

République 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
Électromécanique**

**Mémoire pour l'obtention du diplôme de
Master**

Spécialité : Maintenance industrielle

Titre

**Effet de la vitesse du chargement en
traction sur les propriétés mécanique des
tubes de transport du gaz naturel en HDPE**

**Présenté par : Ben Abderrahmane Brahim
Mosbah Abdelhamid**

Soutenu publiquement le : devant le jury composé de :

AKERMI FAOUZI

Université de Ghardaïa

Encadreur

BOUKHARI HAMED

Université de Ghardaïa

Président

BOUSNANE TAOUFIK

Université de Ghardaïa

Examineur

BOUCHELGA FATIMA

Université de Ghardaïa

Examineur

Année universitaire: 2025 / 2026

Remerciements

Nos vifs remerciements s'adressent tous particulièrement à Allah pour nous avoir donné le courage et la volonté de poursuivre nos études. Ce modeste travail est le fruit d'une collaboration de plusieurs personnes que je tiens à remercier et rendre hommage.

Je voudrais remercier le président et les membres du jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Je remercie mon encadreur Dr. AKERMI FAOUZI qui nous a vivement encouragés, sans son soutien ce travail n'aurait pas abouti à terme.

Nos remerciements vont aussi à tous nos professeurs et toutes les personnes qui nous ont soutenus jusqu'au bout, et qui n'ont pas cessé de nous donner des conseils très importants enseigne de reconnaissance.



Dédicace

Je dédie humblement cet ouvrage à :

Mes parents, source d'amour inconditionnel, de prières sincères et de sacrifices quotidiens. Votre présence m'a toujours donné la force de persévérer.

Mes frères et sœurs, piliers de soutien et de réconfort à chaque étape de ce parcours.

Mes professeurs estimés, pour leurs précieux conseils et leur générosité à partager leurs connaissances.

Mes amis et collègues, mes fidèles compagnons dans cette aventure académique, avec qui j'ai partagé des moments d'effort, des défis et des réussites.

Puisse cet ouvrage modeste être l'aboutissement d'années de dévouement et le tremplin d'un avenir riche en succès.

Louange à Dieu, par la grâce duquel tout est accompli.

MOSBAH ABDELHAMID



Dédicace

À ceux qui m'ont soutenu :

**Mes parents, pour votre dévouement exemplaire et vos prières
bénies.**

Mes frères et sœurs, pour avoir été mes piliers de soutien.

Mes enseignants, pour leur transmission généreuse du savoir.

**Mes amis et collègues, pour la solidarité et les souvenirs
inoubliables.**

**En espérant que ce modeste fruit de mes efforts soit à la hauteur
de vos attentes.**

Dieu soit loué pour l'aboutissement de ce projet.

BEN ABDERRAHMANE BRAHIM

Résumé

L'objectif principal de cette étude est d'analyser l'influence de la vitesse de chargement sur le comportement mécanique des tubes en polyéthylène Haute Densité utilisés pour le transport du gaz naturel. En tant que matériau viscoélastique, la réponse du HDPE aux sollicitations externes varie significativement selon la rapidité d'application de la charge. Ce travail vise à déterminer comment ces variations affectent les seuils de résistance et la ductilité des tubes produits par l'unité industrielle Plastub, afin de garantir la sécurité et l'intégrité structurelle des réseaux de transport énergétique.

Mots-clés : HDPE, extrusion, comportement viscoélastique, vitesse de chargement, propriétés mécaniques, gaz naturel.

Abstract

The main objective of this study is to analyze the influence of loading speed on the mechanical behavior of High-Density Polyethylene (HDPE) pipes used for natural gas transportation. As a viscoelastic material, the response of HDPE to external stresses varies significantly depending on the rate at which the load is applied. This work aims to determine how these variations affect the strength thresholds and ductility of the pipes produced by the Plastub industrial unit, in order to ensure the safety and structural integrity of energy transport networks.

Keywords: HDPE, extrusion, viscoelastic behavior, loading speed, mechanical properties, natural gas.

ملخص

تتمثل الغاية الأساسية من هذه الدراسة في تحليل تأثير سرعة التحميل على السلوك الميكانيكي لأنابيب البولي إيثيلين عالي الكثافة (HDPE) المستخدمة لنقل الغاز الطبيعي . ونظراً لكون مادة الـ HDPE مادة "لزجة مرنة" (Viscoélastique) ، فإن استجابتها للإجهادات الخارجية تتغير بشكل كبير تتبعاً لسرعة تطبيق الحمل . ويهدف هذا العمل تحديداً إلى تقييم مدى تأثير هذه المتغيرات على عتبات المقاومة الميكانيكية وقدرة الأنابيب المنتجة في وحدة (Plastub) النوميرات، وذلك بهدف ضمان السلامة والصلابة الهيكلية لشبكات نقل الطاقة على المدى الطويل.

الكلمات المفتاحية: البولي إيثيلين عالي الكثافة، البثق، السلوك اللزج المرن، سرعة التحميل، الخصائص الميكانيكية، الغاز الطبيعي.

Sommaire

Table des matières

Introduction générale.....	I
Chapitre 1:.....	
Présentation de l'installation industrielle Plastub et de la chaîne de production des tubes.....	III
1. Introduction du chapitre	4
2. Présentation de l'entreprise Plastub	4
3. Organisation générale de l'usine.....	4
4. Chaîne de production des tubes en HDPE	5
5. Vérifications et contrôle en cours de production.....	7
6. Essais effectués au laboratoire de contrôle qualité	7
7. Conclusion	9
Chapitre 2 :	
Étude bibliographique et propriétés physiques, thermiques et mécaniques du HDPE.....	10
1. Introduction aux polymères et au polyéthylène haute densité :.....	11
2. Structure semi-cristalline du HDPE :.....	11
3. Caractérisation de la Morphologie Semi-Cristalline :.....	15
4. Caractéristiques physico-chimiques	16
5. Classification des grades du polyéthylène	16
6. Propriétés thermiques du HDPE.....	17
7. Propriétés mécaniques du HDPE.....	17
8. Résistance à la fissuration sous contrainte environnementale (ESCR)	18
9. Procédés de fabrication et normes de qualité	18
10. Avantages du HDPE par rapport aux matériaux traditionnels.....	18
11. État de l'art et études antérieures.....	18
12. Conclusion du chapitre.....	18

Chapitre 3 :	20
Comportement viscoélastique du HDPE et effet de la vitesse de déformation	20
1. Introduction du chapitre	21
2. Concepts fondamentaux de la viscoélasticité	21
3. Modélisation du comportement viscoélastique	23
4. Définition du taux de déformation (strain rate)	25
5. Effet de la vitesse de chargement sur les propriétés mécaniques	27
6. Principe d'équivalence temps-température	28
7. Dissipation d'énergie et échauffement adiabatique lors des essais rapides	30
8. Conclusion	30
 Chapitre 4 :	 32
Étude expérimentale, résultats et discussion	32
1. Introduction du chapitre	33
2. Préparation des éprouvettes	33
3. Dispositif expérimental	38
4. Conditions d'essai	39
5. Résultats expérimentaux	40
6. Analyse et discussion des résultats	41
7. Recommandations techniques pour la sécurité des réseaux de gaz	46
8. Conclusion	47
Conclusion générale	48
Références	50

Liste des abréviations

- **HDPE / PEHD:** Polyéthylène Haute Densité (High-Density Polyethylene)
- **PVC:** Polyvinyl Chloride (chlorure de polyvinyle).
- **MFR / MFI:** Melt Flow Rate / Melt Flow Index (Indice de fluidité à chaud).
- **DSC:** Differential Scanning Calorimetry (Calorimétrie Différentielle à Balayage).
- **OIT:** Oxidation Induction Time (Temps d'induction à l'oxydation).
- **IANOR:** Institut Algérien de Normalisation.
- **SDR:** Standard Dimension Ratio (Rapport dimensionnel standard).
- **MRS:** Minimum Required Strength (Résistance minimale requise).
- **PE80 / PE100:** Grades de polyéthylène classés selon leur résistance minimale requise (8.0 MPa et 10.0 MPa).
- **TG:** Glass Transition Temperature (Température de transition vitreuse).
- **Tm:** Melting Temperature (Température de fusion).
- **ESCR:** Environmental Stress Cracking Resistance (Résistance à la fissuration sous contrainte environnementale).
- **WLF:** Équation de Williams-Landel-Ferry (Principe d'équivalence temps-température).
- **POM:** Polarized Light Microscopy (Microscopie à lumière polarisée).
- **TEM:** Transmission Electron Microscopy (Microscopie électronique à transmission).
- **AFM:** Atomic Force Microscopy (Microscopie à force atomique).
- **WAXS:** Wide-Angle X-ray Scattering (Diffusion des rayons X aux grands angles).
- **SAXS:** Small-Angle X-ray Scattering (Diffusion des rayons X aux petits angles).
- **ISO:** International Organization for Standardization (Organisation Internationale de normalisation).

Liste Des Figures

Fig.1.1	Installation d'une ligne d'extrusion de tubes HDPE.	5
Fig.1.2	Chambres de refroidissement à eau	6
Fig.1.3	Machine d'impression laser	6
Fig.1.4	Dispositif et schéma pour la MELT FLOW INDEX «PLASTOMÈTRE»	7
Fig.1.5	Dispositif expérimental et schéma de principe d'un calorimètre différentiel à balayage (DSC).	8
Fig.1.6	Exemple de vieillissement observé sur des éprouvettes	8
Fig.2.1	Structure moléculaire linéaire du HDPE (modèle 3D)	11
Fig.2.2	Les structures moléculaires des polymères en fonction de leur degré de cristallinité.	11
Fig.2.3	polymère amorphe	12
Fig.2.4	Polymères semi-cristallins	12
Fig.2.5	Schéma représentant : (a) la structure d'une lamelle cristalline formée par repliement successifs de chaîne polymère, (b) empilement des lamelles cristallines, (c) vue globale du sphérolite.	14
Fig.2.6	Coupe transversale 3D d'un tube HDPE pour le gaz	17
Fig.3.1	Représentation schématique des phénomènes de fluage (haut) et de relaxation de contrainte (bas) caractéristiques des matériaux viscoélastiques.	21

Liste de figures

Fig.3.2	Représentation schématique des modèles rhéologiques élémentaires : (a) Modèle de Maxwell (série) et (b) Modèle de Kelvin-Voigt (parallèle).	22
Fig.3.3	Évolution du seuil d'écoulement σ_y du HDPE en fonction de la vitesse de déformation (échelle logarithmique) pour différentes températures.	26
Fig.3.4	Principe de construction d'une courbe maîtresse par décalage horizontal (facteur a_T) à partir du principe d'équivalence temps-température.	28
Fig.4.1	Tube en HDPE	33
Fig.4.2	Schématisation du prélèvement des éprouvettes longitudinales	35
Fig.4.3	Eprouvette haltère de traction selon la norme ISO 6259-3 Type 1	36
Fig.4.4	Schéma détaillé et comparaison réelle de l'appareil de préparation des éprouvettes (IPT - LABTR006).	37
Fig.4.5	Schéma du dispositif d'essai de traction et géométrie de l'éprouvette PEHD 100 (image fournie).	38
Fig.4.6	Variation de la contrainte nominale moyenne corrigée en fonction de la vitesse de traction.	41
Fig.4.7	Courbes force-déplacement des éprouvettes en PEHD à une vitesse de traction de 50 mm/min.	42
Fig.4.8	Courbes force-déplacement des éprouvettes en PEHD à une vitesse de traction de 70 mm/min.	42

Liste de figures

Fig.4.9	Courbes force–déplacement des éprouvettes en PEHD à une vitesse de traction de 90 mm/min.	43
Fig.4.10	Courbes force–déplacement des éprouvettes en PEHD à une vitesse de traction de 110 mm/min.	43
Fig.4.11	Courbes force–déplacement des éprouvettes en PEHD à une vitesse de traction de 130 mm/min.	44
Fig. 4.12	Illustration de l'effet de la vitesse de déformation sur la réponse mécanique des polymères : transition du comportement ductile vers fragile aux vitesses élevées.	44
Fig.4.13	Groupe d'éprouvettes utilisé pour les tests	46

Liste des tableaux

Tableau 3.1	Comparaison entre les comportements élastique, visqueux et viscoélastique	22
Tableau 3.2	Gamme de vitesses de déformation usuelles en caractérisation mécanique du HDPE	25
Tableau 3.3	Synthèse qualitative de l'effet de la vitesse de déformation sur les propriétés mécaniques du HDPE	27
Tableau 4.1	Conditions d'essai et dimensions des éprouvettes par série de traction (vitesses 50–130 mm/min)	39
Tableau 4.2	Analyse des résultats expérimentaux des essais de traction sur le PEHD 100	40

Introduction générale

Introduction générale

Le transport et la distribution du gaz naturel représentent un enjeu stratégique majeur pour les infrastructures énergétiques contemporaines. Dans ce contexte, les tubes en Polyéthylène Haute Densité (HDPE) ont profondément transformé le secteur, grâce à leurs propriétés intrinsèques remarquables telles que leur légèreté, leur flexibilité et leur excellente résistance à la corrosion. [\[35\]](#)

Contexte industriel: L'adoption du HDPE dans les réseaux de distribution de gaz s'est généralisée au cours des dernières décennies, supplantant progressivement les matériaux traditionnels comme l'acier ou la fonte. Sa facilité de mise en œuvre et sa durée de vie estimée à plus de 50 ans en font un choix privilégié pour les opérateurs industriels, à l'instar de l'entreprise Plastub. [\[35\]](#)

Problématique: En dépit de ses nombreux avantages, le HDPE est un matériau polymère dont le comportement mécanique est d'une complexité notable. En tant que matériau viscoélastique, sa réponse aux sollicitations externes est fortement modulée par des paramètres environnementaux et opérationnels, notamment la vitesse de chargement. [\[31\]\[34\]](#)

Une compréhension approfondie de l'influence de cette vitesse sur la résistance et la ductilité du tube est donc impérative pour garantir la sécurité et l'intégrité structurelle des réseaux de transport de gaz. [\[31\]\[34\]](#)

Hypothèses de travail: Nous postulons que l'accroissement de la vitesse de chargement induit une modification significative des seuils de résistance mécanique et de la capacité de déformation du matériau, pouvant potentiellement altérer le mode de rupture. [\[31\]](#)

Objectifs de l'étude : La présente étude vise à :

- Présenter le processus industriel de fabrication des tubes en HDPE au sein de l'entreprise Plastub.
- Réaliser une synthèse bibliographique exhaustive sur les propriétés physico-chimiques et mécaniques du HDPE. [\[30\]\[31\]\[34\]](#)
- Analyser l'influence de la vitesse de chargement sur les propriétés mécaniques en traction du HDPE.

