant être utilisé dans des analyses de fiabilité des engrenages, est présenté. Chaque variable de conception doit être représentée par une variable aléatoire, décrite par le type de distribution et les paramètres (généralement, moyenne et écart-type). Des algorithmes spécifiques sont ensuite appliqués pour rechercher la configuration de rupture la plus probable.

Scénario de défaillance

La fonction d'état limite s'écrira

$$G(X) = H_{\max} - H \quad (5.27)$$

La probabilité de défaillance s'écrira

$$P_f = \int_{G(\{X\}) \leq 0} f_{\{X\}}(\{x\}) dx_1 \dots dx_n \quad (5.28)$$

5.8. Résultat et discussion

L'approche probabiliste est de plus en plus utilisée pour calculer la fiabilité des matériaux et des structures. Nous venons de montrer que l'analyse de la fiabilité est un outil très intéressant pour la conception et la maintenance des structures. Elle a l'avantage de considérer la structure à travers deux points de vue : *coût* et *sûreté*.

Connaître le poids d'une variable, c'est identifier l'influence de sa variation sur l'état du système mécanique. Le but d'une telle étude est de sélectionner les variables les plus significatives, ce qui permet de mieux les maîtriser selon leur rôle par rapport au comportement mécanique ou à la fiabilité.

Tableau 5.2 : Liste des variables aléatoires

Numéro	Variable	Valeur	Loi	Moyenne	Ecart-type
1	alfa	20.0000	Normale	20.0000	0.5
2	b	15.0000	Normale	15.0000	0.26
3	E	1000.0000	Normale	1000.0000	45
4	m	3.0000	Normale	3.0000	0.026
5	n	250.0000	Normale	250.0000	15
6	P	0.1000	Normale	0.1000	0.0100
7	S	3.0000	Normale	3.0000	0.1

L'étude de l'importance des variables aléatoires et de leurs paramètres de distribution permet d'avoir une idée claire et précise sur le comportement mécano-fiabiliste. Nous cherchons donc les effets des variations lors de la défaillance du système, c'est à dire au point de défaillance le plus probable.

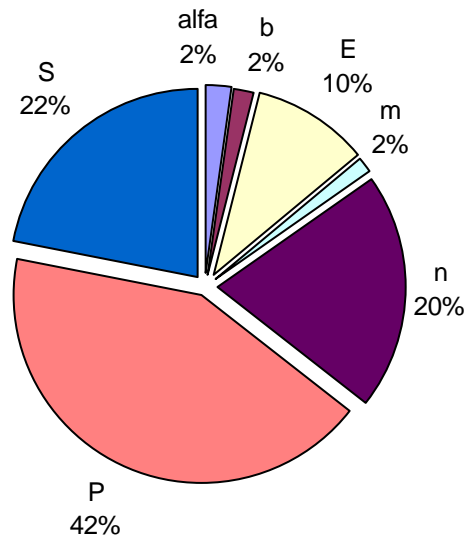


Figure 5.4 : Importance des variables dans la fiabilité des engrenages en PA 66

L'analyse de sensibilité permet de rechercher les variables aléatoires principales dont la dispersion a apporté la contribution significative de probabilité de défaillance de la structure. En effet, la marge de sûreté en dimensionnant d'un engrenage dépend essentiellement de la distance de glissement, de la vitesse de rotation et de la puissance avec 72%, la figure 5.4 exprime clairement l'importance des variables dans la fiabilité des engrenages en PA 66.

L'étude paramétrique réalise une série d'analyses physiques afin d'étudier l'évolution du comportement en fonction des paramètres sélectionnés. L'utilisateur doit spécifier le modèle mécanique et l'état limite, sélectionner les variables et préciser la prise en compte ou non de l'interaction. Dans le but de limiter le volume de calcul, les interactions se limitent aux combinaisons des variables deux à deux.

Les résultats des calculs de fiabilité sont présentés dans les figures ci-dessous (5.5, 5.6, 5.7, 5.8) qui illustrent l'évolution de l'indice de fiabilité en fonction de la puissance pour différents facteurs (n, b, alfa, E), cependant la dernière figure (5.9) représente l'évolution de l'indice de fiabilité en fonction de la charge pour différentes distances de glissement.

