

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY جامعة باجي مختار-عناية

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA



FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR Année 2011

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

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

Développement d'une technique de mesure des vitesses de fissuration dans
les dentures de roue en PA

Option : Mécanique de la rupture

Par

Lamia.KANOUNI

DIRECTEUR DE MEMOIRE Abdelaziz Amirat Pr Université de Annaba

DEVANT LE JURY

PRESIDENT : Kamel CHAOUI Pr Université de Annaba

EXAMINATEURS : Nasserredine ZEGHIB Pr Université de Annaba

Hamid.HAMADACHE MC Université de Annaba

Remerciements

Ce travail de recherche a été réalisé au sein du laboratoire LR3MI, Mécanique des Matériaux et Maintenance Industrielle (LR3MI) sous la direction de Monsieur Abdelaziz Amirat Professeur de l'Université Badji Mokhtar Annaba

Je tiens à lui exprimer ma gratitude et ma profonde reconnaissance pour avoir accepté l'encadrement de ma thèse. Tout au long de la thèse, il a su orienter et diriger mes travaux de recherche, se montrer disponible, me guider et me conseiller tout en me témoignant une grande confiance

Je tiens à remercier Professeur ***Kamel CHAOUI***, de l'Université d'Annaba, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de thèse. Qu'il trouve ici ma gratitude et ma reconnaissance pour l'intérêt qu'il a manifesté pour ce travail.

Je tiens à remercier Professeur ***Nasser Eddine ZEGHIB*** et Dr ***Hamid HAMADACHE***, de l'Université d'Annaba qui m'ont fait l'honneur d'examiner mon mémoire.

Mes remerciements sincères s'adressent aussi à ***Walid GHELLOUDJ***, doctorant de l'Université d'Annaba pour son aide.

Je voudrais aussi remercier tous le personnel, enseignants, doctorants, techniciens, et mes collègues du Magister, et tout ceux qui m'aider de près, ou de loin n'ont ménagé aucun effort pour réaliser ce travail

WWW.OXPDF.COM

Dédicace

Le plus grand merci revient à dieu le puissant qui a lui le seul pouvoir de nous guider le bon chemin durant notre vie

A ma chère mère pour son encouragements sans cesse renouvelés aux quel je souhaite a lui longévité et prospérité

A ma chère sœur Lilia

A mes frères Samir, Ramses et sa femme Meriem et pour leur enfant aymen.

A mes amies, Ibtissem, Afef, Layla, Karima, Zahia, Meriem, Hanéne, Hana,

A mes cousines, Soulef et Salima

A tous ceux que j aime et qui m'ont soutenu de loin et de prés

Lamia

www.oxpof.com

Résumé

Les engrenages en polyamides bien qu'ils soient de plus en plus employés dans l'industrie en raison de plusieurs avantages par rapport aux aciers présentent un certain nombre d'inconvénients qui suscitent beaucoup d'intérêt par les chercheurs. Tous sont d'accord pour dire que le problème majeur est l'usure des dents mais il y a aussi les autres phénomènes de rupture telle que la fissuration par fatigue. Cette dernière est peu étudiée à cause de la complexité du phénomène car il associe usure.

Dans ce travail nous présentons une étude sur la mise en œuvre d'une technique de mesure des fissures de fatigue dans une roue dentée. L'étude présentée dans ce travail est une contribution forte intéressante dont l'objectif est de trouver une approche pour étudier la fatigue des dents d'engrenages en polyamides. Elle a été scindée en trois parties principales dont la mise en œuvre d'un banc d'essai de fatigue, le développement d'une technique de mesure de la fatigue et l'analyse des résultats de la fatigue.

Les résultats montrent que la fatigue dans les roues dentées est associée au phénomène d'usure. L'existence d'une fissure dans une dent introduit un phénomène de compétitivité entre l'usure et la fatigue. En effet l'usure est dominante quand la fissure est dans la saillie de la dent mais elle est réduite quand la fissure est dans le creux de la dent. Contrairement aux métaux les vitesses de propagation de fatigue sont plus rapides au niveau du diamètre primitif qu'au niveau du diamètre du pied de dent. La durée de vie peut atteindre les 3 millions de cycles en présence de l'usure mais quand la fatigue s'implique, elle réduite de plus de fois puisqu'au bout de 700000 cycles la dent peut se rompre. La technique mise en œuvre dans ce travail est acceptable est peut être améliorée par le contrôle fin la réalisation d'entaille. Les résultats obtenus sont conformes à ceux de la littérature.

Mots clés : polyamide, fatigue, propagation de fissure, usure, engrenage

Abstract

The polyamide gears although they are employed more and more in industry because of several advantages compared to steels present a certain number of disadvantages which cause much interest by the researchers. All are of agreement to say that the main issue is the wear of the teeth but there are also the other phenomena of rupture such as cracking by fatigue. The latter is studied little because of the complexity of the phenomenon because it associates wear.

In this work a presented study on the technical measurement implementation of the fatigue cracks in a toothed wheel. The study shows an interesting strong contribution whose objective is to find an approach to study the teeth fatigue of polyamide gears. It was divided into three principal phases of which the testing ground implementation of fatigue, the technical measurement development of fatigue and analysis of obtained results.

The results show that fatigue in gears is associated with the phenomenon of wear. The existence of a cracking in a tooth introduces a phenomenon of competitiveness between wear and fatigue. Certainly, wear is dominant when the cracking is in the edge of the tooth but it is reduced when the cracking is in the hollow of the tooth. Unlike to metals propagation velocities of fatigue are faster on the level of the diameter than on the base diameter level of tooth. The lifespan can reach the 3 million cycles in the presence of wear but when fatigue is implied, it reduced of more than once since at the end of 700000 cycles the tooth can break. The technique implemented in this work is acceptable and can be improved by fine control of the realization of notch. The obtained results are in conformity with those of the literature.

Keywords: polyamide, fatigue, crack growth, wear, gear

موجز

على الرغم من أن استخدام التروس المصنعة من مواد البولياميد بشكل متزايد في الصناعة بسبب مزاياها العديدة أكثر من التروس الفولاذية ذات العديد من المساوئ التي أثارت اهتمام الكثير من الباحثين. وجلهم متفقون على أن المشكلة الرئيسية هي بلي الأسنان بالإضافة للكسر الناتج عن الكلال. وهي الظاهرة التي كانت دراستها محدودة بسبب تعقيدها لأنها تتطوي على البلي.

تم تقديم دراسة لتنفيذ تقنية لقياس التصدع الناتج عن الكلال في عجلة مسننة. وهذه الدراسة قدمت مساهمة مثيرة جدا للاهتمام، والتي تهدف إلى البحث عن مقارنة لدراسة كلال الأسنان في تروس البولياميد. والتي تنقسم إلى ثلاثة مراحل رئيسية هي تنفيذ اختبار الكلال وتطوير تقنية لقياس الكلال ثم تحليل النتائج.

لقد أظهرت النتائج ارتباطا لكالل التروس مع ظاهرة البلي، ووجود التصدع في الأسنان وضحت ظاهرة المنافسة بين البلي والكلال. والواقع البلي هو المهيمن عندما يكون التصدع عند حافة الأسنان وينخفض عندما يكون التصدع في جوف الأسنان. وعلى عكس المعادن فإن انتشار الكلال أسرع في مستوى القطر على مستوى القطر عند جذور الأسنان. ويمكن أن يمتد عمر الترس إلى 3 مليون دورة في وجود البلي ولكن عندما يتعلق الأمر بالكلال فينقص إلى 700000 دورة حيث يمكن أن تنهار السن. تعتبر التقنية المستخدمة مقبولة مع إمكانية تحسين الإنتاج عن طريق التحكم الدقيق في تحقيق النقرة، والنتائج المنحصل عليها متوافقة مع تلك المعهودة.

كلمات البحث : مادة البولياميد، كلال، نمو التصدع، بلي، مسننات.

www.oxfordjournals.com

Liste des figures	i
Liste des tableaux	x
Liste des abréviations	ix
Introduction générale	1
Chapitre1: Etude sur les polymères	
1.1. Introduction	6
1.2. Classification des polymères	7
1.2.1 Selon les propriétés	7
1.2.1.1. Les Thermoplastiques	7
1.2.1.2. Les Thermodurcissables	7
1.2.1.3 Les élastomères	8
1.2.2. Point de vue de la structure physique	8
a) Polymère amorphe	8
b) Polymère semi cristallin	10
1.3. Différents niveaux structuraux	11
1.4. Comportement mécanique des polymères	13
1.4.1.1. Facteurs ayant une influence sur les propriétés mécaniques des polymères	13
1.5. Polyamide PA66	14
1.5.1. Introduction	14
1.5.2. Description générale de Nylon 6,6	14
1.5.3. Synthèse	15
1.5.3.1. Synthèse des intermédiaires du Polyamide 66	15
1.5.3.2. La synthèse du Polyamide 66	16
1.5.4. Propriétés mécaniques	16
1.5.5. Propriétés chimiques	17
1.5.5.1. Résistance aux produits chimiques	17
1.5.5.2 Fatigue, abrasion et coefficient de frottement	18
1.5.6. Absorption d'eau	18
1.5.7. Résistance au choc	20
1.5.8. Procédé de fabrication des pièces plastiques	22
1.5.8.1. Moulage par injection	22
1.5.8.1.1. Presse à injection	23
1.5.8.1.2. Le moule	23
1.5.8.2. Les paramètres d'injection	24
1.5.8.2.1. Température de la matière fondue	24
1.5.8.2.2. Température du moule	24
1.5.8.2.3. Vitesse d'injection	24
1.5.8.2.4. Durée de maintien sous pression	24
1.5.9. Les applications de PA66	24
chapitre2: Les caractéristiques et les défauts des engrenages	
2.1. Introduction	28
2.2. Définition des engrenages	28
2.3. Cycle de fonctionnement d'un engrenage	29

2.4. Développement de cercle	30
2.5. Etudes des engrenages parallèles à dentures droites	31
2.5.1. Caractérisation des engrenages cylindriques à denture droite	31
2.6. Résistance des engrenages	33
2.6.1. Méthode de Lewis	33
2.6.2. Contrainte maximale de la flexion	35
2.6.3. Pression superficielle	35
2.6.4. Contrainte de surface	36
2.7. Origines d'avaries d'engrenages	36
2.8. Défauts des engrenages.	37
2.8.1. Usure	38
2.8.1.1. Usure par abrasion	38
2.8.1.1.1. Résistance à l'usure abrasive de polymères.	38
2.8.1.2. Usure par adhérence	39
2.8.1.3. Usure par fatigue	40
2.8.1.3.1. Causes de la fatigue de contact	41
chapitre3: Mécanique de la rupture	
3.1. Généralités	45
3.2. Définition de la rupture	45
3.3. Modes de rupture	46
3.3.1. Rupture ductile	46
3.3.2. Rupture fragile	47
3.4. Mécanique linéaire élastique de la rupture	47
3.4.1. La région de la pointe de fissure	48
3.4.2. Champ de contraintes en bout de fissure	48
3.4.3. Facteurs d'intensité de contraintes	51
3.4.4. Taux de restitution d'énergie	52
3.5. Les différents types d'endommagement dans les polymères	53
3.6. Fatigue	54
3.6.1. Facteurs d'incidence sur la durée de vie en fatigue	55
3.6.1.1. Effets de surface	55
3.6.1.2. La conception	55
3.6.1.3. Effets de l'environnement	55
3.6.2. Classification des essais de fatigue	55
3.6.3. Préfissuration	56
3.6.4. La propagation des fissures de fatigue	56
chapitre 4: Mise au point d'un essai de fatigue et d'usure sur les roues dentées en PA	
4. Mise au point d'essai de fatigue et d'usure	62
4.1. Matériau	63
4.2. Caractéristiques de la roue dentée	64
4.3. Machine d'essai	64
4.4. Essai de fatigue	66
4.4.1. Pré-fissuration du flanc des dents	66

4.4.1.1. Pré-fissuration avec un cutteur à chaud et à froid	66
4.4.1.2. Pré-fissuration avec une scie à métaux et une lame rasoir	67
4.4.1.3. Pré-fissuration sur une fraiseuse horizontale avec cutteur comme outil d'entaille	67
4.4.1.4. Préfissuration sur Fraiseuse Horizontale avec une fraise disque	69
4.4.1.5. Pré-fissuration sur fraiseuse à commande numérique	69
4.4.2. Technique de mesure de la propagation de la fissure	71
4.5. Mesure de l'usure	73
4.5.1. Mesure de l'usure par perte de poids	73
4.5.1. Mesure de l'usure par perte de cotes	74
4.6. procédure de la mesure de la dureté	74
4.7. Conditions d'essai	76
Chapitre 5 : Analyse des résultats	
5.1. Choix d'une méthode de préfissuration	79
5.2. Mesure de la dureté	80
5.3. Etude de l'usure sur le flanc de la dent	82
5.3.1. profile de l'usure	82
5.3.2. Compétitivité de l'usure et la fatigue	83
5.3.3. Evolution de l'usure	86
5.3.3.1. Effet du sens de rotation	86
5.3.3.2. Effet de la dureté	88
5.3.3.3. Effet de l'entaille et de sa position sur le flanc de la dent	89
5.4. Analyse de la fissure de fatigue dans une dent de roue en polyamide	91
5.4. 1.Faciès de rupture	91
5.4. 2.Trajectoire de la fissure de fatigue	93
5.4. 3.Analyse des longueurs de fissure en fonction du nombre de cycles	95
5.4. 4.Analyse des vitesses de fissuration	100
Conclusion	103

Liste des tableaux

<i>Tableau n</i>	<i>Titre</i>	<i>Page</i>
Chapitre 1		
1	Taux de cristallinité et masse volumique de différents thermoplastiques dans les états 100% cristallin, 100% amorphe et semi-cristallin	11
2	comparaison de l'absorption de solvants par PA6, PA6-6, PA6-10, PA11	18
3	résistance au choc de PA66	21
Chapitre 2		
1	caractéristiques dimensionnelle des engrenages cylindriques à dentures droites	32
2	origines et localisation des défauts	37
Chapitre 4		
1	Propriétés thermiques et mécaniques du PA66	63
2	Poids et Dureté des roues en fonction de la couleur de la roue	63
3	Caractéristiques géométriques du pignon	64
4	Caractéristique de la fraiseuse à commande numérique	69
5	Base de suivi de l'évolution de la fissure par fatigue dans une roue dentée.	72
6	Mesure de la longueur d'entaille	73
Chapitre 5		
1	Comparaison des méthodes de pré fissuration d'un flanc de dent de roue en PA66	80
2	Variation du diamètre de l'empreinte en fonction du temps	81

Liste des figures

<i>Figure n°</i>	<i>Titre</i>	<i>Page</i>
<i>Introduction générale</i>		
<i>1</i>	Fissure au niveau du cercle primitif	<i>2</i>
<i>2</i>	Zones de contact des dents et les limites	<i>2</i>
<i>3</i>	Vitesse de propagation de la fissure en PA66 pour des niveaux différents d'humidité	<i>2</i>
<i>4</i>	a: Principe de la machine d'essai b: Vue d'un pignon à l'essai	<i>3</i>
<i>Chapitre 1</i>		
<i>1</i>	La constitution d'un polymère	<i>6</i>
<i>2</i>	Illustration des différents états de la matière	<i>8</i>
<i>3</i>	Interpénétration de structure de pelote	<i>9</i>
<i>4</i>	Structure d'un polymère semi-cristallin	<i>10</i>
<i>5</i>	Les différents niveaux structuraux des polymères	<i>12</i>
<i>6</i>	Formes isotactiques, syndiotactiques et atactiques des chaînes polymères	<i>12</i>
<i>7</i>	Structure de l'unité de répétition dans le nylon 66	<i>15</i>
<i>8</i>	Arbre de la chimie du sel nylon 66	<i>15</i>
<i>9</i>	Absorption d'humidité (% en masse) en fonction de l'humidité relative (%) l'air ambiant pour plusieurs polyamides	<i>19</i>
<i>10</i>	Absorption à saturation de PA aliphatique en fonction de la concentration en amine pour différents HR	<i>19</i>
<i>11</i>	Courbes contrainte-allongement en traction à 230 C de PA 6-6 non chargés, à différentes teneurs en eau absorbée (% en masse)	<i>20</i>
<i>12</i>	Influence de la reprise d'humidité sur la résistance en flexion pour un polyamide (PA 66.)	<i>20</i>
<i>13</i>	La position des échantillons entaillés pour les essais Charpy	<i>21</i>

14	Evolution typique de la résilience en choc entaillé en fonction de la température pour un polyamide non renforcé (Nylon) et renforcé par un élastomère	22
15	Presse à injection	23
16	Évolution dans le temps de la production mondiale de polyamides	25
Chapitre 2		
1	Paramètres d'engrènement	30
2	Principe de définition d'une courbe à développante de cercle-application au cas des engrenages cylindriques-	30
3	Caractérisation géométrique des engrenages cylindriques à dentures droites	31
4	Modèle de Lewis	34
5	Effort de contact de deux cylindres. (a) Cylindres en contact; (b) distribution de pression de contact	35
6	mécanismes d'usure par abrasion	38
7	Résistances usure par abrasion pour les plastiques et les métaux de dureté similaire: (I) en plastique (par exemple, L54, L68, nylon 6, le polyéthylène à basse pression, le polyéthylène à haute pression, polyfluoroethylene), (II) des métaux (par exemple, argent, zinc, cadmium, plomb)	39
8	Transfert d'une particule (a) soudure d'une aspérité ; (b) arrachage d'une particule	40
9	mécanisme de formation de particules d'usure due à la croissance de surface a des fissures	41
Chapitre 3		
1	Essai de traction	46
2	Courbes contrainte-déformation dans le cas des ruptures fragiles et ductiles	47
3	Les zones de champs mécaniques	48
4	Champ de contraintes au voisinage d'une fissure	48

5	Distribution de la contrainte maximale en bout de fissure et forme correspondante de la zone plastique	49
6	Modèle simple de déformation plastique à la pointe de la fissure, avec ou sans correction d'Irwin	50
7	Différents modes de propagation d'une fissure	51
8	Les différents types d'endommagement dans les polymères	54
9	Loi de propagation générale	57
Chapitre 4		
1	Schéma de principe de la propagation de la fissure dans une dent de roue.	62
2	Roue dentée en PA66	64
3	a) Vue du moteur électrique, pignon d'attaque et tambour a couronne denté b) Système de transmission par engrenage c) Rapport de transmission Pignon- Couronne Tambour	65
4	Pré-fissuration avec un cutteur à chaud	66
5	Bourrage de la matière au fond de l'entaille	67
6	Scie avec une lame de rasoir.	67
7	Fraiseuse avec un cutteur comme outil de coupe avec dispositif de montage	68
8	Dispositif de fixation de la roue sur l'étau de fraiseuse horizontale	68
9	Fraiseuse avec une fraise disque comme outil de coupe	69
10	Vue générale de la fraiseuse à commande numérique	70
11	Dispositif de fixation de la roue dentée bridé sur la table de la fraiseuse à CN	70
12	Vue générale d'une prise de mesure sous le Microscope optique	71
13	Plaque d'observation de dent de roue sous microscope	71
14	Instruments de mesure de l'usure : a) Balance électronique (b) Pied à module	74
15	Préparation de l'échantillon pour les mesures de la dureté : a) Indentation isolée, b) Indentations multiples ; c) Echantillon avec dents colorée	75
16	Stand de mesure de la dureté sur les dents de roue en polyamide.	76

Chapitre 5		
1	Valeurs de la dureté sur 12 roues dentées en PA66 prises d'un même lot	81
2	Schéma de l'évolution de l'usure observée sur le flanc d'une dent tournant dans un seul sens	82
3	Photographies de 2 roues dentées après usure des dents a) Rotation dans 2 sens ; b) Rotation dans un seul sens	82
4	Différence dimensionnelle du profil de l'usure sur deux dents a) Roue en 2 sens de rotation b) Roue en 1 seul sens de rotation	83
5	schéma de position de l'entaille dans 3 dents d'une même roue dentée	84
6	Phénomène de compétitivité de l'usure et de la fatigue sur les roues dentée* après 375000 cycles, l'entaille a disparu générant un même profil de l'usure sur les dents 1 et 2 ** dent 2 avec entaille avant essai de fatigue	85
7	Schéma de principe de compétitivité entre l'usure et la fatigue	85
8	Effet de l'entaille sur l'évolution de l'usure sur le flanc d'une dent a) dent sans entaille, b) dent avec entaille	86
9	a) Effet du sens de rotation sur l'usure des dents de roue en PA66.R1SR: Roue à 1 Sens de Rotation, RDSR: Roue à Double Sens de Rotation	87
9	b) Effet du sens de rotation sur la perte de côtes des dents de roue en PA66 R1SR: Roue à 1 Sens de Rotation, RDSR: Roue à Double Sens de Rotation	88
10	Effet de la dureté sur l'évolution de l'usure sur une dent de roue en Polyamide	89
11	Effet de l'entaille et de sa position sur l'usure d'un flanc de dent en Polyamide	90
12	Faciès de Rupture et Zones de Fatigue	91
13	Faciès de rupture d'une dent en acier	92
14	Faciès de rupture dans un acier	92
15	Comparaison de faciès de rupture entre deux dents a) dent en acier, b) dent en Polyamide 66	93
16	Trajectoire de la fissure par fatigue dans une dent en polyamide	93

17	Dégâts provoqués suite à une rupture par fatigue de la dent de pignon en polyamide	94
18	Exemple de Mesure des longueurs des fissures par superposition d'image sur une dent en polyamide	95
19	Evolution de la fissure sur les dents de roue en PA66 D3 et D4 sont les dents 3 et 4 pour la roue (53 HRC)	97
20	Evolution de la variation de la longueur de la fissure Δa , sur les dents de roue en PA66D3 et D4 sont les dents 3 et 4 pour la roue (53 HRC)	97
21	Effet de la forme de dent sur la propagation de la fissure de fatigue a) dent avec arrondi au creux et au pied large b) dent sans arrondi au creux et au pied large c) dent avec arrondi au creux et au pied étroit	98
22	Evolution de la fissure sur les dents de roue avec creux sans arrondi en PA66	98
23	Evolution de la variation de la longueur de la fissure Δa , sur des dents de roue avec des en creux sans arrondi en PA66	99
24	Evolution de la longueur de la fissure sur deux roues de forme de creux différents (D353 et D453 avec creux arrondi au pied large, RCSA1 et RCSA2 avec creux sans arrondi avec pied large)	100
25	Schéma de principe pour le calcul de ΔK sur une dent de roue	101

a	Demi longueur de fissure (mm)
da /dN	Vitesse de propagation de fissure (m ² /cycle)
E	Module de Young (MPa)
FCP	Fatigue crack propagation
G	Taux de restitution d'énergie (J/m ²)
K	Facteur d'intensité de contrainte (MPa m ^{1/2})
ln	Logarithme népérien
m	Constante caractéristique du matériau
PA	polyamide
PBT	Poly (téréphtalate de butylène)
PP	Polypropylène
PE	polyéthylène
PEHD	Polyéthylène haute densité
PELD	Polyéthylène basse densité
PET.	Poly (éthylène téréphtalate)
PP	polypropylène
PS,	polystyrène
PVC,	poly (chlorure de vinyle)
POM	Poly (oxyméthylène)
RCSA	Roue à creux sans arrondis
RCA	Roue à creux avec arrondis
R1SR	Roue à un seul sens de rotation
RDSR	Roue à double sens de rotation
T _f	Température de fusion
T _{g10}	Température de transition vitreuse
T _v	Température de transition vitreuse
W _t	La force tangentielle
α	Coefficient de sécurité

r_p	rayon de la zone plastique (mm)
δW_{elast}	Variation de l'énergie de déformation élastique
δW_{ext}	Variation de l'énergie potentielle des forces extérieures
δW_s	Variation de l'énergie cinétique
δW_s	Energie dissipée dans la séparation des lèvres de la fissure
σ_{max}	La contrainte maximale
γ	Energie de la surface de décohésion

www.oxpdf.com

Introduction générale

Les matériaux plastiques sont de plus en plus employés dans l'industrie en raison de plusieurs avantages tels que le fonctionnement silencieux, le poids léger, la résistance à la corrosion, la facilité de production en série, le faible coefficient de frottement, et la capacité de fonctionner sans lubrification externe [1].

Parmi ces matériaux, les matériaux thermoplastiques sont largement utilisés dans la production des engrenages. Leurs applications vont des matériels de bureautique, de l'agroalimentaire, l'automobile, les machines de textiles et autres [2]. L'électroménager par exemple connaît une expansion dans les matériaux plastiques extraordinaires. En l'occurrence les machines à laver en plastiques forment une part de 75% suite au prix de revient. Un sondage au niveau des revendeurs de l'électroménager au niveau de la ville d'Annaba en Algérie donne les ménages s'orientent vers les lave-linges en plastiques à cause des prix forts intéressants. Une enquête sur la performance de ces machines au niveau de trois citées de 1000 habitants chacune révèle que plus de 50% utilisent des lave-linges en plastique. Tous sont d'accord pour dire que le problème majeur est l'usure des dents. Pratiquement, la durée de vie d'une machine pour une moyenne d'un lavage par jour est de 30 mois ce qui correspond à une 3000000 de cycles. En plus de l'usure il faut savoir que les engrenages en polyamide ont un certain nombre d'inconvénient, une durée de vie courte, et ne sont pas résistants à la chaleur lors du fonctionnement sous de fortes charges et grandes vitesses [2,3]. Ces inconvénients limitent typiquement leurs utilisations, en particulier à grande charge, à grande vitesse et des températures élevées. Il est observé des modes de défaillance du type: les fissures de la racine, les fissures de surface, des déformations dentaires graves, et une usure excessive [2].

Par ailleurs, la détérioration des roues dentées par rupture due aux phénomènes de fissuration par fatigue constitue une problématique fréquente, mal connue et peu entreprise par la recherche [4].

Dans une étude effectuée sur des engrenages en plastique, il a été constaté que 92% des défaillances ont été des ruptures dont 62% sont produites près du point primitif (Figure 1.1), tandis que 30% près du creux de la dent. Il a été montré que les ruptures se situaient dans la zone de l'engrènement unique (Figure 1.2), c'est-à-dire dans la zone du cercle primitif. La zone d'engrènement unique est considérée comme un domaine critique dans les engrenages en plastique et délimite également la zone primitive [2].

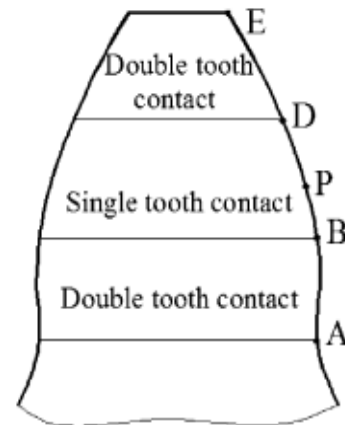
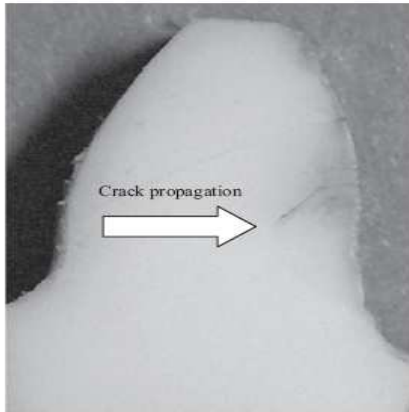


Figure I.1 : Fissure au niveau du cercle primitif [2] **Figure I.2**: Zones de contact des dents et les limites [2].

Plusieurs paramètres affectent la rupture de surface sur les roues à dentures droites. Les facteurs qui régissent sont la longueur de fissure initiale, l'angle de la fissure, la force de contact, frottement, déformation, durcissement de la couche, et la pression hydraulique du liquide piégé agissant sur la surface de la fissure [5]. L'eau est connue pour avoir des répercussions sur les propriétés structurales [6,7]. Mais le grand nombre d'enquêtes antérieures, les phénomènes d'amorçage et de propagation liés aux contacts de roulement ne sont pas encore bien compris [8,9,10].

La Figure I.3, montre les résultats de fatigue sur le N66 et illustre bien l'effet de l'absorption de l'eau sur la propagation des fissures.

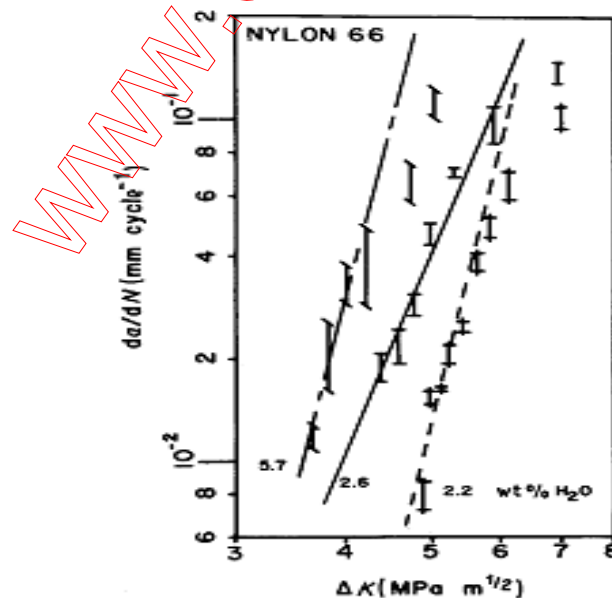


Figure I.3 : Vitesse de propagation de la fissure en PA66 pour des niveaux différents d'humidité [10]

Les techniques d'analyses des vitesses de fissuration par fatigue dans les engrenages constituent aussi une problématique expérimentale très complexe. La complexité du

phénomène réside dans le fait que mener un essai de fatigue sur une roue dentée entraîne automatiquement le phénomène d'usure. Séparer la fatigue de l'usure dans ce cas, n'est pas réaliste et nécessite une attention particulière. Les machines d'essai sont généralement conçues de manière à faire coupler la roue échantillon en plastique avec une autre roue résistante, en acier (Figure I.4). Il faut noter que le phénomène d'usure existe toujours. En présence d'un autre phénomène telle la fatigue, la géométrie de la dent change et va influencer l'analyse de la propagation des fissures

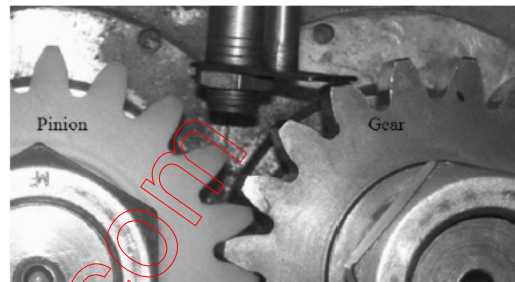
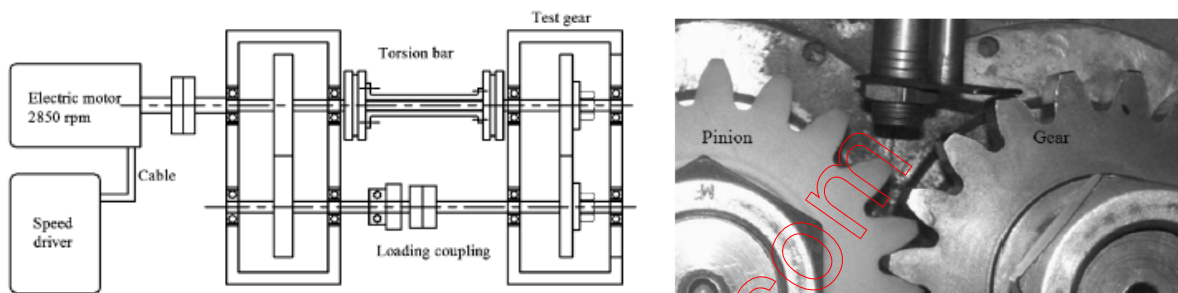


Figure I.4a: Principe de la machine d'essai [2] Figure I.4b: Vue d'un pignon à l'essai [2]

Le travail présenté dans ce mémoire de magistère, s'inscrit dans le cadre de la politique du laboratoire de recherche en mécanique des matériaux et maintenance industrielle (LR3MI). L'équipe de recherche matériaux nouveaux et composites s'intéressent à leurs comportements et à la caractérisation des propriétés mécaniques afin d'agir positivement sur la durée de vie des pièces de mécanismes et de systèmes de production. Dans un premier temps, l'axe est orienté vers l'usure des roues dentées en polyamide. Cet axe a fait l'objet d'une étude par GHALLOUDJ Walid, dans le cadre de la préparation de son mémoire de magistère intitulé: Etude de l'endommagement et de la fiabilité des engrenages à dentures droites en polyamide 66 [11].

Ces travaux sont soldés par des résultats riches en expérimentation où l'on a adopté un lave-linge comme machine d'essai de l'usure, et a développé une technique de mesure de l'usure sur les dents de roues dentées en polyamides. Les résultats ont confirmé le phénomène d'absorption de l'eau du polyamide et son effet sur l'usure. Une partie des résultats a été la conséquence de publication dans Springer d'un article internationale [12] dans le cadre de la préparation de la thèse de doctorat de BOUNAMOUS Boubaker.

Le mémoire ci-présent est une continuité de ces travaux et a pour objectifs de doter en moyens expérimentaux le laboratoire LR3MI en machine d'essai de fatigue des roues dentées, de développer une technique de mesure des vitesses de fissuration par fatigue, de former une

équipe pour l'analyse de l'usure et de la fatigue dans les roues dentées, et aussi d'avoir une indépendance dans l'utilisation de matériels de laboratoire.

Après une introduction générale, le mémoire est divisé en 5 chapitres dont les trois premiers sont dédiés à la recherche bibliographique, le quatrième aux travaux expérimentaux le cinquième à l'analyse des résultats d'usure et de fatigue dans les roues en polyamide, une conclusion, les perspectives et les références bibliographiques.

