

Republique Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche scientifique



Université de Ghardaïa



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'Automatique et d'Electromécanique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : *Sciences et Technologies*

Filière : *Électromécanique*

Spécialité : *Maintenance Industrielle*

Par : Ismail Ouamer & Kara Abdallah Taha Yacine .

Thème

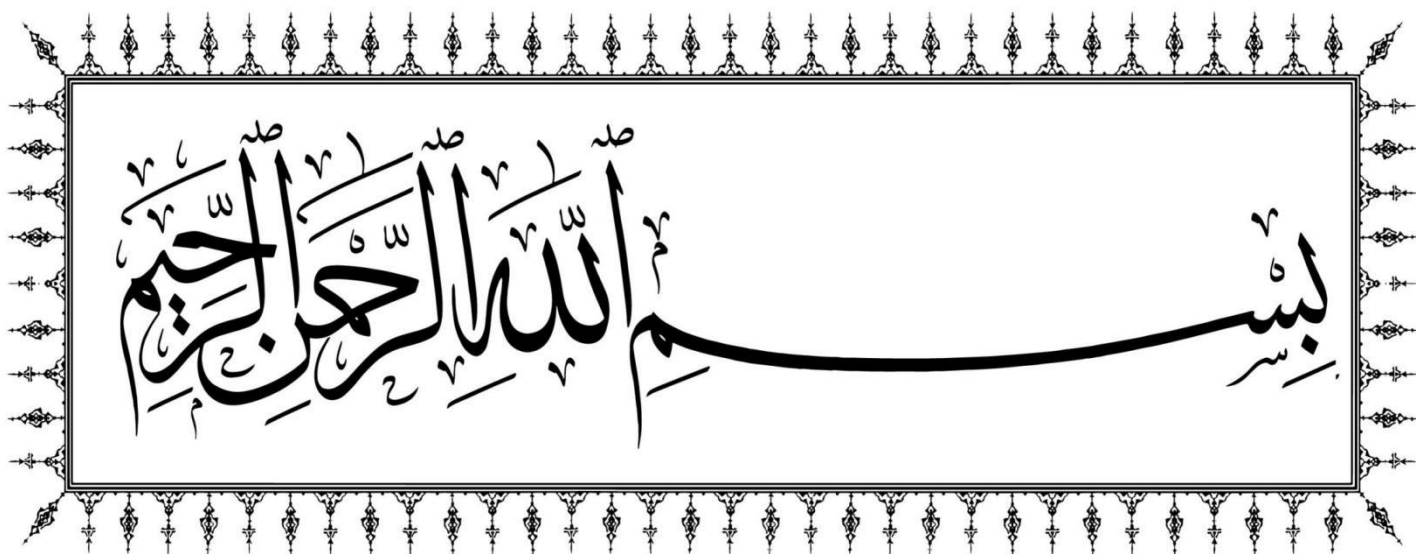
**Influence de l'environnement saharien algérien
sur les tubes en PEHD-Effets sur les propriétés
mécaniques**

Soutenu publiquement le : 14/06/2026

Devant le jury :

M. Hamed BOUKHARI	Univ. Ghardaïa	Président
Mme Fatima BOUCHELAGHA	Univ. Ghardaïa	Examineur
M. Amor BOUARICHA	Univ. Ghardaïa	Encadreur

Année universitaire 2025/2026



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail à ceux qui occupent une place précieuse dans notre cœur et qui ont, chacun à sa manière, accompagné notre parcours personnel et intellectuel.

À nos **chers parents**, piliers de notre vie, pour leur amour inconditionnel, leurs encouragements constants et leurs prières sincères.

À nos **frères et sœurs**, compagnons de souvenirs, de joies et d'épreuves.

À nos **amis fidèles**, pour leur soutien, leur écoute et leurs mots réconfortants.

À nos **collègues**, pour les échanges enrichissants, le partage de savoir et l'esprit d'équipe.

Et tout particulièrement,

Nous exprimons notre profonde gratitude pour votre sagesse, votre patience et votre passion. Grâce à vos conseils et à votre bienveillance, vous avez su éveiller en nous le goût du savoir et l'exigence du travail bien fait.

Avec toute notre reconnaissance.

Ismail & Yacine



Remerciements

Nous exprimons nos sincères remerciements à :

Notre encadrant, M. Bouaricha Amor, ainsi qu'à M. Akermi Fouzi, pour leur accompagnement précieux, leurs conseils avisés et leur bienveillance tout au long de ce travail. Leur soutien nous a permis d'avancer avec confiance et rigueur.

Nous remercions également nos enseignants pour la richesse de leur enseignement, ainsi que nos familles, en particulier nos parents, pour leur amour, leur patience et leurs encouragements constants.

Un grand merci à nos collègues et amis pour leur soutien moral, leurs échanges enrichissants et leur présence à chaque étape de ce travail.

À toutes et à tous,

Merci de tout cœur.

Résumé :

Cette étude vise à analyser l'influence de l'environnement saharien algérien sur les propriétés mécaniques des tubes en polyéthylène haute densité (PEHD) utilisés dans les réseaux de transport du gaz naturel. Le climat désertique se caractérise par des températures élevées, un rayonnement ultraviolet intense, une faible humidité ainsi que des tempêtes de sable susceptibles d'affecter les performances et la durabilité des matériaux polymères. Le travail s'appuie sur une analyse bibliographique des propriétés physiques et mécaniques du PEHD, des mécanismes de vieillissement des polymères et des caractéristiques climatiques du Sahara algérien. Une démarche expérimentale a également été mise en œuvre à travers la préparation d'éprouvettes normalisées et l'application de protocoles de vieillissement accéléré conformes aux normes internationales.

Les résultats montrent que l'exposition prolongée aux températures élevées, au rayonnement ultraviolet et à l'abrasion par le sable entraîne une dégradation progressive de la structure du matériau, provoquant une diminution de certaines propriétés mécaniques telles que la résistance à la traction, la résistance à la fissuration sous contrainte et la résistance aux chocs. L'étude met en évidence l'importance de l'utilisation d'additifs stabilisants, du choix approprié du matériau et de conditions d'installation adaptées afin d'améliorer la durée de vie des conduites et d'assurer la sécurité des réseaux de transport de gaz en milieu saharien.

Mots-clés : PEHD, environnement saharien, propriétés mécaniques, rayonnement UV, vieillissement accéléré, résistance à la traction, abrasion par le sable, transport de gaz naturel.

المخلص:

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل تأثير البيئة الصحراوية الجزائرية على الخصائص الميكانيكية لأنابيب البولي إيثيلين عالي الكثافة (PEHD) المستخدمة في شبكات نقل الغاز الطبيعي. وتتميز البيئة الصحراوية بمجموعة من العوامل المناخية القاسية، أهمها درجات الحرارة المرتفعة، والإشعاع الشمسي والأشعة فوق البنفسجية، والعواصف الرملية، والانخفاض الكبير في الرطوبة، وهي عوامل تؤثر بصورة مباشرة في سلوك المواد البوليمرية ومدة خدمتها. اعتمدت الدراسة على مراجعة أدبية شاملة للخصائص الفيزيائية والميكانيكية لأنابيب PEHD وآليات تدهورها تحت تأثير العوامل البيئية المختلفة، إضافة إلى دراسة خصائص المناخ الصحراوي الجزائري. كما تم إعداد عينات معيارية من أنابيب PEHD وإخضاعها لبروتوكولات شيخوخة متسارعة تحاكي الظروف الحقيقية للاستعمال، مع الاستناد إلى المعايير الدولية الخاصة باختبارات المواد البلاستيكية.

أظهرت نتائج الدراسة أن التعرض المطول لدرجات الحرارة المرتفعة والأشعة فوق البنفسجية والتآكل الرملية يؤدي إلى تغيرات بنيوية في المادة البوليمرية، مما ينعكس على انخفاض بعض الخصائص الميكانيكية مثل مقاومة الشد ومقاومة التشقق تحت الإجهاد والقدرة على تحمل الصدمات، وبالتالي تقليص العمر الافتراضي للأنابيب. كما بينت الدراسة أهمية اختيار المواد المناسبة، وإضافة المثبتات المضادة للأشعة فوق البنفسجية، واعتماد شروط تركيب ملائمة للحد من تأثير البيئة الصحراوية وضمان استمرارية وأمان شبكات نقل الغاز.

الكلمات المفتاحية: البولي إيثيلين عالي الكثافة (PEHD)، البيئة الصحراوية الجزائرية، الخصائص الميكانيكية، الأشعة فوق البنفسجية، الشيخوخة المتسارعة، مقاومة الشد، التآكل الرملية، شبكات نقل الغاز.

Abstract :

This study investigates the influence of the Algerian Saharan environment on the mechanical properties of High-Density Polyethylene (HDPE) pipes used in natural gas transportation networks. Desert environments are characterized by extreme temperatures, intense ultraviolet radiation, low humidity, and frequent sandstorms, all of which may significantly affect the performance and durability of polymeric materials. The work is based on a comprehensive literature review of HDPE physical and mechanical properties, polymer degradation mechanisms, and the climatic characteristics of the Algerian Sahara. An experimental approach was also adopted through the preparation of standardized specimens and the application of accelerated aging protocols in accordance with international standards.

The results indicate that prolonged exposure to high temperatures, ultraviolet radiation, and sand abrasion leads to progressive degradation of the polymer structure, resulting in a reduction in key mechanical properties such as tensile strength, environmental stress crack resistance, and impact resistance. The study highlights the importance of using UV stabilizers, selecting suitable HDPE grades, and adopting appropriate installation practices to improve service life and ensure the reliability and safety of gas transportation systems operating in desert environments.

Keywords: HDPE, Saharan environment, mechanical properties, UV radiation, accelerated aging, tensile strength, sand abrasion, natural gas transportation networks.