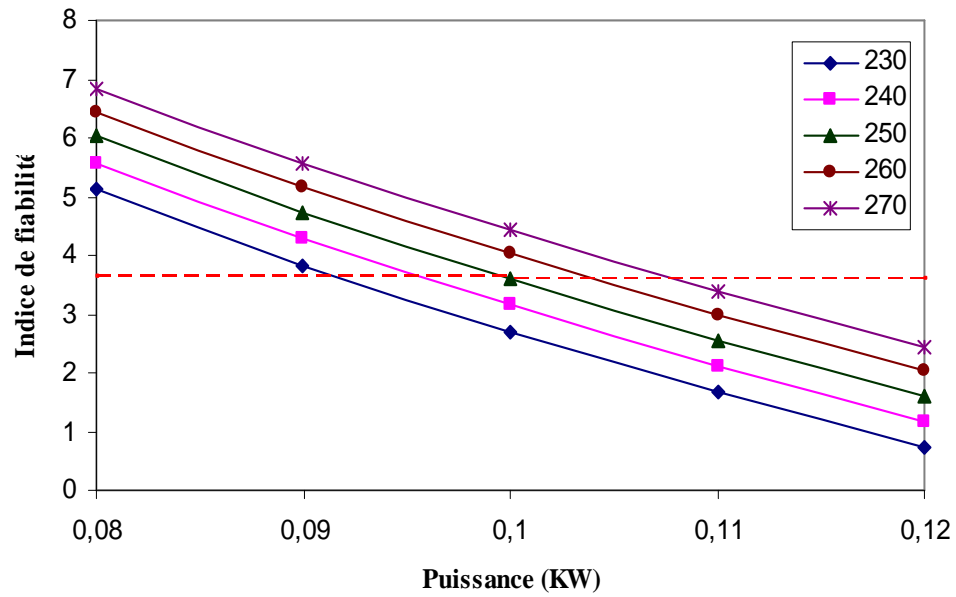


Figure 5.5 : Evolution de l'indice de fiabilité en fonction de la puissance pour différentes vitesses de rotation

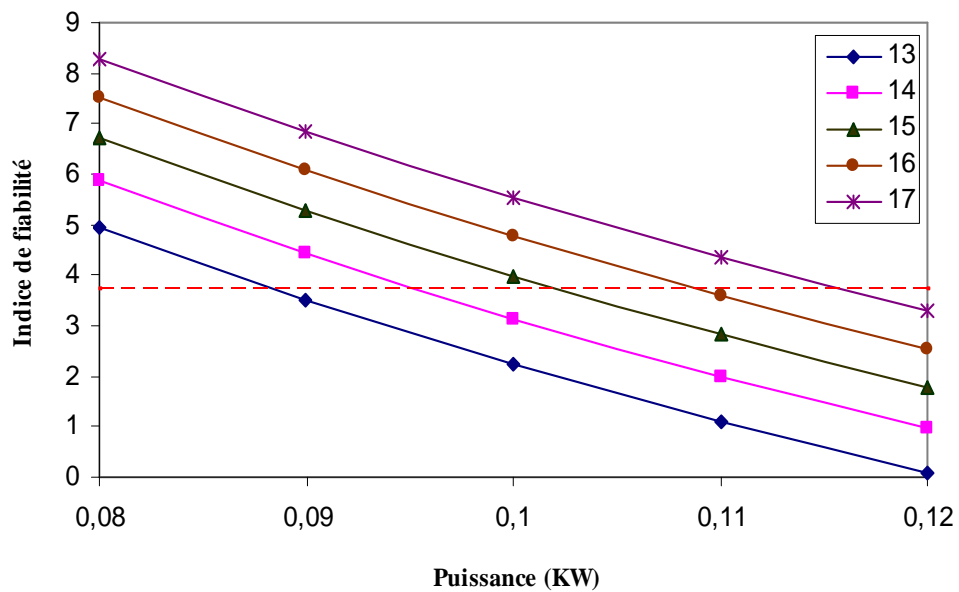


Figure 5.6 : Evolution de l'indice de fiabilité en fonction de la puissance pour différentes largeurs de dents