Introduction générale

Organisation du Mémoire : Ce travail est structuré en quatre chapitres :

1. Le premier chapitre est dédié à la présentation de l'unité industrielle Plastub et à la description détaillée du processus d'extrusion des tubes en HDPE. [\[35\]](#)
2. Le deuxième chapitre propose une étude bibliographique approfondie sur le HDPE et ses caractéristiques fondamentales. [\[30\]\[34\]\[37\]](#)
3. Le troisième chapitre présentera la méthodologie adoptée ainsi que l'aspect théorique de la recherche.
4. Le quatrième chapitre sera consacré à la présentation, à l'analyse et à l'interprétation des résultats obtenus.

Chapitre I

Présentation de l'installation industrielle Plastub et de la chaîne de production des tubes HDPE

Chapitre 1 : Présentation de l'installation industrielle Plastub et de la chaîne de production des tubes HDPE

1. Introduction du chapitre

Ce chapitre est dédié à la présentation de l'entreprise Plastub, où notre stage pratique a été réalisé, et à la description détaillée du processus de fabrication des tubes en polyéthylène haute densité (HDPE). Nous y aborderons les différentes étapes de production, depuis la réception des matières premières jusqu'au produit fini, en soulignant les dispositifs de contrôle de la qualité mis en œuvre pour assurer la conformité des tubes aux normes en vigueur

2. Présentation de l'entreprise Plastub

Historique et domaine d'activité

L'entreprise Plastub est une unité industrielle spécialisée dans la fabrication de tubes en matières plastiques, notamment le PVC et le HDPE. Implantée dans la zone industrielle de Bounoura à Ghardaïa, elle s'étend sur une superficie de 6 hectares. Plastub joue un rôle essentiel dans le secteur des infrastructures en Algérie en fournissant des solutions de tuyauterie destinées à l'assainissement, à l'irrigation et au transport des fluides sous pression, tels que le gaz naturel et l'eau potable. [\[35\]](#)

3. Organisation générale de l'usine

L'usine est structurée en quatre départements principaux :

- **L'administration** : Responsable de la gestion des ressources humaines, des finances et de la direction générale.
- **L'atelier de production** : Constitue le cœur de l'usine, abritant les lignes d'extrusion qui opèrent en continu selon un système de rotation (3x8h).
- **Laboratoire de contrôle de qualité** : Certifié par l'IANOR, il est garant de la conformité technique des produits par des essais rigoureux.
- **Dépôt de stockage** : Zone dédiée au tri et au stockage des tubes finis, généralement protégée des rayonnements solaires directs pour préserver l'intégrité des produits.

4. Chaîne de production des tubes en HDPE

a. Matière première utilisée

Contrairement au PVC qui requiert un mélange complexe de plusieurs composants, le HDPE est utilisé sous forme de granulés de résine pure. [\[35\]](#)

Avant toute utilisation, cette résine est soumise à des tests de caractérisation pour vérifier sa qualité et s'assurer de son adéquation au processus d'extrusion. [\[35\]](#)



Fig1.1: Installation d'une ligne d'extrusion de tubes HDPE.

b. Étapes de transformation et d'extrusion

Le processus débute par l'alimentation de l'extrudeuse en granulés de HDPE. Ces derniers sont ensuite fondus et malaxés par des vis sans fin sous l'action de résistances chauffantes, à des températures précisément contrôlées. [\[35\]](#)[\[32\]](#)

La pâte homogène ainsi obtenue est poussée à travers une filière qui confère au matériau sa forme tubulaire circulaire.

c. Refroidissement, calibrage, marquage et coupe

- Calibrage et Refroidissement: Le tube chaud, après avoir quitté la filière, passe dans un calibre sous vide. Ce dispositif permet de fixer ses dimensions exactes. Le refroidissement est ensuite assuré par plusieurs bacs d'eau successifs. [\[35\]](#)

Chapitre 1 : Présentation de l'installation industrielle Plastub et de la chaîne de production des tubes HDPE

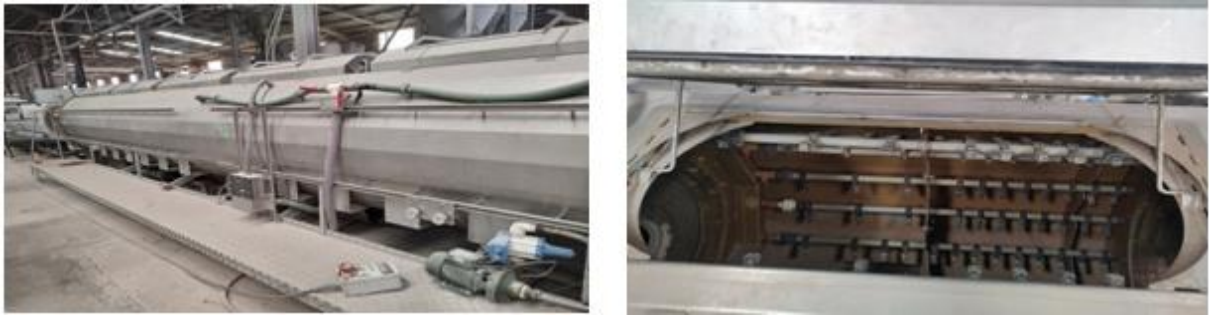


Fig1.2: Chambres de refroidissement à eau.

- **Marquage** : Un dateur-marqueur imprime sur le tube des informations essentielles telles que le nom du fabricant, la norme de référence, le rapport SDR (Standard Dimension Ratio), la pression nominale, ainsi que la date et le numéro de lot de fabrication.

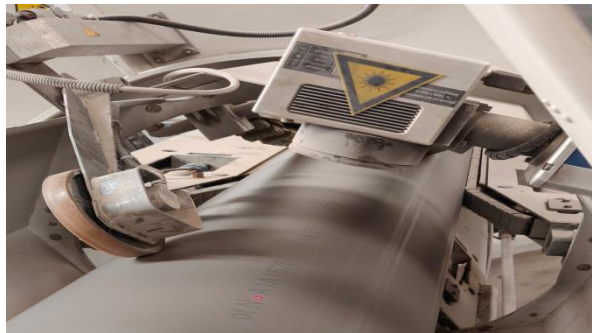


Fig1.3: Machine d'impression laser

- **Tirage et Coupe** : Une tireuse synchronisée avec l'extrudeuse assure le déplacement continu du tube. Enfin, un système de mesure déclenche une scie automatique qui coupe le tube à la longueur désirée.

5. Vérifications et contrôle en cours de production

a. Contrôle dimensionnel

À intervalles réguliers (toutes les heures), un contrôleur procède à la vérification du diamètre extérieur du tube à l'aide d'un circométer. L'épaisseur de la paroi est également mesurée en plusieurs points de la circonférence à l'aide d'un palmer ou d'un pied à coulisse.

b. Contrôle visuel

Un examen visuel continu est effectué par les opérateurs afin de détecter tout défaut de surface potentiel, tant sur les parois internes qu'externes du tube.

6. Essais effectués au laboratoire de contrôle qualité

a. Essai de l'indice de fluidité à chaud (MFR)

Conformément à la norme ISO 1133-1: 2022, cet essai permet de mesurer la fluidité de la résine à l'état fondu. Il est crucial pour s'assurer que la viscosité du matériau est optimale pour le processus d'extrusion. [\[35\]](#)

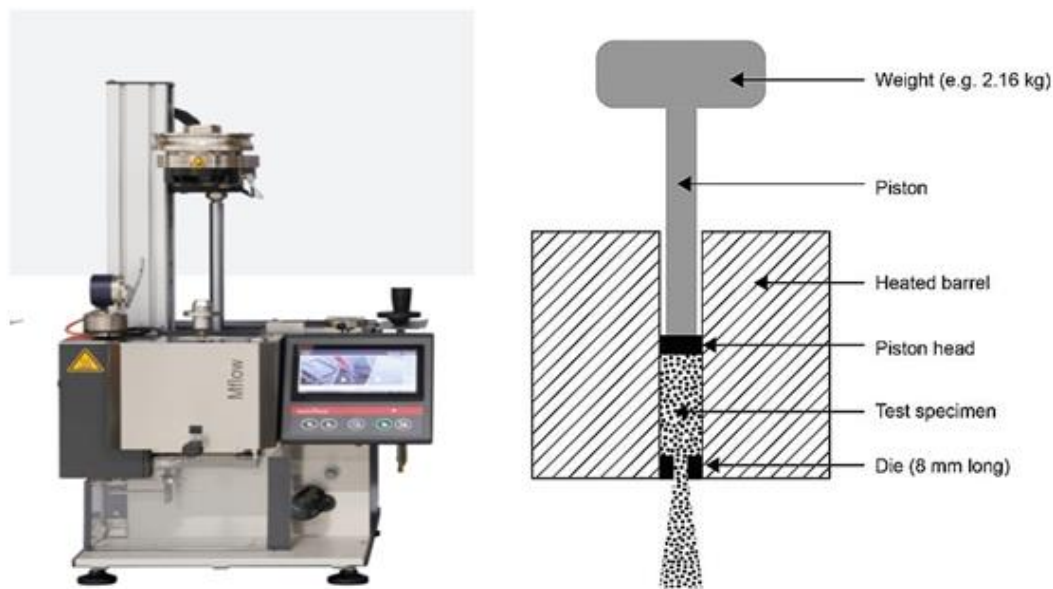


Fig 1.4: Dispositif et schéma pour la MELT FLOW INDEX «PLASTOMÈTRE».

Chapitre 1 : Présentation de l'installation industrielle Plastub et de la chaîne de production des tubes HDPE

b. Essai du temps d'induction à l'oxydation (OIT)

Conformément à la norme ISO 11357-6, Cet essai thermique évalue la stabilité thermique du matériau. Il fournit une estimation de la résistance du tube à la dégradation oxydative sur le long terme, un facteur essentiel pour la durabilité des applications [\[25\]](#) . [\[33\]\[35\]](#)

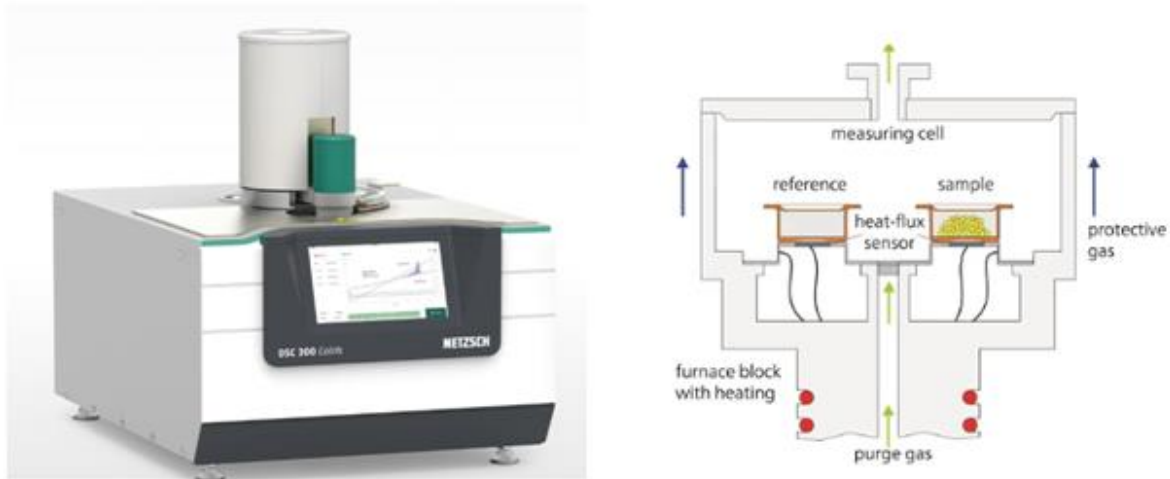


Fig1.5: Dispositif expérimental et schéma de principe d'un calorimètre différentiel à balayage (DSC) [\[25\]](#).



Fig 1.6:exemple de vieillissement observé sur des éprouvettes.

7. Conclusion

La maîtrise rigoureuse du processus d'extrusion au sein de Plastub, associée à un contrôle qualité strict en laboratoire, garantit la production de tubes en HDPE de haute fiabilité, répondant aux exigences des applications industrielles les plus critiques. [\[35\]](#)

- raccords aux extrémités car le soudage peut être effectué pour fabriquer un réseau de transport de fluides.

Chapitre 2 :

Étude bibliographique et propriétés physiques, thermiques et mécaniques du HDPE

Chapitre 2 : Étude bibliographique et propriétés physiques, thermiques et mécaniques du HDPE

1. Introduction aux polymères et au polyéthylène haute densité

Les polymères sont des macromolécules formées par la répétition d'unités élémentaires appelées monomères. Le Polyéthylène Haute Densité (HDPE) appartient à la famille des polyoléfines. Il est obtenu par la polymérisation de l'éthylène à basse pression, ce qui lui confère une structure peu ramifiée. [\[30\]\[34\]\[29\]](#)

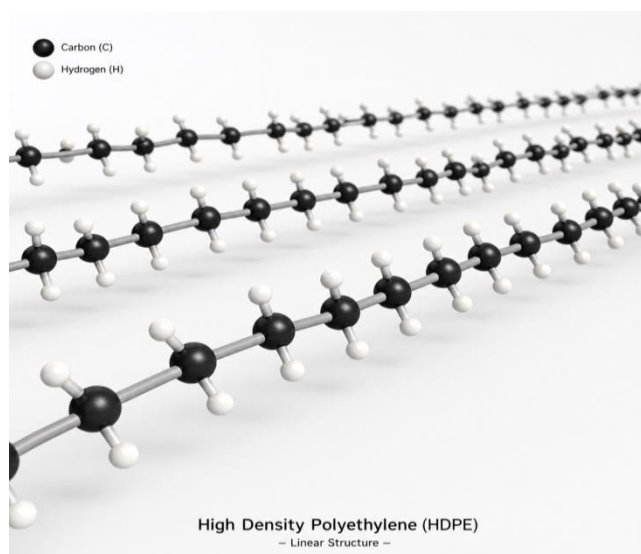


Fig2.1 : Structure moléculaire linéaire du HDPE (modèle 3D).

2. Structure semi-cristalline du HDPE :

Le HDPE est un polymère semi-cristallin, caractérisé par la coexistence d'une phase cristalline ordonnée et d'une phase amorphe désordonnée. Cette dualité structurale est à l'origine de sa rigidité, de sa résistance mécanique et de sa bonne résistance chimique [\[26\]\[28\]](#). [\[34\]\[37\]](#)



Chapitre 2 : Étude bibliographique et propriétés physiques, thermiques et mécaniques du HDPE

Fig2.2: Les structures moléculaires des polymères en fonction de leur degré de cristallinité.

a) Les polymères amorphes:

Les chaînes macromoléculaires peuvent être organisées de façon aléatoire dans l'espace et constituent ainsi une phase amorphe. La phase amorphe est théoriquement équivalente à un liquide «figé» sans ordre moléculaire à orientations macromoléculaires préférentielles.

