



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLICQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
المدرسة الوطنية العليا للمناجم والمعادن - عمار العسكري - عنابة
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES ET DE LA METALLURGIE
AMAR LASKRI- ANNABA

Département

Science et Génie des Matériaux

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du Diplôme d'INGENIEUR D'ETAT

Spécialité : Science et Génie des Matériaux

Thème

Approche expérimentale de quelques propriétés mécaniques de tubes en HDPE : Effet de la vitesse de chargement et analyse de l'essai d'éclatement

Présenté par : **Chaabane SAOUDI**

Encadré par : **Pr. Kamel CHAOUI**

Jury de Soutenance

Dr. Mohamed Cherif BENOUDIA

ENSMM Annaba

Président

Dr. Samia BOUDEBANE

ENSMM Annaba

Examinateur

Pr. Kamel CHAOUI

ENSMM Annaba

Encadreur

NOVEMBRE 2020

Département : Science et Génie des Matériaux

**AUTORISATION DE DEPOT FINAL DU
MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

Je soussigné (e) M. Pr. Mohamed Chenif BENOUAIA
Président(e) du jury de soutenance de mémoire de fin d'études (MFE), déclare
avoir autorisé l'ingénieur d'état M. SAOUDI Chaabane
à déposer son mémoire de fin d'études après avoir apporté les corrections
signalées par les membres du jury.

Avis du Promoteur :

AF. Kchaou

Avis de l'Examineur : Avis Favorable

Dr SAMIA LEMBOUB

Président du Jury



REMERCIEMENTS

J'adresse mes remerciements en premier lieu à Notre Seigneur Allah qui m'a donné suffisamment de force et une volonté résolue pour élaborer ce modeste mémoire d'ingénieur après cinq années continues d'études et d'apprentissage.

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement mon encadreur Professeur Kamel Chaoui pour m'avoir donné l'occasion de découvrir le domaine des tubes en polyéthylène. Je le remercie aussi pour ses précieux conseils, ses lucides orientations et ses encouragements constants lors de la réalisation de ce travail. Je tiens aussi à remercier Dr S. Niou, Dr W. Ghabeche et Dr L. Alimi qui ont mis à ma disposition leurs documentations.

Bien que le stage final en industrie se soit déroulé dans des conditions difficiles, le thème du mémoire m'a permis de découvrir les opérations de contrôle de la qualité du produit fabriqué, les pratiques en industrie pour les mesures des propriétés mécaniques et la mise en application de certaines de mes connaissances apprises à l'ENSMM-Annaba. Ceci n'aura pas été possible sans la contribution de plusieurs personnes :

- Madame le Chef de Département Samia Boudebane,*
- Mes enseignants du département,*
- Les ingénieurs et techniciens de l'ENSMM,*
- Au cadre de l'entreprise TUBEX Oran, MM. Abdelilah Ayouni, Mustapha, Abdelkrim et tous les autres qui m'ont aidé...*
- Les responsables et agents de l'administration,*
- Mon ami doctorant Mohamed Imad Eddine Haddar,*
- Mes collègues étudiants de ma promotion...*

Qu'ils trouvent ici tous mes remerciements et tous mes profonds sentiments d'amitié, d'estime, de reconnaissance et de sympathie.

Chaabane...

DEDICACES...

Je dédie ce travail, fruit de plusieurs années d'études mes chers parents.

*À cet homme humble, précieuse offre de Dieu, mon exemple éternel,
Mon soutien moral, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir,
À toi mon cher...Père.*

*À ma très chère, à ma vie, à ma source de joie et ma source de force,
Qui a toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager,
À toi, que j'adore tant... Maman.*

Mes Parents...

Ils m'ont enseigné la patience,

Ils m'ont enseigné la politesse,

Ils m'ont enseigné le sacrifice,

Ils m'ont supportés sans conditions...

... pour que ce jour, qu'ils ont longuement attendu, puisse enfin arriver...

À mes chers frères et mes chères sœurs

Résumé :

Cette étude a été réalisée dans une entreprise d'extrusion de tubes en polyéthylène de haute densité (HDPE). Elle présente une revue bibliographique sur les polymères et les propriétés des tubes en HDPE. Il a été montré qu'au moins cinq paramètres spécifiques régissent la qualité de ces tubes. Il s'agit de la résistance minimale requise, la résistance à la propagation de fissures, la résistance à la propagation lente de fissure, la résistance à la déformation par écoulement et la rigidité. Aussi, il a été expliqué que 3 régions décrivent la durée de vie d'un tube sous l'effet de son environnement de service : la région caractérisée par un mécanisme de rupture ductile, la région de la rupture quasi-fragile et enfin la région de rupture purement fragile. Ensuite, l'effet de la vitesse de chargement sur 9 propriétés mécaniques a été présenté. Les données expérimentales n'étaient pas suffisantes pour sortir avec des corrélations mais les tendances apparentes sont respectées dans certains cas comme la rigidité et la contrainte maximale. Enfin, des essais d'éclatement de tubes HDPE à des différentes pressions et températures ont été exploités. Il a été observé que pour le tube PN 10, la chute de la durée de vie s'étale de 91h jusqu'à 2 h lorsque la température d'essai augmente de 35 à 65°C. Pour les PN 16 et PN 20, ces diminutions de durées de vie s'échelonnent respectivement de 96h à 3h et de 98h à 2h. Ces résultats indiquent que la norme est respectée dans la correspondance entre les pressions d'essai et les épaisseurs minimales requises pour chaque cas. Ceci est en totale cohérence avec le concept du ratio SDR (Standard Dimension Ratio). Les valeurs retrouvées sont bien connues dans les standards des tubes (PN 10, PN 16 et PN 20) et les SDR correspondant sont respectivement 17 ; 11 et 9.

Mots-clés : *Polyéthylène, HDPE, Tube, Taux de déformation (ou vitesse de chargement), Propriété mécanique, Essai d'éclatement, Durée de vie, SDR.*

Abstract:

This study was performed in a company which extrudes high density polyethylene (HDPE) pipes. It presents a literature review on polymers and some properties of HDPE pipes. At least five specific parameters have been shown to govern the quality of extruded tubes. These are the minimum required strength, the resistance to crack propagation, the resistance to slow crack growth, the resistance to flow deformation and finally the stiffness. Also, it was explained that 3 regions describe the lifetime of a pipe under the effects of its service environment: the first is region characterized by a ductile fracture mechanism; the second region is associated with the quasi-brittle fracture and finally the third one exhibits purely brittle failure at longterm. Then, the effect of loading speed on 9 mechanical properties was presented. The experimental data was not sufficient to come out with definitive correlations but the apparent trends are respected in some cases such as stiffness and maximum stress values. Finally, burst tests of HDPE pipes at different pressures and temperatures were performed. It has been observed that for the PN 10 pipe, the drop in service life ranges from 91 hrs to 2 hrs when the test temperature increases from 35°C to 65°C. For PN 16 and PN 20 pipes, the reduction in life spans ranges from 96 hrs to 3 hrs and from 98 hrs to 2 hrs respectively. These results indicate that the standard requirement is met and the correspondence between the test pressures and the minimum thicknesses necessary for each case are in accordance. This is fully consistent with the concept of SDR (Standard Dimension Ratio). The values found are well known in literature for PN 10, PN 16 and PN 20. The standard corresponding SDRs are respectively 17; 11 and 9.

Keywords: Polyethylene, HDPE, Pipe, Deformation rate (or loading speed), Mechanical property, Burst test, Service life, SDR.

ملخص

أجريت هذه الدراسة في شركة أنابيب البولي إيثيلين عالي الكثافة (HDPE). يقدم مراجعة الأدبيات حول البوليمرات وخصائص أنابيب HDPE. تم عرض خمسة معايير محددة على الأقل للتحكم في جودة هذه الأنابيب. هذه هي الحد الأدنى المطلوب من القوة، ومقاومة انتشار الشقوق، ومقاومة بطء نمو الشقوق، ومقاومة تشوه التدفق والصلابة. أيضاً، تم توضيح أن 3 مناطق تصف عمر الأنبوب تحت تأثير بيئة خدمته: المنطقة التي تتميز بألية كسر مطيلة، ومنطقة كسر شبه هش، وأخيراً المنطقة تمزق هش بحت. بعد ذلك، تم عرض تأثير سرعة التحميل على 9 خواص ميكانيكية. لم تكن البيانات التجريبية كافية للخروج مع الارتباطات ولكن يتم احترام الاتجاهات الظاهرة في بعض الحالات مثل الصلابة والضغط الأقصى. أخيراً، تم استغلال اختبارات الانفجار لأنابيب HDPE عند درجات ضغط ودرجات حرارة مختلفة. لقد لوحظ أنه بالنسبة لأنبوب PN 10، يتراوح الانخفاض في عمر الخدمة من 91 ساعة إلى ساعتين عندما تزداد درجة حرارة الاختبار من 35 إلى 65 درجة مئوية. بالنسبة لـ PN 16 و PN 20، تتراوح هذه التخفيضات في العمر من 96 ساعة إلى 3 ساعات ومن 98 ساعة إلى ساعتين على التوالي. تشير هذه النتائج إلى استيفاء المعيار في التوافق بين ضغوط الاختبار والحد الأدنى للسمك المطلوب لكل حالة. هذا يتوافق تمامًا مع مفهوم SDR (نسبة الأبعاد القياسية). القيم الموجودة معروفة جيدًا في معايير الأنبوب (PN 10 و PN 16 و PN 20) و SDR المقابلة هي 17 على التوالي؛ 11 و 9.

الكلمات الرئيسية: البولي إيثيلين، HDPE، الأنبوب، معدل التشوه (أو سرعة التحميل)، الخاصية الميكانيكية، اختبار الاندفاع، عمر الخدمة، SDR.

Sommaire

Remerciements	ii
Dedication	iii
Abstract	iv
Résumé	v
ملخص	vi
Listes des figures	ix
Liste des tableaux	xi
Nomenclature	xii
INTRODUCTION.....	1
I. Chapitre I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES POLYMERES UTILISES POUR LA FABRICATION DE TUBES HDPE : CONTROLE DE LA QUALITE EN USINE ET DUREE DE VIE.....	3
I.1 Généralités sur les polymères	4
I.1.1 Les polymères	4
I.1.2 Classes de polymères.....	4
I.1.3 Polyéthylène.....	6
I.1.4 Caractéristiques générales des polyéthylènes	7
I.1.5 Processus de fabrication des tubes en PE	7
I.1.6 Tubes en polyéthylène.....	8
I.1.7 Avantages et inconvénients	9
I.1.8 Propriétés du tube en PE.....	9
I.1.9 Rupture des tubes en PE	11
I.1.10 La durée vie des tubes en PE	12
I.1.11 Produits fabriqués par l'entreprise TUBEX :.....	14
Chapitre II : ETUDE DE L'EFFET DE LA VITESSE DE CHARGEMENT SUR LES PROPRIETES MECANQUES DANS LA DIRECTION LONGITUDINALE DU TUBE HDPE.....	15
II.1 Introduction	16
II.2 Essais mécaniques standards sur les tubes en HDPE.....	16
II.2.1 Essai de traction	17

II.2.2	Description de la machine de traction	17
II.2.3	Essai de traction d'un polymère semi-cristallin	18
II.3	Conditions expérimentales	22
II.3.1	Préparation des éprouvettes d'essai.....	22
II.3.2	Effet de la vitesse lors d'essai de traction.....	26
II.4	Résultats	27
II.5	Discussion.....	29
III.	Chapitre III : ETUDE DE L'EFFET DE LA TEMPERATURE SUR LA PRESSION D'ECLATEMENT DU TUBE HDPE.....	39
III.1	Introduction	40
III.2	Base théorique sur l'utilité de ce test de pression	40
III.2.1	Appareil de pression hydrostatique	40
III.2.2	Principe de l'essai :.....	40
III.2.3	Analyse des défaillances observées.....	41
III.3	Conditions expérimentales	42
III.3.1	Principe.....	42
III.3.2	Préparation des éprouvettes	43
III.3.3	Appareillage	43
III.3.4	Mode opératoire	45
III.4	Résultats	45
III.5	Discussion.....	48
	CONCLUSION GENERALE.....	53
	Références bibliographiques.....	55

Liste des figures :

