

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR ANNABA-UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

INTITULE

**Effet du brunissage sur les propriétés mécaniques d'un
PEHD2050 concentré à 2.5% de noir de carbone**

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE MECANIQUE

SPECIALITE : GÉNIE DES MATÉRIAUX

PRESENTE PAR : AOUABDI HADJER

DIRECTEUR DE MEMOIRE : Dr. HAMADACHE H. (Pr)

DEVANT LES JURYS

PRESIDENT: Dr. CHAOUI K. (Pr)

EXAMINATEURS : Dr. AMIRAT A. (Pr)

Dr. BOUNAMOUS B. (MAA)

Année: 2018/2019

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au Département de Génie Mécanique de la faculté des Sciences de l'Ingénierat et au Laboratoire de Recherche des technologies Avancées en Production Mécanique (LRTAPM). Il a bénéficié de l'aide pour le choix du sujet et la réalisation des éprouvettes, de l'unité industrielle ALFAPIPE Annaba.

Je tiens à remercier vivement :

- Monsieur Hamid HAMADACHE; professeur des universités au Département de Génie Mécanique de l'UBMA Annaba pour m'avoir accueilli dans son équipe, d'avoir accepté d'être mon Encadreur et qu'en plus de sa disponibilité, ses orientations et ses conseils avisés a su bien m'encadrer et me soutenir tout au long de ce travail.

- Madame Karima Chef de Service et tous les éléments du laboratoire de Revêtement de ALFAPIPE Annaba. pour leurs conseils scientifiques dont ils m'ont fait bénéficier, pour la bienveillance attention et l'encouragement constant qu'ils ont toujours porté à mes travaux tout au long de mon Stage pratique à l'unité ALFAPIPE. Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde gratitude.

- Mes remerciements vont également à Monsieur le Professeur KAMEL CHAOUI qui m'a fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

- Messieurs les Enseignants : Professeur Abdelaziz AMIRAT, MR BOUNAMOUS ont bien voulu accepté la laborieuse tâche d'être les rapporteurs de ce mémoire. Leurs critiques et remarques m'ont été fort précieuses et je les en remercie. Ils m'ont également fait l'honneur de faire partie du jury de Soutenance; Qu'ils en soient encore fortement remerciés.

- Que tous le Personnel Technique et Administratif du Département Génie Mécanique, les collègues et amis qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de ce travail et à en faire de celui-ci un plaisir, retrouvent ici l'expression de ma parfaite considération et ma gratitude la plus sincère.

Hadjer AOUABDI

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Tous ceux qui m'ont un jour aimé et qui ont cru en moi.

A ma chère mère qui mérite d'être la meilleure mère du monde

A mon cher père qui m'a toujours encouragé

A ma sœur Imen

A mon mari OUSSAMA

A mes chères amies Meriem, Hala, Rahma

A tous mes amis

JE VOUS DIS TOUS "MERCI "

Liste des figures

Figure I.1 : Modèle schématique de la synthèse d'un polymère.....	5
Figure I.2 :Représentation schématique d'un polymère thermoplastique.....	6
Figure I.3 : Schéma représentatif du polyéthylène.....	11
Figure I.4 : La polymérisation du polyéthylène	11
Figure I.5 : Principe de DSC.....	15
Figure I.6 : Capacité de chaleur.....	16
Figure I.7 :Température de transition vitreuse.....	18
Figure I.8 :Température de cristallinité.....	19
Figure I.9 : Température de fusion.....	20
Figure I.10 :Courbe DSC.....	21
Figure 1.11:Classement des irrégularités de surface.....	23
Figure 1.12 : Paramètres de rugosité.....	23
Figure I.13 : Diagramme contrainte-déformions.....	25
Figure I.14: La machine de traction.....	26
Figure I.15:Sur une éprouvette de traction la longueur initiale entre repères L0 est normalisée.....	26
Figure I.16 : Courbe de traction.....	27
Figure I.17 :Principe de l'essai de dureté BRINELL.....	30
Figure I.18 : Principe de l'essai de dureté VICKERS.....	31
Figure I.19 : Principe de l'essai de dureté ROCKWELL b et ROCKWELL C.....	31
Figure II.1 :Schéma de la déformation des irrégularités de surface lors d'un traitement par bille.....	34
Figure II.2 : Principe du galetage.....	36
Figure II.3 : Outils de galetage.....	36
Figure II.4 :Principe de brunissage.....	38
Figure II.5 : Différentes formes de brunissoirs.....	39
Figure II.6 : Schéma du brunissoir.....	39
Figure II.7 : Adaptateur fraiseuse / brunissoir..... ;;	39
Figure III.1 : Granulé de PEHD.....	42
Figure III.2 : Mesure de la rugosité.....	43
Figure III.3 :Dureté shore a) duromètre Hareprute, b) technique de mesure.....	44

Figure III.4 : étape de préparation d'éprouvettes, a) plaque en PEHD, b) Machine à découper les éprouvettes en PEHD, c) éprouvettes finies.....	45
Figure III.5: Essai de traction a) Mesure de l'épaisseur de l'éprouvette, b) l'éprouvette avant l'essai, c) Machine de traction (ZWICK) ,d) l'éprouvette avant l'essai	46
Figure III.6 : Courbe rationnelle de traction.....	47
Figure III.7: Calorimètre différentiel à balayage.....	48
Figure III.8: Technique de mesure de la DSC a) Pesée de l'échantillon, b) préparation de la capsule, c) placement d'échantillon et début d'essai.....	48
Figure III.9: Courbe DSC pour PEHD.....	49
Figure III.10: Brunissage a) étalonnage de la force, b) mode opératoire.....	49
Figure IV.1 : Effet du brunissage sur la rugosité avec le taux de réduction.....	52
Figure IV.2 : Effet du brunissage sur H shore moy avec le taux de réduction.....	53
Figure IV.3 : Diagramme des interactions pour la dureté Hs.....	57
Figure IV.4 : Diagramme des interactions pour Ra.....	57
Figure VI.5 : Influence des paramètres du brunissage sur la rugosité.....	58
Figure VI.6 : Influence des paramètres du brunissage sur la dureté Hs.....	58

Liste des tableaux

Tableau I.01 : Les domaines d'application des polymères.....	9
Tableau I.2 : Caractéristiques du PEHD	14
Tableau I .3 : Avantages et Inconvénients du PEHD	14
Tableau III .1 : Les valeurs de rugosité.....	43
Tableau III.2 : Les valeurs de la dureté shore.....	44
Tableau III.3 : Facteur codés en brunissage	50
Tableau III.4 : Matrice d'expérience	50
Tableau IV.1 : Les valeurs mesurées de Ra avant traitement de brunissage.....	51
Tableau IV.2 : Les valeurs mesurées de Ra après traitement de brunissage.....	51
Tableau IV.3 : Comparaison des valeurs moyennes des rugosités Ra mesurées avant et après traitement par brunissage avec le résultat de calcul du taux de réduction s.....	52
Tableau IV. 4 : Les valeurs de la dureté mesurées H shore avant traitement de brunissage.	52
Tableau IV 5 : Les valeurs de la dureté mesurées H shore après traitement de brunissage.....	53
Tableau IV. 6 : Comparatif de H shore moy avant et après traitement de brunissage	53
Tableau IV.7 : Facteurs codés.....	54
Tableau IV.8 : Matrice des essais	54
Tableau IV.9 : Les réponses mesurées après traitement de brunissage Ra H shore.....	54
Tableau IV.10 : Valeurs des coefficients polynôme.....	55

SOMMAIRE

Remerciements.....	i
Dédicace.....	ii
Liste des figures.....	iii
Liste des tableaux.....	v
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Etude bibliographique	
I .1 Introduction.....	3
I .2 Les polymères.....	3
I.2.1 Historique des polymères.....	3
I.2.2 Définition d'un polymère.....	4
I.2.3 Les types des polymères.....	5
I.2.3.1 Les thermoplastiques.....	5
I.2.3.2 Les thermodurcissables.....	6
I.2.3.3 Les élastomères.....	7
I.2.3.4 Les élastomères thermoplastiques.....	7
I.2.4 Propriétés des polymères.....	7
I.2.5 Mise en forme des polymères.....	9
I.2.6 Applications des polymères.....	9
I.3 Polyéthylène (PE).....	10
I.3.1 Définition.....	10
I.3.2 Les différents types de polyéthylène.....	11
I.3.3 Le polyéthylène haute densité (PEHD).....	12
I.3.3.1 Présentation.....	12
I.3.4 Propriétés des polyéthylènes haute densité.....	12
I.3.4.1 Propriétés rhéologiques.....	12

I.3.4.2 Propriétés mécaniques.....	13
I.3.4.3 Propriétés thermiques.....	13
I.3.4.4 Propriétés chimiques.....	13
I.3.4.5 Propriétés électriques.....	14
I.4 Principe de la DSC.....	15
I.4.1 Explication de la courbe de DSC obtenue.....	16
I.4.1.1 La capacité de chaleur.....	16
I.4.1.2 La température de transition vitreuse.....	17
I.4.1.3 La Cristallisation.....	18
I.4.1.4 La fusion.....	19
I.4.2 Synthèse.....	20
I.5 Etats de surface.....	22
1.5.1 La surface.....	22
1.5.2 Topographie.....	22
I.5.2.1 Définition.....	22
I.5.3 Paramètres de rugosité.....	23
I.6 Essai de traction.....	24
I.6.1 Introduction.....	24
I.6.2 Définition.....	24
I.6.3 Principe d'essai.....	24
I.6.4 La machine de traction.....	25
I.6.5 Les éprouvettes.....	26
I.6.6 Courbe de traction.....	27
I.6.8 <i>Caractéristique nominales ou apparentes</i>	27
I.7 Essais de dureté.....	29
I.7.1 Essais de dureté quantitatifs.....	29
I.7.1.1 Essai BRINELL.....	29
I.7.1.2 Essai VICKERS.....	30
I.7.1.3 Essais ROCKWELL.....	31
I.7.2 Essais de microdurete.....	32
I.7.2.1 VICKERS micro.....	32

I.7.2.2 Dureté KNOOP.....	32
I.7.3 Essais spécifiques pour polymères et métaux mous.....	32
I.7.3.1 Dureté SHORE.....	33
I.7.3.2 Dureté BARCOL.....	33

Chapitre II : Traitements mécanique de surface

II. Traitements Mécaniques De Surface.....	34
II.1 Introduction.....	34
II .2 Principe de traitement de finition par pression.....	34
II.3 Différents type de Traitement Mécanique de Surface.....	35
II.3.1 Galetage.....	35
II.3.1.1 Différents types de galetage.....	36
II.3.2 Influence du galetage sur la rugosité.....	36
II.3.3 Avantages du galetage.....	37
II.4 Brunissage.....	37
II.4.1 Principe de brunissage.....	38
II.4.2 Le dispositif de brunissage.....	39
II.4.3 Action du brunissage.....	38
II.4.4 Le brunissage a pour but.....	40
II.4.5 Avantages du brunissage.....	40
II .4.6 Inconvénients du brunissage.....	40
II.5 Conclusion.....	41

Chapitre III :Matériaux et techniques expérimentales

III.1 Introduction.....	42
III.2 Matériau.....	42
III.3 Caractérisation des matériau.....	43
III.3.1 Mesure de la rugosité.....	43
III.3.2 Mesure de dureté shore.....	44

III.4 Essai de traction.....	44
III.4.1 Les éprouvettes.....	44
III.3.2 Mode opératoire.....	45
III.4 Calorimétrie différentiel à balayage pour polyéthylène.....	47
III.4.1 Équipement.....	48
III.4.2 Mode opératoire et mesure.....	48
III.5 Traitement par Brunissage.....	49
III.5.1 Mode opératoire.....	49
III.5.2 Régime de travail.....	50
III.5.3 Méthodologie des essais.....	50

Chapitre IV : Résultats expérimentaux

IV.1 Introduction.....	51
IV.2 Mesure de Rugosité de surface.....	51
IV.3 Plan D'expérience.....	54
IV.4 Modèle des plans factoriels.....	55
IV.5 Les réponses avec les facteurs codées.....	55
IV.6 Les réponses avec les unités légales.....	56

Conclusion générale.....	59
---------------------------------	-----------

Références bibliographiques.....	60
---	-----------

Introduction générale

Les polymères, leurs mélanges et leurs composites sont devenus des matériaux courants à usages multiple ou ordinaires est vraiment indispensables à la vie quotidienne de l'être humain. Parmi ces matériaux, les polymères thermoplastiques sont largement employés dans toutes les applications d'ingénierie telles que la mécanique, l'électronique, l'hydraulique et le génie civil.

Les applications types des polyéthylènes ayant une qualité moyenne et standard sont essentiellement pour les sacs plastiques, les tubes simples, les housses rétractables, les films industriels et les emballages. Par contre, les applications types des polyéthylènes de hautes performances, sont réservées au transport de produits corrosifs ou dangereux, les films de pellicules, les produits d'étanchéité, les emballages à basse température, les conduites de chauffage au sol et certains réservoirs de stockage. Les Polymères répondent à des spécifications toujours plus exigeantes en termes de performances techniques, de fiabilité, d'économie d'élaboration, de durabilité, d'impact environnemental et de capacité de recyclage. Le monde s'est engagé à trouver plus de solutions et d'améliorations de ses propriétés d'utilisation (dureté, fluidité, élasticité...).

Par ailleurs il est connu que la partie externe des matériaux est très sensible aux sollicitations créant ainsi une brèche qui permet d'amorcer les ruptures et les faire parvenir au cœur des pièces. La surface d'une pièce mécanique est aussi une zone de contact avec l'environnement hostile comme l'air, pour des problèmes d'oxydation. Elle est également la partie d'une pièce où se produisent les phénomènes d'usure, de frottement, de grippage et de matage. Combinant tous les facteurs défavorables, la surface d'une pièce mécanique est une zone particulièrement vulnérable, et la surface des polymères ne dérange pas à cette règle.

Le polyéthylène présente une striction qui ne conduit pas à la rupture Toutefois le col présenté sur les courbes de traction ne devient jamais instable, il s'allonge parce que en augmentant la contrainte, l'écroutissage est considérable et peut accommoder l'augmentation de la contrainte du à la réduction de la section dans le col. Cet étrange comportement est dû à l'alignement des chaînes polymériques dans le col et le long de sa direction. Pour cette raison les polymères étirés (i.e complètement strictionnés) peuvent être rendus très résistants beaucoup plus en fait que les polymères non étirés.

Ainsi, les techniques actuelles de fabrication des polymères feront appel de plus en plus à des procédés modernes de mise en forme tels que les traitements mécaniques de surface (TMS)

qui opèrent par une déformation plastique des couches superficielles et par conséquent génèrent un phénomène d'écroutissage.

C'est dans cet esprit que ce mémoire s'articule sur quatre chapitres principaux:

- Dans le premier chapitre nous avons présenté une recherche bibliographique sur les polymères en générale et le polyéthylène Haute Densité (PEHD) en particulier. La mise en œuvre, la caractérisation, les applications et les propriétés des polyéthylènes sont passées en revue. Il a été aussi question de rappeler les différentes généralités sur le comportement en traction, la calorimétrie à balayage différentiel (DSC), la dureté ainsi que rugosité.
- Dans le deuxième chapitre nous avons présenté quelques généralités sur les traitements mécaniques de la surface (TMS) notamment le principe et les différents type de Traitement.
- Dans le troisième chapitre nous avons présenté le Matériau étudié et les techniques de sa caractérisation telles que, les propriétés de traction, la dureté et la rugosité avant et après traitement du brunissage.
- Le quatrième chapitre regroupe tous les résultats expérimentaux relatifs aux caractéristiques de surfaces ainsi qu'un modèle de prédiction des réponses de sortie.
- Une conclusion générale et une liste de références bibliographiques ont clôturé ce mémoire.

I.1 Introduction

Depuis plusieurs décennies, les matériaux polymères ont vu leur utilisation croître dans divers domaines. Ils ont des propriétés mécaniques très attractives qui les ont rendus incontournables pour un nombre d'applications. Parmi les grandes familles des polymères, le polyéthylène (PE) est capable de répondre à des exigences techniques pointues et permet ainsi la fabrication de produits de haute technologie (tubes pour eau ou gaz résistant à de fortes pressions et à la fissuration, réservoirs d'essence pour automobile résistant à la chaleur et aux rayonnements...). L'utilisation des tubes en polyéthylène haute densité (HDPE) a augmenté considérablement dans différents secteurs. Les tubes en PE sous pression ont été utilisés avec succès depuis plus de 50 ans, principalement dans les systèmes d'alimentation des gaz et d'eau [1].

I.2 Les polymères

I.2.1 Historique des polymères

Le terme polymère est utilisé pour la première fois en 1832 par Jöns Jacob Berzelius. En 1835, le français Henri Victor Regnault prépare du chlorure de vinyle à partir du dichlore et d'éthylène.

Il observe que ce produit en ampoule scellée, se transforme progressivement en une poudre blanche, non cristalline, qu'il n'identifie pas encore comme étant du PVC.

En 1863, un imprimeur américain John Wesley Hyatt et son frère, sont attirés par un concours doté de 10 000 dollars dont le but est de trouver une substance pour remplacer l'ivoire dans la fabrication des boules de billard.

Après plusieurs années de tâtonnement, les frères Hyatt inventent le celluloïd en 1870, matière plastique issue d'un mélange à chaud de nitrocellulose et de camphre, plastifiant de la nitrocellulose [1].

En 1897, apparaît la corne artificielle ou galalithe, un mélange caséine - formol. Le premier polymère entièrement synthétisé date de 1907 ; il est réalisé par Hendrick Baekeland.

Cette résine urée-formol est baptisée bakélite. Elle bouleverse alors l'environnement domestique puisqu'on la rencontre dans la poignée de fer à repasser, les coques de téléphone. Puis apparaissent successivement en 1928, le plexiglas ou PMMA, une idée de l'allemand Otto Röhrner, en 1931 le PVC et le polystyrène (PS), en 1935 le polyéthylène (PE) et en 1937 le nylon.

Il faut attendre la fin de la seconde guerre mondiale pour que l'essor des matériaux polymères devienne considérable grâce aux travaux de Hermann Staudinger, le père de la chimie des macromolécules, de Carothers, puis de Ziegler et Natta.

Vers le milieu des années 1960, le PVC commence à remplacer le verre dans les emballages alimentaires. C'est également à cette époque que la pétrochimie prend la relève de la carbochimie dans la production des polymères.