- ❖ Le Premier chapitre fait un rappel sur les polymères, ainsi qu'une description sur le polyamide (PA66), comportement, propriétés et caractérisation ainsi que les techniques de fabrications et enfin leur application.
- ❖ Le deuxième chapitre présente des généralités sur les engrenages, et explique les principes fondamentaux pour réaliser un engrenage particulièrement les modèles géométriques et mécaniques qui régissent particulièrement les engrenages à dentures droites pour qu'ils résistent mieux aux modes de défaillances qui les caractérisent telles que l'usure et la fatigue.
- ❖ Le troisième chapitre, introduit les notions de la mécanique de la rupture, mode de rupture, et la fatigue qui sont nécessaires pour l'appréhension des objectifs de ce travail.
- ❖ Le quatrième chapitre est le chapitre clé de ce mémoire, car il présente la procédure pour mener un essai de fatigue, la technique de mesure des vitesses de fissuration et la manière d'analyser les résultats.
- ❖ Le cinquième chapitre présente les résultats de mesure de l'usure et de la fatigue et l'analyse comparative avec des conditions d'essais différentes et les résultats de la littérature.

La conclusion générale récapitule d'une manière claire les résultats de ces travaux avec les perspectives qui à court terme qui feront objet sujets de recherche très demandés.

Enfin ce mémoire ouvert par un résumé est clôturé par une liste de références bibliographiques organisée par chapitre

Références bibliographiques

- [1] G .Drouin, M. Gou, P. Thirry, R.Vinet. Elements de machines (Dieusième Edition).1989
- [2] H.Imrek, Performance improvement method for Nylon 6 spur gears Tribology International 42(2009)503–510
- [3] H. Duzcukoglu, Study on development of polyamide gears for improvement of load-carrying capacity, Tribology International, 2009
- [4] y. k. chen, s. n. kukureka, c. j. hooke, m. rao, s. n. kukureka, surface topography and wear mechanisms in polyamide 66 and its composites, journal of materials science 35 (2000) 1269 – 1281
- [5] H.Düzcükoglu , H.Imrek b A new method for preventing premature pitting formation on spur gears, Engineering Fracture Mechanics 2008
- [6] S.Yu , H.Hu, J.Yin , Effect of rubber on tribological behaviors of polyamide 66 under dry and water lubricated sliding, Wear 265 (2008) 361–366
- [7] Grégory Marque, Absorption de l'eau par les polymères, Thèse de Doctorat, Université de Savoie, 2009
- [8] Hodge, R. M.; Edward, G. H.; Simon, G. P. Polymer 1996, 37,1371- 1376
- [9] Philip E. Bretz,* Richard W. Hertzberg, John A. Manson,,nfluence of absorbed moisture on fatigue crack propagation behaviour in polyamides Part 1 Macroscopic response, journal of materials science 16 (1981) 2061-2069
- [10] PHILIP E. BRETZ,* RICHARD W. HERTZBERG, JOHN A. MANSON.Influence of absorbed moisture on fatigue crack propagation behaviour in polyamides Part 2 Fractography journal of materials science 16 (1981) 2070-2078
- [11] W .Ghalloudj., Etude de l'endommagement et de la fiabilité des engrenages à dentures droites en polyamide 66, Magister, Université Annaba, 2008
- [12] B.Bounamous and K.Chaoui. Degradation and failure of some polymers (polyethylene and Polyamide) for industrial applications. In Damage and Fracture Mechanics: failure analysis of engineering materials and structures by T. Boukhrouba, M. Elboujdaini and G. Pluvinage; Springer Science + Business Media B.V. (2009) 183-194

1.1. Introduction

Les polymères, appelés communément "matières plastiques. Les plastiques inventés au XXème siècle ont remplacé les matériaux traditionnels comme le bois ou le métal. Les recherches menées pour améliorer et diversifier leurs propriétés les destinent à de nombreuses utilisations. Les matières plastiques sont légères, hygiéniques, durables et faites sur mesure. C'est grâce à toutes leurs qualités qu'elles sont devenues irremplaçables et omniprésentes dans les objets notre vie quotidienne"[1,2].

Polymère est un mot qui vient du grec « pollus » plusieurs, et « meros » partie. Un Polymère est une macromolécule organique ou inorganique constituée de l'enchaînement et répété d'un même motif, le monomère (du grec monos: un seul ou une seule, et meros ; partie), reliés les uns aux autres par liaison covalentes (figure 1.1). L'enchaînement des monomères peut se faire de façon linéaire (polymères linéaires), présenter des ramifications aléatoires (polymères branchés) ou systématiques et régulières [3,4].

Les polymères sont constitués de macromolécules à squelette covalent, liées entre elles par des liaisons faibles (liaisons de Van der Waals ou liaisons hydrogène).Leurs propriétés dépendent fortement du comportement de ces liaisons faibles, et évoluent considérablement avec la température. Les polymères sont constitués d'un grand nombre d'unités fondamentales, appelées monomères. Ce sont des molécules organiques dont le noyau est essentiellement constitué d'un atome de carbone (ou de silicium dans le cas des polymères siliconés) [5]

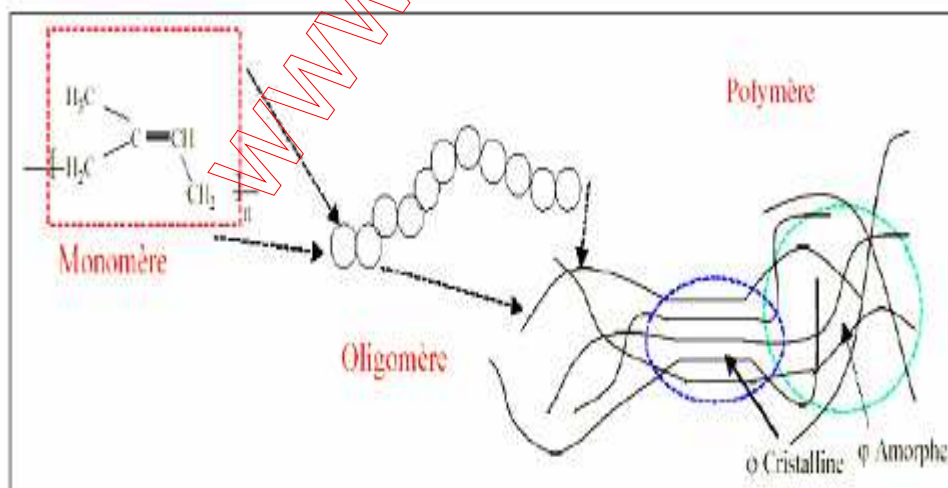


Figure 1.1: La constitution d'un polymère. [5]

1.2. Classification des polymères

Les polymères peuvent être classés selon divers critères,

1.2.1 Selon les propriétés : une des propriétés mises en cause est l'influence d'une élévation de température. Une autre est le comportement élastique. Il en résulte qu'on distingue trois grandes familles [6,7,8]

1.2.1.1. Les Thermoplastiques:

Les thermoplastiques fondent lorsqu'on les chauffe, tout comme la glace ou le beurre. C'est le cas du polyéthylène, du polypropylène, des polyamides, de certains polyesters. En revanche, l'avantage est que dans l'état fondu, on peut les mouler dans la forme que l'on veut. C'est un procédé industriel employé pour fabriquer des objets à la pièce, en discontinu. Ce procédé est bien connu également pour les métaux, mais les températures de fusion des polymères sont bien plus basses, de l'ordre de 80°C à 300°C. [1]

Le comportement global du matériau dépend alors de la mobilité des chaînes les unes par rapport aux autres et de la rotation autour des liaisons C - C. L'élévation de température facilite le déplacement des chaînes les unes par rapport aux autres, le comportement d'abord vitreux, devient caoutchoutique entre la température de transition vitreuse (Tg ou Tv) et la température de fusion Tf. La réversibilité de comportement permet la mise en forme de ces matières à l'état fondu ou caoutchoutique. [4]

Ils 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 [2]

Parmi les principaux thermoplastiques, on peut citer le PE, le PP, le PS, le PVC, les polyamides, le PET.[5]

1.2.1.2. Les Thermodurcissables:

Les thermodurcissables sont des plastiques qui prennent une forme définitive au premier refroidissement. La réversibilité de forme est impossible car ils ne se ramollissent plus une fois moulés. Sous de trop fortes températures, ils se dégradent et brûlent (carbonisation). Les molécules de ces polymères sont organisées en de longues chaînes dans lesquelles un grand nombre de liaisons chimiques solides et tridimensionnelles ne peuvent pas être rompues et se renforcent quand le plastique est chauffé. La matière thermodurcissable garde toujours sa forme en raison de ces liaisons croisées et des pontages très résistants qui empêchent tout

glissement entre les chaînes Les thermodurcissables représentent 20% de matières plastiques .[2]

Ce sont des matériaux amorphes et infusibles, il ne peut y avoir aucun déplacement de chaînes les unes par rapport aux autres. Lorsque la température augmente, le matériau ne devient pas visqueux, mais il conserve sa rigidité jusqu'au moment où il se dégrade. On appelle ces plastiques thermodurcissables car, en général, une élévation de température favorise la réaction de polymérisation et le degré de réticulation, donc la rigidité.[4]

1.2.1.3 Les élastomères:

Les élastomères sont des matériaux aux propriétés bien particulières. Ce sont des polymères de haute masse moléculaire et à chaînes linéaires. Le déplacement de leurs chaînes les unes par rapport aux autres n'étant limité que par une légère réticulation, on peut obtenir de grandes déformations élastiques totalement réversibles. Lorsque la contrainte est nulle, ces matériaux sont amorphes, leurs chaînes tendant toutefois à s'aligner au cours de la déformation, il se produit une augmentation de la rigidité. Pour obtenir un tel comportement, il faut utiliser ces matériaux à une température supérieure à leur température.

Exemples : caoutchouc naturel, polybutadiène, polyisoprène. [5,4]

1.2.2. Point de vue de la structure physique

a) 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'ya a pas de distance constante entre les macromolécules et aucune régularité dans l'arrangement et l'orientation, et ce ci en raison de la structure et de la disposition aléatoire des chaine individuelles (Figure 1.2). [9]

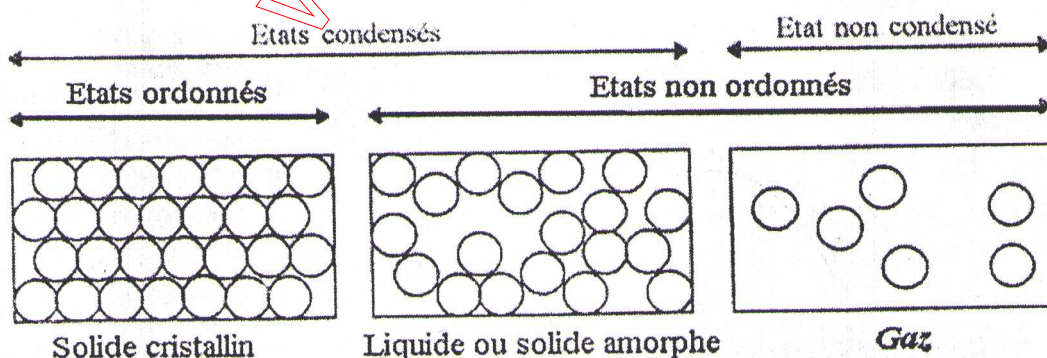


Figure 1.2 : Illustration des différents états de la matière [9]

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 inerte. 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 (figure I.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 thermo durcie fortement réticulée. [10]

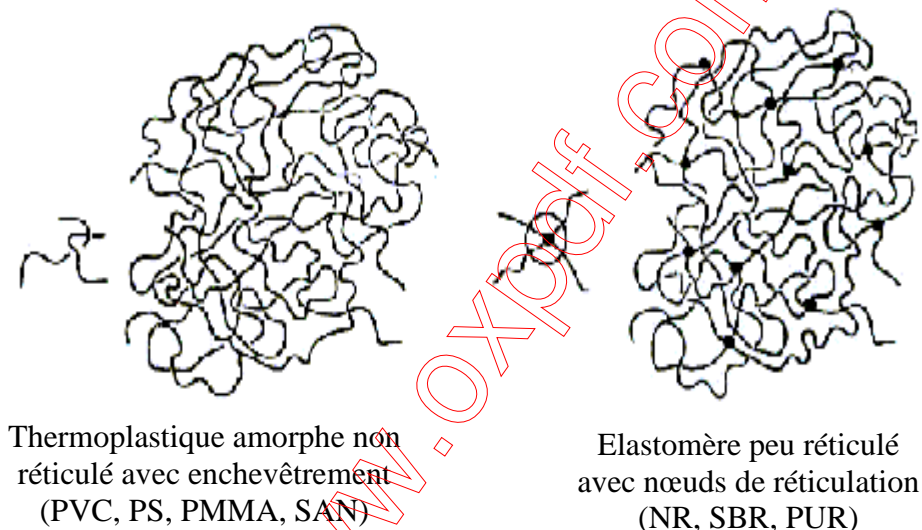


Figure 1.3 : Interpénétration de structure de pelote. [10]

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. 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. [11,12]

b) Polymères Semi –Cristallins

Les zones amorphes des thermoplastiques semi-cristallins sont composées de boucles de chaînes repliées pénétrant dans les cristallites, et de chaînes traversant plusieurs cristallites, d'extrémités de chaînes libres. L'enthalpie et l'entropie sont nettement plus élevées dans les zones amorphes que dans les zones cristallines. Elles dépendent toutes deux de la température, mais de façon différente. L'accès d'un polymère, susceptible de cristalliser, à l'état qui correspond à la plus basse enthalpie libre est donc fonction de la température.

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 le cas régulièrement répartis le long du squelette. Le PET, le PTFE et le PA sont des exemples de polymères possédant une structure cristalline (figure 1.4). Un certain nombre de plastiques cristallisent mal ou pas du tout, à cause de substituant irrégulièrement répartis et/ou relativement volumineux.

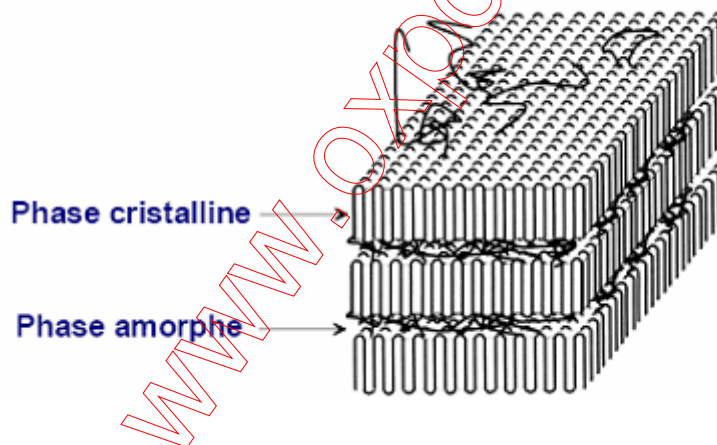


Figure 1.4: Structure d'un polymère semi-cristallin [10]

Les thermodurcissables et la plupart des élastomères ne peuvent pas se cristalliser à cause de leur structure moléculaire [11,12]

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. A la cristallisation [13]

Tableau I.1 : Taux de cristallinité et masse volumique de différents thermoplastiques dans les états 100% cristallin, 100% amorphe et semi-cristallin [11]

Matériau polymère	Taux de cristallinité [%] usuel	Masse volumique [g/cm ³]		
		ρ_c (cristallin)	ρ_a (amorphe)	ρ (usuelle)
Polyamide (PA 66)	35-45	1.24	1.07	1.14
Polyamide (PA 6)		1.23	1.08	1.14
Poly(oxyméthylène) (POM)	70-80	1.54	1.25	1.41
Poly(téréphtalate d'éthylène) (PET)	30-40	1.50	1.33	1.38
Poly(téréphtalate de butylène) (PBT)	40-50	-	-	1.3
Polypropylène (PP), principalement chaînes isotactiques	70-80	0.95	0.85	0.905
Polypropylène (PP), taux plus important de chaînes atactiques	50-60	0.95	0.85	0.896
Polyéthylène haute densité (PEHD)	70-80	1.0	0.85	0.95
Polyéthylène basse densité (PELD)	45-55	1.0	0.85	0.92

1.3 Différents niveaux structuraux :

On peut définir trois niveaux d'étude de la structure des polymères (figure1.5). On parlera d'échelles moléculaire, macromoléculaire et supramoléculaire.

A l'échelle moléculaire, on considère les différentes unités structurales monomères et leur agencement au sein du polymère. Afin d'obtenir un polymère, il faut avoir des monomères au minimum bifonctionnels, ce qui permet d'obtenir une chaîne linéaire. Mais les monomères peuvent avoir une fonctionnalité plus grande, conduisant ainsi à des polymères ramifiés sous des formes différentes (peignes, dendrites, étoiles, réseaux). De plus, les polymères ne sont pas forcément constitués d'un seul type de monomère (homopolymères) mais peuvent être formés à partir d'un mélange de monomères aux fonctionnalités différentes (copolymères). En

fonction de l'arrangement de ces différents monomères, on obtiendra des polymères nommés copolymères "alternés", "statistiques" ou "blocs".

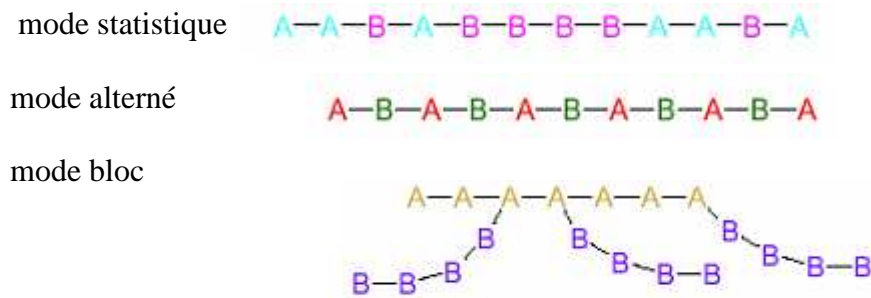


Figure 1.5: Les différents niveaux structuraux des polymères [14]

D'autre part, les polymères vont être dépendants de leur stéréochimie. Considérons un cas de polymère dissymétrique simple, par exemple les polyvinyles. L'enchaînement des Monomères vinyliques va conduire à la constitution de chaînes différentes en fonction de la présence des groupements latéraux de part et d'autre de l'axe de la chaîne carbonée principale [15,2,14].

Deux types d'enchaînements réguliers peuvent apparaître. 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. (figure 1.6)

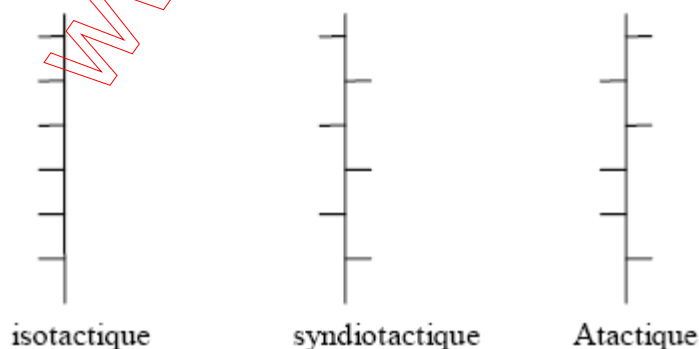


Figure 1.6: Formes isotactiques, syndiotactiques et atactiques des chaînes polymères [15]

A l'échelle macromoléculaire, on considère les dimensions des polymères obtenus, c'est à dire le nombre de monomères liés de façon covalente dans une seule chaîne

polymérisée. Ce nombre de monomères est nommé degré de polymérisation n . Il permet d'obtenir la masse molaire M de la chaîne, puisque $M = n \cdot M_n$ ou M_n est la masse molaire de l'unité de répétition..

A l'échelle supramoléculaire, on va observer l'agencement des chaînes entre elles et la constitution de zones amorphes ou cristallisées qui va en résulter. En effet, quelques polymères thermoplastiques ont la possibilité de cristalliser [15]

1.4. Comportement mécanique des polymères:

Les propriétés des matériaux polymères sont beaucoup plus sensibles que celles des métaux aux influences extérieures, telles que la température, la durée, l'intensité et le type de chargement, les radiations UV et les agents chimiques. leur module d'élasticité est en général inférieur de deux ordres de grandeur environ à celui des métaux. les caractéristiques de résistance peuvent différer d'un ordre de grandeur seulement. Le concepteur de pièces en matière plastique est donc souvent obligé de prendre également en compte les problèmes de déformation dans le calcul de leur résistance. [6]

1.4.1. Facteurs ayant une influence sur les propriétés mécaniques des Polymères

-La cristallinité (ou taux de cristallinité) correspond au pourcentage en poids de phase cristalline dans le matériau. Les cristaux ont une résistance chimique beaucoup plus élevée que la phase amorphe du même matériau. Les matériaux semicristallins sont ainsi généralement beaucoup plus résistants aux solvants organiques que les matériaux amorphes. Cela provient des interactions fortes entre les molécules dans les cristallites, que les solvants ne peuvent dissoudre. [16]

-La température de transition vitreuse (T_g) correspond à la température à laquelle le polymère passe de l'état vitreux à l'état caoutchoutique. Dans l'état vitreux (températures basses), les mouvements intermoléculaires (glissements des chaînes) sont bloqués. Lorsque les mouvements intermoléculaires sont possibles, c'est l'état caoutchoutique. La température de transition vitreuse dépend donc de la rigidité de la chaîne polymère (une chaîne rigide aura une T_g haute, une chaîne souple aura une T_g basse), de la taille des groupes latéraux (des groupes latéraux grands vont être des obstacles au glissement des chaînes et donc donner un polymère de haute T_g) et la force des interactions intermoléculaires (des interactions fortes donnant une haute T_g). [16]

- Le taux de réticulation correspond à la densité de liaisons pontales entre les chaînes. Il est évident que la présence des liaisons covalentes entre les chaînes (polymères thermodurcissables) donne lieu à des propriétés différentes de celles des polymères purement linéaires (matériaux thermoplastiques) dont les seules liaisons intermoléculaires sont des

liaisons faibles (Van der Waals, ponts hydrogène etc.). Par exemple, les thermoplastiques peuvent être fondus puis re-solidifiés alors que les thermodurcissables se décomposent à haute température mais ne fondent pas. [16]

1.5. Polyamide PA66

1.5.1.Introduction

En 1927, la société américaine DuPont constitue un service de recherches pour l'étude de la synthèse des polymères à longues chaînes. La direction en est confiée à Wallace Hume Carothers. Le polyamide 6-6 est découvert en 1936, la production à l'échelle industrielle débutera en 1938. Parallèlement Paul Schlack un chimiste allemand, obtient par ouverture puis polycondensation d'un caprolactame (amine cyclique), une résine polyamide à six atomes de carbone baptisée Perlon. Le polyamide (PA) a été rapidement utilisé dans l'industrie textile, en particulier pour la fabrication des toiles de parachute. Au départ le nylon s'appelle No run (« ne file pas » en anglais) en rapport avec les bas en soie qui filaient, puis il s'appelle Nolen, Nolon et enfin Nylon. Plusieurs histoires reviennent sur l'origine du terme Nylon, le nom viendrait des initiales des épouses des chimistes de Du Pont de Nemours, qui collaborèrent à la découverte,. Pendant la deuxième guerre mondiale, l'acronyme du mot a été déformée pour faire Now You've Lost Old Nippons (« Maintenant vous avez perdu vieux Japonais »).[17]

1.5.2.Description générale de Nylon 6,6

Thermoplastique industriel semi-cristallin qui est le nylon aliphatique non renforcé, considérées parmi les meilleures de tous les thermoplastiques industriels. Le polyamide est un polymère qui à l'état solide est sous forme semi-cristalline : une partie est ordonnée ou cristalline et une autre désordonnée ou amorphe. 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.[16,18]

Le polyamide 6.6 est désignés par deux chiffres relatifs au nombre d'atomes de carbone contenu dans le motif de répétition (figure1.7). Dans la désignation usuelles comme PA 6-6, les valeurs correspondent au nombre d'atome de carbone composant un motif de la chaine dont respectivement, le nombre d'atomes de carbone de la diamine et du diacide. [17]

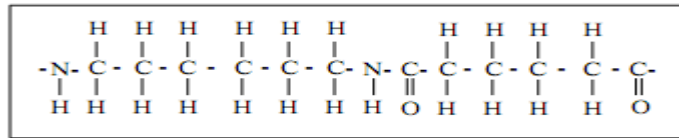
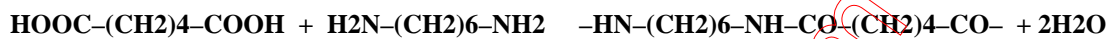


Figure1.7: Structure de l'unité de répétition dans le nylon 66.[19]

1.5.3.Synthèse.

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:



acide adipique hexaméthylène diamine hexaméthylène adipamide

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

1.5.3.1. 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. 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 (figure1.8) [20].

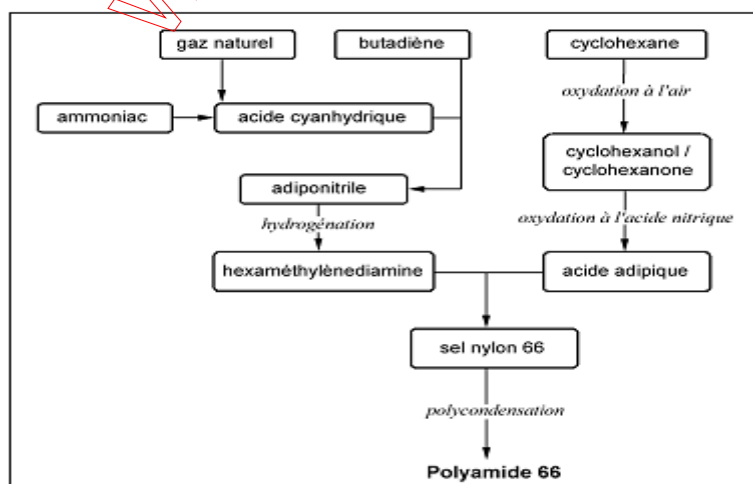


Figure 1.8. Arbre de la chimie du sel nylon 66 [20].

1.5.3.2. La synthèse du Polyamide 66.

Une fois les intermédiaires obtenus, ils sont transformés sous forme de sel nylon 66, l'adipate d'hexaméthylènediamine : $+H_3N-(CH_2)_6-NH_3^+$, $-OOC-(CH_2)_4-COO-$. La stœchiométrie 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.[20]

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. [20]

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 [20]

1.5.4. Propriétés mécaniques.

La résistance mécanique des polyamides varie avec la teneur en humidité d'autant plus que celle-ci est importante, ainsi qu'avec la vitesse de sollicitation imposée. Alors que la vitesse d'impact doit être grande pour provoquer la rupture, le fluage se produit pour de faibles vitesses de déformation. Les essais classiques de traction, de compression, de flexion et de cisaillement sont généralement réalisés à vitesse moyenne, à l'état sec et à l'état humide. Une mesure de la viscosité en solution, liée à la masse moléculaire en nombre (M_n), permet de se faire une première idée du niveau des propriétés mécaniques. Les propriétés

mécaniques finales dépendent aussi des conditions de transformation prises dans leur ensemble (compoundage, moulage ou extrusion, réception et refroidissement). [21]

1.5.5. Propriétés chimiques

1.5.5.1. Résistance aux produits chimiques

Les PA ont une bonne résistance au contact d'un grand nombre de produits chimiques courants ainsi, par exemple:

— Ils sont insensibles aux carburants (essences ordinaire et super, avec ou sans plomb, gazole), à la plupart des huiles de lubrification des graisses, des fluides hydrauliques et de transmission, des peintures, des laques, des produits cosmétiques ou alimentaires, aux aldéhydes, esters, cétones, éthers, ainsi qu'aux bases faibles à moyennement fortes;

— Un certain gonflement peut se produire lorsqu'ils sont immergés dans les hydrocarbures aromatiques, dans les hydrocarbures fluorés et dans les alcools, bien qu'il ne se produise pas d'attaque chimique;

— Ils résistent assez bien à l'eau bouillante désaérée ou chlorée, mais leur durée de vie est limitée en présence d'eau bouillante brassée fortement oxygénée et, dans ce cas, il est nécessaire d'utiliser des grades spécialement stabilisés (antioxydants).

En revanche, les polyamides se dissolvent dans les acides minéraux concentrés, les phénols et les solvants chlorés, notamment à chaud, qui sont donc utilisés pour mesurer leur viscosité en solution. [21]

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. [22]

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), hydrocarbure 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, Zn, Cl_2), le tableau 1.2 donne les valeurs d'absorption de différents solvants pour les PA6, PA6-6, PA6-10, PA11 en (%) [11].

Tableau 1.2: comparaison de l'absorption de solvants par PA6, PA6-6, PA6-10, PA11[11]

Nylon	PA 6	PA 6-6	PA6-10	PA 11
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

1.5.5.2. Fatigue, abrasion et coefficient de frottement

Les polyamides ont de bonnes propriétés d'endurance en fatigue qui peuvent être encore accrues par incorporation de charges renforçantes. Ils ont un faible coefficient de frottement au contact de beaucoup d'autres matériaux. Ainsi, à titre indicatif, pour le couple PA/acier, les coefficients de frottement sont les suivants :

- Frottement statique: 0,35 à 0,7;
- Frottement dynamique sec : 0,2 à 0,4 ;
- Frottement dynamique lubrifié: 0,02 à 0,1.[21]

1.5.6. Absorption d'eau.

La présence de l'eau, qui conditionne la majeure partie de propriétés physiques ou mécaniques des PA est primordiale, aussi bien lors de leur mise en oeuvre que pour une utilisation ultérieure [22]

L'absorption d'eau est à considérer, plus particulièrement, pour les matériaux hygroscopiques comme les polyamides (figure1.9) [11]

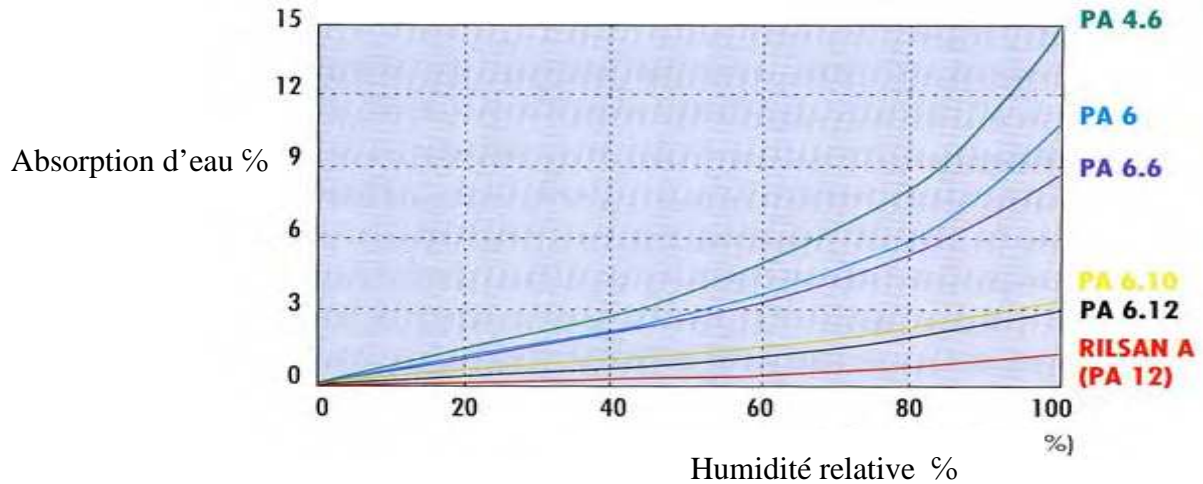


Figure1.9: Absorption d'humidité (% en masse) en fonction de l'humidité relative (%) de l'air ambiant pour plusieurs polyamides [23]

La quantité d'eau absorbée par un polyamide va dépendre de la nature et de la structure physique de celui-ci, du pourcentage d'humidité relative de l'atmosphère ou de la composition du milieu d'immersion, et bien sûr du temps, de la température ou encore de l'application d'une contrainte. Parmi les principaux paramètres structuraux influençant la cinétique d'absorption des PA, on distingue particulièrement la concentration en groupes amine et la présence de zones cristallines. En effet, lorsque le rapport du nombre de groupes aliphatiques non polaires de la chaîne sur le nombre de fonctions amine $-CH_2-$ / $-COONH$ augmente, l'absorption à saturation diminue (Figure 1.10). [22] pourcentage de l'amide dans la

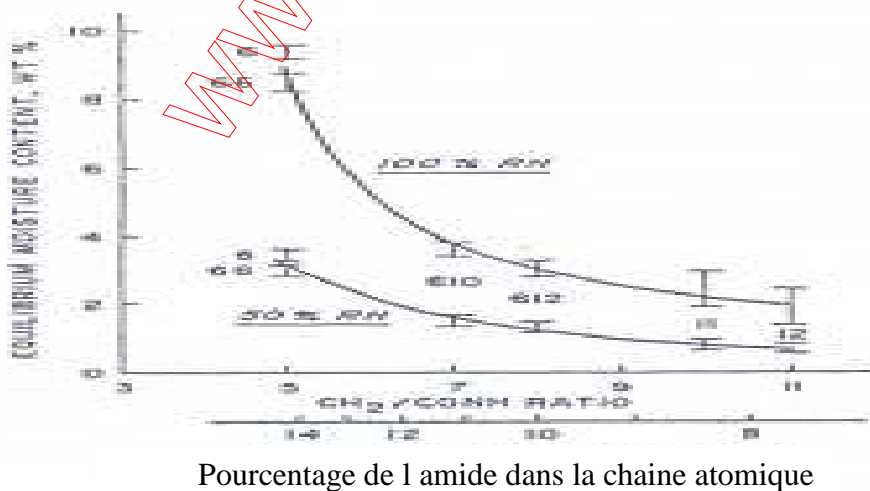


Figure1.10: Absorption à saturation de PA aliphatique en fonction de la concentration en amine pour différents HR [22]

Lors de leurs utilisation, une atmosphère très humide pourra rendre inadéquates en dimensions les pièces réalisées en polyamides absorbant beaucoup d'humidité et modifiera de façon sensible leurs propriétés. [21]

Le diagrammes contrainte-allongement en traction à 23°C du PA 6-6 pour différentes teneurs en humidité sont donnés sur la (figure 1.11)

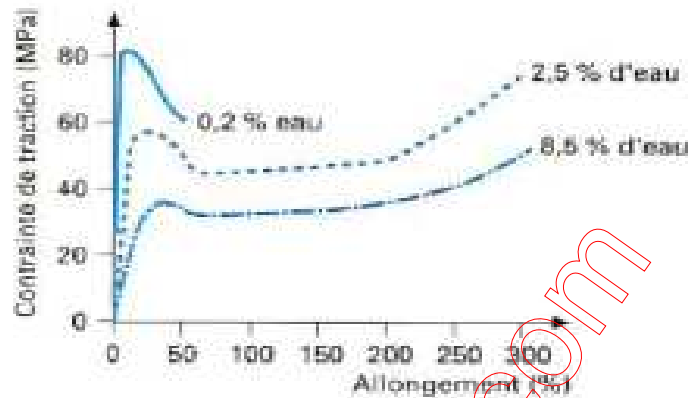


Figure 1.11 : Courbes contrainte-allongement en traction à 23 C de PA 6-6 non chargés, à différentes teneurs en eau absorbée (% en masse) [21]

Pour certaines matières plastiques, l'absorption d'eau entraîne une plastification de celles-ci et, par conséquent, une diminution de leur résistance en flexion (figure1.12).[24]

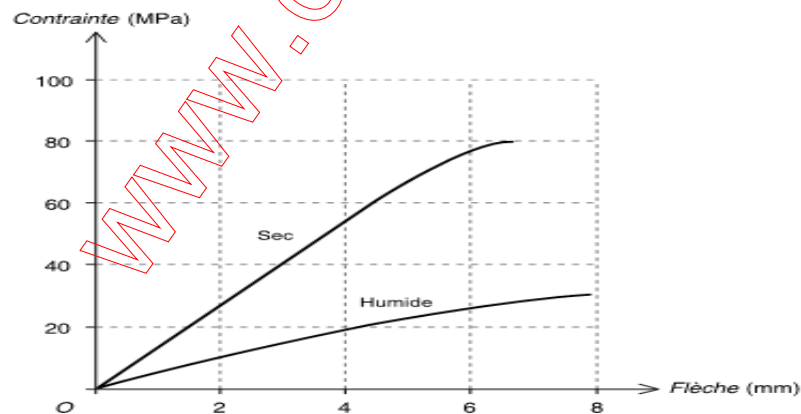


Figure1.12: Influence de la reprise d'humidité sur la résistance en flexion pour un polyamide (PA 66.). [24]

1.5.7. Résistance au choc.

La résilience caractérise la capacité d'un matériau à absorber les chocs sans se rompre. Elle est mesurée sur des machines de type Charpy (éprouvette sur deux appuis, voir figure1.13) [25].