Figure I.1 Variation du module d'Young d'un polymère, en fonction de la température.....	5
Figure I.2 Les différentes parties d'une ligne d'extrusion des tubes en PE.....	7
Figure I.3 Distribution bimodale des masses moléculaires (Cazenave, 2005) [7].....	8
Figure I.4 Représentation schématique de la structure semi-cristalline du PE [7]..	10
Figure I.5 Représentation schématique du développement des propriétés du PE de tubes [8]..	10
Figure I.6 Fissuration sous faible contrainte à l'échelle moléculaire à l'origine d'une rupture de type fragile.....	11
Figure I.7 Fissuration sous contrainte élevée à l'échelle moléculaire à l'origine d'une rupture de type ductile.	12
Figure I.8 Illustration schématique des mécanismes de la rupture des tubes en PE sous pression.....	13
Figure II.1 Différents essais mécaniques.....	16
Figure II.2 Machine ATSFAR TCS 1000 de traction.	17
Figure II.3 Schéma descriptive de machine de traction.	18
Figure II.4 Courbe contrainte-déformation d'un polymère semi-cristallin en traction uni-axiale étirée à vitesse d'allongement constante.	19
Figure II.5 Différentes zones de traction uni-axiale d'un thermoplastique Semi-Cristallin avec la représentation schématique de l'éprouvette d'essai.	20
Figure II.6 Découpage des éprouvettes.	23
Figure II.7 Schéma d'éprouvette de type 1 de l'essai de la traction	23
Figure II.8 Appareil de fraisage avec + exemple d'une éprouvette.....	25
Figure II.9 Eprouvette d'essai mise en place dans la machine de traction.....	26
Figure II.10 Fenêtre d'insertion des paramètres.	26
Figure II.11 Graphe de la contrainte au seuil d'écoulement pour $e=6,5$ mm et $v=20$ mm/min. ..	27
Figure II.12 Diagramme contrainte-déformation pour tous les échantillons à différentes vitesses	30
Figure II.13 Diagramme contrainte-déformation pour des essais similaires à notre étude et couvrant une plus grande plage de vitesse [47].....	31
Figure II.14 Augmentation de module d'Young au cours d'augmentation de vitesse.	32
Figure II.15 Augmentation contrainte maximal au cours d'augmentation de vitesse.....	32

Figure II.16 Comportement de la contrainte d'étirage a forid au coure d'augmentation de vitesse.	33
Figure II.17 Comportement de la contrainte à la rupture au coure d'augmentation de vitesse....	33
Figure II.18 Comportement de la pente d'étirage a froid au coure d'augmentation de vitesse....	34
Figure II.19 Le calcul de travail pour un vitesse de 20 m/min.....	35
Figure II.20 Le calcul de travail pour un vitesse de 50 m/min.....	35
Figure II.21 Le calcul de travail pour un vitesse de 80 m/min.....	35
Figure II.22 Le calcul de travail pour un vitesse de 100 m/min.....	35
Figure II.23 Le calcul de travail pour un vitesse de 120 m/min.....	35
Figure II.24 Le calcul de travail pour un vitesse de 200 m/min.....	35
Figure II.25 Représentation des différentes travail en fonction des différents vitesses.	37
Figure III.1 Embouts fixé aux bouts du tube.....	43
Figure III.2 Chronographe.....	44
Figure III.3 Machine test de la pression hydrostatique (éclatement).....	44
Figure III.4 Etapes d'essai.....	45
Figure III.5 Le temps de la résistance des tubes HDPE en mode pression pour des températures allant de 35°C à 65°C (P=15,9Bar).	46
Figure III.6 Le temps de la résistance des tubes HDPE en mode pression pour des températures allant de 35°C à 65°C (P=25,1Bar).	47
Figure III.7 Le temps de la résistance des tubes HDPE en mode pression pour des températures allant de 35°C à 65°C (P=31,5Bar).	48
Figure III.8 Le temps de la résistance des tubes HDPE en mode pressions pour des températures allant de 35°C à 65°C.	49

Liste des tableaux :

Tableau I.1 Classification et désignation des différentes résines de HDPE [EN 12201-1]	6
Tableau I.2 Caractéristiques majeurs des différentes familles des Polyéthylènes. [20]	7
Tableau I.3 Permis les avantages et inconvénients d'un polyéthylène.....	9
Tableau I.4 Produits principalefabriqués par l'entreprise TUBEX.....	14
Tableau II.1 Profil des éprouvettes (Type I) de l'essai de traction.....	24
Tableau II.2 Diagrammes contrainte-déformation pour toutes échantillons demesure.....	28
Tableau II.3 Différents paramètres tirés après essai de traction ont vitesses différentes.....	29
Tableau II.4 Calculs des W_i pour chaque vitesse ($V=20-200\text{mm/min}$).....	35
Tableau II.5 Représentation des différents W_i en focntion des vitesses.....	36
Tableau III.1 Durée de la résistance des tubes HDPE en mode pression pour la température de 35°C à 65°C . le type de polymère 63 PN10 avec une épaisseur ($e = 3,8 \text{ mm}$).....	45
Tableau III.2 Durée de la résistance des tubesHDPE en mode pression pour la température de 35°C à 65°C . le type de polymère 63 PN16 avec une épaisseur ($e = 5,8 \text{ mm}$).....	46
Tableau III.3 Durée de la résistance des tubesHDPE en mode pression pour la température de 35°C à 65°C . le type de polymère 63 PN20 avec une épaisseur ($e = 7,1 \text{ mm}$).....	47
Tableau III.4 Durée de la résistance des trois tubes HDPE en mode pression pour la température de 35°C à 65°C . de tous les cas.	48

Nomenclature :

PE : Polyéthylène.

HDPE : Polyéthylène à haute densité.

PEBD : Polyéthylène à basse densité.

PEMD : Polyéthylène de moyenne densité.

PP : Polypropylène.

PET : Poly (téréphtalate d'éthylène).

PBT : Poly (téréphtalate de butylène).

PA: Polyamide.

PVC : Polychlorure de Vinyle.

SDR : Standard Dimension Ratio.

E : module d'élasticité [MPa].d = diamètre extérieur [mm].

e : épaisseur du tube [mm].F=charge appliquée [N].

Lo : longueur totale de l'échantillon de traction [mm].

P : pression d'essai [Bar].

L : allongement maximal [mm].

V : vitesse de la traverse [mm/min].

σ : résistance à la traction [MPa].

σ_{max} : Contrainte maximale [MPa].

σ_{CD} : contrainte de l'étirage à froid (cold drawing) [MPa].

σ_f : contrainte à la rupture [MPa].

σ_{hoop} : contrainte circonférentielle [MPa].

ε : allongement [%].

$\Delta\varepsilon_{CD}$: L'étendu de l'étirage en termes de déformation [%].

ε_f : déformation a la rupture [%].

Pente : pente correspondant a l'étirage a froid.T :

température [°C].

Tf : Température de fusion[°C].

Mv : Masse volumique [g/cm^3]

t_f : le temps de l'échec (time to failure) [h].

W1 : Wélastique [Joule].

W2 : Wassouplissement ; retour après le Maximum et avant étirage [Joule].

W3 : Wcold drawing [Joule].

W4 : Wplastique ou durcissement plastique ou orientation des chaines [Joule].

Introduction Générale

INTRODUCTION

Les polymères sont omniprésents dans notre environnement quotidien. Ils représentent une classe de matériaux de plus en plus importante. Ils concurrencent les matériaux traditionnels, métaux et matériaux minéraux, grâce à leur faible densité alliée à des propriétés thermomécaniques de plus en plus élaborées. Leurs propriétés, très spécifiques dans le cas des polymères fonctionnels, leur possibilité de recyclage, au moins en ce qui concerne les matières thermoplastiques les rendent de plus en plus utiles et économiques. Des statistiques récentes montrent que plus de 90% des systèmes de distribution de gaz nouvellement installés dans le monde entier sont exclusivement faits en polyéthylène (PE) en raison de son coût relativement faible, sa facilité d'installation et de sa durabilité à long terme vis-à-vis des dégradations dues aux effets de l'environnement, par rapport aux systèmes à base (anciens) de cuivre et d'acier [1-3].

Le polyéthylène (PE) est connu pour être l'un des plus simples, ce qui fait de lui un matériau modèle pour l'étude du comportement mécanique des polymères semi-cristallins. Par conséquent, il continue à faire l'objet de plusieurs recherches dédiées à des points particuliers concernant surtout de nouvelles applications. Plusieurs études ont permis de mettre au point de nombreux concepts sur la cristallisation du PE et sur son effet sur la microstructure finale (semi-cristallin). Les propriétés mécaniques macroscopiques ont été aussi largement étudiées, et souvent elles sont corrélées avec le taux de cristallinité et l'épaisseur des cristallites. Seulement, des zones d'ombres continuent d'exister toujours, surtout en ce qui concerne l'interaction entre les propriétés mécaniques et leur dégradation par les micro-organismes vivants telles les bactéries présentes à l'échelle locale ou par les agents agressifs environnants.

La durabilité des réseaux de conduites en polyéthylène de Haute Densité (HDPE) est un facteur important à prendre en compte dans l'estimation de la durée de vie. En effet, ils sont souvent exposés à des contraintes environnementales sévères (exposition aux UV, aux produits chimiques...) en plus de la pression du réseau, ce qui induit en général une modification de leur microstructure, de l'état physique, et même leur composition chimique. Tout l'enjeu repose alors sur une évaluation rationaliste de la durée de vie de ces structures, en considérant l'aspect "vieillesse" du matériau. Les difficultés associées à ce type de

prédiction sont difficiles à cause de la durée limitée dont dispose l'expérimentateur pour analyser les phénomènes mis en jeu.

Un problème majeur que l'on rencontre pour les pièces thermoplastiques concerne l'estimation de leur durée de vie. De nombreux travaux ont été menés pour prédire la durée de vie de structures sous le mode fluage, en fissuration lente, dans des environnements agressifs, etc... Dans ce contexte, des aspects relatifs à l'influence du procédé de mise en œuvre, des paramètres microstructuraux et des effets de l'environnement sur certaines propriétés mécaniques particulières du matériau ont été étudiés.

Ce travail fait suite au stage effectué dans l'entreprise TUBEX d'Oran qui se spécialise dans la fabrication de tubes en PE et PVC destinés au transport et à la distribution de différents fluides comme le gaz naturel et l'eau potable ou l'acheminement des eaux usées vers les stations de traitement et de conditionnement. Suite à la pandémie qui a sévi dans le pays, l'objectif de ce mémoire a été revu pour inclure seulement sous la forme de 3 chapitres successifs les objectifs suivants :

- a) Mettre au point une étude bibliographique sur la fabrication de tubes en HDPE
- b) Sur la base du contrôle qualité en usine, étudier l'effet de la vitesse de chargement sur le comportement contrainte-déformation (σ - ϵ) et analyser les propriétés mécaniques correspondantes
- c) Sur la base du contrôle qualité en usine, étudier l'effet de la température sur la pression d'éclatement du tube (durée de vie)

Dans le Chapitre I, nous passons en revue la bibliographie sur les matériaux polymères et en particulier le polyéthylène, ses classes et quelques-unes de ses propriétés. Ensuite, nous présentons le procédé industriel d'extrusion des tubes et les contrôles de qualité qui sont réalisés.

Dans le Chapitre II, l'essai de traction, accompli en usine sur des éprouvettes longitudinales issues du tube, est présenté. Ce même essai a été conduit sous différentes vitesses de chargement pour étudier l'effet de paramètre sur les propriétés mesurées.

Dans le Chapitre III, un autre essai en relation avec la résistance mécanique des tubes en HDPE est analysé, il s'agit du test d'éclatement sous pression à température contrôlée (Burst Test).

Le mémoire est clôturé par une conclusion générale.

Chapitre I :

**ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES
POLYMERES UTILISES POUR LA FABRICATION
DE TUBES HDPE : CONTROLE DE LA QUALITE
EN USINE ET DUREE DE VIE**

I.1 Généralités sur les polymères

I.1.1 Les polymères

Les polymères sont constitués d'un grand nombre d'unités fondamentales, appelées monomères. Ce sont des molécules organiques dont le noyau est essentiellement constitué d'atomes de carbone et d'hydrogène. Les formes de polymères sont bien exprimées avec les éléments naturels tels que le latex, le bois ou le coton. Mais la plus grande partie reste les polymères obtenus par synthèse chimique à partir des gaz issus des charbons ou des hydrocarbures gazeux. Les polymères sont donc des substances organiques macromoléculaires obtenues par l'assemblage des monomères de base suivant des réactions de polymérisation [1].

I.1.2 Classes de polymères

Les polymères sont divisés à sa fonction de leurs propriétés en trois classes. Le point de vue thermique conduit au classement des matériaux polymères organiques en matériaux thermoplastiques et matériaux thermodurcissables. Le point de vue mécanique introduit les notions de solides viscoélastiques et d'élastomères. Il est possible aussi d'examiner le matériau en s'intéressant à sa structure physique ou à sa structure chimique ; dans premier cas, les notions de matériaux semi-cristallins et de matériaux amorphes introduites ; dans le second, c'est la structure moléculaire en chaîne qui est à prendre en considération [2-4].

I.1.2.1 Comportements thermiques des polymères

Les propriétés mécaniques des polymères dépendent largement de la température. Aux basses températures, la plupart des polymères prennent un état vitreux : ils sont rigides. Lorsque la température augmente, elles passent par un état de transition : dans une certaine plage de température du polymère, les chaînes macromoléculaires glissent les unes par rapport aux autres et le polymère se ramollit.

Cette plage de température est appelée température de transition vitreuse et est exprimée en Tg. À des températures plus élevées, le polymère passe à travers la plate-forme en caoutchouc : son comportement est viscoélastique. Dans cet état, la force de van der Waals et les liaisons transversales entre les chaînes agissent comme une force de rappel lorsque le matériau est déformé.