En 1977, les professeurs Mac Diarmid, Heeger et Shirakawa découvrent qu'il est possible de moduler la conductivité électrique du polyacétylène moyennant l'introduction contrôlée de groupements donneurs ou accepteurs d'électrons, ce qui fait passer le polymère de l'état d'isolant à celui de conducteur [2]. Aujourd'hui les matériaux polymères se trouvent dans tous les domaines, où ils se substituent aux matériaux usuels des céramistes et des métallurgistes.

I.2.2 Définition d'un polymère

Le terme polymère (du grec polus qui signifie « nombreux, plusieurs » et mēros qui signifie « unité, partie ») ; qui sont typiquement regroupés toute matériaux formés par la répétition d'un très grand nombre n de petites molécules de faible masse moléculaire appelées monomères qui liés entre eux par des liaisons primaires (liaisons covalentes) sachent que le monomère est une molécule de base (pouvant être par exemple non saturée ou cyclique ou encore comportant des fonctions réactives à ses extrémités [3]).

L'assemblage des monomères pour l'obtention de polymères (ou macromolécules) s'appelle la polymérisation. La réaction de polymérisation est également utilisée par les organismes vivants. (Fig. I.01) [03].

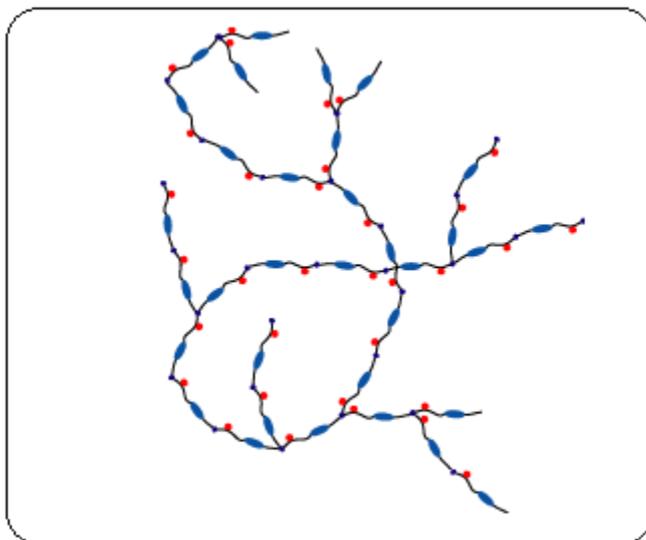


Figure I.2 : Représentation schématique d'un polymère thermoplastique [04, 08].

I.2.3.2 Les thermodurcissables

Un thermodurcissable est un produit (poudre à mouler solide ou résine liquide) transformé irréversiblement par polymérisation en un réseau tridimensionnel infusible et insoluble que l'on qualifie de thermodurci.

Il est souvent d'usage, dans l'industrie, d'employer abusivement le terme thermodurcissable pour désigner à la fois le système réactif initial, soluble et fusible et le produit final et infusible.

Le réactif initial peut être composé d'un monomère ou d'un mélange de monomères (résines aminoplastes et phénoplastes, silicone,...) ou plus fréquemment d'un mélange de polymère linéaire de faible masse molaire et de monomère (résine époxy, résines polyesters insaturés,...). [04, 08].

Dans tous les cas, la réticulation s'effectue sous l'action de la chaleur et / ou de catalyseurs. Ces polymères amorphes ont une température de transition vitreuse élevée (80 °C à + de 150 °C) mais, du fait de la réticulation, ne présentent pas d'état caoutchoutique ni d'état liquide.

La mise en œuvre des thermodurcissables est donc moins aisée que celle des thermoplastiques car il faut impérativement effectuer la mise en forme en même temps que la réaction chimique de réticulation. Cependant, les thermodurcissables présentent une résistance mécanique, chimique et thermique plus élevées que les thermoplastiques [05].

I.2.3.3 Les élastomères

Un élastomère est un polymère linéaire ou ramifiée transformé par vulcanisation en un réseau tridimensionnel faiblement réticulé infusible et insoluble.

Les élastomères se différencient des thermodurcissables par leur propriété d'élasticité caoutchoutique, c'est-à-dire la capacité à subir de très grandes déformations réversibles sous l'action de contrainte mécaniques.

Ils peuvent atteindre de très grandes allongements (jusqu'à 500 %) tout en étant capables de retrouver leur géométrie initiale en restituant au milieu l'énergie qui leur a été fournie lors de la déformation [06].

I.2.3.4 Les élastomères thermoplastiques

Un élastomère thermoplastique est un polymère linéaire ou ramifié présentant les propriétés d'élasticité caoutchoutique d'un élastomère et de facilité de mise en oeuvre d'un thermoplastique.

Les élastomères thermoplastiques sont le souvent des copolymères à blocs (ou des mélanges d'homopolymères et /ou copolymère) dont la structure à l'état solide résulte toujours de l'association d'au moins deux phases distinctes non miscibles :

- une phase souple (température de transition vitreuse comprise entre 90 °C et 40 °C) associée à une phase rigide (température de transition vitreuse ou température de fusion supérieure à 90 °C).

C'est donc un matériau multiphasé ou la phase rigide est dispersée dans la phase souple [07].

I.2.4 Propriétés des polymères

Les propriétés des matériaux polymères sont beaucoup plus sensibles que celles des métaux aux influences extérieures telles que la température, la dureté, l'intensité de la contrainte appliquée, les radiations UV et les agents chimiques.

Les caractéristiques de résistance peuvent différer seulement d'un ordre de grandeur. Hormis les paramètres spécifiques ou matériaux (masse molaire, taux de ramification, mobilité des chaînes, taux de réticulation,.....), et les conditions extérieures (humidité, agents

chimiques, température, vitesse de sollicitation, type et intensité des contraintes appliquées) [08].

➤ Propriétés physiques des polymères

Avant tout, rappelons qu'il existe une grande variété de matières plastiques, tout comme il existe un grand nombre d'alliages métalliques, une des caractéristiques physiques générales des polymères est : La masse volumique : La masse volumique des matières plastiques est peu élevée. La légèreté des polymères est sans aucun doute une des qualités qui a le plus largement contribué à leur diffusion.

En ce qui concerne le rapport (résistance à la traction / masse volumique), certains polymères sont en fait supérieurs bien à des matériaux métalliques.

La faible masse volumique des plastiques est due au faible poids atomique des principaux atomes de leurs chaînes (principalement l'hydrogène et le carbone) [09].

➤ Propriétés thermiques

• La température

La température de transition vitreuse "**T_g**" et la température de fusion "**T_f**" sont les deux températures fondamentales nécessaires dans l'étude des matériaux polymères.

La température de transition vitreuse est partiellement importante pour les polymères amorphes, notamment les thermoplastiques amorphes, pour lesquels, il n'existe aucune force de cohésion importante autre que l'enchevêtrement [10].

Les températures caractéristiques d'un seul et même matériau peuvent alors être classées de la façon suivante :

Température de transition vitreuse < Température de cristallisation < Température de fusion < Température de décomposition thermique [10].

Selon la température à laquelle il est soumis, un matériau polymère peut présenter des comportements mécaniques différents. Ceci peut se produire pour les thermoplastiques semi cristallins dans un domaine même étroit de la température [10].

I.2.5 Mise en forme des polymères

Véritable encyclopédie technique des matériaux polymères, cet ouvrage traite de tous les polymères technique (polymère fluorés, alliages, etc), élastomère, colles et adhésifs, polymères alvéolaires.

Après une partie générale sur les propriétés, les techniques de mise en forme et le recyclage, il fournit, pour chaque matériau, toutes les informations utiles à sa connaissance, d'application et son utilisation : propriétés d'usage, modes de mise en œuvre, domaines d'application et perspectives, données commerciales.

Cette troisième édition bénéficie de multiples actualisations et comporte un nouveau chapitre, sur les silicones.

Cet ouvrage est un outil de travail indispensable pour tous les ingénieurs (recherche, études, production, achats, etc.) amenés à travailler avec les matériaux polymères, quel que soit leur domaine d'activité [10].

I.2.6 Applications des polymères :

Les polymères constituent une des principales révolutions techniques du XXème siècle .ceux-ci sont utilisés pour un nombre extraordinaires d'applications à tous les échelons de la vie. (Voir Tableau I.01) [10].

Tableau I.01 : Les domaines d'application des polymères.

Domaines	Exemples
Le secteur de la construction	Les portes, conduites d'eau et l'assainissement, peinture des murs des plan chaires et des plafonds, revêtement du sol.
Industrie de l'emballage	Bouteilles, pots de yaourt, boîtes aux lettres, problème thermique, gainage films vidéo.
Médecine et santé	Poches de sang, gants, lentilles, verres de lunettes, les organes artificiels, Seringues, industrie dentaire, prothèses, outils de chirurgie
Articles ménagers	Tupperware, poubelles, seaux, vaisselle.
Matériel électrique et électronique et les communications	Tension d'isolement, isolation, laveuses, ordinateurs et les caméras, Radio et

	télévision, téléphone.
Industrie au Tocomplete	Système vitre claire, Tapie, carrosserie, optiques, planches de bord, habillage intérieur, Façades de téléviseurs, gainage de câbles.
Industrie textile	Vêtement, fibres textiles naturelles et synthétiques, sacs, ski, similicuir, non tissés.
Dans le domaine agricole	Colles, vernis, mousses
Sports-loisirs	Certaines parties des bâtiments, des avions et des bateaux, DVD, bandes magnétiques, Files de pêche et les cordons utilisés, piscines, coques de bateaux.
Industrie chimique	Tuyauterie, cuves, revêtements.
Le domaine alimentaire	Procédés de fabrication d'aliments, emballages (bouteilles, pots de yaourt, briques de lait, boites à oeufs) ou industriel (flacons de détergent, sachets et sacs, casiers)...
Le matériel de maison	Meuble, vaisselle, accessoires... ; Utilisés en industrie pour maintenir le matériel d'une violente collision.

II.3 Polyéthylène (PE)

II.3.1 Définition

Le polyéthylène, ou polythène (sigle générique PE), est un des polymères les plus simples et les moins chers [11]. C'est un matériau semi cristallin obtenu par la polymérisation de l'éthylène. C'est le plus important polymère de synthèse, devant le polypropylène (PP), le polychlorure de vinyle (PVC) et le polystyrène (PS).

Sa production mondiale était d'une quarantaine de millions de tonnes en 2010 [11].

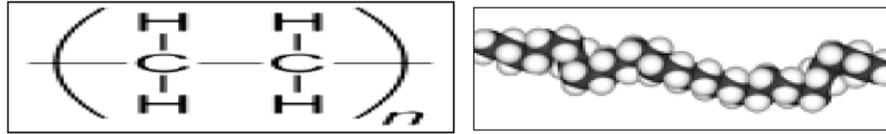


Figure I.3 : Schéma représentatif du polyéthylène [11].

La polymérisation du polyéthylène est représentée dans la figure suivante

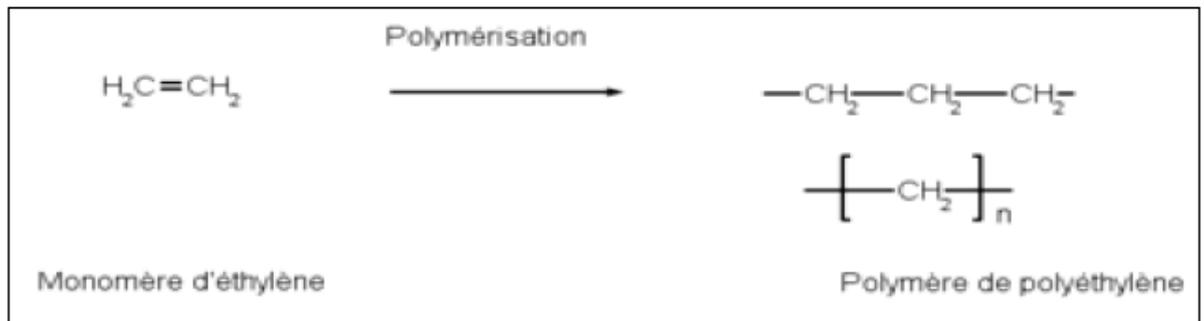


Figure I.4 : La polymérisation du polyéthylène [11].

I.3.2 Les différents types de polyéthylène

Il existe différents types de polyéthylène. Les polyéthylènes sont classés en fonction de leur densité qui dépend du nombre et de la longueur des ramifications présentes sur les chaînes moléculaires.

PE-BD, polyéthylène basse densité (en anglais LDPE, low-density polyethylene)

- PE-BDL, polyéthylène à basse densité linéaire (en anglais LLDPE, linear lowdensity polyethylene)
- PE-HD, polyéthylène haute densité (en anglais HDPE, high-density polyethylene)

- PE-UHPM, polyéthylène à masse molaire élevée (en anglais UHMWPE, ultrahigh-molecular-weight polyethylene)
- PE-R, polyéthylène réticulé (en anglais PEX, cross-linked polyethylene)
- PE-RHD, polyéthylène réticulé à haute densité (en anglais HDXLPE, high density cross-linked polyethylene)
- PE-MD, polyéthylène à moyenne densité (en anglais MDPE, medium density polyethylene)
- PE-TBD, polyéthylène à très basse densité (en anglais VLDPE, very low density polyethylene) [12].

I.3.3 Le polyéthylène haute densité (PEHD)

I.3.3.1 Présentation

Le polyéthylène haute densité (PEHD) a été synthétisé en 1953 par le chimiste allemand Karl Ziegler.

I.3.4 Propriétés des polyéthylènes haute densité :

Les propriétés des polyéthylènes dépendent essentiellement de trois paramètres structuraux à savoir : **la cristallinité, la masse moléculaire et la distribution des masses moléculaires** [13].

I.3.4.1 Propriétés rhéologiques :

Le PEHD à l'état fondu présente un comportement viscoélastique non linéaire, cela signifie que sa viscosité diminue avec l'augmentation du cisaillement.

Lors de l'extrusion, le polyéthylène est soumis à un gradient de vitesse de cisaillement, du cylindre de l'extrudeuse à la filière.

Il est donc important de connaître la courbe de viscosité-vitesse de cisaillement sur l'étendue de la plage de cisaillement.

La mesure de l'indice de fluidité à chaud (IF) permet d'estimer la viscosité à une vitesse de cisaillement donnée [13].

I.3.4.2 Propriétés mécaniques :

La rigidité et la dureté du PEHD augmentent avec la densité, et donc avec la cristallinité.

La rigidité est mesurée au moyen de module d'élasticité qui varie d'environ 1600 MPa (dans le cas du PEHD) alors que la dureté (Shore D) varie d'environ 60.

Le PE est un thermoplastique résistant au choc et à l'impact, même à des basses températures ($T < 0^{\circ}\text{C}$), due à sa faible température de transition vitreuse « T_g » (jusqu'à -110°C).

Cette résistance est d'autant meilleure que :

- La masse molaire est plus élevée.
- La cristallinité est plus faible.
- La distribution des masses moléculaires est plus large.

Le touché paraffinique du PE lui assure un faible coefficient de friction.

Sa résistance à l'abrasion augmente avec la masse moléculaire et la cristallinité. Elle est remarquable pour les PEHD de masse moléculaire très élevée [13].

I.3.4.3 Propriétés thermiques

Le point de fusion du PEHD se situe entre 120 et 136°C .

La conductivité thermique et le coefficient de dilatation thermique linéaire sont fonction du taux de cristallinité, ils sont plus élevés pour les homopolymères que les copolymères [13].

I.3.4.4 Propriétés chimiques

Propriétés chimiques du PE vis-à-vis des agents chimiques sont déterminées par leur structure paraffinique apolaire, par son caractère cristallin et sa très haute masse moléculaire.

Il résiste bien aux acides forts (les acides inorganiques) et les bases fortes (les solutions salines), mais il est attaqué par les acides oxydants (les acides nitriques concentrés).

Il se gonfle dans les hydrocarbures aliphatiques et aromatiques et dans leurs dérivés halogénés, dans lesquels il se dissout à température élevée, ce qui explique sa grande perméabilité aux vapeurs de ces produits.

Il est également peu perméable à la vapeur d'eau, à cause de son caractère hydrophobe (l'absorption d'eau est d'environ 0.01% et 0.5 % pour le PE contenant du noir de carbone) [14].

I.3.4.5 Propriétés électriques:

Le PE présente d'excellentes propriétés d'isolation électrique quelles que soient sa masse moléculaire et sa cristallinité. Sa faible permittivité relative et son faible facteur de dissipation diélectrique font de lui un matériau de choix en isolation électrique [14].

Tableau I.2 : Caractéristiques du PEHD [15]

Masse volumique	930 Kg /m ³
Masse molaire moyenne Mw	310000 (g/mole)
Taux dz cristallinité Xc	74 %
Température de fusion Tf	203 °C
Indice de fluidité	0.2- 1 ; 4g/10 (min)
Noire de carbone	2- 2,5 %

Tableau I .3 : Avantages et Inconvénients du PEHD [16]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Mise en œuvre aisée. • Excellentes propriétés d'isolation électrique. • Résistance aux chocs. • Grande inertie chimique. • Qualité alimentaire 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensibilité aux UV en présence d'oxygène. • Sensibilité à la fissure sous contrainte. • Mauvaise tenue à la chaleur. • Collage important

I.4 Principe de la DSC

La calorimétrie à balayage différentiel est une technique utilisée pour étudier ce qui arrive aux polymères lorsqu'ils sont chauffés. Cette technique sert à étudier les transitions thermiques d'un polymère.

Les transitions thermiques sont les changements qui interviennent dans un polymère quand vous le chauffez. La fonte d'un polymère cristallin ou la transition vitreuse en sont des exemples.