Notations

PEHD	Polyéthylène Haute Densité
HDPE	High Density Polyethylene
PE100	Polyéthylène classe PE100
PE100-RC	Polyéthylène à résistance accrue à la fissuration lente
UV	Ultraviolet
ESCR	Environmental Stress Crack Resistance
SCR	Stress Crack Resistance
ISO	International Organization for Standardization
ASTM	American Society for Testing and Materials
SDR	Standard Dimension Ratio
PN	Pression Nominale
MOP	Maximum Operating Pressure
SCG	Slow Crack Growth
RCP	Rapid Crack Propagation
MPa	Mégapascal
GPa	Gigapascal
K-Plast	Société de fabrication des tubes utilisée dans l'étude

Table des matières

Dédicaces	I
Remerciements	III
Résumé	IV
Notations	VI
Sommaire	VII
Liste des Figures	XI
Liste des Tableaux	XII
Introduction générale	02

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES MATERIAUX DE CONSTRUCTION

Introduction	04
I.1. Contexte saharien et facteurs environnementaux influents.....	04
I.2. Importance du sujet pour les réseaux de gaz	05
I.2.1. Assurer la sûreté et la sécurité des réseaux de gaz	05
I.2.2. Améliorer la durée de vie des tuyaux	05
I.2.3. Réduire les coûts de maintenance et d'exploitation	05
I.2.4. Assurer la continuité de l'approvisionnement en gaz dans les zones désertiques	05
I.2.5. Soutenir l'élaboration de Normes et de spécifications techniques nationales	06
I.3. Limites de l'étude.....	06
I.3.1. Limites physiques	06
I.3.2. Limites environnementales	06
I.3.3. Limites géographiques	06
I.3.4. Limites expérimentales	06
Conclusion	07

CHAPITRE II : ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction	09
II.1. Informations générales sur des tubes PEHD	09
II.1.1. Structure moléculaire	09
II.1.2. Caractéristiques	10
II.2. Propriétés mécaniques des tubes en PEHD	10
II.2.1. Coefficient d'élasticité (Module de young)	11
II.2.2. Résistance à la traction.....	11
II.2.3. Résistance à la corrosion et à la fissuration sous contrainte environnementale (ESCR)	11
II.3. Effets connus des facteurs environnementaux sur les polymères et le PEHD	12
II.3.1 Température élevée	12
II.3.1.1. Mécanisme de dégradation	12
II.3.1.2. Effets sur les propriétés mécaniques	12
II.3.2. Rayonnement UV	12
II.3.2.1. Mécanisme de dégradation.....	13
II.3.2.2. Effets sur les propriétés mécaniques.....	13
II.3.3. Abrasion par le sable	13
II.3.3.1. Effets sur les propriétés mécaniques.....	13
II.3.4. Spécifications standard et normes industrielles	14
II.3.4.1. Spécifications physiques et mécaniques générales des tuyaux PEHD.....	15
II.3.4.2. Normes industrielles (Internationales / américaines)	15
Conclusion	16

CHAPITRE III: CARACTERISATION DE L'ENVIRONNEMENT SAHARIEN

Introduction	19
--------------------	----

III.1. Variables climatiques	19
III.1.1. La température	19
III.1.2. Vent	20
III.1.3. Rayonnement solaire	21
III.1.4. Humidité	23
III.1.5. Profils temporels des facteurs (journalier/saisonnier)	25
Conclusion	26

CHAPITRE IV: DEMARCHE EXPERIMENTALE

Introduction	28
IV.1. Sélection de l'échantillon étudié.....	28
IV.2. Protocole de vieillissement accélérée.....	28
IV.3 Essai de traction	29
IV.3.1. Préparation des échantillons.....	29
IV.3.2. Techniques expérimentales.....	30
IV.4. Etat initial (avant vieillissement)	31
IV.5. Etat vieilli (après vieillissement).....	33
IV.5.1. Vieillissement par irradiation UV.....	33
IV.5.1.1. Contrainte au seuil d'écoulement	35
IV.5.1.2. Module de Young	36
Conclusion	36
Conclusion générale	38

Références

Liste des figures

Figure II.1 : tuyaux PEHD	09
Figure II.2 : Structure chimique du Polyéthylène (PE)	10
Figure III.1: variationannuelle de la température dans la ville de Ouargla (2025-2026)	20
Figure III.2: variationannuelle de la vitesse et de la direction du vent dans la ville de Ouargla (2025-2026)	21
Figure III.3 : variationannuelle de l'humidité relative dans la ville de Ouargla (2025-2026)	25
Figure IV.1: Tuyau de transmission de gaz PEHD100	28
Figure IV. 2 : Forme deséprouvettes de traction.	29
Figure IV. 3 : Géométrie et dimensions des éprouvettes de traction.	30
Figure IV.4: Machined'essai de traction " Testometric "	30
Figure IV. 5 : Courbe detraction d'un polymère semi-cristallin (PEHD)	31
Figure IV. 6 : Évolution del'allongement d'une éprouvette en PEHD au cours d'un essai de traction avantrupture.	32
Figure IV. 7 : Différentes zones composent la courbe de traction agrandie entre 0 et 100% de déformation pour le PEHD.	32
Figure IV.8 : Evolution de la contrainte en fonction de la déformation aprèsdifférentes durées d'irradiation pour une vitesse de 100 mm/min et àtempérature ambiante (23,5 °C) et $\lambda=365$ nm.	34
Figure IV.9 : Evolution de la contrainte au seuil d'écoulement du PEHD enfonction dela durée d'exposition	35
FigureIV.10 : Evolution du module d'Young enfonction de la durée d'irradiation du PEHD	36

Listes des tableaux

Tableau IV.1 : Caractéristiques mécaniques expérimentales du PEHD à l'état initial (nonvieilli)	33
Tableau IV.2 : Caractéristiques mécaniques expérimentales du PEHD vieilli à différentes durées.	35

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE :

Les tuyaux en polyéthylène haute densité (PEHD) constituent l'épine dorsale des réseaux de transport de gaz naturel grâce à leur grande flexibilité, leur résistance chimique et leur facilité d'installation. Cependant, leur fonctionnement dans des environnements désertiques difficiles pose des défis fondamentaux qui vont au-delà de la simple surchauffe, pour inclure des interactions complexes avec le rayonnement ultraviolet, de grandes fluctuations thermiques entre le jour et la nuit, une sécheresse constante et l'érosion causée par des sables volatils. Ces facteurs affectent non seulement la surface externe, mais pénètrent également dans la structure moléculaire, provoquant une "rupture et fission de la chaîne" et une "cristallisation chimique" accélérées, ce qui entraîne une perte progressive de la propriété vitale "plasticité" qui permet aux tubes d'absorber les contraintes mécaniques, les rendant vulnérables à la présence d'un danger potentiel soudain qui peut endommager le tube. Dans le contexte des zones désertiques algériennes de la vallée de Safa, où les projets d'infrastructure sont répartis à des températures allant jusqu'à 50 degrés Celsius et une faible humidité, un problème majeur se pose quant à la mesure dans laquelle ces conditions extrêmes affectent les propriétés mécaniques des tuyaux (telles que la traction, la résistance aux chocs, la propagation des fissures), provoquent une corrosion superficielle, augmentent les coûts de maintenance et de remplacement. Par conséquent, cette étude vise à évaluer et analyser les processus de dégradation physique de ces matériaux, et à déterminer dans quelle mesure leurs propriétés de base ont changé à la suite d'une exposition à long terme à ces facteurs, dans le but de fournir des recommandations scientifiques et pratiques qui contribuent à améliorer la durabilité de ces tuyaux et à prolonger leur durée de vie, pour assurer la sécurité et la durabilité des infrastructures énergétiques dans des conditions désertiques difficiles.

CHAPITRE I:

CADRE GENERAL DE L'ETUDE

CHAPITRE I : CADRE GENERAL DE L'ETUDE

Introduction :

L'utilisation des tubes en polyéthylène haute densité (PEHD) dans les réseaux de transport et de distribution du gaz naturel connaît une expansion considérable grâce à leurs propriétés mécaniques avantageuses, leur résistance à la corrosion et leur facilité d'installation. Toutefois, les conditions climatiques sévères qui caractérisent l'environnement saharien algérien peuvent affecter leur comportement à long terme et compromettre leur durabilité.

Dans ce contexte, il apparaît nécessaire d'étudier les principaux facteurs environnementaux propres au milieu désertique ainsi que leur influence potentielle sur les infrastructures gazières. Ce chapitre présente le cadre général de l'étude en mettant l'accent sur les caractéristiques du climat saharien, les contraintes auxquelles sont soumis les tubes en PEHD et l'importance de cette problématique pour la sécurité, la fiabilité et la pérennité des réseaux de transport du gaz.

I.1. Contexte saharien et facteurs environnementaux influents :

Le climat désertique est l'un des environnements les plus difficiles lors de l'évaluation des performances des tuyaux en polyéthylène haute densité (PEHD) utilisés dans les réseaux de transport de gaz, en raison de ses conditions naturelles difficiles qui affectent directement les matériaux polymères. Les déserts sont caractérisés par des températures très élevées le jour, ce qui est compensé par une diminution notable la nuit, ce qui impose aux canalisations des cycles répétés de dilatation et de contraction pouvant entraîner une accumulation de contraintes thermiques. L'exposition constante au rayonnement ultraviolet est également un facteur clé pour accélérer les processus de vieillissement photothermique et thermique des polymères, qui peuvent réduire leur durée de vie s'ils ne sont pas améliorés par des additifs protecteurs. De plus, le sable et les tempêtes de sable sont une source de corrosion superficielle et de micro-rayures qui peuvent affecter la résistance des tuyaux aux facteurs externes. Une faible humidité et une sécheresse constante, en revanche, contribuent à modifier le comportement du sol autour des tuyaux, ce qui peut se refléter dans les contraintes mécaniques qui agissent sur eux.

La compréhension conjointe de ces facteurs environnementaux est une étape essentielle pour comprendre les défis auxquels sont confrontés les pipelines pehd dans le contexte du désert, et permet de développer des solutions d'ingénierie et techniques qui assurent la durabilité des réseaux de transport de gaz dans des conditions aussi extrêmes.

I.2. Importance du sujet pour les réseaux de gaz :

L'importance de ce sujet passe par un ensemble d'aspects techniques, économiques et sécuritaires qui font de la compréhension du comportement de cette substance en milieu désertique une nécessité scientifique et de terrain.

I.2.1. Assurer la sûreté et la sécurité des réseaux de gaz :

Les tuyaux PEHD sont largement utilisés en raison de leurs propriétés distinctives, telles que leur résistance à la corrosion, leur légèreté et leur grande élasticité. Cependant, l'environnement désertique algérien se caractérise par une élévation significative des températures, une grande fluctuation thermique quotidienne, en plus d'une exposition constante aux rayons ultraviolets et aux tempêtes de sable.

I.2.2. Améliorer la durée de vie des tuyaux :

Cela contribue à :

- ✓ Choisir la nuance de PEHD la plus appropriée en fonction des exigences de pression et de température.
- ✓ Ajustez les proportions d'additifs anti-UV pour assurer une meilleure protection.
- ✓ Détermination de la profondeur optimale d'enfouissement des tuyaux dans le but de réduire l'influence du rayonnement solaire et de la chaleur de surface.

I.2.3. Réduire les coûts de maintenance et d'exploitation :

La détérioration prématurée des canalisations en raison de conditions climatiques sévères entraîne des coûts d'entretien et de réparation élevés, ainsi que d'éventuelles interruptions de service. En étudiant scientifiquement les impacts environnementaux, des stratégies de prévention efficaces peuvent être développées qui réduisent les taux d'échec et réduisent les coûts opérationnels à long terme.