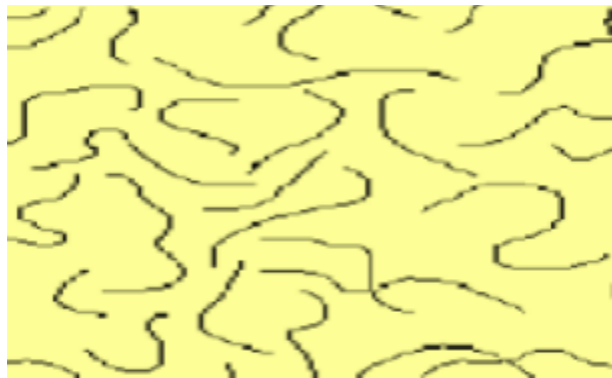


Fig. 2.3: polymère amorphe

b) Les polymères semi-cristallins:

Ils sont constitués de phases cristallines et de phases amorphes du même polymère. Leur microstructure est souvent complexe, et, en conséquence, la description de leurs propriétés aussi. Leurs propriétés mécaniques sont généralement bonnes.

Exemple : La matière plastique des gobelets jetables est plus résistante à la déchirure dans la direction circonférentielle que dans la direction des génératrices, ce qui manifeste une anisotropie des propriétés mécaniques.



Fig.2.4: Polymères semi-cristallins

C) La morphologie semi-cristalline

➤ **Le concept de Semi-Cristallinité :**

Les polymères semi-cristallins possèdent une structure unique caractérisée par la coexistence de deux phases: une phase cristalline (ordonnée) et une phase amorphe (désordonnée). L'organisation de ces phases a été expliquée par différents modèles au fil du temps [\[26\]](#), [\[34\]](#)[\[37\]](#)[\[27\]](#)

➤ **Le modèle des Micelles Frangées (*Fringed Micelles*) :**

C'est le premier modèle historique. Il décrit la structure comme de petites zones cristallines (5 à 50 nm) où les chaînes sont alignées parallèlement. Dans ce schéma, une seule macromolécule est assez longue pour traverser plusieurs zones cristallines (micelles) orientées au hasard, tout en passant par des zones amorphes moins ordonnées.

➤ **Le modèle Lamellaire et le Repliement des Chaînes :**

Apparu vers la fin des années 1950, ce modèle repose sur l'idée que les chaînes polymères se replient sur elles-mêmes de manière régulière [\[26\]](#), [\[37\]](#)

Le repliement serré (*adjacent reentry*) : La chaîne se replie à la surface pour occuper le site immédiatement voisin.

Le repliement désordonné (*randomswitchboard*) : La chaîne forme des boucles plus lâches et rentre dans la phase cristalline à un point plus éloigné.

Ces repliements forment des lamelles cristallines d'environ 10 nm d'épaisseur. Lors de la cristallisation, ces lamelles s'empilent pour former des paquets appelés fibrilles [\[26\]](#), [\[37\]](#)

➤ **L'Organisation à Grande Échelle : Les Sphérolites**

Les sphérolites sont des entités symétriques et sphériques que l'on observe lors de la cristallisation à partir d'un état fondu. Ils résultent d'un arrangement radial des fibrilles partant d'un centre de nucléation [\[26\]](#).

Chapitre 2 : Étude bibliographique et propriétés physiques, thermiques et mécaniques du HDPE

Dans cette structure globale :

Les zones cristallines se trouvent au sein des lamelles.

Les zones amorphes se situent entre les lamelles, entre les fibrilles et entre les sphérolites eux-mêmes.

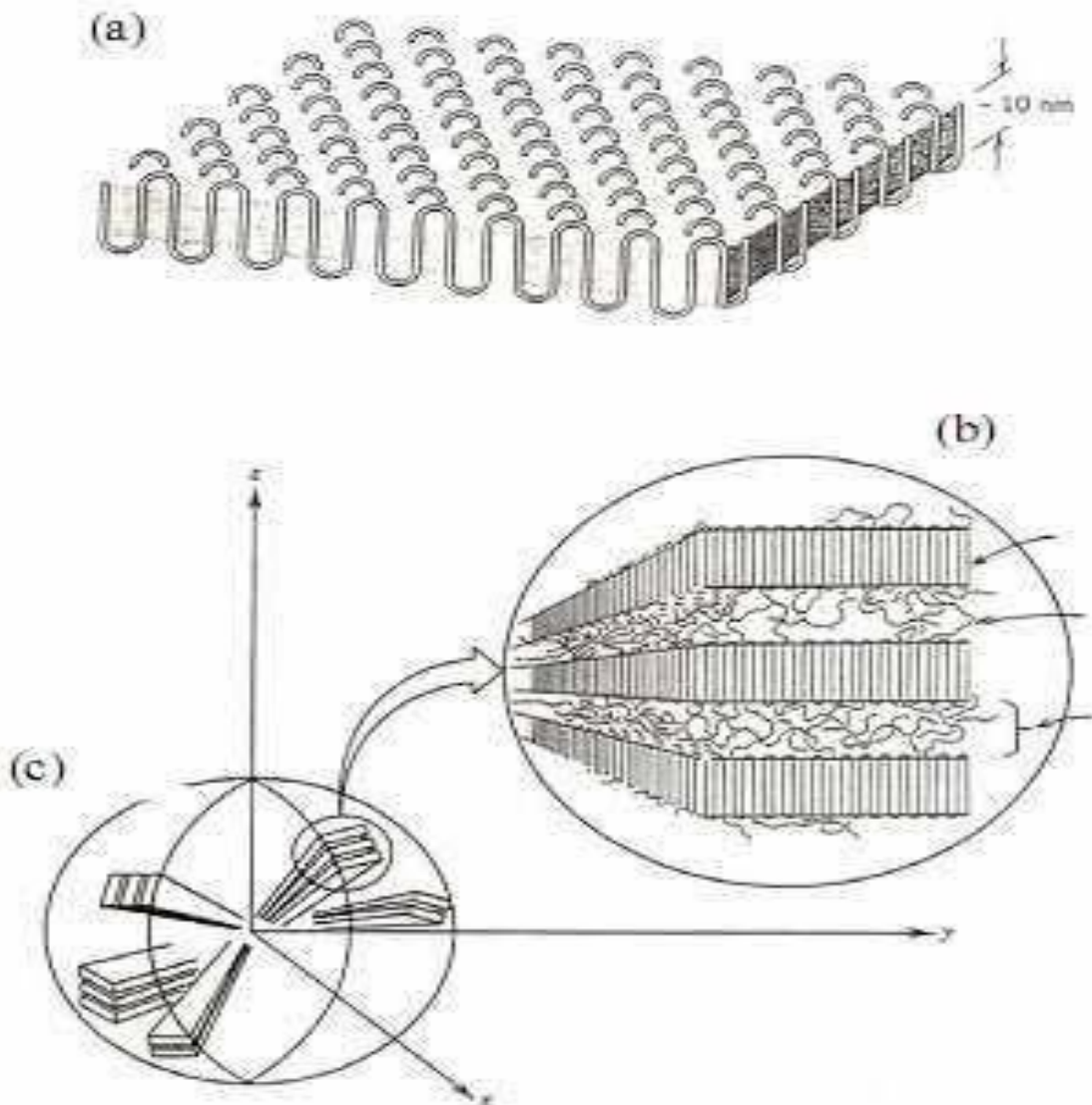


Fig 2.5 : Schéma représentant : (a) la structure d'une lamelle cristalline formée par repliement successifs de chaîne polymère, (b) empilement des lamelles cristallines, (c) vue globale du sphérolite.

3. Caractérisation de la Morphologie Semi-Cristalline :

Outre l'organisation lamellaire et sphérolitique, les polymères présentent un ordre atomique à longue portée défini par la maille cristalline. Pour explorer cette structure à différentes échelles, plusieurs techniques expérimentales sont utilisées [\[25\]](#)[\[26\]](#); [\[37\]](#)

a. Microscopies Optique et Électronique :

➤ Microscopie Optique en Lumière Polarisée (POM) :

Bien que sa résolution soit limitée, elle est essentielle pour étudier les sphérolites, l'orientation cristalline par biréfringence et mesurer les vitesses de croissance cristalline.

➤ Microscopie Électronique à Transmission (TEM) :

Elle offre une résolution spatiale supérieure, permettant d'observer les chaînes repliées. Cependant, c'est une méthode destructive ("post mortem") qui nécessite une préparation complexe des échantillons (coloration/staining) pour contraster les phases cristallines et amorphes.

b. Techniques de diffusion des rayons (X) :

➤ WAXS (Grands Angles) :

Permet d'étudier l'ordre cristallin à l'échelle de l'angström (maille atomique).

➤ SAXS (Petits Angles) :

Chapitre 2 : Étude bibliographique et propriétés physiques, thermiques et mécaniques du HDPE

Analyse la structure au-delà de quelques nanomètres (niveaux lamellaire et fibrillaire).

c. Microscopie de Force Atomique (AFM) :

L'AFM est devenue une technique complémentaire majeure aux méthodes traditionnelles (TEM/POM) :

- **Non-destructive** : Elle permet d'obtenir la topographie superficielle sans altérer l'échantillon.
- **Polyvalente** : Elle visualise les détails de la structure semi-cristalline à tous les niveaux d'organisation.
- **Dynamique** : Grâce à des accessoires thermiques, elle permet de suivre en temps réel les processus de cristallisation et de fusion en surface.

4. Caractéristiques physico-chimiques

➤ Densité

La densité du HDPE se situe généralement dans une plage allant de 0,941 à 0,965 g/cm³. Cette propriété est un indicateur clé de la compacité de sa structure moléculaire. [\[34\]](#)

➤ Taux de cristallinité

Le HDPE présente un taux de cristallinité élevé, souvent compris entre 60% et 80%. Ce paramètre influence directement la dureté, la rigidité et la résistance à la traction du matériau [\[28\]](#), [\[34\]](#)[\[37\]](#).

5. Classification des grades du polyéthylène

Le polyéthylène destiné à la fabrication de tubes pour le transport de gaz est classifié en fonction de sa MRS (Minimum Required Strength - Résistance Minimale Requise): [\[35\]](#)

Chapitre 2 : Étude bibliographique et propriétés physiques, thermiques et mécaniques du HDPE

- PE80: Possède une MRS de 8,0 MPa.
- PE100: Offre une MRS de 10, 0 MPa, ce qui lui confère une meilleure résistance à la propagation lente des fissures, un critère essentiel pour les applications sous pression.
[\[35\]](#)[\[33\]](#)[\[4\]](#)

6. Propriétés thermiques du HDPE

- Température de transition vitreuse (T_g): Le HDPE présente une T_g basse, généralement entre -110°C et -120°C [\[28\]](#). En dessous de cette température, le matériau devient cassant.
- Température de fusion (T_m): La T_m du HDPE se situe entre 130°C et 135°C [\[28\]](#). Au-delà de cette température, le matériau passe à l'état fondu.

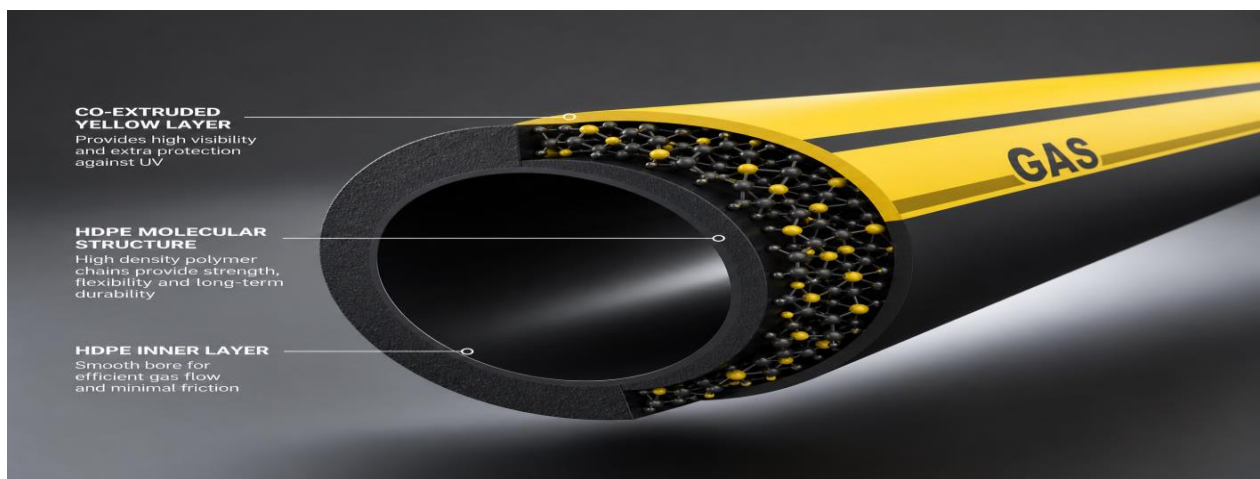


Fig2.6 : Coupe transversale 3D d'un tube HDPE pour le gaz

7. Propriétés mécaniques du HDPE

- Comportement en traction: Le HDPE manifeste un comportement ductile caractéristique, avec un seuil d'écoulement bien défini [\[24\]](#), [\[30\]](#)[\[34\]](#)[\[36\]](#)[\[1\]](#)
- Module d'Young : Ce module est un indicateur de la rigidité du matériau, variant généralement entre 800 et 1200 MPa pour le HDPE.
- Allongement à la rupture: Le HDPE se distingue par un allongement à la rupture très élevé, témoignant de sa grande ductilité et de sa capacité à se déformer significativement avant la rupture [\[24\]](#)[\[28\]](#).

8. Résistance à la fissuration sous contrainte environnementale (ESCR)

L'ESCR est une propriété cruciale qui quantifie la capacité du HDPE à résister à l'initiation et à la propagation de fissures lorsqu'il est soumis simultanément à une contrainte mécanique et à l'action d'un environnement chimique agressif. [\[33\]](#)[\[35\]](#)[\[6\]](#)

9. Procédés de fabrication et normes de qualité

La fabrication des tubes en HDPE pour le transport de gaz est strictement encadrée par des normes internationales, telles que l'ISO 4437, qui définissent les exigences de performance et de qualité [\[18\]](#) . [\[35\]](#)

10. Avantages du HDPE par rapport aux matériaux traditionnels

Le HDPE offre des avantages significatifs par rapport aux matériaux conventionnels. Il est intrinsèquement résistant à la corrosion, contrairement à l'acier, et sa légèreté facilite grandement les opérations de transport et d'installation, réduisant ainsi les coûts et les délais.