Test Charpy (Vue de dessus)

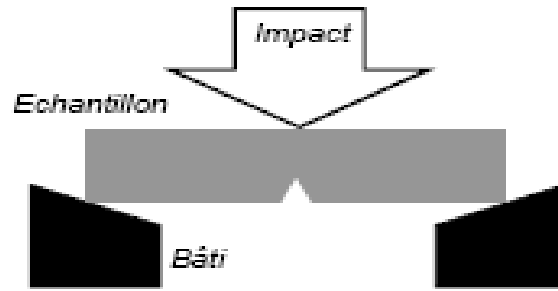


Figure 1.13 :La position des échantillons entaillés pour les essais Charpy [26]

La ténacité dépend de la combinaison entre la force appliquée et la déformation résultante. La capacité d'absorption d'énergie d'un matériau est beaucoup mieux définie par sa résistance au choc, également appelée résilience, ou sa résistance au choc sur éprouvette entaillé, également appelée résilience. En effet, deux matériaux caractérisés par la même ténacité peuvent être tels que l'un se rompt pour une force élevée avec une faible déformation et l'autre pour une force plus faible mais avec une déformation plus grande.

La capacité d'absorption d'énergie d'un corps est définie comme l'énergie à fournir pour provoquer sa rupture. Cette énergie peut être déterminée, par intégration, à partir de l'aire sous la courbe force-allongement correspondante jusqu'au point de rupture. Rapportée à la section normée ou au volume de l'éprouvette étudiée, elle est souvent définie comme la ténacité du matériau. . [11]

Tableau 1.3 : résistance au choc de PA66 [21]

Propriétés mécaniques: Polyamides aliphatiques non chargés : propriétés mesurées sur éprouvettes sèches	PA66
Choc Charpy à 23 oC avec entaille	3
Dureté Rockwell R	120
Choc Izod à 23 oC	50
Dureté Shore D	80

À basse température, ce sont les matériaux absorbant le moins d'humidité et restant le plus flexibles qui supportent le mieux les chocs [21]

L'augmentation de la durée de la sollicitation a un effet analogue à l'augmentation de la température. Lors d'une augmentation de température, la rigidité du matériau décroît et la

ténacité augmente (la déformation au seuil découlement ou à la rupture s'accroît ainsi que la résistance aux chocs). [27]

La Figure 1.14: représente la résistance au choc entaillé en fonction de la température obtenue typiquement avec un polyamide non renforcé et un polyamide renforcé. On peut distinguer plusieurs régimes [26]

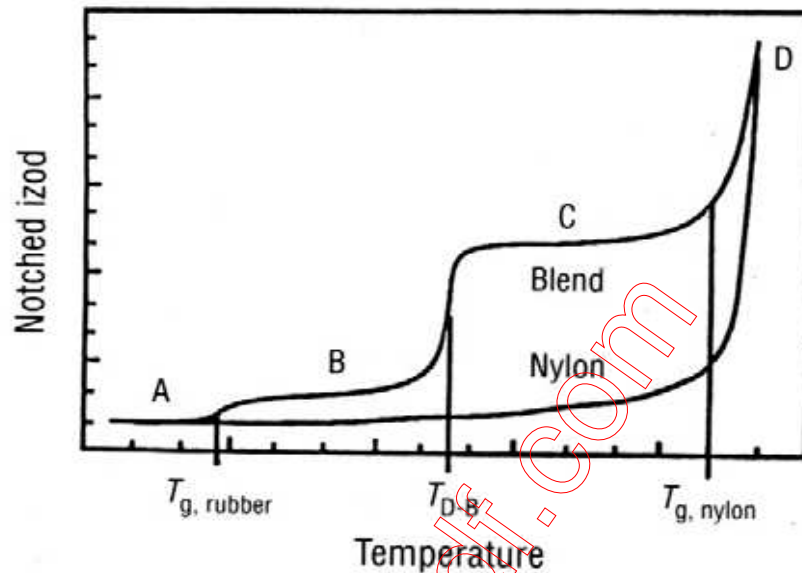


Figure 1.14 : Evolution typique de la résilience en choc entaillé en fonction de la température pour un polyamide non renforcé (Nylon) et renforcé par un élastomère [26].

1.5.8. Procédé de fabrication des pièces plastiques

1.5.8.1 Moulage par injection.

Ce procédé est l'un des plus importants dans l'industrie des plastiques. Il a fait l'objet d'un développement intensif et peut maintenant être utilisé pour produire des articles d'une complexité considérable à un coût très bas. [28].

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.

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 et RYNITE, les polyamides, livrées sous forme de granulés, sont séchées 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. [29]

1.5.8.1.1. 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 DERLIN jusqu'à environ 300°C pour certains polyamides ZYTEL et polyesters RYNITE renforcés de fibre de verre (figure1.15).[29]

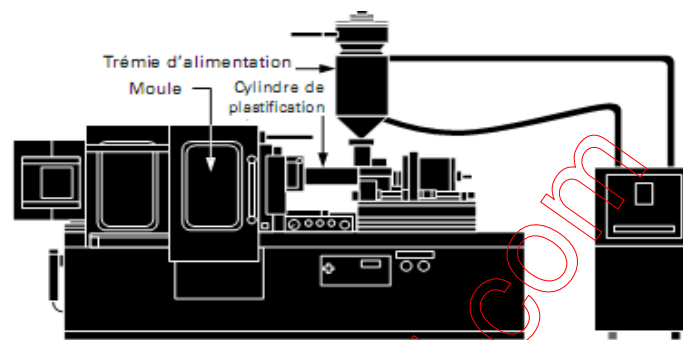


Figure1.15: Presse à injection [12]

1.5.8.1.2. 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 [29]. L'obtention de pièces injectées de grande qualité résulte en effet de la finesse de réglage des paramètres de moulage et de la constance dans le temps de ceux-ci:

- Alimentation en granulés déshydratés;
- Plastification/ fusion avec parfaite homogénéisation de la température;
- Dosage précis de la matière fondue;
- Injection rapide et remplissage simultané des empreintes du moule
- .régulation thermique précise du moule et du fourreau de la vis.
- .ouverture-fermeture du moule et éjection des pièces moulées en cycle automatisé. [21]

1.5.8.2. Les paramètres d'injection

1.5.8.2.1. Température de la matière fondue

Des variations de la température de la matière fondue aux alentours des températures habituelles n'ont qu'une faible influence sur les dimensions de la pièce moulée. Avec des températures trop basses, il peut y avoir un mauvais remplissage du moule. Avec des températures trop hautes, il y a le danger d'un endommagement thermique du matériau.

1.5.8.2.2. Température du moule

Elle a une très grande influence sur le retrait de la pièce moulée. Le retrait est plus important avec une température de moule faible, qu'avec une température de moule élevée. Les températures de moule habituelles pour le Polyacétal et le Polyamide se situent entre 60°C et 120°C.

1.5.8.2.3. Vitesse d'injection

Elle a l'influence la plus élevée sur l'orientation et la cristallisation de la matière moulée. L'importance du retrait en dépend fortement.

1.5.8.2.4. Durée de maintien sous pression

La durée de maintien sous pression est la durée d'injection ajoutée à la durée de maintien sous pression elle-même. Il existe un temps de maintien sous pression pour lequel le retrait de moulage est minimal et constant et pour lequel la masse de la pièce est la plus élevée. Certains tentent de montrer qu'il existe une relation mathématique entre la précision de la pièce moulée et les paramètres d'injection.

Cependant, actuellement ce n'est que grâce à son savoir-faire et à son expérience que le mouleur déterminera les paramètres d'injection permettant d'obtenir, pour un moule donné, une pièce optimale. [30]

1.5.9. Les applications de PA66

- **Mécaniques:** grâce à sa rigidité, il est utilisé dans l'industrie mécanique quand on demande cette caractéristique à détriment de la résistance au choc pour obtenir: engrenages, cames, poulies, guidage anti-usure et pièces mécaniques en général.

- **Alimentaire:** dans certaines occasions il peut être utilisé à contact avec des aliments.
Electriques: la variation des caractéristiques électriques causée par la variation du teneur de l'humidité limite fortement l'utilisation dans domaine.

- **Chimiques:** il résiste aux alcalis, aux composés inorganiques et aux solvants. [31]

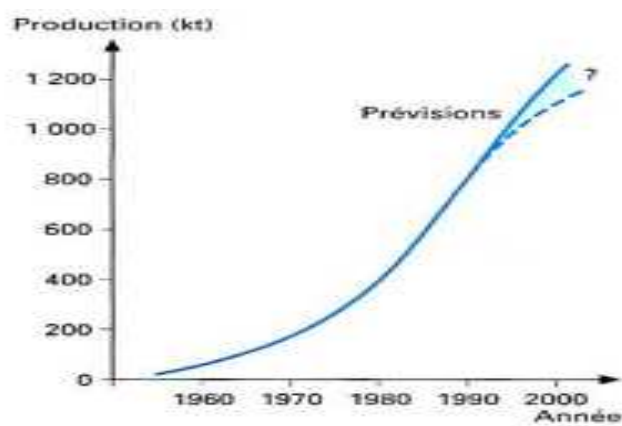


Figure1.16: Évolution dans le temps de la production mondiale de polyamides. [21]

www.xpdf.com

Références Chapitre 1

- [1] J-L. Halary, F. Lauprêtre, L.Monnerie « Mécanique des matériaux polymères (Belin Échelles, 2008)
- [2] J.M Cowie, s Polymer Chemistry and physics of modern Material, Blackie, 1991
- [3] S. Lakshmi . Nair1 · Cato T. Laurencin, Polymers as Biomaterials for Tissue Engineering and Controlled Drug Delivery, 102: 47–90 2006
- [4] P. Kiekens Thermoplastic polymers: overview of several properties and their consequences in flax fibre reinforced composites Polymer Testing, Volume 20, , 2001, Pages 885-893 K. Van de Velde, P. Kiekens
- [5] M.Bouktra, Détermination de la loi de comportement effective du polyethylene terephthalate par les algorithmes genetiques , thèse de magistère Annaba,2008
- [6] G.W.Ehrenstein et F.Montagne, Principaux domaines d'application des matières plastiques, 2002.
- [7] M Carrega et Coll, Matériaux industriels. Matériaux polymères, Dunod, Paris 2000
- [8] J.Rault, Les polymères solides. Amorphes, élastomères, semicristallins, Cépaduès-Editions, Toulouse (2002)
- [9] M .Carrega. les polymères de la molécules à l'objet, EDP Science,Cedex,France 1999
- [10] M. Reyne, *Technologie des plastiques*, HERMES, Paris, 1998.
- [11] G. W. Ehvenstrein, F.Montagne, Matériaux polymère, Structure, propriétés et application, Harmés, Paris, 2000
- [12] G. Jarrousse, Self adhesion of semi-crystalline polymers between their glass transition temperature and their melting temperature, thèse doctorat, Université ParisVI 2004
- [13] F. coeuille, Revêtements polymères de canalisation de fluide: caractérisation de l'adhésion en milieu agressif, Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris,2002
- [14] J-L. Halary, F. Lauprêtre, De la macromolécule au matériau polymère, (Belin Échelles, 2004)
- [15] C.dutriez, corrélations entre les propriétés diélectriques et mécaniques des polymères ; influence de la température, docteur de l'Ecole Centrale de Lyon et de l'Ecole Doctorale des Matériaux de Lyon, 2004
- [16] J .Bost ., Matières plastiques I. Chimie Applications, 2ème édition, Technique et Documentation (Lavoisier), Paris 1985
- [17] Plastics Technology, « Water Injection: It's All Coming Together », 2005

- [18] J. C-Barrioz. Mécanisme d'usure de polymère orientés: Application à l'abrasion des fibres de polyamide, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2003
- [19] I Boustead, Eco-profiles of the European Plastics Industry, POLYAMIDE 66 (Nylon 66), March 2005
- [20] A.Marcellan, Microstructures, micromécanisme et comportement à la rupture de fibre de PA66, Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2003
- [21] B.Guérin, polyamide, technique de l'ingénieur, traité plastique et composites volumes A3360-2, 2003
- [22] F.Poulard, Adhésion du polyamide 11: mécanismes et vieillissement hygrothermal, thèse de doctorat , école des mines de paris,1998
- [23] A.carin, étude expérimentale et modélisation thermomécanique de l'étape de calibration dans le procédé d'extrusion de tubes en polyamide 12,thèse de doctorat école des mines de paris ,2005
- [24] Document Dunod, pratique des plastiques et composites, décembre 2003
- [25] ASTM E23 : Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials
- [26] L Corté, renforcement des polymères semi-cristallins, thèse de doctorat, Université pierre et marie curie, 2006.
- [27] R.Detene, F.Froyer, Introduction aux matériaux polymers, Technique et Documentation, Paris 1997
- [28] Eco-profiles of the European Plastics Industry, POLYAMIDE (66 Nylon 66), March 2005
- [29] W .Ghalloudj., Etude de l'endommagement et de la fiabilité des engrenages à dentures droites en polyamide 66, Magister, Université Annaba, 2008
- [30] H.P. Braunger, Sind die Herstellbedingungen von spritzgegossenen Zahnrädern schon optimal ?, MaschinenMarkt, Vol. 86, N.26, mars 1980, p. 471-474
- [31] "Scaling concepts in polymer physics" P. G. de Gennes 1979

2.1. Introduction

Nul ne sait quand les engrenages ont été inventés. Les archéologues estiment qu'ils auraient été inventés 5000 ans avant Jésus Christ lorsque les être humains paresseux de relever l'eau du sol eux-mêmes ont l'idée d'utiliser les animaux. Ainsi, ils ont eu besoin de transférer la rotation de l'orientation horizontale à la verticale.

Dans les premiers siècles ils ont été employés par les ingénieurs pour soulever des charges lourdes (matériaux de construction par exemple). Les premiers engrenages ont été fait à partir du bois et souvent lubrifiées par de la graisse animale.

Ils ont été également utilisés dans l'industrie éolienne et la production de vapeur afin de diminuer ou augmenter la vitesse de rotation fournie par les pompes et les turbines.

Aujourd'hui, vu les progrès résultant d'une constante amélioration des procédés d'élaboration des matériaux, des processus de fabrication du soin apporté lors du montage et l'amélioration de la propreté inclusionnaire des matériaux, la durée de vie des engrenages est nettement améliorée [1,2].

2.2. Définition des engrenages

La transmission de l'énergie mécanique entre deux (ou plus) arbres relativement proches, animés de mouvements de rotation, est assurée par un engrenage comportant toujours au moins deux éléments :

- une roue dentée de la plus petite taille désignée sous le terme de pignon,
- une roue dentée identique ou plus grande désignée sous le terme de roue dentée [3]

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 on trouve les dentures droites, les dentures hélicoïdales, etc...
- **Les engrenages à axes concourants**: ce type est nommé conique. Les deux arbres sont tels que leurs axes de rotation se coupent. On distingue les sous catégories
 - ❖ Denture droites, les génératrices passent par le point de concours des axes de rotation.

- ❖ dentures hélicoïdales
- ❖ dentures spirales, engendrées par des segments rectilignes s'appuyant sur une courbe directrice
- **Les engrenages a 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 dentures hypoïdes [4,5,6]

2.3. Cycle de fonctionnement d'un engrenage (étude de l'engrènement)

L'engrènement d'un pignon et d'une roue est caractérisé par (figure2.1):

- **Début d engrènement:**

le profil P1 est attaqué a sa pointe par le profil P2. Le début se caractérise donc par le point d'intersection A de la ligne d'action et du cercle de tête de la roue menée.

- **Fin d'engrènement:**

Dans cette situation, le profil P2 est en contact par sa pointe avec le profil P1. le point extrême d'action B est l'intersection A de la ligne d'action avec le cercle de tête de la roue menante.

- **Période d'approche et de retraite:**

La période d'approche est celle qui comprise entre le début de l'action et le moment ou le point de contact est au primitif (point I sur la ligne d'action). La longueur d'approche est alors:

$$gf=AI \quad (2.1)$$

la période de retraite est comprise entre le moment ou le point de contacte en I et la fin de l'action (point B sur la ligne d' action). Elle est donnée par :

$$ga=IB \quad (2.2)$$

Pour un engrenage parallèle à denture droite, les paramètres (figure 2.1) essentiels d'engrènement sont:

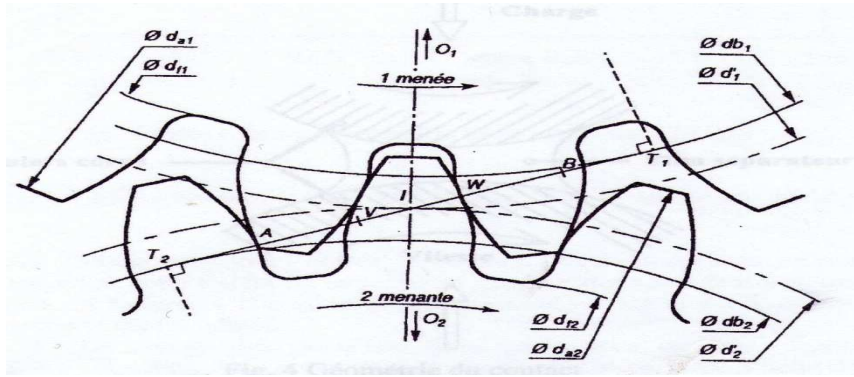


Figure 2.1: paramètres d'engrènement. [2]

O_1O_2 : entraxe de fonctionnement a ;

α : angle de pression de fonctionnement;

T_1T_2 : droite d'action;

AI: segment d'approche;

IB: segment de retraite

AB: segment de conduite

VW: segment de contact unique

d_{b1}, d_{b2} : diamètre de base de la roue 1 et 2.

d_1, d_2 : diamètre primitif de la roue 1 et 2.

d_{a1}, d_{a2} : diamètre de tête de la roue 1 et 2

d_{f1}, d_{f2} : diamètre de pied de la roue 1 et 2 [2]

2.4. Développement de cercle:

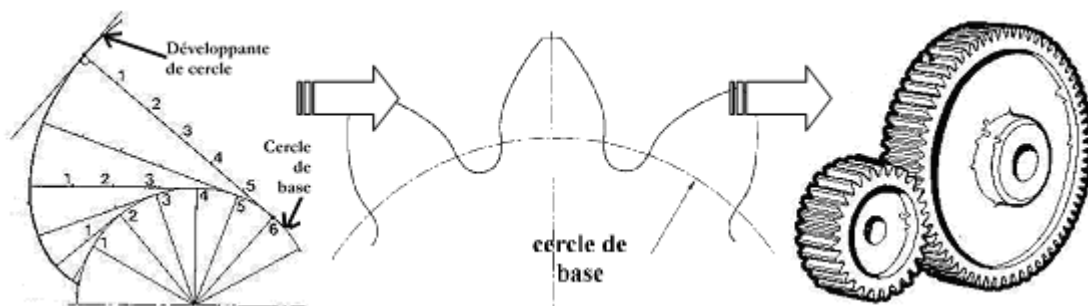


Figure. 2.2 : Principe de définition d'une courbe à développante de cercle.

- application au cas des engrenages cylindriques -[7]

La courbe à développante de cercle (figure 2.2) est le profil tracé par l'extrémité d'un segment de droite roulant sur un cercle de base. Concrètement, une développante de cercle s'obtient en enroulant un fil autour d'un cylindre de diamètre donné (cercle de base). Si un crayon est attaché à l'extrémité du fil, et si ce dernier est ensuite tendu vers l'extérieur, la pointe du crayon décrira une courbe à développante. [7]

2.5. Etudes des engrenages parallèles à dentures droites.

On appelle denture droite (figure 2.3) 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.

2.5.1. Caractérisation des engrenages cylindriques à denture droite.

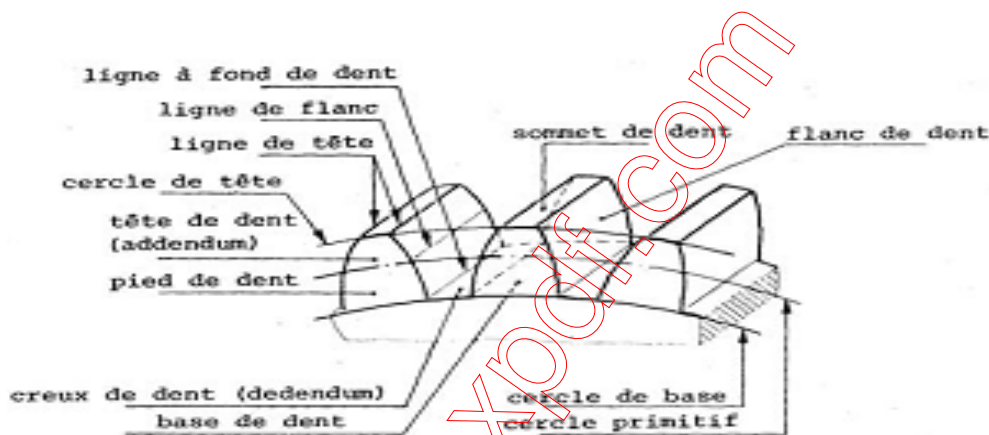


Figure 2.3: Caractérisation géométrique des engrenages cylindriques à dentures droites [8]

Cercle primitif : cercle imaginaire qui correspond à la circonférence des roues de friction équivalentes à partir desquelles l'engrenage droit est généré.

Diamètre primitif (D) : diamètre du cercle primitif de la roue (D_g) ou du pignon (D_p).

Nombre de dents (N) : nombre de dents de la roue (N_g) ou du pignon (N_p).

Pas diamétral (P) : rapport entre le nombre de dents et le diamètre primitif en pouces. Les pas diamétraux sont normalisés, en po-1, par l'AGMA.

Pas primitif (p) : distance, mesurée le long du cercle primitif, d'un point sur une dent au point correspondant sur la dent adjacente.

Module (m) : Quotient du pas exprimé en mm par le nombre π . Les modules sont normalisés, en mm, par ISO.

Saillie : Distance radiale à partir du cercle primitif jusqu'au sommet de la dent.

Creux : Distance radiale à partir de cercle primitif jusqu'au fond de chaque entre - dent.

Épaisseur : Longueur de l'arc du cercle primitif compris entre les deux profils d'une dent.

Diamètre de tête : diamètre du cercle passant par les sommets des dents.

Diamètre de pied : Diamètre du cercle passant par le fond de chaque entre – dent.

Angle de pression : Angle aigu entre le rayon du cercle primitif passant par le point, où le profil d'une dent coupe le cercle primitif, et la tangente au profil de ce point. Les angles normalisés sont 14,58, 20 et du 25°. L'angle de pression de 20° est le plus utilisé actuellement. Cette variable affecte la forme de dent. Plus l'angle de pression est élevé (pour même cercle primitif et même pas diamétral), plus la dent est épaisse au cercle de base et plus elle est mince au cercle de saillie. [9]

Tableau2.1 : caractéristiques dimensionnelle des engrenages cylindriques à dentures droites [10]

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	$a = (d_1 + d_2)/2$

2.6. Résistance des engrenages

2.6.1. Méthode de Lewis

On utilise la méthode simplifiée de Lewis (figure 2.4) 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 [11,12].

En réalité

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

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

$$W = F_t \cos \alpha_a / \cos \alpha \quad (2.4)$$

α étant l'angle d'incidence ou de pression

Donc

$$W = F_t \quad (2.5)$$

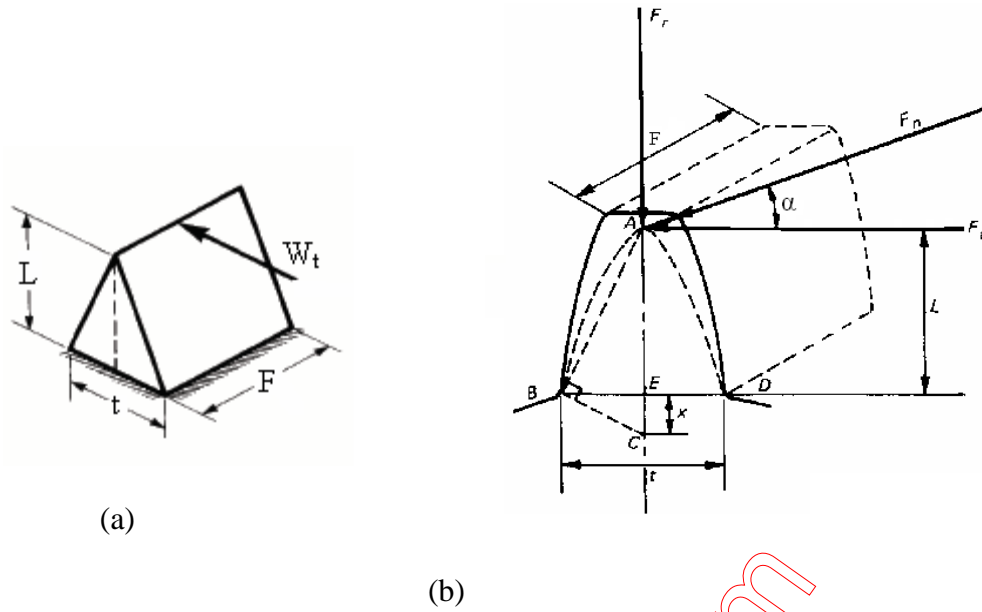


Figure 2.4 : Modèle de Lewis [13]

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

$$w = \sqrt{(w_t)^2 + (w_r)^2} \quad (2.6)$$

$$w = \frac{2T}{D_P} \quad (2.7)$$

$$w_r = w_t \tan \alpha \quad (2.8)$$

$$T = 9550 \cdot \frac{P}{n} \quad (2.9)$$

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

$$\sigma = \frac{W_t \cdot P_d}{F \cdot J} K_S \cdot K_0 \cdot K_m \cdot K_v \quad (2.10)$$

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 [11,14].

2.6.3. Pression superficielle

La valeur de la pression de contact sur les flancs des dents a une grande signification pour la durée de vie [15]. 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 2.5b, 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 .

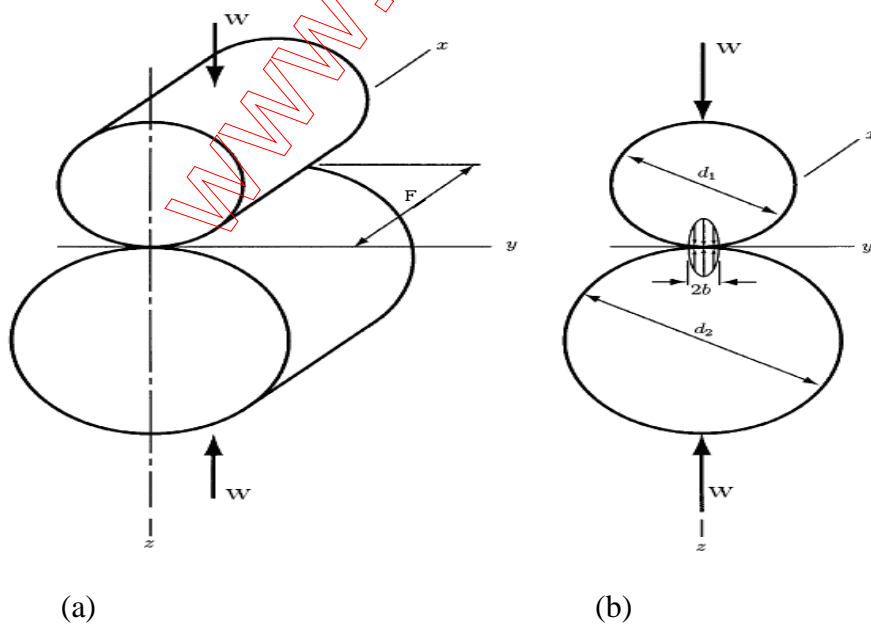


Figure 2.5 : Effort de contact de deux cylindres. (a) Cylindres en contact; (b) distribution de pression de contact [16]

2.6.4. Contrainte de surface

$$\sigma_H = |p_{\max}| = C_p \sqrt{\frac{W_t \cdot C_o \cdot C_m \cdot C_s \cdot C_f}{C_v \cdot F \cdot D_p \cdot I}} \quad (2.13)$$

C_p : coefficient élastique

C_f : facteur d'état de la surface

$$C_p = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1-\mu_p^2}{E_p} + \frac{1-\mu_g^2}{E_g} \right) \pi}} \quad (2.14)$$

μ_p et μ_g : Coefficient de Poisson des engrenages

E_p et E_g : module d'élasticité des engrenages

$$I = \frac{\cos \alpha \sin \alpha}{2} \frac{R_v}{R_v + 1} \quad (2.15)$$

(2.15)

R_v : le rapport de transmission entre les deux engrenages [17,18].

$$R_v = \frac{Z_g}{Z_p} = \frac{D_g}{D_p} \quad (2.16)$$

2.7. Origines d'avaries d'engrenages

Les avaries des engrenages en service présentent un coût important pour l'industrie et il est essentiel de les prévenir. Les statistiques concernant les causes des défaillances et la

localisation des défauts dans les transmissions de puissance à engrenages permettent de conclure que les organes les plus sensibles sont les roulements et les engrenages

Une enquête réalisée par une société des assurances a permis d'établir des statistiques sur les causes des défaillances. Les résultats de cette enquête sont résumés dans le tableau 2.1

Tableau 2 2: origines et localisation des défauts [19]

Origine des défauts	%	Localisation des défauts
Fabrication (calcul des assemblages, matériaux)	40	Dentures
		arbres
Exploitation (maintenance)	43	carter
Autres (machines adjacentes)	17	autres

Cette enquête montre que:

- La denture concerne la majorité des sources des défaillances
- Les erreurs de conception et les défauts de fabrication sont à l'origine de 40% des avaries.
- Une maintenance conditionnelle et préventive devrait permettre de réduire les nuisances occasionnées par les avaries en cours d'exploitation. [19]

2.8. Défauts des engrenages.

La plupart des mécanismes qui possèdent des pièces en mouvement, comportent des engrenages, des roulements....etc. le fonctionnement de ces mécanismes est lié essentiellement à la durée de vie de ces composants. Ces dernières subissent sous l'influence de multiples facteurs tels que charge transmise, dureté des matériaux, vitesse de glissement, rugosités, frottement, lubrifiant, etc. des avaries qui peuvent dans le cas extrême interrompre leur fonctionnement [20]

2.8.1. Usure

2.8.1.1. Usure par abrasion

L'usure par abrasion ou à lieu lorsque des particules dures sont présentes entre les surfaces de frottement. Ces particules contiennent des oxydes métalliques, les poussières abrasives, et des débris dur à partir de l'environnement. Ces premières particules pénètrent le métal, puis arracher les particules relativement importantes de la surface. Elle est l'une des formes les plus courantes d'usure et peut se manifester par des marques ou des rayures des surfaces. [21,22], les agents d'abrasion peuvent être de diverses natures, et liés ou non a l'un des deux corps, suivant les cas, on distingue deux cas distincts :

- Si les particules dures qui constituent l'abrasif sont fixées a la surface du corps antagoniste et qu'elles se déplacent a la surface du corps étudié sans rouler, on parlera d'abrasion de 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 l'abrasion trois corps [23]