Enfin, lorsque la température des polymères mal réticulés est élevée, une phase d'écoulement visqueux peut se produire, correspondant au désenchevêtrement des chaînes. Ce dernier comportement est utilisé pour façonner les plastiques. Certains polymères ont également un point de fusion supérieur à T_v .

Les polymères étant utilisés la plupart du temps à température ambiante, si leur température de transition vitreuse est inférieure à la température ambiante (propriétés du caoutchouc), ils sont appelés élastomères. Dans l'autre cas, ce sont des corps plastiques (comportement rigide). La nature du polymère, le poids moléculaire moyen, le degré de polymérisation et la structure affectent fortement la largeur de ces différentes régions et leurs seuils d'apparition dans le temps où la température [24].

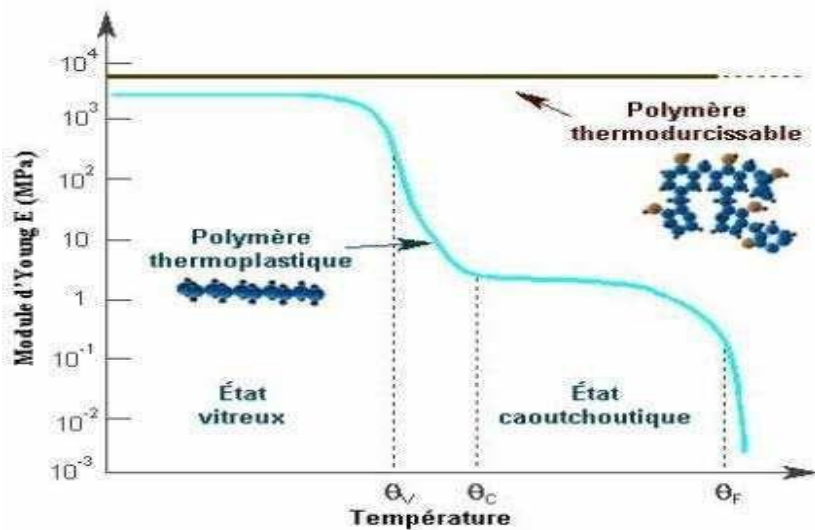


Figure I.1 Variation du module de Young d'un polymère, en fonction de la température.

I.1.2.2 Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques décrivent leur comportement vis-à-vis des sollicitations mécaniques (comme la pression, la tension, la torsion, le frottement, l'impact et les effets de la gravité). En d'autres termes, est-ce que la structure et la forme du polymère peuvent-elles être stables dans le temps même si elles sont soumises à des contraintes externes comme la température ? Certains polymères sont appréciés pour leur bonne stabilité dimensionnelle (par exemple les polyesters aromatiques). Les élastomères offriront d'excellentes capacités d'absorption des chocs, de sorte que d'autres élastomères seront recherchés [25].

La perte de linéarité entraîne une contrainte de seuil et une déformation de type viscoélastique. Ce seuil est suffisamment bas pour la plupart des polymères, mais pour certains polymères, une telle limite élastique n'existe pas. Cette situation est un polymère fragile dont l'échantillon casse dans la phase viscoélastique, ou un élastomère, qui se caractérise par son comportement superplastique.

Dans le domaine viscoélastique, associé à une déformation de l'ordre de 5% la recouvrance de la déformation à contrainte nulle est totale. Au-delà de ce niveau de déformation, le matériau ne sera plus entièrement recyclable. Il existe un composant irréversible, que l'on peut qualifier de plastique ou plus précisément de viscoplastique. Lorsque la limite d'élasticité se produit, quelques pour cent de la déformation se produisent généralement et cela se produit :

- Soit sous la forme d'un maximum local de la courbe représentant l'évolution de la contrainte vraie en fonction de la déformation vraie ;
- Soit sous la forme d'un brusque changement de sa pente [25].

I.1.3 Polyéthylène

Le matériau utilisé pour la fabrication des tubes principalement le polyéthylène à moyenne et haute densité (PEMD et HDPE). Le taux de cristallinité compris entre 40 et 80% pour cette polymère semi-cristallin [5], (Tableau I.1) qui représente les différentes désignations en fonction de sa résistance minimale aux contraintes circonférentielles (MSC) à 20°C pendant 50 ans [Norme ISO 4437].

Tableau I.1 Classification et désignation des différentes résines de HDPE [Norme EN 12201-1].

Désignation	CCM (MPa)
PE 32	3,2
PE 40	4
PE 63	6,3
PE 80	8
PE100	10

I.1.4 Caractéristiques générales des polyéthylènes

Les caractéristiques utilisées en contrôle de la qualité du polyéthylène sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau I.2 Caractéristiques majeures des différentes familles des Polyéthylènes [26].

Type de PE	Masse volumique (g/cm ³)	Taux de cristallinité (%)	T° de fusion (°C)	T° de transition Vitreuse (°C)	Module de Young (MPa)
PEBD	0,915 - 0,935	41 - 58	95 - 117	-133 à -103	120 – 135
PEMD	0,930 - 0,945	55 - 65	125 -130	-	350 - 800
HDPE	0,945 - 0,970	65 - 80	130 - 138	-120	800 - 1300

I.1.5 Processus de fabrication des tubes en PE

La technique de mise en œuvre de produits longs (de section droite constante), tels que les branchements en polyéthylène, repose sur le procédé d'extrusion. Le principe est de fondre et plastifier des granulés de PE au moyen d'une trémie d'alimentation dans un cylindre chauffé à l'intérieur duquel ils sont chauffés et fondus puis poussés par une vis d'Archimède de façon continue vers la filière qui donnera la forme finale du tube. L'ensemble trémie, cylindre, vis et filière constitue l'extrudeuse [21].

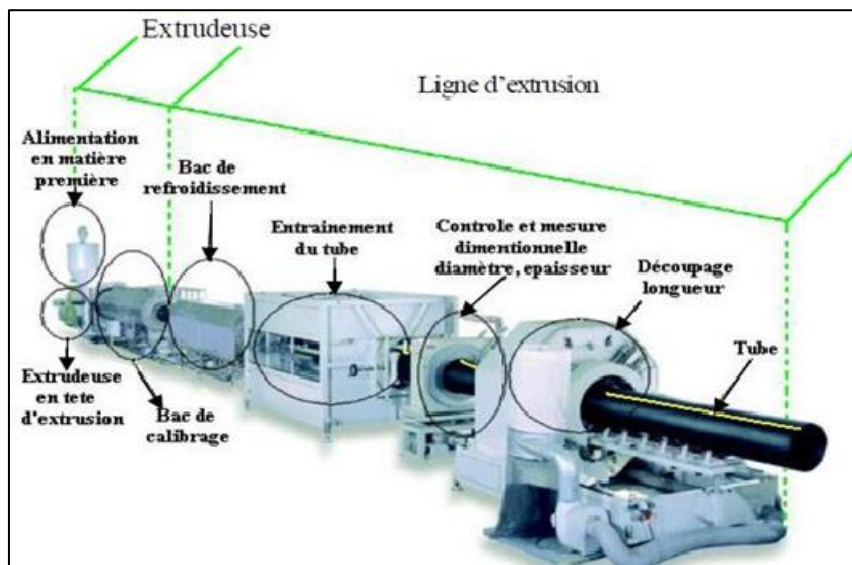


Figure I.2 Les différentes parties d'une ligne d'extrusion des tubes en PE.

A la sortie du moule, le tube subit un étirement isotherme à l'air libre, provoquant l'orientation et l'organisation des chaînes moléculaires le long de l'axe d'étirage. Ce changement de morphologie du cristal PE conduit à des propriétés mécaniques différentes dans le sens d'extrusion et le sens vertical (plus améliorée dans le sens d'étirage) [22].

Le tube est ensuite refroidi en le faisant passer d'abord dans une cuve d'étalonnage où son diamètre est ajusté à une dimension donnée, puis dans une série de cuves à eau pour un refroidissement supplémentaire. Le changement brusque de température auquel le PE a été soumis pendant la trempe entraîne la création d'un gradient de température dans la paroi du tube [23]. A la fin de la ligne d'extrusion, le tube est découpé à la longueur désirée à l'aide d'une scie circulaire suiveuse.

I.1.6 Tubes en polyéthylène

I.1.6.1 Structure du PE de tubes

Le polyéthylène PE a commencé à être utilisé dans les systèmes de conduites sous pression au début des années 1950 [6]. Il s'agit du polyéthylène basse densité (PEBD), proposé pour les conduites d'eau de petit diamètre et à basse pression.

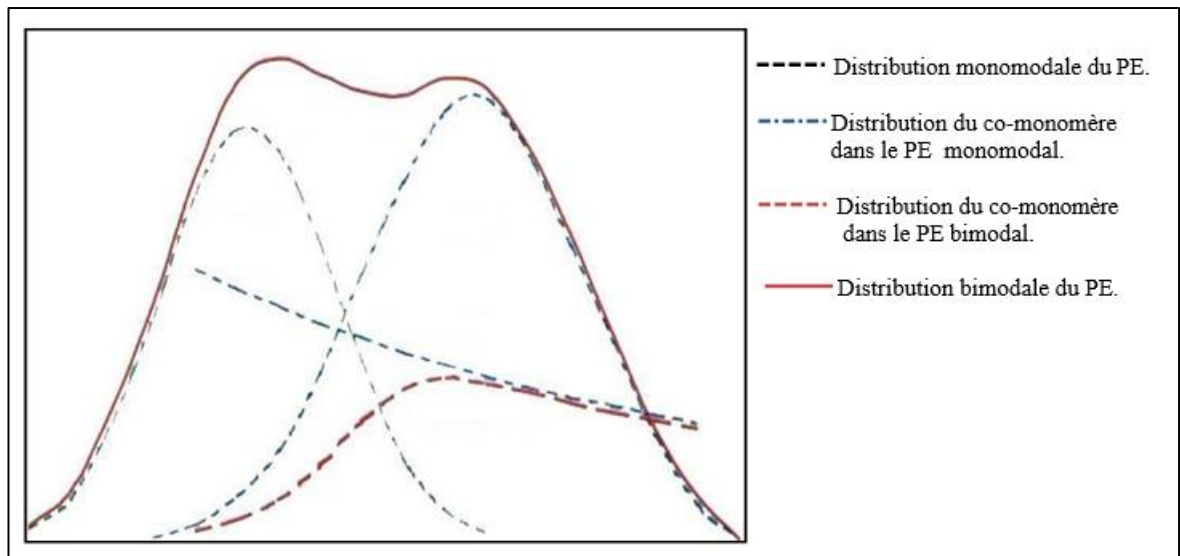


Figure I.3 Distribution bimodale des masses moléculaires (Cazenave, 2005) [7].

Une dizaine d'années plus tard, le polyéthylène haute densité (HDPE) a été introduit dans la fabrication des tubes de grand diamètre. Au début des années 1990, un nouveau type de PE plus efficace, appelé HDPE bimodal, a été introduit dans la production de tubes de gaz. Son nom fait référence à la distribution bimodale des poids moléculaires (Figure I.3) utilisant les nouveaux procédés de fabrication de PE.

I.1.7 Avantages et inconvénients

Le Tableau I.3 montre les avantages et inconvénients du matériau polyéthylène [27].

Tableau I.3 Permis les avantages et inconvénients d'un polyéthylène.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">Mise en œuvre aisée	<ul style="list-style-type: none">Sensibilité aux UV en présence d'oxygène
<ul style="list-style-type: none">Très bonne résistance aux chocs	<ul style="list-style-type: none">Sensibilité à la fissure sous contrainte (ESC)
<ul style="list-style-type: none">Qualité alimentaire	<ul style="list-style-type: none">Sensibilité à la $T^{\circ} > 40-45^{\circ}\text{C}$
<ul style="list-style-type: none">Excellentes propriétés d'isolation électrique	<ul style="list-style-type: none">Collage difficile et retrait important
<ul style="list-style-type: none">Grande inertie chimique	<ul style="list-style-type: none">Mauvaise tenue à la chaleur

I.1.8 Propriétés du tube en PE

Le PE doit son développement à l'amélioration de ses propriétés mécaniques, c'est-à-dire la résistance à la pression hydrostatique à long terme (ou MRS), la résistance à la croissance lente des fissures (SCG) et la résistance à la propagation rapide des fissures (RCP). Ces caractéristiques sont fortement influencées par le type de co-monomère, la densité, le poids moléculaire et la distribution du poids moléculaire. Un meilleur contrôle de ces paramètres permet d'adapter de meilleures propriétés.

Une densité (ou taux de cristallinité) élevée assure une bonne rigidité (bonne résistance ductile à la rupture sous pression interne). Alors qu'un poids moléculaire élevé garantit une bonne ténacité. Ces deux paramètres permettent au tube de résister à des pressions plus élevées.