11. État de l'art et études antérieures

De nombreuses recherches ont été menées sur le comportement du HDPE, notamment l'effet de la vitesse de déformation. En tant que matériau viscoélastique, sa réponse mécanique est fortement dépendante de la rapidité avec laquelle la charge est appliquée, un aspect fondamental pour la prédiction de sa performance en service [\[5\]](#)[\[20\]](#).

12. Conclusion du chapitre

Une compréhension approfondie de la structure semi-cristalline et du comportement viscoélastique du HDPE est essentielle pour prédire sa durabilité et sa fiabilité dans les

Chapitre 2 : Étude bibliographique et propriétés physiques, thermiques et mécaniques du HDPE

applications industrielles, en particulier celles soumises à des contraintes environnementales et mécaniques variées [\[13\]\[23\]](#).

Chapitre 3 :

**Comportement viscoélastique du
HDPE et effet de la vitesse de
déformation**

Chapitre 3 : Comportement viscoélastique du HDPE et effet de la vitesse de déformation

1. Introduction du chapitre

Le polyéthylène à haute densité (HDPE), polymère thermoplastique semi-cristallin, est largement utilisé en industrie grâce à ses excellentes propriétés mécaniques, sa résistance chimique et son faible coût. Toutefois, son comportement viscoélastique – où la réponse dépend à la fois de l'amplitude de la contrainte et de la durée d'application – est caractéristique des polymères. [\[30\]\[34\]](#)

Ce chapitre vise à expliquer ce comportement viscoélastique du HDPE et l'impact du taux de déformation sur ses propriétés mécaniques. Il rappelle d'abord les bases (élasticité, viscosité, viscoélasticité) et les modèles rhéologiques classiques (Maxwell, Kelvin-Voigt). Il définit ensuite le taux de déformation et son lien avec la vitesse de la traverse de la machine d'essai. Les effets de la vitesse de chargement sur le seuil d'écoulement, la résistance maximale, l'allongement à la rupture et la transition ductile-fragile sont analysés. Enfin, le principe d'équivalence temps-température (WLF), ainsi que la dissipation d'énergie et l'échauffement adiabatique lors d'essais rapides, sont abordés. [\[31\]\[34\]](#)

2. Concepts fondamentaux de la viscoélasticité

a. Élasticité

Un matériau est dit élastique lorsque sa déformation est totalement récupérable après suppression de la contrainte appliquée, et ce de façon instantanée. Pour un solide élastique linéaire, la relation entre contrainte σ et déformation ε est donnée par la loi de Hooke: [\[31\]](#)

$$\sigma = E \cdot \varepsilon(3.1)$$

Où E est le module d'Young (ou module d'élasticité) exprimé en Pa. Dans ce cas, il n'y a aucune dépendance au temps : la réponse est purement instantanée et toute l'énergie mécanique est stockée réversiblement.

Chapitre 3 : Comportement viscoélastique du HDPE et effet de la vitesse de déformation

b. Viscosité

Un matériau visqueux (ou fluide newtonien idéal) se caractérise par une contrainte proportionnelle à la vitesse de déformation et non à la déformation elle-même. La loi de Newton s'écrit: [\[31\]](#)

$$\sigma = \eta \cdot \dot{\epsilon} \quad (3.2)$$

Où η est la viscosité dynamique (Pa.s) et $\dot{\epsilon} = d\epsilon/dt$ est la vitesse de déformation. Contrairement au cas élastique, l'énergie fournie est entièrement dissipée sous forme de chaleur et la déformation est irréversible.

c. Viscoélasticité

La viscoélasticité combine les deux comportements précédents: le matériau possède à la fois une composante élastique (récupérable) et une composante visqueuse (dissipative). Les polymères tels que le HDPE présentent typiquement ce comportement. Deux phénomènes caractéristiques en découlent [\[8\]\[10\]](#); [\[31\]\[30\]](#)

- Le fluage (creep): sous contrainte constante, la déformation augmente progressivement avec le temps [\[2\]\[10\]](#), [\[11\]](#)
- La relaxation de contrainte: sous déformation imposée constante, la contrainte interne diminue progressivement au cours du temps [\[8\]\[10\]](#).

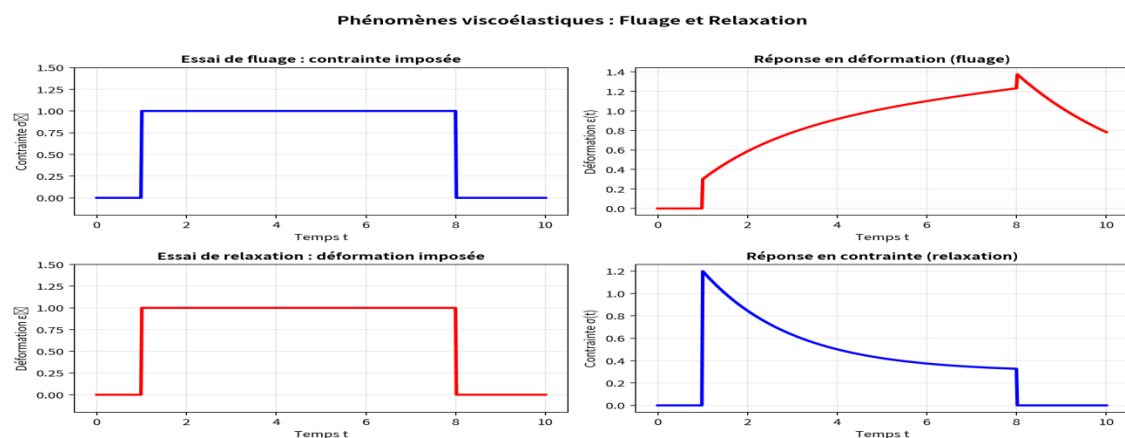


Fig 3.1 : Représentation schématique des phénomènes de fluage (haut) et de relaxation de contrainte (bas) caractéristiques des matériaux viscoélastiques.

Chapitre 3 : Comportement viscoélastique du HDPE et effet de la vitesse de déformation

Le tableau suivant récapitule les différences essentielles entre les trois types de comportements mécaniques :

Tableau 3.1 : Comparaison entre les comportements élastique, visqueux et viscoélastique.

Comportement	Loi constitutive	Réversibilité	Dépendance au temps
Élastique	$\sigma = E \cdot \varepsilon$	Totale et instantanée	Aucune
Visqueux	$\sigma = \eta \cdot \dot{\varepsilon}$	Nulle	Totale
Viscoélastique	$\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, t)$	Partielle	Forte
Élasto-plastique	$\sigma = f(\varepsilon)$ avec seuil	Partielle	Faible

3. Modélisation du comportement viscoélastique

Pour représenter mathématiquement le comportement viscoélastique, on utilise des modèles rhéologiques composés d'éléments mécaniques idéalisés: le ressort (comportement élastique, module E) et l'amortisseur visqueux (comportement visqueux, viscosité η). Différentes combinaisons de ces deux éléments permettent de construire des modèles de complexité croissante [8], [31][36]

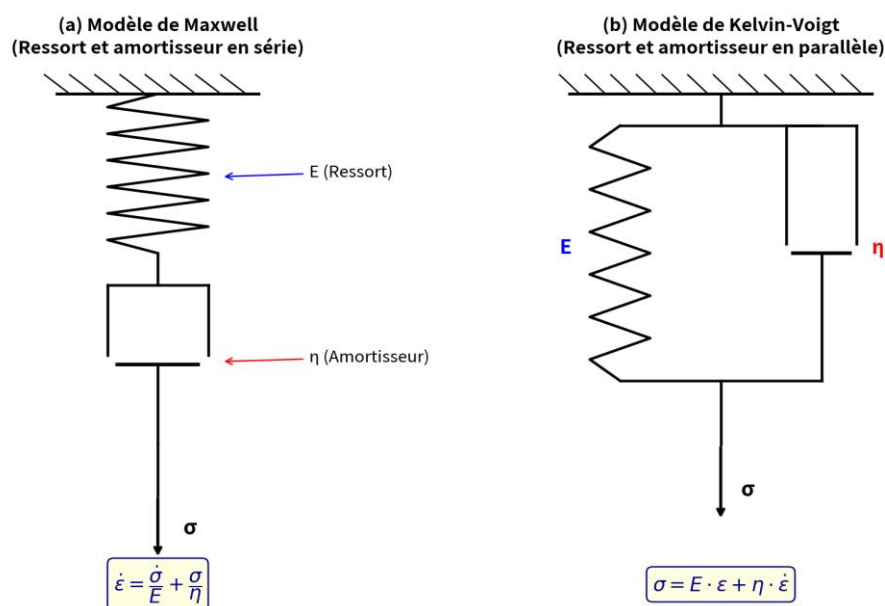


Fig 3.2 : Représentation schématique des modèles rhéologiques élémentaires : (a) Modèle de Maxwell (série) et (b) Modèle de Kelvin-Voigt (parallèle).

Chapitre 3 : Comportement viscoélastique du HDPE et effet de la vitesse de déformation

a. Déformation, ϵ

Accroissement de la longueur par unité de longueur initiale de la longueur de référence. Elle est exprimée comme un rapport sans dimension ou en pourcentage (%). Elle est utilisée pour des déformations jusqu'au point d'écoulement.

$$\epsilon = \Delta L_0 / L_0 \quad (3.3)$$

$$\epsilon(\%) = 100 * \Delta L_0 / L_0 \quad (3.4)$$

Où

L_0 : Longueur de référence de l'éprouvette, en millimètres;

ΔL_0 : Accroissement de la longueur de l'éprouvette entre les repères de référence, en millimètres.

b. Modèle de Maxwell

Le modèle de Maxwell est constitué d'un ressort et d'un amortisseur visqueux disposés en série (Figure 3.2). La contrainte σ est identique dans les deux éléments, et la déformation totale est la somme des deux contributions: [\[31\]](#)[\[36\]](#)

$$\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2 = \sigma/E + \int (\sigma/\eta) dt \quad (3.5)$$

En dérivant par rapport au temps, on obtient l'équation différentielle :

$$\dot{\epsilon} = \dot{\sigma}/E + \sigma/\eta \quad (3.6)$$

Ce modèle prédit correctement la relaxation de contrainte: pour une déformation constante ϵ_0 , la solution s'écrit [\[8\]](#) :

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \exp(-t/\tau), \text{ avec } \tau = \eta/E \quad (3.7)$$

Où τ est le temps caractéristique de relaxation. En revanche, le modèle de Maxwell ne représente pas correctement le fluage (il prédit un écoulement infini sous contrainte constante) [\[8\]](#)

c. Modèle de Kelvin-Voigt

Chapitre 3 : Comportement viscoélastique du HDPE et effet de la vitesse de déformation

Le modèle de Kelvin-Voigt associe un ressort et un amortisseur en parallèle (Figure 3.2). Les deux éléments subissent la même déformation ε , et la contrainte totale est la somme des contraintes individuelles: [\[31\]\[36\]](#)

$$\sigma = E \cdot \varepsilon + \eta \cdot \dot{\varepsilon} \quad (3.8)$$

Sous contrainte constante σ_0 appliquée à $t = 0$, la solution en fluage est [\[8\]](#):

$$\varepsilon(t) = (\sigma_0/E) \cdot [1 - \exp(-t/\tau)] \quad (3.9)$$

La déformation tend asymptotiquement vers la valeur élastique σ_0/E avec un temps de retard $\tau = \eta/E$. À l'inverse de Maxwell, ce modèle décrit correctement le fluage mais ne peut pas rendre compte de la relaxation instantanée [\[8\]](#).

d. Interprétation physique des modèles

Physiquement, le ressort représente la partie réversible de la déformation (étirement élastique des chaînes macromoléculaires et des liaisons covalentes), tandis que l'amortisseur représente la partie dissipative (glissement, réarrangement et désenchevêtrement des chaînes polymères). Pour décrire fidèlement le comportement réel du HDPE, des modèles plus complexes sont nécessaires (modèle de Zener / SLS, modèle de Burgers, modèles généralisés avec plusieurs temps de relaxation) [\[9\]\[10\]](#).

4. Définition du taux de déformation (strain rate)

a. Définition mathématique

Le taux (ou vitesse) de déformation, noté $\dot{\varepsilon}$, est défini comme la dérivée temporelle de la déformation :

$$\dot{\varepsilon} = d\varepsilon/dt \quad (3.10)$$

Il s'exprime en s^{-1} et caractérise la rapidité avec laquelle le matériau est déformé. Les essais mécaniques classiques couvrent généralement une gamme allant de $10^{-5} s^{-1}$ (essais quasi-statiques très lents) à environ $10^3 s^{-1}$ (essais dynamiques par barres de Hopkinson). [\[34\]](#)

Chapitre 3 : Comportement viscoélastique du HDPE et effet de la vitesse de déformation

b. Importance physique

Pour les matériaux viscoélastiques tels que les polymères, le taux de déformation influence directement la réponse mécanique. À faible $\dot{\epsilon}$, les chaînes macromoléculaires ont le temps de se réarranger et d'accommoder la déformation: le matériau apparaît ductile et possède un seuil d'écoulement réduit. À fort $\dot{\epsilon}$, le mouvement des chaînes est limité et le matériau devient plus rigide et plus fragile [\[20\]\[22\]\[24\]](#), [\[30\]\[34\]](#)

c. Lien avec la vitesse de traverse de la machine

Lors d'un essai de traction sur une machine universelle, la traverse se déplace à une vitesse v (mm/min ou mm/s). Pour une éprouvette de longueur utile initiale L_0 , le taux de déformation nominal (dit ingénieur) est donné par :

$$\dot{\epsilon} = v / L_0 \quad (3.11)$$

Par exemple, pour une éprouvette de longueur utile $L_0 = 50$ mm sollicitée à $v = 50$ mm/min $\approx 0,833$ mm/s, on obtient $\dot{\epsilon} \approx 0,0167$ s⁻¹. Le tableau 3.2 présente quelques vitesses typiques rencontrées lors de la caractérisation mécanique du HDPE.

Tableau 3.2 : Gamme de vitesses de déformation usuelles en caractérisation mécanique du HDPE.