La figure 2.6 présente ces deux types de mécanismes d'usure

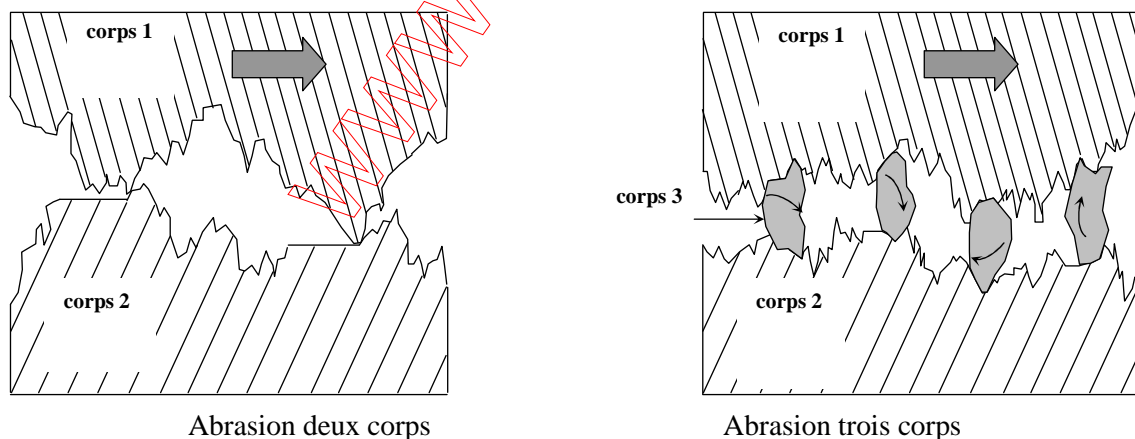


Figure 2.6 : mécanismes d'usure par abrasion [23]

2.8.1.1.1. Résistance à l'usure abrasive de polymères.

Les polymères toujours, peuvent avoir un degré étonnamment élevé de la résistance à l'usure abrasive par rapport à un métal de la même dureté. La résistance à l'usure abrasive des matières plastiques et les métaux mous est illustré à la figure 2.7. [24] La durée de vie

supérieure de polymères peuvent généralement être attribués à leur très haute résistance à l'abrasion par grains émoussés par rapport aux métaux, et de leur incapacité à la rupture grains aux produits frais des bords tranchants. [25]

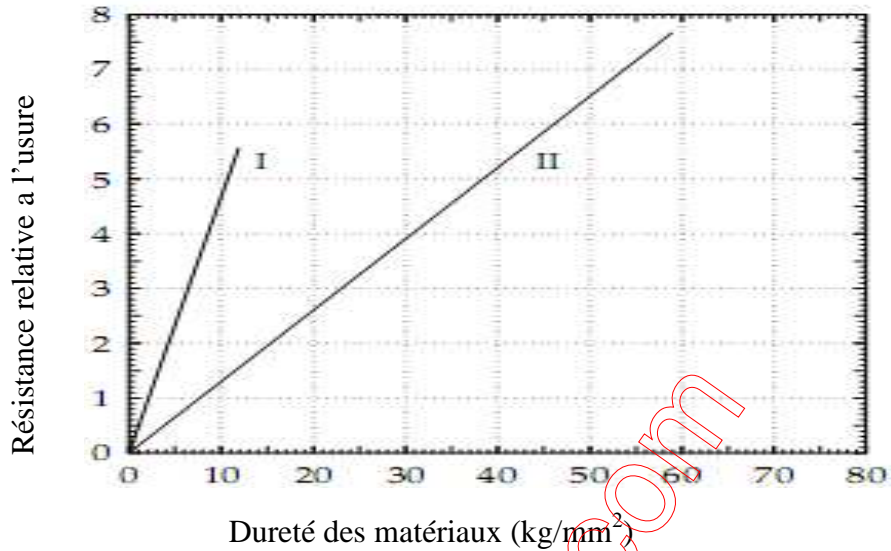


Figure2.7. Résistances usure par abrasion pour les plastiques et les métaux de dureté similaire; (I) en plastique (par exemple, L54, L68, nylon 6, le polyéthylène à basse pression, le polyéthylène à haute pression, polyfluoroéthylène), (II) des métaux (par exemple, argent, zinc, cadmium, plomb) [24]

Les propriétés d'usure par abrasion des matières plastiques peuvent être fortement touchées par des additifs tels que des charges et plastifiants [24]

2.8.1.2. Usure par adhérence

L'adhérence a été longtemps employée par l'Ecole Anglaise pour expliquer les phénomènes de frottement. On observe que deux matériaux dont les surfaces sont absolument pures adhèrent l'un à l'autre dans le vide, il faut une certaine force de traction pour les séparer. Il existe des liaisons appelées jonctions. L'adhérence des matériaux s'explique par la présence d'électrons libres à leur surface qui forment des filiations cristallines (jonctions cohésives) ou qui maintiennent les surfaces par des forces électrostatiques (fonctions adhésives). L'adhérence est favorisée par le contact qui existe entre les matériaux lorsque les aspérités sont écrasées plastiquement. En séparant un métal dur pressé contre un métal mou, on constate que des particules de ce dernier sont arrachées et adhèrent à la surface du premier. Donc il y a transfert du métal mou sur le métal dur. On observe que l'adhérence est réduite avec l'augmentation de la dureté ou de la rugosité des corps en contact. L'adhérence ne se manifeste habituellement pas, il n'est pas forcément d'exercer une force de

traction afin de séparer deux solides qui ont été pressés modérément l'un contre l'autre parce que :

- Les jonctions en état de déformation élastique se séparent naturellement lorsque la charge normale diminue, seulement les jonctions plastiques peuvent rester liées.

- Les surfaces sont toujours polluées par des oxydes, de la vapeur d'eau adsorbée, . Cette contamination empêche l'adhérence. La force d'adhérence correspond à la force nécessaire à la séparation des corps. Elle dépend notamment de la nature de la liaison, de la vitesse de séparation, de la géométrie du contact et des propriétés rhéologiques de l'interface. Le glissement n'est possible que par :

. Cisaillement du corps le plus tendre lorsque la soudure est résistante (figure 2.8) ; des particules du corps le plus tendre (1) sont transférées sur le corps le plus dur (2) , la substance du corps (1) finit par frotter sur elle-même. Cisaillement des microsoudures lorsqu'elles sont moins résistantes que les corps, il n'y a pas de matière arrachée.[26].

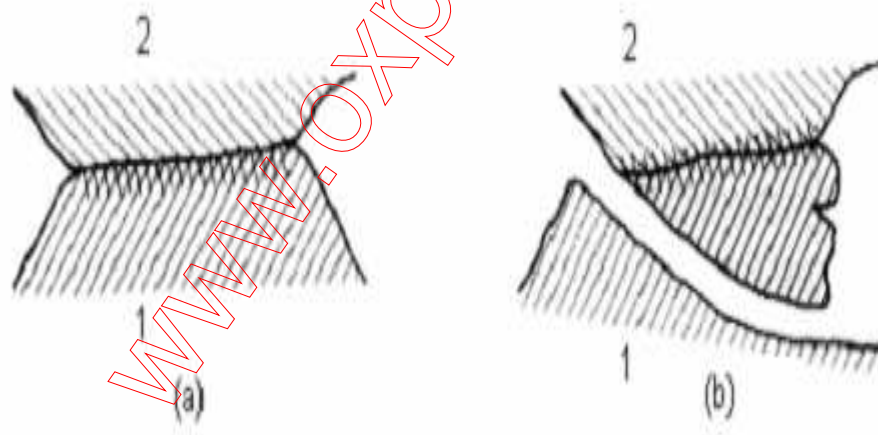


Figure 2.8: Transfert d'une particule (a) soudure d'une aspérité ;(b) arrachage d'une particule [26]

2.8.1.3. Usure par fatigue

Le terme de fatigue par contact »ou« fatigue de surface «couramment utilisé dans la littérature pour les endommagement de surface provoquée par un contact de roulement répétées .Les contacts entre les aspérités accompagnée de très fortes contraintes locales sont répétées un grand nombre de fois au cours de glissement ou du roulement, et les particules

d'usure sont générés par propagation de fissure de fatigue, d'où terme l'usure par fatigue,. L'usure dans ces conditions est déterminée par l'initiation de la fissure, la propagation des fissures et des ruptures. Surfaces usées contiennent des taux très élevés de la déformation plastique par rapport aux surfaces non usées. [27]

Il a été constaté que, pendant le glissement non lubrifié en particulier de réciprocity glissement, des particules d'usure peuvent se former en raison de la croissance des fissures de surface. Au cours du glissement de faibles plans faiblesse dans le matériau devient orientées parallèlement à la surface par le processus de déformation, et de particules d'usure laminaire sont formés par une fissure de surface atteignant un faible plan comme l'illustre la figure 2.9. [28]

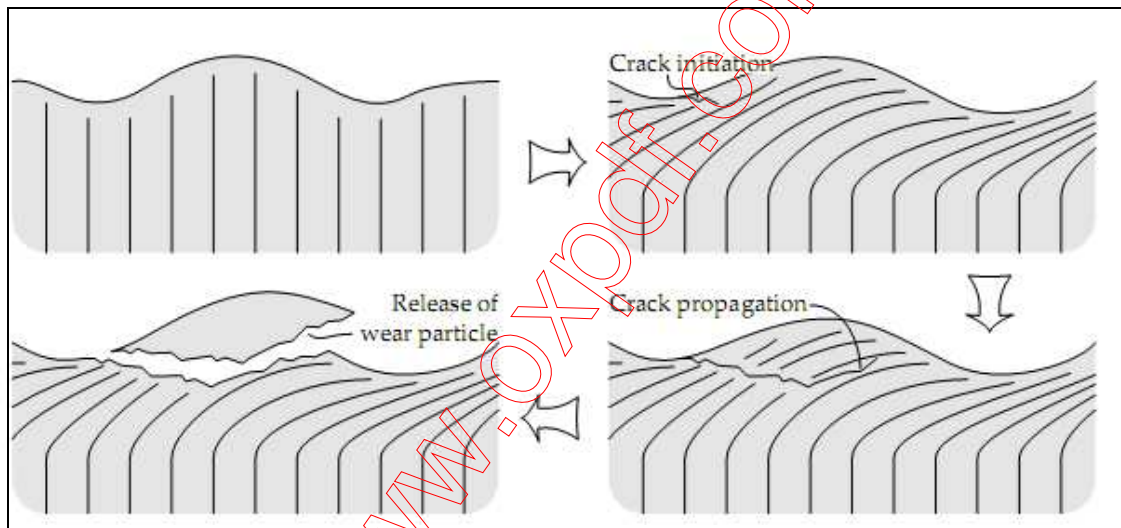


Figure.2.9 : mécanisme de formation de particules d'usure due à la croissance de surface a des fissures [28]

2.8.1.3.1. Causes de la fatigue de contact

En termes très généraux les causes de la fatigue de contact peuvent être résumées comme due soit par des limitations matérielles roulant, lubrification, ou des conditions d'exploitation. Matériau pour le contact du roulement doit être de qualité très élevé puisque toutes imperfections actuelles peuvent agir comme sites d'initiation pour le développement de fissures. L'état de surface doit également être de haute qualité car les fissures peuvent provenir de défauts de surface et les irrégularités. La présence d'un lubrifiant peut avoir un effet significatif sur la fatigue de contact en empêchant un contact réel entre les corps

roulants... La taille et la quantité de débris d'usure et de contaminants présents dans le lubrifiant sont très importantes. Débris d'usure et de contaminants peuvent affecter la fatigue de contact par les bosses et le grattage surfaces de contact en passant par le contact EHL, et donc créer de nouveaux sites pour le développement de la fissure. Les conditions de fonctionnement que le niveau de stress et la quantité de glissement peut aussi affecter de façon significative la fatigue de contact [27]

www.oxpdf.com

Références bibliographiques

- [1] F.Hennebelle, détermination des incertitudes de mesures sur machines a mesuré tridimensionnelles application aux engrenages, thèse doctorat, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers ,2007
- [2] M.R. Sarl, Effet des polluants solides des lubrifiants sur les surfaces des roues dentées, thèse de doctorat Université Annaba 2008.
- [3] G. Drouin et coll., Éléments de machines, École Polytechnique, 1988, 537 pages
- [4] G. Henriot. Engrenages conception fabrication mise en œuvre. Paris: Dunod 1999 P875.
- [5] F.L Livtin. Theory of gearing .cleveland, Ohio, Naza reference publication 1212, , p 670 1989
- [6] F.L. Livtin, A fogaskerékkapcsolás elmélete. Budapest: Muszaki Könyvkiadó P 605 1972
- [7] M.Lelkes, Définition des engrenages klingelberg, institut national des sciences appliquées de Lyon, thèse doctorat 2002
- [8] G. Henriot, Traité théorique des engrenages, Editions Dunod, ISBN 2-04-015526-0, 1983.
- [9] J. Litwin, Cour, Mécanismes et éléments de machines 2008.
- [10] B.Vauban, Cour, les engrenages et les trains d engrenages 2006.
- [11] G. Drouin, M. Gou, P. Thirty, R. Vinet: éléments de machines ; 2^{ème} édition de l'école Polytechnique de Montréal ; 1986
- [12] Junivall, C. Robert et Marshek, M. Kurt, Fundamentals of Machine Component Design, John Wiley, 1991
- [13] A. Eugene, Avallone; Theodore Baumeister, Standard Handbook for Mechanical Engineers, Tenth Edition New York, McGraw-Hill, eBooks.
- [14] D. Marghitu, Mechanical Engineers Handbook, Academic Press Series in Engineering California 2001, eBooks
- [15] C. Oancea, Analyse des dents d'engrenages droites par la méthode des potentiels complexes, Université Laval Québec, 1997
- [16] J. Martin, H. Ramirez, Les mécanismes de fatigues des fibres thermoplastiques, Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris, France, 2004

- [17] Engineering Machine Design, Involute Gear Tooth Contact Stress Analysis, the University of Tennessee at Martin.
- [18] Engineering Machine Design, Involute Gear Tooth Bending Stress Analysis, the University of Tennessee at Martin.
- [19] M. Aublin, R. Boncompain, M. Boulaton, D. Caron, E. Jeary, B. Locage, J. Rea, *Systèmes Mécaniques : Théorie et Dimensionnement*. Dunod 1998 Paris
- [20] M.R. Sari, Effet des polluants solides des lubrifiants sur les surfaces des roues dentées, thèse de doctorat Université Annaba 2008.
- [21] B. C Crussard., "Transient Creep of Materials," Paper 75, Ft. Int. Conf. on Creep, Inst. Mech. Engrs, London, , Vol. 2, p. 123,1963.
- [22] O'Connor, J. J., and Johnson, K. L., "The Role of Surface Asperities in Transmitting Tangential Forces Between Metals," Am. Soc. Mech. Engrs, Paper No. 62-Lub-14, 1962
- [23] W .Ghalloudj., Etude de l'endommagement et de la fiabilité des engrenages à dentures droites en polyamide 66, Magister, Université Annaba, 200
- [24] G.M. Bartenev ,V.V. Lauretev, *Friction and Wear of Polymers*, Elsevier, Amsterdam, 1981.
- [25] J.K. Lancaster, Abrasive Wear of Polymers, *Wear*, Vol. 14, 1969, pp. 223-229.
- [26] E.Abdelmalek, nfluence des parametres mecaniques lors de l'endommagement par les phenomenes tribologiques des couples des materiaux xc48/xc55 et A60/XC55, Thèse magister, 2006
- [27] Stachowiak, W. Gwidon , and W.Andrew . Batchelor, *Engineering Tribology* 2ème édition. 2000
- [28] R.C. Bill, Fretting Wear and Fretting Fatigue - How are They Related? *Transactions ASME, Journal of Lubrication Technology*, Vol. 105, 1983, pp. 230-238

3.1. Généralités

Le comportement mécanique d'un polymère semi cristallin est un problème multi échelle, dans le quel à la fois les lamelles et la superstructure jouent un rôle. La cause de la plupart des phénomènes de rupture est généralement dû soit la négligence au cour de la conception, de la construction d'une structure ; ou encore à l'application d'une nouvelle conception ou d'un nouveau matériau qui produit un résultat imprévu. La présence des défauts, des trous, des fissures apparues pendant la mise en forme, le transport le stockage ou la consommation peuvent provoquer des dommages imprévus, ainsi il est indispensable de comprendre le comportement à la rupture des polymères et influence de la microstructure sur le comportement à la rupture des matériaux pour permettre d'approcher au mieux le problème du risque d'amorçage [1]

Les recherches scientifiques menées afin de comprendre et de prévenir les accidents aboutirent à la naissance notamment de la mécanique de la rupture, qui a pour objet l'étude de la propagation de fissures macroscopiques préexistantes au sein d'un matériau. [2 ,3] C'est un phénomène complexe qui conditionne, dans beaucoup de cas, la durée de vie des structures. En réalité la propagation de fissure est un processus aléatoire qui dépend de nombreux paramètres incertains comme les conditions d'amorçage, la longueur initiale, les propriétés du matériau, la géométrie et les dimensions de la structure, l'intensité et la nature du chargement au cours du temps et d'autres facteurs inhérents à l'application .La propagation d'une fissure dans une structure donnée a été au début du siècle et jusqu'à nos jours l'une des causes majeures de ruptures catastrophiques. Le souci de sécuriser les structures et de prévenir les ruptures catastrophiques par un choix judicieux du matériau et de la conception est au fait ancien et continue à susciter les mêmes intérêts [4]

3.2. Définition de la rupture

La rupture est un problème auquel l'homme aura à faire aussi longtemps qu'il fabriquera des structures. .

La rupture désigne la séparation d'un corps en plusieurs parties sous l'action d'une contrainte de nature statique, c'est-à-dire qu'elle est constante ou qu'elle varie peu avec le temps. Il peut s'agir d'une contrainte de traction, de compression, de cisaillement ou de torsion. [5,6]

3.3. Modes de rupture

La courbe contrainte / déformation (figure 3.1) issue, par exemple, d'essais de traction sur des éprouvettes jusqu'à la rupture, fait souvent apparaître deux zones lors de la déformation du matériau (figure 3.1).

- Une zone élastique, dans laquelle contraintes et déformations sont liées proportionnellement. Le matériau revient à son état d'origine lorsque cesse la sollicitation.
- Une zone plastique, pour laquelle le matériau ne revient pas à son état d'origine lorsque cesse la sollicitation [7]

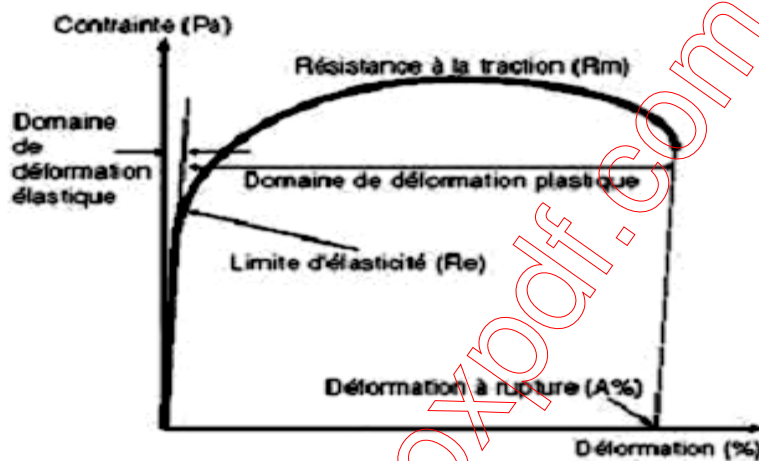


Figure 3.1 : Essai de traction [8]

Au regard de la cristallographie (échelle des grains), les déformations élastiques et permanentes respectent la cohésion de la matière. De ce fait, la rupture survient lorsque cette cohésion est détruite. Elle opère par création de discontinuités surfaciques ou volumiques au sein de la matière

Il s'agit de microfissures de l'ordre du micron, qui deviennent des macros fissures en atteignant des dimensions de l'ordre du millimètre, et en fin, des fissures, à l'échelle des structures mécaniques.

Les deux modes de rupture des matériaux à usage industriel sont la rupture ductile et la rupture fragile (figure 3.2). Une telle Classification repose sur la capacité d'un matériau à subir une déformation plastique. [7]

3.3.1 Rupture ductile

Les matériaux ductiles acquièrent une importante déformation plastique, assortie d'une énergie d'absorption élevée, avant de se rompre. La ductilité indique le degré de la

déformation plastique à la rupture. La ductilité s'exprime quantitativement par un pourcentage d'allongement après la rupture ou un coefficient de striction exprimé en pourcentage.

La rupture ductile est le résultat de l'instabilité des très grandes déformations locales engendrées au voisinage des défauts cristallins. Au voisinage de ces défauts, les sollicitations extérieures créent des concentrations de contraintes qui engendrent de grandes déformations plastiques. Les ruptures ductiles se produisent donc après le déplacement ou le glissement d'un grand nombre de dislocations. Cela entraîne des empilements de dislocations qui conduisent à la formation de microfissures. Lorsque ces défauts deviennent importants, le matériau se déchire. [9,10]

3.3.2. Rupture fragile

Par contre, une rupture fragile se caractérise par une déformation plastique légère ou nulle et par une énergie d'absorption faible, le phénomène fragile correspond au cas où les dislocations ne peuvent pas se déplacer, ou bien dont les mouvements sont difficiles et limités. Ainsi, très généralement, la fragilité augmente avec la limite d'élasticité. Les ruptures fragiles, se faisant sans déformation plastique, se produisent par décohesion de plans cristallographiques. En somme, la rupture fragile se produit lorsque les liaisons interatomiques se rompent sans déformation plastique globale [6,9]

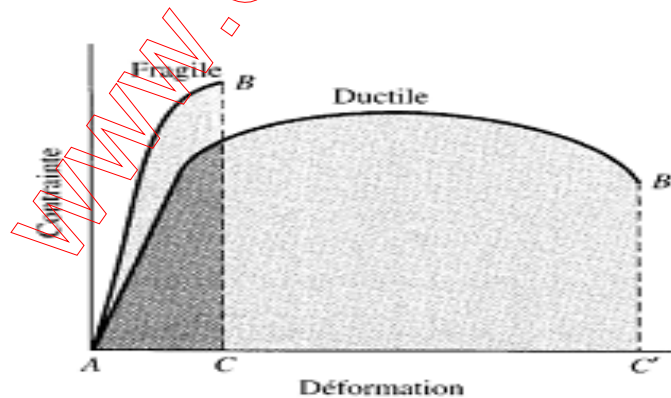


Figure 3.2. Courbes contrainte-déformation dans le cas des ruptures fragiles et ductiles. [6]

3.4. Mécanique linéaire élastique de la rupture

La mécanique élastique linéaire de la rupture essaie de décrire les perturbations engendrées par une fissure par l'intermédiaire d'une approche analytique. Pour ce faire, en première approximation, le solide considéré est décrit comme un milieu élastique. Griffith fut

le premier à formuler et appliquer le concept de la mécanique de la rupture. Son critère est défini dans le cas d'une plaque d'un matériau isotrope contenant une fissure elliptique de longueur $2a$ et considère l'équilibre entre l'énergie élastique stockée et l'énergie nécessaire pour produire une surface [11]

3.4.1. La région de la pointe de fissure

De différents travaux en milieu élastique fissuré (Broberg [12], Christensen [13], Ehrlacher [14]), la région de la pointe de fissure peut être décomposée en trois zones (figure 3.3).

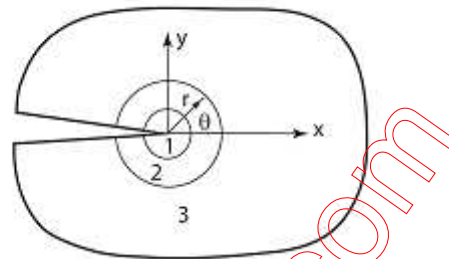


Figure.3.3 : Les zones de champs mécaniques [15]

- La zone d'élaboration: elle se situe au voisinage direct de la pointe de fissure. L'étude de cette zone, considérée comme ponctuelle d'un point vue mécanique, est très complexe tendent vers l'infini théoriquement à l'approche de la pointe de fissure.
- La zone singulière: dans cette zone, le champ de contrainte présente une singularité en $1/\sqrt{r}$
- La zone des champs lointains: elle est extérieure aux deux zones précédentes. Elle fait le lien entre la zone singulière et les conditions aux limites de chargement et déplacement. [15]

3.4.2. Champ de contraintes en bout de fissure

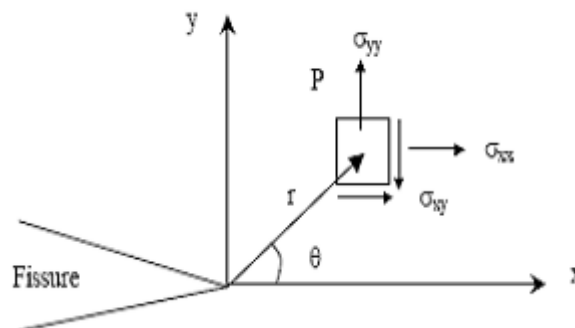


Figure.3.4: Champ de contraintes au voisinage d'une fissure [16]

Dans une plaque infinie chargée biaxialement sous une contrainte σ et contenant une fissure centrale de longueur $2a$. La distribution des contraintes (Figure 3.4) pour un état plan

de déformations (plaque épaisse ou plasticité restreinte) en un point situé à une distance r du bout de fissure et à un angle θ par rapport l'axe x est donné par l'expression suivante [74,16]:

$$\begin{cases} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{cases} = \frac{\sigma\sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi a}} \cos \frac{\theta}{2} \begin{cases} 1 + \sin^2 \frac{\theta}{2} \\ \cos^2 \frac{\theta}{2} \\ \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \end{cases} \quad (3.1)$$

D'après l'équation (3.1) les contraintes σ_x et σ_y sont infiniment grandes quand r tend vers 0 (au bout de la fissure). Mais comme le montre la figure 3.5. Pour les matériaux ductiles: présentant un certain degré de plasticité, l'écoulement au voisinage de la fissure restreint à une valeur de contrainte maximale:

$$\sigma_{max} = \alpha \sigma_{yt} \quad [17] \quad (3.2)$$

Où $\alpha = 1$ pour l'état de contraintes planes, $\alpha = 3$ en état de déformation planes et σ_{yt} la contrainte d'écoulement du matériau.

La figure (3.5) montre contrainte maximale en bout de fissure et forme correspondante de la zone plastique

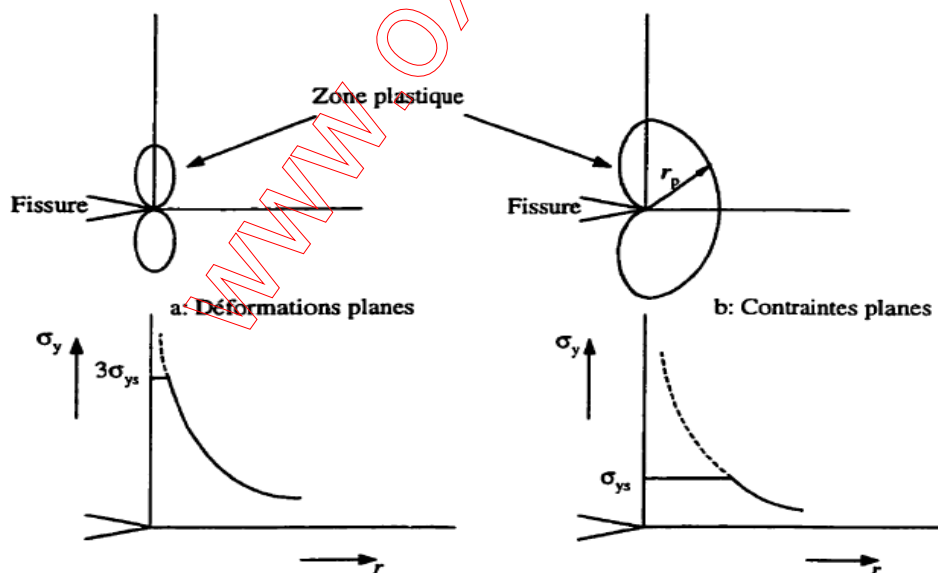


Figure.3.5 : Distribution de la contrainte maximale en bout de fissure et forme correspondante de la zone plastique. [17]

Les contraintes σ_x et σ_y dépendent de la position géométrique $f(\theta)/\sqrt{2\pi r}$ et du terme $K_I = \sigma\sqrt{\pi a}$. K_I est appelé facteur d'intensité de contrainte, en mode 1. Ce mode résulte d'une

contrainte normale perpendiculaire au plan de la fissure et qui impose aux surfaces de la fissure de se déplacer perpendiculairement l'une sur l'autre. La valeur critique de ce facteur d'intensité de contrainte est la ténacité et représente la capacité du matériau à résister à la propagation brutale d'une fissure. Dans le cas où une plasticité se développe au bout de la fissure, la profondeur de la fissure est remplacée par une profondeur effective $a_{eff} = a + r_p$, L'expression du facteur d'intensité de contrainte devient alors :

$$k_I = \sigma \sqrt{\pi(a + r_p)} \quad (3.3)$$

r_p étant le rayon de la zone plastique.

Pour un état de contraintes planes, en supposant que l'écoulement du matériau survient selon le critère de Von Mises, r_p est donné par:

$$r_p = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{k_I}{\sigma_{yF}} \right)^2 \quad (3.4)$$

σ_{yF} étant la limite d'écoulement du matériau.

En état de déformations planes, Irwin [76] (figure 3.6) a montré que r_p s'exprime comme suit

$$r_p = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{k_I}{\sigma_{yF}} \right)^2 \quad (3.5)$$

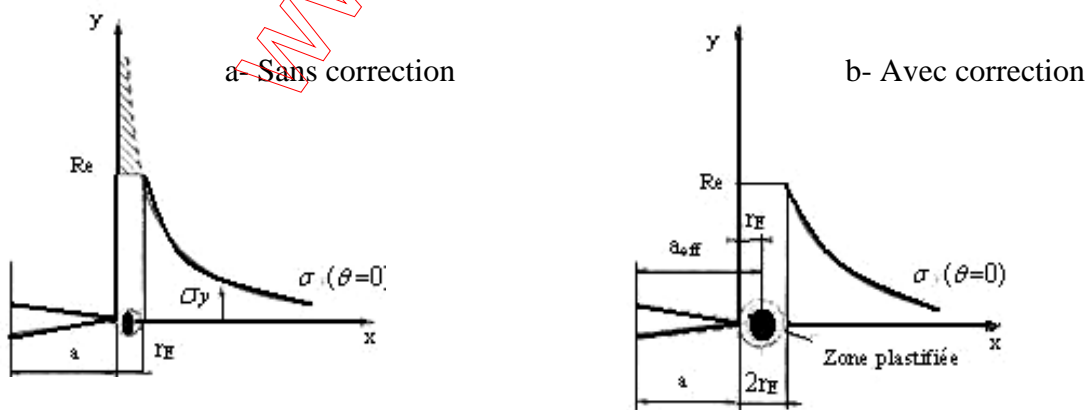


Figure.3.6: Modèle simple de déformation plastique à la pointe de la fissure, avec ou sans correction d' Irwin [19].

Dugdale [21] soutient qu'en état de contraintes planes, la zone plastique est plutôt de forme

elliptique et sa longueur est:

$$r_p = \frac{\pi}{8} \left(\frac{k_1}{\sigma_{ys}} \right) \quad (3.6)$$

D'ailleurs ce modèle de Dugdale semble mieux expliquer le comportement des polymères[22].

3.4.3. Facteurs d'intensité de contraintes

On peut également établir un critère de rupture permettant la propagation de la fissure à l'aide d'une analyse locale des contraintes élastiques à la pointe de la fissure. Ceci repose sur l'hypothèse que le matériau possède un comportement linéaire élastique, caractérisé par son module d'Young, E. On distingue trois modes de propagation d'une fissure suivant le mode de sollicitations, (figure 3.7). [22]

Mode I : mode d'ouverture de la fissure, ou les déplacements aux lèvres de la fissure sont perpendiculaires à la direction de propagation.

Mode II : mode de cisaillement dans le plan, ou les déplacements aux lèvres de la fissure sont parallèles à la direction de propagation

Mode III : mode de cisaillement hors du plan, ou les déplacements aux lèvres de la fissure sont parallèles au fond de la fissure [23]

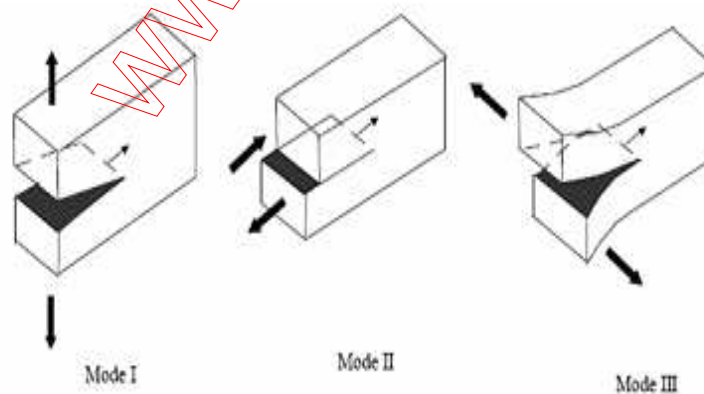


Figure 3.7: Différents modes de propagation d'une fissure. [17]

En mode I [24]

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \frac{k_I}{\sqrt{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_{yy} &= \frac{k_I}{\sqrt{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_{xy} &= \frac{k_I}{\sqrt{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}\end{aligned}\tag{3.7}$$

En mode II

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \frac{k_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_{yy} &= \frac{k_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \\ \sigma_{xy} &= \frac{k_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}\end{aligned}\tag{3.8}$$

En mode III [82]

$$\begin{aligned}\sigma_{13} &= -\frac{k_{III}}{\sqrt{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \\ \sigma_{23} &= -\frac{k_{III}}{\sqrt{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2}\end{aligned}\tag{3.9}$$

3.4.4. Taux de restitution d'énergie

Historiquement, c'est Griffith [25] qui a abordé le problème de la rupture des corps fissurés d'un point de vue énergétique. Il a considéré la fissuration du solide comme un processus physique où le bilan énergétique est lié à la croissance de la fissure.

