République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Yahia FARES de MÉDÉA
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie mécanique

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention de diplôme de

Master en Génie mécanique

Option : Ingénierie Des Matériaux et des surfaces

Thème

Etude expérimentale de la résistance à l'érosion des optiques automobiles

Présenté par :

Mr : LADJALI Sebbah et Mr : ALLOUN Lakhdar

Proposé et Dirigé par :

Dr : MADAOUI Zakarya

Année Universitaire 2022-2023

REMERCIEMENTS

Nous remercions Allah pour Sa générosité et exprimons notre reconnaissance pour nous avoir donné le courage et la force d'accomplir cette tâche.

Nous tenons également à exprimer notre profonde gratitude envers nos parents pour les sacrifices qu'ils ont consentis afin de nous permettre de poursuivre nos études.

En accomplissant humblement cette tâche, nous tenons à remercier notre superviseur, **Dr. MADAOUI ZAKARYA**, pour ses encouragements à notre égard.

Nous demandons à tous nos enseignants en génie mécanique qui ont supervisé notre formation de trouver ici notre gratitude pour leur sérieux, la qualité de leurs cours et l'attention qu'ils ont portée à notre parcours à l'Université de Technologie "Yahia Farès" de Médéa.

Nous exprimons toute notre gratitude aux membres du comité d'évaluation qui superviseront notre travail. À tous ceux qui ont contribué directement ou indirectement au développement de ce projet, nous vous remercions sincèrement.

DEDICACE

Avec l'aide de Dieu Tout-Puissant et l'amour de tous ceux qui m'aimaient et que j'aimais, j'ai été soutenu et j'ai pu mener à bien ce travail que je leur ai dédié :

Tout d'abord, je tiens à remercier mes chers parents qui tiennent une place importante dans mon cœur. Tu as toujours été là pour moi et tu n'as jamais cessé de me soutenir.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos soi-disant désirs, et je vous remercie pour votre soutien inépuisable et votre présence constante à mes côtés.

A Sebbah et tous mes amis et collègues, en particulier mes chers amis **Yahia**, **Soufien**, **Hamza**,et **Abderrahim**, et à tous ceux qui m'ont aidé directement ou indirectement, je prie pour que Allah vous garde et vous bénisse pour toujours, si Allah le veut.

ALLOUN Lakhdar

DEDICACE

Avec l'aide de Dieu Tout-Puissant et l'amour de tous ceux qui m'aimaient et que j'aimais, j'ai été soutenu et j'ai pu mener à bien ce travail que je leur ai dédié :

Tout d'abord, je tiens à remercier mes chers parents qui tiennent une place importante dans mon cœur. Tu as toujours été là pour moi et tu n'as jamais cessé de me soutenir.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos soi-disant désirs, et je vous remercie pour votre soutien inépuisable et votre présence constante à mes côtés.

A **Lakhdar** et tous mes amis et collègues, en particulier mes chers amis **Yahia**, **Soufien**, **Hamza**, et **Abderrahim**, et à tous ceux qui m'ont aidé directement ou indirectement, je prie pour que Allah vous garde et vous bénisse pour toujours, si Allah le veut .

LADJALI Sebbah

Etude expérimentale de la résistance à l'érosion des optiques automobiles

Résumé :

Dans ce travail, une étude expérimentale du comportement à l'érosion des optiques automobiles utilisées au nord de l'Algérie a été réalisée. Quatre échantillons de durées d'utilisation 2, 4, 8 et 10 années dans ce milieu ont été utilisées sans aucun vieillissement accélérer.

Initialement, leslentilles tirés des optiques automobiles ont été préparés après pesés par une balance de précision de $10^{\wedge -3}$ gr. Les expérimentations d'érosion des lentilles étudiées sont effectuées sur le banc d'essai d'érosion conçu et réalisé au laboratoire de Rhéologie et Mécanique (LRM).

Les pertes de masse, le taux d'érosion et les cicatrices causées par érosion sont analysées en fonction des angles d'impact et de la durée d'utilisation et la durée de sablage. Plusieurs types d'endommagement sont observés ont montré qu'une bonne aptitude des lentilles à l'érosion est obtenue pour une durée de 4 années d'utilisation. Ces résultats sont dus à une amélioration de la microdureté des matériaux polymèreaprès cette durée d'utilisation. Tous les échantillons testés présententune perte de masse et un taux d'érosion les plus importantspour un angle d'impact de 30°.

mots clé : L'érosion, Les optiques automobiles, polycarbonate, sablage, Microscope optique.

دراسة تجريبية لمقاومة تآكل بصريات السيارات

ملخص :

تم في هذا العمل إجراء دراسة تجريبية لسلوك تآكل بصريات السيارات المستخدمة في شمال الجزائر. تم استخدام أربع عينات مع فترات استخدام 2 و 4 و 8 و 10 سنوات في هذه البيئة دون أي تسريع في الشيخوخة.

في البداية ، تم تحضير العدسات المأخوذة من بصريات السيارات بعد وزنها بميزان دقيق يبلغ 10 ^ -3 جرام. يتم إجراء تجارب تآكل العدسات المدروسة على طاولة اختبار التآكل المصممة والمنتجة في مختبر الريولوجيا والميكانيك (LRM).

يتم تحليل الخسائر الجماعية ومعدل التآكل وندبات التعرية كدالة لزوايا التأثير ومدة الاستخدام ووقت السفع الرملي. لوحظت عدة أنواع من الأضرار التي أظهرت أنه تم الحصول على قدرة جيدة للعدسات على التآكل لمدة 4 سنوات من الاستخدام. هذه النتائج ناتجة عن تحسن في الصلابة الدقيقة للمواد البوليمرية بعد فترة الاستخدام هذه. تُظهر جميع العينات التي تم اختبارها أعلى معدل فقد للكتلة ومعدل تآكل لزاوية تأثير تبلغ 30 درجة.

الكلمات المفتاحية: التآكل ، بصريات السيارات ، البولي كربونات ، السفع الرملي ، المجهر البصري.

Experimental study of the erosion resistance of automotive optics

Abstract :

In this work, an experimental study of the erosion behaviour of automotive optics used in northern Algeria was carried out. Four samples with durations of use of 2, 4, 8 and 10 years in this environment were used without any accelerating ageing.

Initially, lenses taken from automotive optics were prepared after being weighed by a precision balance of 10^-3 gr. The erosion experiments of the studied lenses are carried out on the erosion test bench designed and produced at the Rheology and Mechanics Laboratory (LRM).

Mass losses, erosion rate and erosion scars are analyzed as a function of impact angles and duration of use and sandblasting time. Several types of damage are observed have shown that a good aptitude of the lenses to erosion is obtained for a period of 4 years of use. These results are due to an improvement in the micro hardness of the polymeric materials after this period of use. All the samples tested show the highest mass loss and erosion rate for an impact angle of 30°.

Key words: Erosion, Automotive optics, polycarbonate, sandblasting, Optical microscope.

TABLEDESMATIÈRES

Remerciement……..... I
Dédicace……..….. II
Résumé……..... III
La liste des figures ……..…..…. VI
La liste des tableaux ……..……..…... V
Introduction générale……..…… 01

ChapitreI:Recherche bibliographique

I.1 Introduction …….. ……..…. ……..... 03
I.2 Types de feux dans l'automobile ……. 04
I.2.1 Phares avant ……..… 04
I.2.2 Feux de croisement et feux de route ……..…… 04
I.2.3Feux de jour ……..…….……. 06
I.2.4 Feux arrière ……..……... 06
I.2.5 Feux antibrouillard ……...……..……. 06
I.2.6 Systèmes d'éclairage adaptatif ..……..……. 07
I.3 Composition de l'optique automobile ……..……..…… 08
I.3 .1 Réflecteur ……..…. 08
I.3.2 Source lumineuse……. 09
I.3.3 Lentille……. 09
I.3.4 Réflecteur de signalisation……... 10
I.3.5 Circuit électrique et connecteurs…….. 11
I.3.6 Boîtier……. 11
I.4 Composition de la lentille de l'optique automobile…… 12
I.5 Source de lumière dans l'optique automobile ……. 13
I.5.1 Les ampoules halogènes …….. 13
I.5.2 Les ampoules xénon ……... 14
I.5.3Phares LED …… 15
I.5.3.1 Principe de fonctionnement ……. 16

I.5.4 Phares laser ……. 17

I.5.5 phares OLED …….. 18

I.6 Caractéristiques de polycarbonate …… 20

I.6.1 Transparence et transmission de la lumière…… 20

I.6.2 Résistance aux chocs…….. 20

I.6.3 Légèreté……... 20

I.6.4 Flexibilité de conception……. 20

I.6.5 Résistance aux rayons ultraviolets (UV)……. 21

I.6.6 Coût abordable…… 21

I.7 Concept de base de polycarbonate …… 21

I.7.1 Les liants polycarbonates ……... 22

I.7.2 Les solvants……. 22

I.7.3 Les plastifiants ……... 23

I.8 Principales caractéristiques du Polycarbonate…….. 23

I.8.1 Propriétés physico-chimique ……. 23

I.8.2 Propriétés mécaniques …….. 24

I.9 Vieillissement des polymères sous l'impact environnemental …… 25

I.9.1 Principaux types de vieillissement …… 26

I.9.1.1 Vieillissement physique…….. 26

I.9.1.2 Vieillissement physique avec transfert de masse…… 26

I.9.1.3 Vieillissement physique sans transfert de masse…… 27

I.9.2. Vieillissement chimique…… 27

I.9.2.1. Coupure de chaînes statistiques…… 28

I.9.2.2. Dépolymérisation……... 28

I.9.2.3 Réticulation……. 29

I.9.2.4 Oxydation…… 29

I.9.3 Dégradation thermique……... 29

I.9.4 Dégradation hydrolytique……... 29

I.9.5 Dégradation par usure …….. 30

I.10 Endommagement observé sur lentille au cours des années d'utilisation …….. 30

I.11 Réparation des lentilles des optiques automobiles ……. 31

I.11.1 Réaliser le ponçage …… 31

I.11.1.1 finition et lustrage (méthode classique et rapide) …… 32

I.11.1.2 Finition par vernis (méthode professionnelle et de haute qualité)…… 34

I.12 Conclusion…….. 35

ChapitreII:Résistance à l'érosion des optiques automobiles

II. Résistance à l'érosion des optiques automobiles…… 37

II.1Introduction…….. 37

II.2 Définition du phénomène d'érosion…….. 37

II.3 Comportement des matériaux à l'érosion ……..…….. 38

II.4 Paramètres influençant sur le comportement des matériaux à l'érosion ……..…….. 40

II.4.1 Vitesses des particules …..……. 40

II.4.2 Taille des particules ……..…….. 41

II.4.3 Forme des particules ……..…… 41

II.4.4 Angle d'impact de l'angle d'incidence…..……. 42

II.4.5 Propriétés de matériau des particules et de l'échantillon ……..…. 43

II.5 Installations d'érosion commerciales et de laboratoire ……..…….. 43

II.5.1 Appareils souffleurs de sable …….. 43

II.6 Composants utilisés dans la machine de sablage …… 46

II.6.1 Pistolet de sablage …… 46

II.6.2 Matériaux abrasifs …… 46

II.6.3 Boîtiers de sablage abrasif…… 46

II.6.4 Dispositifs antipollution de l'air (équipement de réduction)…… 46

II.6.5 Compresseur d'air…… 47

II.7 Banc d'essai d'érosion réalisé …… 47

II.8 Principe de fonctionnement …… 49

II.9 Sable utilisé …… 49

II.10 Conditions opératoires …… 50

ChapitreIII:Partieexpérimentale

III. 1 Introduction …… 50

III. 2 Conditions opératoires …… 51

III. 3 Techniques d'analyses…….. 51

III.4 Résultats et discussion …….. 53

III.4.1 Perte de poids …… 53

III.4.1.1 Effet de l'angle d'impact …… 53

III.4.1.2 Effet des années d'utilisation …….. 56

III.4.2 Taux d'érosion …….. 58

III.4.2.1 Effet des années d'utilisation …….. 58

III.4.2.2 Effet de l'angle d'impact……. 60

III.4.3 Observation microscopique …….. 63

III.5 Conclusion …… 66

Conclusion générale……..……...…… 67

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES……..… VI

LALISTEDESFIGURES

Chapitre I: Présentation de l'organisme d'accueil

Figure	Titre	Page
I.1	Les phares avant	04
I.2	Feux de croisement et feux de route	05
I.3	Feux de jour	05
I.4	feux de arrière	06
I.5	Feux antibrouillard	07
I.6	Systèmes d'éclairage adaptatif	07
I.7	Réflecteur	08
I.8	Source lumineuse	09
I.9	Lentille	10
I.10	Réflecteur de signalisation	11
I.11	Boîtier	12
I.12	Coupe longitudinale montrant les différentes couches de la lentille de l'optique automobile	12
I.13	Les ampoules halogènes	13
I.14	Les ampoules xénon	15
I.15	Phares LED	16
I.16	Phares laser	18
I.17	Phares OLED	19
I.18	la formule structurale du polycarbonate.	22
I.19	Rayures et éclats de pierre, réparation possible avec renforcement du phare	30
I.20	Dégâts trop profonds, ils ne peuvent pas être réparé	30
I.21A	pulvérisateur	31
I.21.B	ponceuse orbitale pneumatique	31
I.22	Réalisation le ponçage	32

I.23A	pâte à polir pour polycarbonate p80 pc	33
I.23.B	polish haute brillance pour polycarbonate p90 pc	33
I.24A	patin de polissage bleu	33
I.24.B	patin de polissage orange	33
I.25	Primaire d'adhérence pour polycarbonate	34
I.26	vernis transparent bicomposant rapid	35
	ChapitreII:Résistance à l'érosion des optiques automobiles	
II.1	L'érosion par particules solides	38
II.2	Séquence d'un impact de particule unique	39
II.3	Comportements typiques des matériaux vis-à-vis l'érosion	40
II.4	Forme interne d'une buse : (a) avant utilisation, (b) après de 10 heures d'usage	44
II.5	Schéma explicatif de banc d'essai réalisé	47
II.6	Banc d'essai d'érosion réalisé au LRM	48
II.7	Micrographies des particules de sable utilisés dans les essais d'érosion (500 µm)	49
	Chapitre III: Partie expérimentale	
III.1	Échantillons tirés des lentilles d'optique automobile.	51
III.2	Banc d'essai d'érosion réalisé au laboratoire de rhéologie et mécanique (LRM) université de chlef.	52
III.3	Balance utilisée au cours de notre étude.	52
III.4	Microscope optique utilisé pour analyser les cicatrices.	52
III.5	Variation de la perte de poids en fonction de l'angle d'impact, **érosion pendant 20 secondes**	53
III.6	Variation de la perte de poids en fonction de l'angle d'impact, érosion pendant 40 secondes	55
III.7	Variation de la perte de poids en fonction des années d'utilisation, **érosion pendant 20 secondes.**	56
III.8	Variation de la perte de poids en fonction des années d'utilisation, érosion pendant 40 secondes	57
III.9	Variation de taux d'érosion en fonction des années d'utilisation, **érosion pendant 20 secondes.**	59

III.10	Variation de taux d'érosion en fonction des années d'utilisation, **érosion pendant 40 secondes.**	60
III.11	Variation de taux d'érosion en fonction de l'angle d'impact, érosion pendant 20 secondes.	61
III.12	Variation de taux d'érosion en fonction de l'angle d'impact, érosion pendant 40 secondes.	62
III.13	Érosion pendant 20 secondes, angle d'impact 30 °	63
III.14	Érosion pendant 20 secondes, angle d'impact 60 °	63
III.15	Érosion pendant 20 secondes, angle d'impact 90 °	64
III.16	Érosion pendant 40 secondes, angle d'impact 30 °	65
III.17	Érosion pendant 40 secondes, angle d'impact 60 °	65
III.18	Érosion pendant 40 secondes, angle d'impact 90 °	66

LALISTEDESTABLEAUX

Tableau	Titre	page
	ChapitreI:Recherche bibliographique	
I.1	propriétés mécaniques et propriété thermique du polycarbonate	25
	ChapitreII:Résistance à l'érosion des optiques automobiles	
II.1	Quelques simulateurs du processus d'érosion utilisés dans les laboratoires.	44
II.2	Composition chimique du sable utilisé	50
II.3	Composition minéralogique du sable utilisé	50

Introduction générale

Introduction générale :

Pour un intérêt commun entre l'industriel et l'utilisateur dans le domaine automobile, l'optique à un rôle important. L'utilisation des différents matériaux (polymère, verre), l'existence des endroits particulièrement exposés et les conditions climatiques dans lesquelles le véhicule est exploité causent des endommagements sérieux à lentille de l'optique des véhicules et à la couche de sa protection (vernis).

Dégradation par abrasion: L'usure abrasive ou abrasion est généralement définie comme l'usure provoquée par le déplacement de matériau de surface en raison du glissement de particules dures le long de la surface. En 1824, Friedrich Mohs a présenté son échelle de résistance à l'abrasion en fonction de la dureté relative de 10 minéraux, dans son essai, il frotte deux matériaux l'un sur l'autre, le matériau le plus dure c'est lui qui va résister au frottement et montre un faible endommagement et perte du matériau.Un domaine d'intérêt en tribologie est celui liés à l'érosion par particules solides,il est définit comme la perte progressive de matière d'une surface en raison d'une interaction mécanique entre cette surface et les particules solides entraînées par un écoulement d'air.

La plupart des polymères organiques (et des matériaux correspondants) sont, de par leur structure caténaire, considérés comme des composéssensibles à leur environnement et sujets au vieillissement. La dégradation d'un polymère est le changement, généralement non désiré, de ses propriétés physiques et mécaniques, causé par des facteurs environnementaux plus ou moins agressifs : radiation solaire, l'effet des radiations ultraviolet, température, environnement chimique, contraintes mécaniques, attaque biologique, pluie acide...etc. L'effet des Ultraviolets et le gradient de la température sur la résistance à l'érosion des lentilles des optiques des véhicules constituent un intérêt a la fois scientifique et industriel.Les études menées traitent l'influence des facteurs environnementaux par des essais artificielles accélérées et dans des périodes qui ne dépasse pas généralement une année, ce qui peut détériore la microstructure de polycarbonate, et les résultats ne donnent pas une bonne corrélation avec ce qui ce passe durant l'exploitation réelle de lentille.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier le comportement à l'érosion des lentilles d'optiques automobiles utilisées dans un endroit au nord d'Algérie. Pour ce but, des essais expérimentaux d'érosion par particules solide sont exécutés dans un banc d'essai réalisé dans laboratoire de Rhéologie et Mécanique (LRM) de l'université de HassibaBenboualiChlef.

Plusieurs échantillons de lentilles d'optiques ont été obtenus à partir des véhicules exploités durant les périodes : 2, 4, 8 et 10 années dans ce milieu. Après une introduction générale, Ce mémoire est organisé sur trois chapitres comme suit :

Dans le **chapitre 1** une synthèse bibliographique sur les Types des feux dans l'automobile, Concept de base de polycarbonate et Vieillissement des polymères sous l'impact environnemental et Réparation des lentilles des optiques automobiles

Le **chapitre 2** présente des généralités sur le phénomène d'érosion, les Paramètres influençant sur le comportement des matériaux à l'érosion, et une présentation de banc d'essai utilisé.

Le **chapitre 3** est dédié à l'étude de la résistance à l'érosion des optiques automobiles. Dans la première partie on présente les conditions opératoires de l'essai et les techniques d'analyse. Dans la deuxième partie comprend les résultats obtenus etles interprétations et les discussions. Une conclusion récapitulative des résultats est aussi présentée.

Le mémoire se termine par une conclusion générale sur l'influence de la durée d'utilisation et l'influence de l'angle d'impact et de la durée de sablage sur le comportement à l'érosion des optiques automobiles .

Chapitre I :

Recherche bibliographique

I :Recherche bibliographique

I.1 Introduction :

L'érosion par sable des optiques automobiles est un problème courant qui affecte la clarté et la visibilité des phares et des feux arrière des véhicules.

Un aspect important de ce problème est que les optiques des voitures modernes sont souvent fabriquées à partir de polycarbonate, un matériau transparent et résistant aux chocs. Cependant, le polycarbonate est plus sensible aux rayures et à l'abrasion que le verre traditionnel. Au fil du temps, les particules de sable soulevées par le vent ou projetées par les autres véhicules peuvent donc endommager la surface des optiques, créant des rayures et rendant le matériau terne et opaque.

Les conséquences de l'érosion par sable des optiques automobiles peuvent être significatives. La principale préoccupation concerne la réduction de la visibilité. Lorsque les optiques sont érodées, la quantité de lumière émise par les phares diminue, ce qui peut compromettre la visibilité du conducteur la nuit ou par mauvais temps. Cela peut augmenter le risque d'accidents.

Le polycarbonate utilisé dans les optiques automobiles est un matériau thermoplastique amorphe découvert en 1953 par Schnell, Bottenbruch et Krimm, trois chercheurs travaillant pour Bayer AG et par le D^{r} Daniel W. Fox de General Electric ,Sa première mise sur le marché date de 1958, sa consommation mondiale annuelle actuelle est de 1 200 000 tonnes.