I.2.4. Assurer la continuité de l'approvisionnement en gaz dans les zones désertiques :

De nombreuses régions du Sud s'appuient sur des réseaux de gaz en PEHD pour répondre aux besoins des résidents, des entreprises industrielles et énergétiques.

I.2.5. Soutenir l'élaboration de Normes et de spécifications techniques nationales :

Cette étude fournit des données scientifiques et techniques importantes aux organismes nationaux concernés par le secteur de l'énergie, tels que Sonatrach et Sonelgaz, ce qui contribue à :

- ✓ Améliorer les normes de conception et d'installation des réseaux de gaz.
- ✓ Développement de protocoles d'essais adaptés aux spécificités de l'environnement désertique.
- ✓ Adopter des matériaux et des technologies plus adaptés aux conditions climatiques locales.

I.3. Limites de l'étude**I.3.1. Limites physiques :**

L'étude se concentre sur les tuyaux en polyéthylène haute densité PE100, en particulier le tuyau utilisé dans l'étude produit par CHIALI TUBES, destiné au transport de gaz.

I.3.2. Limites environnementales :

L'étude se limite aux facteurs environnementaux les plus importants caractéristiques du Centre désertique algérien, représentés principalement par les températures élevées, le rayonnement solaire et ultraviolet, la faible humidité, le vent et les tempêtes de sable, en tant que facteurs pouvant affecter le vieillissement et la détérioration des tuyaux en PEHD.

I.3.3. Limites géographiques :

L'étude traite de l'environnement désertique algérien en mettant l'accent sur les conditions climatiques de la région d'Ouargla comme référence pour représenter les conditions désertiques locales, avec l'utilisation de certaines données climatiques pour d'autres zones désertiques algériennes lorsque la comparaison ou l'interprétation est nécessaire.

I.3.4. Limites expérimentales :

L'étude est basée sur des échantillons prélevés sur la paroi du tube PE100, la préparation d'échantillons standard pour les tests, avec l'application de protocoles de vieillissement accéléré dans le but de simuler certaines conditions d'exposition environnementales réelles.

- Les résultats sont limités au type de matériau, aux échantillons, aux conditions de vieillissement et aux protocoles expérimentaux adoptés dans cette étude, et ne peuvent donc pas être directement généralisés à tous les types de tubes pehd ou à toutes les conditions de fonctionnement dans le désert sans études supplémentaires impliquant différents types de matériaux, diamètres, conditions de fonctionnement et différentes durées d'exposition.

Conclusion :

Ce chapitre a permis de présenter le cadre général de l'étude ainsi que les principales caractéristiques de l'environnement saharien algérien susceptibles d'influencer les performances des tubes en PEHD. L'analyse a montré que les températures élevées, le rayonnement ultraviolet, les tempêtes de sable et les importantes variations thermiques constituent des facteurs de dégradation pouvant affecter les propriétés mécaniques et la durée de vie des conduites.

L'importance de cette thématique réside dans son impact direct sur la sécurité des réseaux de transport du gaz, la réduction des coûts de maintenance et l'amélioration de la fiabilité des infrastructures énergétiques. Ces éléments justifient la nécessité d'approfondir l'étude des propriétés du PEHD et des mécanismes de dégradation associés aux conditions désertiques.

CHAPITRE II:
ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE II: ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction :

Avant d'évaluer l'effet de l'environnement saharien sur les performances des tubes en PEHD, il est indispensable de comprendre les caractéristiques intrinsèques de ce matériau ainsi que les phénomènes physiques et chimiques susceptibles d'affecter son comportement. Le polyéthylène haute densité est un matériau polymère largement utilisé dans les applications industrielles en raison de ses excellentes propriétés mécaniques et de sa résistance à la corrosion.

Ce chapitre est consacré à une analyse bibliographique portant sur la structure du PEHD, ses principales propriétés mécaniques et les effets des facteurs environnementaux tels que la température, le rayonnement ultraviolet et l'abrasion par le sable. Les normes internationales et industrielles régissant la fabrication et l'évaluation des tubes en PEHD y sont également présentées.

II.1. Informations générales sur les tubes en PEHD :

Les tuyaux en polyéthylène haute densité (PEHD) sont des tuyaux fabriqués à partir de polyéthylène haute densité, un polymère thermoplastique semi-cristallin dérivé du pétrole. Ils se caractérisent par de longues chaînes principalement linéaires, ce qui leur confère une forte cohésion moléculaire et une grande résistance à la traction, comparativement à d'autres types de polyéthylène. Ces tuyaux sont également recyclables, ce qui en fait un choix respectueux de l'environnement. [1.2]



Figure II.1 : tuyaux PEHD.

II.1.1. Structure moléculaire :

Les polymères sont des substances constituées d'un grand nombre de petites unités répétitives appelées monomères. Un monomère est une molécule simple capable de réagir avec d'autres monomères pour former de longues chaînes appelées polymères.

Ces monomères sont souvent composés d'éléments de base tels que le carbone et l'hydrogène, ce qui confère aux polymères diverses propriétés qui sont utilisées dans de nombreux domaines tels que les plastiques et les fibres synthétiques. [1.2]

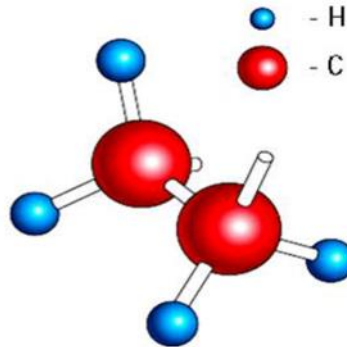


Figure II.2 : Structure chimique du Polyéthylène (PE).

II.1.2. Caractéristiques :

- Grande flexibilité : il peut être roulé en rouleaux de grandes longueurs, ce qui réduit les joints et accélère l'installation.
- Durabilité exceptionnelle : résiste aux chocs élevés même à basse température.
- Il présente une excellente résistance à la corrosion et aux produits chimiques : il ne rouille pas, mais cette résistance dépend de la concentration, de la température et de la contrainte.
- Connexions sans fuite : par soudage thermique (bout à bout ou avec connexions électriques) pour que la connexion devienne homogène avec le tuyau.
- Durée de conservation longue : généralement, elle dépasse 50 ans dans des conditions normales.
- Écologique : recyclable, réduit les pertes d'eau grâce à son système hermétique. [2]

II.2. Propriétés mécaniques des tubes en PEHD :

Le polyéthylène haute densité (PEHD) est l'un des matériaux polymères les plus importants utilisés dans les applications d'ingénierie, en particulier dans les systèmes de tuyauterie pour le transport de l'eau et du gaz. L'importance de ce matériau réside dans ses excellentes propriétés mécaniques, et cette étude vise à analyser les propriétés mécaniques les

plus importantes du PEHD, en se concentrant sur le module d'élasticité, la résistance à la traction, la résistance à l'usure et la fissuration sous contrainte environnementale.

II.2.1. Module d'young :

Le module d'élasticité est une mesure de la dureté d'un matériau et de sa capacité à résister à la déformation élastique. La littérature scientifique indique que sa valeur pour le PEHD varie de 0,55 à 1,00 GPA, ce qui est plus élevé par rapport au polyéthylène basse densité (PEBD). [3.4]

II.2.2. Résistance à la traction :

La résistance à la traction du PEHD varie de 20 à 30 MPa, ce qui est une caractéristique essentielle pour évaluer la capacité d'un matériau à résister aux contraintes avant l'effondrement.

II.2.3. Résistance à la corrosion et à la fissuration sous contrainte environnementale (ESCR) :

Le concept de corrosion dans les matériaux polymères est souvent associé à la corrosion chimique et à la résistance aux fissures sous contrainte environnementale, qui sont deux facteurs décisifs dans la performance des tuyaux en PEHD. [3.4]

Il se présente sous deux formes :

- **Corrosion chimique** : il s'agit d'un dommage qui se produit sur un matériau lorsqu'il réagit chimiquement avec des substances environnantes telles que des acides, des bases ou des substances oxydantes

- **Résistance à la fissuration sous contrainte environnementale (ESCR)** : c'est une mesure qui montre la capacité du plastique (comme le PEHD) à résister à l'apparition de petites fissures, et cela se voit lorsqu'il est simultanément exposé à :

- Contraintes mécaniques (compression, traction ou contraintes résiduelles de fabrication)
- Milieu chimique (par exemple détergents, huiles, tensioactifs). [4.5]

II.3. Effets connus des facteurs environnementaux sur les polymères et le PEHD :

II.3.1 Température élevée :

L'exposition à une chaleur élevée est un facteur clé du vieillissement du polyéthylène haute densité, car elle accélère les réactions chimiques et physiques qui entraînent une détérioration à long terme des propriétés mécaniques.

II.3.1.1. Mécanisme de dégradation :

- **Oxydation thermique (Thermo-oxydation) :** l'énergie thermique rompt les liaisons chimiques dans les chaînes polymères, générant des radicaux libres. Ces radicaux réagissent avec l'oxygène, provoquant une oxydation thermique. Ce processus comporte deux étapes principales : la première est l'épuisement des antioxydants ajoutés au polymère pour le protéger, et la seconde est l'initiation de réactions en chaîne conduisant à la rupture des chaînes principales (Scission de chaîne) et à la formation de réticulations.[5]

- **Rupture de chaîne et enchevêtrement :** avec une augmentation de la durée d'exposition à la chaleur, les réactions de rupture de chaîne deviennent dominantes, réduisant le poids moléculaire du polymère et augmentant sa fragilité. À leur tour, les premiers stades peuvent entraîner une augmentation temporaire de la rigidité due à l'enchevêtrement. [5]

II.3.1.2. Effets sur les propriétés mécaniques :

- **Module d'élasticité et limite d'élasticité :** des études ont montré que l'exposition à la chaleur (à 80 degrés Celsius) entraîne une diminution notable du coefficient d'élasticité et de l'allongement de la réfraction, tandis que la limite d'élasticité augmente de manière significative. Cela indique que le matériau perd de son élasticité et devient plus cassant. [6]

- **Résistance à la fissuration sous contrainte-SCR :** l'exposition à la chaleur entraîne une diminution significative de la résistance du PEHD à la fissuration sous contrainte, qui est l'un des indicateurs les plus importants de la durabilité à long terme. Par exemple, une étude a montré qu'un échantillon d'une épaisseur de 2,0 mm perdait environ 86% de sa résistance à la fissuration sous contrainte après 8760 heures d'exposition à la chaleur. [6.7]

II.3.2. Rayonnement UV :

L'exposition aux UV est l'un des facteurs de vieillissement les plus graves affectant le PEHD, en particulier dans les applications extérieures qui ne sont pas enterrées.