Cependant, une longue ramification et une large distribution de poids moléculaire de type bimodal augmentent le degré d'enchevêtrement et le nombre de molécules de liaison dans la partie amorphe assurant une meilleure liaison entre les lamelles cristallines (figure I.2) et, par conséquent, une bonne résistance à la rupture due aux phénomènes de fissuration sous contrainte [8-9-10-11-12-13].

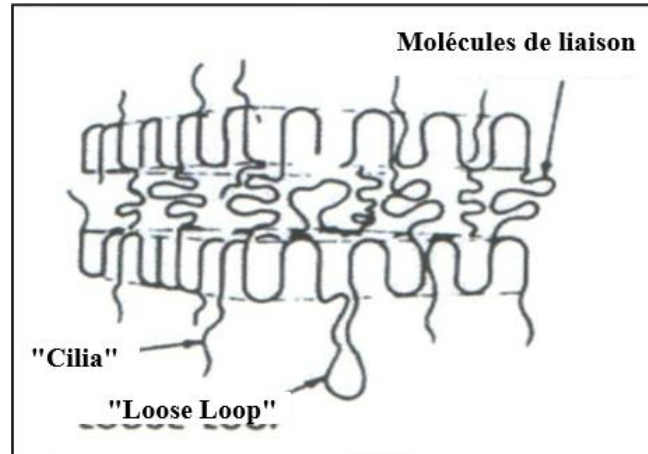


Figure I.4 Représentation schématique de la structure semi-cristalline du PE [7].

L'amélioration des propriétés du PE d'une génération à l'autre est bien documentée dans (figure I.3) et a permis d'augmenter la durée de vie des tubes jusqu'à 100 ans.

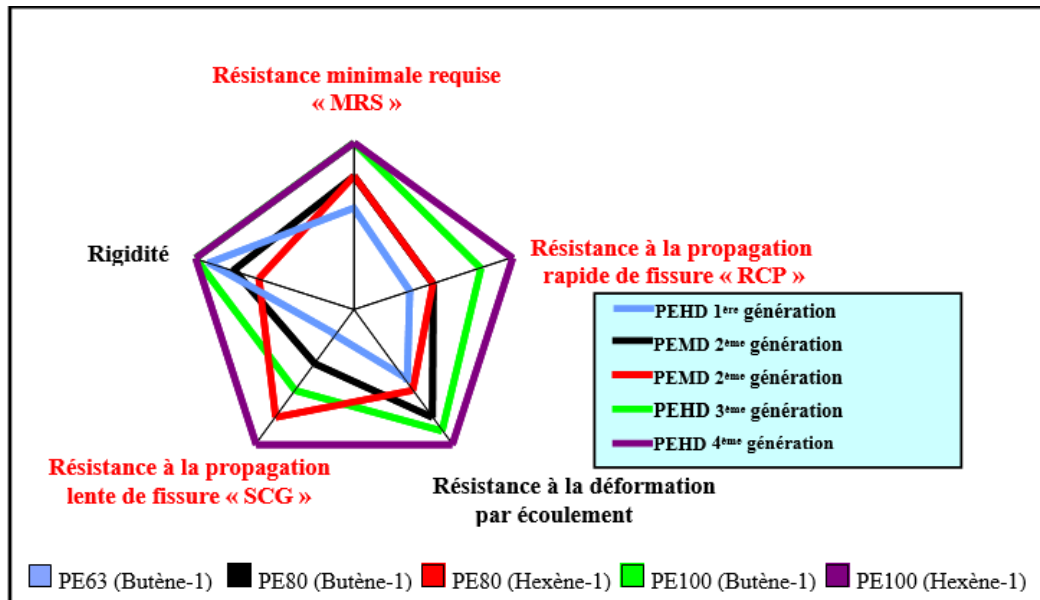


Figure I.5 Représentation schématique du développement des propriétés du tube en PE [8].

I.1.9 Rupture des tubes en PE

En fonction de l'intensité de la contrainte mécanique appliquée, le tube PE se brise de deux manières différentes [14] :

- Sous l'effet de faibles contraintes de traction, inférieures à la résistance mécanique du PE à court terme, les molécules de liaison se démêlent et se détendent à long terme où elles seront démêlées laissant derrière elles une partie qui ne pourrait pas résister à la contrainte appliquée conduisant à une rupture de type fragile dans la zone inter lamellaire amorphe (figure I.4).
- En cas de forte contrainte, lorsque la rupture est de type ductile, les liaisons secondaires de la phase amorphe sont étirées et orientées et la zone cristalline se détend. Lorsque les contraintes deviennent trop élevées (au-delà du seuil d'écoulement), les macromolécules de la phase cristalline se séparent en petits segments (figure I.5).

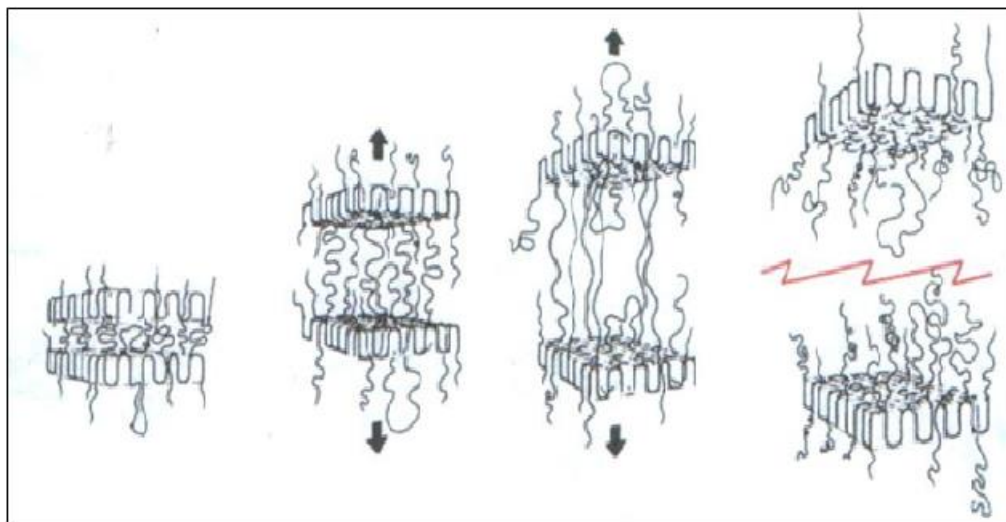


Figure I.6 Fissuration sous faible contrainte à l'échelle moléculaire à l'origine d'une rupture de type fragile.

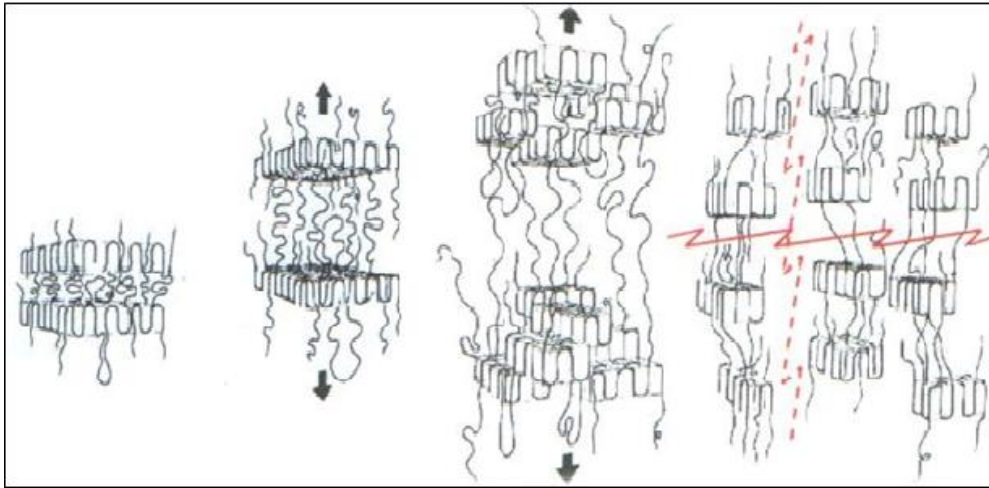


Figure I.7 Fissuration sous contrainte élevée à l'échelle moléculaire à l'origine d'une rupture de type ductile.

I.1.10 La durée vie des tubes en PE

Les mécanismes de rupture des tubes en PE, sous l'effet de la pression interne, sont divisés en trois parties ou régions caractéristiques A, B et C (figure I.6). Dans la région A (la région de forte contrainte), la rupture se produit avec une déformation importante (rupture ductile) provoquant le gonflement du tube, puis son éclatement sous la forme d'un bec de perroquet. Elle est due au développement rapide de microfissures perpendiculaires à l'axe du tube sous l'effet de la pression interne [15].

Dans la région B (la région de faible contrainte), la fracture est produite par l'initiation et la propagation lente de microfissures produisant une fissure plane parallèle à l'axe du tube sans déformation visible (fracture fragile). Le point de transition de la fracture ductile-fragile (le genou) détermine la durée de vie d'un tube à une température donnée [16].

Dans la région C, presque indépendamment du niveau de stress, la rupture fragile résulte de la dégradation thermo-oxydante du matériau du tube, elle peut se produire après une consommation chimique ou une perte physique d'antioxydants [17].

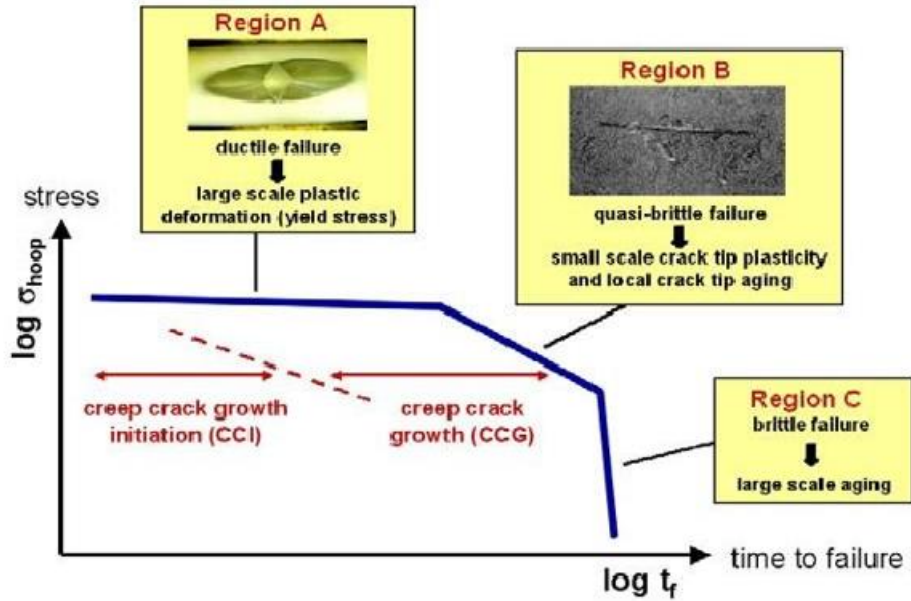


Figure I.8 Illustration schématique des mécanismes de la rupture des tubes en PE sous pression.

Ainsi, le graphique représentant le logarithme de la contrainte circonférentielle (σ_{hoop} , hoop stress) en fonction du logarithme du temps de rupture, est généralement utilisé pour prédire la durée de vie du PE à température ambiante (20°C) à dont la formation du genou prend beaucoup de temps (impossible à reproduire en laboratoire), ce qui a nécessité l'utilisation d'une méthode d'extrapolation, dans des conditions accélérées [18], décrite dans la norme ISO 9080 (2003).



Sur la base des résultats des mesures TIO (OIT), a constaté que la perte totale d'antioxydants phénoliques et phosphites est attendue après 35 ans d'exposition des tubes PE100 dans l'eau à la température de service de 25°C, alors que la durée de vie a été estimée à 85 ans [19].

Étant donné que les tubes en PE des premières générations sont encore utilisés aujourd'hui, certains auteurs se sont efforcés d'étudier leur état et de prévoir leur durée de vie restante après de longues périodes d'utilisation. À titre d'exemple, les tubes en PE 80 (PE de la deuxième génération) utilisés depuis 30 ans dans le secteur du gaz sont en bon état et peuvent durer plus de 50 ans. Alors que la durée de vie restante des tubes, basée sur le PE de la même génération [20].

I.1.11 Produits fabriqués par l'entreprise TUBEX :

TUBEX porte un intérêt particulier à l'écoute et à la satisfaction de ses clients. Pour les garantir, TUBEX a mis en point un système management de qualité, ce qui lui a valu sa certification ISO 9001. En plus d'une qualité et d'une pureté irréprochable de la matière première utilisée, TUBEX est dotée d'équipements de production de dernière génération. Des échantillons de produits sont présentés dans la Tableau I.4.

Tableau I.4 : Produits principale fabriqués par l'entreprise TUBEX.

	
Tube HDPE d'adduction d'eau selon la norme EN12201.	Tubes en PVC d'assainissement selon la norme EN ISO 1452.