Type d'essai	Vitesse de traverse v	Taux de déformation $\dot{\epsilon}$ typique
Fluage / quasi-statique lent	0,5 mm/min	$\sim 1,7 \times 10^{-4}$ s ⁻¹
Traction standard (ISO 6259-3)	5 – 50 mm/min	$10^{-3} - 10^{-2}$ s ⁻¹
Essai rapide (servo-hydraulique)	500 – 5000 mm/min	$10^{-1} - 1$ s ⁻¹
Impact Charpy / Izod	~ 3 m/s	$\sim 10^2$ s ⁻¹
Barres de Hopkinson (SHPB)	> 10 m/s	$10^3 - 10^4$ s ⁻¹

Chapitre 3 : Comportement viscoélastique du HDPE et effet de la vitesse de déformation

5. Effet de la vitesse de chargement sur les propriétés mécaniques

L'un des aspects les plus marquants du comportement du HDPE est sa forte sensibilité à la vitesse de déformation. La figure 3.3 présente des courbes force-déplacement typiques obtenues à différentes vitesses de sollicitation. [30][34]

a. Effet sur le seuil d'écoulement (σ_y)

Le seuil d'écoulement σ_y augmente de manière logarithmique avec la vitesse de déformation. Cette dépendance est bien décrite par la loi d'Eyring [20][22][24] : [34][21]

$$\sigma_y = \sigma_0 + (k_B \cdot T / V^*) \cdot \ln(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0) \quad (3.12)$$

Où k_B est la constante de Boltzmann, T la température absolue, V^* le volume d'activation et $\dot{\epsilon}_0$ une vitesse de référence. La figure 3.2 illustre cette dépendance pour différentes températures.

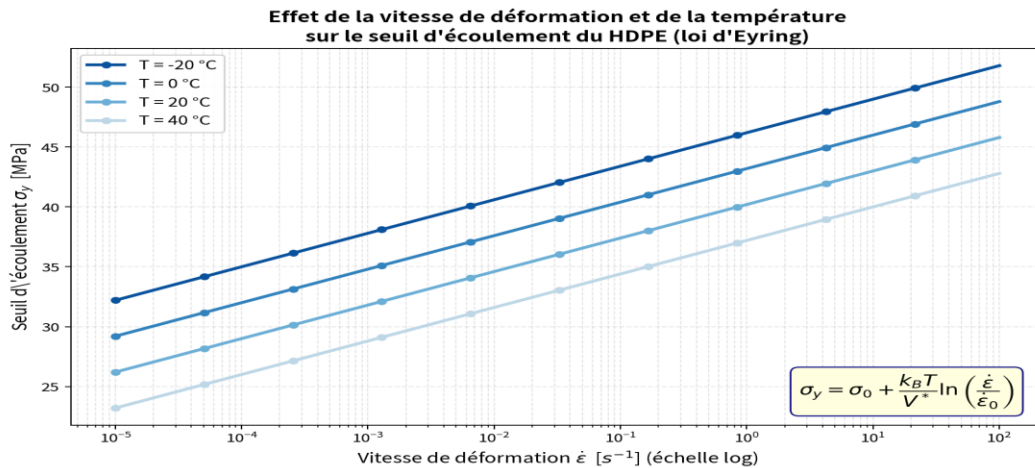


Fig 3.3 :Évolution du seuil d'écoulement σ_y du HDPE en fonction de la vitesse de déformation (échelle logarithmique) pour différentes températures.

b. Effet sur la résistance maximale (σ_{max})

De manière similaire, la contrainte maximale σ_{max} atteinte avant rupture augmente avec la vitesse de déformation. Cet effet est lié au fait que le mouvement des chaînes moléculaires est d'autant plus gêné que la sollicitation est rapide, entraînant un durcissement apparent du matériau [5][20] [30][34]

c. Effet sur l'allongement à la rupture (ϵ_r)

Chapitre 3 : Comportement viscoélastique du HDPE et effet de la vitesse de déformation

L'allongement à la rupture ϵ_r évolue de manière opposée: il diminue lorsque la vitesse de sollicitation augmente. Aux vitesses élevées, les mécanismes de plasticité (formation et propagation de la striction, orientation des chaînes) n'ont pas le temps de se développer, ce qui conduit à une rupture plus précoce [5][20], [30][34]

d. Effet sur la ductilité et la fragilité

À basse vitesse et température élevée, le HDPE présente un comportement ductile caractérisé par une déformation plastique importante et une forte absorption d'énergie avant rupture. À haute vitesse ou basse température, le comportement devient fragile : la rupture survient brusquement, avec peu de déformation plastique et une faible énergie dissipée. Cette transition ductile-fragile est cruciale pour les applications soumises à des chargements dynamiques (impacts, crashes, chutes) [17][20], [34][33][3]

Tableau 3.3 : Synthèse qualitative de l'effet de la vitesse de déformation sur les propriétés mécaniques du HDPE.

Propriété	Évolution avec $\dot{\epsilon} \uparrow$	Origine physique
Module d'Young E	$\uparrow$ (légère)	Rigidification élastique aux hautes fréquences
Seuil d'écoulement σ_y	$\uparrow$ (forte, logarithmique)	Loi d'Eyring, activation thermique
Contrainte maximale σ_{max}	$\uparrow$	Durcissement par manque de mobilité des chaînes
Allongement à la rupture ϵ_r	$\downarrow$	Moins de temps pour la plasticité
Ténacité / Ductilité	$\downarrow$ (transition ductile-fragile)	Temps insuffisant pour la relaxation

6. Principe d'équivalence temps-température

Chapitre 3 : Comportement viscoélastique du HDPE et effet de la vitesse de déformation

L'un des concepts les plus puissants en rhéologie des polymères est le principe d'équivalence temps-température (PETT). Il stipule qu'un essai réalisé à haute température et faible vitesse est équivalent à un essai réalisé à basse température et vitesse élevée. Ce principe permet d'extrapoler le comportement à long terme à partir d'essais courts effectués à différentes températures [7][8], [31]

a. Loi de Williams-Landel-Ferry (WLF)

Le décalage horizontal à appliquer aux courbes expérimentales pour construire une courbe maîtresse est donné par le facteur de translation a_T , défini par l'équation de Williams-Landel-Ferry [7] :

$$\log(a_T) = -C_1 \cdot (T - T_{ref}) / [C_2 + (T - T_{ref})] \quad (3.13)$$

Où T_{ref} est la température de référence, et C_1 et C_2 des constantes dépendantes du matériau. Pour de nombreux polymères, avec $T_{ref} = T_g$ (température de transition vitreuse), on a typiquement $C_1 \approx 17,4$ et $C_2 \approx 51,6$ K (valeurs universelles de Williams-Landel-Ferry) [7].

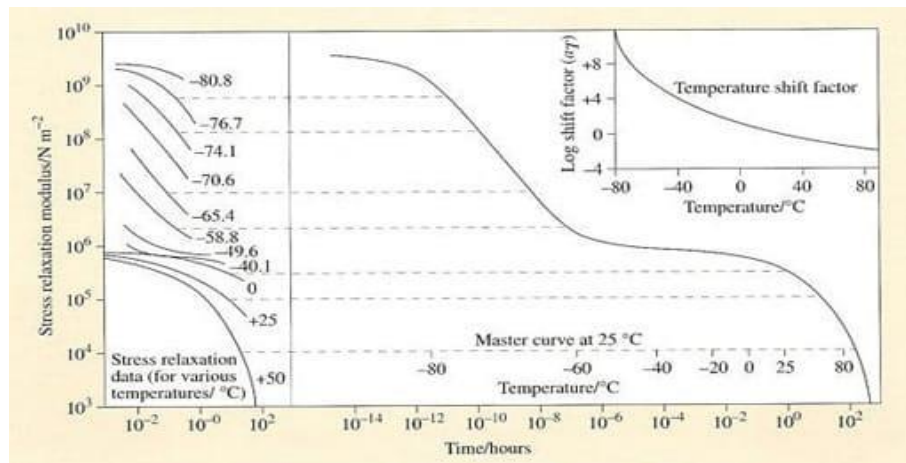


Fig 3.4 : Principe de construction d'une courbe maîtresse par décalage horizontal (facteur a_T) à partir du principe d'équivalence temps-température.

b. Interprétation pour les polymères

Chapitre 3 : Comportement viscoélastique du HDPE et effet de la vitesse de déformation

Cette équivalence traduit un fait physique simple: la mobilité des chaînes macromoléculaires dépend à la fois de la température (agitation thermique) et du temps dont elles disposent pour se réorganiser. Ainsi, augmenter la température revient à accélérer les processus de relaxation, ce qui est équivalent à diminuer la vitesse de sollicitation. Pour le HDPE, cette propriété permet de prédire la durabilité à long terme (plusieurs années) à partir d'essais accélérés à températures élevées [\[7\]\[8\]\[13\]](#), [\[31\]\[34\]\[12\]](#)

7. Dissipation d'énergie et échauffement adiabatique lors des essais rapides

Lors d'un essai mécanique, une partie de l'énergie fournie au matériau est dissipée sous forme de chaleur à cause du caractère visqueux. L'énergie totale dissipée par unité de volume est donnée par l'aire sous la courbe σ - ε :

$$W_{diss} = \int \sigma \cdot d\varepsilon \quad (3.14)$$

À vitesses de déformation lentes, la chaleur produite peut s'évacuer vers le milieu extérieur : l'essai est qualifié d'isotherme. En revanche, à vitesses élevées ($\dot{\varepsilon} > 10^0 \text{ s}^{-1}$ typiquement), les temps caractéristiques de diffusion thermique deviennent plus longs que la durée de l'essai. La chaleur reste localisée dans le matériau : on parle alors de conditions adiabatiques.

L'élévation de température locale ΔT peut être estimée par la relation :

$$\Delta T = \beta \cdot (W_{diss}) / (\rho \cdot C_p) \quad (3.15)$$

Où β est la fraction d'énergie mécanique convertie en chaleur (coefficient de Taylor-Quinney, typiquement 0,8 – 0,95 pour les polymères), ρ la masse volumique et C_p la capacité thermique massique. Pour le HDPE sollicité à grande vitesse, ΔT peut facilement atteindre 20 à 50 °C, ce qui ramollit localement le matériau et peut favoriser l'apparition d'instabilités plastiques telles que la striction ou le cisaillement localisé (bandes de cisaillement adiabatiques).

8. Conclusion

Chapitre 3 : Comportement viscoélastique du HDPE et effet de la vitesse de déformation

Ce chapitre a présenté les notions fondamentales nécessaires à la compréhension du comportement viscoélastique du HDPE et de l'influence de la vitesse de déformation sur ses propriétés mécaniques. Les principales conclusions peuvent être résumées comme suit : [\[30\]](#)[\[31\]](#)[\[34\]](#)

- Le HDPE présente un comportement viscoélastique combinant des composantes élastique (réversible) et visqueuse (dissipative).
- Les modèles de Maxwell et Kelvin-Voigt constituent les briques de base de la modélisation viscoélastique, chacun décrivant fidèlement un aspect particulier (relaxation pour Maxwell, fluage pour Kelvin-Voigt).
- Le taux de déformation $\dot{\epsilon}$ est un paramètre déterminant : il est directement lié à la vitesse de traverse de la machine d'essai par $\dot{\epsilon} = v / L_0$.
- Lorsque la vitesse de déformation augmente, le seuil d'écoulement σ_y et la contrainte maximale $\sigma_{\max}$ augmentent, tandis que l'allongement à la rupture diminue, traduisant une transition progressive ductile $\rightarrow$ fragile.
- Le Principe d'équivalence temps-température (loi WLF) permet d'extrapoler le comportement à long terme à partir d'essais accélérés à températures élevées [\[7\]](#).
- Aux vitesses élevées, l'échauffement adiabatique devient significatif et modifie localement les propriétés du matériau.

Ces notions constituent le socle théorique indispensable à l'analyse des résultats expérimentaux présentés dans le chapitre suivant, consacré à la caractérisation mécanique du HDPE par essais de traction à différentes vitesses de déformation.

Chapitre 4 :
**Étude expérimentale,
résultats et discussion**

1. Introduction du chapitre

Ce chapitre s'inscrit dans la continuité du chapitre 3, consacré aux bases théoriques de la viscoélasticité du PEHD et au rôle de la vitesse de déformation. Il vise à confronter ces notions aux résultats expérimentaux obtenus en traction. La démarche adoptée repose sur la présentation du matériau, du protocole et des conditions d'essai, suivie de l'analyse des résultats issus des différentes campagnes. Cette approche permet d'évaluer l'influence de la vitesse de chargement sur le comportement mécanique du PEHD 100, tout en prenant en compte les limites liées à la qualité des données expérimentales.

2. Préparation des éprouvettes:

a. Matériau



Fig.4.1 : Tube en HDPE.

Chapitre 4 : Étude expérimentale, résultats et discussion

Pour cette étude, on a utilisé un tube en polyéthylène de haute densité (PEHD) extrudé et pigmenté, destiné au transport de gaz naturel. [\[35\]](#)

Le tube prend le marquage suivant :

STPM CHIALI PE 100 200*11.4 Gaz 4 - 150711 – lot N°= 277 BGE 15

Tel que :

STPM CHIALI : La désignation commerciale du fabricant :

PE100 : Le symbole d'identification du polyéthylène :

100 : MRS =100

200*11.4 : Les dimensions du tube :

200 : Diamètre extérieur nominal ;

11.4 : Epaisseur nominale ;

Gaz4 : L'application visée (Gaz) sous une pression maximale de service (4 bars) ;

150711 : La date de fabrication 15 Juillet 2011 ;

Lot N°= 277 : Le numéro du lot de fabrication.

BGE 15 : L'origine de la matière première.

b. Éprouvettes

Les éprouvettes utilisées dans ce chapitre sont préparées à partir d'un tube en PEHD 100 représenté ci-dessus. **Fig. 4.1.**

Prélèvement dans le tube :

Prélever des bandes dans le tube, sans chauffage et sans aplatissement de celui-ci, de telle manière que leurs axes soient parallèles à l'axe du tube et que leurs emplacements soient conformes selon diamètre extérieur nominal.

Préparation et Usinage des Éprouvettes :

La phase de préparation des échantillons suit un protocole rigoureux afin de garantir l'intégrité des propriétés mécaniques du matériau. Ce processus se déroule comme suit :

Chapitre 4 : Étude expérimentale, résultats et discussion

Débitage des tubes : Le tube initial est sectionné en tronçons (bondes) d'une longueur uniforme de 150 mm.

Usinage de précision :

Les éprouvettes sont confectionnées sur une fraiseuse conformément aux exigences de la norme ISO 6259-3 (Type 1) [\[19\]](#), [\[35\]](#)

Cette norme définit les méthodes de détermination des caractéristiques en traction pour les tubes en polyoléfines (polyéthylène PE, polypropylène PP, etc.) [\[19\]](#), [\[35\]](#)

Contrôle des paramètres de coupe :

Afin de préserver l'état initial du polymère, l'usinage est réalisé avec de faibles profondeurs de passe. Cette précaution est essentielle pour :

Éviter toute déformation mécanique résiduelle.