Ainsi comment peut-on étudier ce qui arrive à un polymère lorsqu'on le chauffe? La première étape consiste à le chauffer, évidemment. C'est ce que l'on fait dans la Calorimétrie à Balayage Différentiel, DSC pour les intimes. Le polymère est chauffé dans un dispositif qui ressemble à cela:

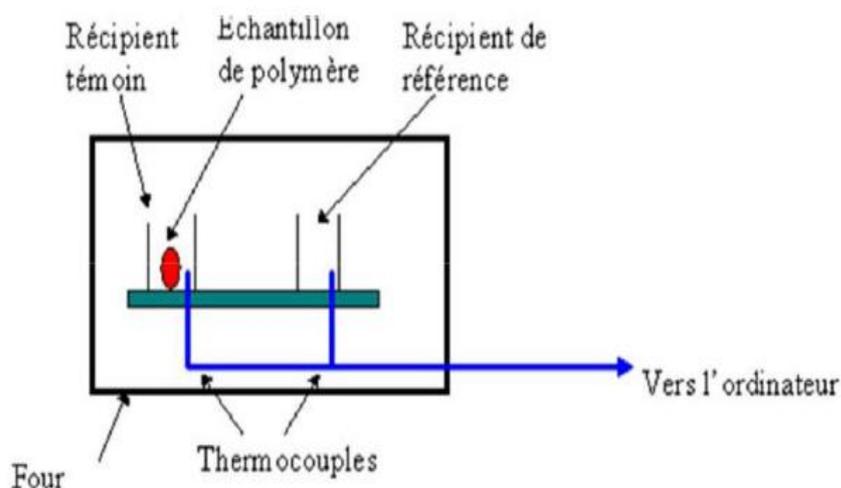


Figure I.5 : Principe de DSC

Il y a deux récipients. Dans l'un des deux, le récipient témoin, vous mettez votre échantillon de polymère. L'autre, que vous laissez vide, est le récipient de référence.

Les deux récipients se trouvent dans un four qui chauffe habituellement à quelque chose comme $10^{\circ}\text{C}/\text{minute}$. Chaque récipient contient un thermocouple relié à un ordinateur.

L'ordinateur fait la différence entre la température de l'échantillon et celle de référence, et les convertit en flux de chaleur. Pourquoi les deux récipients n'auraient-ils pas la même température? C'est simple : ils sont différents! L'un contient le polymère et l'autre pas...

L'échantillon de polymère représente de la matière supplémentaire dans le récipient témoin par rapport au récipient de référence. La présence de cette matière supplémentaire et son « inertie thermique » (plus y'a de matière, plus il faut de temps pour que tout soit chaud!) font que le récipient témoin ne sera pas à la même température que le récipient de référence.

Mesurer la quantité de chaleur supplémentaire à fournir au récipient témoin est ce que nous mesurons lors d'une manipulation DSC. Dans les grandes lignes, voici ce que nous faisons lors d'une manipulation DSC : Sur l'axe des abscisses nous traçons la température (du four). Sur l'axe des ordonnées nous traçons la différence de chaleur entre les deux récipients, témoin et référence [17].

I.4.1 Explication de la courbe de DSC obtenue

I.4.1.1 La capacité de chaleur

Nous pouvons apprendre beaucoup de cette courbe. Imaginons que nous voulions chauffer un polymère. Quand nous commencerons à chauffer nos deux récipients, l'ordinateur tracera la différence entre les chaleurs des deux récipients en fonction de la température. C'est-à-dire, nous tracerons la chaleur absorbée par le polymère en fonction de la température.

La courbe ressemblera à ceci :

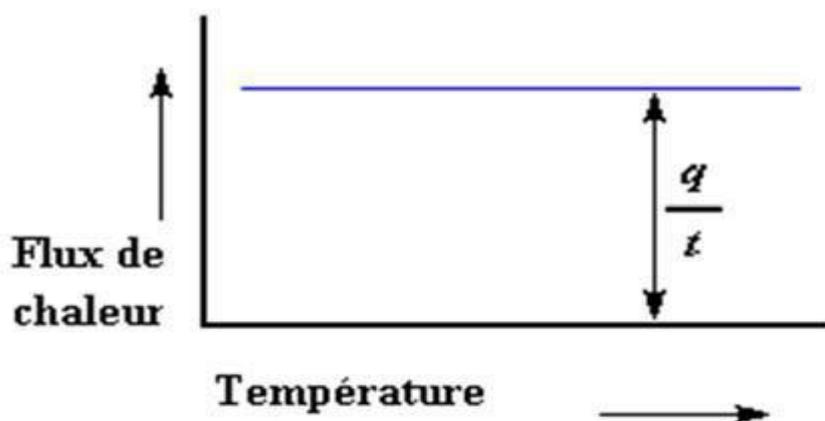


Figure I.6 : Capacité de chaleur

Le flux de chaleur à une température donnée est plein de renseignements. Il va être donné en unités de chaleur q par unité de temps t . La vitesse de chauffage est l'augmentation T de la température par unité de temps t .

Divisons

$$\frac{\text{Chaleur}}{\text{Temps}} = \frac{q}{t} = \text{FluxDeChaleur}$$

$$\frac{\text{AugmentationDeLaTempérature}}{\text{Temps}} = \frac{\Delta T}{t} = \text{VitesseDeChauffage}$$

Divisons maintenant le flux de chaleur q/t par la cadence de chauffage T/t .

Nous obtenons la chaleur supplémentaire fournie, divisée par l'augmentation de la température.

$$\frac{\frac{q}{t}}{\frac{\Delta T}{t}} = \frac{q}{\Delta T} = C_p = \text{CapacitéDeChaleur}$$

La transition vitreuse : quand vous donnez une certaine quantité de chaleur à un élément, sa température montera d'une certaine quantité, et cette quantité de chaleur qu'utilise l'élément pour obtenir une telle augmentation de température s'appelle la *capacité de chaleur*, ou le C_p .

Nous obtenons la capacité de chaleur en divisant la chaleur fournie par l'augmentation résultante de température. Et c'est tout simplement ce que nous avons fait dans l'équation présentée plus haut. Nous avons trouvé la capacité de chaleur à partir de la courbe de DSC [17].

I.4.1.2 La température de transition vitreuse

La DSC peut nous en apprendre beaucoup plus sur un polymère que sa capacité de chaleur.

Regardons ce qui se produit lorsque nous chauffons le polymère un petit peu plus.... Après une certaine température, notre tracé se décalera soudainement vers le bas, comme ceci:

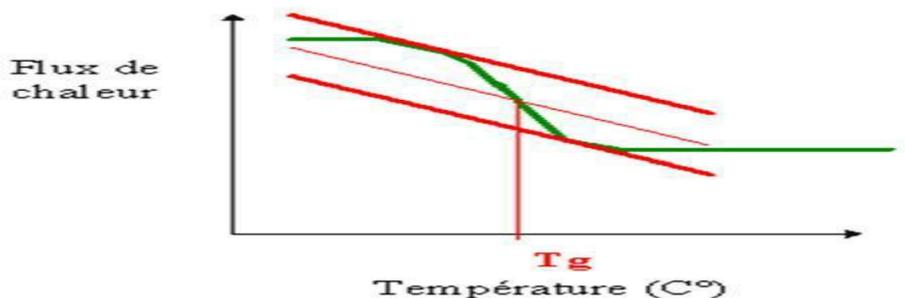


Figure I.7 : Température de transition vitreuse

Cela signifie que le flux de chaleur augmente, et que la capacité de chaleur de notre polymère augmente.

Ceci se produit parce que le polymère vient juste de passer par la phase de transition vitreuse. Et comme vous le savez, les polymères ont une capacité de chaleur plus élevée au-dessus de la température de transition vitreuse.

Grâce à ce changement de capacité de chaleur ayant lieu à la transition vitreuse, nous pouvons utiliser la DSC pour mesurer la température de transition vitreuse d'un polymère.

Vous aurez remarqué que le changement ne se produit pas instantanément, mais a lieu sur une plage de températures. Cela rend la détermination exacte de Tg plutôt difficile, mais nous utilisons la méthode bien connue des tangentes pour déterminer Tg, (voir le dessin).

I.4.1.3 La Cristallisation

Au-dessus de la transition vitreuse, les polymères sont très mobiles. Ils s'agitent et se tortillent, ne restent jamais en position très longtemps. Ils sont comme des passagers essayant de s'installer confortablement dans un siège d'avion...

Quand les polymères atteignent la bonne température, ils ont gagné assez d'énergie pour entrer dans des arrangements très ordonnés que nous appelons des cristaux.

Quand les polymères se transforment en ces arrangements cristallins, ils expulsent de la chaleur, que le thermocouple du récipient témoin peut mesurer.

Cette augmentation du flux de chaleur se voit très bien sur la courbe du flux de chaleur en fonction de la température [17].

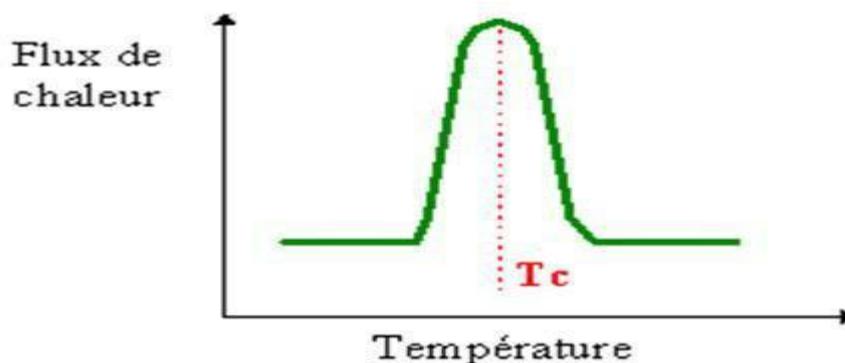


Figure I.8: Température de cristallinité

La température au point le plus haut est appelée Température de cristallisation du polymère :

T_c .

Il est également possible de mesurer l'aire du " pic ", qui est la valeur de la chaleur latente de cristallisation du polymère.

Mais n'oublions pas le plus important, cette hausse nous indique que le polymère peut cristalliser. Si vous analysiez un polymère 100% amorphe, comme le polystyrène atactique, vous n'obtiendriez pas de hausse sur la courbe, parce que de tels matériaux ne cristallisent pas.

En outre, parce que le polymère dégage la chaleur quand il se cristallise, nous appelons la cristallisation une transition exothermique [17].

I.3.1.4 La fusion

La chaleur peut permettre à des cristaux de se former dans un polymère, mais trop de chaleur peut conduire à leur démantèlement. Si nous continuons à chauffer notre polymère après son point de cristallisation T_c , nous atteindrons peut être une autre transition thermique appelée fusion.

Quand nous atteignons la température de fusion du polymère T_f , ces cristaux de polymère commencent à s'écrouler, c'est qu'ils fusionnent. Les chaînes de molécules sortent de leurs arrangements ordonnés, et commencent à bouger librement. Et au cas où vous vous posiez la question, il est possible de le voir sur une courbe DSC.

Vous souvenez vous de cette chaleur que le polymère a dégageé quand il s'est cristallisé? Et bien, quand on atteint la température T_f , il est grand temps de reprendre ce qui a été donné. Il existe une chaleur latente de fusion aussi bien qu'une chaleur latente de cristallisation.

Quand les cristaux de polymère fondent, ils ont besoin d'absorber de la chaleur.

Gardez en mémoire que la fusion est une transformation du premier ordre. Cela signifie que lorsque l'on atteint la température de fusion, la température du polymère ne s'élèvera pas tant que tous les cristaux n'auront pas fondus.

Cette absorption de chaleur pendant la fusion (baisse de température au niveau du thermocouple du récipient témoin) apparaît sous la forme d'un grand creux sur notre courbe de DSC.

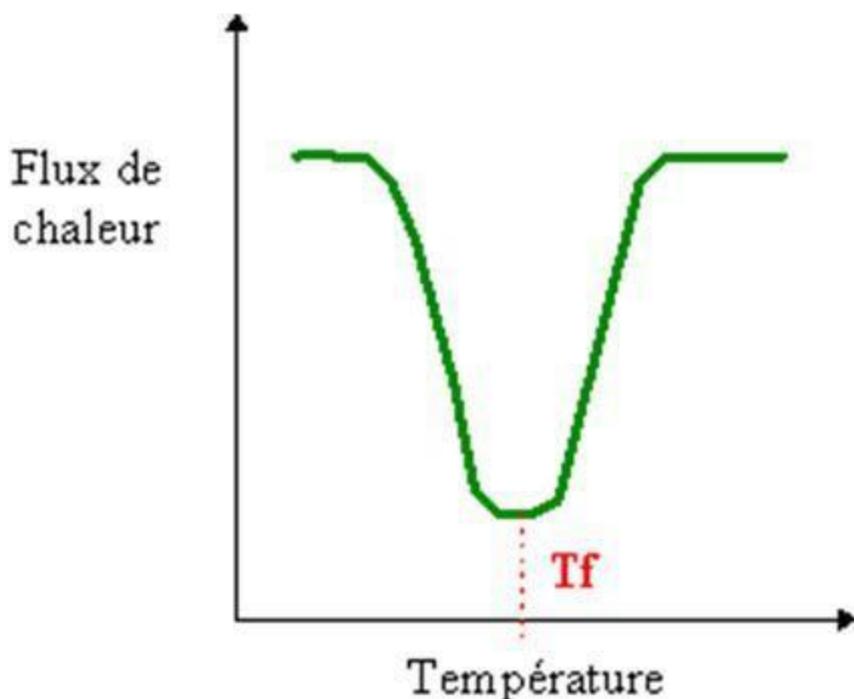


Figure I.9:Température de fusion

Ainsi, nous pouvons mesurer la chaleur latente de fusion en mesurant l'aire de cette crête.

La température la plus basse du creux est appelée température de fonte du polymère, Tf. Puisque nous devons donner de l'énergie au polymère pour le faire fondre, la fusion est une transition endothermique.

I.4.2 Synthés

Nous avons vu une étape sur la courbe lorsque le polymère est passé par la température de transition vitreuse. Puis, nous avons vu un grand pic lorsque le polymère a atteint sa température de cristallisation. Et finalement, le grand creux de fusion.

Une courbe de DSC ressemble donc généralement à cela (ici, celle du P.E.T)

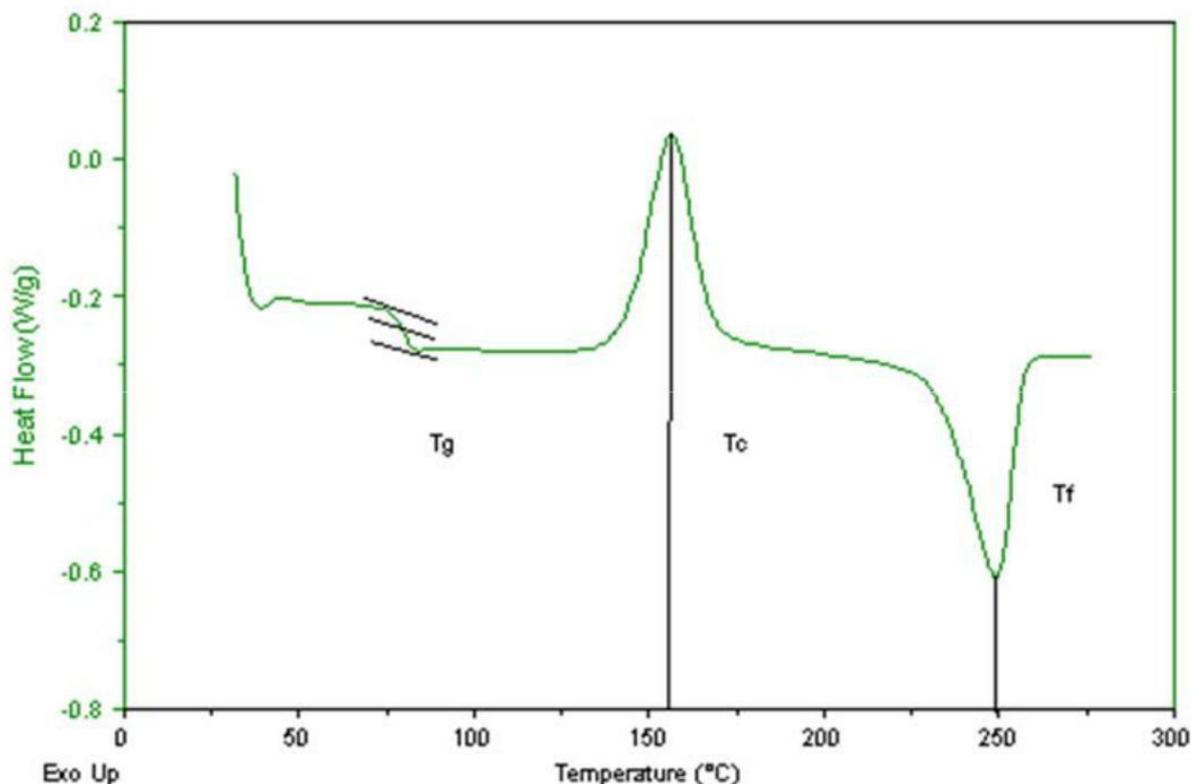


Figure I.10: Courbe DSC

Bien sûr, les courbes de DSC ne comportent pas toutes ces 3 étapes.

Le pic de cristallisation et le creux de fusion apparaîtront seulement pour les polymères qui peuvent former des cristaux. Les polymères complètement amorphes ne montreront ni cristallisation ni fusion. Mais les polymères à la fois cristallins et amorphes passeront par les trois étapes décrites plus haut.

Si vous regardez la courbe de DSC, vous constatez une grande différence entre la transition vitreuse et les deux autres transformations, cristallisation et fusion thermique. Pour la transition vitreuse, il n'y a ni crête ni creux. C'est parce qu'il n'y a aucune chaleur latente dégagée, ou absorbée par le polymère.

La seule chose que nous voyons à la température de transition vitreuse est un changement de la capacité de chaleur du polymère. Puisqu'il y a changement de celle-ci, mais qu'il n'y a aucune chaleur latente impliquée, la transition vitreuse est appelée transformation du second ordre.

Les transitions comme la fusion et la cristallisation, qui ont des chaleurs latentes, sont des transformations du premier ordre [17].

I.5 Etats de surface

1.5.1 La surface

En tribologie, la surface ne définit pas uniquement la zone de séparation des corps, mais concerne toutes les caractéristiques du contact qui jouent un rôle sur le frottement, c'est-à-dire sur les contraintes mécaniques, les températures, le comportement du troisième corps (lubrifiant, débris d'usure...).

Par conséquent, on admettra que les paramètres définissant la surface correspondent à l'ensemble des propriétés mécaniques, physiques et chimiques des matériaux en présence, ainsi qu'aux caractéristiques géométriques du contact incluant, par extension, la forme des pièces [18], [19].

1.5.2 Topographie

I.5.2.1 Définition

Ce terme générique regroupe l'ensemble des facteurs caractérisant les irrégularités géométriques d'une surface, qui vont du domaine microscopique défini plus généralement par la rugosité, au domaine macroscopique correspondant à la géométrie de contact.