Le polycarbonate est un polymère issu de la polycondensation du bisphénol A et d'un carbonate ou du phosgène (chlorure de carbonyle),Ce procédé de fabrication est le plus courant et reste aujourd'hui le plus utilisé par les principaux producteurs.

Le polycarbonate a, comme avantages, d'être un matériau transparent avec une très bonne résistance au choc, une résistance thermique permettant une utilisation jusqu'à 120 ˚C et une excellente esthétique par sa transparence.

Dans ce chapitre, nous présentons une recherche bibliographique sur les optiques automobile (types, composition, matériaux de fabrication, source d’allumage… etc).), Et sur

le phénomène de dégradation des polymères sous l'impact environnementale suivi par le procéder de réparation des optiques automobiles **[1]**.

I.2Types de feux dans l'automobile :

Les optiques automobiles sont les systèmes d'éclairage installés sur les véhicules pour fournir une visibilité et une signalisation appropriées, tant pour le conducteur que pour les autres usagers de la route. Voici quelques généralités sur les optiques automobiles **[2]**:

I.2.1 Phares avant :

Les phares avant sont les principaux systèmes d'éclairage utilisés pour éclairer la route devant le véhicule. Ils sont essentiels pour une conduite sûre, surtout la nuit et par mauvaise visibilité. Les technologies les plus couramment utilisées pour les phares avant sont les ampoules halogènes, les lampes au xénon (HID) et les diodes électroluminescentes (LED).



Figure I.1 : Les phares avant [3].

I.2.2 Feux de croisement et feux de route :

Les phares avant sont souvent équipés de feux de croisement et de feux de route. Les feux de croisement éclairent la route devant le véhicule sans éblouir les conducteurs venant en sens inverse, tandis que les feux de route fournissent une illumination maximale de la route lorsque la visibilité le permet.



Figure I.2 : Feux de croisement et feux de route [3].

I.2.3Feuxdejour :

Les feux de jour sont des optiques spécifiques conçues pour améliorer la visibilité des véhicules pendant la journée. Ils sont généralement situés à l'avant du véhicule et utilisent des technologies économes en énergie, telles que des LED, pour une meilleure efficacité.



Figure I.3 : Feux de jour [3].

I.2.4Feux arrière :

Les feux arrière servent à signaler les intentions du conducteur et à avertir les autres usagers de la route lors du freinage ou des changements de direction. Ils comprennent les feux de position, les feux de stop, les clignotants et les feux de recul.



Figure I.4 : feux d'arrière [3].

I.2.5Feux antibrouillard :

Les feux antibrouillard sont conçus pour améliorer la visibilité lors de conditions de brouillard, de pluie ou de neige.

Ils sont généralement situés à l'avant et à l'arrière du véhicule et fournissent un éclairage plus bas et plus large que les phares normaux **[2]**.



Figure I.5 : Feux antibrouillard [3].

I.2.6 Systèmes d'éclairage adaptatif :

Certains véhicules sont équipés de systèmes d'éclairage adaptatif, tels que les phares directionnels, les phares automatiques ou les feux de virage, qui ajustent automatiquement l'angle et l'intensité de l'éclairage en fonction des conditions de conduite pour une visibilité optimale.

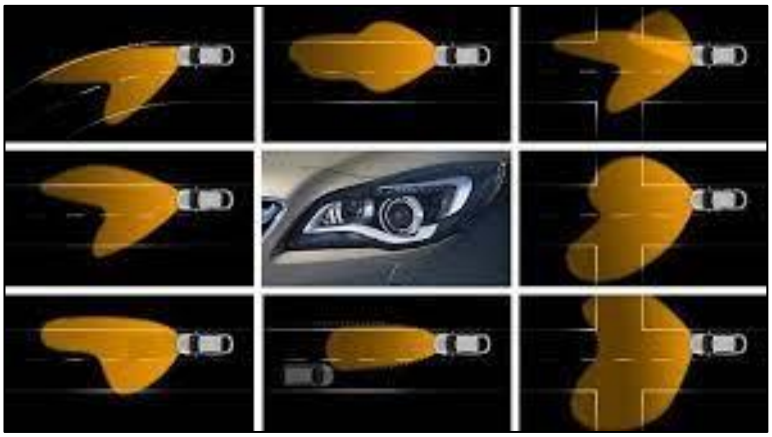


Figure I.6 : Systèmes d'éclairage adaptatif [3].

Il est important de noter que les réglementations sur les optiques automobiles peuvent varier d'un pays à l'autre. Les normes de sécurité et les exigences légales concernant les optiques automobiles sont mises en place pour assurer une visibilité adéquate, une signalisation efficace et minimiser les éblouissements pour les autres conducteurs.

I.3 Composition de l'optique automobile :

L'optique automobile est généralement composée de plusieurs éléments qui travaillent ensemble pour fournir un éclairage adéquat et une signalisation efficace sur les véhicules. Voici les principaux composants d'une optique automobile **[2]**.

I.3.1 Réflecteur :

Le réflecteur est une pièce généralement métallique située à l'arrière de l'optique. Il réfléchit la lumière émise par la source lumineuse (ampoule, LED, etc.) dans une direction spécifique, contribuant ainsi à la formation du faisceau lumineux.

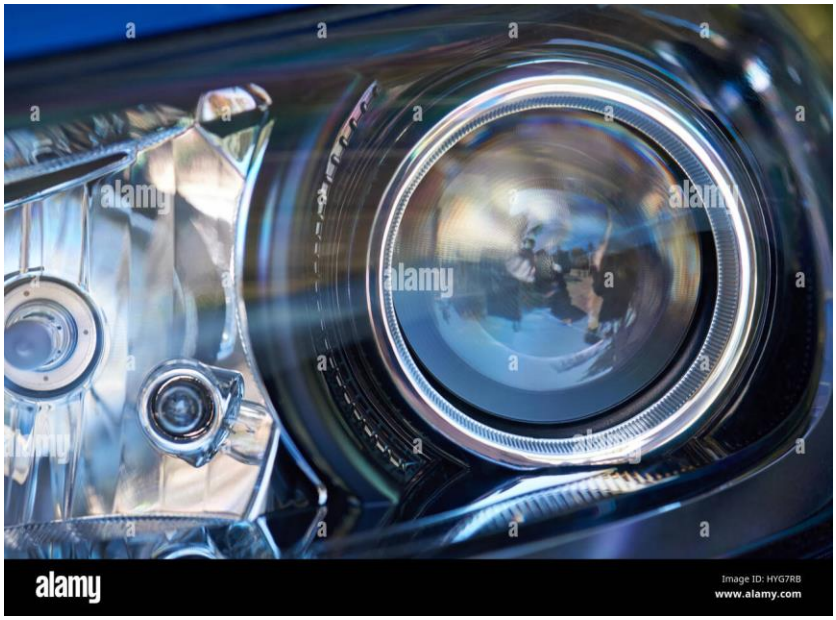


Figure I.7 : Réflecteur [3].

I.3.2 Source lumineuse :

La source lumineuse peut être une ampoule traditionnelle (halogène), une lampe au xénon (HID) ou des diodes électroluminescentes (LED). La source lumineuse émet de la lumière lorsqu'elle est alimentée en électricité, et c'est cette lumière qui est utilisée pour l'éclairage avant, arrière et latéral du véhicule.



Figure I.8 : Source lumineuse [4].

I.3.3Lentille :

La lentille est un élément transparent situé à l'avant de l'optique. Elle aide à diriger le flux lumineux émis par la source lumineuse et à le concentrer dans un motif spécifique. La lentille peut être conçue pour créer des motifs d'éclairage spécifiques, tels que des faisceaux de croisement, des faisceaux de route ou des motifs de signalisation **[2]**.



Figure I.9 : Lentille [3].

I.3.4 Réflecteur de signalisation :

Certains optiques automobiles, tels que les clignotants, les feux de freinage ou les feux de recul, peuvent comporter des réflecteurs de signalisation. Ces réflecteurs sont conçus pour réfléchir la lumière émise par la source lumineuse dans une direction spécifique, augmentant ainsi la visibilité des signaux de signalisation.



Figure I.10 :Réflecteur de signalisation [3].

I.3.5Circuit électrique et connecteurs :

Les optiques automobiles sont connectées au système électrique du véhicule via des connecteurs spécifiques. Le circuit électrique alimente la source lumineuse et peut inclure des fonctions telles que le contrôle de l'intensité lumineuse, le clignotement ou l'activation automatique des feux.

I.3.6 Boîtier :

Le boîtier de l'optique automobile est généralement en plastique ou en verre, et il protège les composants internes des éléments extérieurs tels que la poussière, l'humidité et les impacts. Il peut également comporter des dispositifs de fixation pour l'installation de l'optique sur le véhicule **[2]**.



Figure I.11 : Boîtier [3].

Ces composants peuvent varier en fonction du type d'optique automobile et des technologies utilisées. Les avancées récentes dans le domaine des optiques automobiles ont vu l'adoption croissante de la technologie LED en raison de sa durabilité, de son efficacité énergétique et de sa polyvalence dans la création de motifs d'éclairage spécifiques **[2]**.

I.4 Composition de la lentille de l'optique automobile :

Le matériau en verre optique a été remplacé par du polycarbonate qui offre une meilleure résistance chimique et mécanique cette couche de lentille est composé en deux couches : une couche de base en polycarbonate et une couche transparente (vernis de protection) (Figure I.12) **[5]**.

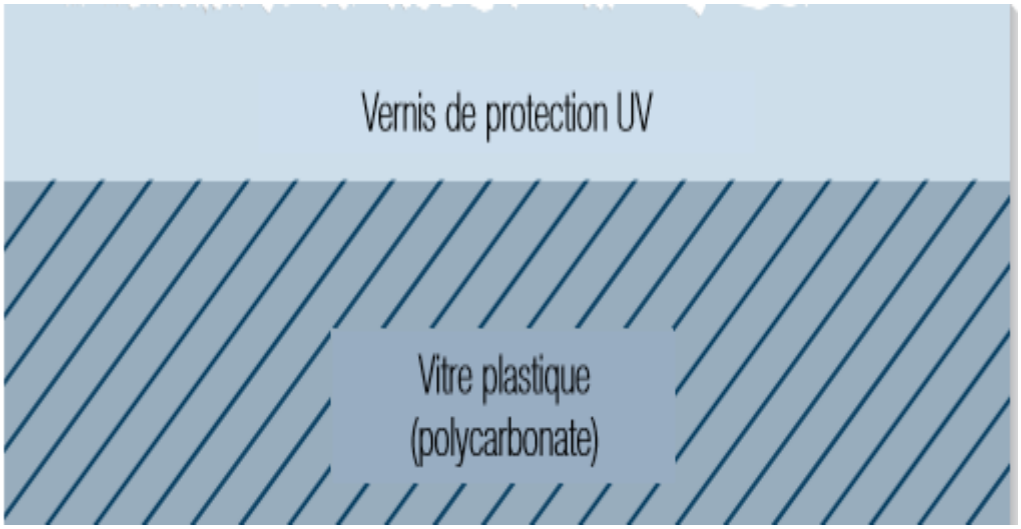


Figure I.12 : Coupe longitudinale montrant les différentes couches de la lentille de l'optique automobile **[5]**.

A. Couche de base :

Substrat de la lentille en polycarbonate.

B. Couche de protection :

Une couche finale de vernis de protection contre les UVsvient recouvrir la couche de base afin de donner un éclat et de la protégée des contraintes mécaniques et chimiques en construisant le premier mur contre les agressions extérieures telles que l'humidité, la lumière, la température, les chocs, les rayures, l'érosion par sable, les pluies acides et le contact avec les produits chimiques.

Cette couche joue également un rôle important dans le renouvellement de l'optique de la voiture**[5]**.

I.5Source de lumière dans l'optique automobile :

I.5.1Les ampoules halogènes :

L'ampoule halogène est le plus vieux modèle et surtout le plus répandu, ce sont les traditionnelles ampoules avec filament. Pour son fonctionnement un courant électrique est envoyé sur le filament métallique qui chauffe et créé une source lumineuse **[2]**.



Figure I.13 : Les ampoules halogènes [4].

A. Les avantages :

- Durée de vie longue (plus de 1000 heures),

- S'adapte à la plupart des types de voiture,

- Prix très intéressant.

B. Les inconvénients :

-Consommation d'énergie/chaleur,

-Fragile, peu vite se détériorer à cause des éléments extérieurs (humidité…).

C. Portée en feux de route :

-Minimum 100m, généralement 150m .

I.5.2Les ampoules xénon :

Les ampoules dites à xénon sont constituées d'un gaz le XÉNON (Xe) (tout comme les néons sont constitués du gaz Néon (Ne). Présentes sur le marché depuis plus de 30 ans, les ampoules à xénon sont reconnues pour leur longévité et leur couleur blanche tirant.

Elles sont aujourd'hui majoritairement utilisées sur les voitures haut de gamme. Le courant électrique est envoyé dans le gaz Xénon pour l'exciter et donc générer sa source lumineuse **[2]**.



Figure I.14 : Les ampoules xénon [4].

A. Les avantages :

-Puissance et intensité lumineuse,

-Faisceau lumineux très net,

-Longévité (plus de 2000 heures).

B. Les inconvénients :

-Le gaz xénon est un gaz rare, qui rend les ampoules chères,

-Peuvent éblouir facilement si mal réglées.

C. Portée en feux de route :

-À peu près 220m.

I.5.3 Phares LED :

Les phares LED (Light Emitting Diode ou Diode Electroluminescente) sont très récents sur le marché de l'automobile. Les phares LED sont bien sûr plus puissants que les ampoules xénon mais plus agréable pour les yeux, ils ont moins tendance à éblouir. Les LED ont la particularité d'avoir une consommation d'énergie très faible par rapport aux ampoules xénon, elles sont donc très souvent utilisées pour les voitures électriques.

Une de leur distinction est leur petite taille, les LED, qui peuvent facilement être assemblées, permettent aux constructeurs automobiles de créer de nouvelles formes, de nouveaux design aux phares, ce qui apportent une touche de singularité aux voitures qui en sont dotées. Cependant, l'utilisation des LED au niveau automobile reste complexe : les LED ont tendance à chauffer fort lorsqu'elles sont en marche, risquant d'enflammer d'autres éléments. Au départ, elles n'étaient utilisées que pour les clignotants et les feux stop. On les trouve récemment appliquées aux phares avant de certaines voitures **[2]**.

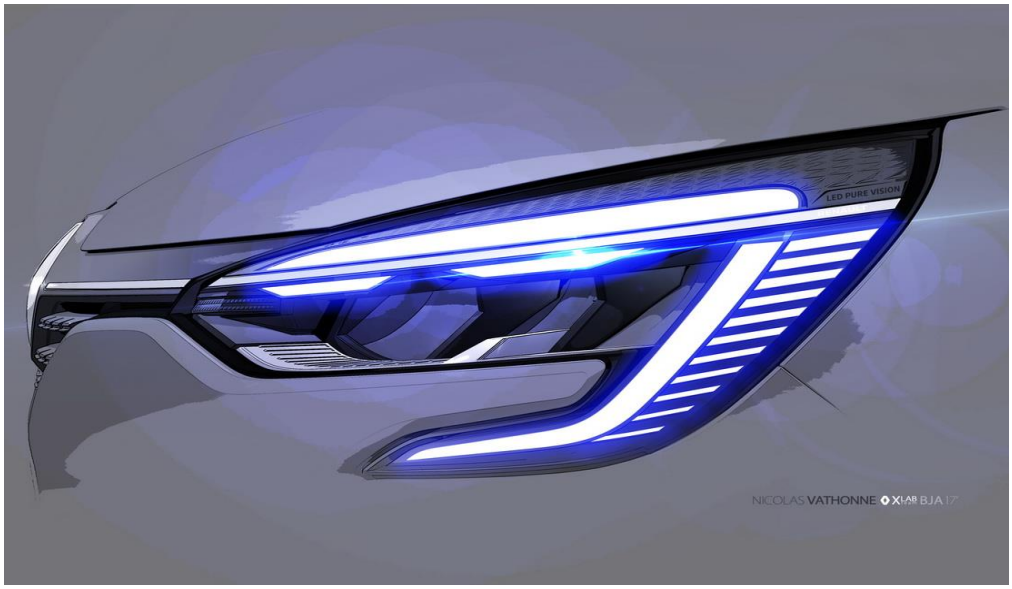


Figure I.15 : Phares LED [3].

I.5.3.1 Principe de fonctionnement :

Tout comme les ampoules halogènes et xénon, les diodes électroluminescentes émettent de la lumière lorsqu'elles sont traversées par un courant électrique. Les diodes électroluminescentes sont composées de 3 « couches » (bande de conduction / bande interdite / bande de valence) assemblées les unes aux autres qui, lorsqu'elles sont traversées par le courant, produisent la lumière.

A. Les avantages :

-Faible consommation d'énergie, durée de vie encore plus longue que les ampoules xénon,

-De petite taille qui permettent leur personnalisation, design pour des formes originales (notamment représenté sur les Audi),

-Éclairage plus puissant et confortable pour la visibilité des autres conducteurs.

B. Les inconvénients :

-Technologie encore chère.

C. Portée en feux de route :

-À peu près 300m.

I.5.4Phares laser :

Les phares laser est une technologie encore toute récente dans le milieu automobile. Les phares laser ont un faisceau lumineux avec une portée multipliée par deux par rapport aux phares à LED, ils sont aussi 1000 fois plus puissants que les ampoules halogènes.

Ce faisceau peut aussi prendre n'importe quelle forme et se déplacer en fonction de la conduite, de la route.

La lumière des phares laser est extrêmement puissante et précise par rapport aux autres feux. Pour son fonctionnement, grâce à un miroir, on concentre l'énergie dégagée par les atomes afin de produire un rayon laser **[2]**.



Figure I.16 : Phares laser [3].

A. Les avantages :

-Éclairage à grande portée et très précis

B. les inconvénients :

-Extrêmement coûteux

C. Portée en feux de route :

-Éclairage à 600m.

I.5.5 phares OLED :

La technologie des phares OLED (Diode Electroluminescente Organique) est la dernière innovation pour l'éclairage automobile. Ces phares offrent encore plus de possibilité au niveau du design, des formes et des couleurs. Les OLED sont plus économes que les LED (très bien positionnées par rapport aux impacts environnementaux), offrent une lumière plus homogène/répartie et un peu moins intense que la lumière LED. Son fonctionnement est le même que les phares LED sauf qu'il s'agit de diodes faites de matières semi-conductrices organiques en couches superposées **[2]**.



Figure I.17 : Phares OLED [3].

A.Les avantages :

-Une possibilité de design encore plus grande,

-Encore plus économe que les LED,

-Résistantes aux fortes températures.

B. Des avantages :

-Intensité plus faible que les LED,

-À utiliser pour les feux de signalisation, à l'arrière (et en complément des LED) ou encore à l'intérieur des voitures.

I.6Caractéristiques de polycarbonate :

Les exigences mécaniques et chimiques pour l'optique automobile pour des périodes d'utilisation longues sont strictes. Au premier rang desquels figure le maintien de l'état de surface des optiques soumises aux contraintes environnementales (rayons UV, eau, oxydation, températures extrêmes, chocs, etc.) : il s'agit de la sécurité de l'homme (conducteur). Le matériau de fabrication le plus couramment utilisé pour les optiques automobiles est le polycarbonate. Le polycarbonate est un polymère thermoplastique transparent, solide et résistant aux chocs. Il présente plusieurs avantages qui en font un choix populaire pour les optiques automobiles **[5]**.

I.6.1Transparence et transmission de la lumière :

Le polycarbonate offre une excellente transparence optique, ce qui permet une transmission élevée de la lumière à travers le matériau. Cela signifie que les optiques en polycarbonate permettent un éclairage efficace et une bonne visibilité pour le conducteur et les autres usagers de la route.

I.6.2 Résistance aux chocs:

Le polycarbonate est connu pour sa résistance exceptionnelle aux chocs. Il est capable de résister à des impacts élevés sans se briser, ce qui est essentiel pour les optiques automobiles exposées à des conditions routières difficiles, aux vibrations et aux risques d'impact.

I.6.3 Légèreté :

Le polycarbonate est un matériau léger par rapport à d'autres options telles que le verre. Sa légèreté contribue à réduire le poids total du véhicule, ce qui peut avoir un impact positif sur l'efficacité énergétique et les performances globales.

I.6.4 Flexibilité de conception :

Le polycarbonate est un matériau facile à moulé et à façonner, ce qui offre une grande flexibilité de conception lors de la fabrication des optiques automobiles. Il peut être moulé dans différentes formes, ce qui permet de créer des lentilles complexes et des motifs d'éclairage spécifiques pour répondre aux besoins esthétiques et fonctionnels des véhicules **.**

I.6.5 Résistance aux rayons ultraviolets (UV) :

Le polycarbonate a une bonne résistance aux rayons UV. Il est capable de résister à l'exposition prolongée au soleil sans subir de dégradation significative. Cette résistance aux UV aide à prévenir le jaunissement ou la dégradation du matériau, ce qui permet aux optiques en polycarbonate de conserver leur clarté et leur performance optique dans le temps

I.6.6 Coût abordable :

Le polycarbonate est généralement plus abordable que d'autres matériaux, comme le verre, ce qui en fait un choix économique pour les optiques automobiles.