Limiter l'échauffement thermique susceptible d'altérer les propriétés physico-chimiques des éprouvettes.

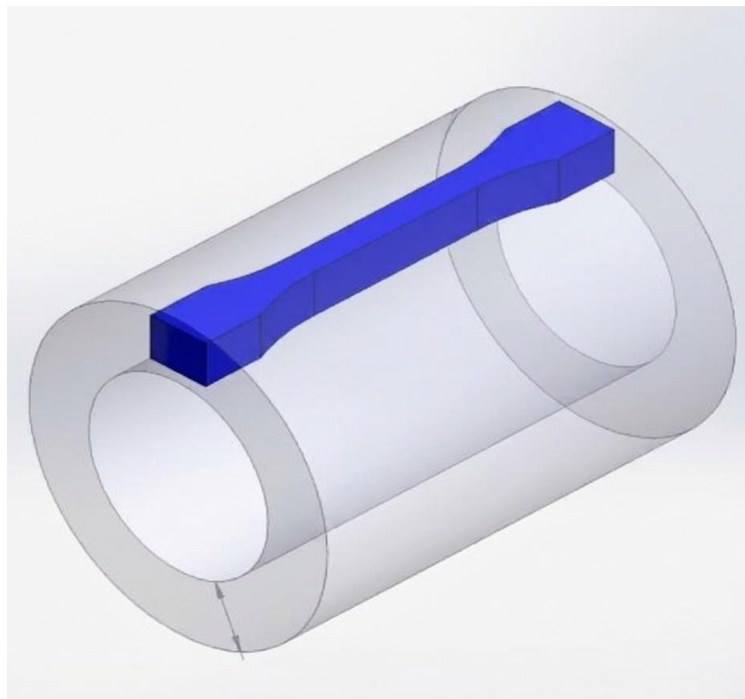


Fig 4.2 : Schématisation du prélèvement des éprouvettes longitudinales.

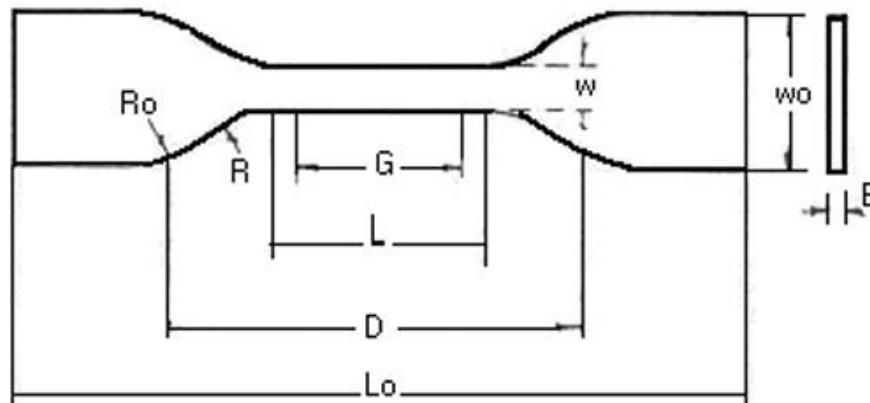


Fig4.3: Epreuve haltère de traction selon la norme ISO 6259-3 Type 1 [\[19\]](#)

Avec :

W : Largeur de la partie étroite	10 ± 0.2
L : Longueur de la partie étroite parallèle.	60 ± 0.5
W0 : Largeur aux extrémités, min.	20 ± 0.2
L0 : Longueur totale, min.	150
G : Longueur de référence.	50 ± 0.5
D : Distance initiale entre mâchoires.	115 ± 0.5
R0 : Rayon externe.	60
B : Epaisseur de l'éprouvette Celle de tube	

Les dimensions sont en millimètres

c. Méthode de découpe et de préparation

Les éprouvettes ont été usinées à partir d'un matériau en PEHD (tube ou plaque noire) à l'aide d'une machine de préparation de type fraiseuse CNC (commande numérique), équipée d'un système d'aspiration des copeaux, comme illustré à la fig4.4. [35]

La découpe a été réalisée par un opérateur qualifié conformément aux exigences expérimentales, afin d'assurer une bonne précision dimensionnelle et une reproductibilité des échantillons.

Avant les essais, la largeur et l'épaisseur de chaque éprouvette ont été mesurées pour déterminer la section initiale, utilisée dans le calcul de la contrainte nominale.

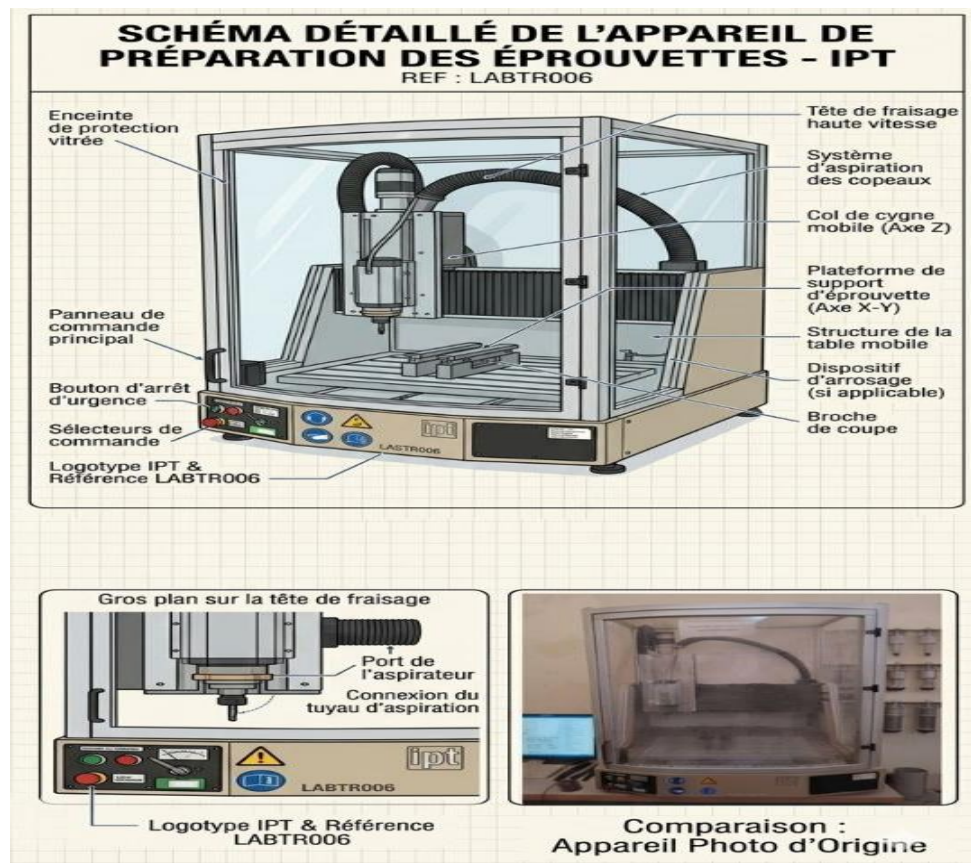


Fig4.4 : Schéma détaillé et comparaison réelle de l'appareil de préparation des éprouvettes (IPT - LABTR006).

d. Norme retenue pour les essais de traction

Pour déterminer les propriétés mécaniques des tubes de transport de gaz naturel en polyéthylène haute densité (PEHD), cette étude s'appuie sur la norme internationale ISO 6259-3 Type 1, Les dimensions de l'éprouvette ont été calibrées pour assurer une répartition uniforme des contraintes dans la zone utile lors de l'étirage, garantissant ainsi la fiabilité, la répétabilité des résultats obtenus et leur parfaite conformité avec les rapports d'essais générés par la machine. [19], [35]

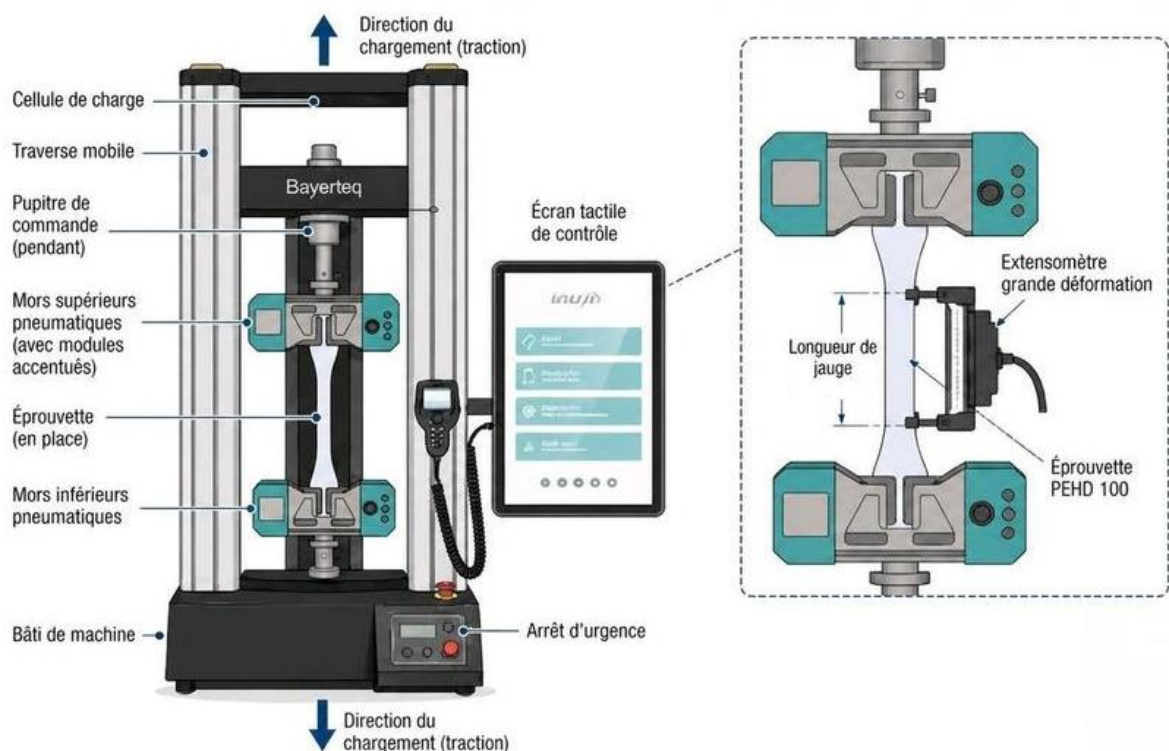


Fig 4.5 – Schéma du dispositif d'essai de traction et de l'éprouvette PEHD.

3. Dispositif expérimental

Les essais de traction ont été réalisés à l'aide d'une machine d'essais universelle (UTM Series, Bayarteq) spécialement configurée pour la caractérisation mécanique du polymère PEHD 100. Le dispositif expérimental repose sur un bâti de machine robuste équipé d'une traverse mobile, pilotée par un pupitre de commande, qui permet d'appliquer une force de traction unidirectionnelle. La mesure précise des efforts appliqués durant l'allongement est assurée par une cellule de charge intégrée au sommet de la structure. Pour garantir un maintien ferme et homogène de

l'éprouvettesans aucun glissement durant l'étirement, le système utilise des mors pneumatiques supérieurs et inférieurs. Le suivi rigoureux des déformations, essentiel pour ce type de matériau ductile, est réalisé grâce à un extensomètre grande déformation fixé directement sur la longueur de jauge de l'éprouvette. Enfin, l'ensemble du système et l'acquisition des données en temps réel sont pilotés via un écran tactile de contrôle, tandis qu'un bouton d'arrêt d'urgence est positionné sur la base du bâti pour assurer la sécurité de l'opérateur et du matériel.

4. Conditions d'essai

Cinq configurations expérimentales ont été retenues dans la présente étude comparative, correspondant à des vitesses de chargement de 50, 70, 90, 110 et 130 mm/min. En considérant une longueur de jauge initiale de 25 mm, les taux de déformation nominaux correspondants sont approximativement de $0,033 \text{ s}^{-1}$, $0,047 \text{ s}^{-1}$, $0,060 \text{ s}^{-1}$, $0,073 \text{ s}^{-1}$ et $0,087 \text{ s}^{-1}$.

Le nombre de mesures exploitables varie selon les séries d'essais. La première série comporte cinq valeurs valides, tandis que les deuxième, troisième et quatrième en comptent chacune quatre. La cinquième série ne comprend que trois résultats exploitables, en raison de la détérioration accidentelle de certaines éprouvettes lors de la préparation expérimentale.

L'impossibilité de les remplacer s'explique par l'indisponibilité du matériau initial, le tube utilisé ayant été entièrement consommé.

Tableau 4.1 : Conditions d'essai et dimensions des éprouvettes par série de traction
(vitesses 50–130 mm/min)

Série	Vitesse (mm/min)	Largeur (mm)	Épaisseur (mm)	L0 (mm)	Entraxe des mors (mm)	n exploitable
Traction 1	50	10.20	11.90	25.00	115.00	5
Traction 2	70	10.27	12.03	25.00	115.00	4
Traction 3	90	10.36	12.40	25.00	115.00	4
Traction 4	110	10.25	12.06	25.00	115.00	4
Traction 5	130	10.20	11.95	25.00	115.00	3

5. Résultats expérimentaux

Dans le cadre du traitement des rapports d'essais, une harmonisation des données a été effectuée afin d'assurer la cohérence des grandeurs mécaniques analysées. Les valeurs numériques ont été interprétées comme des forces maximales (en newtons), en accord avec les dimensions des éprouvettes et les propriétés attendues du PEHD 100.

La contrainte nominale moyenne a été calculée à partir de la relation : $\sigma = F / S_0$, où F est la force maximale moyenne et S_0 la section initiale de l'éprouvette.

Tableau 4.2 : Analyse des résultats expérimentaux des essais de traction sur le PEHD 100
: Détermination des propriétés mécaniques.