On considère ici un corps fissuré - soumis à un chargement sur le bord extérieur S_{ext} . Lors de la propagation de la fissure, l'aire augmente de $\pm S$. La conservation de l'énergie totale du système s'écrit sous la forme suivante

$$\delta w_{tot} = \delta w_{elas} + \delta w_{ext} + \delta w_s + \delta w_{cin} = 0\tag{3.10}$$

Avec :

– δW_{elast} la variation de l'énergie de déformation élastique ;

– δW_{ext} la variation d'énergie potentielle des forces extérieures (ou le travail des forces extérieures $\int E \delta u$)

– δW_S l'énergie dissipée dans la création des nouvelles surfaces fissurées ;

– δW_{cin} la variation d'énergie cinétique.

En introduisant la densité d'énergie de séparation des surfaces fissurées ($\delta W_S = 2\gamma \delta S$) et en supposant qu'il existe un état d'équilibre avec les sollicitations extérieures et une fissure de surface juste avant la propagation. La fissure se propagera de façon instable si l'énergie cinétique augmente $\pm W_{cin} \dot{E} 0$, soit

$$\frac{\partial}{\partial S} (w_{elast} + w_{ext}) + 2\gamma < 0 \quad (3.11)$$

On définit le taux de restitution d'énergie G

$$G = -\frac{\partial}{\partial S} (w_{elast} + w_{ext}) \quad (3.12)$$

Le critère de propagation de Griffith se traduit donc par

$$G > 2\gamma \quad (3.13)$$

L'initiation de la propagation à partir de la configuration de fissure S est possible lorsque

$$G = 2\gamma \quad [15] \quad (3.14)$$

3.5. Les différents types d'endommagement dans les polymères

En sommet de fissure, dans un polymère, trois types de mécanisme ont été identifiés et sont schématisés sur la figure 3.8. Il s'agit de l'endommagement, du cisaillement et de la craquelure. L'endommagement est probablement le mécanisme le plus complexe dans le sens où, à l'intérieur de cette zone de l'ordre du millimètre, se mêlent craquelures, bandes de cisaillement et décohésions. [26]

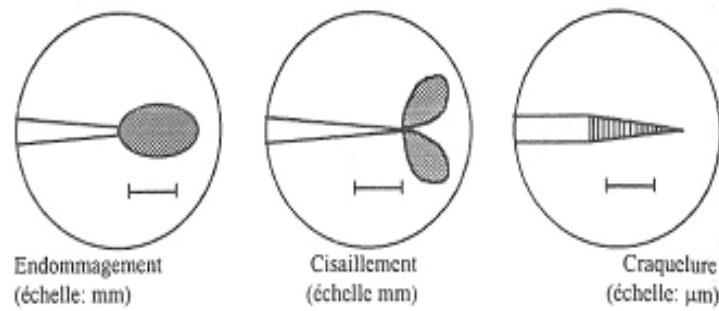


Figure.3.8. Les différents types d'endommagement dans les polymères. [26]

3.6. Fatigue

Les premières observations de ce phénomène datent du milieu du XIX^{ème} siècle. La notion de fatigue introduite par Braithwaite en 1854, sera requantifiée par l'ingénieur allemand Wöhler en 1938. Il a mis en évidence l'existence de la limite de fatigue (ou d'endurance): variation minimale de contraintes nécessaire à l'apparition d'une rupture par fatigue. Assez vite, on montrera que cette rupture est obtenue par la propagation lente d'une fissure à chaque cycle, de chargement, la vitesse de propagation étant une fonction croissante de la variation du facteur d'intensité de contraintes en fond de fissure K_I , ainsi que le proposera Paris et al. En 1963. En effet de telles fissures sont observables sur des structures en cours d'exploitation et l'examen d'une pièce rompue en fatigue permet de mettre en évidence des marques macroscopiques, traces de la position de la fissure à diverses étapes de sa propagation. [27]

La fatigue est une forme de défaillance qui se produit dans des structures (ponts, avions, pièces de machines, etc.) subissant des contraintes dynamiques et variables. Elle est susceptible de se manifester même lorsque la contrainte est nettement inférieure à la résistance à la traction ou à la limite conventionnelle d'élasticité dans le cas d'une charge statique. Une telle défaillance porte le nom de fatigue parce qu'elle succède habituellement à une longue période de cycles de déformation et de contrainte. L'importance de la fatigue réside dans le fait qu'elle constitue la cause de quelque 90% de toutes les défaillances des métaux. De même, les polymères et les céramiques (à l'exception des verres) sont eux aussi exposés aux défaillances par fatigue. La défaillance par fatigue est de nature fragile. Elle découle de l'amorçage et de la propagation de fissures, et engendre le plus souvent une surface de rupture perpendiculaire à la direction de la contrainte de traction appliquée. La contrainte appliquée peut être assimilée à une traction ou une compression, à une flexion ou à

une torsion [6].

3.6.1. Facteurs d'incidence sur la durée de vie en fatigue

La tenue en fatigue des matériaux à usage industriel est étroitement liée à un grand nombre de facteurs, dont la valeur de la contrainte moyenne, la conception géométrique, les effets de surface, diverses variables métallurgiques et l'environnement. Il est à noter que l'accroissement de la contrainte moyenne suscite une diminution de la durée de vie en fatigue.

3.6.1.1 Effets de surface

La plupart des fissures menant à une rupture de fatigue s'amorcent à la surface et notamment en des zones de concentration de contrainte. Il s'avère que la durée de vie en fatigue est étroitement liée à l'état et à la configuration de la surface du composant.

3.6.1.2 La conception

La conception d'un composant exerce une influence marquée sur la tenue en fatigue. Toute entaille ou discontinuité géométrique, tels les sillons, les trous, les rainures de clavette, les filets, etc. peut jouer le rôle d'amorce de rupture et se transformer en site d'amorçage d'une fissure de fatigue.

3.6.1.3 Effets de l'environnement

Les facteurs environnementaux peuvent aussi influencer sur la tenue en fatigue des matériaux. Deux Types de rupture par fatigue favorisée par l'environnement sont : la fatigue thermique et la fatigue corrosion [6].

3.6.2. Classification des essais de fatigue

On peut distinguer d'abord deux grandes catégories d'essais de fatigue : les essais sous amplitude de charge constante et les essais sous amplitude de charge variable ou à programme de charge tendant à simuler les sollicitations en service.

- Dans le premier cas, celui des **essais sous amplitude de charge constante**, on peut distinguer les essais d'endurance, cherchant à déterminer la limite de fatigue ou la durée de vie à rupture, des essais de fissuration, cherchant à mesurer la vitesse de propagation des fissures de fatigue. On peut également distinguer le domaine de l'endurance ou des grandes durées de vie, ou fatigue vibratoire, du domaine de la fatigue oligocyclique, correspondant à des nombres de cycles à rupture, faibles par suite d'une déformation plastique généralisée ou localisée (entaille) de la pièce ou de l'éprouvette (fatigue plastique).

- Par ailleurs, on peut distinguer les **essais à charge imposée**, comme par exemple les essais de flexion rotative sur éprouvette cantilever où la charge est appliquée par un poids, des **essais à déplacement imposé**, comme par exemple les essais de flexion plane d'une éprouvette à l'aide d'une bielle et d'un excentrique. En général les essais de fatigue à grand nombre de cycles sont des essais à charge imposée, tandis que les essais de fatigue plastique sont des **essais à déformation imposée**, la machine étant asservie à la mesure de la déformation cyclique de l'éprouvette par un extensomètre. [28]

3.6.3. Préfissuration

La préfissuration en fatigue doit permettre de créer une fissure droite et très aiguë et d'une taille adéquate pour mener ensuite l'essai de propagation de fissure proprement dit. La préfissuration permet de se dégager de la zone perturbée par la présence de l'entaille mécanique.

Elle doit être menée de façon à ce que les résultats de vitesse de propagation de fissure ultérieurs ne soient pas perturbés par cette phase de préfissuration (changement de forme du front de fissure, effets d'histoire du chargement de préfissuration). [28]

3.6.4. La propagation des fissures de fatigue

Les phénomènes liés à la propagation de la fissuration en fatigue (FCP) sont aussi très complexes. Les modèles qui se proposent de décrire cette propagation devraient tenir compte de tous les paramètres qui conditionnent cette propagation dans un matériau donné. Il ya: les paramètres intrinsèques dépendant du matériau lui-même comme le module d'Young, limite d'élasticité, ténacité,....

Les paramètres extrinsèques dépendant des conditions d'utilisation comme la température, la fréquence et la forme de la fonction de chargement,...

La diversité de ces paramètres a conduit les concepteurs à établir des lois basées généralement Sur des données expérimentales et décrivant, le plus correctement possible, l'effet de certains paramètres jugés plus prépondérants que d'autres sur la vitesse de propagation des fissures. L'examen de pièces polymériques rompues en fatigue permet de distinguer des stries macroscopiques, empreintes des positions successives d'une fissure qui se propage lentement. Si l'on suit la longueur de la fissure en fonction du nombre de cycles, on observe que la vitesse de propagation est une fonction croissante de la longueur de fissure avec une augmentation rapide en fin de vie, ce qui a fait rechercher des lois d'avancée de

fissure de type puissance [29]

En effet lorsqu'on présente, en échelle logarithmique, la variation de la vitesse de fissuration (da/dn) en fonction de ΔK (figure 9), on constate que la courbe présente une partie linéaire qui obéit à l'équation suivante :

$$\frac{da}{dn} = C\Delta k^n \quad 3.15$$

Où C et n sont des paramètres qui caractérisent le matériau et les conditions d'essai. [30]. Pour le nylon 66 étaient $A = -6,1$ et $m = 4,7$ [31].

On remarque que lorsque la variation du facteur d'intensité de contrainte ΔK devient faible (régime I), la vitesse de fissuration le devient également et tend vers zéro à une valeur ΔK , appelée seuil de la propagation, cela signifie que, même si le matériau présente une fissure, celle-ci ne se propage plus si la variation du facteur d'intensité de contrainte qui lui est associé est inférieur à la valeur critique ΔK_c . En d'autres mots, l'endommagement causé en tête de fissure par l'application d'un nombre même très élevé de cycle de chargement est insuffisant pour provoquer une propagation de la fissure et, par conséquent, une rupture locale.

Pour le régime 2, appelé régime de Paris (figure 3.9), la vitesse de fissuration obéit à la relation de Paris (équation 3.15) : par contre, il y a une accélération progressive de la vitesse de fissuration lorsque la valeur du facteur d'intensité de contrainte approche de la valeur critique K_c , valeur à laquelle il y a une rupture brutale de la pièce. [30]

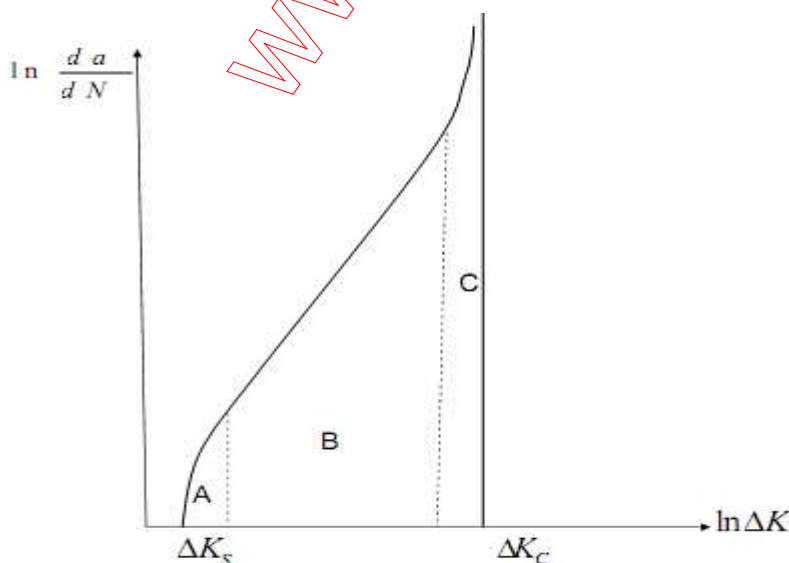


Figure 3.9 : Loi de propagation générale [29]

Références bibliographiques

- [1] Z.Soumahoro, Etude du couplage thermomécanique dans la propagation dynamique de Fissure ,Thèse doctorat, Ecole Polytechnique,2005
- [2] A.Zeghloul,concepts fondamentaux de la mécanique de la rupture, Cours DEA, Universitéde Metz,2004.
- [3] R. Chambon, D.Caillerie et C. Tamagnini, A finite deformation second gradient Theory of plasticity , ComptesRendusdel'Académie des Sciences – Series IIB –Mechanics, Volume329,Issue11,pages797-802. 2001
- [4] A.Ghobarahet H. Abou Elfath, Rehabilitation of a reinforced concrete frame using Eccentric steel bracing , EngineeringStructures,Volume23,Issue7, ,pages745-755, 2001
- [5] D.Broek,Elementary engireening fracture mechanics, Haicover, Papeback, 1982
- [6] J.B.Lablond ,mécanique de la rupture fragile et ductile, Broché Hermes sciences publications , 2003
- [7] S.Belkahla. cours d'élasticité-plasticité, O.P.U (2000)
- [8] W.D.callister,Jr,J.Welly, Son ,Materials science and Engineering, Inc, New York, 1994
- [9] J.Lamond, Mécanique de la rupture fragile et de l'endommagement, approches statistiques et propabilités (collection, etude en mécanique des matériaux et des structures, broche, Hermes, Lavoisier,2007.
- [10] T.L.Andersem, Fracture Mechanics, Fundamentale and application, second edition, Haicover 1994
- [11] A.A Griffith. The phenomena of rupture and flow in solids. Philosophical Transactions of the Royal Society, ,(1920). 221:163–198.
- [12] K. Broberg, Crack sand Fracture, Academic Press,1999
- [13] R.M.Christensen, L.N.McCartney, Viscoelastic crack growth, International Journal of Fracture 23(1)(1983)R11–R13
- [14] A.Ehrlacher, Contribution à l'étude thermodynamique de la progression de fissure et à la mécanique de l'endommagement brutal, Thèse de docteur d'État, Université Pierre et Marie Curie Paris(1985)
- [15] H. N .NGUYEN, Etude numérique de la fissuration d'un milieu visco_elastique : Analyse de l'essai de rupture sur bitume, thèse doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et

Chaussees, 2008

- [16] H. M Westergaard. "Bearing Pressures and Cracks" J. Appl Mech., VOL 6, A 49-A 53 (1939)
- [17] A.Mamat, Comportement a la rupture de mélange incompatible de PA6 et d'ABS: analyses des transitions ductile et fragile, thèse de doctorat, Canada 2000
- [18] F. A. McCLINTOCK . and G. R. Irwin, "Wasticity Aspects of Fracture Mechanics" ASTM STP 382, p. 84- 1 13(1965)
- [19] F. Akermi, Etude de la relation entre les propriétés mécaniques et l'hétérogénéité des tubes extrudés en HDPE-100 de transport de gaz naturel par des essais de traction et d'impact mécanique, Thèse de Magister, Annaba 2005
- [20] D. S .Dugdale . 'Yielding in Steel Sheets Containhg Slits". J. Mech. Phys. Solids, VOL 8, p. 100-104 (1960)
- [21] J.O.Williams, Stress Analysis of Polymers Longmans Group Limited, London, (1973)
- [22] K. Lakhdar, Adhésifs et techniques de collages: caractérisation de l'adhérence. Thèse de magistère, Université Boumerdes, 2006
- [23] Z.Soumahoro, Etude de couplage thermomécanique dans la propagation dynamique de fissure, thèse de doctorat à l'école polytechnique de France, 2005
- [24] A. Zeghloul, Concepts fondamentaux de la mécanique de la rupture, Thèse de Doctorat, Université de Metz, France, 2004
- [25] A. Griffith, the Phenomena of Rupture and Flow in Solids, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character 221(1921)163–198
- [26] G.BOISOT, Mécanismes et modélisation mécanique de la déformation de l'endommagement et de la rupture du Polyamide 11 pur et renforcé choc, thèse doctorat, l'école nationale supérieure des mines de paris, juin 2009
- [27] C. Lemaignan, La rupture des matériaux, EDP Sciences, 2003
- [28] P. Rabbe, H.-P. Lieurade, A. Galtier. Essais de fatigue Partie I Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques M 4 170-2003
- [29] R.Khelif, Etude et analyse de la rupture des tubes en polyethylene pour le transport de gaz: optimisation par la fiabilité, Thèse de doctorat, 2007

[30] J.M.Dorlot, J.P.Bailon, J.M.Masounave, Des matériaux, Edition de l'école polytechnique de Montréal 1986

[31] M. G. Wyzgoski, G. E. Novak, D. L. Simon, Fatigue fracture of nylon polymers, Part 1 Effect of frequency, 25 (1990) 4501-4510

www.oxpof.com

4. Mise au point d'essai de fatigue et d'usure

La complexité dans la mesure des vitesses de fissuration réside dans le fait que lorsque la fissure se propage, l'usure modifie le flanc de contact de la dent tout en réduisant les dimensions de la dent. Donc, dans un essai de fatigue, il faut aussi observer l'évolution de l'usure. Sur un flanc de dent, quand il ya apparition de fissure, l'épaisseur de la dent diminue à cause de l'usure. En conséquence, en présence d'une entaille, la longueur de l'entaille va évoluer de deux façons; elle diminue sur le flanc de la dent à cause de l'usure et elle se propage au fond de la fissure à cause de la fatigue. La Figure 4.1 donne le principe de propagation de la fissure sur le flanc de la roue dentée rétrécissement de l'entaille initiale. En conséquence, dans une analyse des vitesses de fissuration ce changement de dimension de la dent et de l'entaille va être prépondérant dans le calcul du facteur d'intensité de contrainte, ΔK .

Devant cette complexité, nous avons entamé les travaux pour mettre en évidence ce phénomène d'usure et de propagation de fissure de fatigue dans une roue dentée en polyamide et de mettre en œuvre une technique d'analyse de ce phénomène.

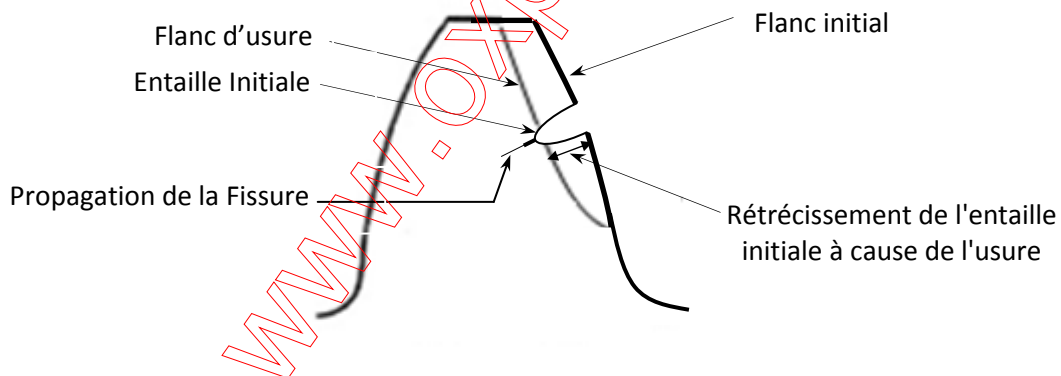


Figure.4.1 : Schéma de principe de la propagation de la fissure dans une dent de roue.

Le présent chapitre présente les différentes phases expérimentales qui nous ont permis d'aboutir aux résultats d'analyse qui seront discutés dans le prochain chapitre. Pour mesurer les vitesses de fissuration en fatigue des roues dentées, il faut rassembler les moyens suivants :

- Connaître le matériau de la roue soumis à l'essai de fatigue
- Connaître les caractéristiques dimensionnelles de la roue
- Trouver une procédure de mesure de vitesse de propagation de la fissure

4.1. Matériau

Le matériau utilisé est le polyamide PA66 dont les propriétés mécaniques et thermiques sont données dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Propriétés thermiques et mécaniques du PA66 [1]

Propriétés du PA66	Valeurs
Masse volumique (g/cm ³)	1.14
Module de Young(MPa)	2800-3200
Absorption d'eau à 23°C et 100 % HR	
Après24h(%)	1.5
A saturation(%)	8.5
Résistance a la traction(MPa)	70-90
Allongement a 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)	45-57
Température de fusion (°C)	240
Chaleur massique Jkg ⁻¹ K ⁻¹	1670
Conductivité thermique a 23°C	0.25
Température d'utilisation	(-30)-180

Le Tableau 4.1 donne les propriétés du PA66. Dans le marché Algérien les roues dentées qui sont disponibles ne présentent aucune traçabilité. En conséquence, nous avons jugé utile de vérifier la dureté des roues afin d'estimer les propriétés. Nous avons été attirés par la couleur des roues qui existent dans le marché. Il y en a 2: en Blanc et en Blanc Cassé. Le Tableau 4.2 donne le poids et la dureté des roues en fonction de leur couleur. La procédure de mesure de la dureté sera expliquée ultérieurement dans ce chapitre

Tableau 4.2 : Poids et Dureté des roues en fonction de la couleur de la roue.

Propriété	Roue en Blanc	Roue en Blanc Cassé
Dureté(HRC)	59	53
Poids (g)	36,3	26,5

4.2. Caractéristiques dimensionnelles de la roue dentée

L'éprouvette d'essai est une roue à dentures droites (Figure.4.2) dont les caractéristiques géométriques sont données dans le tableau 4.3

Tableau 4.3 : Caractéristiques géométriques du pignon

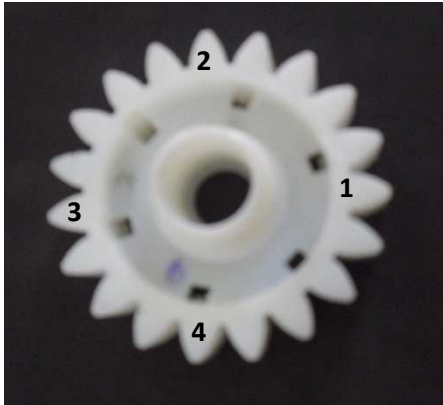


Figure 4.2 : Roue dentée en PA66

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

4.3. Machine d'essai

Les essais sont réalisés sur une machine à entraînement par engrenage (Figures 4,3 a, b, c.) dont la rotation est effectuée dans un seul sens. Le principe de fonctionnement de la machine est le suivant

Un moteur électrique d'une puissance de 1,2 KW, entraîne en rotation à sa sortie une vis sans fin en acier. Cette dernière transmet ce mouvement à une roue intermédiaire à denture hélicoïdale en plastique, solidaire du pignon d'attaque en PA66 au moyen de cannelures à une vitesse de 250 t/mn. Ce dernier à son tour, fait tourner le tambour à couronne dentée dans une cuve qui reçoit une charge maximale de 9kg; cette charge est formée de 3 kg de linge et de 6 kg d'eau .

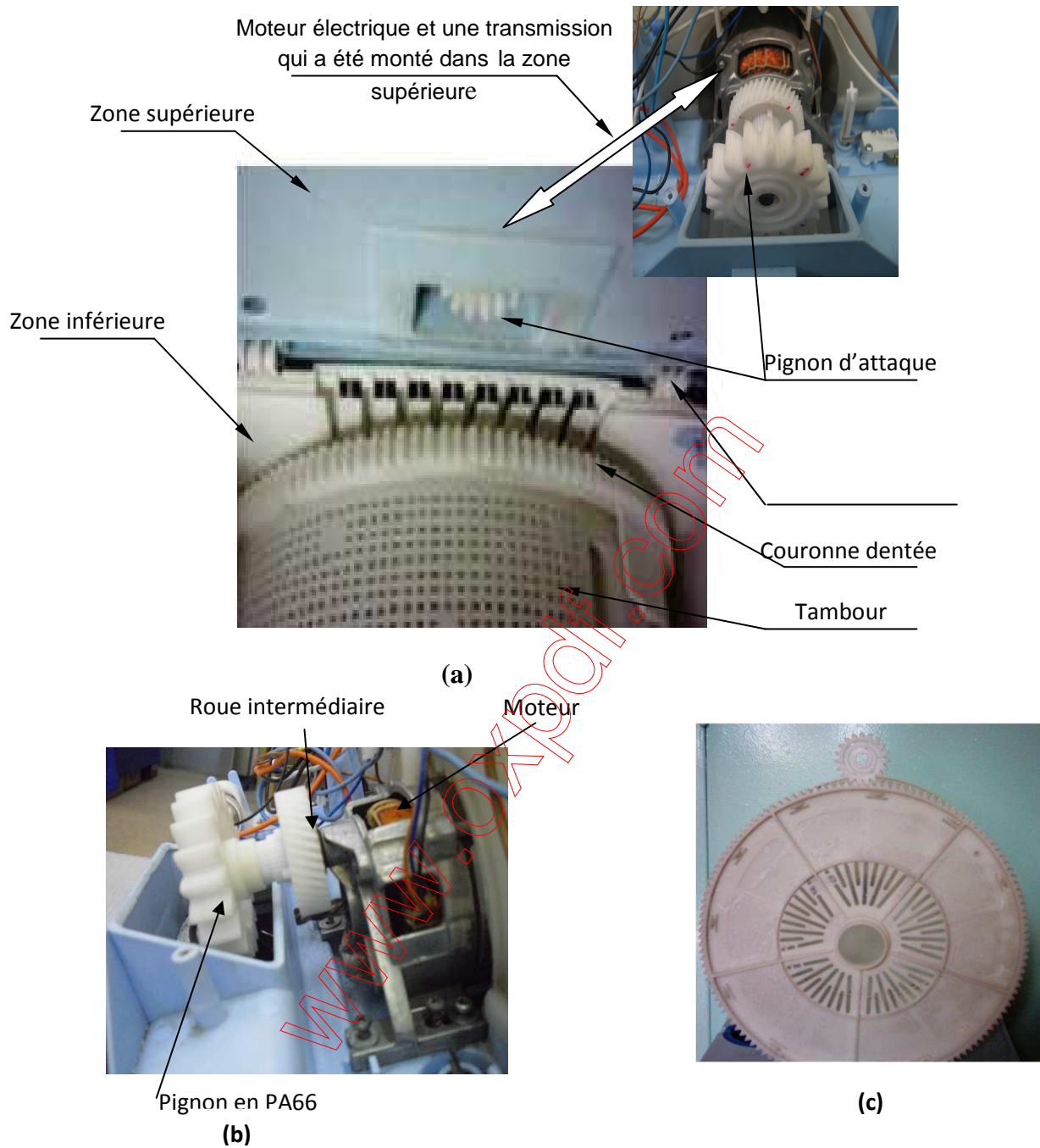


Figure 4.3 : a) Vue du moteur électrique, pignon d'attaque et tambour a couronne dentée

b) Système de transmission par engrenage

c) Rapport de transmission Pignon- Couronne dentée du Tambour

4.4. Essai de fatigue

L'essai de fatigue consiste à déterminer les vitesses de fissuration sur les flancs des dents de la roue dentée. Pour provoquer de la propagation en fatigue, il faut qu'il y ait une fissure déjà initiée. Le stade d'initiation est très lent et peut prendre jusqu'à 90% de la durée de vie en fatigue d'un matériau.

Pour accélérer le phénomène, il faut donc introduire une entaille et soumettre l'éprouvette à l'essai de fatigue

La problématique sur une roue dentée est qu'il est difficile de trouver un moyen d'introduire une entaille sur un point donné du flanc d'une dent et avec la profondeur requise

Dans cette rubrique nous allons montrer les différentes tentatives de pré-fissuration d'un flanc de la dent pour arriver à la solution

4.4.1. Pré-fissuration du flanc des dents

Une entaille peut être introduite par plusieurs moyens, nous allons donner ce qui suit les différents moyens qui étaient à notre disposition et nous avons effectué une comparaison

4.4.1.1. Pré-fissuration avec un cutter à chaud et à froid

La première idée est d'utiliser tout simplement un cutter, Figure 4.4. La coupe est très difficile à obtenir, non homogène, non précise. Après quelques dixièmes de millimètre de pénétration, le contrôle de la coupe est impossible. Le réchauffement de la lame n'est pas intéressant car il provoque au fond de l'entaille un bourrage de la matière Figure 4.5



Figure .4.4: Pré-fissuration avec un cutter à chaud



Figure 4.5 : Bourrage de la matière au fond de l'entaille

4.4.1.2. Pré-fissuration avec une scie à métaux et une lame rasoir

Dans ce cas, il est très facile de scier une entaille avec une scie à métaux manuellement. Malheureusement la coupe est très rugueuse et mal finie. Pour obtenir une fine entaille on rajoute une coupe avec lame rasoir au fond de l'entaille (figure.4.6)



Figure.4.6 : une scie avec une lame de rasoir.

4.4.1.3. Pré-fissuration sur une fraiseuse horizontale avec coupeur comme outil de coupe

L'utilisation de la fraiseuse horizontale permet de contrôler l'entaille à introduire. L'outil est une lame de coupeur. La Figure 4.7 montre le dispositif de pré-fissuration sur une fraiseuse horizontale. La lame de coupeur est montée sur la broche de la machine à l'arrêt. Un dispositif de montage constitué d'une semelle sur la quelle est montée une roue dentée de guidage qui doit diriger la roue à entailler est montée sur un étau, Figure 4.8

La roue à entailler est guidée de manière à présenter un flanc d'une dent roue vers le coupeur pour introduire l'entaille. Les mouvements d'avance sont donnés à la main, au moyen des manivelles de guidage de la table de la machine outil. La roue est guidée dans le sens longitudinale et frontale pour permettre au coupeur de sillonner la dent.

Néanmoins, toutes les entailles obtenues ne sont pas uniformes, car l'outil n'est pas rigide, le coupeur se déforme et recule quand on vas en profondeur.



Figure.4.7 : Fraiseuse avec un coupeur comme outil de coupe avec dispositif de montage

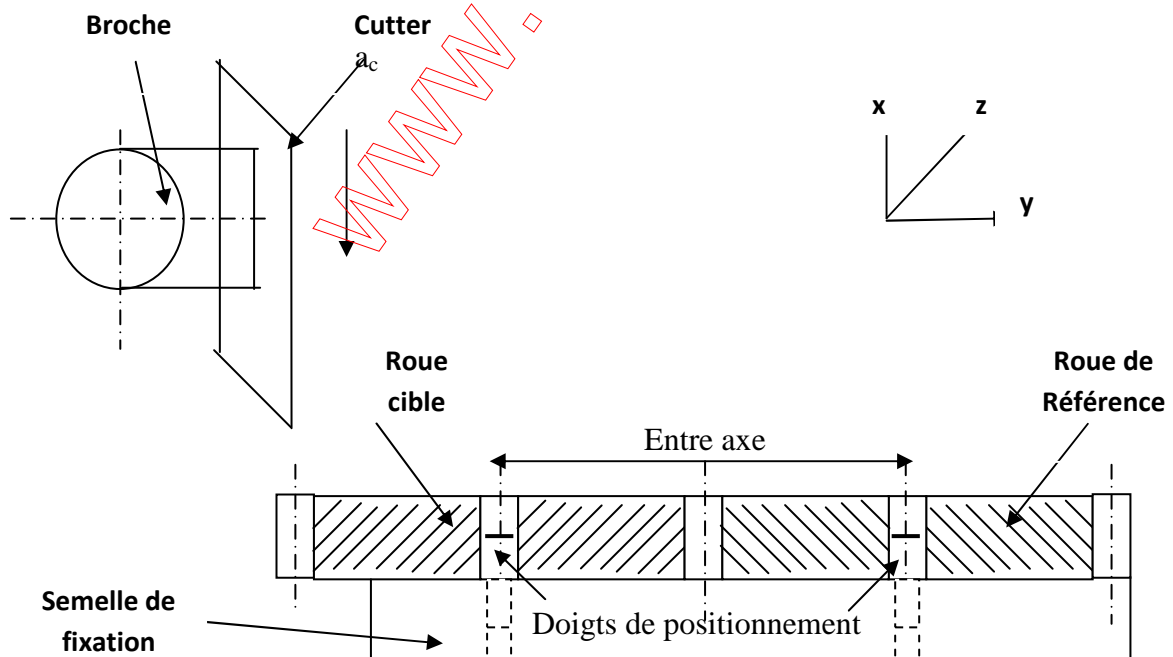


Figure 4.8 : Dispositif de fixation de la roue sur l'étau de fraiseuse horizontale

4.4.1.4. Pré-fissuration sur Fraiseuse Horizontale avec une fraise disque

Dans ce cas, la fraise disque (figure 4.9) étant rigide, provoque une déformation de la roue; conséquence d'une dent encastrée non rigide



Figure.4.9: Fraiseuse avec une fraise disque comme outil de coupe

4.4.1.5. Pré-fissuration sur fraiseuse à commande numérique

Après toutes les tentatives présentées ci-dessus, il était clair qu'il fallait trouver une solution optimale. L'utilisation d'une fraiseuse à commande numérique avec un dispositif de fixation de la roue est une solution précise et pertinente. Les caractéristiques de la fraiseuse type CONTROLAB sont présentées dans le tableau 4.4

Tableau 4.4 : Caractéristique de la fraiseuse a commande numérique

Caractéristiques	Valeur
puissance	180w
Les avances programmables	500-2500 tr/min
vitesse	0-250 mm/min

L'avantage de l'ensemble de la machine et dispositif (Figure 4.10) est qu'on peut orienter la dent dans le sens où l'on veut introduire l'entaille avec précision.