En raison de ces caractéristiques, le polycarbonate est largement utilisé pour fabriquer les lentilles des phares avant et des feux arrière des véhicules. Cependant, il convient de noter que certains optiques automobiles haut de gamme peuvent utiliser d'autres matériaux, tels que le verre, pour des performances optiques spécifiques ou pour des exigences de design particulières.

Cependant, il est important de noter que le polycarbonate peut être sensible aux rayures, ce qui peut affecter la clarté optique à long terme. Par conséquent, il est courant de trouver des traitements de surface tels que des revêtements anti-rayures pour améliorer la durabilité et la résistance aux rayures des optiques en polycarbonate **[5]**.

I.7 Concept de base de polycarbonate :

Le polycarbonate est un matériau plastique composé de plaques transparentes superposées. Ce plastique possède la principale caractéristique d’être extrêmement résistant, difficilement déformable et difficilement inflammable. Il a vu le jour dans les années 50 en Europe (découvert par des chercheurs allemands). Utilisé pour un grand nombre de surface

vitrée, c'est aussi un matériel particulièrement approprié pour tous les objets demandant une résistance aux chocs et aux rayures **[6]**.

Deux familles de matériaux sont couramment utilisées dans l'industrie pour leur propriété de transparence: les verres set les polymères. Parmi ces deux familles, les trois matériaux les plus répandus sont le verre, le poly méthacrylate de méthyle (PMMA) et le polycarbonate (PC). Dans cette section, une attention particulière a été donnée au polycarbonate. Son étude porte sur son élaboration et sa composition chimique, ses propriétés et sa mise en forme. Le polycarbonate mis à disposition pour ces travaux de doctorat est le MAKROLON 2458 de chez Bayer (Leverkusen, Allemagne). Ce n'est pas la nuance exacte utilisée pour les vitres de phares automobile avant. Les constructeurs de phares utilisent néanmoins des nuances dont les propriétés sont sensiblement identiques à celles du MAKROLON 2458. Une étude comparative entre le MAKROLON 2458 et le polycarbonate utilisé par le Groupe PSA, partenaire de ces travaux, sera réalisée avant de commencer l'étude de la buée. Dans cette partie, les caractéristiques générales relatives au polycarbonate s'appliquent bien évidemment aux deux polycarbonates : le MAKROLON 2458 et celui utilisé par le Groupe PSA **[7]**.

I.7.1Les liants polycarbonates :

Les polycarbonates sont des composés macromoléculaires obtenus principalement à partir du diphénylolpropane, ou bisphénol A, par polycondensation avec un carbonate **[8]**.

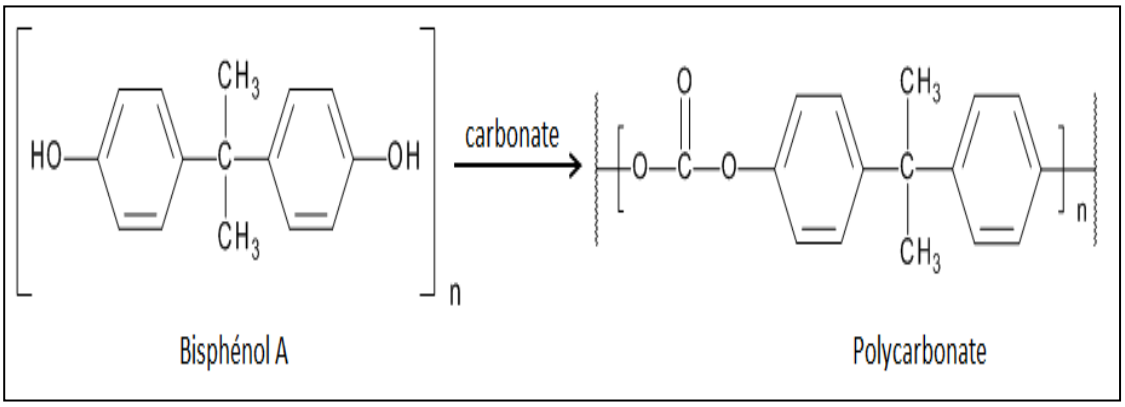


Figure I.18 : la formule structurale du polycarbonate **[8]**.

I.7.2 Les solvants :

Pour l'assemblage de PC avec lui-même, le collage par solvants est de loin la méthode la plus facile et la plus économique tout en donnant un joint avec une résistance mécanique élevée (meilleure qu'avec des adhésifs).

-dichloroéthane,

-le dioxane,

-le monochlorobenzène.

et les mélanges de ces solvants sont utilisés dans les opérations de collage des polycarbonates sur eux-mêmes.

I.7.3 Les plastifiants :

Les plastifiants principaux sont le bisphénol A et les phtalates. Le bisphénol A est une résine d'époxyde et de polycarbonate que l'on trouve dans la résine d'époxy et dans de nombreux plastiques **[9]**.

I.8 Principales caractéristiques du Polycarbonate :

Voici quelque caractéristique du polycarbonate **[10] :**

- bonne résistance mécanique,
- bonne résistance au fluage,
- résistance aux chocs exceptionnelle,
- température de déformation sous charge élevée,
- faible reprise d'humidité,
- bonne stabilité dimensionnelle,
- transmission lumineuse élevée (jusqu'à 90 %),
- légèreté (la moitié de la densité du verre à vitres),
- bonne résistance aux intempéries,
- bonne propriété d'isolation électrique,
- bonne résistance aux rayonnements à haute énergie,
- auto-extinguible,
- facilement usinable,

- Solidité et rigidité élevées,
- Grande résistance à la déformation thermique,
- Stabilité chimique moyenne.

I.8.1Propriétés physico-chimique :

A. Solubilité :

Les meilleurs solvants du polycarbonate pour les opérations de nettoyage (par exemple) sont **[8] :**

- Acétone,
- Dichlorométhane.

B. Stabilité :

Les polycarbonates sont des matériaux à usage technique, durs et rigides, difficilement combustibles **[8] :**

dont les propriétés principales sont :

- Stabilité mécanique et dimensionnelle avec une exceptionnelle résistance aux chocs qui en fait le matériau de choix pour la fabrication des casques de moto, de pompiers, etc,
- Solidité et résistance à l'abrasion ,
- Bonne stabilité aux très basses températures jusqu'à -150°c et aux températures élevées jusqu'à 140°c environ ,
- Transparence, 80-90 % à 1mm d'épaisseur ,
- Résistance vis-à-vis des produits chimiques et de certains solvants. Sensible à l'hydrolyse (attaques alcalines) et soluble dans certains solvants aromatiques et dans les solvants halogénés.

Les polycarbonates sont perméables à certains gaz et sensibles aux UV **[7]**.

I.8.2 Propriétés mécaniques :

Si nous parlons des propriétés mécaniques du plexiglas et du polycarbonate, il est nécessaire de mentionner en premier lieu l'extraordinaire résistance de ces matériaux. Le plexiglas et le polycarbonate compact sont beaucoup plus résistants aux chocs que le verre. Les propriétés mécaniques du polycarbonate sont certainement les meilleures de cette catégorie.

La résistance aux impacts, c'est-à-dire la résistance aux chocs, est jusqu'à 25 fois plus élevée dans le cas du polycarbonate que dans le cas du verre. Pas étonnant que l'une des nombreuses applications de ce matériau soit la fabrication de verre pare-balles et de divers types de boucliers balistiques **[11]**.

Tableau I.1 : propriétés mécaniques et propriété thermique du polycarbonate **[11]**.

Propriété mécanique	
module d'élasticité longitudinal	2400 MPa
résistance à la flexion	~90 Mpa
résistance à la compression	> 80 Mpa
résistance aux chocs (Izod)	10 kJ/m^2
absorption de l'eau	0,15%
résistance à la traction	> 60 Mpa
allongement lors de l'étirement	6%
Propriété thermique	
température de fonte	> 148°C
température maximale d'utilisation	120°C
capacité thermique spécifique	1,2-1,3 J/g/K

I.9 Vieillissement des polymères sous l'impact environnemental :

Au cours du temps et selon les modes d'utilisation des matières plastiques, on observe souvent une altération des propriétés des polymères, altération qui peut entraîner la mise hors service de ces produits.

La dégradation des polymères est un processus par lequel les polymères se décomposent ou se fragmentent en de plus petites unités chimiques. Il existe différents mécanismes de dégradation des polymères, notamment la dégradation thermique, chimique, biologique et photochimique.

La dégradation thermique des polymères se produit lorsqu'ils sont exposés à des températures élevées telles que l'exposition au soleil, dans notre étude la combinaison entre le soleil et la source de lumière dans l'optique. La dégradation chimique des polymères se produit lorsque des réactions chimiques se produisent entre le polymère et certains agents chimiques, tels que les pluies acides. La dégradation biologique des polymères se produit lorsque des organismes tels que les bactéries, les champignons. La dégradation photochimique des polymères se produit lorsque le polymère est exposé à la lumière, en particulier aux rayons ultraviolets (UV). Les rayons UV peuvent provoquer des réactions chimiques dans la structure du polymère, ce qui entraîne sa dégradation votre référence.

Il est important de noter que tous les polymères ne se dégradent pas de la même manière ni à la même vitesse. Certains polymères sont conçus pour être biodégradables, ce qui signifie qu'ils peuvent se dégrader plus rapidement dans des conditions spécifiques. D'autres polymères, tels que le polyéthylène (PE) ou le polypropylène (PP), sont considérés comme non biodégradables et peuvent mettre des centaines d'années à se dégrader dans l'environnement **[12]**.

I.9.1 Principaux types de vieillissement :

Le terme de vieillissement définit l'ensemble des processus chimiques et physiques irréversibles se produisant, au cours du temps, dans un matériau. Pour des conditions extérieures comme (température, agents chimiques, radiations UV …). Le polymère subit ces contraintes, au cours de la mise en forme et à l'usage.

I.9.1.1Vieillissement physique :

Le terme vieillissement physique englobe tous les processus conduisant à une altération irréversible des propriétés d'utilisation du matériau sans qu'il y ait modification chimique de la structure des macromolécules constituant le matériau Le vieillissement physique peut résulter de **[12]**.

- Modifications de la configuration spatiale des macromolécules (cristallisation),
- Phénomène de surface (fissuration milieu tensioactif).
- Phénomène de transport (pénétration de solvants, migration d'adjuvants). On distingue deux grandes catégories de phénomènes selon qu'ils impliquent ou non un transfert de masse c'est-à-dire un transport de petites molécules du matériau vers l'environnement (perte d'adjuvants) ou de l'environnement vers le matériau (absorption de solvants)

I.9.1.2 Vieillissement physique avec transfert de masse :

Les phénomènes de transport de masse font essentiellement appel aux notions de solubilité, de diffusion et de plastification

A. Pénétration de solvants :

La pénétration de solvants a pour conséquence le gonflement du polymère aussi la plastification qui se traduit par une modification du comportement mécanique du matériau

B. Perte d'adjuvants :

La perte d'adjuvants résulte de la migration de ces derniers hors des matériaux, dans tous les cas le départ de l'adjuvant se traduit par la perte des propriétés qu'il était censé d'apporter au polymère, La vitesse de perte de plastifiants dépend essentiellement de l'épaisseur du matériau de la température, du confinement de l'atmosphère et de la structure du plastifiant.

I.9.1.3 Vieillissement physique sans transfert de masse :

A. Fissuration sous contrainte en milieu tensioactif :

En milieu tensioactif, les polymères sont le siège de fissurations dans les zones les plus contraintes et ceci après un temps pouvant varier entre quelques minutes et quelques jours, selon les conditions et la qualité des polymères. Le phénomène de fissuration est lié au développement de forces de tension superficielle à l'interface polymère liquide **[12]**.

B. Vieillissement physique interne (évolution de la morphologie) :

Le vieillissement physique interne est uniquement lié à des causes internes au matériau (mobilité moléculaire) c'est-à-dire au fait que le matériau est au terme de sa mise en œuvre,

dans un état thermodynamiquement instable, le vieillissement résulte alors d'une évolution plus ou moins lente vers un état plus stable.

C. Chocs thermiques (variations de température) :

Les chocs thermiques peuvent entraîner des ruptures mécaniques induites par dilatation différentielle. Deux mécanismes sont susceptibles d'intervenir.

I.9.2 Vieillissement chimique :

On appelle vieillissement chimique tout phénomène impliquant une modification chimique du matériau (polymère ou ses adjuvants) sous l'influence de l'environnement. En pratique, le vieillissement chimique se superpose souvent à un vieillissement physique et les deux phénomènes interférents **[12]**.

Les principaux types généraux de réaction intervenant lors du vieillissement chimique sont les suivants:

- Coupure de chaînes statistiques,

- Dépolymérisation,

- Réticulation,

- Oxydation,

I.9.2.1. Coupure de chaînes statistiques:

Les coupures de chaînes statistiques se produisent sur des sites distribués de manière aléatoire dans le réseau macromoléculaire.

Une grande variété de mécanismes chimiques peut être la cause de coupure statistique des chaînes. On peut citer la thermolyse, coupure β, l'hydrolyse et la radiolyse.

Sur le plan de la structure, ces coupures de chaînes provoquent une diminution de la masse moyenne dans le cas des polymères linéaires et une diminution du taux de réticulation dans le cas des polymères tridimensionnels. Les propriétés physiques telles que les propriétés optiques, élastiques et thermiques sont très peu affectées par les coupures de chaînes statistiques **[12]**.

Cependant, les coupures de chaînes affectent considérablement les propriétés mécaniques car elles sont responsables de la fragilisation du matériau.

I.9.2.2. Dépolymérisation :

La dépolymérisation est un cas particulier de la réaction de coupure de chaînes, elle conduit à l'élimination d'un fragment moléculaire (monomère) et à une diminution très faible et rapide de la masse moléculaire**.**

Une coupure de chaîne crée un site actif qui déstabilise la liaison monomère voisine et entraîne l'élimination séquentielle de molécules du monomère.

La dépolymérisation est donc l'inverse de la polymérisation, elle est d'autant plus facile que l'énergie de liaison monomère – monomère est faible.

I.9.2.3Réticulation :

La réticulation est la réaction conduisant à la formation de ponts covalents entre les segments de chaînes voisines, elle se traduit par une diminution de la mobilité moléculaire.

Dans le cas des polymères linéaires de taux de réticulation modérés, la réticulation se traduit par l'apparition de chaînes plus ramifiées de masses moléculaires plus élevées que les chaînes initiales.

I.9.2.4 Oxydation :

L'oxydation est une réaction en chaîne amorcée par la rupture d'une liaison en radicaux libres, elle se traduit par l'accumulation de groupes tels que – OH et C=O, la stabilité d'un matériau dépend de la présence de liaisons faibles.

La dégradation oxydante du polyéthylène réticulé chimiquement (PRC) conduit à la formation de composés carbonylés **[12]**.

I.9.3 Dégradation thermique :

Une élévation de température, que ce soit pendant l'utilisation du matériau ou pendant sa mise en œuvre entraîne une dégradation thermique des matières plastiques imputable à la modification de la structure des chaînes macromoléculaires. Cette dégradation thermique peut provoquer soit une rupture des chaînes (cas du polyéthylène PE), soit une dépolymérisation

(cas du polyméthylméthacrylate PMMA), soit une réaction sur les groupes latéraux (formation d'HCl au cours de la pyrolyse du chlorure de polyvinyle PVC). A la limite, la dégradation thermique peut provoquer une combustion, réaction fortement exothermique **[12]**.

I.9.4 Dégradation hydrolytique :

Est principalement réservée aux polymères possédant des hétéro-éléments dans la chaîne principale : polyesters, polyamides, polyéthers, etc …, elle est dûe à l'existence d'équilibres pour les réactions de polymérisation par étapes correspondantes. La vitesse de dégradation est liée à la nature des substituants de la fonction hydrolysable mais aussi à la température, à la valeur du pH et à la concentration de l'eau dans le système. Ce dernier paramètre est extrêmement important, il est étroitement dépendant de l'hydrophilie du matériau **[12]**.

I.9.5 Dégradation par usure :

L'érosion des polycarbonates est un phénomène qui peut se produire sous certaines conditions environnementales ou d'utilisation. L'érosion désigne l'usure ou la détérioration progressive de la surface du polycarbonate, généralement due à des facteurs tels que l'abrasion, l'exposition aux produits chimiques ou à des conditions météorologiques agressives **[12]**.

I.10 Endommagement observé sur lentille au cours des années d'utilisation :

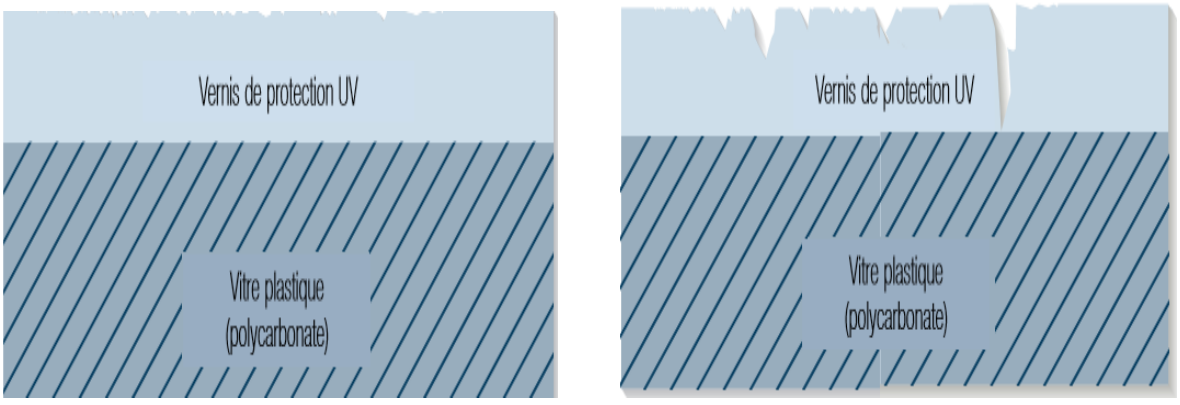


Figure I.19: Rayures et éclats de pierre, réparation possible avec renforcement du phare **[5]**.

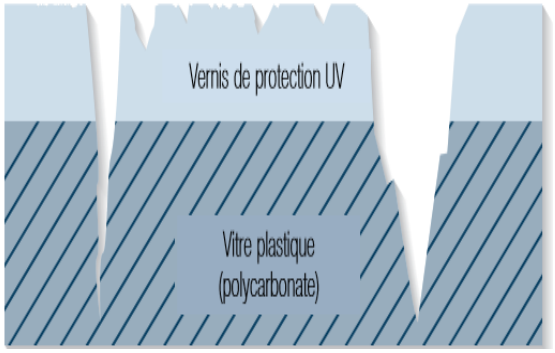


Figure I.20 : Dégâts trop profonds, ils ne peuvent pas être réparé **[5]**.

I.11 Réparation des lentilles des optiques automobile :

Pour éviter toute dégradation de la carrosserie lors du travail de nettoyage, il est préférable de masquer le contour du phare avec du ruban adhésif.

Nettoyer l'optique, souvent couvert de saletés et autres poussières, est aussi une étape préliminaire importante **[13]**.

I.11.1 Réaliser le ponçage :

Pour le ponçage, il faut débuter par le disque au grain le plus gros pour aller progressivement vers le plus fin.

Poncez l'optique avec une mini ponceuse orbitale en commençant avec un disque P500 si l'optique est simplement opacifié par les U.V. ou avec un grain plus gros s'il comporte des rayures ou si le vernis est boursoufflé.

Attention : Poncez en respectant les sauts de grains jusqu'au P2000 (ex. P500 + P800 + P1000 + P2000). A partir du P1000, il est possible et même conseillé d'humidifier l'optique ou le disque avec un pulvérisateur **[13]**.



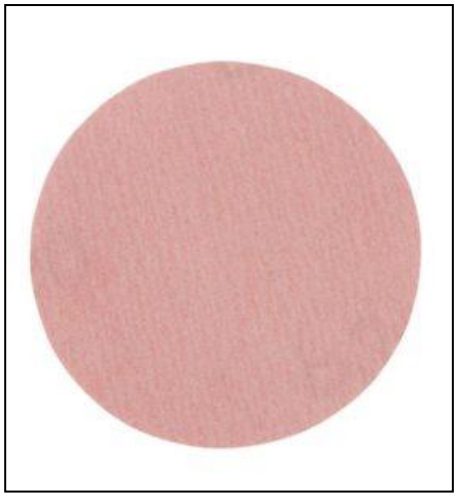


Figure I.21.A : pulvérisateur. **Figure I.21.B :** ponceuse orbitale pneumatique **[14]**.