II.3.2.1. Mécanisme de dégradation :

- **Photodégradation** : La photodégradation : Le polyéthylène (PE) absorbe les rayons ultraviolets de manière limitée, et la photodégradation s'accélère en présence de substances qui absorbent les rayons, de défauts, de chaleur et d'oxygène.

- **Deux phases opposées** : dans les premiers stades de l'exposition, le réarrangement des chaînes et la formation de doubles liaisons peuvent entraîner une augmentation de la rigidité. Mais après avoir atteint une dose de rayonnement critique (dose seuil), l'effet de rupture des chaînes prévaut, ce qui entraîne une détérioration des propriétés mécaniques. [8.9]

II.3.2.2. Effets sur les propriétés mécaniques :

Module de Young et coefficients de limite d'élasticité : des études ont montré une tendance non linéaire ; ces propriétés augmentent initialement (en raison de l'intrication et du réarrangement) puis commencent à diminuer après une certaine dose de rayonnement (comme 7,2 MJ comme constaté par Becerra & D'almeida [2017])

- **Fluage** : l'exposition aux UV réduit le taux de fluage en régime permanent, en particulier à de faibles niveaux de contrainte, en raison de la dureté accrue du matériau dans les premiers stades.

- **Résistance à la fissuration sous contrainte (SCR)** : La SCR diminue de manière très significative lorsqu'elle est exposée au rayonnement ultraviolet, et la diminution peut atteindre plus de 98% surtout si elle est suivie d'une exposition thermique, montrant un effet synergique. [8.9.10]

II.3.3. Abrasion par le sable :

L'érosion du sable se produit à la suite du frottement des particules de sable avec la surface extérieure ou intérieure des tuyaux sous l'influence du vent, de l'écoulement ou de la pression du sol dans les zones désertiques, et les dommages augmentent avec l'augmentation de la taille, de la vitesse et de la concentration du sable.

II.3.3.1. Effets sur les propriétés mécaniques :

II.3.3.1.1. Module d'élasticité :

Le frottement constant entre la paroi des tuyaux en polyéthylène haute densité (PEHD) et de fins grains de sable montre un effet direct sur les propriétés mécaniques du tuyau, en particulier le module d'élasticité. Le mouvement fréquent du sable, en particulier dans les

environnements à haute température, entraîne de fines rayures de surface sur la paroi du tuyau. Ces rayures agissent comme des points focaux pour les contraintes, contribuant à l'émergence de zones de faiblesse localisées au sein de la structure polymérique.

Au fil du temps, cette usure de surface se traduit par une diminution progressive de la dureté du matériau, et des diminutions du module d'élasticité allant de 10% à 20% peuvent être enregistrées dans des environnements sableux actifs. Cet effet est plus prononcé dans les tuyaux enfouis dans des sols sableux à forte mobilité, où la probabilité de frottement augmente en raison des changements d'humidité, des vibrations, de la dilatation thermique du sol.

II.3.3.1.2. Résistance à la traction :

Des études sur la performance des tuyaux en polyéthylène haute densité (PEHD) dans des environnements sableux montrent qu'un frottement constant avec de fins grains de sable entraîne une détérioration progressive des propriétés mécaniques du tuyau, en particulier de la résistance à la traction. L'usure par frottement réduit l'épaisseur de la paroi au fil du temps, ce qui affaiblit la structure mécanique du tuyau et augmente sa susceptibilité à la fissuration sous des charges.

De plus, les rayures superficielles causées par le frottement du sable se transforment progressivement en microfissures (microfissures) qui servent de points de départ à la rupture mécanique, réduisant la capacité du tuyau à résister aux forces de traction et à la pression interne. On estime que cette dégradation pourrait entraîner une réduction allant jusqu'à environ 15% de la résistance à la traction sur une période de 5 à 10 ans dans des environnements sableux actifs. [11.12]

II.3.3.1.3. Résistance à la corrosion :

Le frottement mécanique entre les tuyaux en polyéthylène haute densité (PEHD) et les grains de sable entraîne une élimination progressive de la couche superficielle lisse, ce qui augmente la rugosité de la surface et accélère le taux d'usure au fil du temps, en particulier dans les environnements secs à forte teneur en particules solides. Des observations techniques ont montré que l'utilisation de couches protectrices ou de matériaux d'enceinte appropriés autour du tuyau dans un sol sableux peut réduire le taux de corrosion jusqu'à 50%, ce qui contribue à prolonger la durée de vie du tuyau à plus de 50 ans lorsque les procédures d'installation correctes sont suivies. [11.12]

II.3.4. Spécifications standard et normes industrielles :

II.3.4.1. Spécifications physiques et mécaniques générales des tuyaux PEHD**II.3.4.1.1. Propriétés physiques :**

- Densité (volume massique) : $\geq 930 \text{ kg / m}^3$ (valeur typique dans les systèmes d'eau).
- Couleur : noir avec des rayures caractéristiques ; généralement des rayures bleues pour les conduites d'eau potable.
- Teneur en carbone noir : 2 - 2,5% pour assurer la résistance aux UV.
- Résistance à la corrosion et aux produits chimiques : inoxydable et résistant à la plupart des produits chimiques courants.
- Flexibilité : élevée, en particulier dans les petits diamètres, ce qui facilite l'installation.

II.3.4.1.2. Propriétés mécaniques :

- Résistance à la traction : $\geq 19 \text{ MPA (MPa)}$.
- Allongement à la rupture : $\geq 350\%$.
- Résistance à la pression nominale : généralement (10 bars), et peut varier en fonction de la conception et du diamètre.
- Résistance aux chocs : élevée ; les tuyaux ne se cassent pas facilement.
- Durée de vie et endurance temporelle : la durée de vie prévue varie de 10 à 50 ans selon les conditions de fonctionnement et la qualité.

II.3.4.1.3. Avantages pratiques :

- Longue durée de vie : dans des conditions normales, elle peut dépasser 50 ans.
- Transport et installation faciles : grâce à la légèreté et à la flexibilité.
- Bonne résistance chimique et mécanique : réduit le besoin d'entretien fréquent.
- Avantages supplémentaires : durabilité élevée et résistance à la fissuration dans des conditions normales de fonctionnement.

II.3.4.2. Normes industrielles (Internationales / américaines) :

Nous discutons des normes internationales et américaines relatives aux tuyaux en polyéthylène haute densité (PEHD) utilisés pour le transport et la distribution du gaz. Nous

expliquons la portée de chaque norme, ses exigences fondamentales, et ses aspects techniques liés à l'ingénierie et aux applications industrielles.

II.3.4.2.1. Normes internationales

ISO 4437-1 : relative aux exigences générales et aux spécifications de base des matériaux en polyéthylène (PE) destinés au gaz

ISO 4437-2 : personnalisé pour les tuyaux eux-mêmes, spécifie les dimensions, les diamètres, les tables de pression (SDR), les exigences de qualité et les essais

ISO 4437-3 : destiné aux pièces et accessoires de raccordement (par exemple connexions électriques et bagues de soudage

ISO 4437-4 : destiné aux vannes en polyéthylène et aux vannes pour dispositifs à gaz

ISO 4437-5 : évalue l'aptitude du système dans son ensemble à l'usage auquel il est destiné. [16]

II.3.4.2.2. Normes américaines

ASTM D2513 : spécification standard de base et principale pour les tuyaux, les tuyaux de pompage auxiliaires (tubes), les pièces de raccordement en polyéthylène (PE) et destinées aux systèmes de pression de gaz naturel et de gaz de pétrole liquéfié (GPL).

ASTM D3350 : système de classification des matériaux de fabrication de tuyaux et de pièces en polyéthylène (basé sur le système de classification "Classification cellulaire" pour déterminer la densité, l'indice de fusion et la résistance aux contraintes environnementales ESCR).

ASTM F3183 : spécification des tuyaux PE enroulés en polyéthylène pour la distribution de gaz. [15]

Conclusion :

L'étude bibliographique réalisée dans ce chapitre a permis de mettre en évidence les principales caractéristiques mécaniques et physiques des tubes en PEHD ainsi que les mécanismes de dégradation pouvant affecter leur comportement en service. Les travaux scientifiques consultés montrent que les températures élevées, le rayonnement ultraviolet et l'abrasion par le sable peuvent provoquer une détérioration progressive des propriétés mécaniques du matériau.

Par ailleurs, les normes internationales ISO et ASTM constituent des références essentielles pour la caractérisation, l'évaluation et le contrôle de la qualité des tubes en PEHD. Ces éléments théoriques constituent une base scientifique solide pour l'analyse de l'environnement saharien et pour la mise en œuvre de la démarche expérimentale présentée dans les chapitres suivants.

CHAPITRE III:
CARACTERISATION DE
L'ENVIRONNEMENT SAHARIEN

CHAPITRE III : CARACTERISATION DE L'ENVIRONNEMENT SAHARIEN**Introduction :**

L'environnement saharien algérien se distingue par des conditions climatiques extrêmes qui influencent fortement le comportement des matériaux exposés à long terme. Les températures élevées, les fortes amplitudes thermiques journalières, l'intensité du rayonnement solaire, la faible humidité ainsi que les tempêtes de sable constituent des contraintes permanentes pour les infrastructures installées dans ces régions.

Ce chapitre a pour objectif de caractériser les principaux paramètres climatiques du Sahara algérien et d'analyser leur évolution temporelle. La compréhension de ces facteurs est essentielle pour évaluer leur impact potentiel sur les tubes en PEHD et pour interpréter les phénomènes de vieillissement et de dégradation observés dans les conditions réelles d'exploitation.

III.1. Variables climatiques :

Le climat désertique est l'un des modèles climatiques les plus importants qui prévalent à la surface de la Terre, car il s'étend sur de vastes zones sur les continents d'Asie, d'Afrique, d'Amérique du Nord et du Sud. Ce climat est caractérisé par des conditions difficiles et uniques qui le rendent complètement différent des autres climats.

En Algérie, malgré la diversité climatique que connaît le pays en raison de sa vaste superficie, le climat désertique reste la caractéristique dominante sur la majeure partie de son territoire. Le désert algérien occupe la plus grande partie de la superficie totale, couvrant environ 84% de celle-ci, s'étendant des contreforts de l'Atlas saharien au sud jusqu'aux frontières les plus méridionales du pays.

Les critères climatiques les plus marquants qui caractérisent cet environnement désertique en Algérie sont :

III.1.1. La température**III.1.1.1. Températures estivales :**

La saison estivale est caractérisée par des températures très élevées, où les valeurs maximales varient généralement entre 45 et 50 degrés Celsius, et peuvent dépasser ce taux dans certaines régions intérieures profondes telles que Ain Saleh et Adrar. Cette augmentation significative est due à l'orthogonalité des rayons du soleil et à l'angle d'incidence, en plus de la

clarté du ciel et de l'absence d'air de vapeur d'eau, ce qui atténue l'intensité du rayonnement dans les zones humides.