- Approvisionnement en eau potable : Tube en HDPE de couleur noire avec bande bleue pour l'approvisionnement en eau potable.
- Distribution de gaz : les tubes en HDPE de couleur noire avec bande jaune sont utilisés dans les réseaux de distribution de gaz et pour le raccordement des maisons.
- Protection des câbles de télécommunication en PVC : tubes compacts en PVC pour la protection des lignes souterraines de télécommunication, d'alarme et de télésurveillance.
- Protection des câbles électriques : Gaine en PE avec bande rouge pour la protection des câbles électriques enterrés (basse et haute tension).
- Élimination par pression du PVC : tubes compacts en PVC sous pression avec joint.

Chapitre II :

**ETUDE DE L'EFFET DE LA VITESSE DE
CHARGEMENT SUR LES PROPRIETES
MECANIQUES DANS LA DIRECTION
LONGITUDINALE DU TUBE HDPE**

II.1 Introduction

Les propriétés mécaniques des matériaux polymères sont souvent obtenues par un essai de traction uni-axial à une vitesse de déformation ou un mouvement constant de la traverse. Ceci reste similaire à ce qui est pratiqué pour les autres matériaux tels que les métaux. Le comportement à la déformation et la forme de la courbe contrainte-déformation des matériaux polymères pendant l'essai de traction sont importants pour la conception technique. Les propriétés mécaniques et les mécanismes de déformation de ces matériaux dépendent fortement de divers paramètres tels que : Les types de matériaux polymères (PVC, PE, PP...), les caractéristiques moléculaires (chaîne linéaire, molécule ramifiée, réseau réticulé et orientation moléculaire), les microstructures (polymère amorphe et semi-cristallin), la vitesse de déformation, la température ambiante et la configuration de l'échantillon de traction. Ces paramètres sont essentiels dans les considérations de conception et aident le concepteur à disposer de données fiables pertinentes pour les applications pratiques qui peuvent être prises en compte [28].

II.2 Essais mécaniques standards sur les tubes en HDPE

Comprendre les propriétés du matériau est essentiel pour l'utiliser correctement. Certaines caractéristiques peuvent être déterminées par des essais mécaniques, notamment : flexion, compression, fluage, cisaillement, torsion et traction comme montré dans la figure II.1 [26].

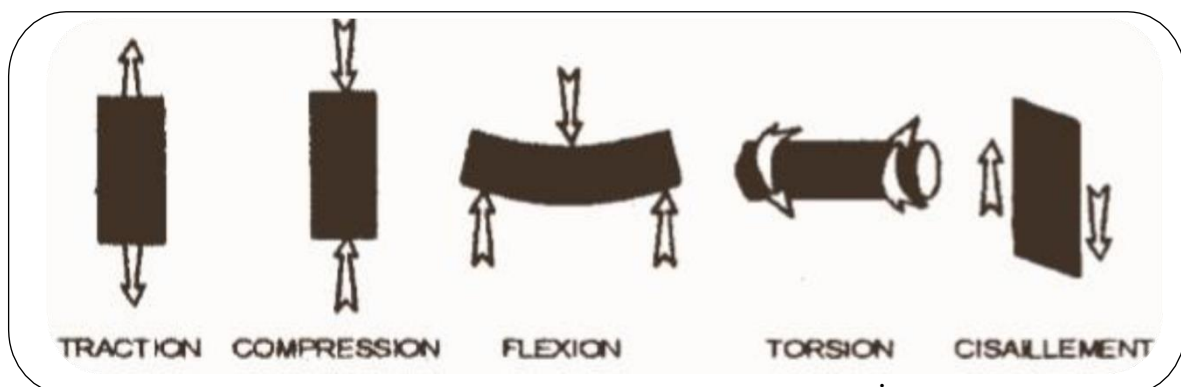


Figure II.1 Différents essais mécaniques.

II.2.1 Essai de traction

L'essai de traction uni-axiale est le test mécanique le plus couramment utilisé. Il s'agit d'appliquer une traction sur un échantillon du matériau à étudier et de mesurer son allongement, qui est fonction de la contrainte à laquelle le matériau est soumis [41].

II.2.2 Description de la machine de traction

Nos expériences (essais mécaniques) ont été effectuées sur une machine conçue pour les polymères « ATSFAR TCS 1000 » conforme à l'ISO 5893. Elle est pilotée par ordinateur et est équipée du logiciel Exet-TCS. Le logiciel correspondant assure le traitement des valeurs mesurées et le contrôle du déroulement des essais (Figure II.2).



Figure II.2 Machine ATSFAR TCS 1000 de traction.

La machine d'essai contient les éléments suivants, Voir Figure II.3 :

- **Mors** : pour tenir les éprouvettes, devant être fixés à la machine de telle sorte que l'axe principal de ces éprouvettes coïncide avec la direction de l'effort dans la ligne centrale de l'ensemble.

- **Indicateur de force** : devant comporter un mécanisme capable d'indiquer la force de traction totale supportée par l'éprouvette maintenue dans les mors.
- **Extensomètre** : convenable pour la détermination de la longueur entre repères de l'éprouvette à tout moment de l'essai. La mesure de l'allongement de l'éprouvette à partir du mouvement des mors manque de précision et doit être évitée dans la mesure du possible [42].

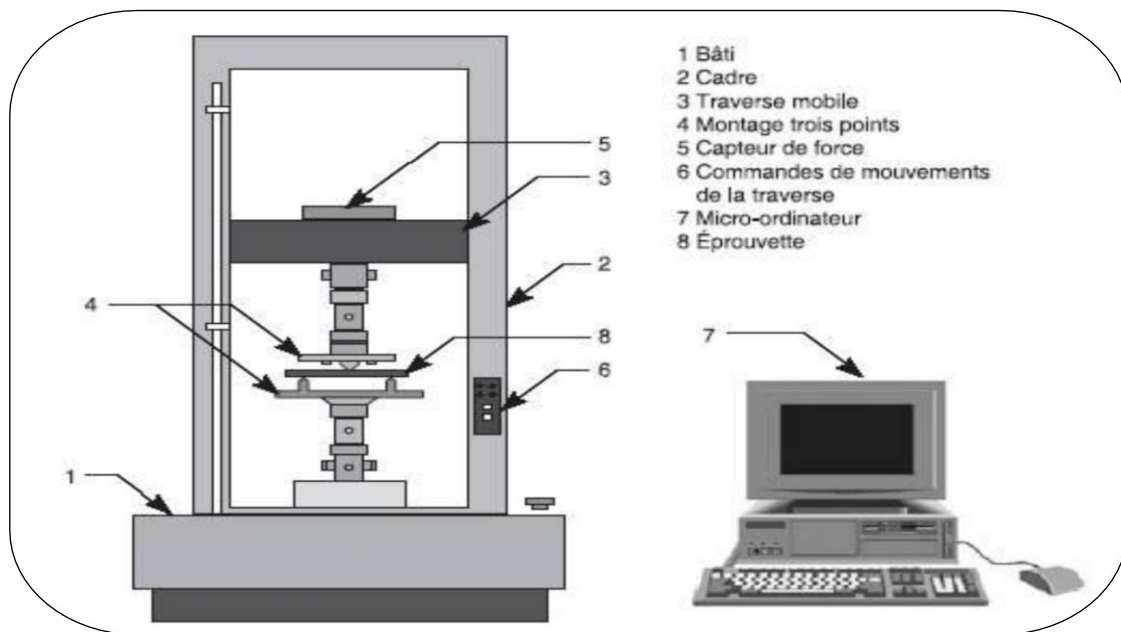


Figure II.3 Schéma descriptive de machine de traction.

II.2.3 Essai de traction d'un polymère semi-cristallin

L'une des caractéristiques les plus notables des thermoplastiques semi-cristallins (dans le cas du HDPE) est leur capacité à subir de grandes déformations plastiques avant la rupture à température ambiante. Ce phénomène est en partie dû à leur température de transition vitreuse (-125°C pour le HDPE) bien inférieure à la température ambiante.

Pour les semi-cristallins, la déformation plastique se produit de manière macroscopique et non uniforme dans un essai de traction uni-axial. Ce phénomène de déformation plastique est appelé striction ou instabilité plastique [41].

La figure II.4 Montre la forme typique de la courbe contrainte-déformation nominale sous tension uni-axiale et l'évolution du profil de l'éprouvette lorsqu'elle est étirée à un allongement constant [43].

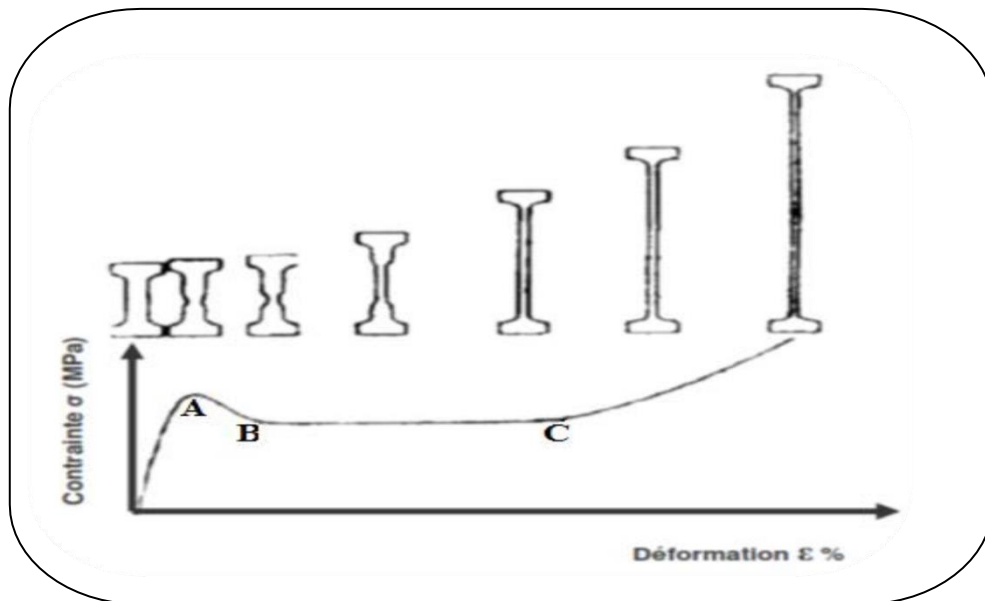


Figure II.4 Courbe contrainte-déformation d'un polymère semi-cristallin en traction uniaxiale étirée à vitesse d'allongement constante.

A partir de cette courbe, on peut décrire les différents types de déformations :

- De 0 à A il s'agit de la déformation élastique réversible du matériau due à la phase amorphe, du fait que le module de cette phase est beaucoup plus faible que celui de phase cristalline [43-44]. La courbe initialement linéaire, fait apparaître une certaine non linéarité juste avant le point A, par suite des effets viscoélastiques [43-45].
- Au point A débuté la striction qui correspond à une déformation hétérogène du matériau qui s'amorce sur un défaut au niveau de l'éprouvette (des défauts structuraux tels que des dislocations).
- De A à B la striction se forme jusqu'à stabilisation.
- De B à C la striction se propage le long de l'échantillon jusqu'au taux naturel de déformation.
- Au-delà de C, la déformation redevient homogène grâce à un durcissement structural lié à l'orientation des chaînes macromoléculaires dans le sens de l'étirage et l'augmentation de la fraction fibrillaire du matériau [43-45].

Ces différentes étapes peuvent être représentées comme suite

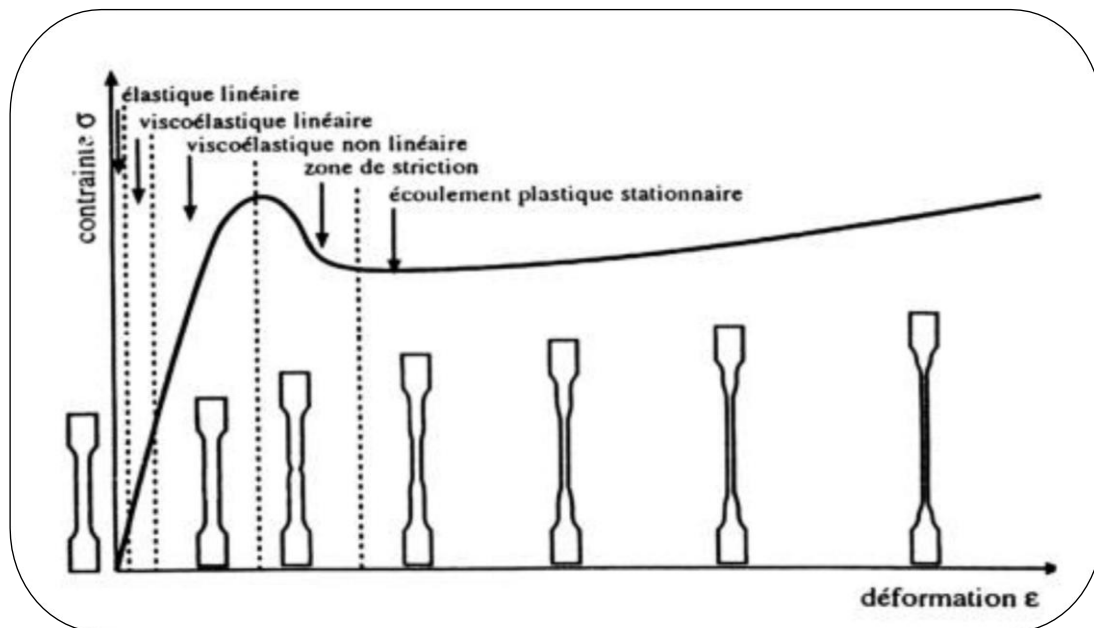


Figure II.5 Différentes zones de traction uni-axiale d'un thermoplastique Semi-Cristallin avec la représentation schématique de l'éprouvette d'essai.