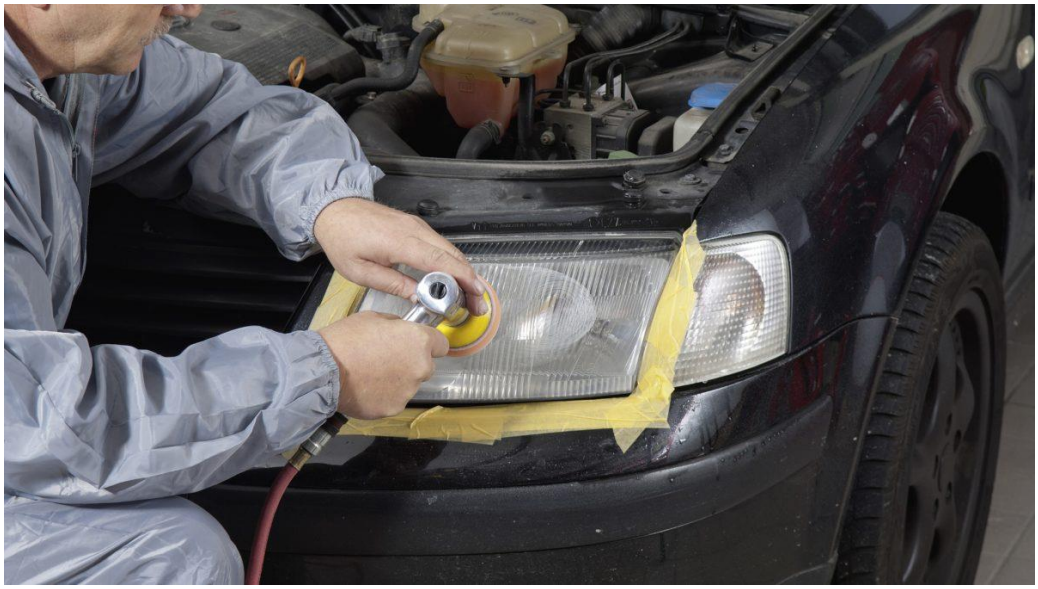


Figure I.22 : Réalisation ponçage **[13]**.

I.11.1.1 finition et lustrage (méthode classique et rapide) :

Après l'étape de ponçage au grain P2000, nettoyez l'optique avec le nettoyant anti silicone AQUA et essuyez avec un chiffon microfibre.

Polissez l'optique avec une mini ponceuse orbitale équipée d'une mousse bleue en utilisant la pâte à polir pour polycarbonate P80PC.

Puis éliminez les résidus de pâte à polir et lustrez l'optique jusqu'au résultat souhaité avec une mini ponceuse orbitale ou une mini lustreuse équipée d'une mousse orange en utilisant le polish haute brillance pour polycarbonate P90PC **[13]**.



Figure I.23.A: pâte à polir pour polycarbonate p80pc.



Figure I.23.B: polish haute brillance Pour polycarbonate p90pc **[14]**.



Figure I.24.A :patin de polissage bleu.



Figure I.24.B :patin de polissage orange **[14]**.

I.11.1.2 Finition par vernis (méthode professionnelle et de haute qualité) :

Après l'étape de ponçage au grain P2000, nettoyez l'optique avec le nettoyant anti silicone AQUA et essuyez avec un chiffon microfibre.

Appliquez le primaire en agitant la bombe pendant 2 min avant l'emploi. Pulvérisez une fine couche uniforme sur l'optique et laissez sécher 40 min à 20°C (lors de l'application, le primaire est laiteux. Une fois sec, il devient transparent) **[14]**.

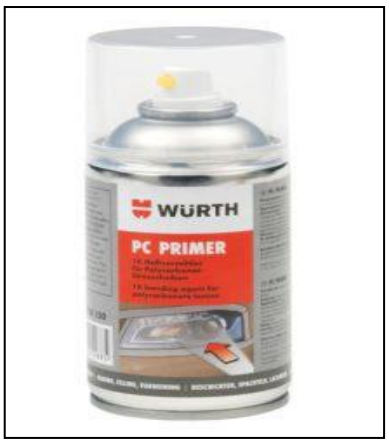


Figure I.25 : Primaire d'adhérence pour polycarbonate **[14]**.

Puis appliquez le vernis : Essuyez la surface de l'optique avec un tampon d'essuyage afin d'éliminer la poussière. Agitez la bombe de vernis pendant 2 min. Prendre ensuite le bouton rouge présent dans le capuchon et l'insérer dans le téton situé sous la bombe et appuyer jusqu'en butée. Jetez le bouton rouge puis agitez la bombe pendant au moins 2 min afin de mélanger le durcisseur **[13]**.

et le vernis. Appliquez le vernis en 2 ou 3 couches fines sur une surface sèche.

Laissez sécher 5-10 min entre les différentes couches

Une fois activé, le vernis est utilisable pendant environ 14 h .



Figure I.26 : vernis transparent bi composant rapide **[14]**.

I.12 Conclusion :

Ce chapitre présente une description détaillée sur les optiques automobiles, le phénomène de dégradation et l'effet environnemental le polycarbonate.

Lentille de l'optique est composée de deux couches. Les deux couches qui constituent le système de lentille ont une importance légale, mais la dégradation se diffère d'une couches à autre, par exemple, le vernis apporte le brillant nécessaire à l'esthétique d'une automobile et le protège également des agressions de l'environnement, polluants atmosphériques, pluies acides, fientes d'oiseaux, car il est en contact direct avec le milieu externe, il est exposée au rayage, au abrasion, a l'érosion et a l'impact de gravillonnage plus que d'autre couche.

La couche de base ou bien le substrat en polycarbonate, n'est pas en contact direct avec le milieu extérieur, mais sa capacité d'affaiblir l'influence des radiations solaire UV augmente la durée de vie de. L'objectif des chercheurs est d'augmenter la durée de vie des optiques conservant l'aspect visuelle, et améliorant en permanence la résistance aux différents phénomènes de dégradation spécifiquement l'érosion.

Chapitre II :

Résistance à l'érosion des optiques automobile

II.Résistance à l'érosion des optiques automobiles

II.1 Introduction :

L'érosion est un phénomène physique, où l'impact des particules solides crée une perte ou un enlèvement de matière. Le sablage est un type de processus d'érosion qui est effectué sur deux types de matériaux différents, à savoir fragile et ductile. Les matériaux fragiles subissent une déformation élastique avant de se développer, tandis que les matériaux ductiles subissent de très grandes déformations plastiques avant de se développer.

L'objectif de ce chapitre est d'étudier le comportement à l'érosion feux de voitureutilisé réellement dans le sahara d'Algérie pendant 2, 4, 8 et10 années. Les observations microscopiques des surfaces avant expérimentation et les résultats obtenus de microdureté sont utilisés dans les discussions des résultats d'érosion obtenus. Les essais expérimentaux sont réalisés sur une machine fabriquée dans le cadre de cette thèse au Laboratoire de Rhéologie et Mécanique (LRM). La microscopie optique a été utilisée pour caractériser l'endommagement dans les cicatrices obtenues. Les discussions sont articulées sur la durée de d'utilisation des échantillons, la microdureté et l'angle d'imapct ainsi de l'endommagement observé par microscopie optique dans les cicatrices.

II.2 Définition du phénomène d'érosion :

Dans certains cas, l'érosion par particules solides est un phénomène utile, comme dans le sablage au jet et le coupage au jet d'eau abrasif à grande vitesse, mais c'est un problème sérieux dans de nombreux systèmes techniques. Il peut entraîner une augmentation de la rugosité et du voile de surface, une perte de brillance et de transparence et même une défaillance prématurée des structures.

Pour les objets mobiles à haute vitesse en plein air (Optique véhicules, avions, pales d'éoliennes, bateaux de surf, etc.), leurs surfaces souffrent généralement de l'érosion par particules solides en raison des particules en suspension dans l'air. Par conséquent, l'érosion par particules solides est une préoccupation majeure pour ces applications. Les matériaux à haute résistance à l'usure par érosion sont nécessaires.

Les différents facteurs influençant la résistance à l'érosion des surfaces sont montrés comme suit :

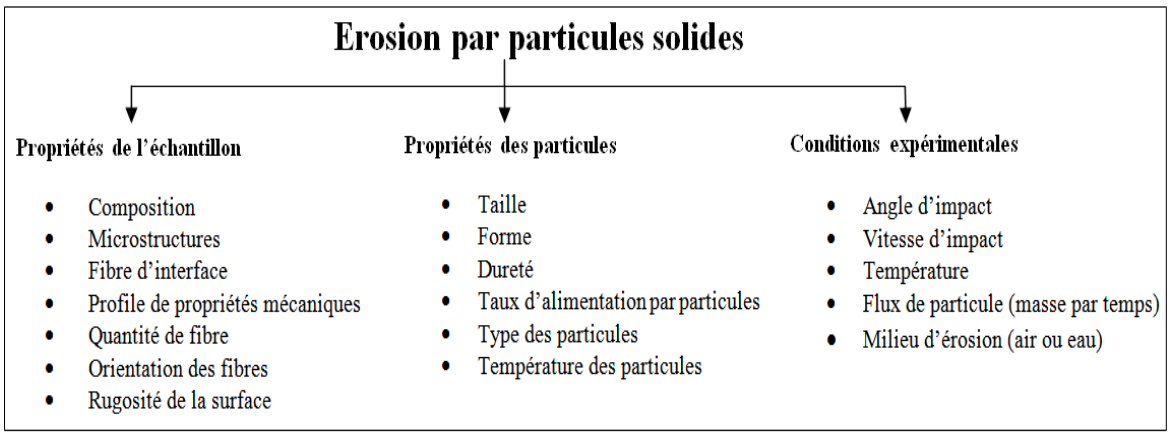


Figure II.1 : L'érosion par particules solides.

II.3 Comportement des matériaux à l'érosion :

La différence se manifeste dans le taux d'érosion (ER : Erosion Rate) dépendant de l'angle d'impact. Lorsqu'un matériau fragile est impacté par une particule dure et pointue, la zone de contact se déforme de manière plastique en raison des fortes contraintes de compression et de cisaillement et une fissure radiale se forme (Figure II.2).

Après l'impact, la déformation plastique conduit à une forte contrainte de traction qui résulte des fissures latérales entraînant l'enlèvement du matériau.

Les polymères trouvent, de plus en plus, d'applications comme matériaux structurels dans divers composants et systèmes d'ingénierie.

La résistance spécifique et la rigidité améliorées des polymères sont principalement responsables de leur popularité.

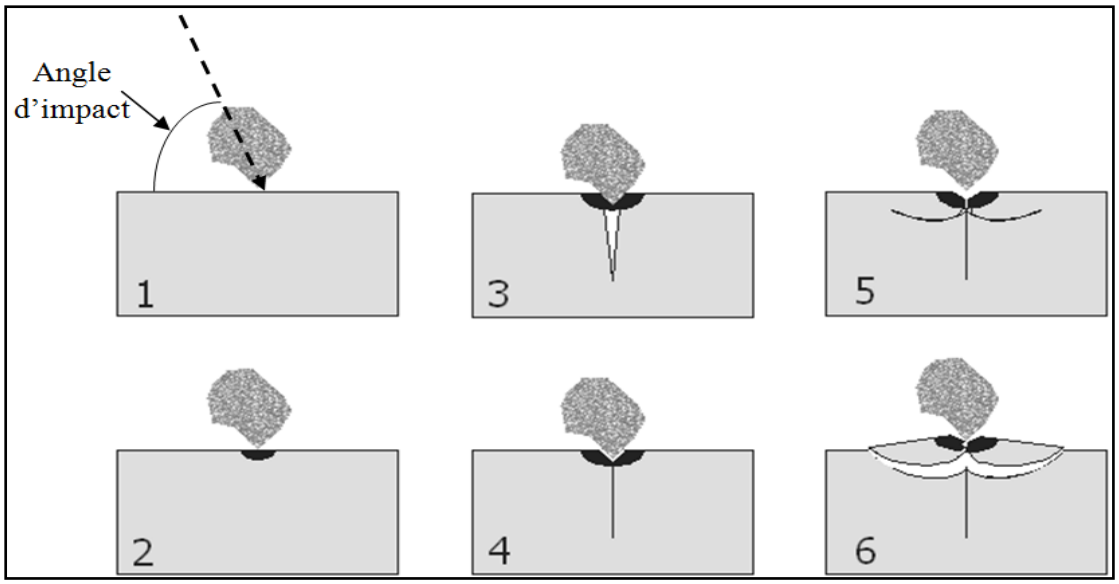


Figure II.2: Séquence d'un impact de particule unique.

L'angle d'impact est généralement défini comme l'angle entre la trajectoire des particules et la surface de l'échantillon **[15]** (Figure II.2).

Si le taux d'érosion (ER) atteint un maximum aux angles d'impact vif, généralement compris entre 15 et 30°, le comportement du matériau en érosion est considéré comme ductile (Figure II.3). En revanche, si ER augmente continuellement avec l'angle d'impact jusqu'a un maximum à 90° (impact normal), le comportement du matériau en érosion est considéré comme fragile (Figure II.3).

De plus, la taille de la particule érodante influe fortement sur le taux d'érosion **[16]**. Il convient toutefois de noter que ce qui est cité ci-dessus sur le comportement des matériaux en matière de ductilité ou de fragilité n'est pas absolu. Par exemple, si des particules sphériques sont utilisées en tant que particules érodantes au lieu de particules avec des arrêtes vifs, le taux d'érosion atteint un maximum pour un angle d'impact de 90° même pour des matériaux ductiles **[17-18]**.

La résistance des matériaux polymères à l'érosion par particules solides s'est révélée médiocre **[19]**, elle est inférieure de deux ou trois ordres de grandeur aux matériaux métalliques **[20]**.

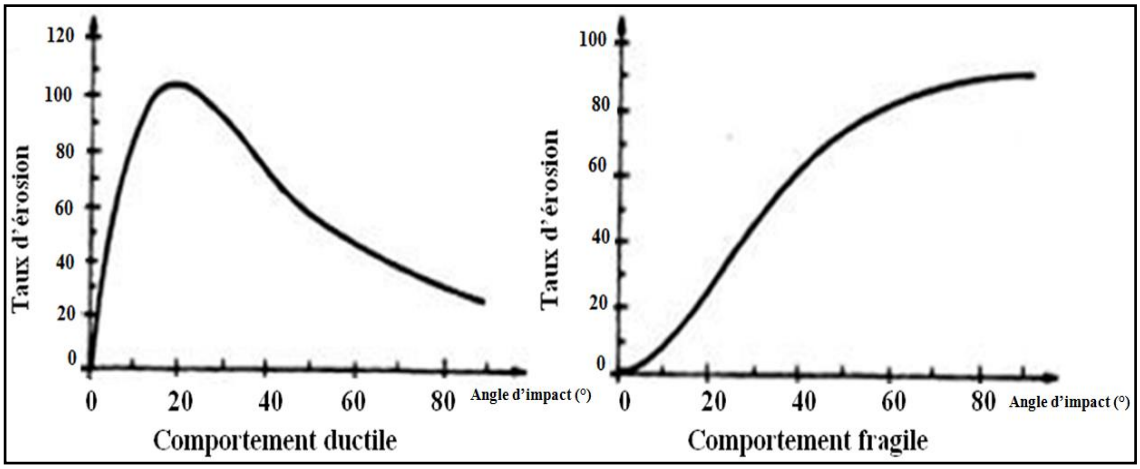


Figure II.3 : Comportements typiques des matériaux vis-à-vis l'érosion **[21]**.

Un certain nombre de chercheurs **[19-23]** ont évalués la résistance de divers types de PMC à l'érosion par particules solides.

Ces chercheurs ont observés que le taux d'érosion de la matrice polymère composite (PMC) était plus élevé que ceux du polymère non renforcé. Un grand nombre de chercheurs **[20-22-23]** ont également noté de manière constante que le taux d'érosion des PMC était considérablement plus élevé que ceux obtenu avec des matériaux métalliques.

De plus, les composites à matrice thermodurcissable présentaient invariablement un taux d'érosion maximal aux angles d'impact normaux (c'est-à-dire un comportement fragile à l'érosion), tandis que pour les composites polymères thermoplastiques, le taux d'érosion atteignait un maximum à un angle d'impact intermédiaire compris entre 40 et 50°, signifiant un comportement à l'érosion semi-ductile.

II.4 Paramètres influençant sur le comportement des matériaux à l'érosion :

Les paramètres influençant l'érosion sont très importants pour évaluer le processus d'érosion. Les différents paramètres qui affectent le processus d'érosion sont brièvement expliqués ci-dessous:

II.4.1 Vitesses des particules :

De nombreuses expériences ont été réalisées dans le passé pour déterminer la perte de volume par impact due aux changements de vitesse **[24-25]**. La vitesse des particules de

sables a une influence importante dans le processus d'érosion car une vitesse plus élevée donne une énergie cinétique plus élevée aux particules pour dégrader la surface.

Le taux d'érosion est principalement affecté par la vitesse d'impact des particules puisqu'il est considérée comme l'un des paramètres prédominant du processus d'érosion **[25]**.

D'autres paramètres tels que l'angle d'impact, la taille, la forme et la dureté des particules, etc.., peuvent également affecter l'exposant de la vitesse. Goodwin et al **[26]**. ont étudié la diminution de la vitesse avec la diminution de la taille des particules et ont conclus qu'en général, plus la vitesse des particules est grande, plus le taux d'enlèvement de matière est grand.

II.4.2 Taille des particules :

Smeltzer et al **[27]**. ont montré que la perte de volume par impact de particule varie linéairement avec le volume et la masse de la particule, à une vitesse constante, dans la plage de taille allant de 20 à 175 µm. Yerramareddy et al **[28]**.ont indiqués que la coupe est le mécanisme principal pour les particules supérieures à 50 µm (le diamètre critique «dc» pour le passage de mode de la déformation à la coupe) et que la valeur dc dépend du matériau cible et de l'angle d'attaque.

Selon Finnie et al **[29],** la perte de volume de matière augmente avec la diminution du diamètre des particules si la masse totale des particules est fixée. Fang et al **[30]**. ont montré que la perte de matière par érosion par particule solide varie linéairement avec la taille des particules pour le mode de coupe. En outre, il a été constaté que les particules abrasives fines ont tendance à créer des cratères plus profonds que les particules grossières **[31]**.

II.4.3 Forme des particules :

C'est le principal facteur de prévision du taux d'érosion dû à l'impact, car il détermine la surface de contact entre la particule et la surface du matériau cible lors d'impact.

Les particules angulaires créaient plus d'érosion pour les matériaux ductiles et fragiles. Hutchings et al **[32]**. utilisent des particules de forme sphères en acier de 9,5 mm de diamètre et de tôle de forme carrée de 8 mm à travers un système de pistolet à gaz comprimé à angles obliques.

Ils ont constaté que les particules sphériques provoquaient un mode d'endommagement de labourage et que les particules angulaires provoquaient une déformation par coupure. L'angle entre la normale à la surface cible et le bord d'attaque de la particule impactante est appelé angle de coupe.

En outre, il a été constaté qu'une particule sphérique atteindrait toujours la surface du matériau cible avec un grand angle de coupe, faisant du labourage. Mais une particule angulaire peut avoir un impact avec un angle de coupe petit, produisant une micro-coupe et un labourage.

Ainsi, dans le cas des particules de SiO_2, les grosses particules provoquent plus de labourage et les particules plus fines entraînent plus de micro-coupes, augmentant ainsi le taux d'érosion.

II.4.4 Angle d'impact de l'angle d'incidence :

L'angle d'impact joue également un rôle important dans l'érosion des matériaux. Pour les matériaux ductiles, le taux d'érosion augmente d'un minimum de zéro à une valeur maximale comprise entre 10° et 30° puis diminue pour une incidence normale. Alors que pour les matériaux fragiles, la perte par érosion augmente d'un minimum de zéro à un maximum de 90°. Carter et al **[33]**. ont montré que, pour un angle d'incidence donné, après la fin de la courte période d'incubation initiale, la profondeur de l'érosion devenait directement proportionnelle au taux d'érosion.

La profondeur de pénétration augmente avec l'augmentation de l'angle d'incidence par rapport à la normale. L'énergie transmise par la particule augmente le volume extrudé et donc le taux d'érosion, jusqu'à ce que la profondeur de pénétration devienne si basse que le taux d'érosion diminue à nouveau. La diminution suivante de la profondeur de pénétration fait rebondir la particule avec une énergie substantielle, due à une perte d'énergie, avec des angles de réflexion inférieurs aux angles d'incidence. Par conséquent, les particules qui rebondissent avec une plus grande rétention d'énergie (cinétique) entraînent un taux d'érosion faible et des processus d'érosion secondaires.

II.4.5 Propriétés de matériau des particules et de l'échantillon :

A. Dureté des particules :

Pour les solides ductiles et les solides fragiles (sauf les matériaux céramiques), l'érosion n'est possible que lorsque la dureté superficielle de la particule est supérieure à celle de la cible **[34]**. Wellinger et al **[34]**. ont observé que le taux d'érosion diminuait de façon spectaculaire à mesure que la dureté des particules diminuait en dessous de celle du matériau.

B. Dureté de surface :

C'est le principal facteur utilisé pour décrire la variation du taux d'érosion des matériaux ductiles. Sheldon **[35]**. a suggéré que la dureté de surface totalement abrasée puisse être utilisée pour décrire l'érosion. La dureté dynamique peut également être utilisée pour les matériaux ductiles et fragiles.

C. Température :

Sundar jan **[36]**. a constaté que le taux d'érosion augmente avec la température dans certains cas et diminuait dans d'autres. La quantité de dommages causés par l'érosion varie en fonction des variables environnementales telles que la température et l'humidité. Par conséquent, leurs effets doivent être déterminés pour estimer la durée de vie des matériaux.

II.5 Installations d'érosion commerciales et de laboratoire :

II.5.1 Appareils souffleurs de sable :

Pour pouvoir étudier l'érosion et les paramètres qui l'influencent, on fait recours à des dispositifs qui consistent à projeter des particules solides sur des matériaux cibles.