III.1.1.2. Températures hivernales :

L'hiver se caractérise généralement par une relative modération des températures diurnes, le maximum se situant généralement entre 15 et 25 degrés Celsius. Mais ce qui est remarquable en cette saison, c'est la diminution notable des températures nocturnes, car le minimum peut descendre en dessous de 10 degrés Celsius, ce qui crée une différence thermique significative entre le jour et la nuit même pendant les mois d'hiver.

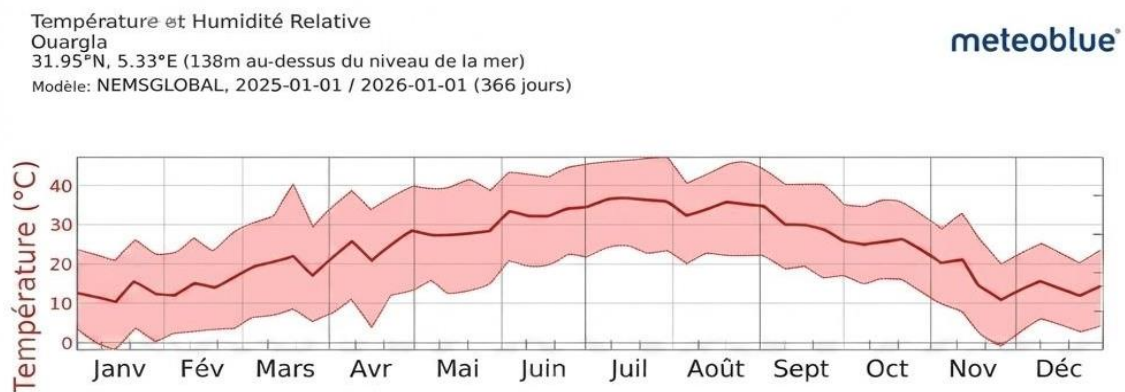


Figure III.1: variation annuelle de la température dans la ville de Ouargla (2025-2026)

III.1.2. Vent :

III.1.2.1. Modèles de vents dominants :

- **Vents chauds du sud (shahili / Sirocco) :** ces vents soufflent de la direction sud-sud-est, chargés de masses d'air tropical chaud et sec. Connu localement sous le nom de "Al-shehili" ou "Sirocco", sa fréquence augmente pendant l'été, car il se déplace vers les régions du nord provoquant une forte hausse des températures, une baisse significative de l'humidité et provoquant de la poussière et de la poussière.

- **Vents du nord-ouest :** soufflant pendant l'hiver, ils se caractérisent par être moins chauds et portent une certaine humidité relative. Mais son effet mouillant diminue progressivement à mesure qu'il se déplace vers le sud vers la profondeur du désert, où il perd sa teneur en vapeur d'eau.

III.1.2.2. Vitesse du vent et répartition géographique :

- **Vitesses générales** : la vitesse du vent est généralement comprise entre 2 et 6 mètres par seconde, une vitesse qui peut théoriquement être considérée comme adaptée à l'exploitation de l'énergie éolienne.

- **Zones à vitesse plus élevée** : les vitesses de vent les plus élevées sont concentrées dans les régions du sud-ouest du pays, en particulier dans la région d'Adrar, où la vitesse approche les 6 mètres par seconde, ainsi que dans de vastes zones d'Ain Saleh.

III.1.2.3. Phénomènes liés au vent :

- **Tempêtes de sable et de poussière** : les tempêtes de sable (appelées localement vents de sable) sont un phénomène courant, en particulier au printemps et au début de l'été. Ces tempêtes sont causées par des vents violents qui soulèvent des particules de sable et de poussière dans les zones exposées, entraînant une faible visibilité horizontale et perturbant les transports et les activités quotidiennes.

- **Érosion éolienne et mouvement des dunes** : le vent joue un rôle majeur dans les processus d'érosion du sable et de transport des sédiments, en particulier dans les zones ouvertes dépourvues de végétation. Les vents forts contribuent à la sculpture du terrain, le transfert de sable, son dépôt sous forme de dunes de sable en mouvement, qui constitue une menace pour les installations humaines, les routes et les zones agricoles, contribue à l'aggravation du phénomène de désertification.

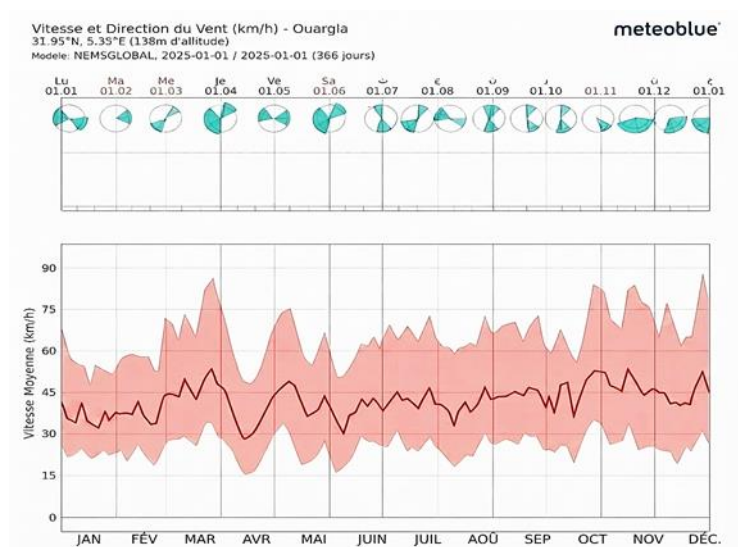


Figure III.2: variation annuelle de la vitesse et de la direction du vent dans la ville de Ouargla (2025-2026)

III.1.3. Rayonnement solaire :

III.1.3.1. Facteurs géographiques et climatiques :

- **Situation géographique :** les zones désertiques algériennes sont situées dans la gamme des latitudes tropicales et désertiques, où l'angle d'incidence des rayons du soleil est presque vertical pendant la plupart des jours de l'année.
- **Clarté de l'air :** la région se caractérise par l'absence quasi permanente de nuages et de nuages du ciel, car le nombre d'heures de luminosité annuelle dépasse 3900 heures, ce qui permet au rayonnement solaire direct d'atteindre la surface de la Terre sans dispersion significative.
- **Sécheresse et faible humidité :** une sécheresse sévère et une diminution du pourcentage de vapeur d'eau dans l'atmosphère contribuent à une diminution de l'absorption et de la diffusion du rayonnement solaire et, par conséquent, une intensité de rayonnement plus élevée atteint la surface. [13.14]

III.1.3.2. Valeurs de rayonnement et leurs indicateurs :

- **Rayonnement solaire instantané (intensité du rayonnement):** l'intensité du rayonnement solaire horaire dans les régions méridionales, telles que Adrar et Tamanrasset, atteint des valeurs comprises entre 700 et 800 watts par mètre carré, ce qui est l'un des taux les plus élevés enregistrés au monde.
- **Rayonnement solaire quotidien :** le rayonnement solaire quotidien moyen dans ces zones se situe entre 4,5 et 8,5 kWh par mètre carré, un taux élevé qui reflète l'intensité de l'énergie solaire disponible par jour.
- **Rayonnement solaire annuel :** le rayonnement solaire annuel total dans les régions du sud atteint environ 2370 kWh par mètre carré, dépassant les moyennes mondiales enregistrées dans la plupart des régions du monde.
- **Heures d'ensoleillement :** le désert algérien compte plus de 3 900 heures d'ensoleillement par an, ce qui signifie que le soleil reste brillant plus de 10 heures par jour en moyenne annuelle.

III.1.3.3. Variation saisonnière du rayonnement :

- Le rayonnement solaire mensuel moyen varie de 211 à plus de 300 watts par mètre carré et par heure.

- Les pics de rayonnement pendant l'été, du fait que les rayons du soleil sont presque perpendiculaires au tropique du cancer, ce qui augmente l'intensité de l'énergie solaire atteignant la surface de la Terre. [13.14]

III.1.4. Humidité :

III.1.4.1. Facteurs de contrôle :

- **Éloignement des plans d'eau :** la plupart des zones désertiques sont situées à de grandes distances de la mer Méditerranée au Nord et de l'océan Atlantique à l'Ouest, ce qui empêche l'accès des masses d'air humide saturées de vapeur d'eau.

- **Températures élevées :** la chaleur élevée augmente la capacité de l'air à retenir la vapeur d'eau sans atteindre le point de rosée, ce qui limite le processus de condensation et maintient l'humidité relative basse.

- **Prédominance des masses d'air continentales :** la région est dominée la majeure partie de l'année par des masses d'air continental sec provenant des profondeurs du désert du Sahara, avec une teneur en vapeur d'eau très limitée.

- **Rareté de la végétation et des plans d'eau :** l'absence de végétation dense, de lacs et de rivières pérennes entraîne des sources locales limitées de vapeur d'eau résultant du processus de transpiration et d'évaporation.

III.1.4.2. Taux d'humidité et leur répartition géographique :

- **Humidité relative annuelle :** l'humidité relative annuelle moyenne dans la plupart des zones désertiques varie de 25% à 40%, ce qui est l'un des plus bas enregistrés au monde. Ce pourcentage diminue davantage dans l'intérieur aride, alors qu'il augmente légèrement dans les zones proches de grandes hautes terres ou vallées.

- Variation géographique :

- Régions du sud profond (telles que Tamanrasset et Ain Saleh) : les niveaux d'humidité les plus bas sont enregistrés, tombant en dessous de 20% pendant les périodes chaudes de la journée.

- Les régions septentrionales du désert (comme Agawhat et Biskra) : connaissent une humidité légèrement plus élevée (jusqu'à 40-50% certaines saisons de l'année) en raison de leur proximité avec les influences humides du Nord.

- Variation quotidienne et saisonnière :

* Variation quotidienne : l'humidité relative augmente considérablement pendant la nuit et à l'aube avec la baisse des températures, et peut atteindre le point de rosée certaines nuits d'hiver, formant de la rosée ou un léger brouillard. Alors qu'il baisse fortement au cours de l'après-midi alors que la chaleur monte, atteignant des creux.