Les irrégularités d'une surface peuvent être classées en trois niveaux (**figure1.3**). Sont donc concernés tous les effets qui résultent de la mise en œuvre et du parachèvement d'une pièce mécanique (opérations de mise en forme, de mise à la côte, traitements thermiques, traitements de surfaces), et en particulier :

- la génération de sillons, aspérités, cavités, porosités...
- la génération de défauts de forme (linéarité, circularité...) [20].

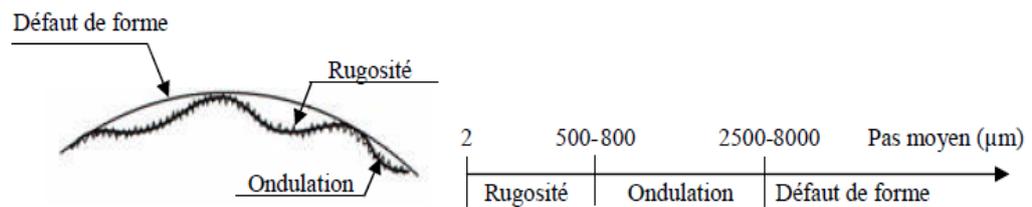


Figure 1.11 : Classement des irrégularités de surface

I.5.3 Paramètres de rugosité

Les paramètres d'état de surface les plus couramment utilisés sont récapitulés dans la figure 1.5

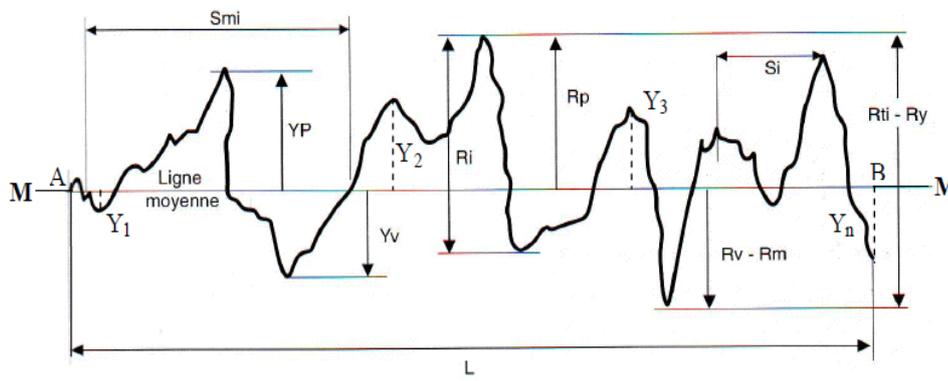


Figure 1.12: Paramètres de rugosité

- MM: Ligne moyenne indiquant la direction générale du profil
- L : Longueur de base servant de mesure et de calcul les paramètres de rugosité
- YP : Hauteur d'un pic par rapport à MM
- YV : Profondeur d'un creux par rapport à «MM»
- Rp, Rv (ou Rm) : Hauteur, Profondeur maxi des pics et creux, par rapport à « MM»
- RT : Rti (ou Ry) Ecart max sur la longueur d'évaluation, ($R_y = R_p + R_m$)
- Rtm: Moyenne des Rti sur la longueur totale d'évaluation
- Ri : Profondeur élémentaire de la rugosité
- R : Profondeur moyenne de la rugosité (moyenne Ri sur la longueur d'évaluation)

- R_{max} : Profondeur maximum de la rugosité
- R_z : Hauteur des irrégularités sur 10 points (moyenne des valeurs absolues des $5Y_p$ et $5Y_v$ les plus grands, sur 5 segments d'évaluation consécutifs.
- **R_a** : Moyenne arithmétique des écarts de profil par rapport à la ligne moyenne, représente la valeur moyenne des distances des pointes successives.
 - S_i : Pas de saillies locales du profil
 - S_{mi} : Pas des irrégularités du profil (moyenne des S_{mi} sur la longueur de base) [20].

I.6 Essai de traction

I.6.1 Introduction

Parmi tous les essais mécaniques, l'essai de traction est certainement l'essai le plus fondamental.

Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques telles que le module d'élasticité, le coefficient de Poisson, la limite d'élasticité, la résistance à la rupture, l'allongement après rupture et le coefficient de striction.

Son exécution est facile et les résultats obtenus servent à dimensionner toutes sortes des pièces allant d'un pignon microscopique jusqu'à la structure métallique d'un grand hall.

Dans la recherche on l'applique pour la caractérisation de nouveaux matériaux et dans l'industrie pour les contrôles périodiques servant à surveiller la qualité des alliages, des polymères et des céramiques [21].

I.6.2 Définition

L'essai consiste à partir d'une machine appropriée, à tirer avec un effort progressif sur les deux têtes d'une éprouvette de forme normalisée. L'essai le plus fréquemment utilisé afin de déterminer le comportement mécanique d'un matériau est l'essai de traction. Cet essai est

Caractérisé par sa facilité de mise en œuvre et par la richesse des informations fournies.

I.6.3 Principe d'essai

On exerce une force de traction sur un barreau de dimension standardisée, jusqu'à sa rupture, en suivant un processus de mise en charge à une vitesse de déformation constante.

L'éprouvette d'essai est prélevée dans le matériau à caractériser et usinée à des dimensions normalisées, afin d'assurer une meilleure comparaison des essais effectués dans différents laboratoires.

Pour chaque type de matériau, il existe un type d'éprouvette [22].

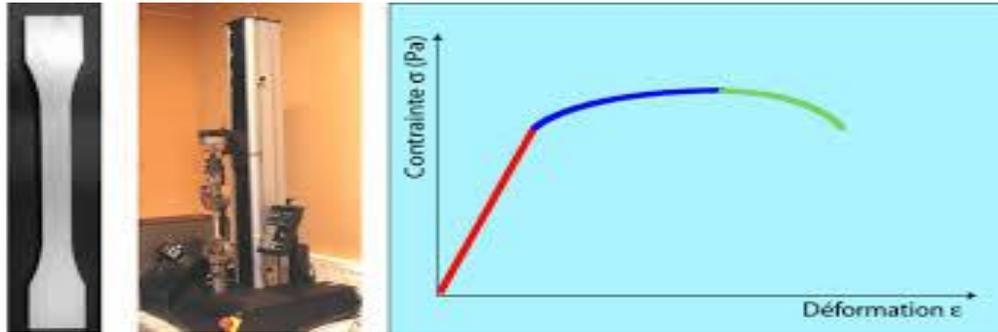


Figure I.13 : Diagramme contrainte-déformations

En enregistrant la force appliquée à l'éprouvette par la machine de traction et son allongement progressif on obtient un diagramme contrainte-déformation.

I.6.4 La machine de traction

Utilisation d'une machine électromécanique à enregistrement électronique :

- Le déplacement de la traverse se déroule à vitesse constante (2mm /mn dans notre cas)
- La force appliquée est mesurée à l'aide d'un capteur à jauges extensométriques
- L'allongement de l'éprouvette est mesuré par un extensomètre à jauges

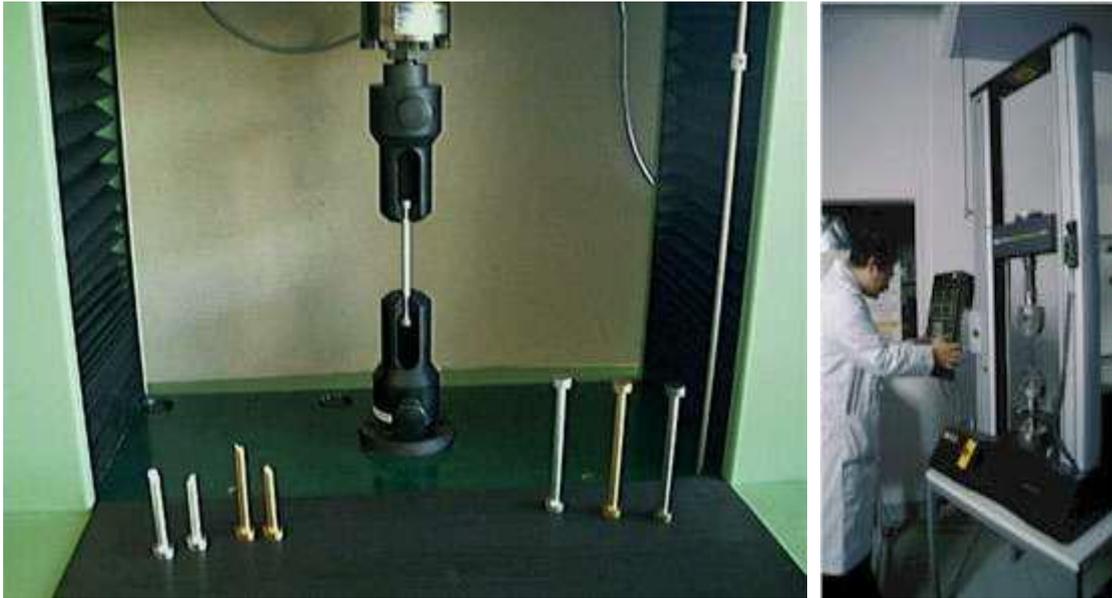


Figure I.14 : La machine de traction

I.6.6 Les éprouvettes

Les éprouvettes de traction sont normalisées ($\varnothing \geq 4\text{mm}$ ou $e \geq 3\text{mm} \dots$).

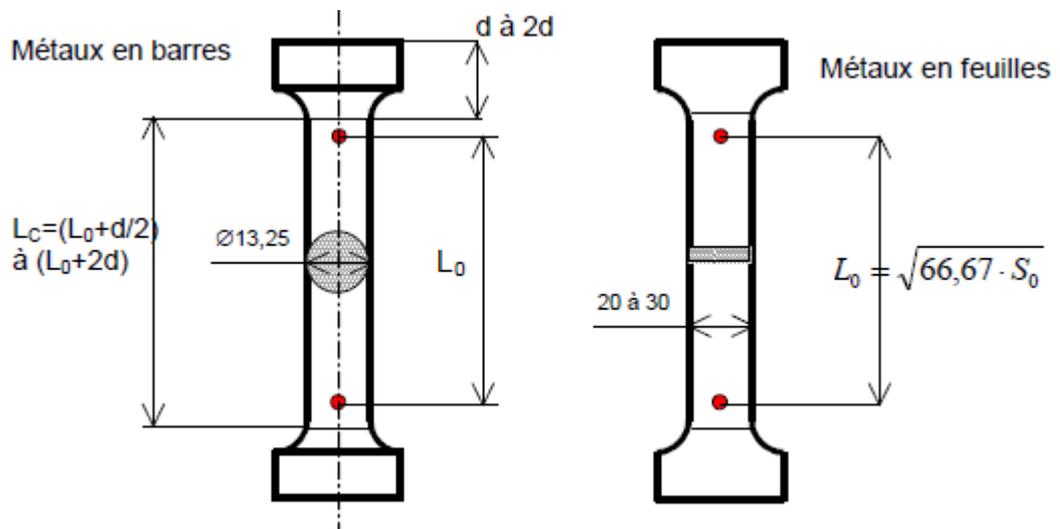


Figure I.15 : Sur une éprouvette de traction la longueur initiale entre repères L_0 est normalisée [23]

On note : S_0 : section initiale en mm^2 S_u : section minimale après rupture

L_0 : longueur initiale entre repères L_u : Longueur ultime après rupture

L_c : longueur de la partie calibrée

I.6.7 Courbe de traction

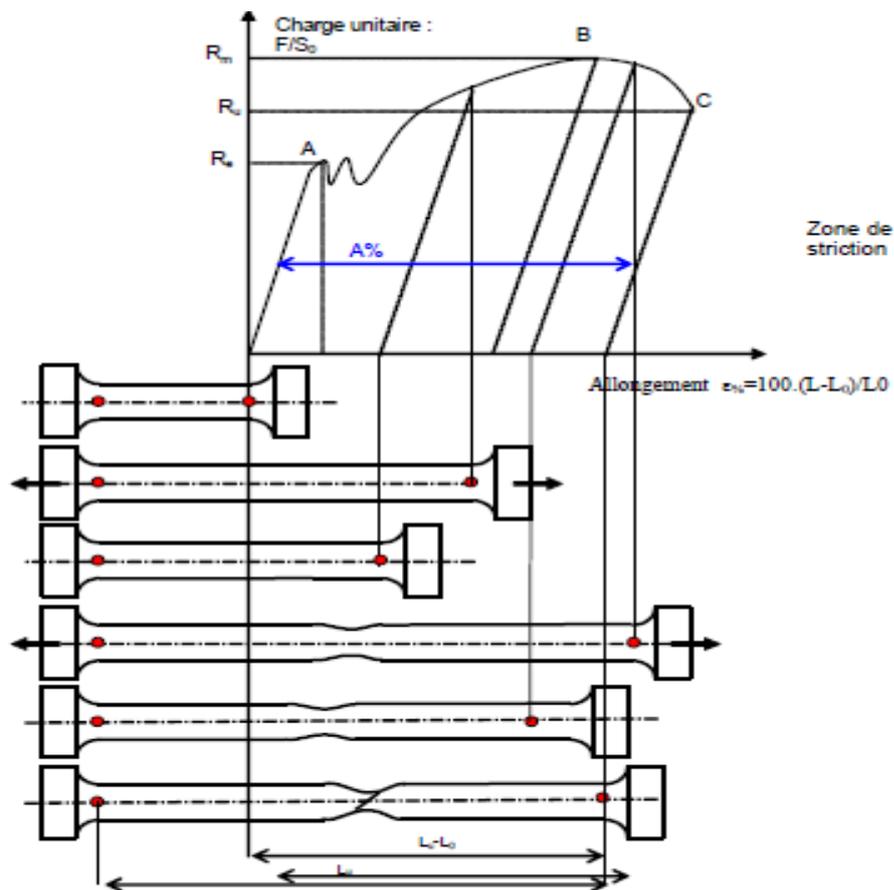


Figure 5

Figure I.16 : Courbe de traction

- ❖ **Zone OA** : domaine des **déformations élastiques ou réversibles** (zone parfois linéaire) si l'on cesse la charge, l'éprouvette retrouve ses dimensions initiales
- ❖ **Zone AB** : la déformation n'est plus complètement réversible. La **déformation** est **plastique (ou permanente)** homogène ; appelée aussi déformation plastique répartie. Les allongements croissent plus vite que les charges. L'allongement a lieu avec une diminution régulière de la section tout au long de l'éprouvette.
- ❖ **Zone BC**: la **déformation plastique se localise** dans une petite portion de l'éprouvette et n'est plus homogène, c'est la **striction** on aboutit à la rupture en C. les allongements croissent avec une diminution de la charge [24].

I.6.8. Caractéristique nominales ou apparentes

a) Limite d'élasticité

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}$$

R_e limite élastique en MPa

F_e charge maxi élastique en N

S_0 Section initiale en mm^2

b) Résistance à la traction :

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}$$

R_m résistance à la rupture en MPa

F_m charge à la rupture en N

S_0 section initiale en mm^2

c) Allongement à la rupture :

$$A\% = 100 \cdot \frac{L - L_0}{L_0}$$

L longueur ultime après rupture

L_0 longueur initiale en mm

d) striction à la rupture :

$$Z\% = 100 \cdot \frac{S_0 - S_f}{S_0}$$

S_0 section initiale en mm^2

S_f section finale après rupture en mm^2

e) Module de Young : représenté par la pente de la courbe dans sa partie linéaire :

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$$

f) Coefficient de poisson

$$\nu = \frac{(d_0 - d) / d_0}{(L - L_0) / L_0}$$

où d_0 et d sont respectivement le diamètre initial et le diamètre sous charge, L_0 et L la longueur initiale et la longueur et la longueur sous charge. N est défini dans le domaine élastique [28].

I.7 ESSAIS DE DURETE

La dureté peut être définie comme une mesure de la résistance à la déformation plastique localisée.

Les méthodes de mesure de la dureté sont basées sur la pénétration forcée d'un indenter à la surface d'un matériau.

Une valeur de dureté est déterminée par la mesure de la dimension ou de la profondeur de l'empreinte faite par l'indenter soumis à des charges et des vitesses d'application contrôlées.

I.7.1 ESSAIS DE DURETE QUANTITATIFS

Les essais consistent à enfoncer un pénétrateur (indenter) dans le matériau. La charge est constante pendant un temps donné et on mesure la dimension de l'empreinte.

L'empreinte est d'autant plus grande que le métal est mou.

La dureté H (Harkness) s'exprime par le rapport de la force sur la surface de l'empreinte.

La dureté est un test empirique et ne correspond pas à une propriété du matériau.

Mais ce test de dureté permet de caractériser les matériaux et de déterminer s'ils sont adaptés à leur utilisation clinique.

I.7.1.1 Essai BRINELL

Johan August BRINELL (1849–1925), ingénieur métallurgiste suédois, travaillait sur la transformation des aciers en fonction de la température. Il avait besoin d'un test rapide non destructif pour déterminer la dureté des différents aciers testés.

Il met au point son test de dureté BRINELL basé sur un indenter bille, pour alliages métalliques peu durs.

L'essai consiste à imprimer dans la pièce une bille en acier ou en carbure de tungstène de diamètre D sous une charge F et à mesurer le diamètre d de l'empreinte.

Dureté Brinell HB = $F / \pi 2D \cdot [D - \sqrt{D^2 - d^2}]$ (surface d'une calotte sphérique)

F = charge d'essai (fonction du matériau) de 500 a 3000 daN

D = diamètre de la bille (5 ou 10 mm)

D = diamètre de l'empreinte en mm

La charge est appliquée progressivement pendant 15 secondes et maintenue a sa valeur finale pendant 15 secondes.

L'essai BRINELL est très peu utilise en Odontologie. Pourquoi ?

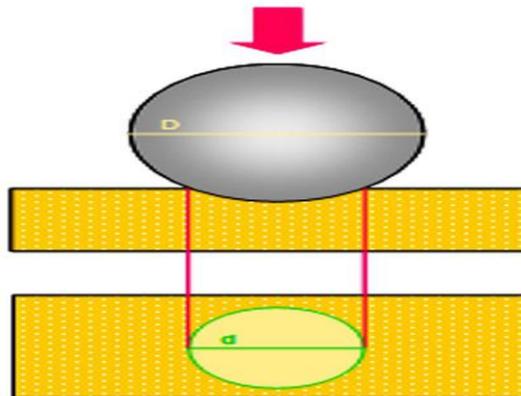


Figure I.17 : Principe de l'essai de dureté BRINELL

I.7.1.2 Essai VICKERS

SMITH et SANDLAND, ingénieurs chez VICKERS Ltd GB ont besoin de tester des matériaux trop durs pour le test BRINELL. En 1925, ils conçoivent une pyramide diamant.