Plusieurs types de dispositifs ont été conçus pour simuler le processus d'érosion des matériaux par impact des particules solides. On rapporte dans la littérature que le premier simulateur a été conçu en 1955. Hutchings **[32]**. a présenté quatre dispositifs d'essais pour simuler les phénomènes érosifs par les techniques suivantes :

- Impact par des jets de particules,
- Boucle de recirculation,
- Accélérateur par centrifugation,
- Bras tourbillon.

Dans la littérature, on trouve des bancs d'érosion verticaux et horizontaux avec buse d'air ou de gaz. Le réglage et l'ajustage des paramètres des tests (distance buse-échantillon, angle et vitesse d'impact, réglage du débit des particules et positionnement des échantillons) se font avec une grande simplicité.

Différents capteurs peuvent être utilisés pour le contrôle de la masse de sable à projeter, ainsi que la concentration des particules transportées par le flux d'air **[37**]. Dans certaines études, le sable est recyclé **[38]**. L'angle d'impact peut être aussi fixé à 45° **[39]**. comme il peut varier de 0° à 90° **[40]**.

Certains simulateurs avec recirculation de sable en circuit fermé sont équipés de capteurs pour la mesure et le contrôle de la température et de l'humidité **[41]**. comme on peut le constater dans (le tableau II.1) qui résume les principaux paramètres ajustables pour quelques types de simulateurs d'érosion rencontrés dans la littérature.

Cependant et malgré l'avancée technologique importante, on note d'une part la difficulté de mesurer la vitesse des particules de façon individuelle et précise. Ceci est un inconvénient majeur de ces simulateurs.

En plus de la variation de la vitesse d'impact (à cause de la chute de pression au niveau des compresseurs d'air ou le vieillissement du moteur), on mentionne l'usure (relativement rapide) de la buse (Figure. II.4) qui doit canaliser d'une façon uniforme le flux des grains érosifs sur l'échantillon. Donc la reproductibilité des essais s'avère altérée ou parfois impossible **[42]**.

A la complexité du phénomène d'érosion, s'ajoutent ces inconvénients qui rendent son étude assez difficile, ainsi que la modélisation des résultats obtenus.

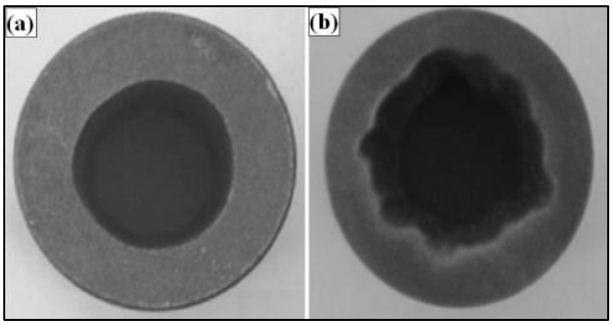


Figure II.4 : Forme interne d'une buse : (a) avant utilisation, (b) après de 10 heures d'usage **[42]**.

Tableau II.1: Quelques simulateurs du processus d'érosion utilisés dans les laboratoires.

Type de simulateur	Vitesse d'impact	Angle d'impact	Contrôle de la masse de sable	Contrôle de la concentration de sable	Recirculation du sable	Contrôle de la température	Contrôle de l'humidité
Sableuse a recirculation de sable en circuit fermé **[39]**	Variable en réglant la pression de l'air	Variable de 0 à 90°	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
Dispositif à écoulement de sable **[40]**	Variable en réglant la distance entre la buse et le porte-échantillon	Fixé à 45°	Oui	Non	Non	Non	Non
Dispositif a tunnel pour sable **[42]**	-	-	Oui	Non	Non	Oui	Oui
Sableuse à circuit ouvert **[41]**	Variable en réglant la pression de l'air et en réglant la distance entre la buse et le porte-échantillon	-	Oui	Non	Non	Non	Non
Sableuse à circuit ouvert (Lab.Mat.non-métal)		Variable de 0 à 90°	Oui	Non	Non	Non	Non

II.6 Composants utilisés dans la machine de sablage :

En général, le sablage nécessite un pistolet, des abrasifs, une armoire, un compresseur. Ceux-ci sont décrits brièvement ci-dessous:

II.6.1 Pistolet de sablage :

Les pistolets d'alimentation à siphon et les pistolets d'alimentation à pression sont les deux types de Pistolet. Dans le pistolet d'alimentation a siphon, un courant d'air aspire l'abrasif (sable) et ressort à travers une large buse.

II.6.2 Matériaux abrasifs :

Ce sont de nombreux types. Quelques-uns d'entre eux sont décrits ci-dessous:

- Sable de silice,
- Oxyde d'aluminium,
- Carbure de silicium,
- Médias en plastique,
- Médias en acier.

II.6.3 Boîtiers de sablage abrasif :

En général, les opérations de sablage abrasif confiné et de sablage utilisent des boitiers pour isoler le système a l'intérieure, pour contrôler la température et pour récupérer les abrasifs et protéger l'ouvrier de la poussière.

II.6.4 Dispositifs antipollution de l'air (équipement de réduction) :

Les filtres / collecteurs de poussière, les filtres à manches et les tissus de filtration sont placés dans les dispositifs de contrôle de la pollution atmosphérique. Les filtres à poussière / collecteurs sont divisés en collecteurs de poussières sèches et humides. Les collecteurs de poussières sèches sont à nouveau séparés en collecteurs de cartouches, collecteurs de sacs et collecteurs de sacs à enveloppes.

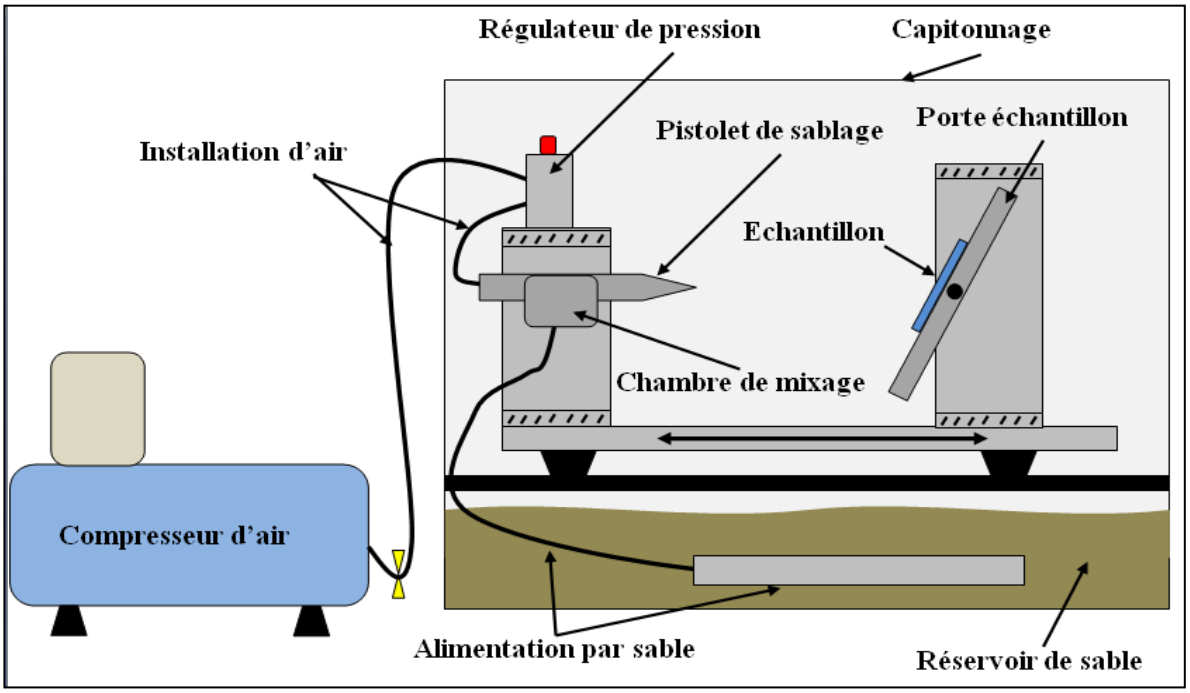
II.6.5 Compresseur d'air :

Il consiste en une pompe à air apte à prélever de l'air ambiant pour le mettre sous pression. Les compresseurs d'air peuvent être utilisés pour le transport d'air a forte pression mais en faible quantité.

II.7 Banc d'essai d'érosion réalisé :

Un banc d'essai d'érosion à été conçu et fabriqué au laboratoire LRM (Figure. II.6). La configuration utilisée dans ce banc d'essai d'érosion par particules solides est capable de créer des situations érosives reproductibles pour évaluer la résistance à l'érosion des échantillons étudiés.

Il se compose d'un compresseur d'air, d'un pistolet de sablage, d'une porte échantillon, d'un régulateur de pression, d'un réservoir de sable, d'un capitonnage et d'un compresseur d'air. Le schéma d'installation du banc d'essai d'érosion est présenté dans (la Figure II.5) et la machine réalisée est présentée dans (la Figure II.6).



FigureII.5 : Schéma explicatif de banc d'essai réalisé.

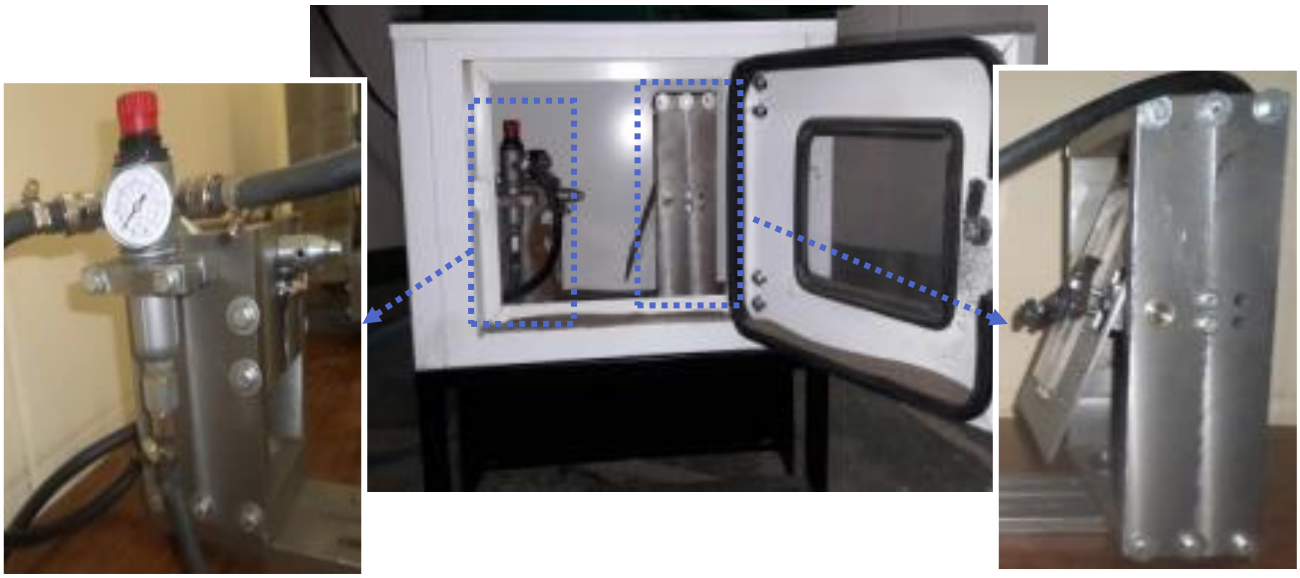


Figure II.6 : Banc d'essai d'érosion réalisé au LRM.

L'air comprimé sec est mélangé aux particules abrasives qui sont alimentées à vitesse constante par un régulateur de pression à travers le tube de buse, puis accélérées en faisant passer le mélange dans une buse en acier de 5 mm de diamètre interne.

Ces particules impactent l'échantillon qui peut être maintenu à différents distance et angles par rapport à la buse du flux érodent à l'aide d'un porte échantillon ajustable. Des échantillons carrés de taille 50×50 mm sont utilisés.

Une procédure d'essai standard est utilisée pour chaque essai d'érosion. Les échantillons sont pesés avec une précision de 0,1 mg à l'aide d'une balance électronique de la marque DENVER INSTRUMENT du laboratoire de département de génie des procédés de l'université de HassibaBenbouali de Chlef. Les échantillons sont érodés pendant 1 minute, puis pesés de nouveau pour déterminer la perte de masse.

Le rapport entre la perte de masse et la masse des particules érodantes, est ensuite calculé en tant que taux d'érosion (ER).

II.8 Principe de fonctionnement :

Avant de procéder au test, la surface de l'échantillon est nettoyée. L'échantillon est serré dans le porte échantillon. L'angle requis et la distance entre l'échantillon et la buse ont été ajustés. L'air à la pression requise est mélangé avec les particules érosives dans une chambre de mixage (Figure II.6) et dirigé vers l'échantillon pour une durée déterminée. La masse initiale et la masse de l'échantillon après l'essai d'érosion ont été pesées à l'aide d'une balance.

Les étapes ci-dessus sont répétées pour les différents échantillons et paramètres sélectionnées.

II.9 Sable utilisé :

Le sable utilisé dans les tests d'érosion provient de la région désertique de sud Algérien. Les molécules sont souvent de forme circulaire avec peu de particules de formes angulaires.

Le sable utilisé a été caractérisé par merouen **[43]**. La taille moyenne des particules varie de 250 à 500 microns, bien que des particules beaucoup plus gros puissent être rencontrés (Figure II.7).

La microdureté Vickers des grains de sable est 12,43 ± 2,27 GPa **[43]**. En tamisant le sable brut, une sélection de grains de 500 µm a été réalisée.

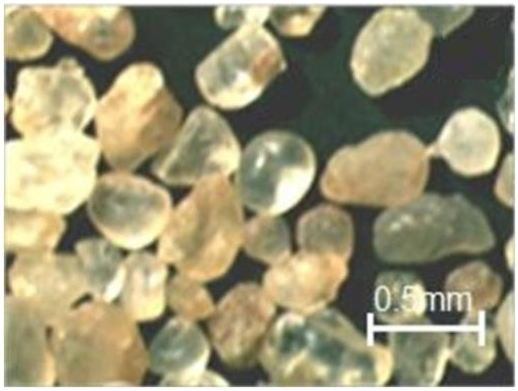


Figure II.7: Micrographies des particules de sable utilisés dans les essais d'érosion (500 µm) **[43]**.

Le sable est composé de plusieurs oxydes dont les compositions (chimique et minéralogique) sont données dans les tableaux II.2 et II.3 **[44]**.La composition chimique

contient essentiellement l'oxyde de Silicium (SiO_2) en présence du Na_2O, et d'autres oxydes en faible pourcentage **[44]**.

Tableau II.2 : Composition chimique du sable utilisé.

Oxydes	SiO_2	Na_2O	CaO	MgO	Al_2O_3	Fe_2O_3
Masse (%)	72.88	24.00	0.80	0.43	1.84	0.05

Tableau II.3 : Composition minéralogique du sable utilisé **[44]**.

Constituants Minéraux	Quartz	Tourmaline	Liménite	Limonite	Gypse
Dureté à l'échelle de Mohs	7	7-7.5	5-6	2-5	2

II.10 Conditions opératoires :

Les échantillons testés en érosion sont tirés de la même manière à ceux utilisés dans les essais de rayage. Les essais d'érosion sont réalisés à température ambiante de 35°C. Dans tous les essais, la distance entre la buse et l'échantillon est fixé à 40 mm, la durée d'érosion est 20 secondes et 40 secondes. La pression d'air est fixée à 0.150 bar. Plusieurs angles d'impact de: 30°, 60° et 90° ont été utilisés. Les endommagements observés sont analysés en utilisant la microscopie optique.

Chapitre III

RESULTATS, DISCUSSIONS ET INTERPRETATIONS

III. 1 Introduction :

L'érosion par sable est un problème répandu qui peut affecter les optiques automobiles, en particulier les phares et les feux arrière. Lorsque les véhicules circulent sur des routes où des particules de sable et de poussière sont présentes, celles-ci peuvent causer des dommages progressifs aux optiques au fil du temps.

Un aspect important de ce problème est que les optiques des voitures modernes sont souvent fabriquées à partir de polycarbonate, un matériau transparent et résistant aux chocs. Cependant, le polycarbonate est plus sensible aux rayures et à l'abrasion que le verre traditionnel. Les particules de sable soulevées par le vent ou projetées par les autres véhicules peuvent donc endommager la surface des optiques, créant des rayures et rendant le matériau terne et opaque.

Les conséquences de l'érosion par sable des optiques automobiles peuvent être significatives. La principale préoccupation concerne la réduction de la visibilité. Lorsque les optiques sont érodées, la quantité de lumière émise par les phares diminue, ce qui peut compromettre la visibilité du conducteur la nuit ou par mauvais temps. Cela peut augmenter le risque d'accidents, tant pour le conducteur lui-même que pour les autres usagers de la route.

Outre les problèmes de sécurité, l'érosion par sable peut également affecter l'esthétique des véhicules. Les optiques ternes, rayées ou opaques peuvent donner une apparence négligée et vieillie à une voiture, ce qui peut être frustrant pour les propriétaires soucieux de l'apparence de leur véhicule.

Le comportement à l’érosion des peintures automobiles utilisé réellement dans un endroit en nord pendant 2, 4, 8 et 10 années est étudié. Les essais expérimentaux sont réalisés sur une machine fabriquée au Laboratoire de Rhéologie et Mécanique (LRM). La microscopie optique a été utilisée pour caractériser l’endommagement dans les cicatrices obtenues. Les discussions sont articulées sur la durée de d’utilisation des échantillons, la durée de sablage et l’angle d’impact ainsi de l’endommagement observé par microscopie optique dans les cicatrices.

III. 2Conditions opératoires :

Les échantillons de peinture étudiés ont été obtenus à partir des optiques automobile circule dans le nord de l'Algérie. Quatre échantillons de dimension 50×50 mm tirés à partir des lentilles d'optique ont été étudiés. Les véhicules à partir desquels sont tirés ces échantillons avaient 2, 4, 8 et 10 années d'utilisation. Les essais d'érosion sont réalisés à température ambiante de 35°C. Dans tous les essais, la distance entre la buse et l'échantillon est fixé à 40 mm, la durée d'érosion est 20 et 40 secondes. La pression d'air est fixée à 0.150 bar. Plusieurs angles d'impact de: 30°, 60° et 90° ont été utilisés. Les endommagements observés sont analysés en utilisant la microscopie optique.

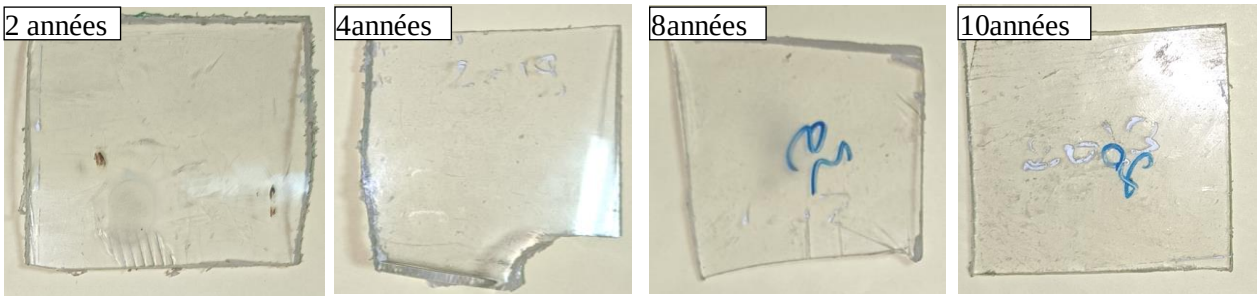


Figure III.1 : Échantillons tirés des lentilles d'optique automobile.

III. 3 Techniques d'analyses :

Tout à fait, Avant de procéder à toute analyse structurale et observation morphologique, il est essentiel de préparer les échantillons correctement. La préparation des échantillons comprend plusieurs étapes:

- La découpe des échantillons selon la taille et la forme requises,
- La préparation de la surface,
- Ainsi que l'opération la plus essentielle dans cette étude : le sablage en utilisant le banc d'essai présenter dans la Figure III.2.

Il est également crucial de peser les échantillons avant et après l'opération de sablage. Cela permettra de mesurer la perte de matière.



Figure III.2 : Banc d'essai d'érosion réalisé au laboratoire de rhéologie et mécanique (LRM) université de chlef.



Figure III.3: Balance utilisée au cours de notre étude.



Figure III.4: Microscope optique utilisé pour analyser les cicatrices.