II.2.4 Effet de la vitesse de la traverse

La détermination de l'effet de la vitesse de la traverse sur les paramètres de résistance dans certains cas lorsque la vitesse augmente [29-30]. Cette tendance est observée [31]. De nombreux chercheurs ont étudié la corrélation entre le taux de déformation, le comportement à la rupture et les propriétés mécaniques des matériaux des tubes en HDPE dans différentes conditions de fonctionnement [32-33]. Ses collaborateurs [34] ont examiné l'applicabilité de la ténacité à la rupture par déformation plane des tubes en plastique (PVC et PE) dans deux orientations (longitudinale et transversale) à différentes vitesses de tête transversale ($VC_H = 5-500$ mm/min). Il a été prouvé que la ténacité à la rupture change considérablement avec la vitesse de chargement, les conditions de recuit et l'orientation de l'échantillon.

La vitesse de la traverse a varié de 0,005 à 500 mm/min à différentes températures de fonctionnement : 23, 38, 50, 85 et 110 °C. Les résultats ont montré que le mode de défaillance passe d'une rupture fragile à une rupture ductile en fonction de la vitesse de la traverse à une température d'essai constante spécifique.

Gensler et al. [35] ont étudié le comportement de fracture du polypropylène isotactique et de l'impact modifié polypropylène isotactique à des vitesses d'essai de 0,1 mm/s à 14 m/s, en utilisant des échantillons de tension compacte (CT).

Les résultats ont révélé que le comportement de déformation indique une transition ductile-fragile à mesure que la vitesse de l'essai augmente. Roberts et al, ont présenté une étude visant à appliquer la technique d'essai de résistance à la rupture par déformation plane sur le tube fabriqué à partir de matériau de tube HDPE. Dans leur travail expérimental, ils utilisent un spécimen de coude à trois points (TPB). Une analyse paramétrique variation-elle a été menée dans laquelle plusieurs conditions de fonctionnement ont été variées, telles que la forme de l'encoche, la racine de l'encoche, l'épaisseur de l'échantillon, la température d'essai et la vitesse de déformation. L'analyse variation-elle expérimentale a montré qu'à des températures plus élevées et des taux de déformation plus faibles, la fracture est ductile.

En revanche, à des températures plus basses et à des taux de déformation plus élevés, la fracture est cassante. Chan et Williams [36] ont utilisé la technique de la courbe de résistance à échantillons multiples comme méthode de base.

Les résultats montrent que la température de refroidissement a un effet significatif sur les paramètres de ténacité à la rupture. Les éprouvettes d'essai de rupture sont fabriquées à la fois en coupe directe des parois du tube et à partir de plaques plates. Les éprouvettes de pliage en trois points CTPB (coupés directement de la paroi du tube) sont préparées directement à partir de la paroi du tube. Diverses éprouvettes de géométrie ont été produites à partir de la paroi du tube.

Les résultats ont révélé que le comportement de la ténacité à la rupture est considérablement affecté par la température et la vitesse de déformation. La ténacité à la rupture diminue avec l'augmentation du taux de déformation et la diminution de la température sur tous les échantillons configurés. Il a été prouvé que les échantillons de CTPB ont une plus grande résistance à la rupture que les autres échantillons configurés.

Plusieurs recherches expérimentales ont utilisé la vitesse de déformation comme paramètre de caractérisation pour quantifier ce comportement. Popelar [37] a étudié l'effet de la vitesse de déformation sur les propriétés mécaniques de deux matériaux de tubes de gaz en polyéthylène, appelés PE2306IX et PE3408IV, à différentes températures ambiantes. Les essais de traction ont été réalisés dans une plage de températures (23 à 77°C) et de taux de

déformation (10^{-5} à 10^{-1} /s) pour les deux matériaux des tubes de gaz en polyéthylène. Les résultats montrent que la limite d'élasticité diminue avec la diminution des taux de déformation. De plus, la limite d'élasticité diminue lorsque la température augmente.

Tang et ses collègues[38-39] ont étudié l'effet de la vitesse de la traverse (0,01 à 500 mm/min) et de la température (25 à 150°C) sur les propriétés mécaniques de deux types de polymères (HDPE et PP). Les essais de traction ont été réalisés sur des éprouvettes en forme d'haltère découpées dans les feuilles au moyen d'un poinçon creux approprié. Les résultats ont révélé que la limite d'élasticité augmente avec la vitesse de la traverse jusqu'à une vitesse de 100 mm/min et diminue ensuite avec la vitesse de la traverse à des vitesses plus élevées.

Dusunceli et Cloak [40] ont étudié l'influence des techniques de fabrication sur le comportement mécanique du HDPE. Les éprouvettes sont extraites de tubes extrudés en HDPE et de feuilles moulées par compression à trois taux de déformation différents ($1e-3$, $1e-4$, et $1e-5$ /s) à température ambiante. Les échantillons extrudés et moulés par compression sont produits à partir des mêmes matières premières. Les résultats des essais de traction ont révélé que l'augmentation de la vitesse de déformation augmente les propriétés mécaniques des deux échantillons. Cependant, la contrainte maximale, la limite d'élasticité et le module d'élasticité des éprouvettes extrudées sont beaucoup plus élevés que ceux des éprouvettes moulées par compression. Cela peut être dû au fait que les différentes méthodes de fabrication entraînent des morphologies et des structures moléculaires différentes au niveau du produit final.

II.3 Conditions expérimentales

II.3.1 Préparation des éprouvettes d'essai

Les éprouvettes doivent être prélevées de telle manière qu'elles soient régulièrement réparties autour du tube (ISO6259-1, 2015). Elles sont découpées parallèlement à l'axe des tubes à l'aide d'une scie électrique (Figure II : 6).

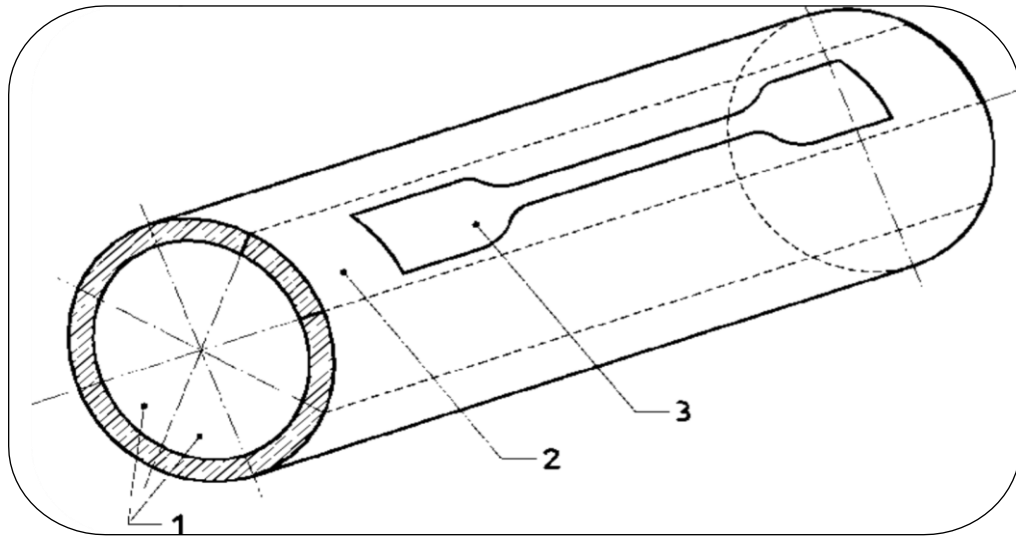


Figure II.6 Découpage des éprouvettes.

Selon la norme (ISO6259-1, 2015), le choix de l'éprouvette dépend de l'épaisseur du tube dans lequel elle est prélevée. Donc les éprouvettes doivent être de **type 1**, de forme et de dimensions indiquées.

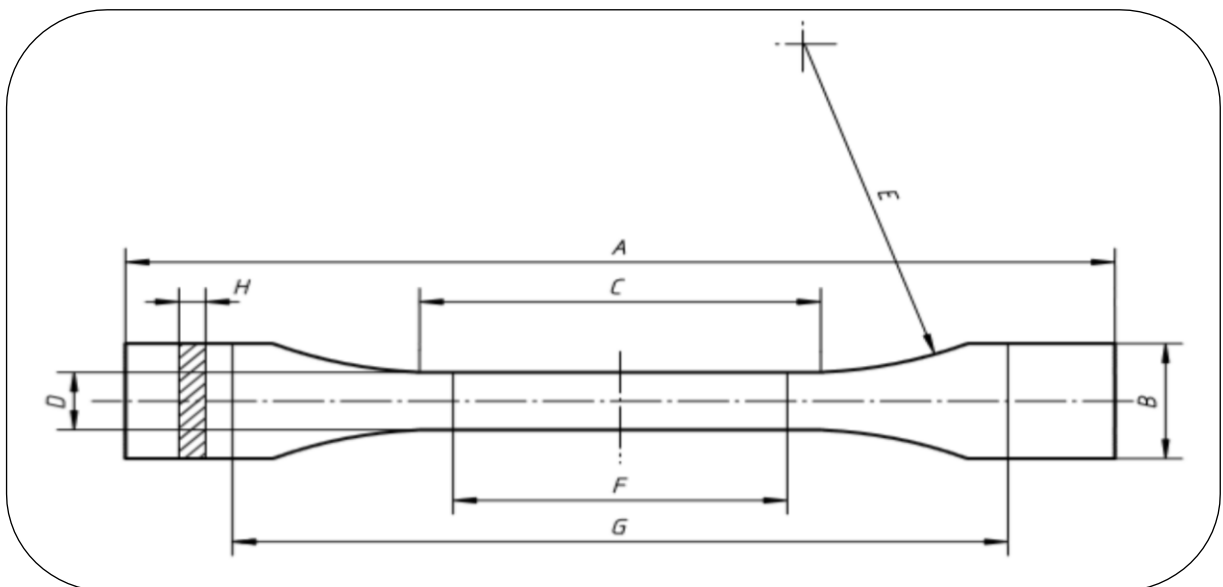


Figure II.7 Schéma d'un éprouvette (Type 1) de l'essai de la traction.

Tableau II.1 Profil des éprouvettes (Type I) de l'essai de traction.

Symbole	Description	Dimensions mm
<i>A</i>	Longueur totale minimale	150
<i>B</i>	Largeur aux extrémités	$20 \pm 0,2$
<i>C</i>	Longueur de la partie calibrée	$60 \pm 0,5$
<i>D</i>	Largeur de la partie calibrée	$10 \pm 0,2$
<i>E</i>	Rayon	60
<i>F</i>	Longueur entre repères	$50 \pm 0,5$
<i>G</i>	Distance initiale entre les mors	$115 \pm 0,5$
<i>H</i>	Épaisseur	Celle du tube

Le centre d'usinage (Figure II.8) est de type HURON à trois axes a permis de réaliser le profil de l'éprouvette dans le plan (x, y). Le régime de coupe est choisi de façon à réduire les échauffements des éprouvettes.