Cette pyramide de diamant a base carrée a un angle au sommet de 136°.

Après l'indentation, on mesure la moyenne des diagonales d1 et d2 de l'empreinte en microscopie optique.

Dureté Vickers HV = 1,854 F/d²

F = charge d'essai (de 1 a 120 daN)

D = diagonale (moyenne de d1 et d2) de l'empreinte en mm

L'essai VICKERS est adapte pour les alliages durs et les céramiques.

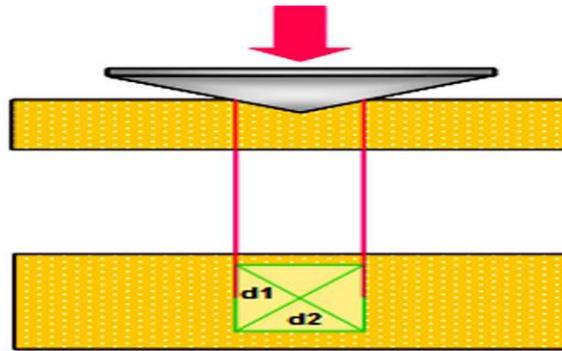


Figure I.18 : Principe de l'essai de dureté VICKERS

I.7.1.3 Essais ROCKWELL

Stanley ROCKWELL travaille comme métallurgiste dans une usine de roulements à billes. Il vérifie les traitements thermiques par des tests de dureté.

L'essai BRINNEL donne une indentation trop grosse. L'essai VICKERS est trop long. En 1922, ROCKWELL conçoit un nouveau système avec différents pénétrateurs, adapté aux métaux et aux plastiques avec une large gamme de matériaux testés.

Pénétrateur :

-soit bille en acier de diamètre 1,59 mm = Rockwell b pour les matériaux mous comme les alliages de cuivre

-soit cône en diamant d'angle au sommet 120° et dont l'extrémité est une calotte sphérique de rayon 0,1mm = Rockwell c, pour les matériaux plus durs comme l'acier.

Recharge F_0 faible de 10 daN = niveau de référence

Surcharge F_1 de 60 à 150 daN

Charge $F_2 = F_0$ à nouveau de 10 daN

On mesure la profondeur de l'empreinte = différence des 2 positions ($F_2 - F_1$)

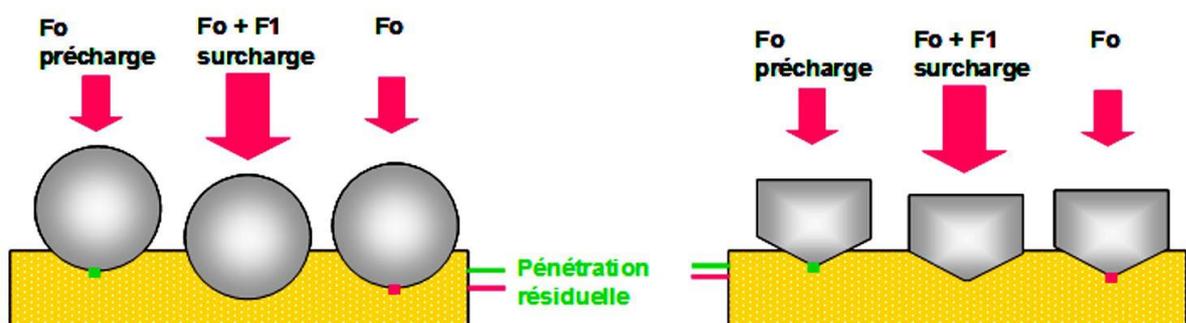


Figure I.19: Principe de l'essai de dureté ROCKWELL b et ROCKWELL C

En fonction du type d'indenter et de la valeur de la charge appliquée on détermine différents types de duretés ROCKWELL (échelle de A à H, de K a M, P, R, S, V) adaptées aux différents types de matériaux. Quand les pièces sont de faibles épaisseur ou diamètre, comme en Odontologie, les duretés Vickers et Rockwell donnent de trop grandes empreintes et on leur préfère les essais de microdureté.

I.7.2 Essais de micro dureté

I.7.2.1 VICKERS micro

Essais sous très faibles charges inférieures à 0,2 daN avec une pyramide diamant Vickers. La mesure de la dimension se fait avec un microscope métallographique. Les empreintes font quelques microns.

I.7.2.2 Dureté KNOOP

Cet essai a été élaboré par Frederick KNOOP en 1939 au Bureau National des Standards aux Etats-Unis.

L'indenter est une pyramide de diamant asymétrique avec un angle de 170° pour un axe et de 130° pour l'autre.

La charge est inférieure à 1 daN. On obtient des empreintes inférieures au 1/10 de mm. L'essai KNOOP est utilisé pour des corps particulièrement fragiles comme les verres, les céramiques ou la dentine.

Il existe également des applications spécifiques pour les plastiques. Quelle que soit la méthode d'essai de dureté choisie, la réalisation de mesures de dureté exige certaines précautions :

- opérer sur une surface plane et polie
- la charge doit être appliquée perpendiculairement à la surface et sans choc.

De plus, il existe des essais de dureté plus spécifiquement adaptés aux polymères ou aux métaux mous.

I.7.3 Essais spécifiques pour polymères et métaux mous

I.7.3.1 Dureté SHORE

Cet essai, utilise depuis 1907, a été conçu pour les polymères. Il mesure la dureté en terme d'élasticité du matériau. Il utilise un indenter sphérique ou conique en acier dont on enregistre le rebond. On distendue une dureté SHORE A pour les caoutchoucs mous et une dureté SHORE D pour les caoutchoucs plus durs.

I.7.3.2 Dureté BARCOL

Essai inventé par Walter COLMAN qui fonda la firme Barber-Colman. C'est un système portable qui utilise de faibles charges de l'ordre de 1 daN.

Il est adapté pour les métaux mous comme l'aluminium et les plastiques. Il existe 3 modèles adaptés chacun à une gamme de matériaux [26].

II. Traitements Mécaniques De Surface

II.1 Introduction

Les traitements mécaniques de surface sont des procédés qui permettent d'améliorer les caractéristiques géométriques et mécaniques des matériaux par une action combinée de durcissement superficiel, de modification structurale et d'introduction de contraintes résiduelles de compression grâce à une déformation plastique hétérogène à la surface des pièces mécaniques [27].

Le principe de base de ces procédés est la mise en application d'une pression à la surface d'un matériau pour provoquer une déformation plastique par un outil (ex : rouleau ou galet). La déformation plastique n'est pas homogène sur la profondeur de la pièce à partir de la surface traitée.

Ce type de traitements génère des contraintes résiduelles de compression qui sont souvent favorables pour la résistance à la fatigue et à la corrosion [28,29].

II.2 Principe de traitement de finition par pression

Le traitement de finition par pression est un procédé de traitement à froid sans enlèvement de matière. Son principe est basé sur les propriétés des matériaux et leur aptitude à la déformation élasto-plastique de la couche superficielle.

Sous la pression des métaux durs, des alliages durs ou diamant, de l'outil (bille, galet, pointe sphérique), les microreliefs de départ de la pièce se déforment plastiquement, se compriment en formant un nouveau microrelief avec plus de régularité (**figure 1.1**).

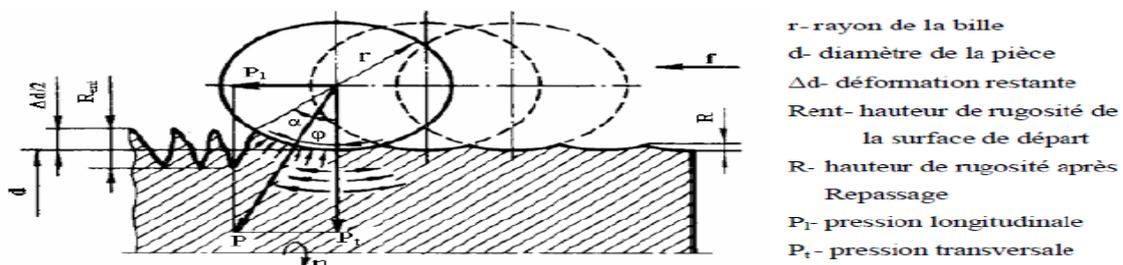


Figure II.1 : Schéma de la déformation des irrégularités de surface lors d'un traitement par bille

La couche superficielle s'écoule sous l'influence de la force de pression développée par la bille, par conséquent les parties en saillies se déplacent vers les creux, la hauteur des irrégularités d'entrée « Rent » diminue.

II.3 Différents type de Traitement Mécanique de Surface :

Les traitements les plus utilisés sont le brunissage, le galetage, le martelage.

Le principe de base est la mise en application d'une pression à la surface d'un matériau pour provoquer une déformation plastique soit par un outil de forme comme pour le galetage, soit par une onde de choc comme pour le traitement par choc laser.

Cette déformation plastique n'est pas homogène sur la profondeur de la pièce à partir de la surface traitée.

Ce type de traitements génère des contraintes résiduelles de compression qui sont souvent favorables pour la résistance à la fatigue et à la corrosion [30].

II.3.1 Galetage

Depuis de nombreuses années le galetage des surfaces est utilisé pour la finition des essieux des wagons moteurs des chemins de fer.

Précisément on le rencontre dans différentes branches de l'usinage mécanique, il s'impose de plus en plus comme étant une technique extrêmement importante et rentable [30].

Le galetage est une opération de finition mettant en contact des galets en acier traité poli et une pièce d'une dureté inférieure comme indiqué sur la figure I.30.

La surface obtenue par galetage est plus fine et présente une meilleure résistance à l'usure que celle obtenue par abrasion. Le galetage travaille par déplacement de la matière plutôt que par enlèvement [31], il oblige, sous l'application d'une force orthogonale, les crêtes d'une rugosité de surface qui a subi un usinage antérieur (tournage, fraisage) à fluer dans les creux **figure II.2**, il s'applique sur des pièces métalliques qui ont un allongement $A > 6 \%$.

Plusieurs recherches ont confirmé les avantages imputés au galetage tels : l'amélioration de la dureté superficielle, la rugosité de surface lui donnant une bonne précision dimensionnelle et géométrique, et la production des contraintes résiduelles de compression qui permettent l'amélioration des résistances à l'usure, à la fatigue, à la corrosion [32].

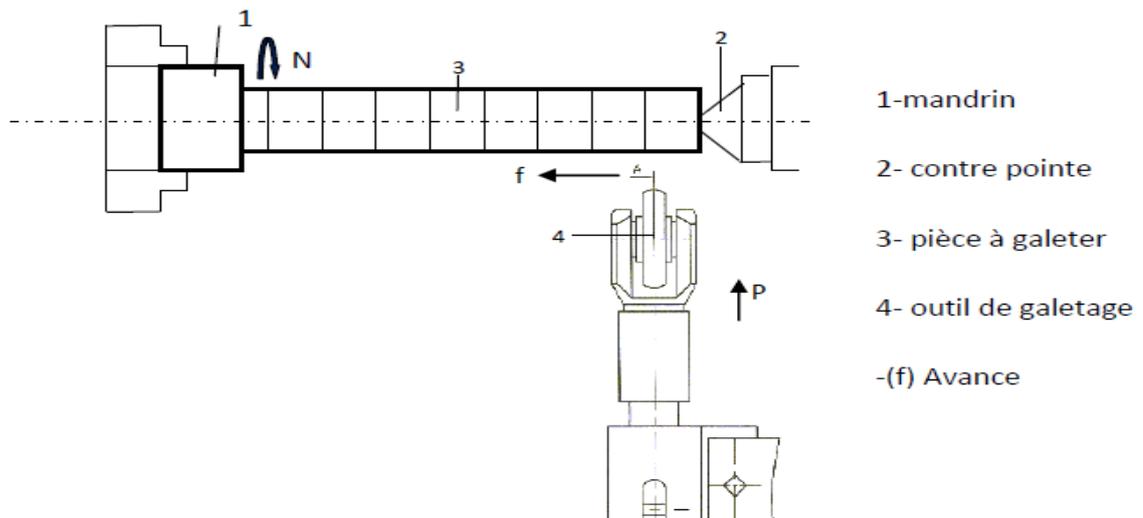


Figure II.2 : Principe du galetage [32]



Figure II.3 : Outils de galetage

II.3.1.1. Différents types de galetage

- **Galetage de renforcement** : il permet d'augmenter la résistance à la fatigue des pièces de construction
- **Galetage dimensionnel ou de forme** : le but de ce galetage est modifier la forme initial de la pièce
- **Galetage de surface** : avec ce galetage on peut améliorer la surface au niveau macro et miro géométrique et il est possible d'atteindre un niveau de superfinition.

II.3.2 Influence du galetage sur la rugosité

L'amélioration de la rugosité sur les pièces brunies dépend des paramètres de procédés.

- Par l'augmentation de la vitesse de déformation on augmente la température dans la zone de déformation qui permet, la stabilisation au moment donné, ainsi que le métal prend un aspect de plus en plus visqueux ce qui réduit le frottement entre l'outil et la pièce ce qui provoque l'amélioration de l'état de surface avec une diminution de la rugosité.

L'amélioration de Ra et aussi assurée par:

- L'augmentation de l'effort de brunissage qui provoque le fluage du métal et par conséquent la plastification, ce qui diminue la rugosité.
- L'augmentation du rayon de l'outil qui réduit la hauteur d'aspérité; ce qui permet la diminution de Ra [28].

II.3.3 Avantages du galetage

1. Amélioration de l'état de surface de 0,05 à 0,1 Ra soit 2 à 4 microns
2. Meilleur contrôle de la cote jusqu'à 0,01 mm
3. Amélioration de la dureté en surface de 5 à 10%
4. Amélioration du temps de contact jusqu'à 300%
5. Amélioration de la résistance à la corrosion
6. Réduction de la friction
7. Elimination des traces et des imperfections
8. Remplace des opérations onéreuses comme la rectification ou rodage
9. Production accrue à cout réduit comparée à d'autres opérations de finition

II.4. Brunissage

Il est d'usage courant qu'une pièce mécanique soit destinée à un rôle fonctionnel dans des conditions sévères.

De ce fait, le matériau doit avoir de hautes caractéristiques mécaniques dont le choix reste un souci majeur pour les industriels à cause des contraintes économiques que peut causer ce choix. Néanmoins, ce problème peut être résolu en faisant appel à des méthodes de fabrication et des modes de traitement sur des matériaux « classique » pour satisfaire les exigences techniques[33].

Le brunissage est un procédé qui agit par déformation plastique superficielle, cette technique est utilisée dans le parachèvement ou finition des surfaces de contact des pièces métalliques dures et des métaux plastiquement déformables [34].

L'opération est réalisée avec un outil : le **brunissoir**.

II.4.1 Principe de brunissage

Le brunissoir exerce une pression sur les crêtes de la surface, ce qui a pour conséquence un fluage de la matière dans les creux, au fur et à mesure de l'avance de l'outil.

Il sert à niveler les aspérités de la surface usinée en créant une zone de métal écrouie indice d'une amélioration de l'état de surface voir **figure I.4**.

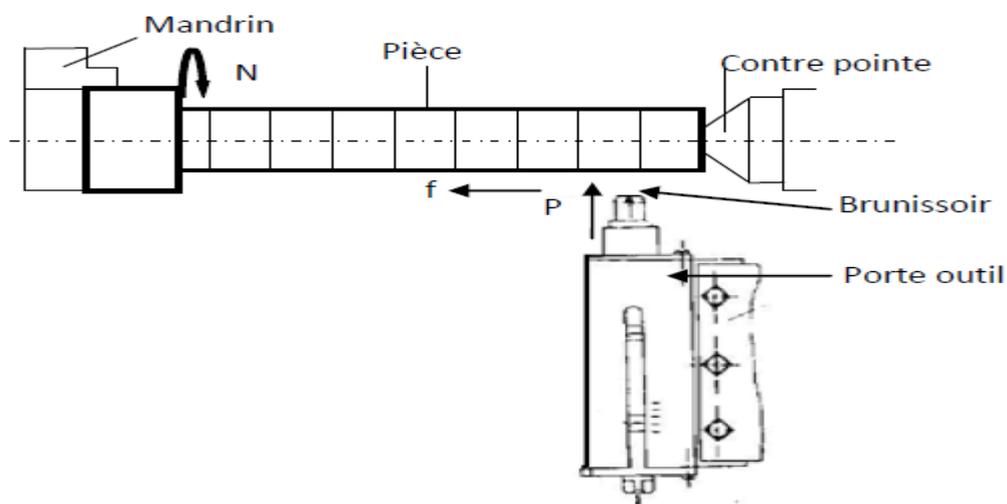


Figure II.4 : Principe de brunissage [19]

Le brunissage se fait à l'aide d'une pointe en diamant ou avec une bille en acier trempé ou en carbure métallique.

Il constitue une opération simple à exécuter, vu qu'elle peut être réalisée sur des machines outils aussi bien classique (tour, fraiseuse...), que spéciales (brunisseuse) [22].

La forme de la partie active de l'outil la plus souvent utilisée est sphérique (bille de rayon 0.8 à 5 mm), mais dans certains cas, elle peut être cylindrique, conique (**fig II.5**) et parfois torique.

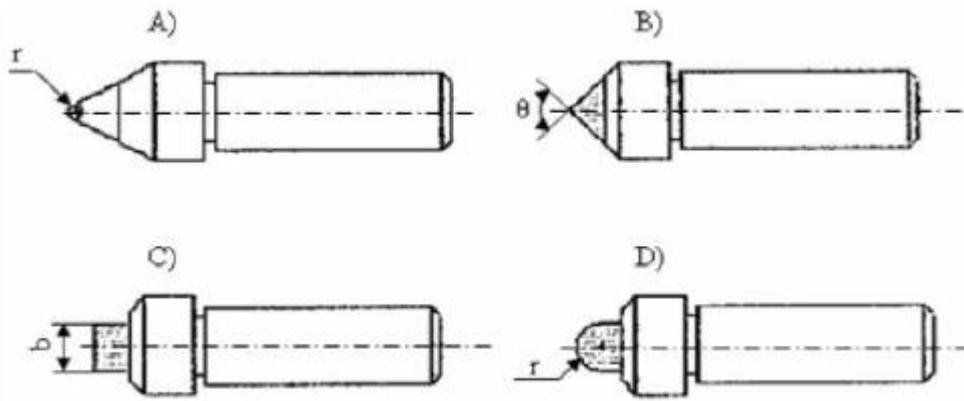


Figure II. 5: Différentes formes de brunissoirs

A) sphérique ; B) conique ; C) cylindrique plate ; D) cylindrique bombé

II.4.2. Le dispositif de brunissage

La partie active sphérique (1) Figure II.6 utilisée pour le brunissage est basée sur un porte-outil installé et serré dans le mandrin spéciale (2) au moyen d'une vis et se déplace dans le manchon guide (4). La pression de brunissage est assurée à l'aide du ressort (5) qui est maintenu entre le mandrin et la butée mobile (6). Le réglage de l'effort de brunissage est effectué à l'aide de la vis de réglage (7) qui s'appuie sur le plateau (8).