III.4 Résultats et discussion :

III.4.1 Perte de poids :

III.4.1.1 Effet de l'angle d'impact :

a- Érosion pendant 20 secondes :

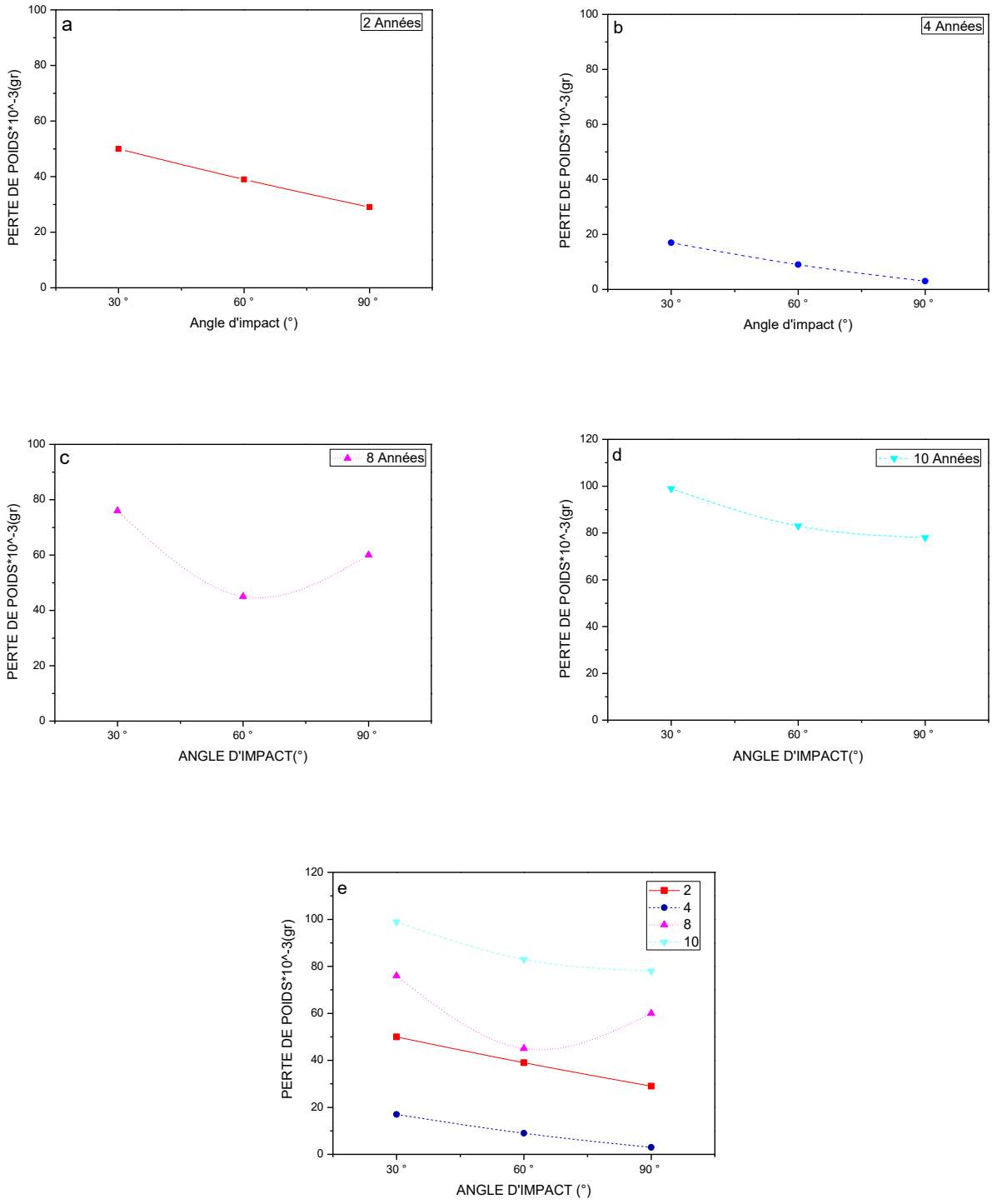
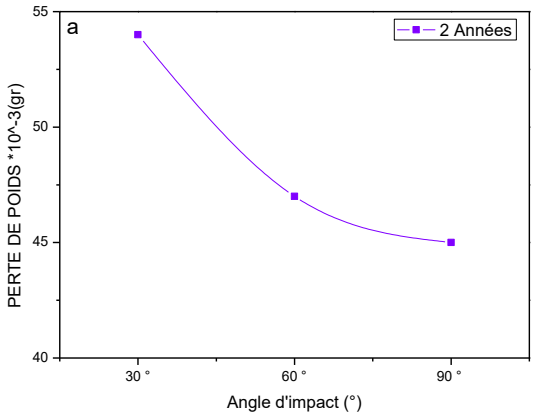


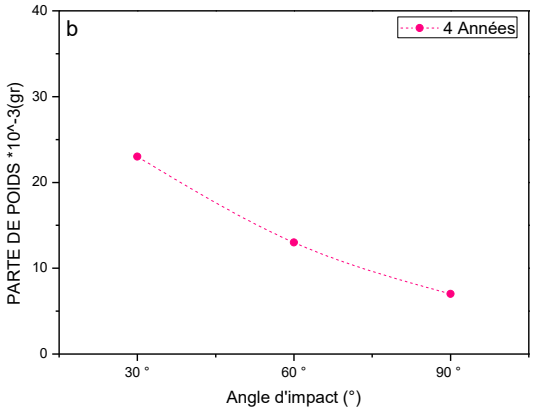
Figure III.5 : Variation de la perte de poids en fonction de l'angle d'impact, **érosion pendant 20 secondes**

La Figure III.5 présente la perte de poids en fonction des années d'utilisations et de l'angle d'impact pour une vitesse d'impact de 20 secondes. Quatre échantillons de 2, 4, 8 et 10 années ont été érodée pendant 20 seconde on variant l'angle d'impact de 30°, 60° et jusqu'à 90°. Une perte de matière très importante est remarquée pour toute les échantillons à un angle d'impact de 30 °, la perte commence à se diminue en allant vers des angles d'impact de 60 ° et arrive à des valeurs faible à un angle de 90° (Fig. III.5- a, b, c, d). Une anomalie est remarquée pour l'échantillon de 8 années d'utilisation, une augmentation inattendue de la perte de poids à un angle d'impact de 90° (Fig. III.5-c). On observe clairement dans la (Fig. III.5-e) que l'échantillon de 4 année d'utilisation à la plus faible perte de poids, et cela reflète une bonne résistance à l'érosion pour cette période d'utilisation, l'échantillon de 10 année présente la mauvaise résistance à l'érosion, la plus grande perte de poids est observée pour cet échantillons.

b- Érosion pendant 40 secondes :

La Figure III.6 présente la perte de poids en fonction des années d'utilisations et de l'angle d'impact pour une vitesse d'impact de 40 secondes. La plus grande perte de matière est remarquée aux un angle d'impact de 30° (Fig.III.6 a, b, c, d),





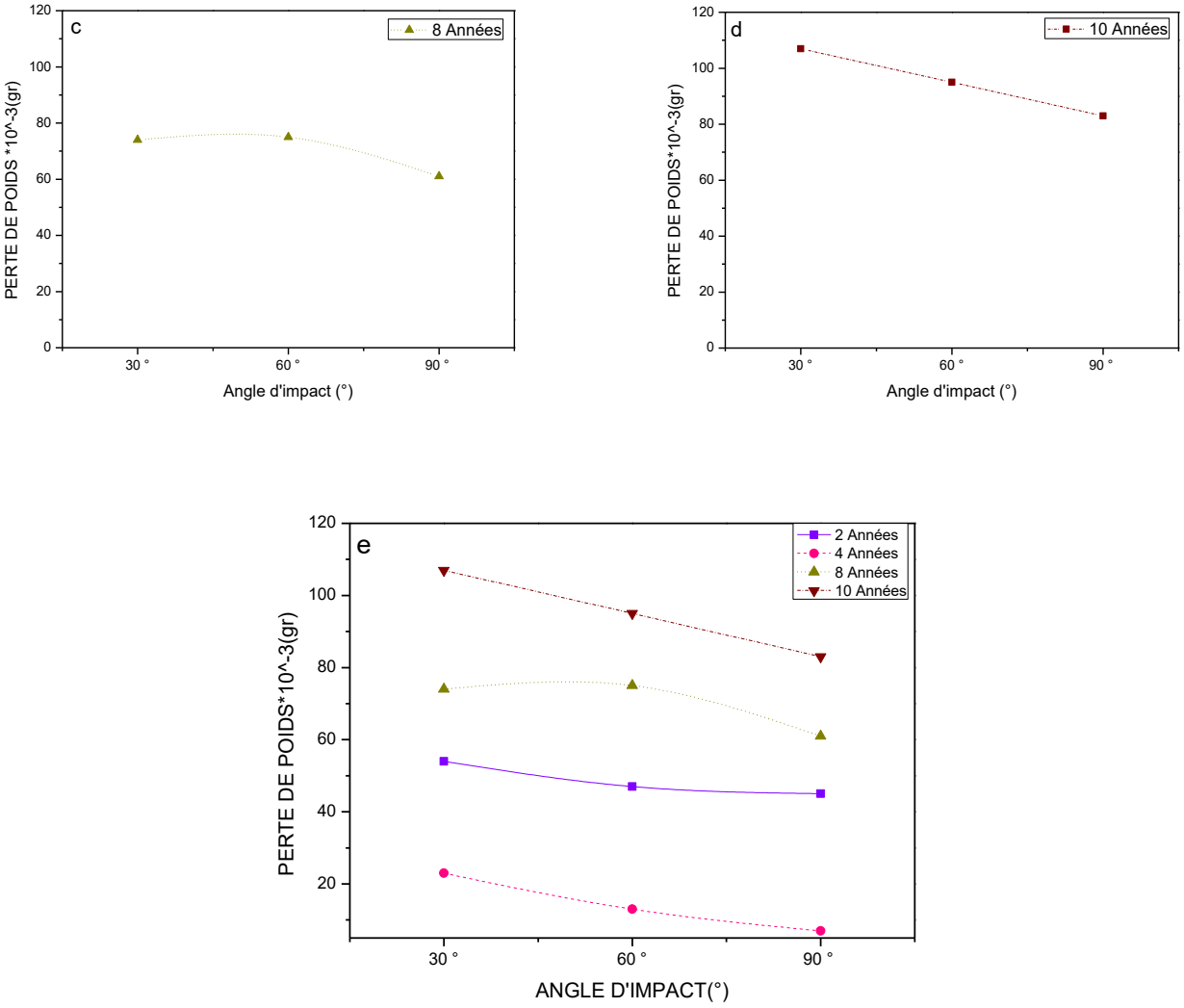


Figure III.6 : Variation de la perte de poids en fonction de l'angle d'impact, érosion pendant 40 secondes

Les résultats montrent que l'échantillon de 10 années d'utilisation présente une perte de masse la plus élevé comparativement aux autres échantillons (Fig.III.6-e). L'échantillon de 4 années d'utilisation a présenté la plus faible perte de masse et donc la meilleure résistance au phénomène d'érosion(Fig.III.6-b). L'échantillon 2 années d'utilisation présente une résistance élevée en comparant avec l'échantillon de 8 années d'utilisation(Fig.III.6-a et c respectivement). Pour ce dernier l'anomalie existe encore, on remarque clairement que la perte de poids est importante à un angle de 60° au lieu de 30°.

III.4.1.2Effet des années d'utilisation :

a- Érosion pendant 20 secondes :

La Figure III.7 présente la perte de poids en fonction des années d'utilisations et de l'angle d'impact pour une vitesse d'impact de 20 secondes. La cause derrière l'étude de la perte de masse en fonction des années d'utilisation et d'angles d'impact est pour comparer la résistance des échantillons à l'érosion pour chaque angle d'impact.

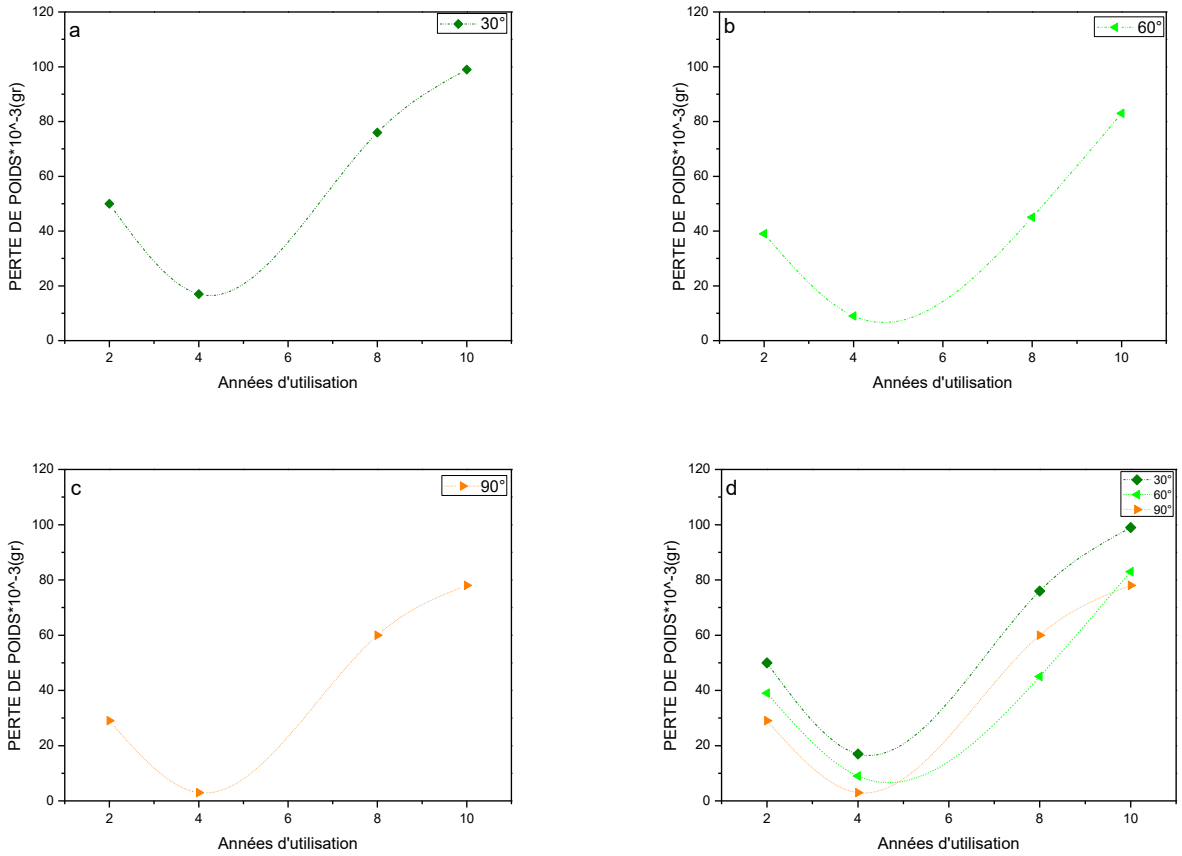


Figure III.7 : Variation de la perte de poids en fonction des années d'utilisation, **érosion pendant 20 secondes.**

Dans la FigureIII.7 a, b, c et d, on remarque l'influence de l'environnement pendant des durées d'utilisations courtes et longues sur la perte de matière et par conséquent sur sa résistance à l'érosion des échantillons étudiés. L'échantillon de 4 années d'utilisation montre une faible perte de masse en comparant avec les autres échantillons (Fig. III.7-d). L'échantillon de 10 années d'utilisation présente la plus grande perte de masse pour tous les

angles d'impact testés (Fig. III.7-d). Les pertes de masse des échantillons de 2 et 8 années sont presque similaires à un angle d'impact de 60 ° (Fig. III.7-d).

b- Érosion pendant 40 secondes :

La Figure III.8 présente la perte de poids en fonction des années d'utilisations et de l'angle d'impact pour une vitesse d'impact de 40 secondes.

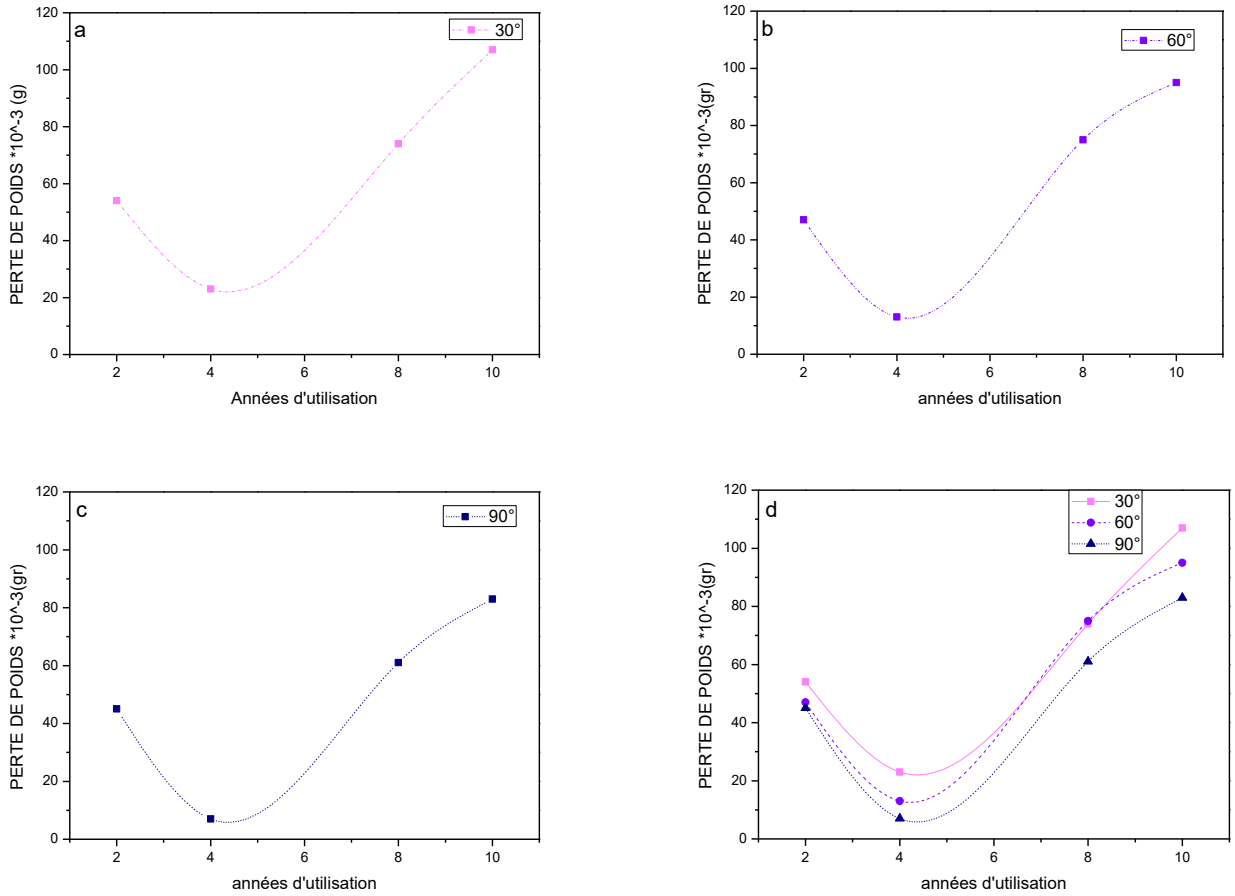


Figure III.8 : Variation de la perte de poids en fonction des années d'utilisation, érosion pendant 40 secondes

On augmentant la durée d'érosion à 40 seconde, on remarque que l'ordre de classement des échantillons parlant de la perte de masse reste identique que l'érosion pendant 20 secondes (Figure III.7), mais avec des valeurs plus grands, mais l'anomalie est remarquée pour l'échantillon de 8 années d'utilisation, on remarque clairement que la perte masse est la même aux angles de 30° et de 60° (Figure III.8 -d).

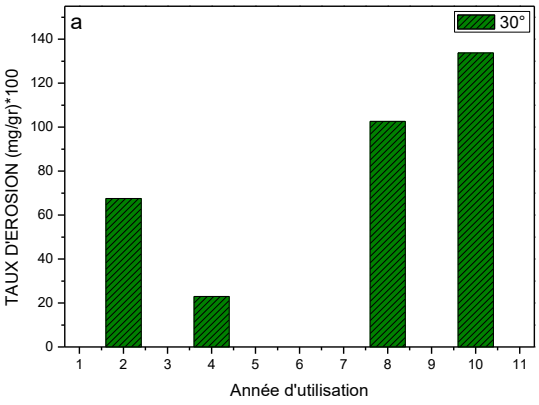
III.4.2Taux d'érosion :

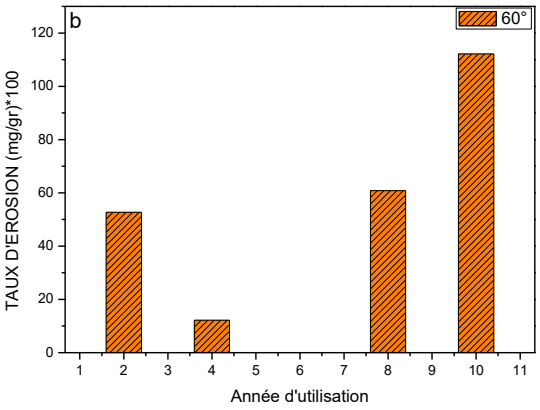
L'effet de l'érosion a été concrétisé par le taux d'érosion (ER) qui est représenté dans l'équation (3-1) par le rapport entre la perte de masse (Δm) dans l'échantillon cible et la masse des particules projetées (m_p):

(III.1) $$ER = \Delta m/m_p$$

III.4.2.1 Effet des années d'utilisation :

La figure III.9 et la figure III.10 présente la variation de taux d'érosion en fonction des années d'utilisation à différentes angles d'impacts pendant 20 et 40 seconde respectivement.