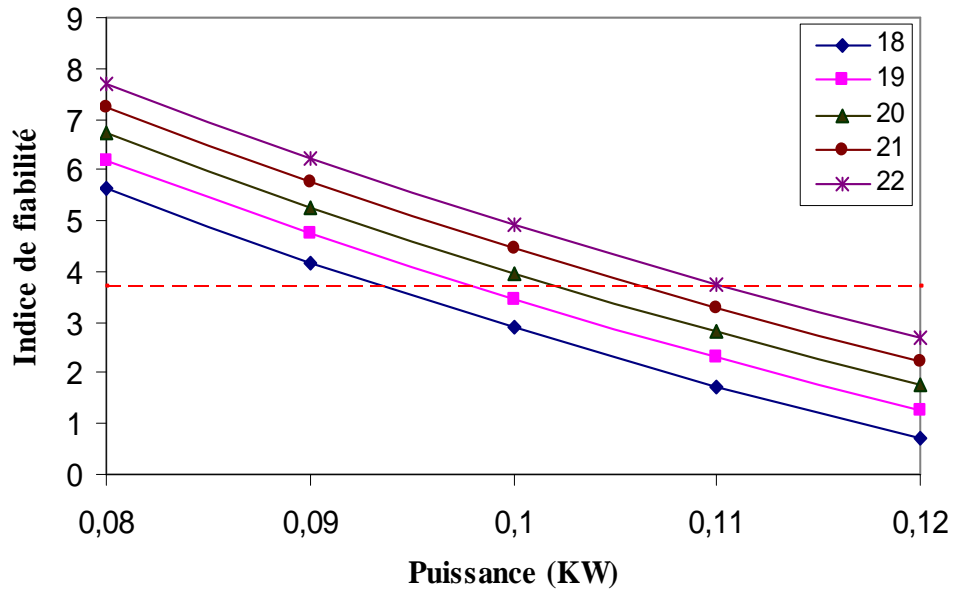


Figure 6.7 : Evolution de l'indice de fiabilité en fonction de la puissance pour différents angles de pression (alfa)

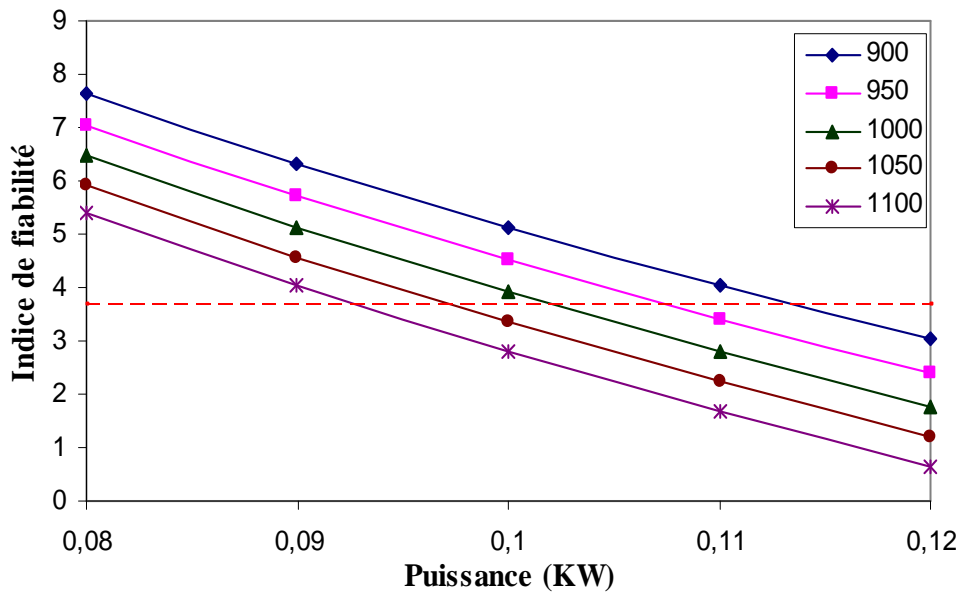


Figure 5.8 : Evolution de l'indice de fiabilité en fonction de la puissance pour différents modules d'élasticité