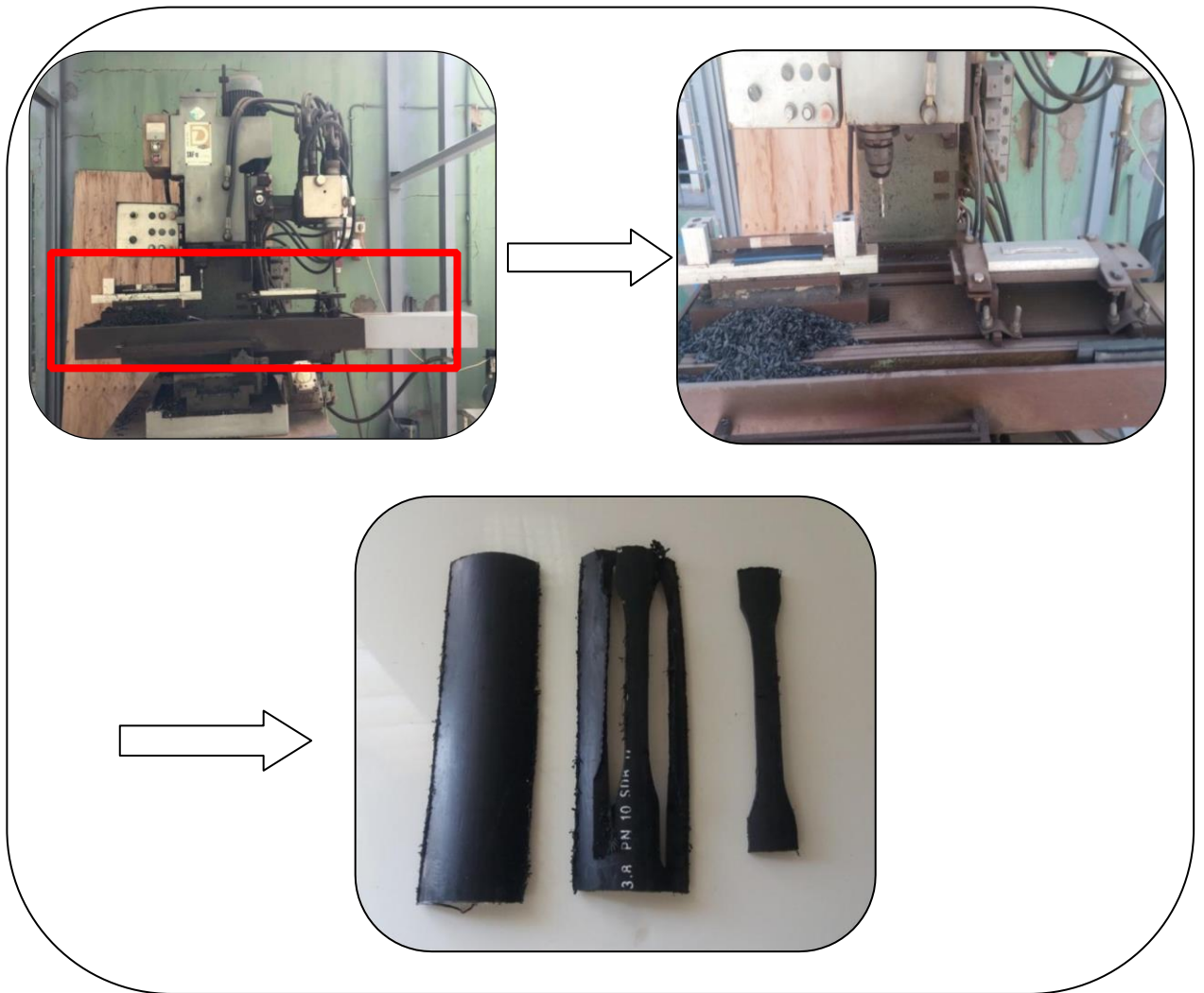


Figure II.8 Appareil de fraisage avec + exemple d'une éprouvette.

Matériels utilisés :

- Un micromètre (pour mesurer les épaisseurs).
- La machine de traction + Ordinateur.

Etapes d'essai :

Les étapes du test sont les suivantes :

- Placer l'éprouvette dans la machine d'essai (Figure II.9).



Figure II.9 Epreuve d'essai mise en place dans la machine de traction

- Puis en va introduire les données et les conditions (la vitesse de déformation d'essai).
- Les dimensions de l'éprouvette
- Après on va click sur démarre et la courbe s'affiche progressivement sur l'écran.

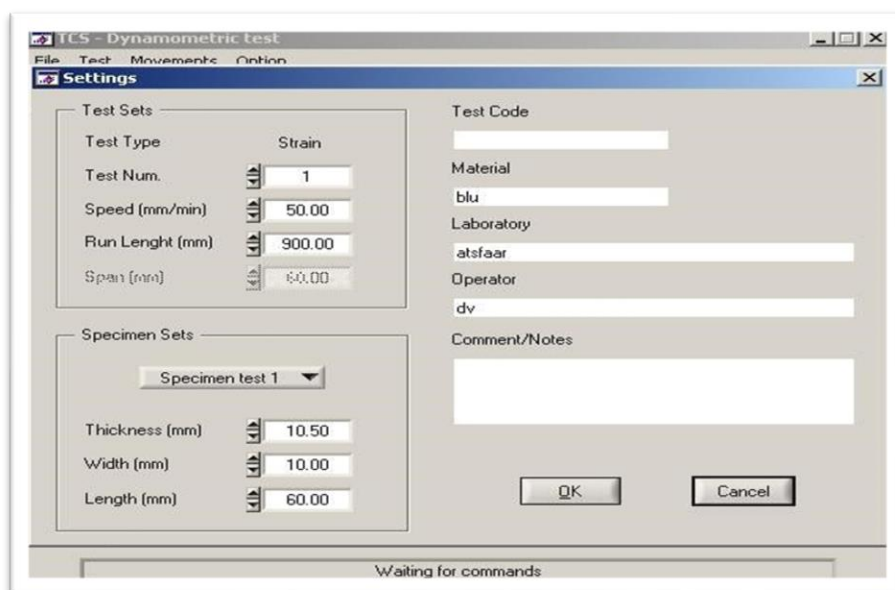


Figure II.10 Fenêtre d'insertion des paramètres.

II.3.2 Effet de la vitesse lors d'essai de traction

La vitesse de la traverse est le premier paramètre qui régit les taux de déformation. On autre, la température à laquelle la déformation du matériau se produit constitue un deuxième critère déterminant dans le comportement du matériau. Par conséquent, l'étude du

comportement de la déformation doit être effectuée à différentes vitesses de la traverse. Plusieurs recherches expérimentales ont utilisé la vitesse de déformation comme paramètre de caractérisation pour quantifier ce comportement.

La traction a été effectuée sur 6 éprouvettes de HDPE de longueurs et surfaces identiques et une même épaisseur. Le matériau a été subit sous plusieurs vitesses d'étirage (traverse) (entre 20 mm/min et 200 mm/min).

Dans la littérature, l'étude de T. El-Bagory [46] a servi comme base de comparaison et d'analyse avec notre étude. Cette dernière a utilisé des éprouvette d'essai de traction avec une épaisseur de 10 mm et une longueur calibrée de 50 mm. La raison de choix de cette étude est qu'elle utilisait le même type d'éprouvette que notre travail.

II.4 Résultats

On prend par exemple la 1^{ère} valeur qui correspond à la vitesse 20 mm/min (Figure II.12)

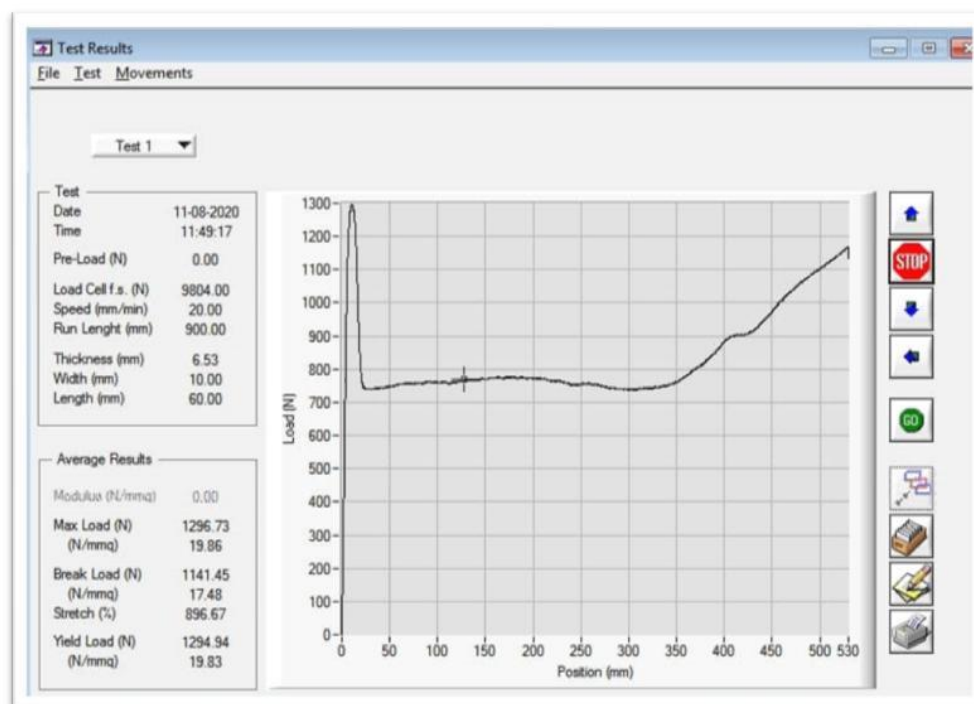
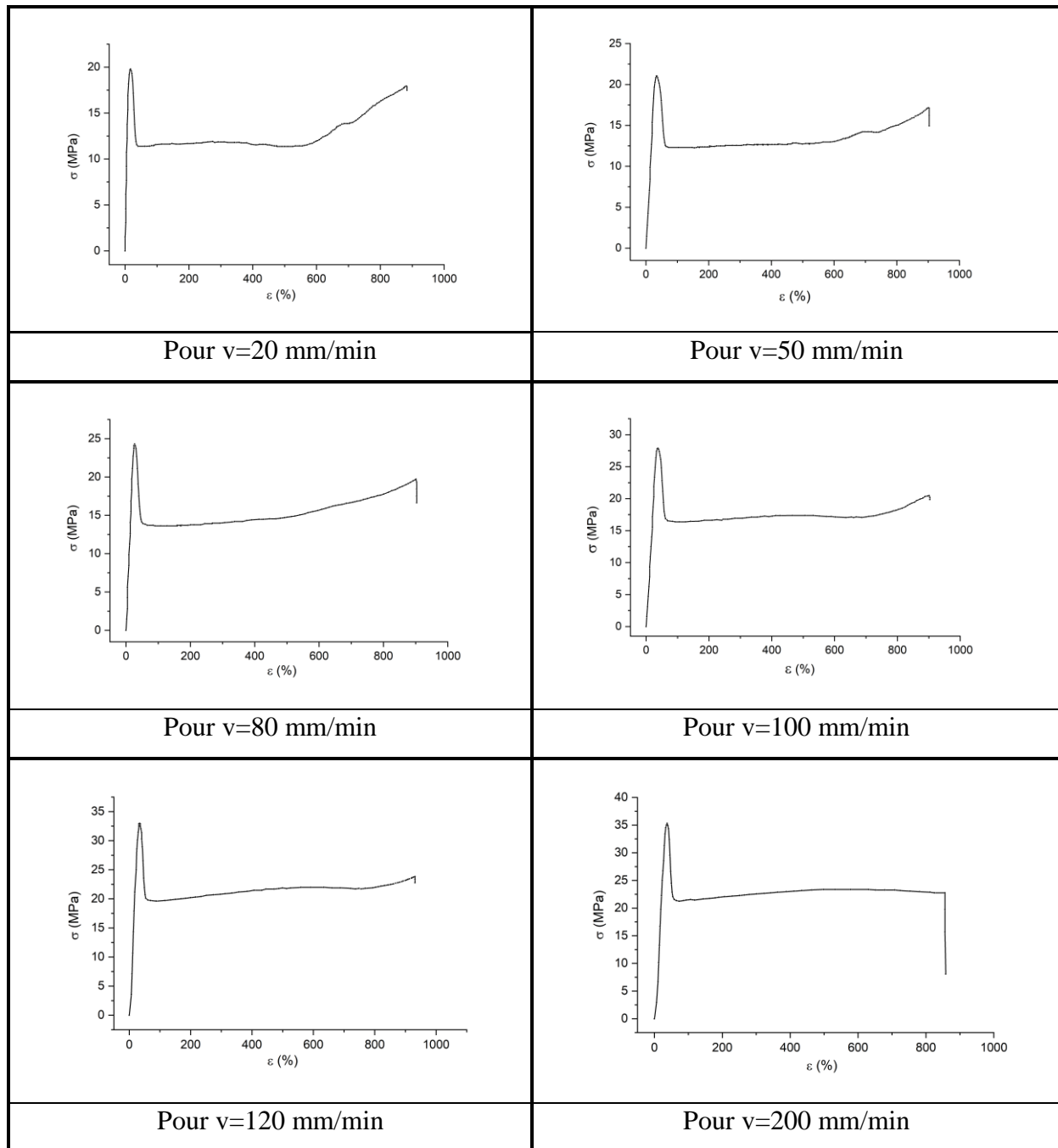


Figure II.11 Graphe de la contrainte au seuil d'écoulement pour $e=6.5$ mm et $v=20$ mm/min.

Au début on a digitalisé tous les points des 6 graphes des différentes vitesses qui sont réparties entre 20 et 200 mm/min englobant 50, 80, 100 et 120 mm/min. Le passage aux graphes contraintes en fonction de la déformation a été effectué manuellement [$\sigma = f(\epsilon)$].

Tableau II.2 Diagrammes contrainte-déformation pour différentes vitesses.



La méthode d'extraction des propriétés mécaniques à partir des courbes contraintes-déformations est décrite dans la littérature concernant les tubes HDPE (études de N. Kiass et al. ainsi que celle de L. Alimi et al.). La justesse des résultats va dépendre en grande partie du

nombre de points digitalisé par expérience. Il aurait été plus sûr et mieux pour cette étude d'enregistrer des données (data) sous la forme de fichiers Excel et assurer le traitement ensuite avec un logiciel adapté.