Série	Forces exploitées (N)	Fmax moyenne (N)	Fmin (N)	Fmax (N)	Section S0 (mm ²)	Contrainte moyenne (MPa)
Traction 1	3573.4, 3581.5, 3719.1, 3706.9, 3737.7	3663.72	3573.4	3737.7	121.38	30.18
Traction 2	3524.7, 3712.0, 3573.6, 3533.4	3585.93	3524.7	3712.0	123.55	29.02
Traction 3	3533.1, 3589.4, 3748.6, 3570.8	3610.47	3533.1	3748.6	128.46	28.10
Traction 4	3752.5, 3821.9, 3571.6, 3448.4	3648.60	3448.4	3821.9	123.62	29.52
Traction 5	3529.7, 3407.9, 3581.2	3506.27	3407.9	3581.2	121.89	28.77

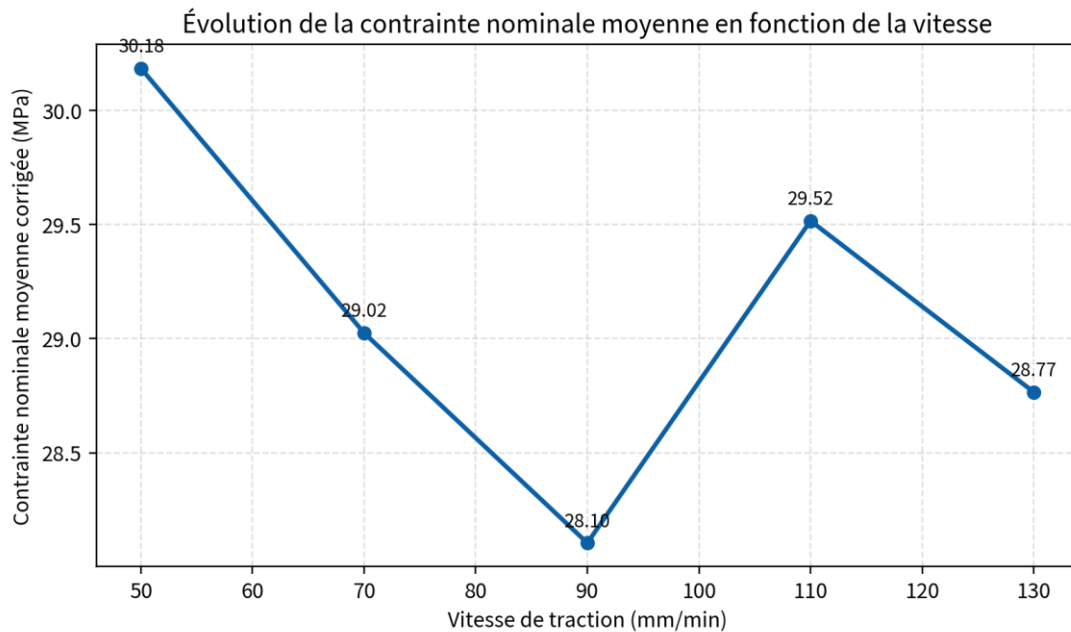


Fig 4.6 : Variation de la contrainte nominale moyenne corrigée en fonction de la vitesse de traction.

6. Analyse et discussion des résultats :

a. Courbes force–déplacement :

Les courbes force–déplacement obtenues lors des essais de traction permettent de caractériser le comportement mécanique du PEHD 100 pour les différentes vitesses de chargement étudiées.

Ces courbes présentent une réponse typique d'un matériau ductile, avec une zone initiale quasi linéaire correspondant au domaine élastique, suivie de l'apparition de la plasticité et d'une phase d'écoulement. Une striction progressive est ensuite observée, conduisant à une diminution de la force jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

L'ensemble de ces résultats confirme le comportement ductile et viscoélastique du PEHD 100 sous chargement en traction

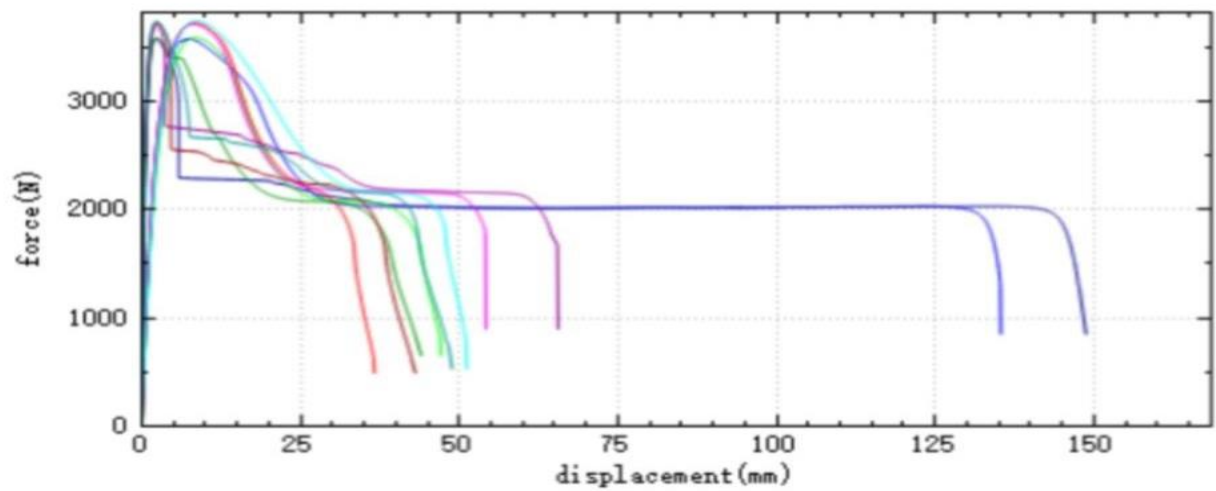


Fig 4.7 : Courbes force-déplacement des éprouvettes en PEHD à une vitesse de traction de 50 mm/min.

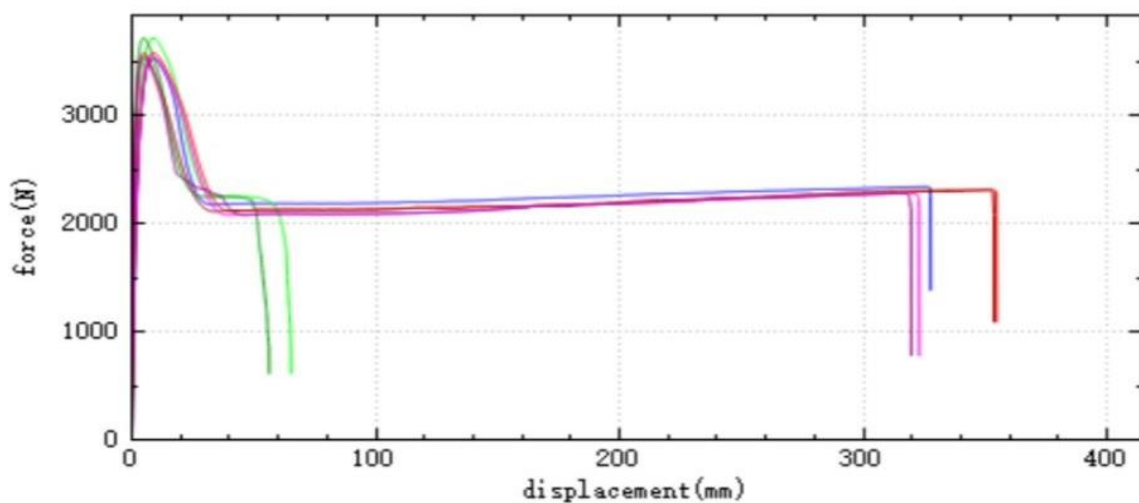


Fig 4.8 : Courbes force-déplacement des éprouvettes en PEHD à une vitesse de traction de 70 mm/min.

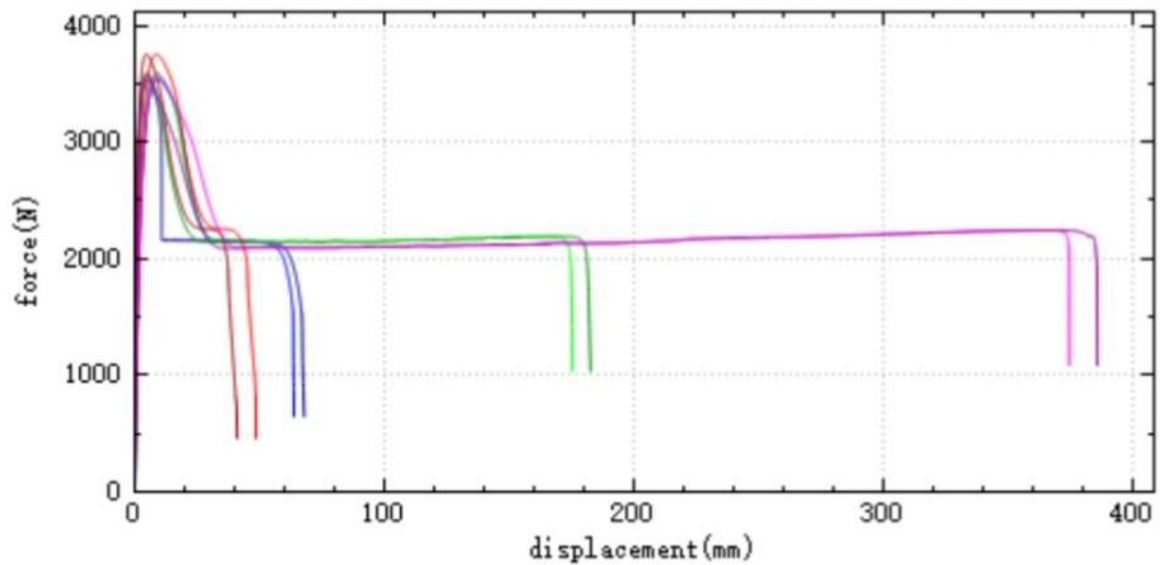


Fig 4.9 : Courbes force-déplacement des éprouvettes en PEHD à une vitesse de traction de 90 mm/min.

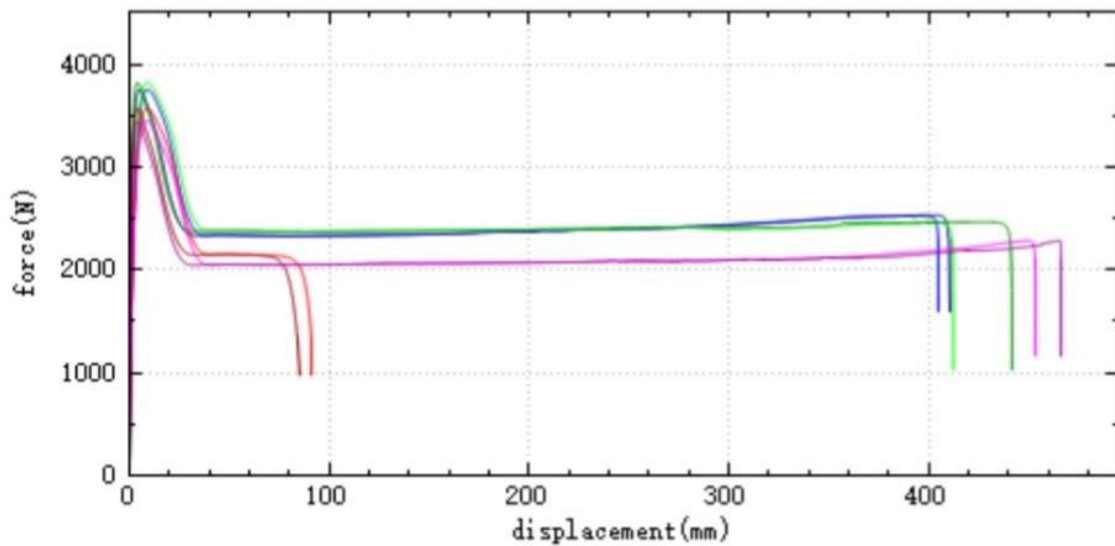


Fig 4.10 : Courbes force-déplacement des éprouvettes en PEHD à une vitesse de traction de 110 mm/min.

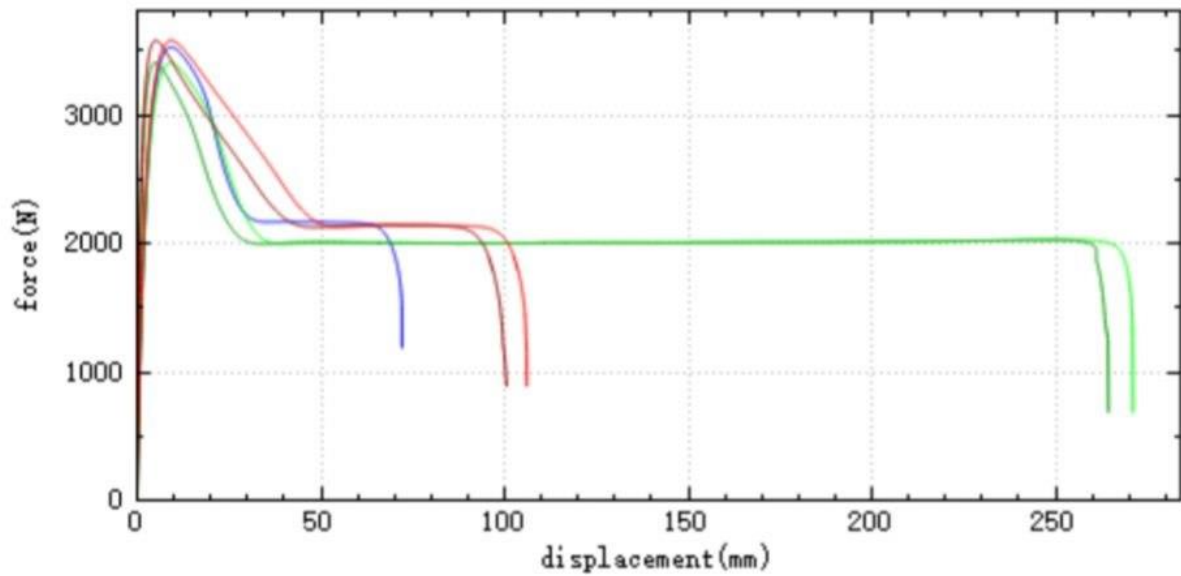


Fig 4.11 : Courbes force–déplacement des éprouvettes en PEHD à une vitesse de traction de 130 mm/min.