* Variation saisonnière : l'humidité relative augmente généralement pendant l'hiver en raison des basses températures et des risques accrus de fuite de certaines masses d'air humide. Alors qu'il diminue fortement pendant l'été malgré des taux d'évaporation élevés, en raison de la capacité de l'air chaud à absorber de plus grandes quantités de vapeur d'eau sans atteindre la saturation. [13.14]

III.1.4.3. Phénomènes associés à l'humidité dans le désert algérien :

- **Rosée** : La rosée est une source d'humidité importante dans certaines zones désertiques, en particulier en automne et au printemps. Il se forme à la suite de températures nocturnes tombant en dessous du point de rosée, ce qui entraîne la condensation de la vapeur d'eau sur les surfaces dures et les plantes, et constitue une source d'eau importante pour les organismes du désert.

- **Brouillard** : le brouillard se produit dans les zones désertiques sous une forme limitée, le plus souvent pendant les saisons d'hiver et de printemps, en particulier dans les zones basses et les vallées où l'humidité nocturne s'accumule. Il peut s'agir d'un léger brouillard qui se dissipe rapidement avec le lever du soleil.

- **Manque relatif d'humidité** : pendant les périodes de vents chauds (shahili ou Sirocco), l'humidité relative chute à des niveaux très bas, pouvant approcher 5% ou moins, ce qui provoque une sensation de brûlure et augmente le stress thermique sur les humains, les animaux et les plantes. [13.14]

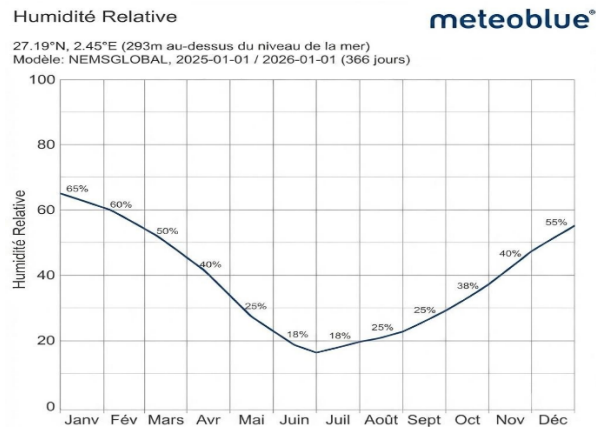


Figure III.3 : variation annuelle de l'humidité relative dans la ville de Ouargla (2025-2026)

III.1.5. Profils temporels des facteurs (journalier/saisonnier) :

L'environnement désertique est caractérisé par de fortes fluctuations des facteurs climatiques, car cette répartition temporelle détermine la nature du stress auquel sont exposés les matériaux, les installations et les organismes vivants. Ce qui suit est une analyse des plus importants de ces facteurs en fonction de leurs cycles quotidiens et saisonniers :

III.1.5.1. Plage de température :

- Distribution quotidienne :

La plage thermique entre le jour et la nuit atteint plus de 30°C. La température la plus élevée est enregistrée entre 14h00 et 16h00, tandis que la température la plus basse est juste avant le lever du soleil.

- Distribution saisonnière :

En été, de longues périodes de rayonnement prévalent avec des températures pouvant dépasser 50°C. En hiver, la température chute brusquement et pendant les nuits, elle peut atteindre moins de zéro Celsius.[13]

III.1.5.2. Rayonnement solaire et rayonnement ultraviolet :

- **Distribution quotidienne :** La forte influence du rayonnement ultraviolet commence de 10h00 à 16h00, et l'indice UV culmine au méridien.

- **Distribution saisonnière :** Le rayonnement solaire atteint son maximum au solstice d'été (juin / juillet), en raison de l'orthogonalité du soleil et du ciel sans nuages, ce qui intensifie les effets associés au rayonnement ultraviolet.

III.1.5.3. Humidité relative

- **Distribution quotidienne :** L'humidité se déplace inversement avec la température. Pendant la nuit, l'humidité augmente et peut atteindre le point de rosée, ce qui provoque la condensation de l'eau sur les surfaces froides. Pendant la journée, l'humidité baisse fortement (elle peut atteindre moins de 10%) à mesure que la température augmente, ce qui accélère les processus de séchage et de fissuration.[13]

- **Distribution saisonnière :** L'humidité est relativement accrue en hiver ou pendant les périodes de rares pluies soudaines.

III.1.5.4. Mouvement du vent et tempêtes de sable :

- **Distribution quotidienne :** Les vents sont le plus souvent actifs l'après-midi, en raison du réchauffement thermique des couches d'air proches de la surface de la Terre (convection).

- **Distribution saisonnière :** La fréquence des tempêtes de sable augmente en période de changement de saison, surtout au printemps, car les vents violents contribuent à l'usure mécanique des surfaces exposées par l'action des grains de sable. [13]

Conclusion

L'analyse des caractéristiques climatiques du Sahara algérien met en évidence un environnement particulièrement agressif pour les matériaux polymères. Les températures extrêmes, le rayonnement ultraviolet intense, les faibles taux d'humidité et les phénomènes d'érosion par le sable constituent des facteurs susceptibles d'accélérer le vieillissement des tubes en PEHD.

Cette caractérisation environnementale fournit les informations nécessaires à la compréhension des mécanismes de dégradation étudiés dans ce travail. Elle constitue également une référence essentielle pour la conception des protocoles expérimentaux destinés à reproduire les conditions réelles de fonctionnement des conduites dans les régions sahariennes.

CHAPITRE IV:

DEMARCHE EXPERIMENTALE

Introduction :

Ce chapitre vise à présenter le matériel de recherche et les conditions de vieillissement qui y sont soumises, et à détailler les outils analytiques utilisés pour suivre l'évolution des propriétés physiques, chimiques et mécaniques du PEHD, selon ses différents niveaux structuraux.

IV.1. Sélection de l'échantillon étudié

Le polymère utilisé dans l'étude est le polyéthylène haute densité grade 100 (PE100), qui est produit par la société (Groupe CHIALI) située à Sidi Bel Abbas (Algérie)

Le tube prend le marquage suivant :

EN1555-2 CHIALI TUBES PE100 125*11.4 Gaz 4 - 06032022

- La désignation commerciale du fabricant : CHIALI TUBES
- Spécifications standard : EN1555-2
- Le symbole d'identification du polyéthylène : PE100
- Les dimensions du tube : 125*11.4
- Diamètre extérieur nominal : 125
- Epaisseur nominale : 11.4
- L'application visée (Gaz) sous une pression maximale de service : Gaz 4 (4 bars)
- La date de fabrication :03-06-2022



Figure IV.1: Tuyau de transmission de gaz PEHD100

IV.2. Protocole de vieillissement accélérée

La dégradation est un processus irréversible dans la majorité des applications de polymères, ce qui entraîne généralement une modification de la composition chimique

et physique du polymère, entraînant la perte de nombreuses propriétés utiles, telles que le poids moléculaire, la résistance mécanique et la couleur

Pour reproduire des conditions de vieillissement proches de celles rencontrées en utilisation réelle, un processus de vieillissement accéléré a été effectué sur le matériau afin d'évaluer son comportement dans un environnement similaire.

IV.3. Essai de traction

Introduction

Les essais de traction sont un double outil d'évaluation ; d'une part, ils permettent un jugement qualitatif sur le comportement d'un matériau (fragilité vs ductilité, dureté vs élasticité), et d'autre part, ils permettent une mesure quantitative précise des propriétés mécaniques de base qui sont habituellement contenues dans les spécifications standard, notamment le module d'élasticité, la contrainte maximale et l'allongement à la rupture.

IV.3.1. Préparation des échantillons

Les échantillons d'essai sont préparés par formage, découpe ou fabrication à partir de feuilles ou de produits finis (tels que des tuyaux), avec des formes géométriques précises. Nos échantillons sont découpés dans la paroi du tuyau avec un perforateur, tout en appliquant un protocole reproductible qui garantit la préservation des caractéristiques d'origine et réduit les contraintes de couture lors de la fabrication, la norme ISO 6259 est utilisée pour les essais de tuyaux.



Figure IV. 2 : Forme des éprouvettes de traction.

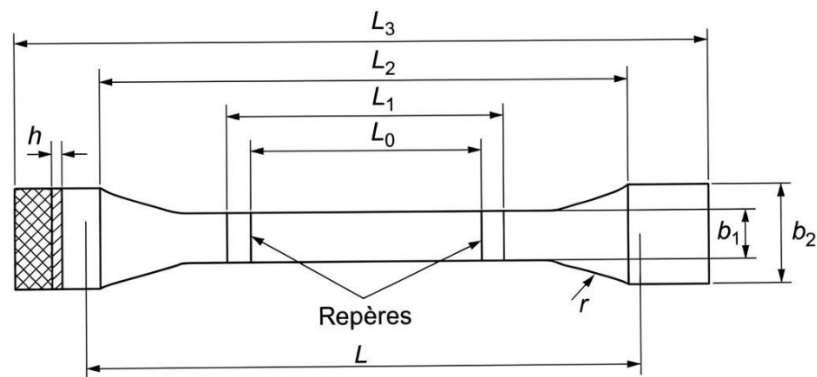


Figure IV. 3 : Géométrie et dimensions des éprouvettes de traction.

IV.3.2. Techniques expérimentales

Des essais mécaniques (traction, compression, fatigue, fluage) ont été réalisés sur un appareil testométrique conforme à la norme ISO 6259, à une température de 23,5 degrés Celsius, soit dans les limites établies en laboratoire (23 ± 2 degrés Celsius).

Le dispositif testométrique représente un système de test complet et moderne, caractérisé par sa flexibilité, son interface simple et son caractère modulaire. Le dispositif combine une cellule de décalage et une cellule de force ; cette dernière est fixée avec des attaches aériennes sur un organe mobile (col de cygne) coulissant sur un guide sans jeu. L'appareil fournit deux moyens de contrôle (manuel via un panneau ou automatique via un ordinateur et un programme d'analyse), où le programme traite les lectures et contrôle le test, avec une charge maximale de 50 KN (comme illustré à la figure IV.4).



Figure IV.4: Machine d'essai de traction " Testometric "

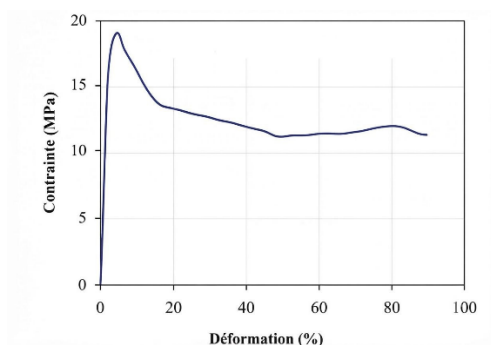
Résultats et discussions

L'évaluation de l'effet de l'obsolescence sur les courbes contrainte / déformation du PEHD implique d'abord une caractérisation complète des échantillons d'état initial, afin de garantir la disponibilité de données de référence précises à des fins de comparaison.