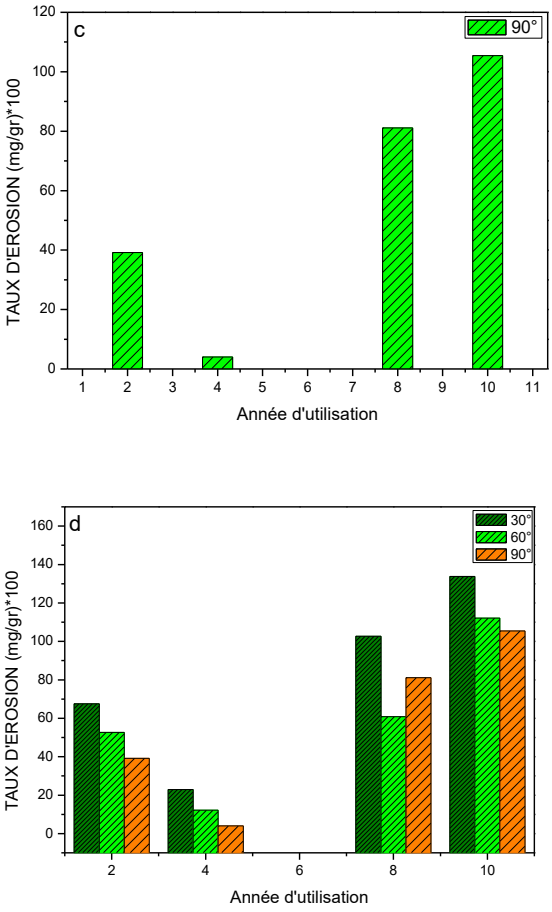
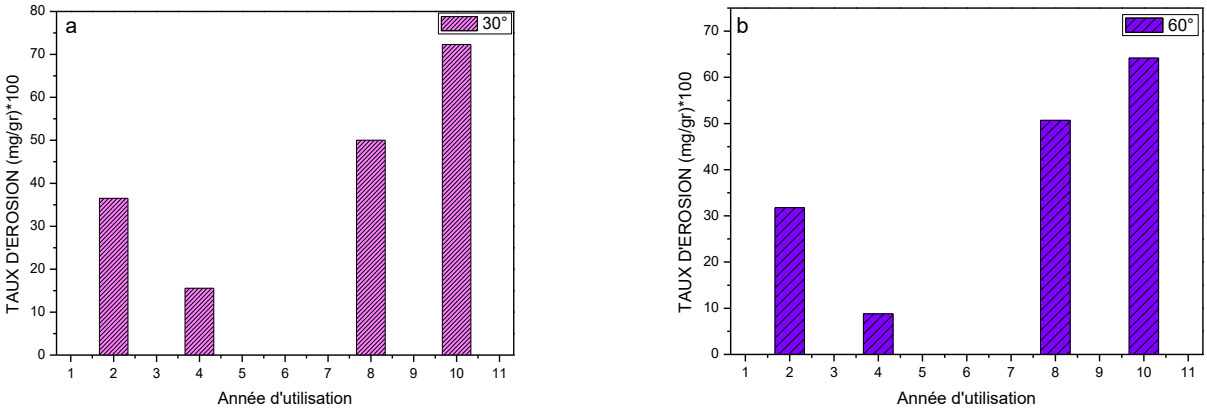


Figure III.9 : Variation de taux d'érosion en fonction des années d'utilisation, **érosion pendant 20 secondes.**



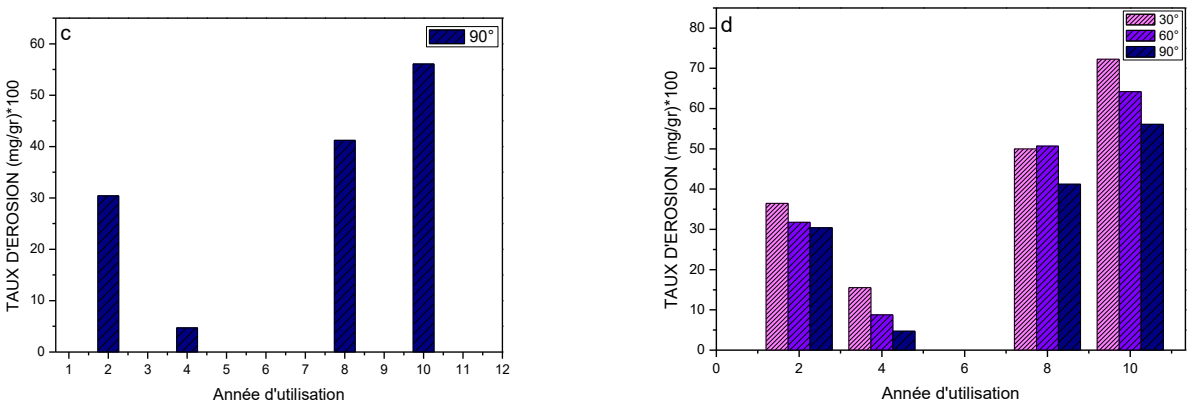


Figure III.10 : Variation de taux d'érosion en fonction des années d'utilisation, **érosion pendant 40 secondes.**

Dans ces figures, il est montré que la durée d'utilisation àune influence importante sur le taux d'érosion.Ce dernier donne une bonne indication sur la résistance des matériaux à l'érosion par particules solides. Il est clairement apparaitre que l'échantillon de 10 années d'utilisation présente le taux d'érosion le plus élevé entre tous les échantillons testés. Le taux le plus faible est noté pour l'échantillon de 4 années d'utilisation. À un angle d'impact de 30° et de 60° pour les échantillons de 2 et 8 années d'utilisations respectivement, on note des valeurs de taux d'érosion très proches(Fig. III.9-d), même remarque a des angle de 30 ° et de 90 ° pour les échantillons de 8 et 10 années d'utilisations respectivement(Fig. III.9-d). On comparant la durée de sablage de 20 et 40 seconde, on trouve que taux d'érosion est important pour 20 seconde de sablage(Fig. III.9), ceci peut être interpréter par la relation de taux d'érosion (3-1), l'augmentation de temps de sablage augmente la masse des particules projeter et par conséquence diminue le taux d'érosion, malgré l'augmentation faible de la perte de masse.

III.4.2.2 Effet de l'angle d'impact :

Le taux d'érosion des optiques automobiles en fonction des angles d'impact à différent années d'utilisation pendant 20 et 40 seconde est illustré dans la figure III.11, et la figure III.12 respectivement.

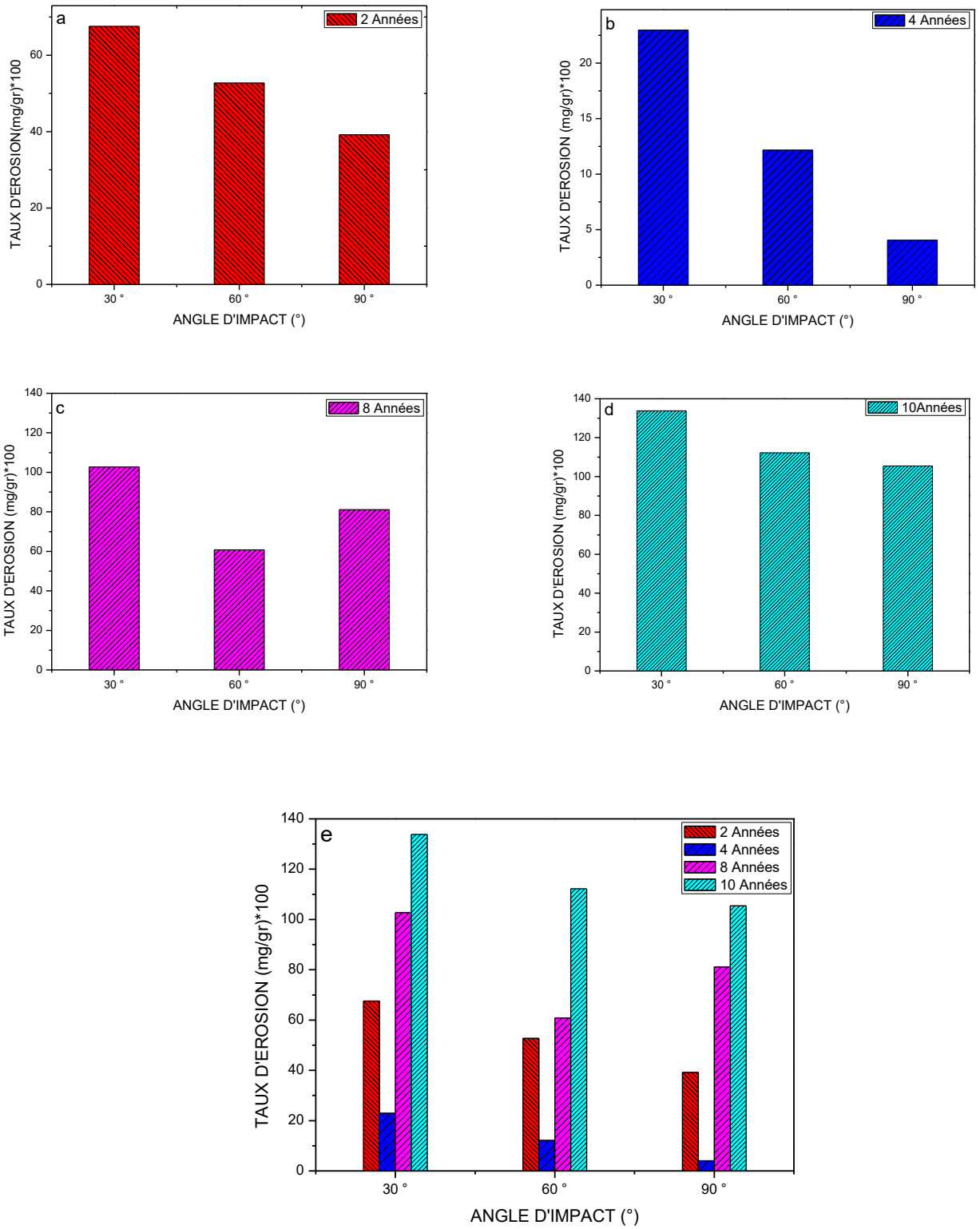


Figure III.11 : Variation de taux d'érosion en fonction de l'angle d'impact, **érosion pendant 20 secondes.**

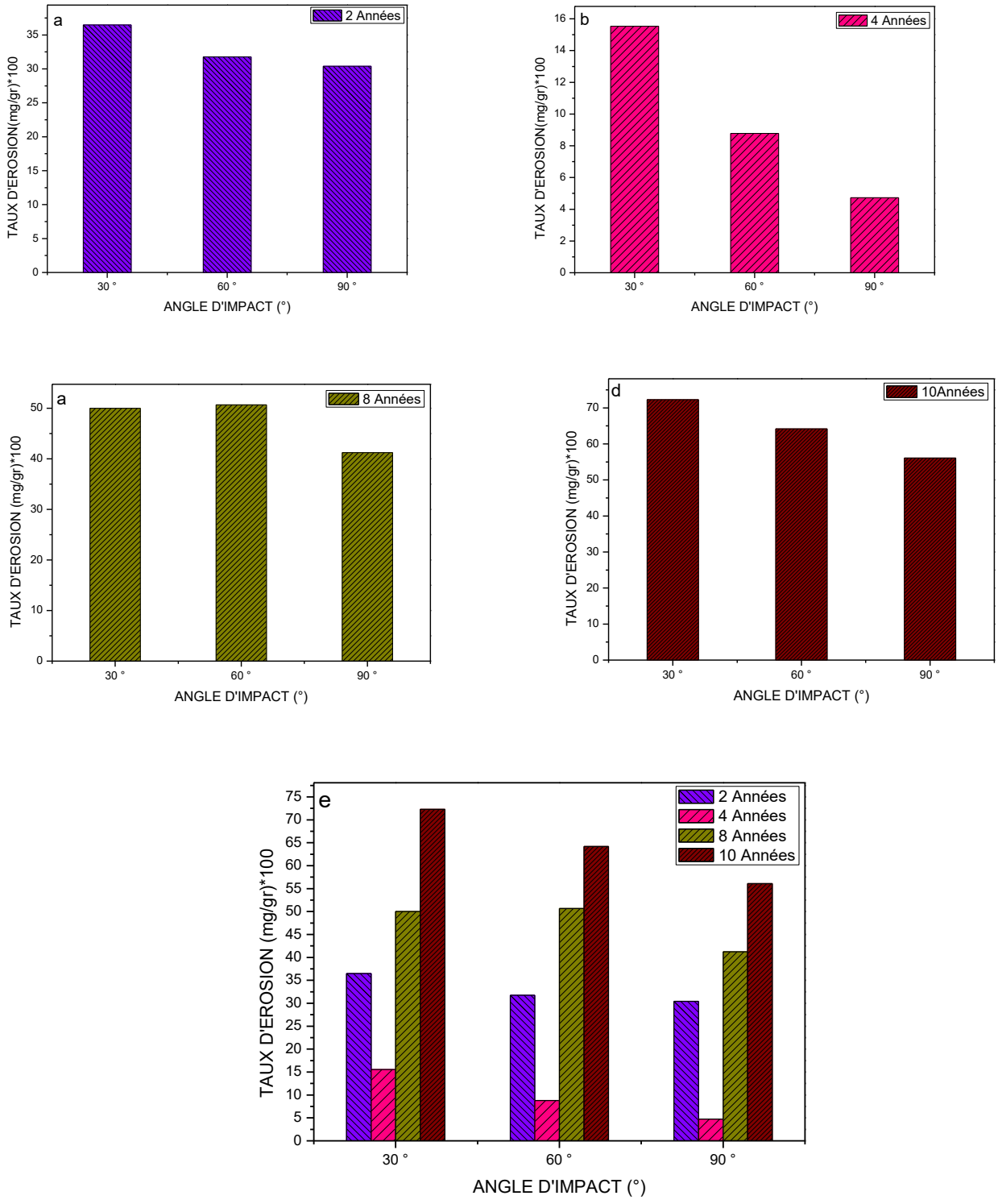


Figure III.12 : Variation de taux d'érosion en fonction de l'angle d'impact, **érosion pendant 40 secondes.**

Tous les échantillons présentent un taux d'érosion élevé pour un angle d'impact de 30°. Letaux d'érosion diminue en augmentant l'angle d'impact à 60° et 90° (Fig. III.11 et Fig.III.12).On remarque que l'échantillon de 10 années d'utilisation présente le taux d'érosion le plus élevé dans tous les angles d'impact, ce qui veut dire une faible résistance à

l'érosion. L'augmentation de temps d'érosion influe toujours sur le taux d'érosion, on remarque que le taux est important dans une durée de sablage de 20 seconde (Fig. III.11), ce résultat est remarqué dans tous les durées d'utilisation et dans tous les angles d'impacts.

III.4.3 Observation microscopique :

a - Érosion pendant 20 sec

Les Figures III. 13, 14 et 15 présentes des observations par microscopie optique des cicatrices obtenues lors de l'essai d'érosion des échantillons testés pendant 20 seconde à différente angle.

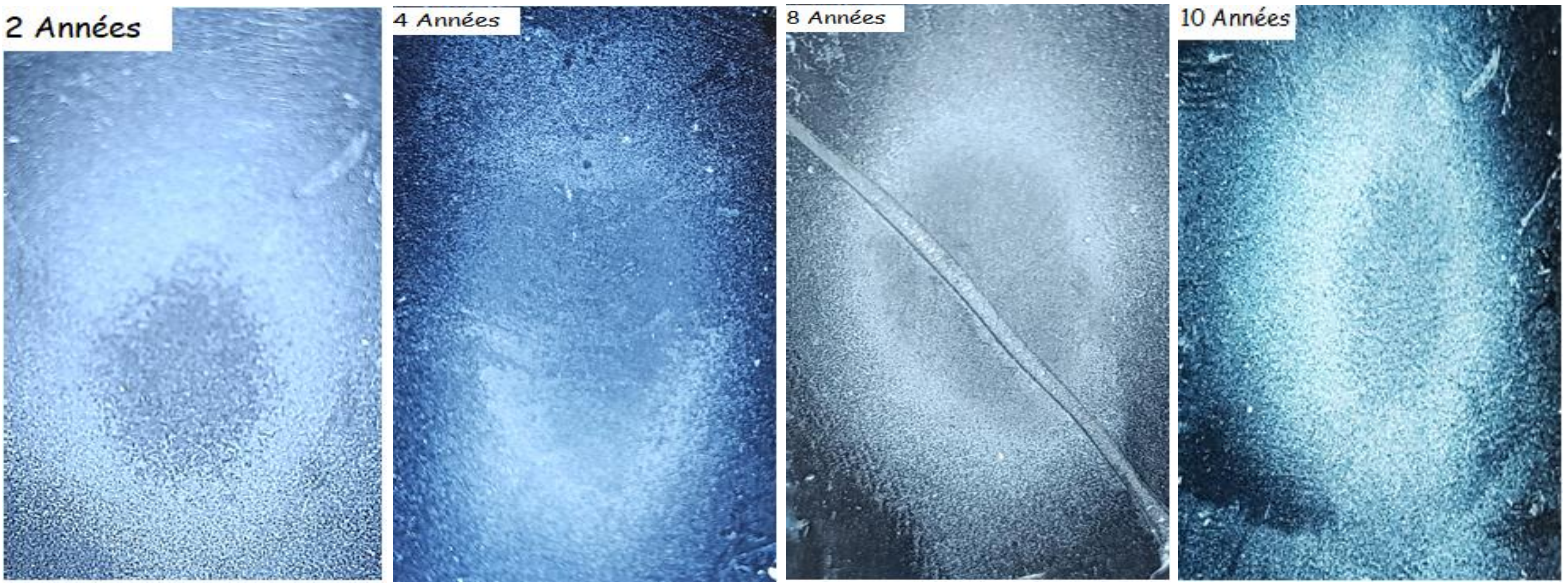


Figure III.13 : Érosion pendant 20 secondes, angle d'impact 30 °

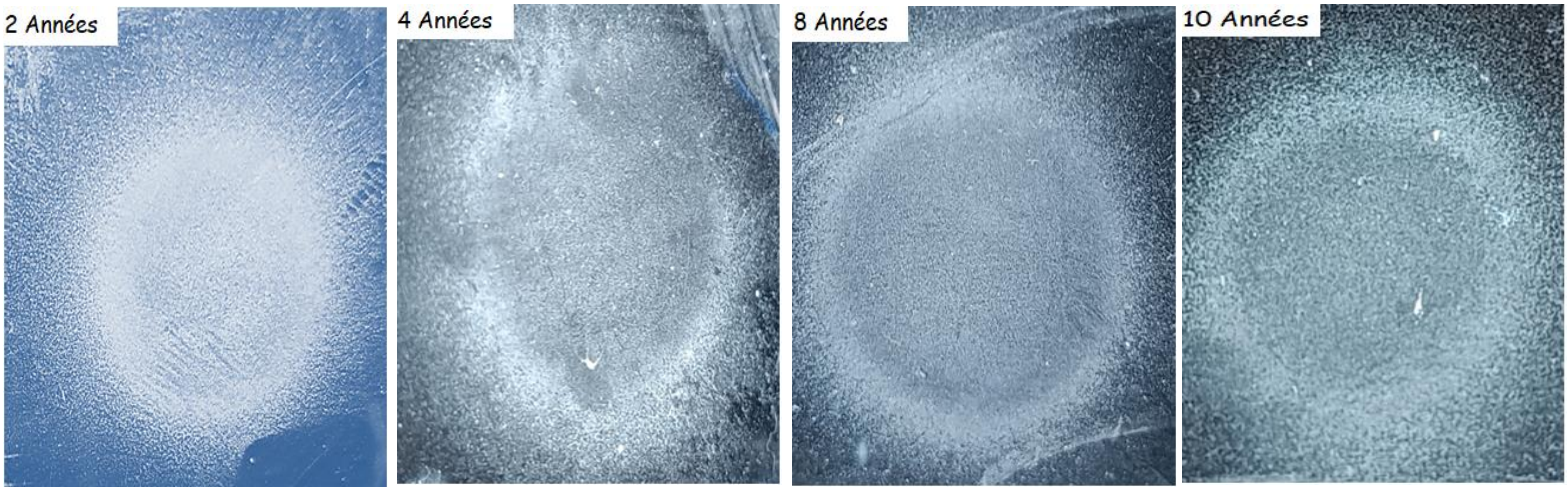


Figure III.14 : Érosion pendant 20 secondes, angle d'impact 60 °

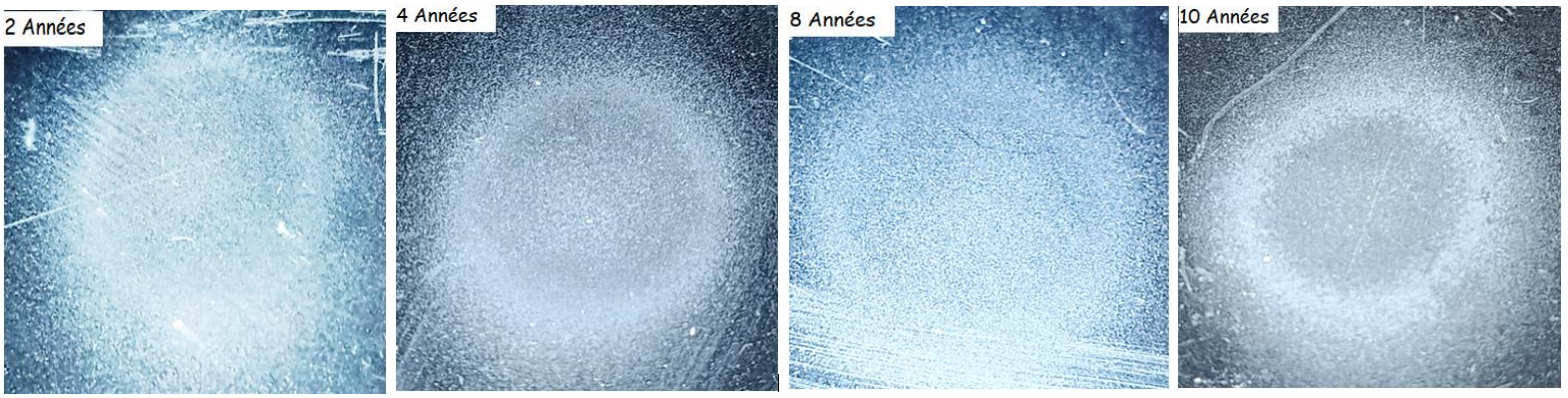


Figure III.15 : Érosion pendant 20 secondes, angle d'impact 90 °

Interpretation des résultats :

D'après les résultats obtenus, on remarque que l'angle d'impact et la durée d'utilisation et la durée de sablage influent fortement sur la résistance à l'érosion des optiques automobile. On à remarquer que la perte de masse est très importante a un angle d'impact de 30°, et se diminue en allant vers des angles d'impact de 60° et de 90° pour toutes les échantillons testés.