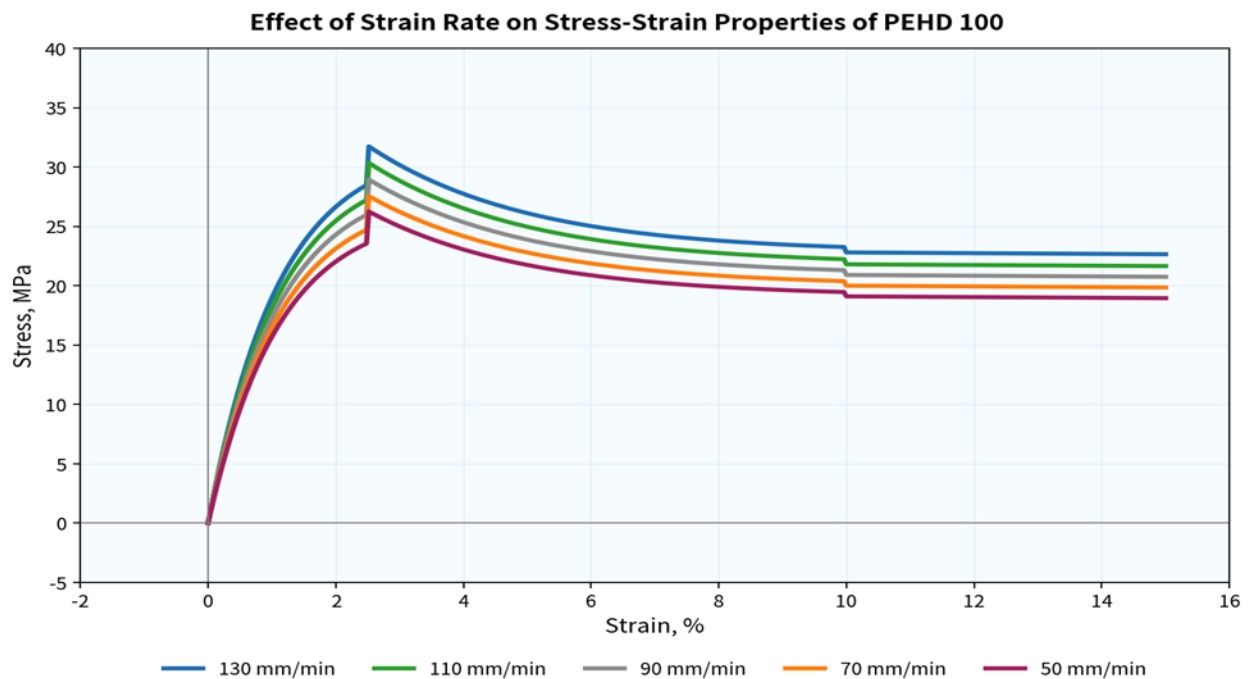


Fig4.12 : Illustration de l'effet de la vitesse de déformation sur la réponse mécanique des polymères : transition du comportement ductile vers fragile aux vitesses élevées.

b. Valeurs de la force maximale :

Les valeurs de force maximale obtenues présentent une dispersion globale modérée entre les différentes séries expérimentales. Les écarts observés restent faibles, ce qui traduit une bonne répétabilité des essais malgré les variations de vitesse de chargement.

Globalement, le comportement du matériau reste cohérent avec les caractéristiques attendues du PEHD 100 en traction.

c. Influence de la vitesse de chargement :

L'influence de la vitesse de chargement sur la force maximale reste globalement limitée dans l'intervalle étudié (50 à 130 mm/min). Les variations observées sont faibles et comparables à la dispersion expérimentale.

Ce comportement peut être expliqué par la nature viscoélastique du PEHD 100, où la vitesse de sollicitation influence principalement les mécanismes de déformation, sans modifier significativement la résistance globale dans la plage testée. [\[30\]\[34\]](#)

d. Comparaison avec la littérature :

Les données issues de la littérature technique concernant le PEHD 100 indiquent une résistance mécanique caractérisée par des niveaux de force et de contrainte cohérents avec un comportement ductile, ainsi qu'un allongement à la rupture élevé [\[5\]\[17\]\[23\]](#).

Dans la présente étude, les résultats obtenus montrent des valeurs de force maximale globalement compatibles avec les ordres de grandeur rapportés dans la littérature pour ce type de matériau. Cette concordance confirme la validité globale des mesures expérimentales et la représentativité du comportement observé.



Fig4.13 : Groupe d'éprouvettes utilisé pour les tests

7. Recommandations techniques pour la sécurité des réseaux de gaz

Les résultats obtenus montrent que le PEHD 100 présente un comportement globalement stable dans la plage de vitesses de chargement étudiée. Pour les applications liées au transport du gaz, il est important de bien contrôler les dimensions des éprouvettes et la qualité des données expérimentales. [\[33\]\[35\]](#)

En effet, une erreur dans les mesures ou dans les unités peut conduire à des résultats faux et donc à de mauvaises conclusions sur le comportement du matériau.

Il est aussi recommandé de conserver les courbes brutes issues de la machine d'essai, et pas seulement les valeurs résumées. Cela permettrait de mieux déterminer des paramètres importants comme le module d'Young, la contrainte d'écoulement ou l'allongement à la rupture.

Dans les applications de transport de gaz, une bonne fiabilité des données est essentielle, et doit toujours être vérifiée en croisant les résultats de l'essai, les fiches techniques du matériau et les observations de rupture. [\[33\]\[35\]\[16\]](#)

8. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter le protocole expérimental et de corriger les incohérences présentes dans les données des essais.

Les résultats les plus fiables concernent les forces maximales mesurées, à partir desquelles des valeurs de contrainte ont été recalculées de manière cohérente. Ces résultats restent globalement conformes au comportement attendu du PEHD 100 utilisé pour le transport du gaz naturel. [\[30\]\[33\]\[34\]](#)

L'étude met en évidence un comportement ductile du matériau, avec une influence limitée de la vitesse de chargement sur la résistance dans l'intervalle 50 à 130 mm/min. [\[30\]\[34\]](#)

Conclusion générale

Conclusion générale

Au terme de ce travail, il ressort que les tubes en polyéthylène haute densité (PEHD) destinés au transport du gaz naturel présentent un intérêt industriel majeur en raison de leur légèreté, de leur résistance à la corrosion, de leur facilité de mise en œuvre et de leurs performances mécaniques adaptées aux réseaux modernes de distribution. L'étude menée a permis d'articuler, dans une même démarche, l'observation du procédé industriel de fabrication au sein de l'unité Plastub, l'analyse bibliographique des propriétés fondamentales du PEHD et l'évaluation expérimentale de son comportement mécanique en traction.

L'analyse théorique a confirmé que le PEHD est un polymère semi-cristallin à comportement viscoélastique, dont la réponse dépend à la fois de sa structure interne, des conditions thermiques et de la vitesse de sollicitation. Cette base scientifique a permis de mieux interpréter les phénomènes observés lors des essais, notamment l'existence d'une réponse ductile globale, la sensibilité du matériau au taux de déformation et l'importance des paramètres de préparation des éprouvettes, de mesure et d'exploitation des données expérimentales.

Sur le plan expérimental, les essais de traction réalisés sur des éprouvettes prélevées à partir de tubes en PEHD 100 ont montré que, dans l'intervalle de vitesses étudié, l'influence de la vitesse de chargement sur la résistance maximale demeure globalement limitée, tandis que le comportement général du matériau reste cohérent avec celui attendu pour ce type de polymère utilisé dans les applications gazières. Les résultats ont également mis en évidence la nécessité d'un contrôle rigoureux des dimensions, des unités, des courbes brutes et des conditions d'essai, afin d'assurer une interprétation fiable et exploitable des propriétés mécaniques.

En définitive, cette étude confirme que le PEHD 100 constitue un matériau performant et pertinent pour les conduites de transport de gaz, à condition que la qualité de la matière première, la maîtrise du procédé d'extrusion et la conformité aux normes de contrôle soient assurées à chaque étape. Comme perspectives, il serait particulièrement intéressant d'élargir cette étude à des vitesses de déformation plus étendues, à l'effet du vieillissement thermique et environnemental, ainsi qu'à une caractérisation plus complète comprenant le module d'Young, la déformation à la rupture, la propagation lente des fissures et l'endommagement à long terme. Ces prolongements permettraient de renforcer encore la sécurité, la durabilité et la fiabilité des réseaux de distribution de gaz en PEHD.

Références

Références

1. Brown, E. N., Willems, R. B., Gray, G. T., Rae, P. J., Cady, C. M., Vecchio, K. S., Flowers, J., & Martinez, M. Y. (2007). Influence of molecular conformation on the constitutive response of polyéthylène: A comparaison of HDPE, UHMWPE, and PEX. *Expérimental Mechanics*, 47(3), 381–393.
2. Liu, H., Polak, M. A., & Penlidis, A. (2008). A practical approach to modeling time-dépendent nonlinear creep behavior of polyéthylène for structural applications. *Polymer Engineering & Science*, 48(1), 159–167.
3. Zhang, Y., Jar, P.-Y. B., Xue, S., & Li, L. (2018). Quantification of strain-induced damage in semi-crystalline polymers: A review. *Journal of Materials Science*, 53(1), 1–35.
4. Brown, N., & Lu, X. (1995). A fundamental theory for slow crack growth in polyethylene. *Polymer*, 36(3), 543–548.
5. Bao, J.-B., Weng, G. S., & Yan, F. (2022). Strain rate-dependent hyperbolic constitutive model for tensile behavior of PE100 pipe material. *Polymers*, 14(7), 1357.
6. Cazenave, J., Seguela, R., Sixou, B., & Germain, Y. (2006). Short-term mechanical and structural approaches for the evaluation of polyethylene stress crack resistance. *Polymer*, 47(11), 3904–3914.
7. Williams, M. L., Landel, R. F., & Ferry, J. D. (1955). The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids. *Journal of the American Chemical Society*, 77(14), 3701–3707.
8. Ferry, J. D. (1980). *Viscoelastic Properties of Polymers* (3rd ed.). New York : John Wiley & Sons. (Ouvrage de référence sur la théorie viscoélastique linéaire).
9. Khan, A. S., & Zhang, H. (2001). Finite deformation of a polymer: Experiments and modeling. *International Journal of Plasticity*, 17(9), 1167–1188.
10. Drozdov, A. D., & Christiansen, J. de C. (2008). Modeling the viscoelastic and viscoplastic response of polyethylene. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 12(3), 159–187.
11. Khan, F., & Yeakle, C. (2011). Experimental investigation and modeling of non-monotonic creep behavior in polymers. *International Journal of Plasticity*, 27(4), 512–521.
12. Sweeney, J., & Ward, I. M. (1996). A constitutive law for large deformations of polymers at high temperatures. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 44(7), 1033–1049.
13. Frank, A., Pinter, G., & Lang, R. W. (2009). Prediction of the remaining lifetime of polyethylene pipes after up to 30 years in use. *Polymer Testing*, 28(7), 737–745.
14. Khelif, R., Chateauneuf, A., & Chaoui, K. (2007). Statistical analysis of HDPE fatigue lifetime. *Meccanica*, 42(1), 39–48.
15. Hassinen, J., Lundbäck, M., Ifwarson, M., & Gedde, U. W. (2004). Deterioration of polyethylene pipes exposed to chlorinated water. *Polymer Degradation and Stability*, 84(2), 261–267.
16. Vinogradova, A. A., Kuzmin, A. V., Slepchenkov, M. M., & Glukhova, O. E. (2022). Method of the mechanical properties evaluation of polyethylene gas pipelines with portable hardness testers. *Inventions*, 7(4), 125.

17. Krishnaswamy, R. K. (2005). Analysis of ductile and brittle failures from creep rupture testing of high-density polyethylene (HDPE) pipes. *Polymer*, 46(25), 11664–11672.
18. ISO 4437-2:2014. Plastics piping systems for the supply of gaseous fuels — Polyethylene (PE) — Part 2: Pipes. Genève : International Organization for Standardization.
19. ISO 6259-3:2015. Thermoplastics pipes — Determination of tensile properties — Part 3: Polyolefin pipes. Genève: International Organization for Standardization.
20. Truss, R. W., Clarke, P. L., Duckett, R. A., & Ward, I. M. (1984). The dependence of yield behaviour on temperature, pressure and strain rate for linear polyethylenes of different molecular weight and morphology. *Journal of Polymer Science : Polymer Physics Edition*, 22(2), 191–209.
21. Brooks, N. W., Duckett, R. A., & Ward, I. M. (1992). Investigation into double yield points in polyethylene. *Polymer*, 33(9), 1872–1880.
22. Bauwens-Crowet, C., Bauwens, J.-C., & Homès, G. (1969). Tensile yield-stress behavior of glassy polymers. *Journal of Polymer Science Part A-2*, 7(4), 735–742.
23. Brown, N. (2007). Intrinsic lifetime of polyethylene pipelines. *Polymer Engineering & Science*, 47(4), 477–480.
24. Hartmann, B., Lee, G. F., & Cole Jr., R. F. (1986). Tensile yield in polyethylene. *Polymer Engineering & Science*, 26(8), 554–559.
25. Wunderlich, B. (2005). *Thermal Analysis of Polymeric Materials*. Berlin: Springer-Verlag. (Référence majeure sur la DSC des polymères semi-cristallins).
26. Mandelkern, L. (2002). *Crystallization of Polymers, Volume 2: Kinetics and Mechanisms* (2nd ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
27. Karger-Kocsis, J., & Bárány, T. (Eds.). (2019). *Polypropylene Handbook: Morphology, Blends and Composites*. Cham: Springer.
28. Patel, R. M. (2017). Polyethylene. In *Multilayer Flexible Packaging* (2nd ed., pp. 17–34). Amsterdam: Elsevier.
29. Maddah, H. A. (2016). Polypropylene as a promising plastic: A review. *American Journal of Polymer Science*, 6(1), 1–11.
30. Ferhoum, R. (2012). Étude expérimentale et modélisation numérique du comportement mécanique du PEHD à l'état vierge et après vieillissement thermique. Thèse de doctorat en génie mécanique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
31. Kermoun, A. (2013). Étude du comportement du polyéthylène à haute densité en fluage et relaxation. Mémoire de master en génie mécanique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
32. Talhi, F. Z. (2008). Étude de l'effet des cycles de transformation sur les propriétés des tubes en PE pour réseaux de distribution gaz et eau. Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas Sétif 1.

33. Boudrahem, M., Belbah, A., & Kirati, O. (2014). Étude de vieillissement d'un polyéthylène de haute densité (PEHD 100) utilisé dans les conduites à gaz sous pressions. *Journal of Materials, Processes and Environment*, 2(1).
34. Sadoun, S. (2018). Effet de la température, de la vitesse de déformation et du vieillissement sur la structure du PEHD. Thèse de doctorat en sciences, Université Badji Mokhtar-Annaba.
35. Larbi, A. (2018). Étude thermomécanique et contrôle qualité des pipelines en PEHD pour le transport de l'eau et du gaz. Mémoire, École Nationale Supérieure des Mines et de la Métallurgie, Annaba.
36. Arieby, R. (2007). Caractérisation mécanique et modélisation thermodynamique du comportement anisotrope du polyéthylène à haute densité : intégration des effets d'endommagement. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine.
37. Alberola, N., & Étienne, S. (1987). Effets des traitements thermiques sur les propriétés micromécaniques d'un polymère semi-cristallin : cas du polyéthylène haute densité. *Revue de Physique Appliquée*, 22(5), 303–313.

شعبه: کمر و گردن
تخصص: طبابت

BUKHARI H.