La pré-fissuration se fait en 3 phases

- Rainurage de l'entaille avec une fraise 2 tailles à bout sphérique et de diamètre 1mm

- Nettoyage du fond de fissure
- Finir l'entaille avec une lame de rasoir



Figure.4.10 : vue générale de la fraiseuse à commande numérique

La figure 4.11 montre le dispositif constitué d'une semelle bridée sur la table de la fraiseuse. Un Vé porte la roue intermédiaire cannelée et bridée sur la semelle du dispositif. La roue est montée sur la partie cannelée. Le rainurage est réalisé avec une fraise de taille $\varnothing 1$ mm

Le régime de coupe est le suivant

- La vitesse de 'avance est 10 mm/s
- La vitesse de rotation $n=1750$ tr/min

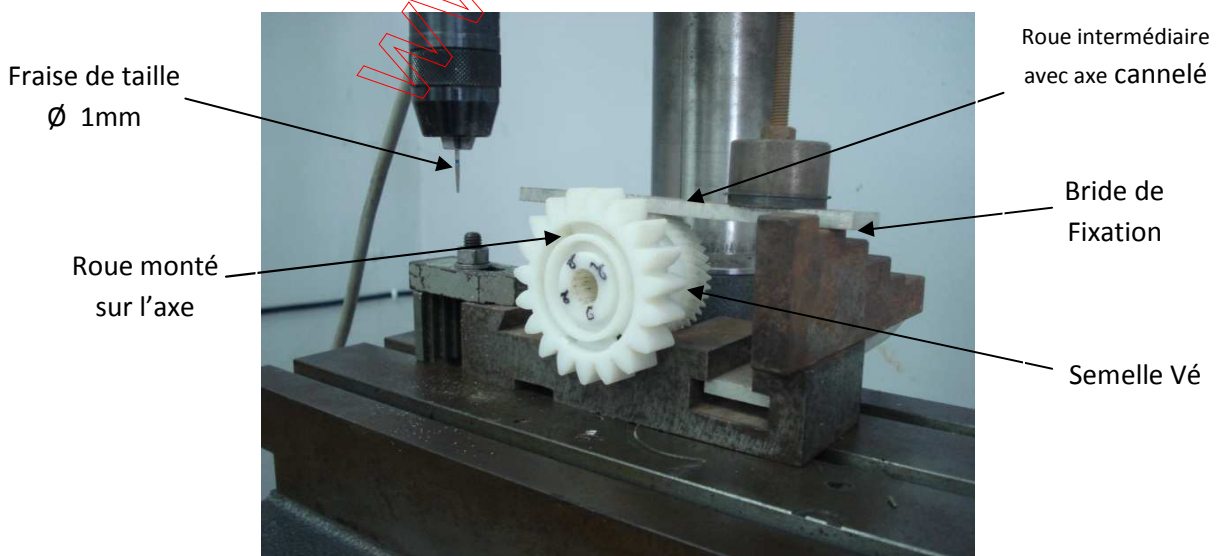


Figure.4.11 : Dispositif de fixation de la roue dentée bridée sur la table de la fraiseuse à CN

4.4.2. Technique de mesure de la propagation de la fissure

La technique de mesure de la propagation de la fissure consiste à prendre des photos successives de la fissure après un cycle de travail donné. Chaque photographie ainsi obtenue est analysée avec comme objectif repérer la longueur de la propagation de la fissure. Pour se faire, les photographies sont prises sur un microscope optique avec 3 agrandissement 4, 10, 40 fois. Chaque image obtenue est enregistrée grâce à une interface Microscope type assisté par ordinateur. Les mesures sont réalisées au moyen d'un logiciel, ainsi chaque image enregistrée correspond à une longueur de fissure mesurée. La succession des images ainsi obtenues relate la longueur de la fissure jusqu'avant rupture.

La Figure 4.12 montre une vue générale de la roue dentée montée sur le microscope en interface avec l'ordinateur. Afin d'éviter tout décalage d'une prise de photo à une autre, un dispositif de montage de la roue pour observation sur microscope a été réalisé. Il consiste en une plaque de plexiglas (Figure 4.13) portant un axe de montage de la roue. Ce dispositif d'observation de dent de roue sur microscope étant fixé sur le tablier du microscope permet de contrôler les déplacements selon les axes, x et y. Il est important de signaler que les photos ont été prises à 4 fois, 10 fois, 40 fois.



Figure.4.12 : Vue générale d'une prise de mesure sous le Microscope optique

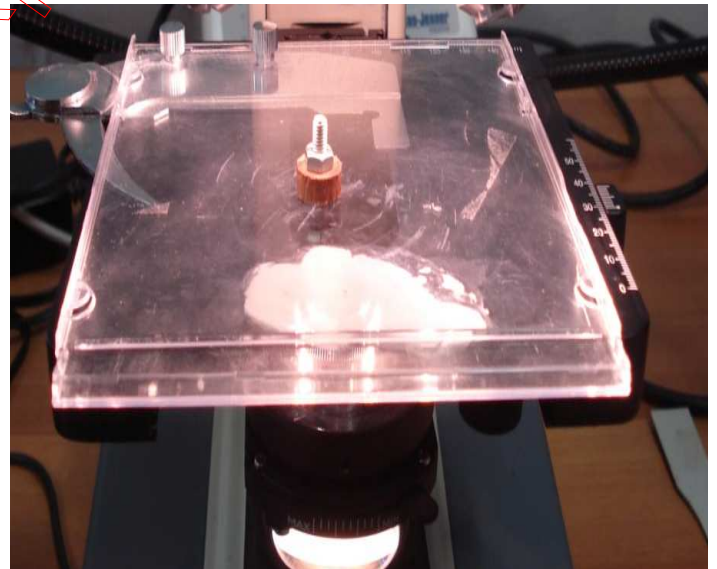





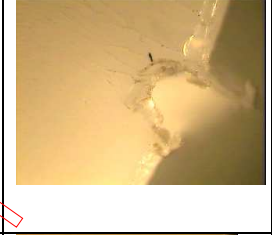
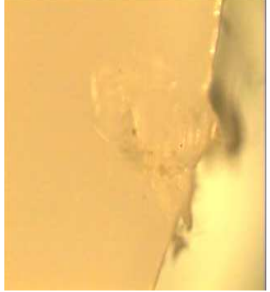


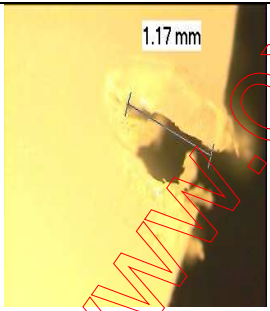
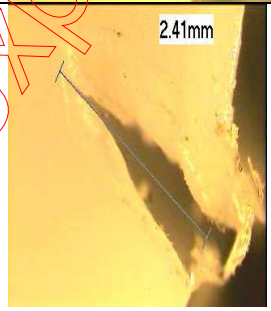



Figure 4.13 : Plaque d'observation de dent de roue sous microscope









Le suivi de la propagation de la fissure est effectué par enregistrement des photos comme l'indique le Tableau 4.5

Tableau 4.5: Base de suivi de l'évolution de la fissure par fatigue dans une roue dentée.

N° dent	Dent1x4	Dent2x4	Dent3x4
Après usinage			
Après lame			
Après vigor			
Après modification Avec la lame			

Le Tableau 4.5 illustre les difficultés rencontrées au départ des travaux avant de maîtriser le processus de coupe. L'introduction de l'entaille constitue la première problématique à résoudre. Les différentes mesures sont réalisées sous le Logiciel Motic images Les résultats de mesure de la longueur initiale de l'entaille sont donnés dans le Tableau 4.6

Tableau 4.6 : Mesure de la longueur d'entaille

	Numéro de la dent	Longueur de fissure (mm)	Schéma
RoueCA53	1	0.8	
	2	2.1	
	3	1.9	
RoueCA59	1	0.7	
	2	2.41	
	3	1.17	
RCSA53	1	3.5	
	2	2.42	

4.5. Mesure de l'usure

La mesure de l'usure a suivie la procédure décrite dans un étude récente sur l'usure des dent de roue en polyamide réalisée dans un cadre de préparation de magistère épar GHELLOUDJ Walid.[1] au niveau du laboratoire de recherche LR3MI. Deux méthodes ont été proposées: Par perte de poids et Par perte de cote.

4.5.1. Mesure de l'usure par perte de poids

Lorsqu'il y a usure, il y a perte de poids. Donc l'usure par perte de poids consiste à mesurer le poids de la roue avant et après un certain nombre d'heures ou de cycle de travail. Une balance électronique type denver d'une capacité de 2000g avec une précision de 0.01g a été utilisée. La perte de poids est mesurée sur l'ensemble de la roue dentée. Donc la perte de poids obtenue est globale et doit être quantifiée pour les 19 dents. Il faut rappeler que le polyamide est un matériau qui absorbe de l'eau. En conséquence, il faut être prudent avec les mesures. A cet effet deux solutions sont préconisées: soit sécher la roue avant chaque mesure; soit peser la roue pour la même période d'imbrication dans l'eau. Par ailleurs, cette méthode peut provoquer des erreurs particulièrement quand le matériau est très absorbant. Ainsi, un

engrenage en PA66 non renforcé, pesant 100g pourrait contenir 2g d'absorption à l'équilibre [2]. Quelles soient les circonstances, dans ce travail, nous avons sollicité Mr GHELLOUDJ Walid qui n'a ménagé aucun effort pour nous aider à mener les mesures dans les conditions les plus appropriées. Le calibrage et l'utilisation de la balance (Figure 4.14.a) ont été réalisés en sa présence.

4.5.2. Mesure de l'usure par perte de cote

L'usure entraîne automatiquement une perte de cote. La perte de cote sur une dent de roue dentée peut être mesurée par un pied à module (Figure 4.14.b). Les pertes de cotes ont été prises à 2 mm du diamètre extérieur de la roue avant et après essai sur machine. Une attention particulière a été prise pour ne pas induire des erreurs de positionnement du pied à module. Il faut noter que même dans ce cas les mesures sont tributaires de l'utilisateur qui peut facilement induire des erreurs. Néanmoins ces mesures sont très indicatives et comme il y a un suivi visuel, on les résultats sont acceptables et fiables.



Figure.4.14 : Instruments de mesure de l'usure

a) Balance électronique, (b) Pied à module

4.6. Procédure de la mesure de la dureté

Les mesures de la dureté ont été réalisées sur les dents de roue au moyen d'un duromètre pour matière plastique, type Quickmatic réf. HH 401. Eu égard au consigne de son utilisation qui impose une surface de 1cm^2 , pour fiabiliser les mesures de la dureté, il a été difficile d'entamer des mesures sur les dents des pignons. Donc une procédure a été développée afin d'uniformiser les mesures, comme suit:

- **Préparation de la surface de mesure.**

Les mesures sont effectuées sur la surface transversale de la dent. Pour mesurer l'empreinte il fallait venir à bout de deux problèmes:

- Régler la surface de mesure

- Eliminer le problème de luminosité qui ne montre pas l'empreinte sous le microscope. En effet la lumière réfléchiée par la couleur de blanche de la dent ne permet pas de distinguer l'empreinte. A cet effet, chaque dent doit être colorée en noir avec un marqueur non-permanent avant de prendre les mesures. Ainsi après indentation, l'empreinte est bien révélée (Figure 4.15a). Pour meilleure estimation de la dureté, l'essai est repris au moins 3 fois. Les mesures ont été réalisées sur une surface de 1 cm². Les empreintes sont espacées d'au moins 2 mm. La Figure 4.15b montre l'effet de la position de l'empreinte sur l'empreinte adjacent. Plus la distance entre 2 empreintes est grande plus la mesure est reproductible et donc fiable.

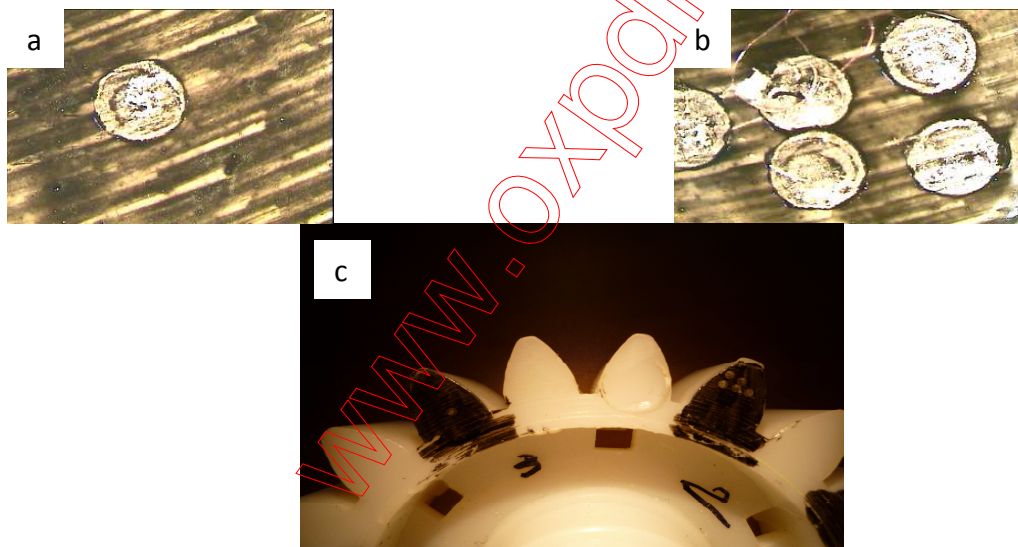


Figure 4.15 : Préparation de l'échantillon pour les mesures de la dureté
a) Indentation isolée, b) Indentations multiples ; c) Echantillon avec dents colorées

Une grande attention a été effectuée pour mesurer la dureté sur la même position d'une dent à une autre. En effet, la roue échantillon est engrenée avec une roue de référence, de manière à ce que l'indentation se fasse sur le même diamètre. La Figure 4.16 illustre le stand de mesure de la dureté sur les roues en polyamide.

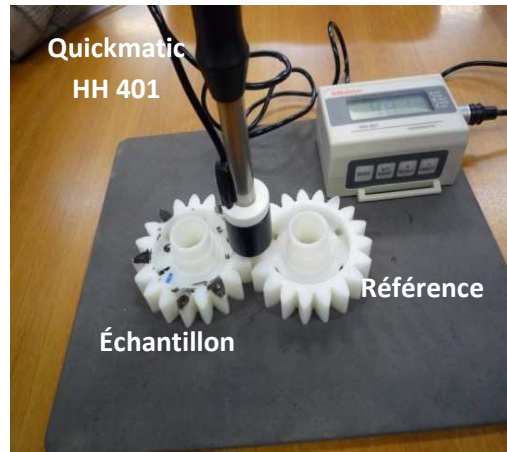


Figure 4.16: Stand de mesure de la dureté sur les dents de roue en polyamide.

4.7. Conditions d'essai

Avant de porter les roues sur la machine les conditions suivantes doivent être remplies

1. Nettoyage complet des roues
2. Mesure des dimensions
3. Contrôler la qualité du flanc de dent, au moyen du microscope
4. Mesure de la dureté
5. Introduction de l'entaille ; afin d'accélérer les essais, une entaille est réalisée sur 4 dents de la roue. Ces dents ne peuvent en aucun cas être adjacentes mais il faut s'assurer qu'il y a au moins 3 dents entre chacune des dents sur les quelles doit porter l'entaille. L'idée vient du fait que dans un engrenage, il ya un engagement de la dent, application de la pression maximale par la dent et dégagement de la dent. Ainsi il ya toujours 3 dents qui travaillent pour respecter les paramètres d'engagement (Figure 2.1)

Injection la roue dans une solution de détergent Vigor (pendant une semaine). Cette solution a fait l'objet d'étude [3,4] qui a montré que les fissures sont favorisées dans cette solution, donc l'objectif de cette solution est d'apporter une contribution d'un agent actif pour activer la fissuration.

6. Reprise des observations sous microscope
7. Montage de la roue dans la machine
8. Mise à jour de la feuille de route

La feuille de route en quelque sorte contient toutes les informations sur la roue

- Date et heure de montage
- Longueur de la fissure et la largeur de la dent
- Prise de photographie
- Nombre de rotation de la machine
- Temps d'arrêt pour observations microscopiques
- Incident éventuelle

www.oxpdf.com

Références bibliographiques

- [1] W .Ghalloudj., Etude de l'endommagement et de la fiabilité des engrenages à dentures droites en polyamide 66, Magister, Université Annaba, 2008
- [2] N.A. Wright¹, S.N. Kukureka, Wear testing and measurement techniques for polymer composite gears, Wear 251 (2001) 1567–1578
- [3] A.G. Sisakali, P. Kingshott, D.W. Breiby, L. Arleth, C.K. Kjellander, K. Almdal, Investigating the role of anionic surfactant and polymer morphology on the environmental stress cracking (ESC) of high-density polyethylene, polymer degradation and stability 89(2005)442-453
- [4] Norme internationale, ISO 13480, 1997

www.oxpdf.com

5.1. Choix d'une méthode de pré fissuration

Un des objectifs qui a été tracé dans la recherche bibliographique est de trouver une méthode de pré fissuration des flancs de dent de roue de dentée. Tous les articles de littérature que nous avons consultés ne rapportent pas la technique utilisée, cependant la méthode qui apparaît plausible est celle donnée dans la référence [1]. C'est la raison pour laquelle nous avons exploré les pistes que nous avons en main au niveau de laboratoire. Donc le pré fissuration d'une entaille sur un flanc de dent de la roue en PA 66 a fait l'objet d'une recherche d'une méthode de pré fissuration à adopter. Cinq méthodes ont été proposées savoir (voir chapitre 4):

- Pré fissuration avec un cutter a froid et a chaud
- Pré fissuration avec scie a métaux suivie d'une lame de rasoir
- Pré fissuration sur fraiseuse horizontal + cutter comme outil de coupe
- Pré fissuration sur fraiseuse horizontal + fraise disque épaisseur 1mm
- Pré fissuration sur fraiseuse a C.N avec une fraise 2 tailles, a bout sphérique de diamètre maximale de 1 mm

Le Tableau 5.1 donne une étude comparative des 5 méthodes, chacune avec ses avantages et ses inconvénients. Il en résulte les conséquences sur la propagation de la fissure. L'utilisation d'un cutter (Figure 4.4) et d'une scie à métaux (Figure 4.6) sont simples à utiliser mais elles ne sont pas précises et ne permettent pas le contrôle de la direction et de la position de l'entaille. La fraiseuse horizontale n'est pas adéquate même si elle offre une découpe régulière et contrôlée, elle souffre d'un problème de rigidité, soit de l'outil quand il s'agit d'un cutter (Figure 4.7) ou de la pièce quand on utilise une fraise disque (Figure 4.9). Le problème de rigidité est très connu en usinage [2]

La meilleure alternative est l'utilisation de la commande numérique (Figure 4.10) avec un dispositif de montage de la roue conçu pour les circonstances (Figure 4.11); elle offre une découpe précise et très contrôlée, sans encombrement.

Cependant la manipulation de la machine outil reste attributaire à un utilisateur expérimenté. L'utilisation de la fraise de taille plus fine, donnerait une meilleure entaille. Un autre gros avantage avec la commande numérique réside dans le contrôle précis dans le régime de coupe.

Chapitre 5 : Analyse des résultats d'usure et de fatigue dans les roues en Polyamides

En conséquence, nous avons ainsi adopté le rainurage avec la commande numérique qui permet de reproduire les entailles à des positions voulues et avec des longueurs contrôlées.

Tableau 5.1 : Comparaison des méthodes de pré fissuration d'un flanc de dent de roue en PA66

N	Méthode		avantages	Inconvénients	Essai de fatigue	Conclusion
1	Cutter + Etau	à chaud	Simple	-Profondeur non précise -difficile à couper	Pas de propagation	Non adoptée
		à froid	-simple -facile à couper	-Profondeur non précise -bourrage de la matière au fond de l'entaille		
2	Scie à métaux suivi d'une lame de rasoir Montage de la roue sur étau		-simple -facile à scier	-Découpe non régulière -Surface rugueuse -Profondeur non précise -Nécessite un contrôle de	Propagation jusqu'à la rupture	Peut être adoptée mais nécessite amélioration
3	Fraise horizontal cutter fixé sur la broche Montage spécial de la roue sur étau		-Profondeur contrôlée -coupe régulière	-Outil non rigide -Déviation de l'entaille avec la profondeur	Pas d'essai Entaille ratée	Non adopté
4	Fraise horizontal Avec fraise disque Φ 100 mm, épaisseur 1mm Montage spécial de la roue sur Etau		-Profondeur contrôlée -coupe régulière -procédé rapide	-Déviation de la dent à cause de l'effort de coupe surtout en profondeur -Encombrement	Pas d'essai Entaille ratée	Non adoptée
5	-Fraiseuse à CN Avec fraise 2 tailles à bout sphérique (Φ 1mm) -dispositif spéciale bridée sur la table de la machine -Finition avec lame de rasoir sur Etau		-Position x, y et z contrôlée -Découpe rapide -Régime de coupe contrôlée selon précision de la machine -fond de rainure régulier et uniforme -pas d'encombrement	-Manipulation de la machine à CN -Maitrise de la lame de rasoir pour affiner l'entaille	Propagation jusqu'à la rupture	Solution adoptée

5.2. Mesure de la dureté

Les roues en PA66 sont acquises sur le marché local. Il est pratiquement impossible de trouver leur origine de fabrication. Elles sont toutes fournies chez le même distributeur, d'un même lot. Ce dernier est très hétérogène comme en indique la couleur des roues 'blanc' et 'blanc cassé'. Il n'existe aucune traçabilité.

A cet effet des essais de dureté sont nécessaires pour identifier la roue de point de vue

propriété mécanique. Ces essais nous ont permis de révéler que :

d'une part dans le lot nous avons enregistré deux duretés, Figure 5.1: Sur un lot de 12 roues, on a observé 7 roues reconnaissables à leur couleur "blanche" avec une dureté moyenne de 59,0 HRC et les autres de couleur d'un "blanc cassé" avec une dureté moyenne de 53,4 HRC.

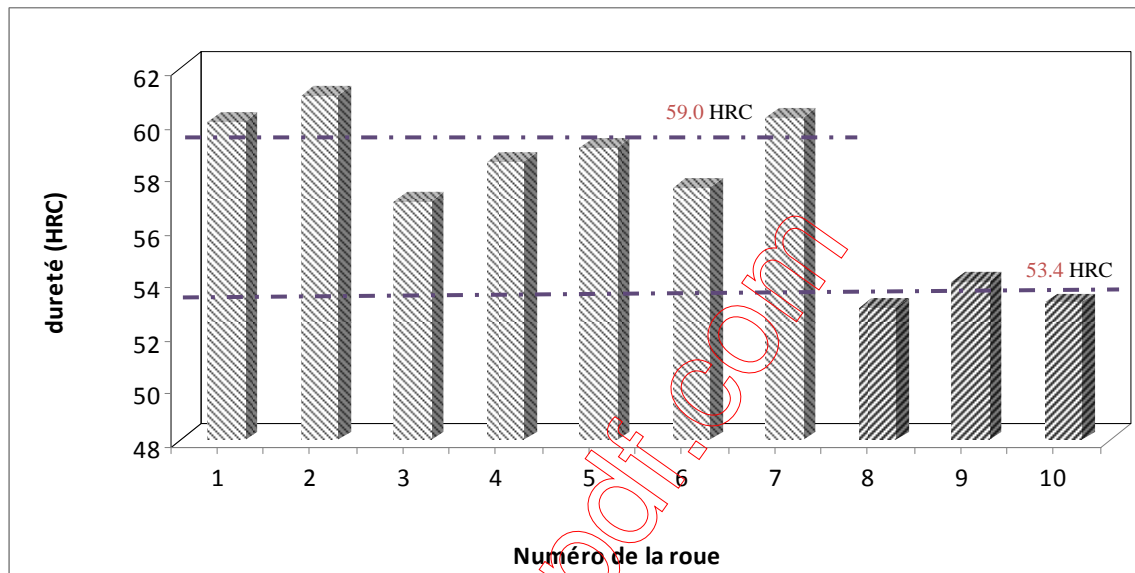

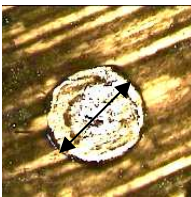
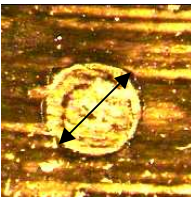
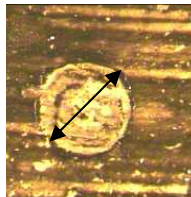


Figure 5.1 : Valeurs de la dureté sur 12 roues dentées en PA66 prises d'un même lot

d'autre part, il fallait voir s'il n'y a pas de retour élastique. De ce fait, l'empreinte laissée par le pénétrateur a été observée pendant un mois, le temps nécessaire estimé pour qu'une fissure se propage jusqu'à rupture. Le Tableau 5.2 montre qu'il n'y a pas de changement sur le diamètre de l'empreinte pendant une période de 30 jours, donc pas de retour élastique après 30 jours.

Tableau 5.2: Variation du diamètre de l'empreinte en fonction du temps

Jours	0	10	20	30
Diamètre (mm)	 0,95	 0,95	 0,95	 0,95

5.3. Etude de l'usure sur le flanc de la dent

5.3.1 profile de l'usure

La figure 5.2 montre le schéma d'évolution du profil de l'usure d'un flanc de dent après 680000 cycles, pour une roue tournant dans un seul sens. Au départ, l'usure ronge le matériau au niveau de la ligne de contact. Au fur et à mesure que la dent travaille, l'usure avance doucement et sûrement en s'élargissant de plus en plus sur la surface de contact jusqu'à usure finale. La progression de l'usure continue jusqu'à arrêt de la machine.

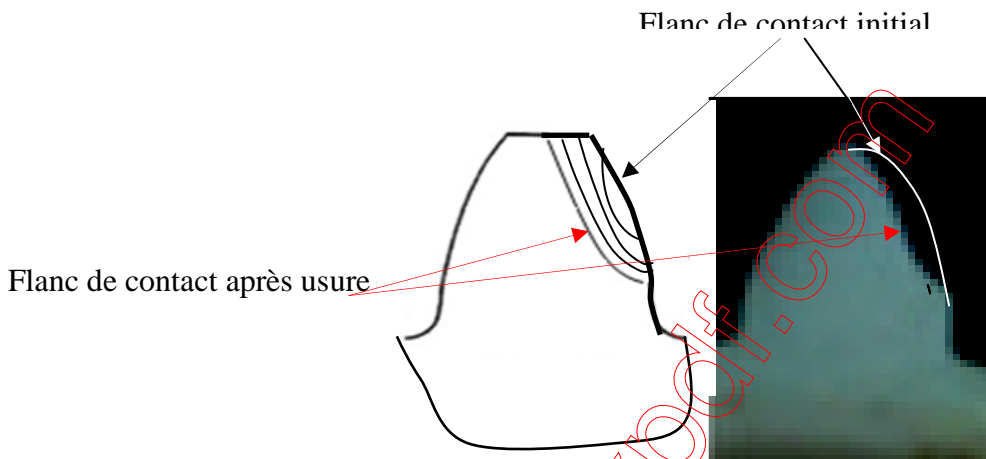


Figure 5.2 : Schéma de l'évolution de l'usure observée sur le flanc d'une dent tournant dans un seul sens

En comparaison avec une roue tournant dans les deux sens [3] la variation du profil de la dent n'est pas du tout le même comme en témoigne les photographies données en Figure 5.3, qui illustrent cette comparaison.

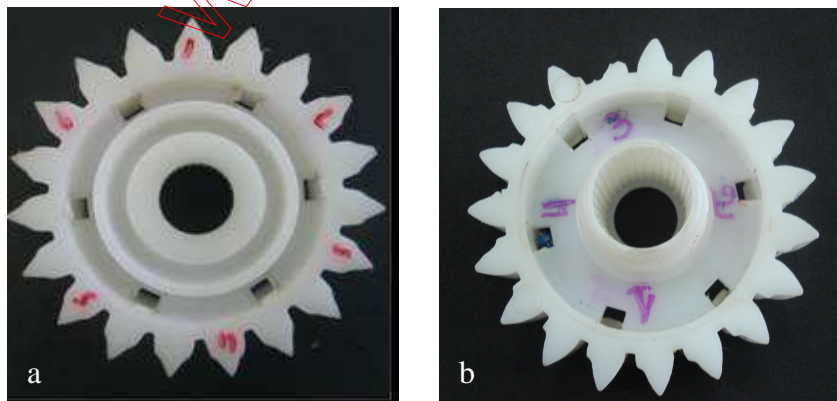


Figure 5.3 : Photographies de 2 roues dentées après usure des dents
a) Rotation dans 2 sens [3]; b) Rotation dans un seul sens

On voit une nette différence entre les flancs des deux roues. Dans le cas de la rotation dans un seul sens, la dent subit la charge toujours du même côté. La dent dans ce cas montre de la résistance sur le flanc de la dent exposé au côté de la dent d'engrenage, conséquence l'usure se propage en profondeur et aussi vers le creux de la dent.

Dans le cas de la rotation dans les 2 sens, la dent reçoit la charge pendant un certain nombre de cycles dans un sens ce qui la déforme dans le même sens et puis quand le sens de rotation change, la dent se libère d'abord pour se déformer dans l'autre sens. Ce changement de sens de rotation expose les deux flancs de la dent à l'usure. Néanmoins l'usure va en profondeur de la dent et beaucoup moins vers le creux. Ceci est dû au retour élastique de la dent à sa position initiale quand il ya changement de rotation générant un profil de dent sous forme de cloche, Figure 5.4. Il faut noter que la hauteur de l'usure dans la roue tournant dans 2 sens est inférieure.

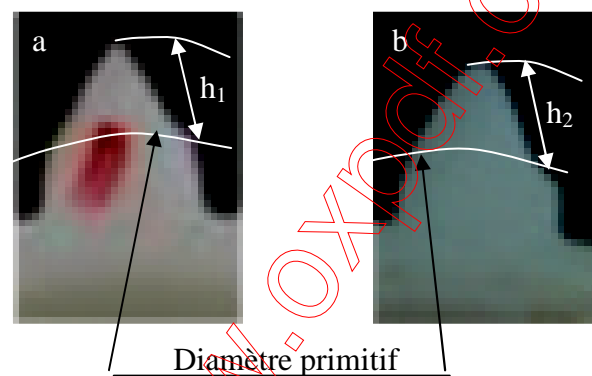


Figure 5.4 : Différence dimensionnelle du profil de l'usure sur deux dents: $h_1 < h_2$
a) Roue en 2 sens de rotation[3]
b) Roue en 1 seul sens de rotation

5.3.2. Compétitivité de l'usure et la fatigue

Nous rappelons que l'objectif de ce travail est de développer une technique de mesure des vitesses de fissuration de fatigue sur les roues dentées en PA66.

Cependant, l'exposition de la roue à un phénomène de propagation de fissure, implique automatiquement l'usure de la dent, ceci induit un phénomène complexe qui intègre une compétitivité entre le phénomène d'usure et la propagation de la fissure. Conséquence, le système s'arrête de fonctionner soit à cause de l'usure, soit à cause de la rupture de la dent suite à la fatigue. Ainsi, nous ne pensons pas dissocier le phénomène d'usure de la fatigue

puisqu'ils peuvent se développer dans les mêmes conditions de services.

Pour cela, nous avons introduit des entailles dans 3 dents de la roue. La position de l'entaille selon le flanc de la dent, ainsi que sa profondeur sont choisies de manière à tirer le maximum d'informations sur une même roue. Il faut rappeler que quand 2 roues dentées s'engrènent, il ya 3 roues dentées qui participent à cet engrenage, la première s'engage, la deuxième est à sa charge maximale et la 3^{ème} se dégage (voir Figure 2.1). Donc les dents qui ont été entaillé sur la roue de 19 dents sont espacées d'un moins de 3 dents. La position de l'entaille est choisie en fonction du diamètre primitif et la profondeur de l'entaille, en fonction de l'épaisseur de la dent. La figure 5.5 illustre un schéma des entailles qui sont introduites sur la dent d'une roue dentée; la dent 1 représentant la dent seine sans entaille.

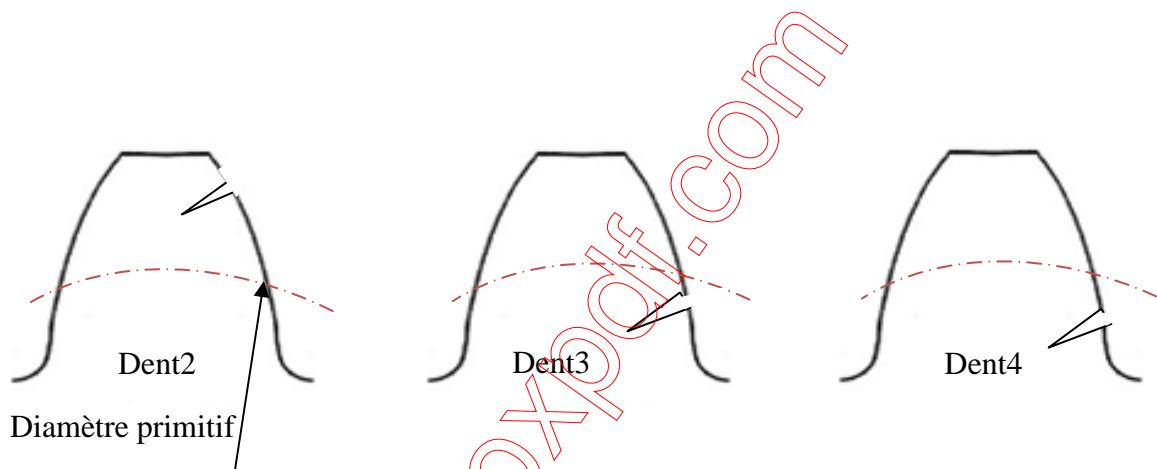


Figure 5.5 : schéma de position de l'entaille dans 3 dents d'une même roue dentée

Le suivi de l'usure sur une roue dentée à 19 dents avec 3 dents entaillées à différentes positions du flanc de la dent, a été révélateur et montre qu'il est intéressant d'analyser le comportement en fatigue.

En effet, le profil du flanc de la dent seine après usure ne rassemble pas à tous les profils des dents dans lesquelles une entaille de 0.87 mm de profondeur a été introduite. Sur la dent 2 ou l'entaille est située sur le saillie de la dent au dessus du cercle primitif, l'usure a été plus importante et a effacé l'entaille dès les premiers cycles et le profile de l'usure rejoint celui d'une dent sans entaille (dent 1) après 375 000 cycles, Figure 5.6.