La figure II.7 représente la pièce qui nous a permis d'installer le brunissoir sur une fraiseuse, sa partie supérieur rentre dans l'entrée de la fraiseuse, la partie inférieure reçoit le brunissoir qui reçoit à son tour la bille.

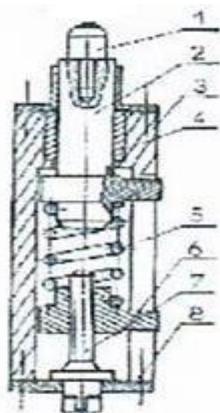


Figure II.6: Schéma du brunissoir



Figure II.7 : Adaptateur fraiseuse/brunissoir

II.4.3 Action du brunissage

Le brunissage provoque à la surface du matériau, des déformations plastiques qui créent des contraintes résiduelles de compression on observe une plastification du matériau obtenu à l'aide de la partie active de l'outil.

Après plastification et déchargement du matériau, la surface perturbée se trouve en compression.

La contrainte de compression est maximale au centre de l'empreinte puis décroît sur les bords de celle-ci.

Ce type d'empreinte est multiplié par l'action du mouvement d'avance de l'outil, alors la contrainte résiduelle n'est pas en générale maximale en surface ; son maximum se situe en générale à quelque dixième de mm sous la surface.

La création d'une telle contrainte résiduelle s'explique par le raisonnement suivant : la déformation produite en surface est une extension ; les couches internes du matériau qui sont moins ou pas déformées empêchent l'allongement de la couche la plus déformée et mettent celle-ci en compression.

Rendre la surface du métal brillante

II.4.4 Le brunissage a pour but de :

- Améliorer l'état de surface
- Réduire la rugosité de la surface
- Augmenter la dureté superficielle.

II.4.5 Avantages du brunissage

- Amélioration de l'état de surface
- Amélioration des caractéristiques mécaniques
- Outillage simple, durée de vie élevée, et peu couteux
- Opération économique car le brunissage est appliqué sur des pièces non traitées
- Il Crès des précontraintes de compression qui agissent favorablement sur l'endurance

II .4.6 Inconvénients du brunissage

- Moyens de contrôle onéreux
- Utilisé que pour le matériau plastiquement déformable

II.5 Conclusion

Le brunissage est un procédé basé sur la déformation plastique de la couche superficielle de matériau. La construction du dispositif (outil) est simple, il peut être monté sur les principales machines-outils (tour, perceuse, fraiseuse) en fonction de types des surfaces à usiner.

La profondeur de coupe (pénétration) tient compte de l'effort de pression et est négligeable. C'est pourquoi le brunissage demeure un procédé de finition agissant sur les propriétés mécaniques.

Le travail s'accompagne d'un dégagement de chaleur interne résultant du frottement entre l'outil et la pièce. C'est pourquoi un arrosage abondant de la zone de coupe est recommandé le liquide utilisé doit avoir les effets suivants :

- Lubrifiant : pour réduire le frottement outil-pièce
- Réfrigérant : pour refroidir la zone de coupe

Comme tout procédé de fabrication, le brunissage introduit des contraintes résiduelles dans une pièce qui vont influencer son comportement en fatigue.

Ces contraintes résiduelles vont se superposer à la sollicitation de service et vont modifier la répartition de contraintes, notamment dans les couches superficielles où s'amorcent généralement les fissures de fatigue suivant la direction négative (compression) de ces contraintes introduites par le brunissage (fermeture des lèvres) la tenue en fatigue du matériau s'en trouvera améliorée.

Notons enfin que d'une manière générale, tout mode d'usinage introduit à la fois :

- Des contraintes résiduelles
- Une nouvelle rugosité superficielle
- Une nouvelle structure des couches superficielles

III.1 Introduction

Pour valider et donner des mesures significatives, les essais mécaniques doivent mettre en jeu des états de contrainte simples et connus, d'interprétation facile et non équivoque. De plus, ils doivent être reproductibles : les résultats obtenus par un laboratoire doivent être utilisable de façon universelle et avoir partout la même signification.

C'est pourquoi des organismes nationaux et internationaux normalisent ces essais. Citons, à titre d'exemples, les organismes de normalisation suivants : L'ASTM (American Society for Testing and Materials, USA), L'AFNOR (Association française de normalisation). Et L'ISO (International Standardisation Organisation).

La normalisation des essais porte sur la géométrie des éprouvettes et sur leur prélèvement, sur les machines et leur étalonnage, sur les techniques expérimentales mis en œuvre et sur le dépouillement des résultats.

Dans ce chapitre nous décrirons le matériau, la rugosité, l'essai de traction, la dureté shore, DSC, Traitement par brunissage.

III.1 Matériau

Au cours de cette étude, nous avons utilisé le polyéthylène de haute densité PEHD avec un grade 2050 et d'une concentration de 2.5 % de noir de carbone (Fig. III.1).



Figure III.1: Granulé de PEHD

III.2 Caractérisation des matériaux

III.2.1 Mesure de la rugosité

La mesure de la rugosité s'est faite sur les quatre paliers d'éprouvette et cela avant et après traitement par brunissage.

L'appareil utilisé pour ces mesures est de marque MITUTOYO SJ-201 et est fourni par le département génie mécanique (Fig.III.2)



Figure III.2: Mesure de la rugosité

Les résultats de mesure des valeurs de rugosité sur l'échantillon réparée sont représentés sur le tableau 1.

Tableau III.1 : Les valeurs de rugosité

	Ra 1	Ra 2	Ra 3	Ra moy (μm)
Palier N° 1 avant	3.57	3.30	2.60	3.15
Palier N° 1 après	1.63	1.50	1.67	1.60
Palier N° 2 avant	2.92	1.95	2.29	2.38
Palier N° 2 après	1.60	1.98	1.75	1.77
Palier N° 3 avant	1.83	1.78	1.71	1.77
Palier N° 3 après	1.29	1.23	1.29	1.27
Palier N° 4 avant	2.78	2.06	2.99	2.61
Palier N° 4 après	1.33	1.25	1.32	1.30

III.2.2 Mesure de dureté shore

La dureté shore a été mesurée avec duromètre shore de type Harteprute DIN 53 505 ISO R 868 Présenté sur la figure III.3.



Figure III.3 : Dureté shore a)duromètre Harteprute, b) technique de mesure

Les résultats de mesure des valeurs de la dureté shore sur l'échantillon réparée sont représentés sur le tableau 2.

Tableau III.2 : Les valeurs de la dureté shore

	Hs	Hs	Hs	Hs moy
Palier 1 avant	98	97	96	97
Palier 1 après	91	87	90	89.3
Palier 2 avant	96	97	96	96.3
Palier 2 après	94	95	88	92.3
Palier 3 avant	98	99	98	98.3
Palier 3 après	87	97	95	93
Palier 4 avant	92	93	94	93
Palier 4 après	83	88	85	85.3

III.3 Essai de traction

III.3.1 Les éprouvettes

Les éprouvettes de forme prismatique ont été prélevées par découpage à partir d'une plaque en PEHD, avec une machine à découper équipée d'un poinçon qui reproduit la forme de l'éprouvette fig.III.4

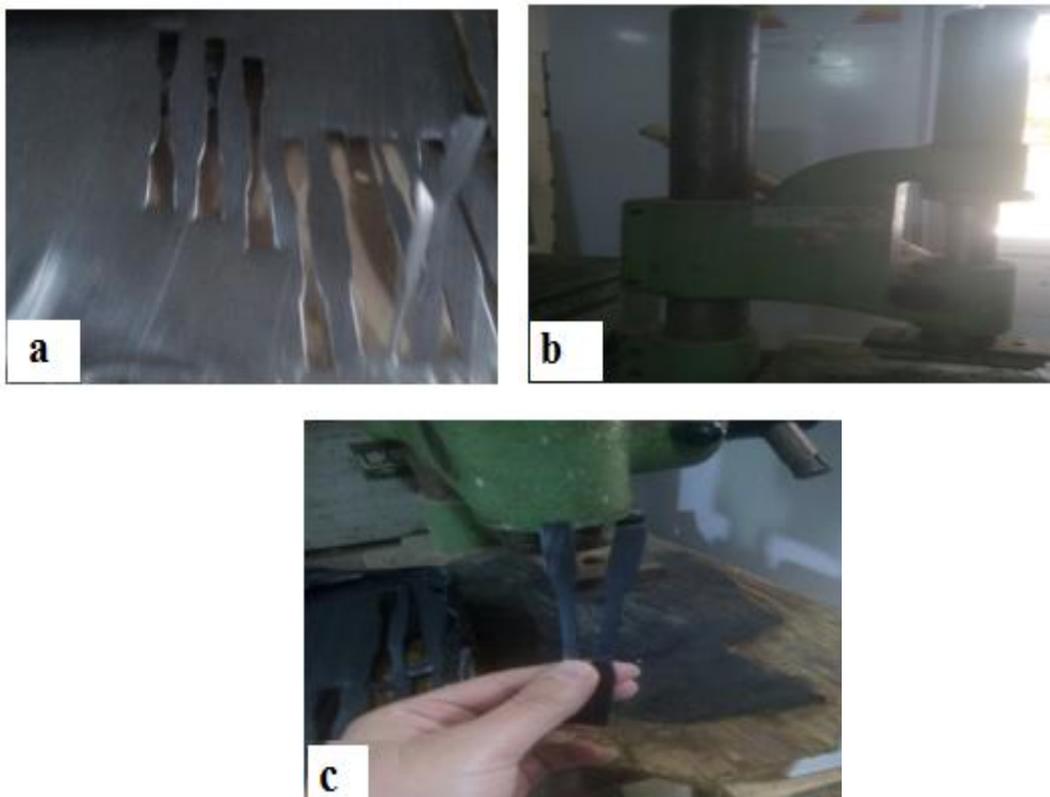


Figure.III.4 : Etape de préparation d'éprouvettes, a) plaque en PEHD, b) Machine à découper les éprouvettes en PEHD, c) éprouvettes finies

III.3.2 Mode opératoire

Des essais de traction ont été effectués sur toutes les éprouvettes Les essais ont été réalisés à l'unité ALFAPIPE sur une machine de traction ZWICK (Figure III.5.).

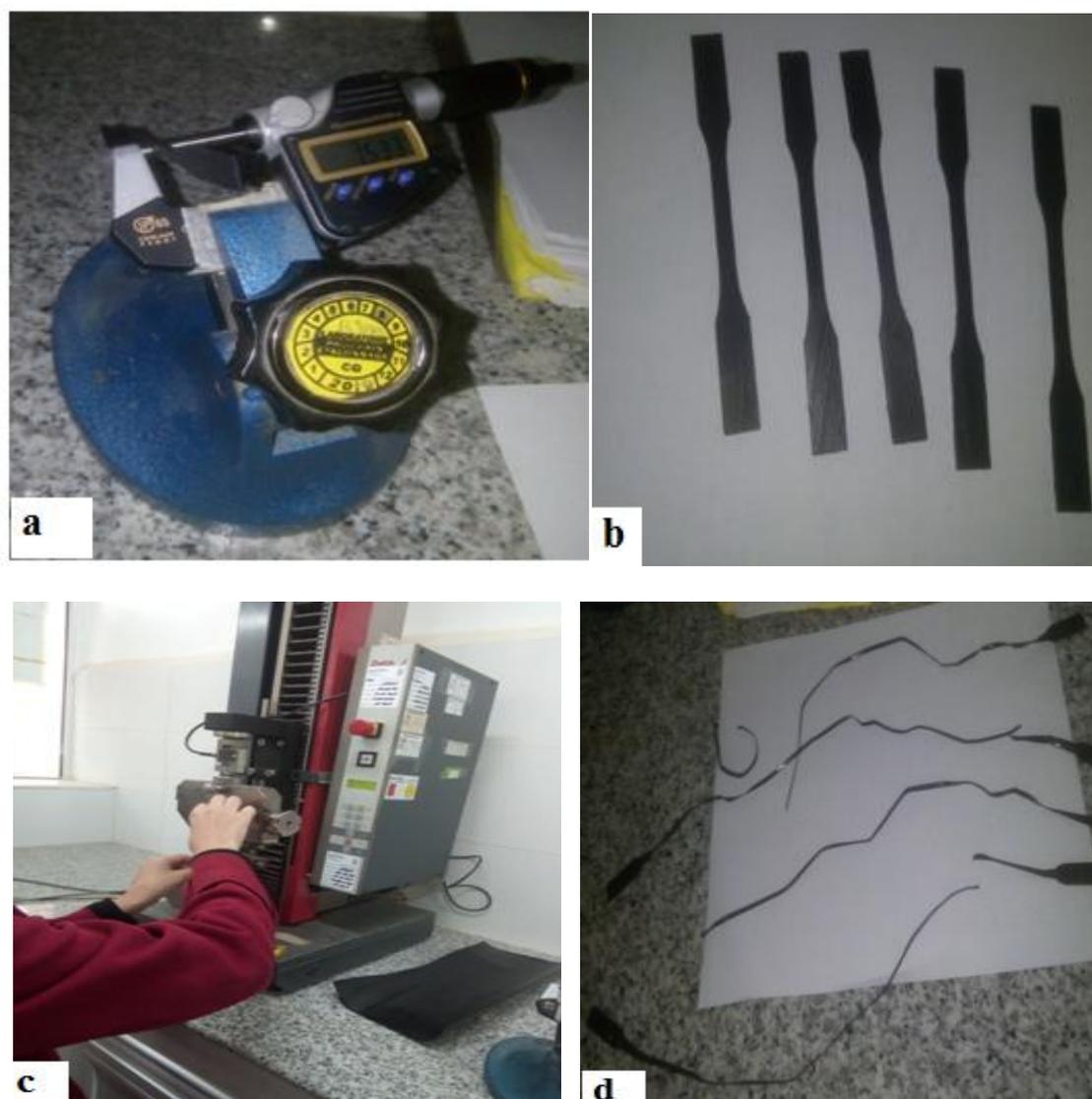


Figure III.5: Essai de traction **a)** Mesure de l'épaisseur de l'éprouvette, **b)** l'éprouvette avant l'essai, **c)** Machine de traction (ZWICK), **d)** l'éprouvette avant l'essai

La machine est équipée d'un extensomètre pour mieux apprécier la traction sur la partie utile de l'éprouvette, l'acquisition des données est assurée par un PC équipé d'un logiciel testXpert.

Le résultat est donné sous forme de courbes rationnelle, le logiciel fournit aussi des statistiques et des caractéristiques propres à la traction en valeurs (Figure III.6).

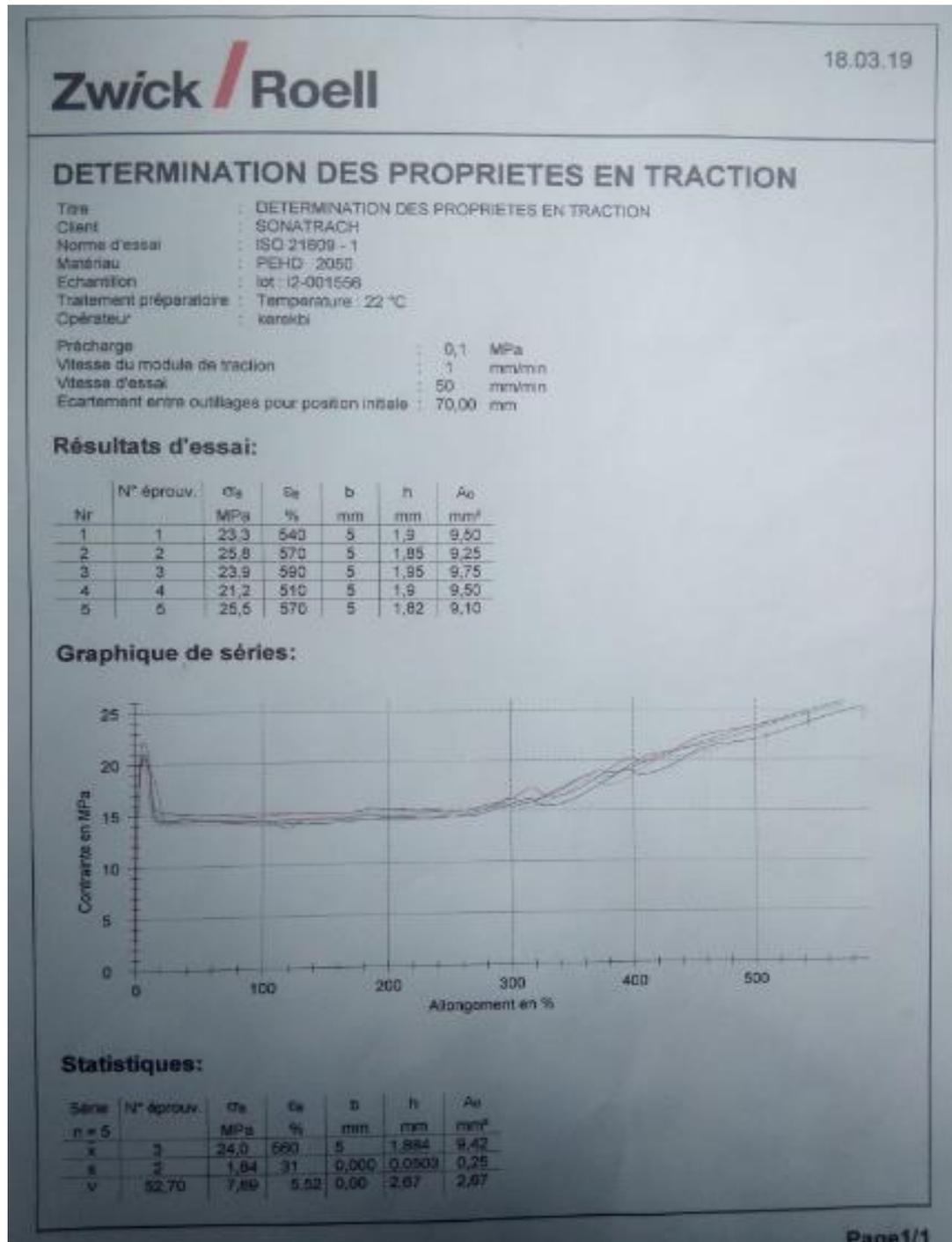


Figure III.6: Courbe rationnelle de traction

III.4 Calorimétrie différentiel à balayage pour polyéthylène

La Calorimétrie différentiel à balayage est une technique utilisée pour étudier la température de fusion, cristallisation, transition vitreuse, polymérisation du polyéthylène haut densité.