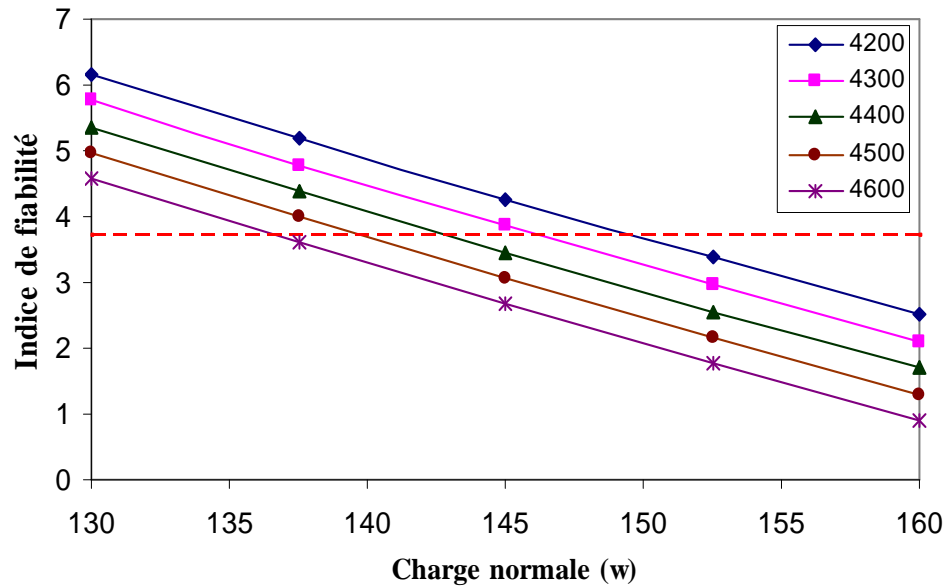


Figure 5.9 : Evolution de l'indice de fiabilité en fonction de la charge pour différentes distances de glissement (sur une seule dent)

Pour calculer la distance de glissement d'une dent en tenant compte qu'elle est symétrique on suppose que l'usure est la même dans les deux côtés. Un des principaux résultats de cette étude réside dans l'utilisation des outils probabilistes pour la qualification des modèles de durée de vie et pour l'évaluation de la sûreté du pignon. Celle-ci est obligatoire pour fournir au concepteur et au service de maintenance, une image réaliste du risque de défaillance des engrenages à différents stades de la durée de vie. Le choix du modèle de durée de vie ne doit pas être seulement basé sur l'équivalence entre les valeurs nominales déterministes, mais il doit également considérer les incertitudes liées aux paramètres d'entrée : géométrie, chargement et matériau.

Selon les données disponibles, les incertitudes des paramètres du modèle devraient être considérées dans l'évaluation de la sûreté du pignon. L'analyse complète montre que l'influence de la charge et la distance de glissement sur la sûreté du pignon sont beaucoup plus grandes que les autres paramètres ; l'augmentation de la vitesse de rotation n , la largeur de la dent b , l'angle de pression α ne fait qu'améliorer l'indice de fiabilité.

5.9. Conclusion

Dans la dernière partie relative à l'introduction de la fiabilité dans le dimensionnement des engrenages en PA 66, il ressort que l'effet de la charge est déterminant pour le calcul de la durée de vie. Nous avons montré que l'indice de fiabilité se dégrade avec la charge. Le but est de sélectionner les variables les plus significatives, ce qui permet de mieux les maîtriser selon leur rôle par rapport au comportement mécanique ou à la fiabilité.

En se basant sur les résultats obtenus par l'étude fiabiliste, P (puissance) avec 42% est la variable la plus importante, suivie de S 22% (distance de glissement), suivie de n 20% (vitesse de rotation) et enfin E 10% (module d'élasticité). Les variables les plus influentes doivent être soumises à de sévères contrôles de qualité; par contre, celles qui jouent un rôle moins important ; α 2% (angle de pression), b 2% (largeur de la dent), m 2% peuvent être moins contrôlées et même supposées déterministes. De telles études ouvrent des perspectives pour l'évaluation basée sur la fiabilité de la durée de vie des engrenages et pour l'analyse de la maintenance basée sur la fiabilité.

Conclusion générale

Cette étude expérimentale a permis d'arriver aux conclusions qui suivent par rapport aux trois cas considérés à savoir (contact sec, contact lubrifié avec eau et lubrifié par un mélange d'eau et de détergent) :

1. Un banc d'essai est mis au point en se basant sur le schéma de principe d'un lave linge de capacité de 3 Kg. Ce banc est adapté à la procédure expérimentale développée dans cette étude. Comme l'objectif est d'établir la loi d'usure en fonction du nombre de cycles de service, le pignon d'entraînement est soumis à la mesure de l'usure des dentures. Pour atteindre cet objectif et mesurer l'usure en fonction du nombre de cycles, une méthodologie contrôlée déployée pour démonter le pignon et le soumettre aux différents protocoles de mesures (poids, dimension, microscopie).