Figure 5.6: Phénomène de compétitivité de l'usure et de la fatigue sur les roues dentée * après 375000 cycles, l'entaille a disparu générant un même profil de l'usure sur les dents 1 et 2 ** dent 2 avec entaille avant essai de fatigue

Sur les dents 3, 4 où l'entaille est au dessous du cercle primitif, dans le creux de la dent, le comportement de l'usure est autre. Il se trouve que l'entaille joue un rôle prépondérant dans la retardation de l'usure. Ceci s'explique par le fait que quand la dent reçoit la charge normale maximale, la force tangentielle W_t va provoquer une rotation de la partie supérieure autour du fond de l'entaille, Figure 5.7. Cette rotation va alléger le phénomène d'usure sur les dents 3 et 4 mais en contre partie, elle va surtout favoriser la propagation de la fissure. La Figure 5.8 montre l'effet de l'entaille sur l'évolution de l'usure sur un flanc de dent. Dans le cas du flanc avec entaille, l'usure s'est propagée loin de l'entaille avec moindre importance que sur dent sans entaille.

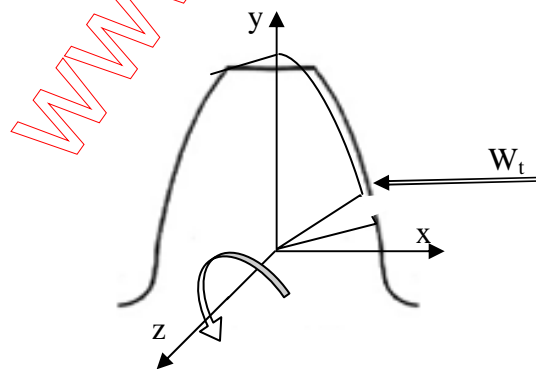


Figure 5.7: Schéma de principe de compétitivité entre l'usure et la fatigue

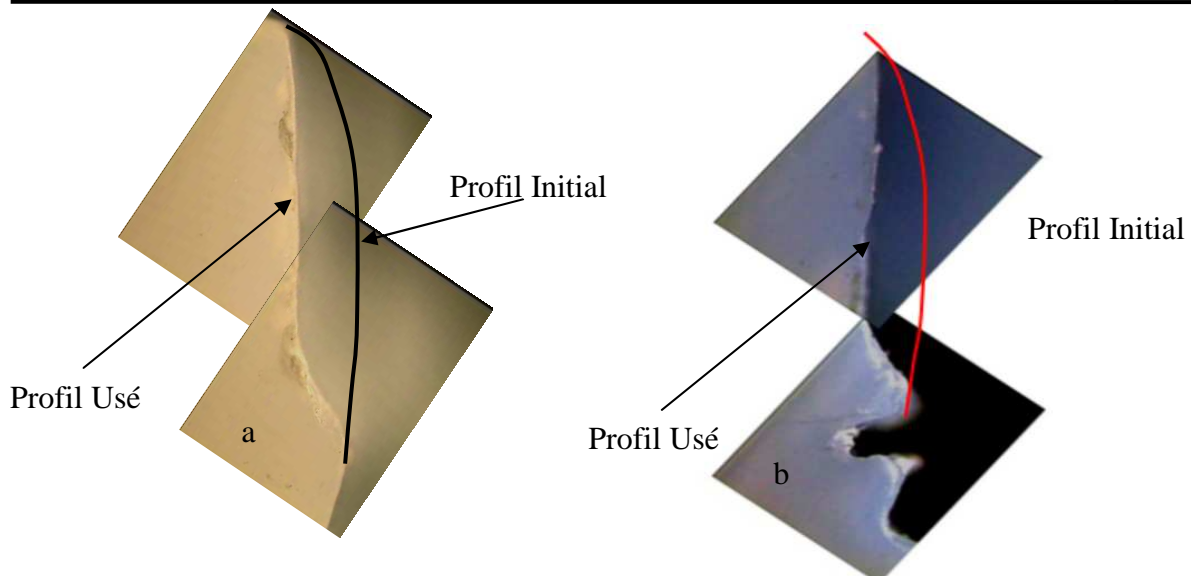


Figure 5.8: Effet de l'entaille sur l'évolution de l'usure sur le flanc d'une dent
 a) dent sans entaille, b) dent avec entaille

5.3.3. Evolution de l'usure

5.3.3.1. Effet du sens de rotation

Dans cette section nous présentons les résultats de l'évolution de l'usure sur une dent sans entaille travaillant dans un sens de rotation. Ces derniers seront comparés aux travaux menés antérieurement sur une roue de même matériau mais tournant dans 2 sens. [3]. Pour reconnaître les dents nous adoptons l'appellation suivante R_{ISR} pour la roue qui travaille dans un sens de rotation et R_{DSR} pour la roue qui travaille à double sens.

La Figure 5.9a illustre le comportement à l'usure U_{59} (U pour usure et 59 correspond à la valeur moyenne de la dureté) d'une dent sans entaille travaillant suivant un sens de rotation. La courbe suit une allure normale, rapide au départ jusqu'à 25000 cycles où la perte de poids est de 0.055 grammes. Elle devient linéaire jusqu'à de 2 millions de cycles où la perte de poids s'est multipliée par 6 atteignant 0,33 grammes. L'allure de la courbe suit alors une loi du type linéaire donnée par l'équation 5.1.

$$U_{RISR} = 0.0002N + 0.001 \quad (5.1)$$

En comparaison avec les résultats antérieurs [3], sur une roue qui a travaillé suivant 2 sens de rotation, on observe que l'allure des courbes d'usure est pratiquement la même. Bien qu'au niveau du profil, on distingue une nette différence, il reste que l'usure évolue de la même manière et avec le même taux. Cette différence est évidente puisque dans nos travaux, 4 dents de la roue utilisée présentent une entaille. Cette dernière retarde l'usure et donc

globalement en terme de perte de poids, on retrouve ce retard sur la courbe d'usure.

nous avons jugé utile d'arrêter les essais à partir de 2 millions de cycles pour ne pas abîmer le bon fonctionnement de la machine. L'allure de la courbe est donnée par l'équation 5.2.

$$U_{RDSR} = 0.0002N - 0.0076 \quad (5.2)$$

Si on enlève le deuxième terme alors l'équation deviendra sous la forme de 5.3.

$$U_{RDSR} = 0.0002N \quad (5.3)$$

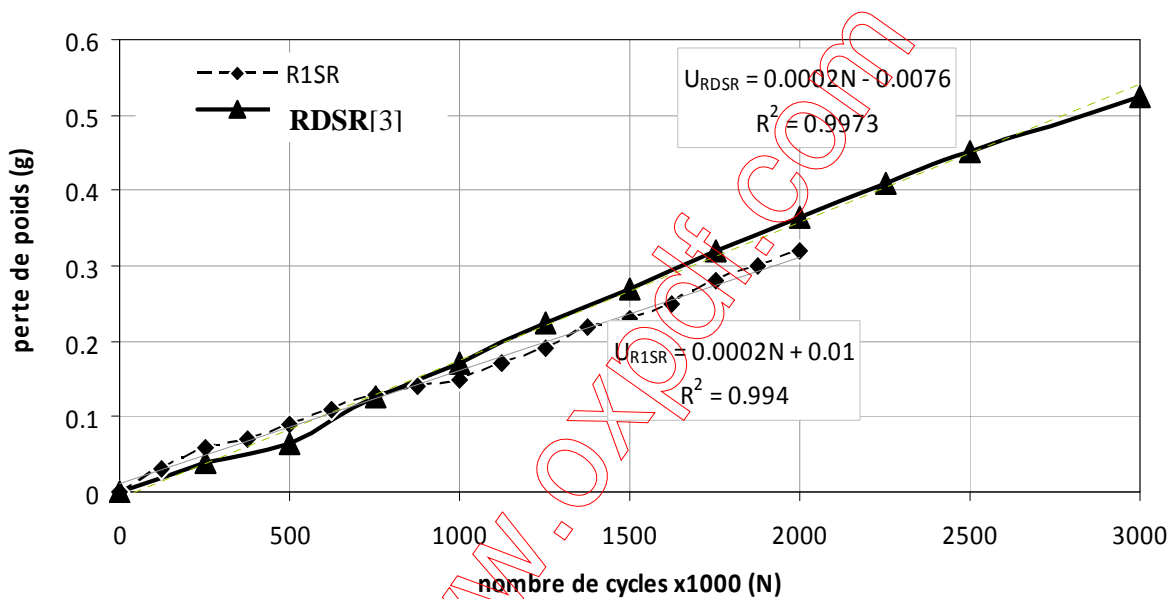


Figure 5.9a: Effet du sens de rotation sur la perte de poids des dents de roue en PA66
R1SR: Roue à 1 Sens de Rotation, RDSR: Roue à Double Sens de Rotation [3]

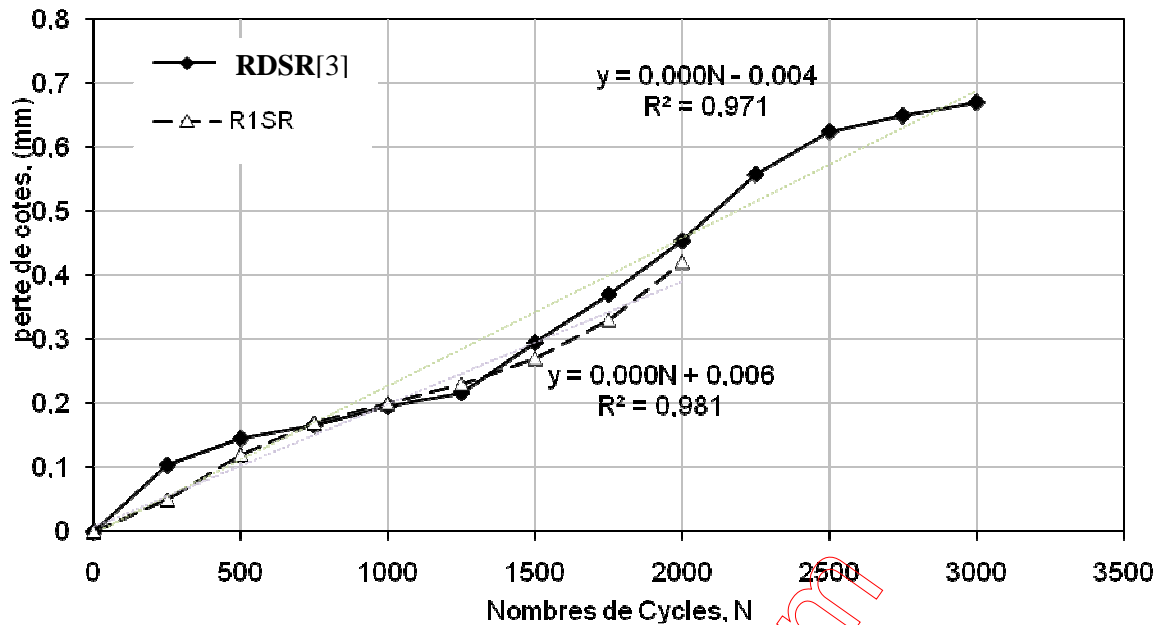


Figure 5.9b : Effet du sens de rotation sur la perte de côtes des dents de roue en PA66
 R1SR: Roue à 1 Sens de Rotation, RDSR: Roue à Double Sens de Rotation [3]

5.3.3.2. Effet de la dureté

Comme il a été signalé dans la rubrique 5.2, les roues dentées qui sont offertes dans le marché ne sont pas identifiées et sont vendues pêle-mêle. On peut les distinguer par leur couleur 'Blanc' et 'blanc cassé' et par la forme du creux des dents. Les roues en BLANC ont une dureté moyenne de 59.0 HRC et sont identifiées par les lettres R₅₉, et les roues en BLANC CASSE ont une dureté moyenne de 53,4 HRC (R₅₃) soit une différence de 6,4 HRC. Cette différence est largement suffisante pour montrer deux allures des courbes d'usure. La Figure 5.10 illustre cette différence et montre que les roues en BLANC sont nettement mieux résistantes à l'usure que les roues en BLANC CASSE.

La loi de comportement de l'usure sur la roue en blanc cassé, équation 5.4, est très significatif par rapport à l'équation 5.3.

$$U_{53} = 0.0014N + 0.0667 \quad (5.4)$$

L'usure dans les roues moins dures (53 HRC) est 7 fois plus rapide que l'usure dans les roues plus dures (59 HRC). On peut dire que dans les polyamides plus la dureté est grande plus la tenue à l'usure est importante.

Pour mieux cerner la problématique, il serait intéressant de trouver la traçabilité des deux types de roues. Il est fort possible que les roues en BLANC CASSE sont fabriquées à

partir de matière recyclée ce qui demandera une caractérisation pour comparaison avec les roues d'origines.

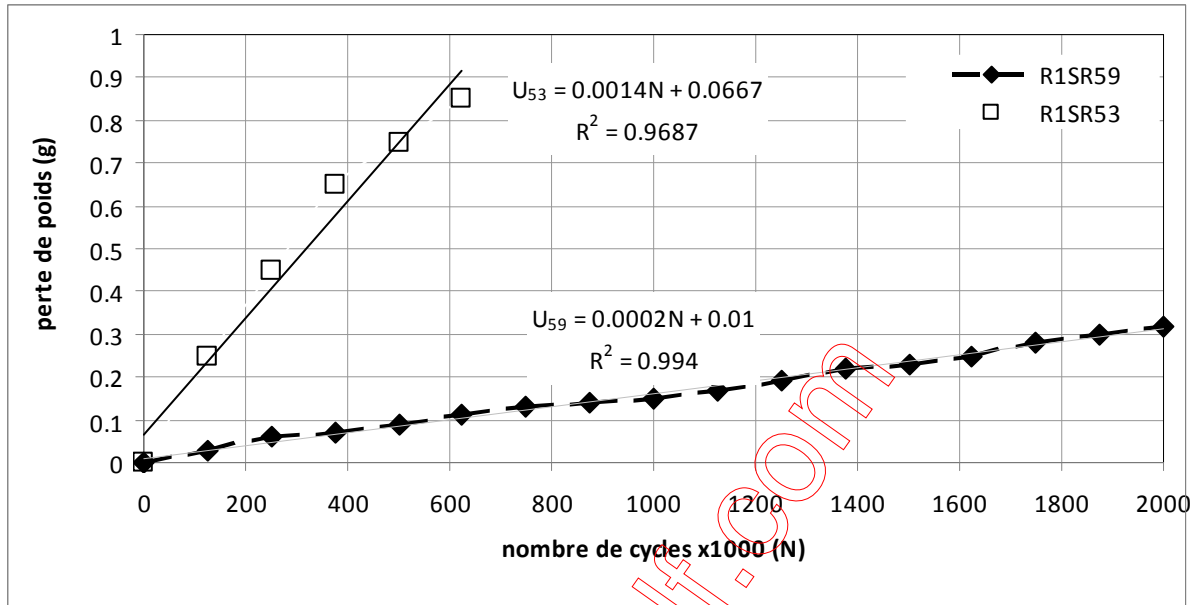


Figure 5.10: Effet de la dureté sur l'évolution de l'usure sur une dent de roue en Polyamide

5.3.3.3. Effet de l'entaille et de sa position sur le flanc de la dent

Dans la rubrique 5.3.3, nous avons montré la compétitivité entre l'usure et la fatigue quand il s'agit d'une dent avec entaille. Le phénomène est très complexe et c'est pour cette raison que dans cette rubrique, nous ne nous intéressons qu'au phénomène d'usure observé sur les dents avec entaille. Quatre dents caractérisent chaque roue. Une dent saine sans entaille identifiée par D₁₅₉, une dent entaillée dans la saillie D₂₅₉, une dent entaillée juste au dessous de la ligne médiane du diamètre primitif, D₃₅₉ et enfin une dent entaillée dans le creux de la dent D₄₅₉ (nous rappelons que le chiffre 59 identifie la dureté en HRC du matériau donc respectivement nous aurons D₁₅₃, D₂₅₃, D₃₅₃ et D₄₅₃ pour la dureté HRC 53). Dans ce cas, l'usure est observée sur chaque dent en mesurant la perte de côte au moyen du pied à module. La perte de poids ne peut pas être effectuée parce que la pesée se fait sur la roue dentée entière. Les Figures 5.11 a et b, montrent les courbes d'évolution de l'usure sur les flancs des dents de roues.

L'effet de l'entaille sur l'usure est bien illustrée sur les Figures 5.11 a et b. Quand il s'agit d'une dent saine, l'usure est rapide. Une entaille de 1 mm sur la saillie de la dent est très vite rattrapée par l'usure et ainsi on obtient la même vitesse d'usure c'est qu'on voit sur les

dents 1 et 2. Quand l'entaille est en bas de la ligne médiane c'est-à-dire juste au dessous du cercle primitif de la roue, l'usure est retardée. Ces mesures confirment les observations faites sur les profils des dents et montrent bien que la partie supérieure de la dent subit un moment de torsion due à la charge tangentielle avant d'entraîner la roue engrenée, dans son mouvement. L'effet des propriétés du matériau est très indicatif sur la qualité des roues utilisées dans ce travail. En effet on voit bien que plus le matériau est dur plus il résiste à l'usure. Sur les 4 dents observées sur chacune des roues, on voit que l'usure est comme a été dit auparavant 7 fois plus rapide sur les roues à dureté inférieure que sur les roues à dureté supérieure. En effet, les essais sont allés jusqu'à 2 millions de cycles dans le cas des roues à une dureté de 59 HRC donnant ainsi une usure de 0,43 mm et dans le cas des roues à dureté de 53 HRC, les essais la machine s'est déclenchée après 680 000 cycles avec une usure maximale de 0,75 mm.

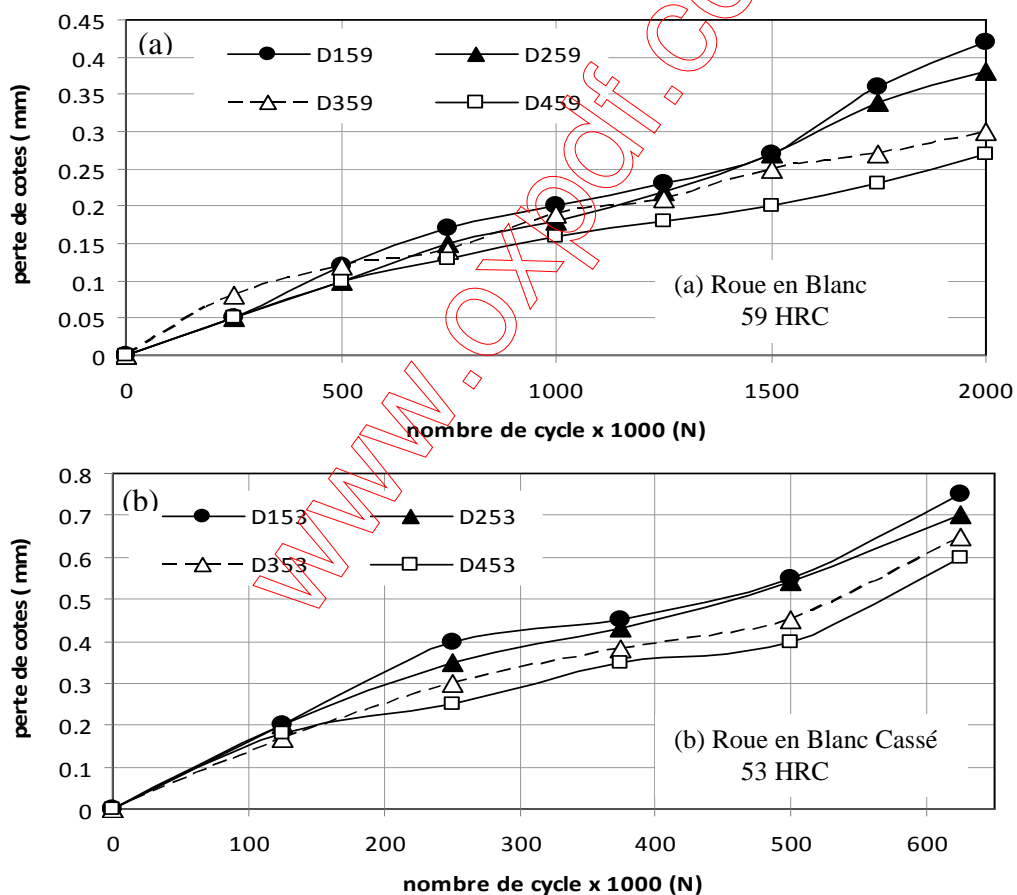


Figure 5.11: Effet de l'entaille et de sa position sur l'usure d'un flanc de dent en Polyamide

5.4. Analyse de la fissure de fatigue dans une dent de roue en Polyamide

5.4.1. Faciès de rupture

Le faciès de rupture d'une roue à dureté de 53HRC, est relevé après 680000 cycles sous charge constante. La Figure 5.12 montre l'état de la surface du faciès qui se compose d'une entaille (grossière et fine), et d'une zone de propagation de la fissure et d'une zone fragile.

Cette figure est obtenue à partir de la superposition de 15 images prises après un même nombre de cycle, avec le même grossissement. Elle montre le principe de propagation de la fissure par fatigue. La fissure se propage à partir de l'entaille fixe, en décrivant des plages formées d'arcs de cercle dont le centre c, et au fond de la zone fragile sur la ligne médiane.

A charge constante les arcs de cercle s'écartent de plus en plus jusqu' à la zone fragile. Il semble que la roue montre beaucoup plus de résistance à l'extérieur que sur les parties externes de la dent. Ceci s'explique par le fait que la matière glisse et se déforme vers les régions où il y a le moins de résistance et se déchire d'une manière continue, formant les plages de fatigue. Il faut noter que l'entaille est faite le long de la dent c'est ce qui a favorisé cette manière de se propager.

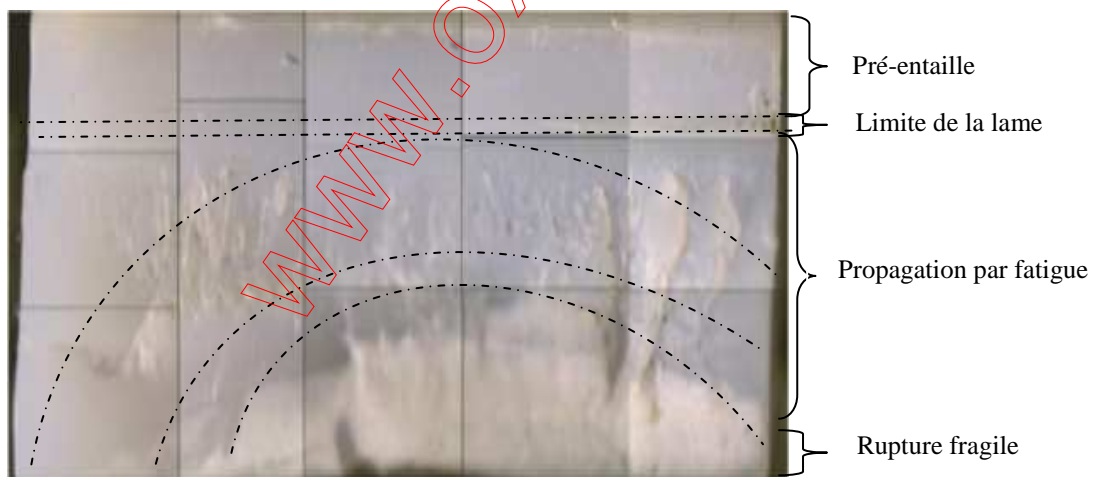


Figure.5.12: Faciès de Rupture et Zones de Fatigue

Comparativement à un faciès de rupture sur une dent en acier, les plages de fatigue progressent plus rapidement au centre qu'aux extrémités de la dent. La Figure 5.12 montre un faciès de rupture d'une dent de roue en acier [5]. Il faut noter que les sites d'initiations sont à l'intérieure de la dent et s'élargisse au fur et à mesure que la fissure avance. Cependant

quand la fissure est le long de l'entaille, les plages de fissures avancent de l'intérieur vers l'extérieur. La zone de rupture finale est très vite atteinte dans ce cas, laissant dire que le polyamide est plus résistant à la fatigue à cause de ces propriétés élastiques. Mais certainement, il s'use plus rapidement.

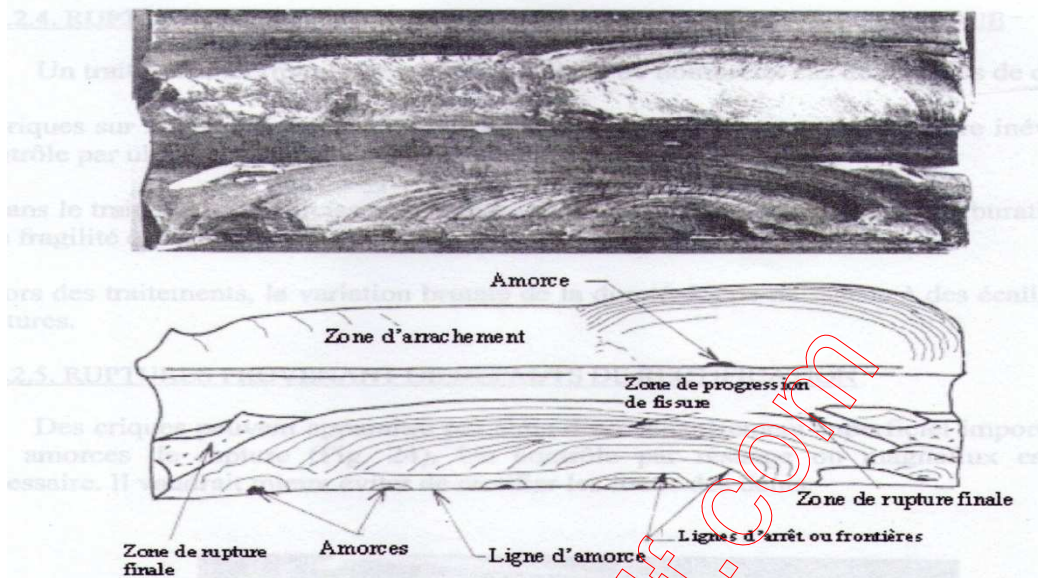


Figure 5.13 : Faciès de rupture d'une dent en acier [5]

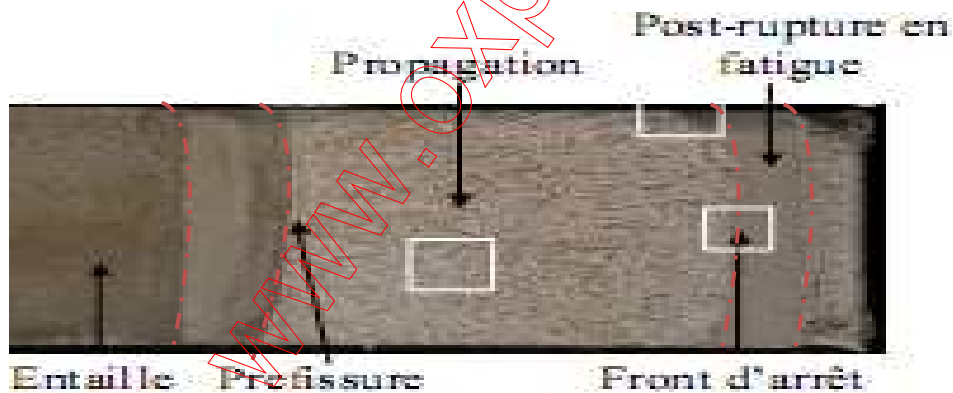


Figure 5.14 : Faciès de rupture dans un acier [6]

La comparaison des deux principes de propagation des fissures de fatigue montre que la denture en PA66 est plus résistante à la fatigue, puisque la zone de rupture fragile est atteinte tardivement, elle est constituée de moins de 20 % de faciès de rupture.

Par contre pour les aciers, la zone fragile forme 35 % du faciès de rupture, ce qui permet à la fissure d'atteindre cette zone plus rapidement. La Figure 5.15, montre le schéma de principe de la propagation de la fissure par fatigue dans le Polyamide et dans l'acier.

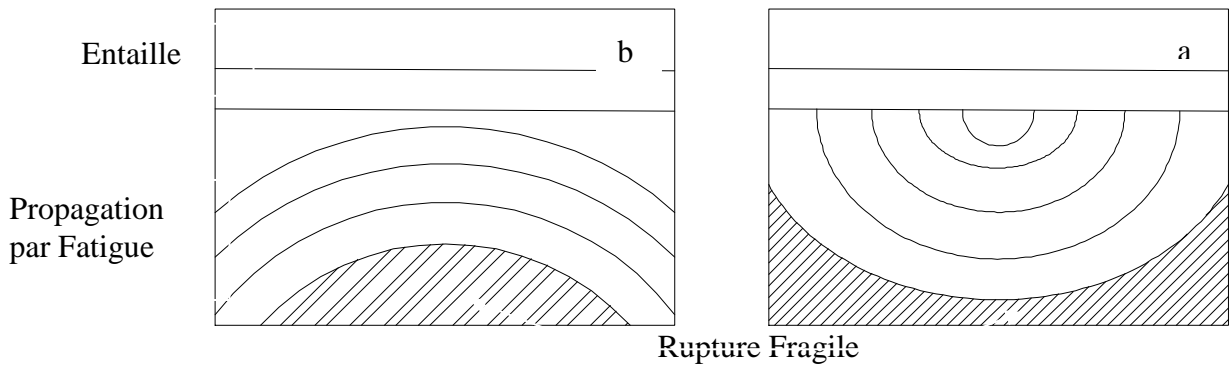


Figure 5.15 : Comparaison de faciès de rupture entre deux dents
 a) dent en acier, b) dent en Polyamide 66

5.4.2 Trajectoire de la fissure de fatigue

La propagation de la fissure est suivie sur les extrémités de la section droite de la dent, à l'aide du microscope. L'essai de fatigue est interrompu tous les 125000 cycles

La roue est démontée, nettoyée, séchée, avant d'être installée sur microscope pour observation. La Figure 5.16 montre la trajectoire de propagation de la fissure suite au phénomène de fatigue.

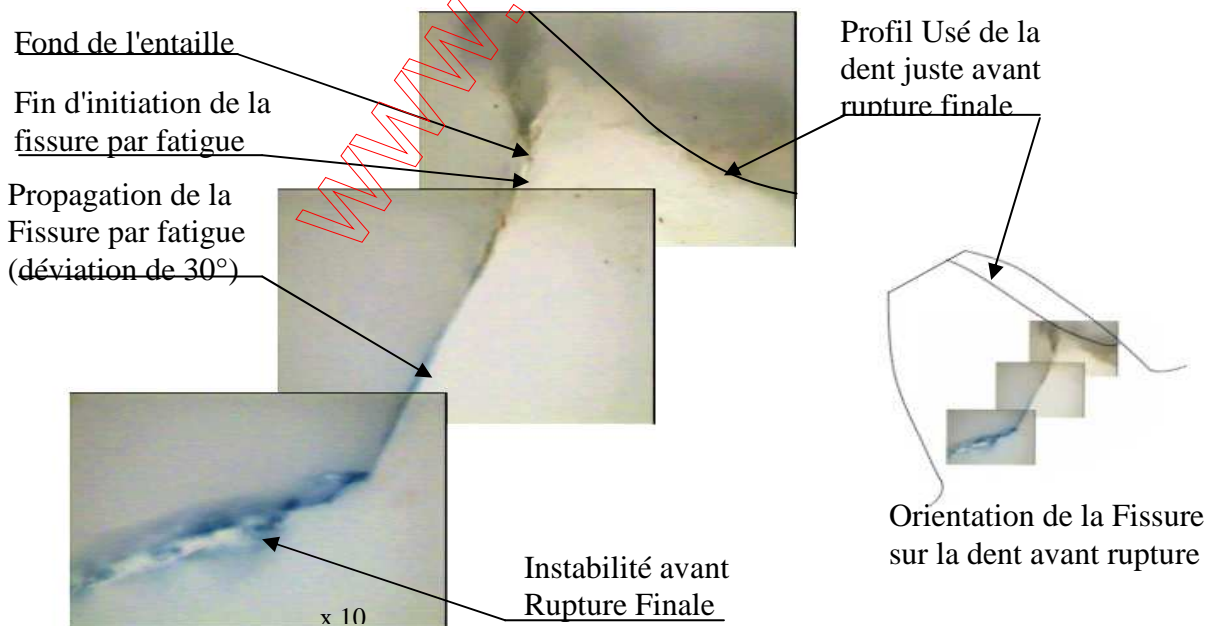


Figure 5.16: Trajectoire de la fissure par fatigue dans une dent en polyamide.

Au départ, la fissure par fatigue démarre du fond de l'entaille sur une distance de 0.06mm ce qui présente une phase d'initiation par fatigue. Puis elle dévie de 30° de sa trajectoire pour rentrer dans une phase de propagation. Ce comportement est couramment observé en fatigue mais avec une déviation de 45°. La fissure continue à se propager jusqu'à une certaine longueur de 5 mm où le phénomène devient instable. Une nouvelle déviation montre que la charge appliquée est devenue trop importante créant ainsi une perturbation dans la propagation qui mène vers la zone de rupture pour que voir la dent s'arracher brusquement. Il faut noter que cette trajectoire est obtenue à charge constante pendant tout l'essai. La rupture brusque de la dent a été néfaste pour le système de transmission par engrenage. En effet, lors du démontage de la roue, on a observé que la roue intermédiaire à denture hélicoïdale, une dent s'est brisée. La Figure 5.17 illustre les dégâts provoqués par la rupture brusque due à une propagation de fissure par fatigue.