IV.4. Etat initial (avant vieillissement) :

Après avoir décrit les matériaux d'étude, les conditions de vieillissement, les techniques d'analyses et de caractérisations utilisées, nous allons maintenant nous intéresser aux résultats de notre étude.

Il est présenté à la Figure IV. 5 réponse conventionnelle du matériau PEHD sous essai de traction uniaxial, à température ambiante (23,5 ° C) et avec une vitesse de traction d'environ 100 mm / min.

**Figure IV. 5 :** Courbe de traction d'un polymère semi-cristallin (PEHD)

La première remarque qu'il faut indiquer et d'après l'allure de la courbe obtenue, est de type matériau ductile avec seuil d'écoulement

On remarque que l'une des caractéristiques les plus remarquables des thermoplastiques semi-cristallins est qu'à température ambiante, ils résistent à une déformation très sévère avant de se rompre.

Ceci est en partie dû au fait que la température de sa transformation verrière (-110°C) est bien inférieure à la température ambiante, ce qui lui confère une élasticité élevée. (Figure IV. 6)

Grâce à cette propriété, le taux de déformation peut atteindre jusqu'à 90% avant qu'une fracture ou une rupture ne se produise.

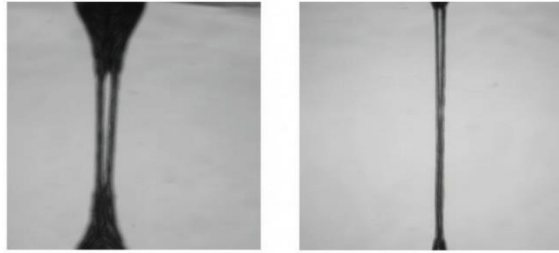


Figure IV. 6 : Évolution de l'allongement d'une éprouvette en PEHD au cours d'un essai de traction avant rupture.

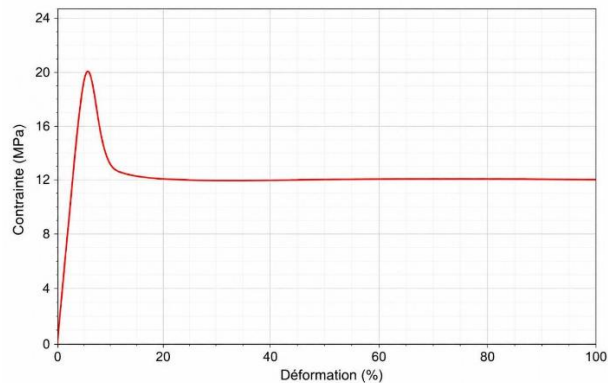


Figure IV. 7 : Différentes zones composent la courbe de traction agrandie entre 0 et 100% de déformation pour le PEHD.

La courbe de traction du matériau PEHD, illustrée à la figure IV. 7, le comportement typique des polymères thermoplastiques dans la gamme des grandes déformations.

La courbe de traction commence par un gradient linéaire abrupt dans lequel la contrainte atteint environ 20 MPa, cette section est connue sous le nom de réponse viscoélastique, qui combine un comportement élastique et visqueux dans une zone dont la déformation est complètement homogène, ce qui en fait une déformation réversible. Cette partie permet de déterminer le module d'élasticité apparent du matériau.

Après cela, la taille se stabilise avec la largeur de l'échantillon restant presque constante, puis ses membres commencent à s'étendre vers les deux extrémités de l'échantillon. Cette diffusion s'accompagne d'un léger changement de la courbe de force, tandis que l'allongement relatif peut atteindre des pourcentages aussi élevés que 99%.

L'étape suivante est connue sous le nom de "durcissement structurel" (écrouissage), qui est souvent attribuée à l'orientation des chaînes polymères le long de l'axe principal de déformation. Lorsque la propagation de la déformation est terminée, la déformation revient à nouveau à son état homogène et se poursuit de cette manière jusqu'à ce que le modèle se brise enfin.

Le tableau IV.1 regroupe les caractéristiques mécaniques expérimentales (contrainte au seuil d'écoulement, allongement à la rupture, contrainte à la rupture et module d'Young) déduites de la courbe Contrainte-Déformation.

Contrainte au seuil d'écoulement (MPa)	Contrainte à la rupture (MPa)	Allongement à la rupture (%)	Module de Young (MPa)
19.85	14.43	300	420.75

Tableau IV.1: Caractéristiques mécaniques expérimentales du PEHD à l'état initial (non vieilli)

IV.5. Etat vieilli (après vieillissement) :

La sensibilité des polymères aux facteurs atmosphériques tels que le rayonnement solaire, l'humidité et les fluctuations saisonnières de la température est le défi le plus important auquel ils sont confrontés dans les endroits exposés, et la cause de ces dommages est principalement due à la formation de composés d'oxydation.

IV.5.1. Vieillissement par irradiation UV

L'enfouissement souterrain des tuyaux offre une protection naturelle contre les rayons UV, cependant, leur exposition à ces rayons pendant les périodes de stockage non exposées, lorsqu'ils sont exposés au soleil et aux intempéries, ou en cas d'utilisation en surface non enterrée, peut entraîner un vieillissement prématuré et augmenter le risque de casse. Bien que le rayonnement UV soit souvent cité comme l'un des facteurs contribuant à la dégradation des matériaux polymères, il joue en fait un rôle central dans le processus de vieillissement. Par conséquent, dans les zones à fort rayonnement solaire, il est recommandé de prendre des mesures supplémentaires pour protéger les tuyaux de ces rayons

Pour étudier l'effet du temps d'irradiation sur les dommages du PEHD sous rayonnement ultraviolet (longueur de 365 nm), des échantillons de celui-ci ont été exposés à ces rayons

pendant des périodes de 150, 300 et 500 heures, ce qui a permis d'évaluer les dommages photochimiques et de déterminer la relation entre la durée du temps et le comportement du matériau. La figure ci-dessous montre le chevauchement des courbes de traction mesurées à une température de 23,5 degrés Celsius.

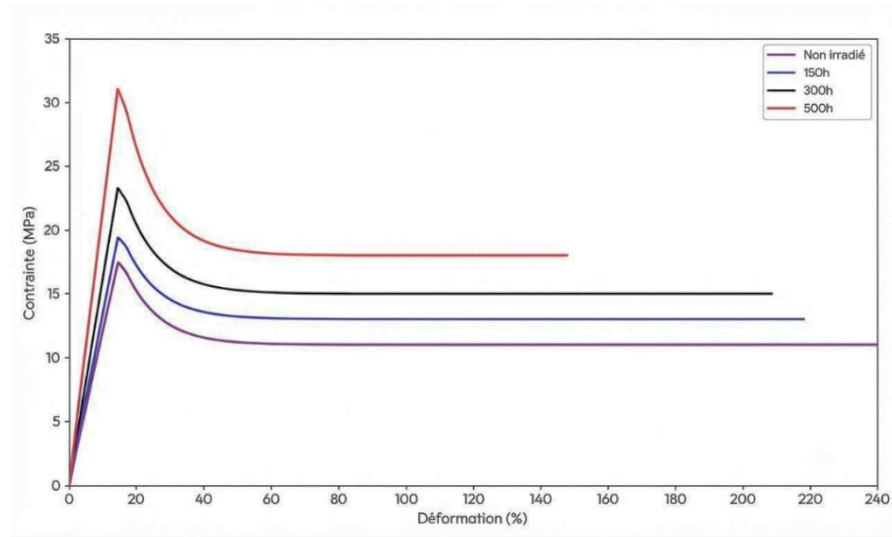


Figure IV.8 : Evolution de la contrainte en fonction de la déformation après différentes durées d'irradiation pour une vitesse de 100 mm/min et à température ambiante (23,5 °C) et $\lambda=365$ nm.

D'après l'allure des courbes de traction figure IV.8, on peut noter qu'il s'agit d'une éprouvette vieillie à 150 h, 300 h et 500 heures par irradiation UV ou non vieillie, les courbes sont très similaires.

Des échantillons de PEHD ont été soumis à un rayonnement ultraviolet, puis leurs caractéristiques ont été mesurées et comparées à des échantillons non exposés. Le taux de perte a été déduit en divisant les lectures des échantillons exposés par les lectures des échantillons non exposés, multipliées par 100.

Pour différentes durées d'exposition, les valeurs obtenues sont regroupées dans le tableau suivant :

Durée d'irradiation	150 h	300 h	500 h
Contrainte au seuil d'écoulement (MPa)	20.87	25.72	32.14
Module d'Young (MPa)	453.74	507.18	676.65

Tableau IV.2 : Caractéristiques mécaniques expérimentales du PEHD vieilli à différentes durées.

Pour évaluer la dégradation du PEHD, une analyse des caractéristiques mécaniques est nécessaire.

IV.5.1.1. Contrainte au seuil d'écoulement :

La figure IV.9 la contrainte d'écoulement se développe en fonction du temps de vieillissement auquel le PEHD a subi à une température de 23,5 degrés Celsius.

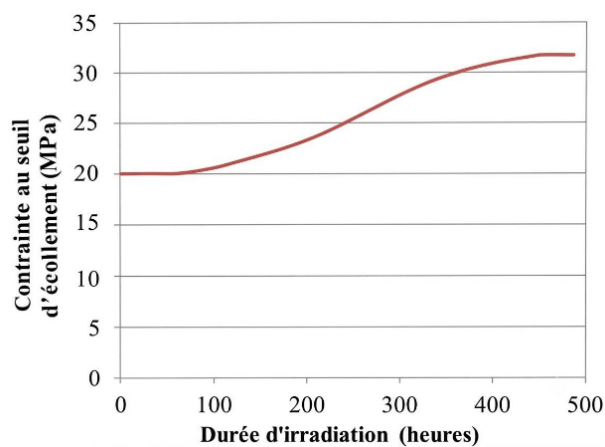


Figure IV.9 : Evolution de la contrainte au seuil d'écoulement du PEHD en fonction de la durée d'exposition

D'après l'observation initiale, nous observons une augmentation de la contrainte d'écoulement au fil du temps, ainsi que l'enregistrement d'échantillons de PEHD âgés avec des niveaux de déformation totale plus élevés que ceux d'échantillons non âgés. Sur la base de ces données, il est apparemment déduit que la ductilité (déformabilité) est plus grande dans le PEHD non endommagé par rapport à son homologue vieilli.

L'augmentation observée est associée au vieillissement chimique causé par le rayonnement ultraviolet, au cours duquel des chaînes amorphes sont oxydées, et à une évolution conséquente de la structure cristalline du PEHD

IV.5.1.2. Module de Young :

Le module de Young décrit la rigidité du polymère. Il caractérise ainsi la facilité de déformer l'échantillon d'une manière élastique.