2. Les méthodes développées pour la mesure de l'usure sont :

- Perte de cote des dentures par le biais d'un pied à module. L'erreur calculée est de l'ordre de 1 à 3 % par rapport aux valeurs réelles obtenues par microscope.
- Perte de poids par l'utilisation d'une balance électronique de précision 0.01g
- En utilisant des prises de vues obtenues par microscope à grossissement de 24 x.

En générale, ces trois méthodes confirment les tendances d'usure observées dans les trois conditions d'essai.

3. En ce qui concerne l'influence de l'environnement d'essai sur l'usure, il a été observé que l'air (usure a sec) permet une usure moindre par rapport à l'eau et le mélange eau et détergent. Dans les contacts avec lubrifiant, l'usure revient au fait qu'il existe une absorption remarquable sur les pignons en PA, chose qui est absente dans les contacts non lubrifiés (à sec). D'une autre manière ; l'eau et le détergent pourraient avoir des effets qui dégradent les propriétés des pignons en PA.

4. En se plaçant à une durée de vie de 3.10^6 cycles pour l'usure, à une profondeur de dent de 0.5 mm. Les pertes de cote sont 0.45 mm, 0.95 mm et 0.85 mm respectivement pour l'état à sec, eau, mélange eau et détergent. Ce classement est aussi confirmé par les mesures des pertes de poids qui donne les valeurs de 0.3g, 0.57g et 0.48g.

En ce qui concerne les résultats obtenus dans les contacts à sec et avec eau, ils sont confirmés par la littérature spécialisée. Par contre, notre étude ajoute le cas de détergent car il représente la réalité de fonctionnement des laves linge.

5. Sur les pignons en PA 66, il a été observé une dent particulièrement représentant le point d'injection lors de moulage de la pièce. En suivant l'usure de cette dent, il a été trouvé que cette partie présente plus d'usure dans tous les cas étudiés. Il est probable que cet état résulte des défauts de moulage accumulés à ce point tels que les soufflures d'air. Cet état donne lieu à un matériau non homogène et peu résistant à l'usure.

6. Dans la dernière partie relative à l'introduction de la fiabilité dans le dimensionnement des engrenages en PA 66, il ressort que l'effet de la charge est déterminant pour le calcul de la durée de vie. Nous avons montré que l'indice de fiabilité se dégrade avec la charge. Le but est de sélectionner les variables les plus significatives, ce qui permet de mieux les maîtriser selon leur rôle par rapport au comportement mécanique ou à la fiabilité.

En se basant sur les résultats obtenus par l'étude fiabiliste, P (puissance) avec 42% est la variable la plus importante, suivie de S 22% (distance de glissement), suivie de n 20% (vitesse de rotation) et enfin E 10% (module d'élasticité). Les variables les plus influentes doivent être soumises à de sévères contrôles de qualité; par contre, celles qui jouent un rôle moins important ; α 2% (angle de pression), b 2% (largeur de la dent), m 2% peuvent être moins contrôlées et même supposées déterministes. De telles études ouvrent des perspectives pour l'évaluation basée sur la fiabilité de la durée de vie des engrenages et pour l'analyse de la maintenance basée sur la fiabilité.