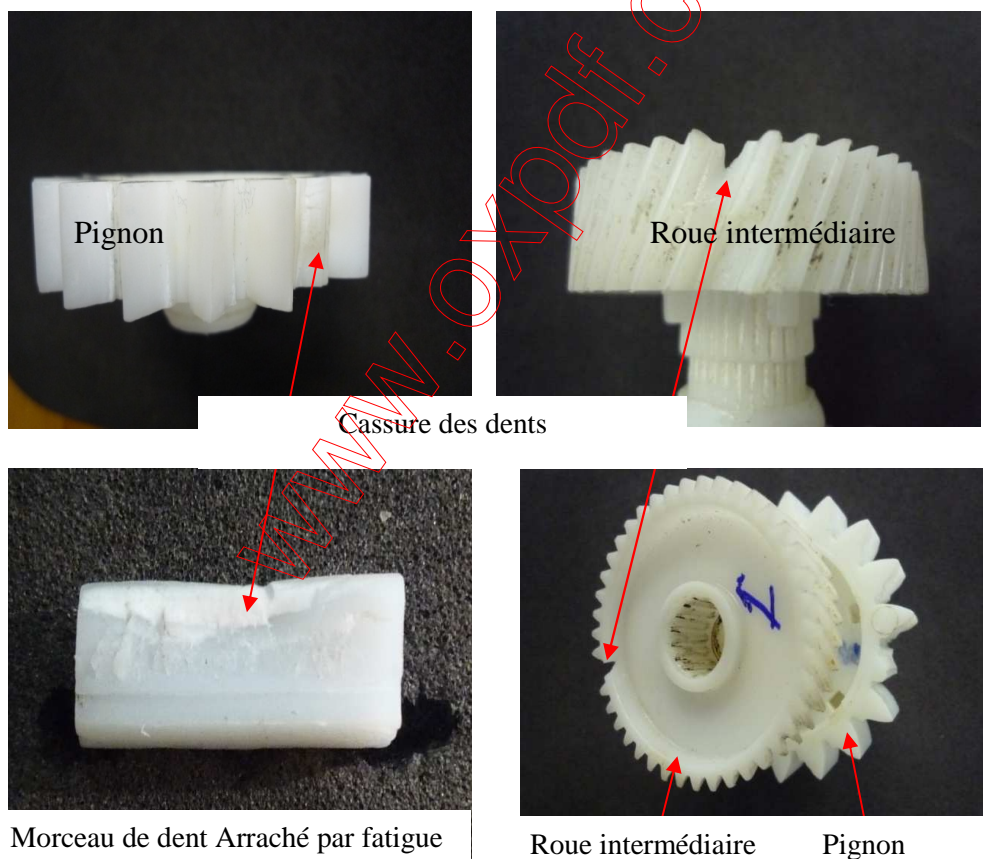


Figure 5.17: Dégâts provoqués suite à une rupture par fatigue de la dent de pignon en polyamide

5.4.3 Analyse des longueurs de fissure en fonction du nombre de cycles

La propagation de la fissure de fatigue est suivie par prises de photographies sur microscope en fonction du nombre de cycles (voir rubrique 4.4.2). Les essais sont arrêtés tous les 125000 cycles pour démonter la roue et la préparer pour observation sous microscope. Chaque image du microscope est cadré avec le même focus, la même position et surtout repérée avant de l'enregistrer. Chaque photographie correspond à une mesure. Les mesures ont été effectuées avec un agrandissement de 40 fois au moyen du Logiciel Motic images La Figure 5.18, montre un exemple de mesure de la propagation de la fissure. La zone 1 représente la longueur de la fissure qui associe la longueur de l'entaille plus l'initiation de la fissure par fatigue. Cette zone est très difficile à détecter, voir même impossible car le fond de la fissure ne peut pas être vu à un agrandissement 40 fois. Mais une fois que la fissure se propage, la fissure devient de plus en plus nette et on peut distinguer les différentes phases de propagations. Les images sont superposées successivement de manière à pouvoir évaluer la propagation de la fissure, comme l'indiquent les zones 1, 2, 3 et 4 correspondant respectivement aux longueurs intermédiaires mesurées a_1 , a_2 , a_3 et a_4 . La longueur finale a , de la fissure est déterminée en calculant la somme des longueurs intermédiaires et puis vérifiée une fois que l'image complète de la fissure est obtenue par superpositions des images intermédiaires.

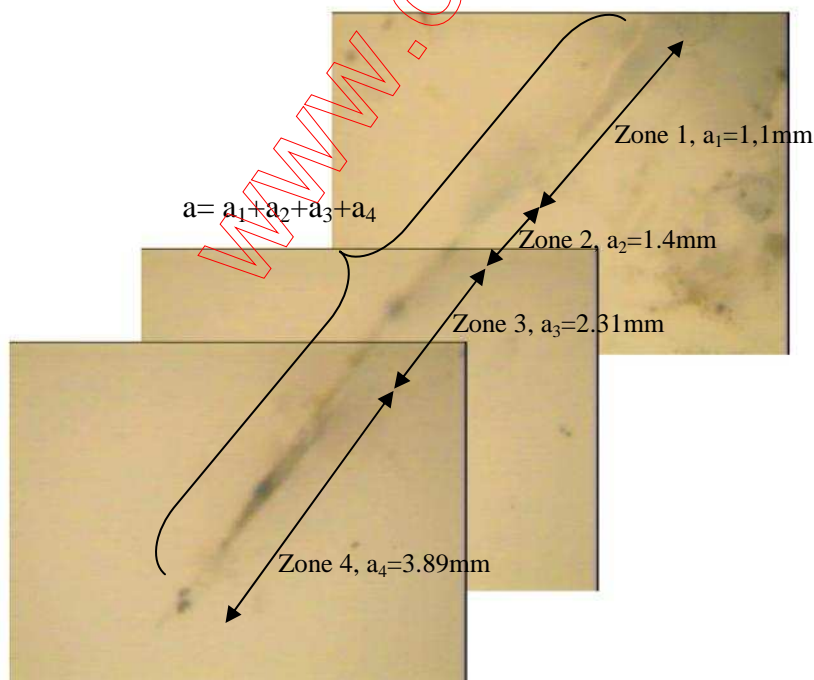


Figure 5.18: Exemple de Mesure des Longueurs des Fissures par superposition d'image sur une dent en polyamide

Nous rappelons que l'objectif recherché dans la mesure des longueurs de fissures est de tracer la courbe longueur des fissures, a en fonction du nombre de cycles, N . Comme il a été montré dans la rubrique 5.3.3, il y a compétitivité entre usure et propagation de fissure en présence d'entaille sur les dents et la propagation de la fissure n'a lieu que sur les dents qui ont été entaillées au dessous de la ligne de contact de l'engrenage c'est-à-dire au dessous du diamètre primitif de la roue. A cet effet les résultats de fatigue ne concerneront que les dents 3 et 4.

La Figure 5.19 illustre les courbes de propagation de la fissure dans deux dents de la même roue dentée avec creux arrondis, en PA66 (dureté 53 HRC). Les deux dents sont repérées 3 et 4 mais avec des entailles situées dans le creux des dents respectivement juste au dessous de la ligne de contact et au fond du creux. La dent 3 a subi une propagation rapide et s'est cassé après 680000 cycles. Ceci ne peut pas confirmer que les vitesses de propagation sont plus rapides quand la fissure démarre à partir de la ligne médiane. Néanmoins quand on voit l'allure des deux courbes, la propagation est pratiquement la même jusqu'à 375000 cycles. A partir de ce nombre l'allure change complètement avec plus de vitesse pour la dent D353

pour atteindre une longueur de 6 mm après 625000 cycles pendant que la longueur a atteint 3,6 pour la roue D453. La Figure 5.20 illustre la variation de la longueur de la fissure Δa et démontre bien que les variations sont plus importantes sur la dent D₃₅₃ que sur la dent D₄₅₃. La variation Δa représente la différence entre la longueur de la fissure et la longueur initiale de l'entaille. Ceci peut être expliqué par 2 points:

- 1) le moment de rotation (Figure 5.7) est plus important quand l'entaille est proche de la ligne de contact. En effet, le polyamide est très élasto-plastique et subit facilement des déformations par rapport aux roues en métal.
- 2) La forme de la dent: une dent qui présente un rayon d'arrondi dans son creux pour réduire la concentration de contrainte résiste mieux qu'une dent sans arrondi Figure 5.20. Ces résultats sont en parfaite harmonie avec les résultats données dans la littérature Hüseyin Imrek [4] et par les travaux de S. SENTHILVELAN and R. GNANAMOORTHY [7].

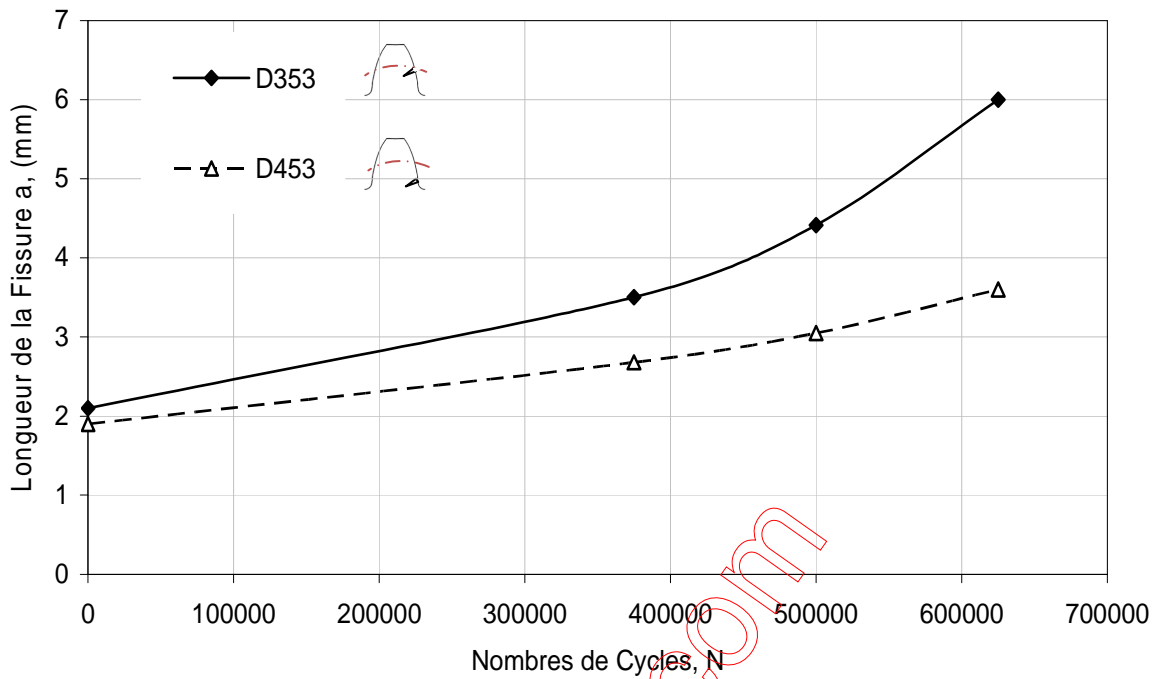


Figure 5.19: Evolution de la fissure sur les dents de roue en PA66
D3 et D4 sont les dents 3 et 4 pour la roue (53 HRC)

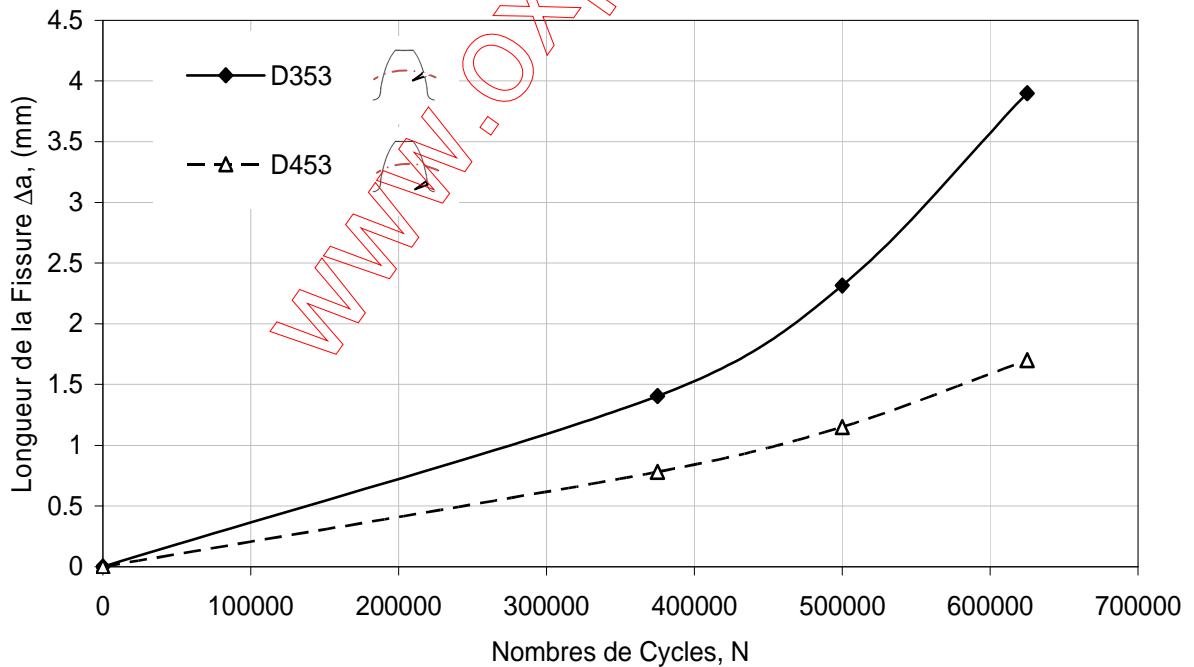


Figure 5.20: Evolution de la variation de la longueur de la fissure Δa , sur les dents de roue en PA66 D3 et D4 sont les dents 3 et 4 pour la roue (53 HRC)

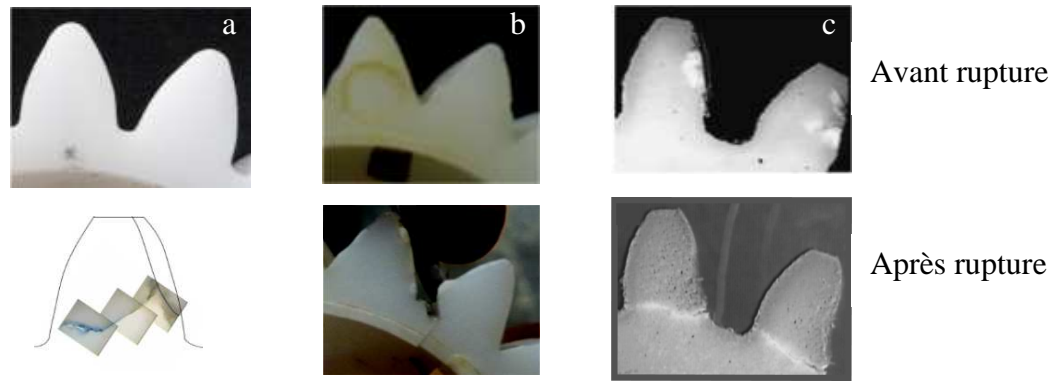


Figure 5.21: Effet de la forme de dent sur la propagation de la fissure de fatigue

- a) dent avec arrondi au creux et au pied large
- b) dent sans arrondi au creux et au pied large
- c) dent avec arrondi au creux et au pied étroit [7]

Pour mettre en évidence l'effet de l'arrondi, nous avons pris une roue avec des creux de dents sans arrondi au pied large (Figure 5.21b), classée dans la gamme HRC 53 et nous avons effectué des essais de fatigue. Les résultats montrent que contrairement à la roue avec des creux arrondis, la fissure de fatigue se propage plus rapidement dans une dent avec entaille au creux que dans une dent avec entaille proche du diamètre primitif. La Figure 5.22 illustre l'évolution de la longueur de la fissure en fonction du nombre de cycles, et la Figure 23 montre l'évolution de la variation de la longueur de la fissure en fonction du nombre de cycle.

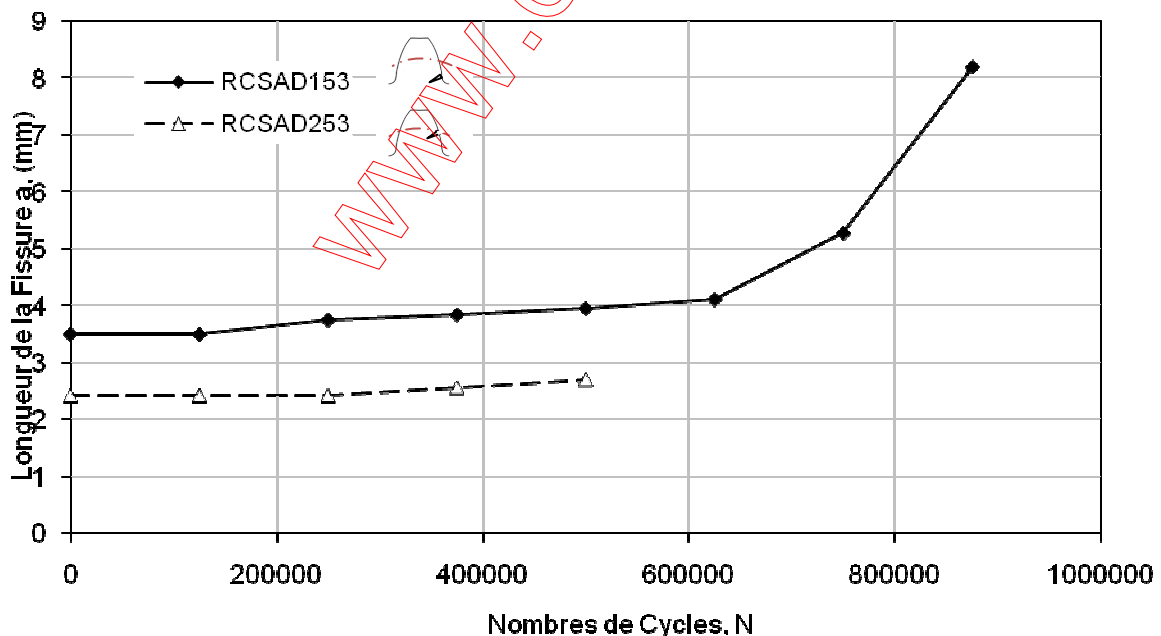


Figure 5.22: Evolution de la fissure sur les dents de roue avec creux sans arrondi en PA66

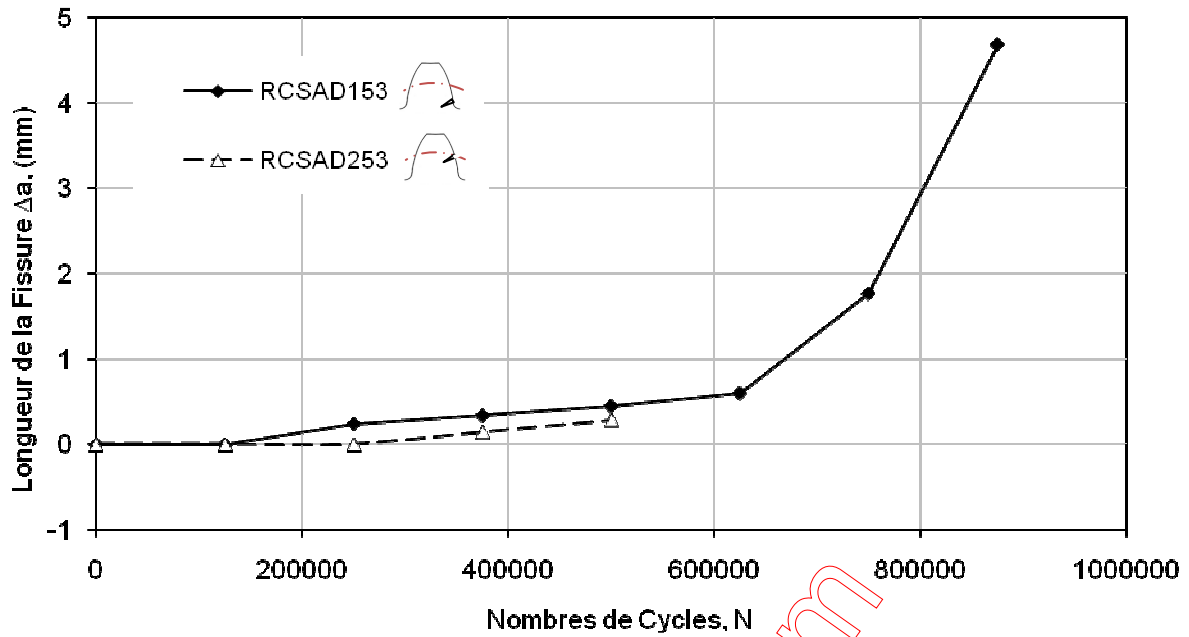


Figure 5.23: Evolution de la variation de la longueur de la fissure Δa , sur des dents de roue avec des en creux sans arrondi en PA66

La Figure 5.24 montre que la géométrie de la dent est très influente sur la vitesse de propagation de la fissure. En effet plus la forme du pied de dent est large plus les vitesses de fissures sont longues. Cependant la Figure 5.24 ne forme qu'une première analyse des vitesses de fissuration de fatigue sur les dents de roues dentées. Une meilleure estimation doit être complétée par l'analyse des taux de fissurations da/dN en fonction du ΔK , l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte. Ce dernier doit être déterminé, c'est l'objet de la prochaine rubrique qui concerne l'analyse des vitesses de fissurations de fatigue dans les dents de roue.

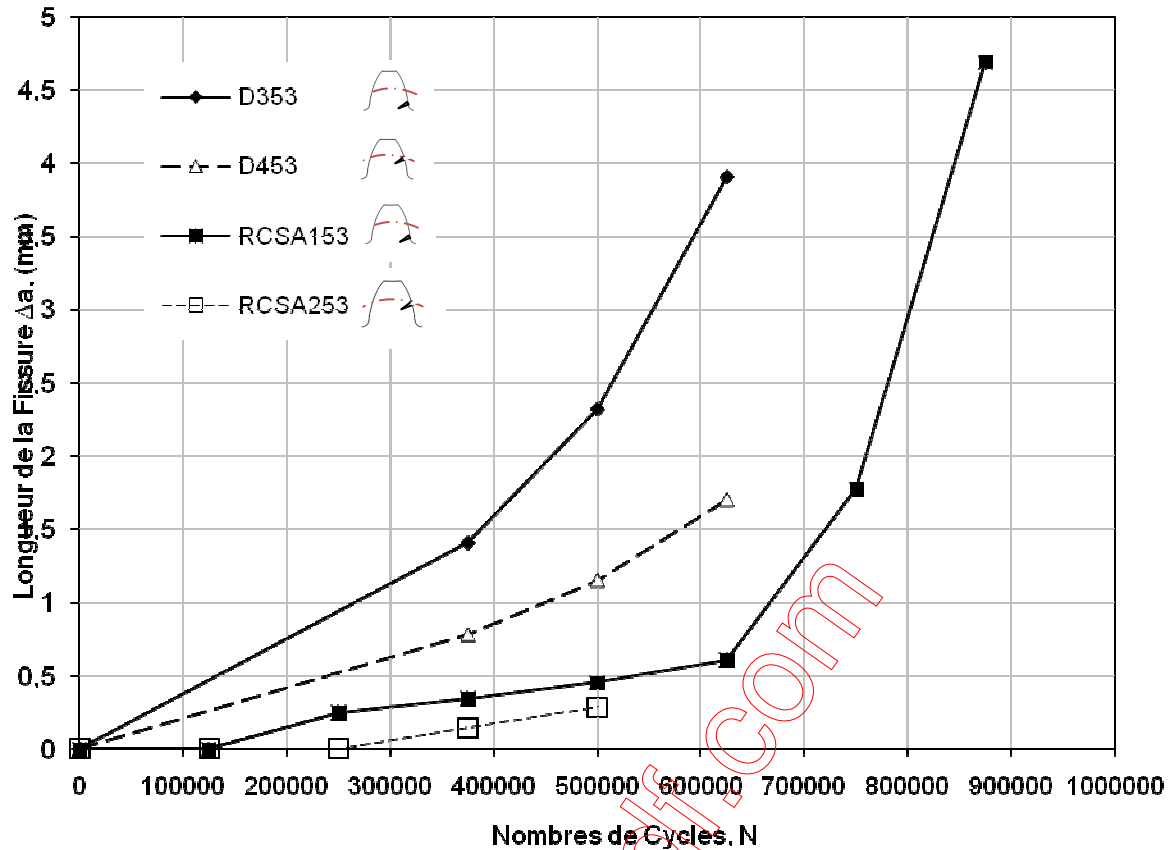


Figure 5.24: Evolution de la longueur de la fissure sur roues avec géométries différentes du creux des dents : (D353 et D453 avec creux arrondi au pied large, RCSA1 et RCSA2 avec creux sans arrondi avec pied large)

5.4.4 Analyse des vitesses de fissuration par fatigue

L'analyse des vitesses de fissuration sur le flanc des dents de roue en polyamide n'est pas aussi simple qu'on le pensait. En effet, la compétitivité qui existe entre le phénomène d'usure et la propagation de la fissure demande une réflexion très aigues sur le phénomène. Dans la littérature, on ne trouve pas de travaux qui ont traité les vitesses de fissuration par fatigue en utilisant comme éprouvette une roue dentée. La major partie des travaux sont effectués en utilisant des éprouvettes standards type SEN (single edge notched) ou CTS (compact tension specimen). L'analyse des vitesses de fissuration s'est basée sur les formulations standards de la mécanique de la rupture particulièrement l'équation (5.5) [8]:

$$\Delta K = \Delta S \cdot (\pi a)^{1/2} \cdot Y \quad (5.5)$$

Où: ΔK est l'amplitude du facteur d'intensité de contraintes

ΔS est l'amplitude de la contrainte appliquée

a est la longueur de la fissure ; Y est le facteur de forme

Le calcul de ΔK nécessite une analyse de la forme de la géométrie de la dent en présence d'une fissure et particulièrement en présence d'un phénomène d'usure. La Figure 5.25 illustre une présentation schématique de la complexité de la forme de la dent. D'une part la forme de la dent n'est pas homogène sur les trois directions x, y et z. Donc on peut estimer les dimensions de la dent en adoptons B comme largeur de la dent, L hauteur de la dent et W la profondeur jusqu'à laquelle peut se propager au maximum la fissure. De même pour la longueur de la fissure, dépend de la propagation de la longueur initiale de l'entaille a_0 , de la propagation de la fissure de fatigue a_f et de la longueur de l'usure a_u . Ainsi la longueur finale de la fissure se présente selon l'équation (5.6):

$$A=(a_0+a_f)-a_u \quad (5.6)$$

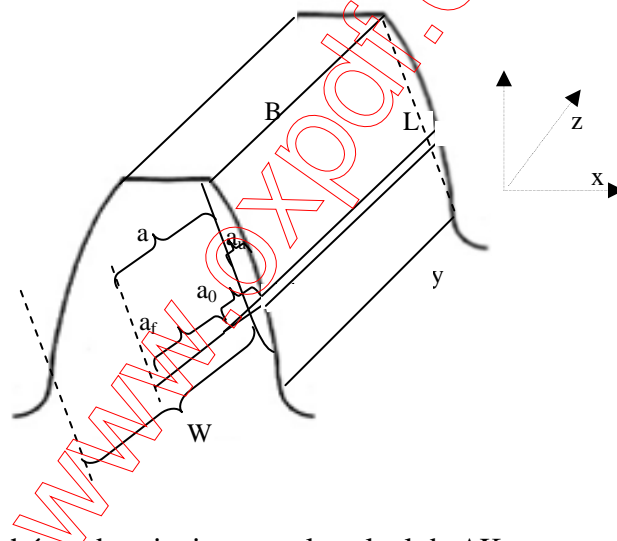


Figure 5.25: Schéma de principe pour le calcul de ΔK sur une dent de roue.

Il est évident que le schéma présenté sur la Figure 5.25 pour le calcul de ΔK , ne répond pas aux normes de calcul de ΔK données par la littérature. A cet effet, nous ne pouvons pas nous prononcer sur les vitesses de fissuration en fonction de ΔK , et nous suggérons que l'étude soit plus appréhendée afin d'arriver à une méthode de calcul. Cette rubrique est justement une partie importante dans les perspectives

Références bibliographiques

- [1] P.E. Bretz, R. W. Hertzberg, J. A. MANSON,,influence of absorbed moisture on fatigue crack propagation behaviour in polyamides Part 1 Macroscopic response, Journal of Materials Science 16 (1981) 2061-2069
- [2] S.Bolognini, Propriétés mécaniques à haute température de cermets Ti(C, N)-WC-Mo-Co à gradient de composition pour outils de coupe, Thèse de doctorat. N°d'ordre 2161-2000
- [3] W .Ghalloudj., Etude de l'endommagement et de la fiabilité des engrenages à dentures droites en polyamide 66, Magister, Université Annaba, 2008
- [4] H.Imrek, Performance improvement method for Nylon 6 spur gears Tribology International 42(2009)503–510
- [5] M.R. Sarl, Effet des polluants solides des lubrifiants sur les surfaces des roues dentées, thèse de doctorat Université Annaba 2008.
- [6] M. Hajjaj , , Propagation dynamique et arrêt de fissure de clivage dans un acier bainitique Thèse doctorat, 2006
- [7] S. Senthilvelan and R. Gnanamoorthy, Damage Mechanisms in Injection Molded Unreinforced, Glass and Carbon Reinforce Nylon 66 Spur Gears, Composite Materials 11: 377–397, 2004.
- [8] K.J Pascoe., An introduction to the properties of engineering materials, 3rd edition, Van Nostrand Reinhold, UK, Co Ltd., 1978

Conclusion

Cette étude a été effectuée au niveau du laboratoire LR3MI, mécanique des matériaux et maintenance industrielle et a pour but de mettre en œuvre une machine d'essai de fatigue des roues dentées en polyamide et de développer une technique de mesure des vitesses de fissuration. Les conclusions de ce travail sont énumérées ci-dessous :

1. Le banc d'essai de propagation de fissure par fatigue se compose d'un moteur électrique qui transmet sa puissance de 1, 2 KW et un mouvement de rotation à 250 t/min à un pignon en PA qui fait l'objet d'éprouvette d'essai, à travers un système d'engrenage. Le pignon s'engrène avec une couronne dentée solidaire d'une cuve qui reçoit une charge de 9kgs, représentée par 1/3 de linge et 2/3 d'eau avec détergent. Le rapport de transmission entre le pignon et la couronne est de 19/132.
2. Les essais de fatigue sont menés sur des dents de pignons, présentant des entailles qui ont été réalisées sur une fraiseuse à commande numérique avec une fraise 2-tailles à bout sphérique de diamètre de 0.8mm. pour obtenir une fissure pointue, un coup de lame a été rajouté au fond de la fissure. Chacune des dents entaillées est comprise entre deux dents saines. La position de l'entaille sur la dent est repérée par rapport au diamètre primitif de la dent; saillie et creux de la dent.
3. La propagation de la fissure est suivie par observation microscopique. La technique consiste en une prise successive de photographies de la fissure après interruption de l'essai tous les 125000 cycles. La succession des images donnent la longueur de la fissure totale avant rupture de la dent.
4. Le comportement à l'usure d'une dent tournant en un cycle à un sens de rotation montre que l'allure de la courbe est linéaire jusqu'à l'arrêt de la machine et révèle une durée de vie de 2 millions de cycles. Comparativement avec les résultats de la littérature, l'allure reste la même. Cependant, dans le cas d'une roue qui tourne en un cycle à 2 sens de rotation, la durée de vie dans ce cas est plus grande puisqu'elle atteint 3 millions de cycles.
5. L'existence d'une fissure dans une dent introduit un phénomène de compétitivité entre l'usure et la fatigue. En effet l'usure est dominante quand la fissure est dans

- la saillie de la dent mais elle est réduite quand la fissure est dans le creux de la dent.
6. La présence d'une entaille dans la saillie de la dent est très vite éliminée par l'usure et pratiquement pour une entaille de 0.7 mm, elle disparaît à la fin de l'essai.
 7. La présence d'une fissure dans le creux implique un moment de rotation autour du fond de fissure favorisant la propagation de la fissure et retardant l'usure.
 8. La dureté joue un rôle important. En effet, plus la matière est dure plus l'usure est moindre. L'augmentation de la dureté de 6HRC provoque une résistance à l'usure de 3,5 fois.
 9. La propagation de la fissure sur une dent de roue présente une phase d'initiation par fatigue et une phase de propagation en marquant une déviation de 30° à 40° jusqu'à la rupture. Ce comportement est conforme à celui des autres matériaux notamment métalliques.
 10. La fissure évolue rapidement quand l'entaille est près du diamètre primitif que quand elle est au fond du creux de la dent. Ce comportement est contraire à celui trouvé dans les métaux. On estime que les déformations plastiques sont très importantes à cause du matériau et de la géométrie de la dent. Les dents en polyamide sont fines dans la saillie et large dans le creux.
 11. Par rapport à une défaillance par usure, la rupture d'une dent par fatigue est dangereuse car elle peut provoquer la rupture brusque d'autres roues impliquées dans le système de transmission.
 12. La technique proposée dans ce travail est acceptable. Cependant, une grande attention doit être apportée au niveau de l'introduction de l'entaille.

PERSPECTIVES :

Le banc d'essai qui a été utilisé dans ce travail a donné des résultats fort intéressants. Il reproduit fidèlement le comportement à l'usure et à la fatigue des dentures de roue en polyamide puisque les conditions d'essais sont réelles.

Cependant, il reste beaucoup à faire pour améliorer ce banc, et la méthode de traitement des données à savoir:

- ✓ L'introduction de l'entaille sur une dent
- ✓ Le prélèvement de la longueur de la fissure plus d'attention (un microscope métallographique permettant de détecter la moindre propagation de la fissure.) pour des essais de laboratoire, il serait plus convivial d'utiliser, le banc d'essai proposé dans la littérature (Figure I.5)
- ✓ Pour analyser les vitesses de propagation des fissures, il est judicieux d'utiliser des éprouvettes standards types single Edge notched specimen (SENS).
- ✓ Le rapport des outils de simulation et modélisation est incontournable.