Le taux d'érosion est aussi influencé par l'angle d'impact et la durée d'utilisation et la durée de sablage. On a trouvé que le taux d'érosion augmente en diminuant la durée de sablage et augmente en augmentant l'angle d'impact.

On a remarqué que l'échantillon de 4 années d'utilisation à la meilleur résistance à l'érosion, et ceci est interpréter par le résultat de zakarya et al [45]. Zakarya et al étudiés l'influence de milieu saharien aride sur la résistance au rayage des couche de peinture à base de polymère, ils trouvent que la microdureté des matériaux polymère augmente en augmentant la durée d'utilisation jusqu'à un optimum de 5 années d'utilisation, et commence de se diminue au-delà de cette période

b - Érosion pendant 40 sec

Les Figures III. 16, 17 et 18 présentes des observations par microscopie optique des cicatrices obtenues lors de l'essai d'érosion des échantillons testés pendant 40 seconde à différente angle.

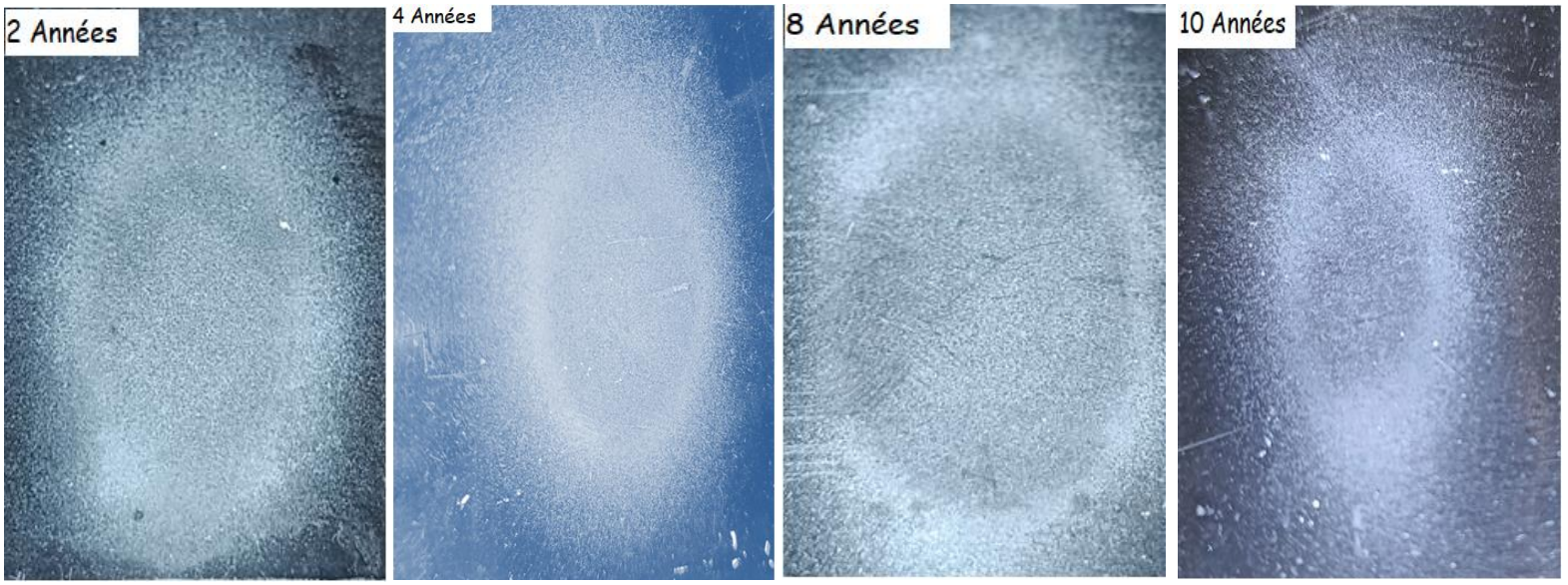


Figure III.16 : Érosion pendant 40 secondes, angle d'impact 30 °

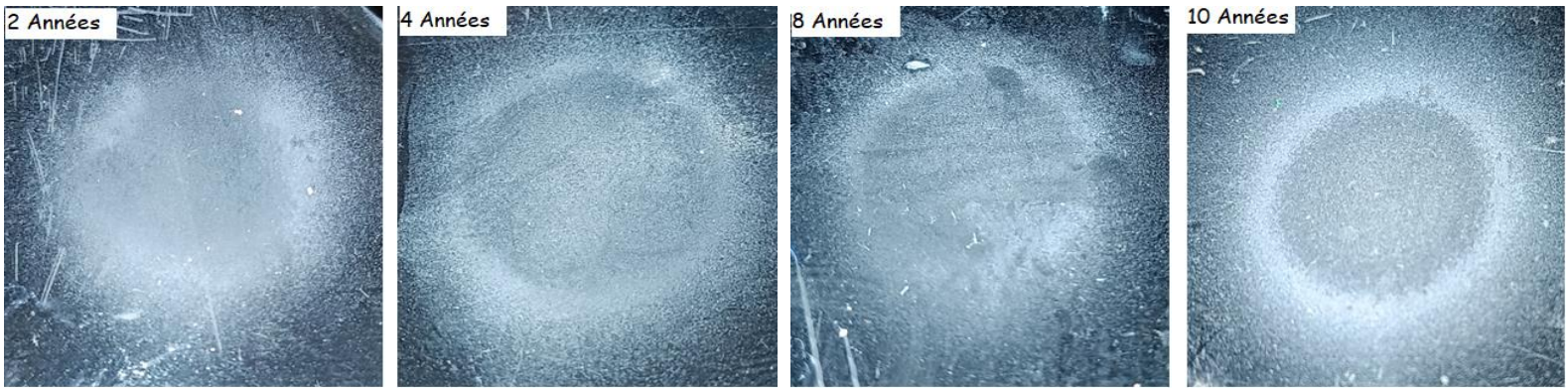


Figure III.17 : Érosion pendant 40 secondes, angle d'impact 60 °

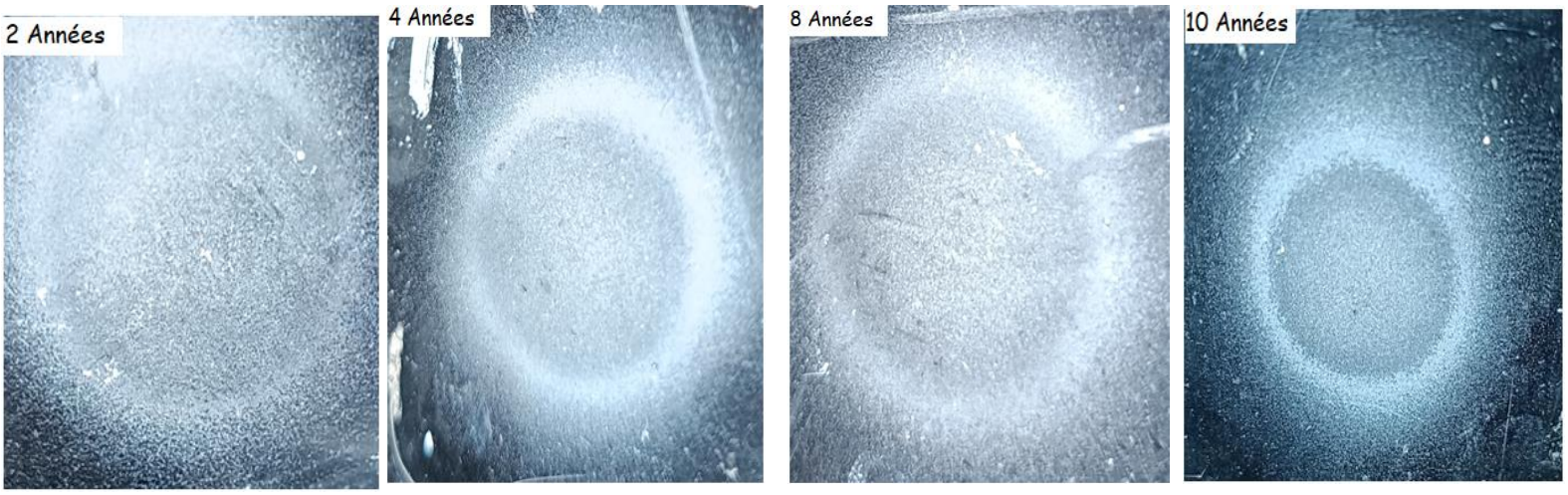


Figure III.18 : Érosion pendant 40 secondes, angle d'impact 90 °

Dans tous les cas, la taille des cicatrices est très grande à un angle d'impact de 30° et est diminué en allant vers des angles d'impact de 60° et 90°. Une forme elliptique est observée à 30° et 60° tandis qu'une forme approximativement circulaire est observée à 90°.Ce résultat peut être expliqué par la géométrie d'impact, qui est modifiée avec l'orientation de l'échantillon lorsque ce dernier est positionné à différents angles d'impact. De plus, cette forme elliptique peut être formée en raison d'une divergence plus élevée du flux de particules à des angles d'impact inférieurs, comme observé dans d'autres études sur l'érosion [46] [47].Dans tous les cas, la surface de la zone endommagée est importante lorsque l'angle d'impact est réduit.

III.5 Conclusion :

Dans ce chapitre une simulation expérimentale de phénomène d'érosion pour étudié le comportement des peintures automobiles est réalisée. Quatre échantillons de lentille d'optique automobiles de différentes années d'utilisation de 2, 4, 8 et 10 ont été utilisés.

Une présentation de différentes résultats obtenus ainsi les discussions les interprétations et on termine par une conclusion.

Ce chapitre illustre l'influence de la durée d'utilisation sur la résistance à l'érosion par particules solides des optiques automobiles. Les résultats obtenus sont nombreux et sont collecté ci-dessous :

1- La perte de masse est très influencée par la durée d'utilisation, l'angle d'impact et par le temps de sablage.L'échantillon de 4 années d'utilisation présentela perte de masse la plus faible par rapport aux autres durées d'utilisation.Ce résultat peut être dû à l'amélioration dans sa microdureté [43].L'échantillon de 10 années montre la plus grande perte de masse, ce qui signifie la plus faible résistance à l'érosion. L'échantillon de 8 années d'utilisation présente une anomalie dans certain points d'essai ce qui nous exige de prendre en considération l'influence de la microdureté dans un travail au futur. La perte de masse est élevée à 40 secondes de sablage.

2- Le taux d'érosion aussi est très influencé par la durée d'utilisation, l'angle d'impact et par le temps de sablage. D'après les résultats obtenus, le taux d'érosion est très important pour un angle d'impact de 30°.Le taux d'érosion est très important à 20 secondes de sablage.

3- Les observations optiques des cicatrices ont montrés que la taille de la cicatrice est très importante à un angle d'impact de 30° pour tous les cas étudiés. Cette taille diminue en allant vers des angles d'impact de 60° et 90°. L'enlèvement de la matière est observé au point de concentration de flux de particules qui est positionné au début de la cicatrice à 30° d'angle d'impact et commencé à se déplacer vers le centre pour un angle d'impact de 90°.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Dans le cadre de cette mémoire, une étude expérimentale de la résistance à l'érosion des optiques automobiles utilisées dans un endroit au nord de l'Algérie est réalisée. Les échantillons testés ont des années d'utilisation réelle de 2, 4, 8 et 10. Pour les essaisexpérimentaux d'érosion, un banc d'essai est utilisé au sein de Laboratoire de Rhéologie et Mécanique (LRM) de l'université de HassibaBenbouali de Chlef.

Avant les essais d'érosion, les échantillons ont été préparés après pesés par une balance de précision de 10^{-3} gr pour déterminer le poids initiale afin avoir la perte de poids après l'essai.

Les conditions opératoires de l'essai d'érosion sont : trois angles d'impact de 30°, 60° et 90°, deux durées de sablage de 20 et 40 secondes ont été utilisées. Les résultats obtenus montrent que l'échantillon de 4 années d'utilisation présenteune perte de masse et un taux d'érosion le plus faible pour tous les angles d'impact testés, ce qui favorise la meilleur résistance à l'érosion de cet échantillon.

On remarque que la perte de masse et le taux d'érosion sont importants pour un angle d'impact de 30°.

Les valeurs de taux d'érosion sont importantes à une durée de sablage de 20 secondes pour tous les angles et les durées d'utilisations testés.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/matieres-thermoplastiques-monographies-42147210/polycarbonates-am3381/

[2] https://www.avatacar.com/blog/mecanique-auto/les-differents-types-eclairage-voiture/

[3]https://www.google.com/search?sxsrf=APwXEdehIjv_D9kxlZJRw2YJDECWyDYHaQ:1687645782025&q=les+phare+automobiles&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwijmeC6-tz_AhVyUKQEHWaICXMQ0pQJegQIDBAB&biw=1024&bih=568&dpr=1#imgrc=_gIRQ7uSX48KXM

[4]https://www.google.com/search?sxsrf=APwXEddUPvTn1XWij7v_30BPvsgeoNhXEQ:1687729017579&q=Les+ampoules+halog%C3%A8nes.et+xenon&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwiHpcfEsN__AhUB6aQKHTIhADsQ0pQJegQIDBAB&biw=1024&bih=625&dpr=1

[5] SprayMax-Scheinwerferprimer_FR.

[6] https://www.alsol.fr/informations/19-quest-ce-que-le-polycarbonate

[7] Thèse de Doctorat de l'Université de Lyon opérée au sein de l'Ecole centrale de Lyon

[8] POLYMERE_PC.pdf

[9] https://ere132.com/apprenez/pour-une-maison-sante/plastifiants.php

[10]https://www.ummto.dz/dspace/bitstream/handle/ummto/8591/MimouniYamina_SalhiN.pdf?sequence=1

[11] https://plasticexpress.fr/proprietes-physiques

[12] https://thesis.univ-biskra.dz Chapitre Dégradation

[13] https://infos.wurth.fr/astuce-voiture-comment-renover-vos-optiques-de-phares/

[14] https://Les sites pour vendre des produits.

[15] Y.I. Oka, S. Mihara, T. Yoshida, 'Impact-Angle Dependence and Estimation of Erosion Damage to Ceramic Materials Caused by Solid Particle Impact', Wear, 267 (2009) 129- 135.

[16] Ruff, A. W. And Wiederhorn, S. M. ‘Erosion by Solid Particle Impact, In: Preece, C. M. (ed.), Treatise on Materials Science and Technology, 16 (1979) 69–125, Academic Press, New York.

[17] Kleis, I. ‘Probleme der Bestimmung des ShrahlverschleissesbeiMetallen’, Wear, 13 (1969) 199–215.

[18] Venugopal Reddy, A. And Sundarajan, G. Erosion Behaviour of Ductile Materials with a Spherical Non-friable Erodent, Wear, 111 (1986) 313–323.

[19] Tilly, G. P. Erosion Caused by Airborne Particles, Wear, 14 (1969) 63–76,

[20] Zahavi, J. And Schmitt, G. F. Solid Particle Erosion of Reinforced Composite Materials, Wear, 71 (1981) 179–190.

[21] N. Adjouadi, «Influence de l’Etat de Surface des Pare-Brises sur la Visibilité des Conducteurs», Thèse de doctorat en science, (2015) IOMP, ufasétif.

[22] Tilly, G. P. And Sage, W. ‘The Interaction of Particle and Material Behaviour in Erosion Processes’, Wear, 16 (1970) 447–465.

[23] Tilly, G. P. ‘The Erosion of Ductile Metals by Spherical Particles’, Wear, 14 (1969) 241–248.

[24] Finnie IA. ‘Erosion of surfaces by solid particles’. Wear; 3 (1960) 87–103.

[25] Sheldon, G. L. ‘Similarities and Differences in the Erosion Behavior of Materials’, Trans. ASME J. Basic Engr., 92 (1970) 619–626.

[26] J.E. Goodwin, W. Sage, G.P. Tilly, ‘Study of Erosion by Solid Particles’, Proc. Inst, of Mech. Engg. (London), 184 (1969) 279-292.

[27] Smeltzer C. E, Gulden M. E and Compton W. A, ‘Mechanisms of material removal by impacting dust particles’, J. Basic Eng., 92 (1970) 639-654.

[28] S.yerramareddy, S. Bahadur, ‘Effect of operational variables, microstructure and mechanical properties on the erosion of Ti-6Al-4V’, Wear, 142 (1991) 253-263.

[29] I. Finnie, G.R. Stevick, J.R. Ridgely, ‘The influence of impingement angle on the erosion of ductile metals byangular abrasive particles’, Wear, 152 (1992) 91-98.

[30] C.-K Fang, T. H Chuang, ‘Surface morphologies and erosion rates of metallic building materials after sandblasting’, Wear 230 (2) 1999 156-164.

[31] Raask E. ‘Tube erosion by ash impact’. Wear; 13 (1969) 301–315.

[32] M. I. Hutchings, ‘Tribology : Friction and wear of engineering materials’, london : CRC Press, 1992

[33] G. Carter, I. J. Bevan, I. V. Katardjiev, and M. J. Nobes, ‘The erosion of copper by reflected sandblasting grains’, Materials Science and Engineering: A 132 (1991) 231-236.

[34] Wellinger, K. And vetz, H, Gleit-Spül und StrahlverschleissPrüfung, "Wear". 1 (1957-58) 225-231.

[35] Sheldon G.L, ‘Similarities and differences in the erosion behavior of materials’. Trans. ASME, J. Basic Eng., Ser. D. 92 (1970) 619–626.

[36] P. R. Sundararajan, ‘Conformational features of the carbosilanepolysilapropylene and comparison with polypropylene’, Macromolecules, 23 (1990) 3179–3183.

[37] M. Karim, S. Naamane, C. Delord A. Bennouna, ‘Laboratory simulation of the surface erosion of solar glass mirrors’, Solar Energy, 118 (2015) 520-532.

[38] S. Caron, ‘Accelerated aging of thick glass second surface silvered reflectors under sandstorm conditions’, Master Thesis, European Solar Engineering School, 2011.

[39] M. Magdich, «Durability in Desert Environments», Eco Guardian, Global CSP & PV Guardian. (2011).

[40] Y. Gachon, A. Vannes, , G. Farges, , M.Sainte Catherine, I. Caron, G. Inglebert, ‘Study of Sand Particle Erosion of Magnetron Sputtered Multilayer Coatings’, Wear, 233-235 (1999) 263-274.

[41] E.G. Collier, ‘Development and use of a duststorm simulation chamber to evaluate solar concentrator degradation as characterized by Loss in reflectivity’, Master Thesis, Texas Tech

University, (1980).

[42] D. Jianxin, L. Lili, L. Jianfeng, D. Mingwei, Y. Xuefeng, 'Development of Sic/(W,Ti)C Gradient Ceramic Nozzle Materials for Sand Blasting Surface Treatments', Intern. Jour. Of Refractory Metals & Hard Materials, 25 (2007) 130-137.

[43] MAROUANI ABDELHAK, 'Etude des caractéristiques physiques de couches mince à base d'oxydes métalliques déposés par voie sol-gel', Thèse de doctor at en sciences, (2018).

[44] Bouaziz, 'Etude des Propriétés d'un Verre Sodo-Calcique Erodé avec du Sable de Ouargla', Mémoire de Magister, IOMP, UFA Sétif, 2004.

[45] **Z. Madaoui, M. Mendas, H. Zahloul, S. Benayoun,** Scratch Resistance of Paints Degraded by Arid Saharan Environments. Prog. Color Colorants Coat., 11 (2018), 233-240.

[46] Finnie I., G.R. Stevick, J.R. Ridgely, 'The influence of impingement angle on the erosion of ductile metals by angular abrasive particles', Wear 152 (1992) 91–98.

[47] Lapides L., A. Levy, 'The halo effect in jet impingement solid particle erosion testing of ductile metals', Wear, 58 (1980) 301–311.