Références bibliographiques

- [1] C. Dutriez. Corrélations entre les propriétés diélectriques et mécaniques des polymères ; influence de la température, Thèse de Doctorat, école centrale de Lyon, France, 2004.
- [2] R. Dekiok, Etude et relation de l'influence de la vitesse de déformation sur la dimension fractale et sur la ténacité dans le cas d'un Polycarbonate, Thèse de Doctorat, Université de Metz, France, 1997.
- [3] Document pédagogique, caractéristiques et choix des matériaux, 2006.
- [4] Gottfried W. Ehvenstein, Fabienne Montagne, Matériaux polymères, Structure, propriétés et application, Hermès, Paris, 2000.
- [5] Rémie Detene Ferard Froyer, Introduction aux matériaux polymères, Technique et Documentation, Paris, 1997.
- [6] M. Carrega, Les polymers de la molécule à l'objet, EDP Science, Cedex, France, 1999.
- [7] C. OUDET, Polymères – Structure et propriétés: introduction, Masson, 1994.
- [8] José Martín Herrera Ramirez, Les mécanismes de fatigue dans les fibres thermoplastiques, Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris, France, 2004.
- [9] Hans-Henning Kausch ; Nicole Heymans; Christopher John Plummer; Pierre Decroly, Matériaux polymères : Propriétés mécaniques et physiques. Principe de mise en œuvre, V14 Lausanne 2001.
- [10] Document pédagogique, Voyage en industrie : Différentes types de matières plastiqués, Cap sciences, 2006.
- [11] N Zouzou, Etude de la mobilité moléculaire du PEN densité à la fabrication des conducteurs : influence de la microstructure, Doctorat, université Paul Sabatier, 2000.
- [12] Document pédagogique, Microstructure des Polymères, 2006.
- [13] Frédérique Coeuille, Revêtements polymères de canalisation de fluide : caractérisation de l'adhésion en milieu agressif, Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2002.
- [14] Xavier Lefebvre, Fissuration fragile lente du polyamide 11 : mécanismes et dures de vie en fluage, Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2002.
- [15] Alba Marcellan, Microstructures, micromécanismes et comportement à la rupture de fibres PA 66, Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2003.
- [16] F.Bollaret, A.Lemasçon, Analyse de défaillance pièce plastique élastomère ou composite, guide pratique, CETIM, 2000.
- [17] W.Kurz, J.P.Mercier et G.Zambelli, Traités matériaux, Tome 1, Lausanne 1995.
- [18] Juliette Cayer-Barrioz, Mécanismes d'usure de polymères orientés : Application à l'abrasion des fibres de polyamide, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2003.
- [19] M. Fontanille, Y. Gnanou, Structure moléculaire et morphologie des polymères, Techniques de l'ingénieur, A3042, 2003.
- [20] Bernard Guérin, Polyamides, Techniques de l'Ingénieur, traité Plastiques et Composites, Volume A3360-2, 2003.
- [21] Document de DuPont, Minlon and Zytel, nylon resins, Design Information – Module II.

- [22] Analyse de défaillance pièce plastique et composite, deuxième rencontre, France.
- [23] G. Mollard, Polyamide 6-6, Techniques de l'ingénieur, 1997, J 6515, p.1-7.
- [24] D.C. Miles, J.H. Bridon, Technologie des polymères, Paris Dunod, 1968.
- [25] H.F. Mark, Encyclopedia of Polymer Science and Technology; 2005, Copyright John Wiley & Sons, eBooks.
- [26] Document de DuPont, polymères techniques : Principes généraux de conception–Module I.
- [27] Document de DuPont, polymères techniques, Guide de moulage pour les résines MINLON et ZYTEL 1^{re} partie.
- [28] Document pédagogique, B. Vauban ; les engrenages et les trains d'engrenages ; 2006.
- [29] Document pédagogique, Transmission de puissance : engrenages 2005.
- [30] Eugene A. Avallone; Theodore Baumeister, Standard Handbook for Mechanical Engineers, Tenth Edition New York, McGraw-Hill, eBooks.
- [31] Gilbert Drouin, Michel Gou, Pierre Thiry, Robert Vinet : éléments de machines ; 2^{eme} édition de l'école Polytechnique de Montréal ; 1986.
- [32] Corina Oancea, Analyse des dents d'engrenages droite par la méthode des potentiels complexes, université Laval Québec ; 1997.
- [33] Juvinall, C. Robert et Marshek, Kurt M., Fundamentals of Machine Component Design, John Wiley, 1991.
- [34] D. Marghitu; Mechanical Engineers Handbook, Academic Press Series in Engineering California 2001, eBooks.
- [35] Engineering Machine Design; Involute Gear Tooth Contact Stress Analysis; The University of Tennessee at Martin.
- [36] Engineering Machine Design; Involute Gear Tooth Bending Stress Analysis; The University of Tennessee at Martin.
- [37] F. Gazanion; amélioration de la résistance à l'usure abrasivé: du titane grâce à la réalisation de traitements de surface par laser ; Docteur de l'université Laval ; 2000.
- [38] B. Bhushan, Modern Tribology Handbook, CRC Press, 2001, eBooks.
- [39] O. Barrau ; étude du frottement et de l'usure d'acier à outils de travail à chaud ; Docteur de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 2004.
- [40] Anders Flodin, Sören Andersson, simulation of mild wear in spur gears, Wear 207 (1997) 16–23.
- [41] Manas Chanda. Salil K. Roy : Plastics Technology Handbook, Fourth Edition, 2006, eBooks.
- [42] R. J. Crawford, Plastics Engineering 3^{ed}, edition by Butter worth, 1998, eBooks.
- [43] M. Kurokawa, Y. Uchiyama, S. Nagai, Performance of plastic gear made of carbon fibre reinforced polyether-ether-ketone. Tribology International. Vol 32 (1999), pp 491–497
- [44] MP. Wolverton, K. Talley, JE. Theberge, P. Blau : Friction, lubrication and wear technology-ASM handbook, vol. 18. Materials Park: ASM International; 1992.