III.4.1 Équipement

L'équipement doit consister en :

- Un calorimètre différentiel à balayage (DSC) avec des accessoires de refroidissement.
- Une balance, précise à 0,1 mg.
- Une presse d'enrobage des échantillons.
- Des récipients en aluminium, avec des couvercles.
- Une alimentation en azote, sec, de qualité analytique.



Figure III.7 : Calorimètre différentiel à balayage

III.4.2 Mode opératoire et mesure

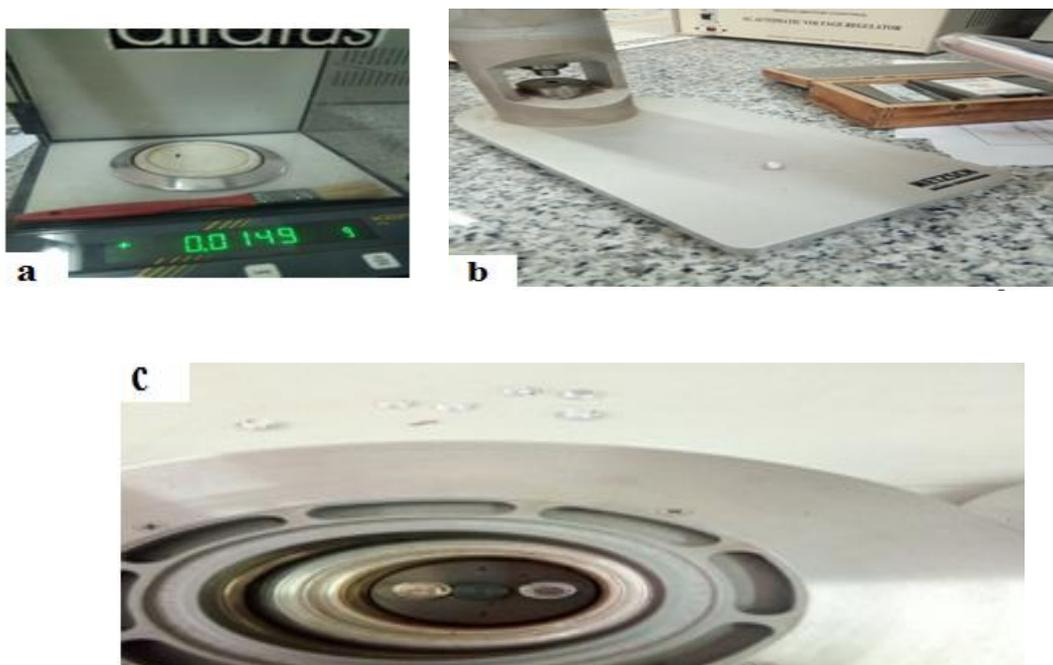


Figure III.8 : Technique de mesure de la DSC a) pesée de l'échantillon, b) préparation de la capsule, c) placement d'échantillon et début d'essai

Chauffer l'échantillon de 400°C à une vitesse de 20 °C/min, Le résultat est donné sous forme de courbes (figure III.7.4)

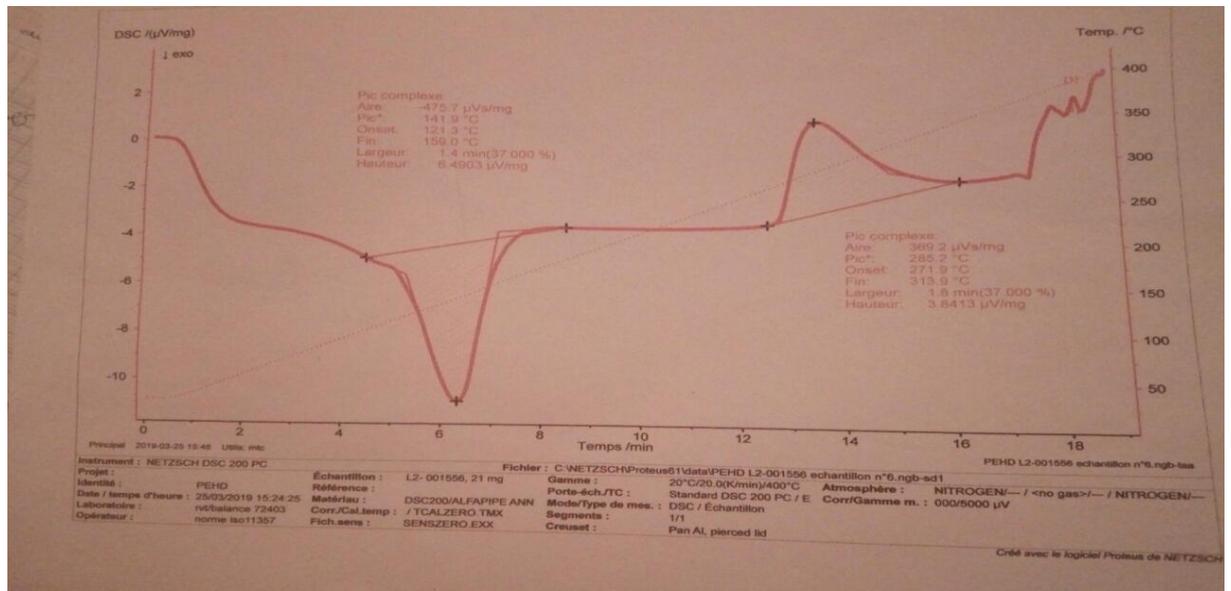


Figure III.9 : Courbe DSC pour PEHD

III.5 Traitement par Brunissage

III.5.1 Mode opératoire

Le brunissage a été réalisé mécaniquement à l'aide d'un dispositif (Fig. III.10), la pièce est maintenue dans le même montage que lors de l'opération de tournage. L'opération est réalisée avec une lubrification abondante.

La Partie active est une bille en acier dur, la force appliquée est avec un ressort d'une raideur spécifique. L'étalonnage est effectué par compression du ressort.

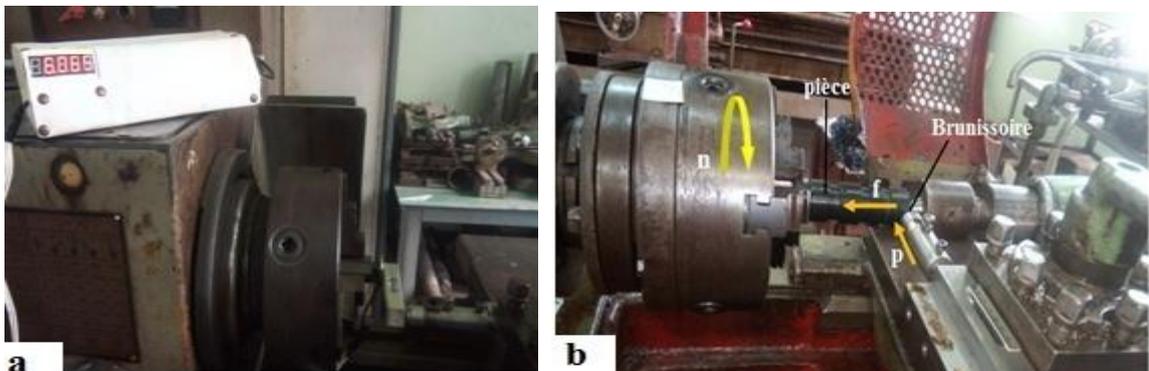


Figure III.10 : Brunissage a) étalonnage de la force, b) mode opératoire

III.5.2 Régime de travail

Le régime de l'opération dépend principalement de la dureté du matériau et de la rugosité du système, dans le cas des matériaux en question, il est recommandé par d'utiliser le régime suivant :

- effort de brunissage : $P = 6 \div 18$ (Kgf)
- avance : $f = 0.037 \div 0.148$ (mm/tr)
- Le rayon de la partie active de l'outil (brunissoir) est $r = 13$ (mm).
- vitesse de travail : $n = 355$ (tr/min)

III.5.3 Méthodologie des essais

Le procédé s'est déroulé conformément aux plans d'expériences 2^2 , le régime adopté est en fonction du matériau et des caractéristiques de la machine outil (**tableau 1**): Facteurs codés en brunissage.

Tableau III.3 : Facteur codés en brunissage

Facteurs Codés	Paramètres	Niveaux	
		-1	+1
X1	Force de pression P (Kgf)	6	18
X2	Avance f (mm/trs)	0.037	0.148

Tableau III.4 : Matrice d'expérience

N° Palier	Paramètres de régime	
	Facteur 1 Effort P	Facteur 2 Avance
Palier N° 1	P=6 Kgf	f = 0.037 mm/tr
Palier N° 2	P=18 Kgf	f = 0.037 mm/tr
Palier N° 3	P=6 Kgf	f = 0.148 mm/tr
Palier N° 4	P=18 Kgf	f = 0.148 mm/tr

IV.1 Introduction

A partir des modèles obtenus précédemment, nous procédons à l'évaluation des paramètres mécaniques tels que Ra, Hs en fonction des régimes de traitement (effort de pression P et l'avance f).

IV.2 Mesure de Rugosité de surface

Les mesures de rugosité sont effectuées sur les éprouvettes avant et après traitement par brunissage, les résultats sont enregistrés sur les tableaux IV.1 et IV.2.

Tableau IV.1 : les valeurs mesurées de Ra avant traitement de brunissage.

N° Palier	Ra 1	Ra 2	Ra 3	Ra moy (μm)
Palier N° 1	3.57	3.30	2.60	3.15
Palier N° 2	2.92	1.95	2.29	2.38
Palier N° 3	1.83	1.78	1.71	1.77
Palier N° 4	2.78	2.06	2.99	2.61

Tableau IV.2 : les valeurs mesurées de Ra après traitement de brunissage.

N° Palier	Ra 1	Ra 1	Ra 1	Ra moy (μm)
Palier N° 1	1.63	1.50	1.67	1.60
Palier N° 2	1.60	1.98	1.75	1.77
Palier N° 3	1.29	1.23	1.29	1.27
Palier N° 4	1.33	1.25	1.32	1.30

Une comparaison des valeurs moyennes des rugosités Ra mesurées avant et après traitement par brunissage avec le résultat de calcul du taux de réduction sont indiquées sur le tableau IV.3.

Tableau IV.3 : Une comparaison des valeurs moyennes des rugosités Ra mesurées avant et après traitement par brunissage avec le résultat de calcul du taux de réduction

N° Palier	Paramètres de régime		Ra moy (μm) avant brunissage	Ra moy (μm) après brunissage	Taux de réduction
	Effort p kgf	Avance (mm/trs)			
Palier N° 1	P= 6	$f=0.037$	3.15	1.60	49%
Palier N° 2	P=18	$f=0.037$	2.38	1.77	26%
Palier N° 3	P= 6	$f=0.148$	1.77	1.27	28%
Palier N° 4	P=18	$f=0.148$	2.61	1.30	50%

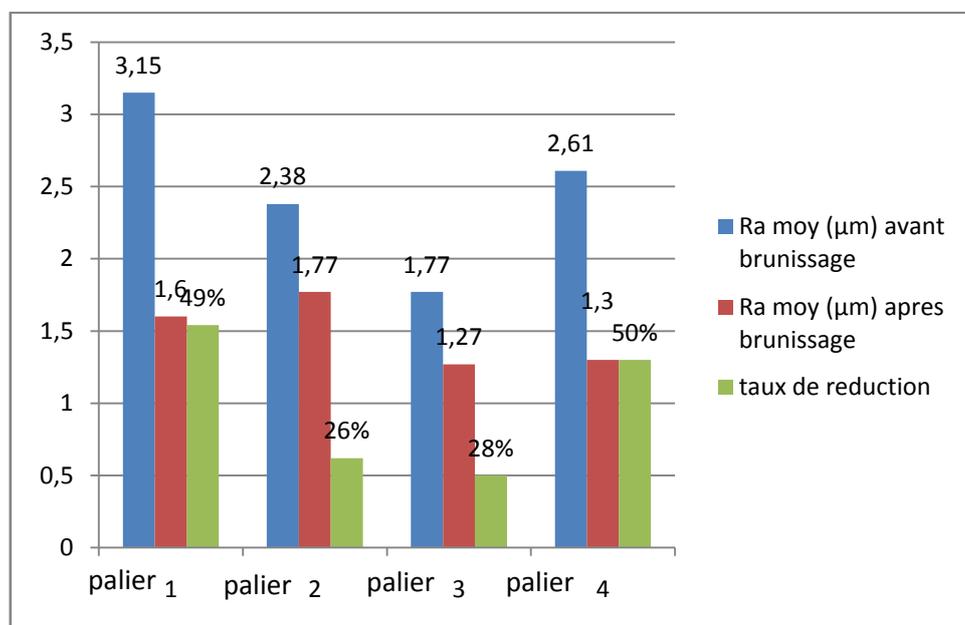


Figure IV.1 : Effet du brunissage sur la rugosité avec le taux de réduction.

Mesure de la dureté des couches superficielles

Tableau IV 4 : Les valeurs de la dureté mesurées H shore avant traitement de brunissage

N° Palier	Hs1	Hs2	Hs3	Hs moy
Palier N° 1	98	97	96	97
Palier N° 2	96	97	96	96.3
Palier N° 3	98	99	98	98.3
Palier N° 4	92	93	94	93

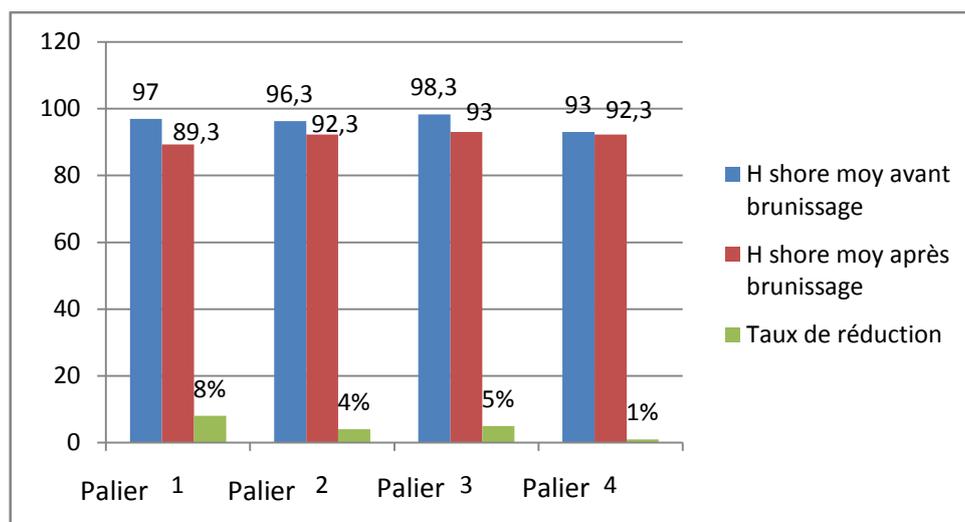
Tableau IV.5 : Les valeurs de la dureté mesurées Hs après traitement de brunissage

N° Palier	Hs 1	Hs 2	Hs 3	Hs moy
Palier N° 1	91	87	90	89.3
Palier N° 2	94	95	88	92.3
Palier N° 3	87	97	95	93
Palier N° 4	83	88	85	85.3

Une comparaison des valeurs moyennes de la dureté mesurées Hs mesurées avant et après traitement par brunissage avec le résultat de calcul du taux de réduction sont indiquées sur le tableau IV.6.

Tableau IV.6 : comparatif de Hs moy avant et après traitement de brunissage

N° Palier	Paramètres de régime		Hs moy avant brunissage	Hs moy après brunissage	Taux de réduction
	Effort p (Kgf)	Avance (mm/trs)			
Palier N° 1	P= 6	$f=0.037$	97	89.3	8%
Palier N° 2	P=18	$f=0.037$	96.3	92.3	4%
Palier N° 3	P= 6	$f=0.148$	98.3	93	5%
Palier N° 4	P=18	$f=0.148$	93	92.3	1%

**Figure IV.2 :** Effet du brunissage sur H shore moy avec le taux de réduction

IV.3 Plan D'expérience

Le procédé s'est déroulé conformément aux plans d'expériences 2^2 , le régime adopté est en fonction du matériau et des caractéristiques de la machine outil (**tableau IV.7.**).

Tableau IV.7 : Facteurs codés

Facteurs codés	Paramètres	Niveaux	
		-1	+1
X1	Force de pression P (Kgf)	6	18
X2	Avance f (mm/trs)	0.037	0.148

Le modèle de planification d'expérience adopté prend en compte deux niveaux de variation et deux facteurs selon la matrice suivante :

Tableau IV.8 : Matrice des essais

N° Palier	Paramètres de régime	
	Facteur 1 Effort P	Facteur 2 Avance
Palier N° 1	P=6 Kgf	$f = 0.037$ mm/tr
Palier N° 2	P=18 Kgf	$f = 0.037$ mm/tr
Palier N° 3	P=6 Kgf	$f = 0.148$ mm/tr
Palier N° 4	P=18 Kgf	$f = 0.148$ mm/tr

Tableau IV.9 : Les réponses mesurées après traitement de brunissage Ra Hs

N° Palier	Paramètres de régime			Ra moy (μ m) après brunissage	Hs moy après brunissage
	X1 Effort P	X2 Avance	X1X2 Interaction P, f		
Palier N°1	-1	-1	+1	1.60	89.3
Palier N° 2	+1	-1	-1	1.77	92.3

Palier N°3	-1	+1	-1	1.27	93
Palier N°4	+1	+1	+1	1.30	92.3

IV.4 Modèle des plans factoriels

Le modèle postulé des plans factoriels complets 2^2

est :

$$Y = [a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_{12}X_1X_2]$$

$_Y$ est la réponse,

– x_1 représente le niveau du facteur 1

– x_2 représente le niveau du facteur 2

– x_1x_2 est le produit des niveaux des facteurs 1 et 2

Ou,

– a_0 est le coefficient constant du modèle ; $a_0 = 1/4 [y_1 + y_2 + y_3 + y_4]$

– a_1 est le coefficient du facteur 1 ; $a_1 = 1/4 [-y_1 + y_2 - y_3 + y_4]$

– a_2 est le coefficient du facteur 2 ; $a_2 = 1/4 [-y_1 - y_2 + y_3 + y_4]$

– a_{12} est le coefficient du terme x_1x_2 . $a_{12} = 1/4 [y_1 - y_2 - y_3 + y_4]$

Après calcul des coefficients polynôme pour chaque réponse, les valeurs sont consignés sur le tableau IV.4.