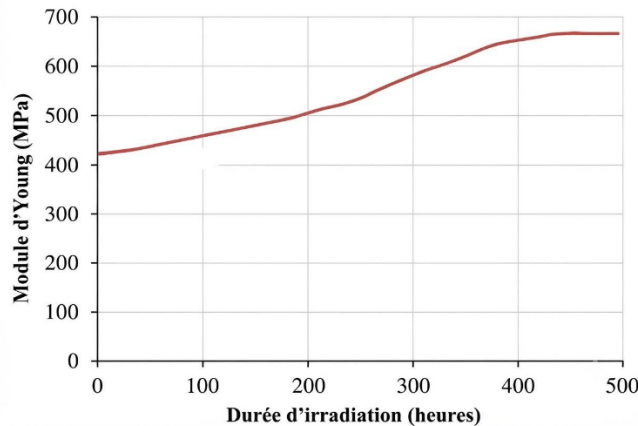


Figure IV.10 : Evolution du module d'Young en fonction de la durée d'irradiation du PEHD

Les résultats de l'étude montrent également que le module d'élasticité est affecté par le processus de vieillissement. Le fait que cette propriété mécanique a augmenté de 400 MPa à l'état initial (non vieilli) à 650 MPa à l'état final (vieilli 500h).

L'augmentation de cette grandeur traduit un accroissement de la rigidité du PEHD. Le vieillissement a donc pour conséquence mécanique, via l'augmentation du taux de cristallinité qui en résulte, une rigidification du matériau

Conclusion :

Les résultats des essais de traction indiquent qu'une exposition au rayonnement ultraviolet pendant 500 heures entraîne une détérioration des propriétés mécaniques du PEHD, ce qui est clairement mis en évidence par l'augmentation significative de la valeur du coefficient de young (E). En conséquence, il peut être établi que le polyéthylène haute densité perd son élasticité initiale (plasticité) et acquiert progressivement une fragilité à la suite d'une telle exposition.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE :

Cette étude avait pour objectif d'analyser l'influence de l'environnement saharien algérien sur les propriétés mécaniques des tubes en polyéthylène haute densité (PEHD), en particulier les tubes en PE100 utilisés dans les réseaux de transport du gaz naturel. L'importance de cette problématique réside dans le rôle que jouent ces conduites dans la sécurité, la fiabilité et la continuité des réseaux de transport de gaz, notamment dans les régions sahariennes caractérisées par des conditions climatiques sévères susceptibles d'affecter les performances des matériaux polymères et leur durée de service.

À travers l'étude théorique et l'analyse bibliographique, les principales propriétés physiques et mécaniques des tubes en PEHD ont été présentées, ainsi que les mécanismes de leur dégradation sous l'effet des différents facteurs environnementaux. Il a été constaté que les températures élevées peuvent accélérer les processus de thermo-oxydation et provoquer des modifications de la structure moléculaire du matériau. Le rayonnement ultraviolet constitue également l'un des principaux facteurs de vieillissement photochimique, notamment pour les surfaces directement exposées au rayonnement solaire. Par ailleurs, les tempêtes de sable et le déplacement des particules de sable peuvent contribuer à l'usure mécanique des surfaces exposées.

L'étude des caractéristiques du climat saharien algérien a également permis de mettre en évidence la sévérité des conditions auxquelles les conduites peuvent être soumises. Les températures extrêmes, l'intensité du rayonnement ultraviolet, la faible humidité ainsi que les vents chargés de sable constituent des facteurs susceptibles d'accélérer le vieillissement des matériaux polymères et d'affecter leurs performances à long terme.

Concernant l'étude expérimentale, celle-ci a été réalisée à partir d'un tube en PE100 destiné au transport du gaz naturel, conforme à la norme EN 1555-2, présentant un diamètre extérieur nominal de 125 mm et une épaisseur nominale de 11,4 mm. Des éprouvettes normalisées ont été préparées à partir de la paroi du tube, puis soumises à un protocole de vieillissement accéléré. Leur comportement mécanique a ensuite été évalué au moyen d'essais de traction conformément à la méthodologie adoptée dans cette étude. Ces essais permettent d'évaluer le comportement élastique, ductile ou fragile du matériau, ainsi que de déterminer plusieurs propriétés mécaniques essentielles, notamment le module d'élasticité, la contrainte maximale et l'allongement à la rupture.

Les résultats de l'étude montrent qu'une exposition prolongée aux facteurs environnementaux sahariens, notamment aux températures élevées, au rayonnement ultraviolet et à l'abrasion

provoquée par le sable, entraîne une dégradation progressive de la structure du matériau polymère. Cette dégradation se traduit par une modification de ses propriétés mécaniques, notamment une diminution de la résistance à la traction, de la résistance à la fissuration sous contrainte et de la résistance aux chocs. À long terme, ces phénomènes peuvent entraîner une diminution de la fiabilité des conduites et une réduction de leur durée de service.

Ainsi, cette étude confirme que l'évaluation des performances des tubes en PEHD dans les régions sahariennes ne doit pas se limiter aux propriétés initiales du matériau, mais doit également prendre en considération les conditions d'exposition environnementale et les différents mécanismes de vieillissement susceptibles de se produire au cours de leur durée de service. Les résultats mettent également en évidence l'importance du choix approprié du matériau, de l'utilisation de stabilisants résistants aux rayonnements ultraviolets et de l'adoption de conditions d'installation et de protection adaptées afin de limiter l'influence des facteurs environnementaux sahariens.

Dans cette perspective, les résultats obtenus dans le cadre de ce travail peuvent constituer une base pour des études futures plus approfondies. Celles-ci pourraient notamment porter sur l'élargissement des essais expérimentaux, l'étude séparée de l'influence de chaque facteur environnemental, ainsi que l'analyse de l'effet synergique de la température, du rayonnement ultraviolet et de l'abrasion par le sable. Des analyses microscopiques et chimiques plus détaillées pourraient également être réalisées afin d'identifier avec davantage de précision les modifications intervenant dans la structure du polymère. À l'avenir, il serait également intéressant de corréler les résultats du vieillissement accéléré avec les conditions d'exposition naturelle dans différentes régions sahariennes, afin d'améliorer l'estimation de la durée de vie des tubes en PEHD.

Enfin, cette étude met en évidence l'importance de comprendre la relation entre les conditions environnementales sahariennes et les propriétés mécaniques des tubes en PEHD, compte tenu de leur impact direct sur la sécurité, la fiabilité et la continuité des réseaux de transport du gaz naturel dans les régions désertiques. La prise en compte des spécificités de l'environnement saharien lors du choix des matériaux, de la conception, de l'installation et de la maintenance des réseaux de gaz constitue ainsi une étape essentielle pour améliorer leurs performances, réduire les risques de défaillance et limiter les coûts de maintenance à long terme.

REFERENCES

References:

- [1]. Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (10th ed.). John Wiley & Sons.
- [2]. Peacock, A.J. (2000). *Handbook of Polyethylene: Structures, Properties, and Applications*. Marcel Dekker, Inc.
- [3]. Sixsmith, T., & Hanselka, R. (1997). *Handbook of Thermoplastic Piping System Design* (1st ed.). CRC Press.
- [4]. McGrath, T.J., & Mruk, S. A. (2000). Thermoplastics Piping. In M. L. Nayyar (Ed.), *Piping Handbook* (7th ed., Chapter D1). McGraw-Hill.
- [5]. Ives, N. M., Mano, J. F., & Gómez Ribelles, J. L. (2001). Structure and molecular mobility of poly (L-lactic acid) in the glass transition region. *Polymer*, 42(9), 4173–4181.
- [6]. Khabbaz, F, Albertsson, A. C., & Karlsson, S. (1999). Chemical and morphological changes of environmentally degradable polyethylene films exposed to thermo-oxidation. *Polymer Degradation and Stability*, 63(1), 127–138.
- [7]. Gedde, U. W., & Ifwarson, M. (1990). Molecular structure and morphology of crosslinked polyethylene in an aged hot-water pipe. *Polymer Engineering & Science*, 30(4), 202–210.
- [8]. Tidjani, A. (2000). Comparison of formation of oxidation products during photo-oxidation of linear low density polyethylene under different natural and accelerated weathering conditions. *Polymer Degradation and Stability*, 68(3), 465–469.
- [9]. Valadez-Gonzalez, A., & Veleza, L. (2004). Mineral filler influence on the photo-oxidation mechanism degradation of high density polyethylene. Part II: Natural exposure test. *Polymer Degradation and Stability*, 83(1), 139–148.
- [10]. Gulmine, J. V., Janissek, P. R., Heise, H. M., & Akcelrud, L. (2003). Degradation profile of polyethylene after artificial accelerated weathering. *Polymer Degradation and Stability*, 79(3), 385–397.
- [11]. Douminge, L. (2010). *Étude du comportement du polyéthylène haute densité sous irradiation ultraviolette ou sollicitation mécanique par spectroscopie de fluorescence* (Doctoral dissertation). Université de La Rochelle.

- [12]. Marcu, M., & Detesan, O. A. (2018). Comparative study on abrasive wear resistance of high density polyethylene (HDPE) and ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE). *Journal of Tribology*, 140(4), 041602.
- [13]. Dubief, J. (1963). *Le climat du Sahara* (Tome II, Fascicule 1). Institut de Recherches Sahariennes, Université d'Alger.
- [14]. Griffiths, J. F. (Ed.). (1972). *Climates of Africa* (World Survey of Climatology, Vol. 10). Elsevier Publishing Company.
- [15]. ASTM International. (2026). Standard specification for polyethylene (PE) gas pressure pipe, tubing, and fittings (ASTM D2513-26a). ASTM International.
- [16]. International Organization for Standardization. (2024). *Plastics piping systems for the supply of gaseous fuels—Polyethylene (PE)—Part 2: Pipes* (ISO 4437-2:2024).

غرداية في 2026/06/14

شعبة:
تخصص: صيانة صناعية

شهادة ترخيص بالتصحيح والايذاء:

انا الاستاذ(ة) بوعريشة عمر ..

بصفتي المشرف المسؤول عن تصحيح مذكرة تخرج (ليسانس/ماستر/دكتورا) المعنونة ب:

Influence de l'Environnement Saharien algérien sur les Tubes en
PEHD -Effets sur les propriétés mécaniques.

من انجاز الطالب (الطالبة):

واعمر اسماعيل

قارة عبد الله طه ياسين

التي نوقشت بتاريخ : 2026/06/14

اشهد ان الطالب/الطالبة قد قام/قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة المناقشة وقد تم التحقق من ذلك من طرفنا
وقد استوفت جميع الشروط المطلوبة.

مصادقة رئيس القسم
قسم الآلية والكهروميكانيك

عزوي محمد



امضاء المسؤول عن التصحيح