- [45] Marcel Dekker : Mechanical Wear Fundamentals and Testing; 2004; eBooks.
- [46] N.A. Wright¹, S.N. Kukureka, Wear testing and measurement techniques for polymer composite gears, *Wear* Vol 251 (2001), pp 1567–1578.
- [47] A.A. Seireg, *Friction_and_Lubrication_in_Mechanical_Design*, University of Wisconsin and University of Florida, 1998, eBooks.
- [48] H. Unal , A. Mimaroglu , V. Serdar, Dry sliding performance of thermoplastics against reinforced unsaturated polyester (BMC): In use in electrical contact breakers components, *Wear* 261 (2006) 841–847.
- [49] Yuji Yamamoto, Tadashi Takashima, Friction and wear of water lubricated PEEK and PPS sliding contacts, *Wear* 253 (2002) 820–826.
- [50] G. Srinath, R. Gnanamoorthy, Sliding wear performance of polyamide 6-clay nanocomposites in water. *Sci. Technol.* 67 (2007) 399–405.
- [51] Scheirs J. *Compositional and failure analysis of polymers—A practical approach*. Chichester: John Wiley and Sons; 2000.
- [52] Choong Hyun Kim, Durability improvement method for plastic spur gears, *Tribology International* 39 (2006) 1454–1461.
- [53] Bin-Bin Jia, Tong-Sheng Li, Xu-Jun Liu, Pei-Hong Cong, Tribological behaviors of several polymer–polymer sliding combinations under dry friction and oil-lubricated conditions, *Wear* 262 (2007) 1353–1359.
- [54] K. Mao, A new approach for polymer composite gear design, *Wear* 262 (2007) 432–441.
- [55] Y.J. Yamamoto, T. Takashina, Friction and wear of water lubricated PEEK and PPS sliding contacts, *Wear* 253 (2002) 820–826.
- [56] Sirong Yu, Haixia Hu, Jian Yin, Effect of rubber on tribological behaviors of polyamide 66 under dry and water lubricated sliding, 2008.
- [57] D. Walton, A.J. Goodwin, The wear of unlubricated metallic spur gears, *Wear* 222 (1998) 103–113.
- [58] A. Mimaroglu, H. Unal and T. Arda, Friction and wear performance of pure and glass fibre reinforced poly-ether-imide on polymer and steel counterface materials *Wear* 262 (2007) 1407-1413.
- [59] Anders Flodin, Sören Andersson, A simplified model for wear prediction in helical gears, *Wear* 249 (2001) 285–292.
- [60] M. Lemaire, en collaboration avec A. Chateauneuf et J.C. Mitteau, *Fiabilité des Structures, Couplage Mécano-Fiabiliste Statique*, Hermès Science Publication, ISBN, 2005.
- [61] Normes françaises, NF X50-120, 1988.
- [62] M. Lemaire, Comment manager une étude mécano-fiabiliste, 17ème Congrès Français de Mécanique, 2005.
- [63] R. Khelif, étude et analyse de la rupture des tubes en polyéthylène pour le transport de gaz : optimisation par la fiabilité, Thèse de Doctorat, Université-Annaba, 2007.
- [64] Phimeca Engineering. PHIMECA- Reliability- based design and analysis. Users Manual, Ver 2.0, France, 2004.