Tableau IV.10 : Valeurs des coefficients polynôme $0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_{12}X_1X_2$

Coef du polynôme	Ra	H shore
a_0	1.485	89.975
a_1	0.05	-1.175
a_2	-0.2	-0.258
a_{12}	-0.035	-45.325

IV.5 Les réponses avec les facteurs codées

On introduire les valeurs des coefficients polynôme dans les expressions du modèle pour chaque paramètres, on trouve les réponses avec les facteurs codées suivantes :

1/ Réponse relative à la Rugosité de « Ra »:

$$Ra = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_{12}X_1X_2$$

$$Ra = 1.485 + 0.05 X_1 - 0.2X_2 - 0.035 X_1X_2$$

2/ Réponse relative à la dureté superficielle de « H shore »:

$$H \text{ shore} = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_{12}X_1X_2$$

$$H \text{ shore} = 89.975 - 1.175X_1 - 0.258X_2 - 45.325 X_1X_2$$

IV.6 Les réponses avec les unités légales

Après développement des équations du modèle et en remplaçant les facteurs codés par leurs valeurs d'après les équations (1) et (2), on trouve les modèles mathématiques de notre expérience en valeurs naturelles comme indiqué dans les relations (4) et (5):

$$X_1 = \frac{P - P_0}{P_{asp}}, \quad X_2 = \frac{f - f_0}{f_{asp}} \quad (1)$$

$$P_0 = \frac{P_{\max} + P_{\min}}{2}, \quad P_{asp} = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{2} \quad (2)$$

$$f_0 = \frac{f_{\max} + f_{\min}}{2}, \quad P_{asp} = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{2} \quad (3)$$

La Rugosité « Ra »:

$$Ra = 1.485 - 0.1P + 0.333f - 0.117Pf \quad (4)$$

La dureté superficielle « H shore » :

$$H \text{ shore} = 89.975 + 3.5P + 1.3695f - 150.479Pf \quad (5)$$

Il ressort de l'analyse des graphes (figure IV.3) qu'une interaction sur la dureté shore entre est possible entre la force de brunissage et l'avance de travail. D'après la figure IV.3, une faible pression (P=6 Kgf) a une forte interaction qu'une grande pression (18kgf).

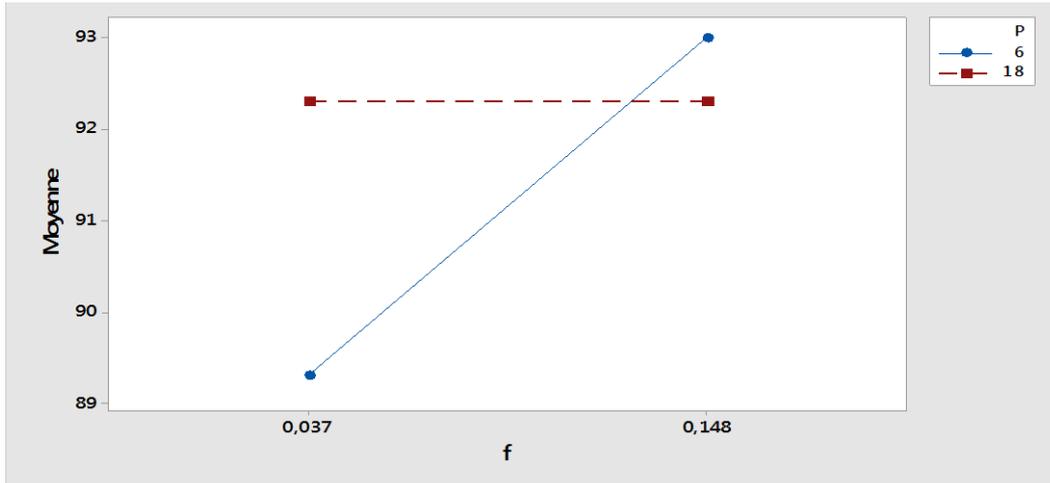


Figure IV.3 : Diagramme des interactions pour la dureté Hs

De la même façon les facteurs P et f ont une interaction sur la rugosité (IV.4). La plus grande pression a un effet considérable sur l'avance.

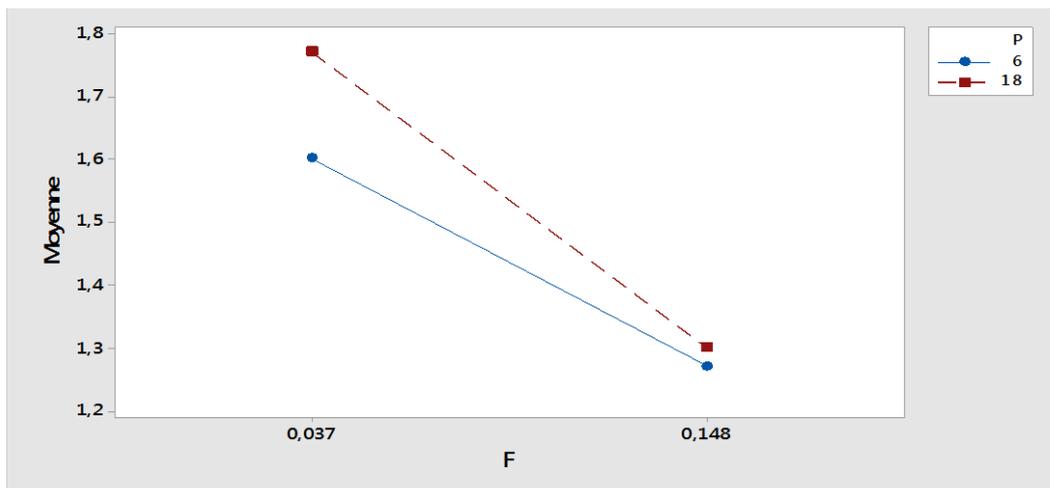


Figure IV.4 : Diagramme des interactions pour Ra

La figure IV.5 et IV.6 montre la variation de la dureté et de la rugosité en fonction des deux paramètres du brunissage.

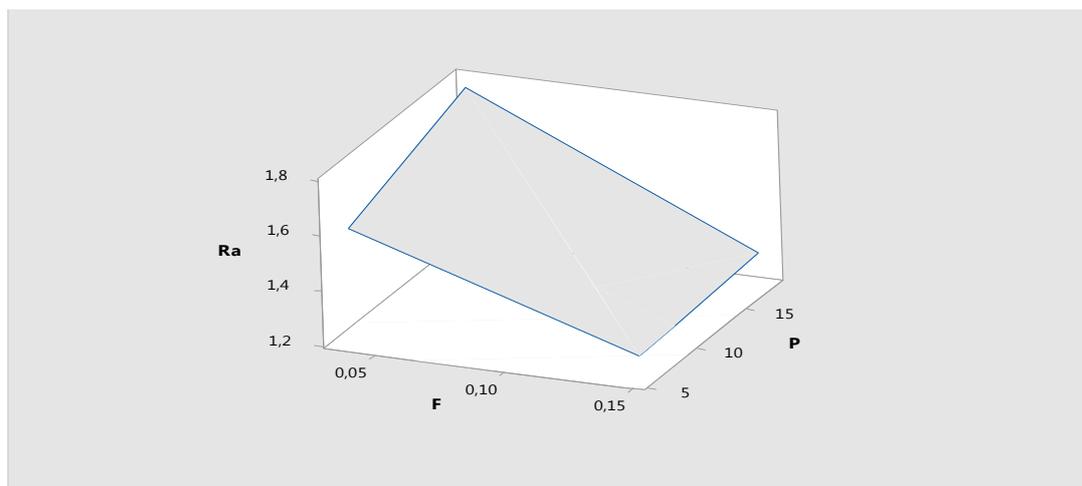


Figure VI.5 : Influence des paramètres du brunissage sur la rugosité

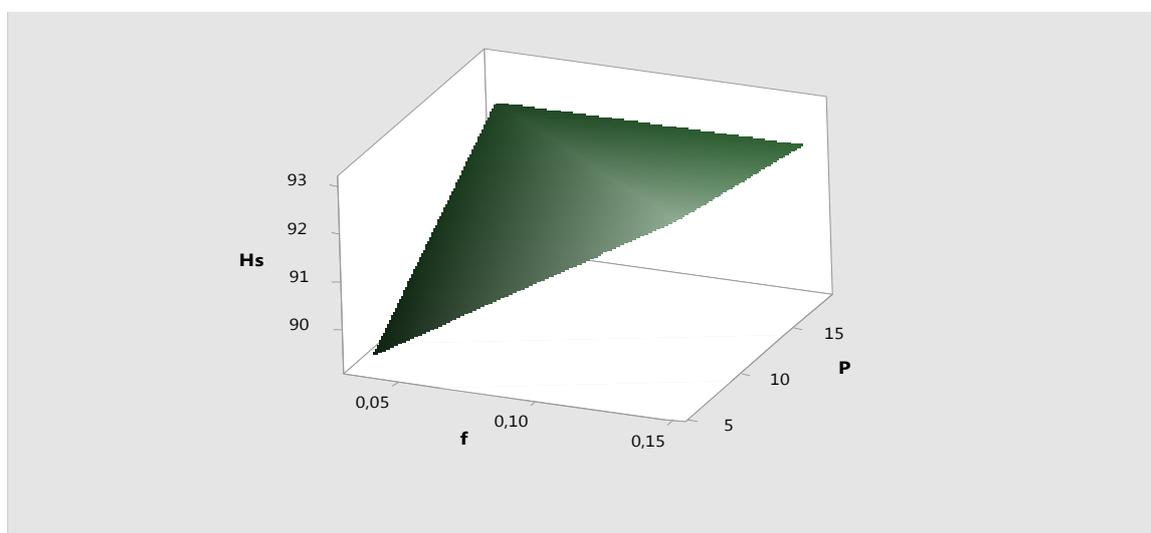


Figure VI.6 : influence des paramètres du brunissage sur la dureté Hs

Conclusion générale

Ce travail est d'appréhender et de connaître de plus près les matières plastiques plus particulièrement les PEHD, leurs caractéristiques mécaniques, propriétés physicochimiques, leurs utilisations et leur impact sur le monde moderne.

Il ressort de ce travail les conclusions et les perspectives suivantes :

- ✓ Les études, essais et traitements effectués nous ont démontrés plusieurs facteurs entrant en jeu dans l'amélioration des propriétés des PEHD et l'influence de ces facteurs sur la qualité du polymère.
- ✓ Les résultats obtenus dans ce travail reposent sur des essais expérimentaux qui ont été réalisés sur des échantillons en PEHD, traitées par le procédé de brunissage à la bille. Toutefois, l'effet de la déformation plastique dépend des propriétés du matériau. Par ailleurs, la méthodologie des plans d'expérience factorielle d'ordre 2^2 , a été suivie lors de la réalisation des essais, ce qui a permis d'observer l'influence des paramètres (P, f) du régime de traitement par brunissage sur les réponses étudiées (Ra, Hs) . Ces plans peuvent constituer un outil d'envergure pour l'établissement des modèles mathématiques, permettant la prédiction des réponses et optimisation des régimes de traitement les plus adaptés avec un minimum d'essai.
- ✓ Les résultats ont montré une influence non négligeable des deux paramètres de brunissage. En effet quelque soit l'avance de travail et quelque soit la force, le brunissage n'a pas montré ses effets bénéfiques vis-à-vis la dureté. Il semble dans ce cas le matériau n'a pas subi d'écrouissage. Cependant pour toutes les conditions de travail, le procédé a amélioré l'aspect de surface en réduisant la rugosité. La meilleure réduction a été enregistrée pour une avance $f = 0,148$ mm/tr et une force $P = 18$ Kgf. Ces deux valeurs constituent le régime optimal du brunissage.
- ✓ En perspective à ce travail il est envisageable d'élargir l'influence du procédé sur les contraintes résiduelles et la tenue en fatigue du matériau et prendre en considération d'autres paramètres du procédé comme le nombre de passes et le diamètre de la bille.

Rréférences bibliographiques

- [1]: U. Schulte, in: Proceedings of Plastics Pipes XIII, Washington, DC, USA, 2006.
- [2]:https://www.memoireonline.com/01/14/8519/m_Les-polymeres-dans-l-industrie3.html
- [3]:<http://dspace.univbiskra.dz:8080/jspui/bitstream/123456789/4326/3/chapitre%20%2001.pdf>
- [4]:<http://dspace.univbiskra.dz:8080/jspui/bitstream/123456789/4326/3/chapitre%20%2001.pdf>
- [5]:<http://dspace.univbiskra.dz:8080/jspui/bitstream/123456789/4326/3/chapitre%20%2001.pdf>
- [6]:<http://dspace.univbiskra.dz:8080/jspui/bitstream/123456789/4326/3/chapitre%20%2001.pdf>
- [7]:<http://dspace.univbiskra.dz:8080/jspui/bitstream/123456789/4326/3/chapitre%20%2001.pdf>
- [8]: Généralités sur les polymères ; **Chapitre I,01 .pdf**
- [9]: Généralités sur les polymères ; **Chapitre I, 01 .pdf**
- [10]: Généralités sur les polymères ; **Chapitre I, 01 .pdf**
- [11] : -« le polyéthylène », [en ligne].Disponible sur [http://fr.wikipedia.org/wiki/polyéthylène\(consulté](http://fr.wikipedia.org/wiki/polyéthylène(consulté) le :12/02/2011))
- [12] : 1-« Connaissance de polyéthylène », Documentation technique de la société ELF ATCHEM, octobre 1995. Etude de l'extrusion du polyéthylène téréphtalate et de ses mélanges non comptabilisés avec le polyéthylène haute densité, mécanique [physics.med-ph], Ecole nationale supérieur des mine »,Paris, 2002.
- [13] :« Propriétés du polypropylène »[en ligne]. Disponible sur : [www.goodfellow.com /csp/active/static/F/PP30.html](http://www.goodfellow.com/csp/active/static/F/PP30.html).Consulté le : 05/07/2010.
- [14] : S.MARCEAU, « Architecture multi échelle et propriétés mécaniques de nanocomposite », Thèse de doctorat ,Université de Savoie, France, (2003), pp : 35.84
- [15] : Etude expérimentale et numerique de comportement elastique du bourrelet de soudure du polyethylene a haut densite (PEHD)
- [16] : E. POSTAIRE, « les matière plastiques à usage pharmaceutique », Edition médicales internationales, paris,(2000), pp :145.
- [17] : <https://www.ecam.fr/materiaux-structures/principe-de-dsc/>
- [18] : ALEXANDRE N. OVCEYENKO, MAKSIMILIAN. M. GAJEK, VLADIMIR I. CEREBRYAKOV, Formation de l'état de surface des pièces par procédés technologiques, Politecnika OPOLOSKA, NAKLAD, Opole.2001.

- [19] : A. PINEAU, A. ZAOUI, D. FRANCOIS ; « Comportement mécanique des matériaux », Hermès 1991.
- [20]: ERCHOV. A. A. SERGUEEV. U. A. KHMELNIKIR. V. L., L'efficacité et perspectives d'utilisation de l'usinage fini, augmentation de la résistance à l'usure de la construction des machines dans l'industrie de l'énergie M. NIIE-INFORMATION- ENERGOMAC1986, 34 p.
- [21] : B. essai de traction Pdf
- [22] : JE GORDON : Structure et Matériaux. L'explication mécanique des formes pour La Science diffusion Bellin 1994,231p.
- [23] : 11 Essai de traction.doc du 06/09/10 PDF
- [24] : recherché Google sur l'essai de traction.
- [25] : Instrumentation d'un choc Charpy Christophe Demulthenon Julien Devaloir Ecol des Mines de Douai Département Technologie des Polymères et Composites
- [26] : B. JACQUOT, « Propriétés mécaniques des Biomatériaux utilisés en Odontologie » Support de Cours (Version PDF), Société Francophone de Biomateriaux Dentaires, date **2009-2010**
- [27] : Bourebia M. Laouar L. 2015. Influence des paramètres de traitement par brunissage sur la texture de la surface, IRevue, proceeding du 22ème Congrès Français de Mécanique, (Irevue, AFM), Lyon, France
- [28] : A.C.E.MENDER, La technique du galetage, métaux, déformation N°47, avril 1978.
- [29] : Hamadache H., Laouar L & Chaoui K., 2006. Influence Des Traitements Mécaniques De Surface sur La Rugosité, La Dureté et la Résistance à L'usure d'un Acier (RB40), Revue des sciences et de la technologie Synthèse N° 15, 120-127.
- [30] : M. Bourebia, Influence des procédés d'usinage sur les rugosités de surface et leurs répercussions sur un contact mécanique, Thèse de Magister; Université de Annaba , 2010
- [31] : Tourab mohamed, et Bouchlaghem Abdelaziz, effets des paramètres du régime de galetage sur la rugosité et la dureté de surface des matériaux ferreux, Université Badji Mokhtar Annaba Département de Génie Mécanique
- [32] : Cogsdill Tools produits Inc. outil de précision 2002 www .cogsdill.com.
- [33] : L. Laouar, H. Hamadache, S.Mekhilef, Influence du traitement mécanique par brunissage sur la tenue à l'usure de l'acier (RB40) produit à SIDER, revue des sciences et technologie "synthèse" n° 14, Université Badji Mokhtar Annaba 2005, pp.
- [34]: H. Hamadache, L. Laouar, N.E. Zeghib, K. Chaoui, characteristics of Rb40 steel superficial layer under ball and roller burnishing, journal of materials Technology 180-2006,130-136.