II.5 Discussion

Dans ce travail nous avons considéré le calcul des propriétés suivantes (**Tableau II.3**) :

- Le module d'élasticité, E qui est demandé par les clients et nécessaire au contrôle de la qualité. Il représente la rigidité du matériau. Il a été obtenu par la méthode de la tangente.
- La contrainte maximale qui reste différente de la limite élastique (qui serait à environ 2% d'élongation). Elle est aussi une caractéristique importante pour le contrôle et pour les utilisateurs.
- La déformation correspondante à la contrainte maximale
- La déformation correspondante à la rupture finale. C'est une caractéristique qui indique la ductilité du matériau à la vitesse considérée.
- La partie étirage est caractérisée par 2 paramètres
Niveau de la contrainte de l'étirage à froid (cold drawing) ; contrainte du palier σ_{CD}
L'étendu de l'étirage en termes de déformation $\Delta\varepsilon_{CD}$
- La contrainte nominale à la rupture (signification restreinte)
- La pente de la partie relative au durcissement plastique

Tableau II.3 : Différents paramètres tirés après essai de traction ont vitesses différentes.

Vitesses (mm/min)	E (MPa)	σ_{max} (MPa)	$\varepsilon(\%)$ (σ_{Max})	σ_{CD} (MPa)	$\Delta\varepsilon_{CD}$ (%)	Pente CD	σ_f (MPa)	ε_f (%)
20	566,40	19,79	17,01	6,33	312,89	0,020	17,05	883,33
50	611,10	21,03	25,34	3,94	291,16	0,013	17,90	903,14
80	665,60	24,30	26,50	4,66	360,84	0,012	19,71	901,20
100	694,43	27,90	34,60	3,44	216,11	0,016	20,44	903,15
120	705,55	32,87	36,10	11,18	175,20	0,064	23,83	931,08
200	805,56	35,31	37,60	/	/	/	22,76	857,32

Le comportement des courbes de contrainte et de déformation pour le HDPE montre les 3 zones caractéristiques : la zone élastique, l'étirage à froid et le durcissement suivi de la rupture. Il faut noter que le durcissement n'est toujours évident à mesure que la vitesse change (surtout lorsqu'elle augmente, **Figure II.12**).

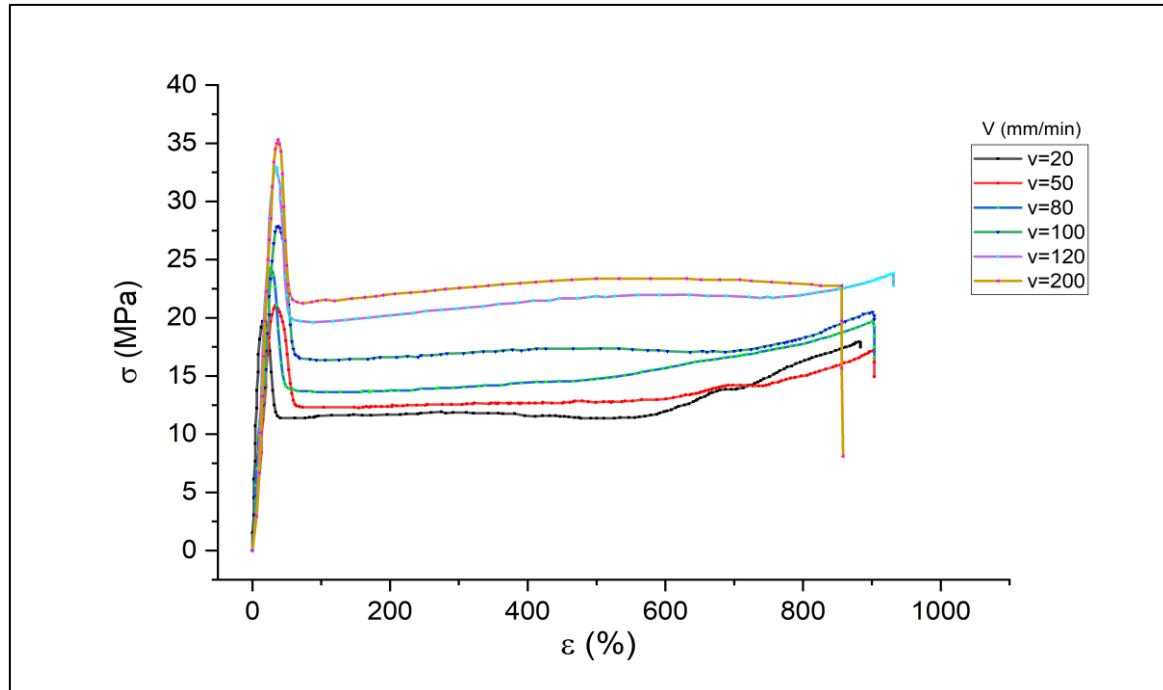


Figure II.12 diagramme contrainte déformation pour tous les échantillons à différentes vitesses.

La figure II.12 illustre les courbes de traction de type contrainte - déformation pour des éprouvettes de HDPE à des vitesses de traverse $V=20-200$ mm/min. D'après cette courbe, il est évident que la limite d'élasticité (σ_{max}) et module de Young E augmentent avec la vitesse de traverse. En revanche, le pourcentage de déformation à la rupture diminue avec l'augmentation de la vitesse de la traverse.

La limite d'élasticité à une vitesse de traverse $V=20$ mm/min est de 19,79 MPa. Par contre à $V=200$ mm/min elle augmente jusqu'à 35,31 MPa.

La figure montre aussi que pour une plage de vitesse de la traverse allant de $V=20$ mm/min. à 120 mm/min, la zone d'étirage à froid est relativement plus grande par rapport aux grandes vitesses. Par conséquent les propriétés mécaniques sont sensiblement affectées. C'est pour cette raison qu'il y a des standards qui fixent les conditions d'essai. En réalité, on mesure en général à 50mm/min, sinon les propriétés publiées doivent être accompagnées des conditions de mesure et spécialement la vitesse d'essai.

Pour littérature, on a pris l'exemple de (T. El-Bagory) [46] qui donné les resultats suivants :

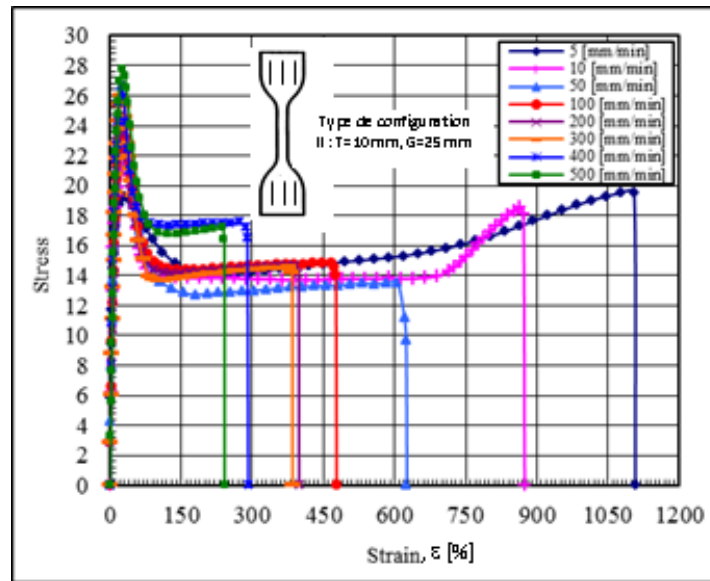


Figure II.13 Diagramme contrainte-déformation pour des essais similaires à notre étude et couvrant une plus grande plage de vitesse [46].

Les courbes types de contrainte de traction/déformation pour des éprouvettes d'extrusion longitudinale de HDPE non soudées, à des vitesses de traverse, $VC.H = 5-500$ mm/min, pour $T=10$ mm, et $G = 25$ mm. Il montre que la limite d'élasticité et le module de Young apparent, E , augmentent avec la vitesse de la traverse, $VC.H$. et à une vitesse de la traverse, $VC.H = 5$ mm/min, est de y 19,2 MPa. Cependant, à une vitesse de la traverse, $VC.H = 500$ mm/min la limite d'élasticité est de 27,7 MPa. Cela signifie que le pourcentage d'augmentation de la limite d'élasticité est d'environ 44 % dans le cas de la vitesse la plus élevée par rapport à la vitesse la plus faible de la traverse. Il montre aussi que pour une plage de vitesses de la traverse, $VC.H = 5-100$ mm/min, la zone d'étréage à froid est relativement plus grande par rapport aux autres vitesses de la traverse. Par d'autre il montre que le durcissement plastique est relativement important a ds vitesse de la traverse $V=5-10$ mm/min.

Dans les figures suivantes, nous montrons chaque propriété en fonction de la vitesse (Figure II.14 – II.15)

- Graphique de E en fonction de la vitesse : allure croissante.

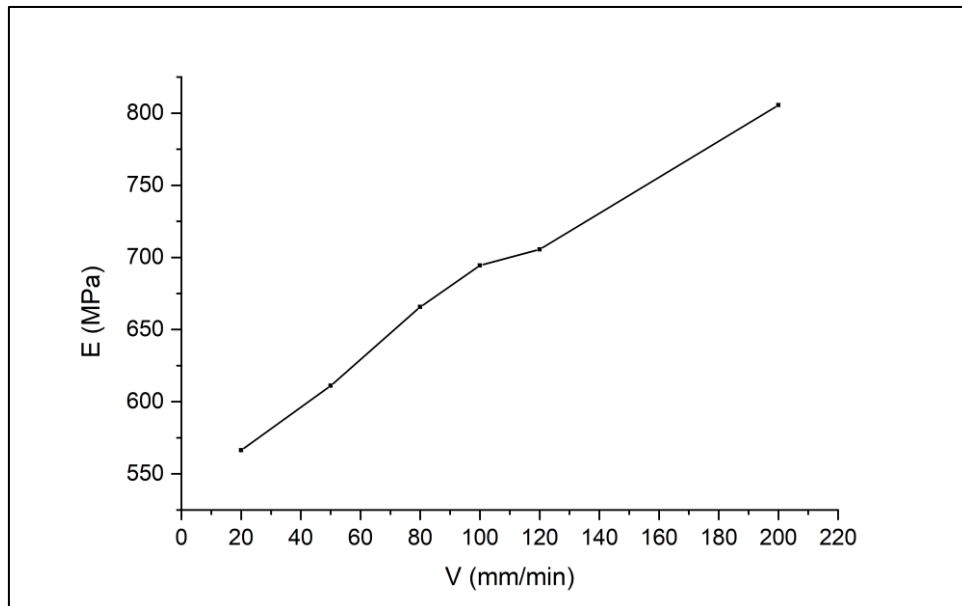


Figure II.14 Augmentation de module d'Young au cours d'augmentation de vitesse.

- Graphique de σ_{\max} en fonction de la vitesse : allure croissante avec un ralentissement aux vitesses élevées.

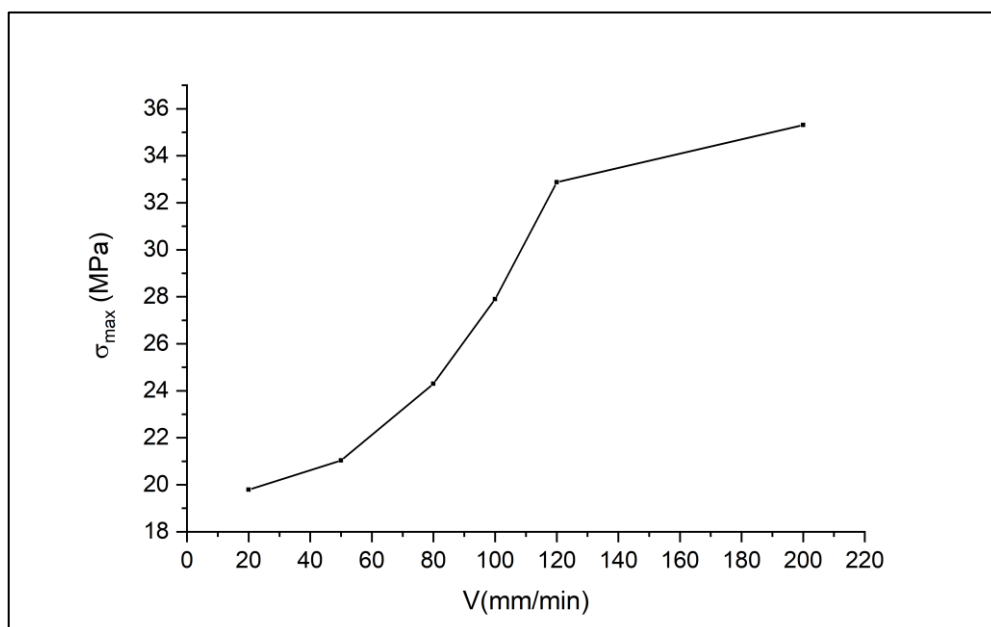


Figure II.15 Augmentation contrainte maximal au cours d'augmentation de vitesse.

- Graphique de σ_{cd} E en fonction de la vitesse : allure mitigée (mixte).

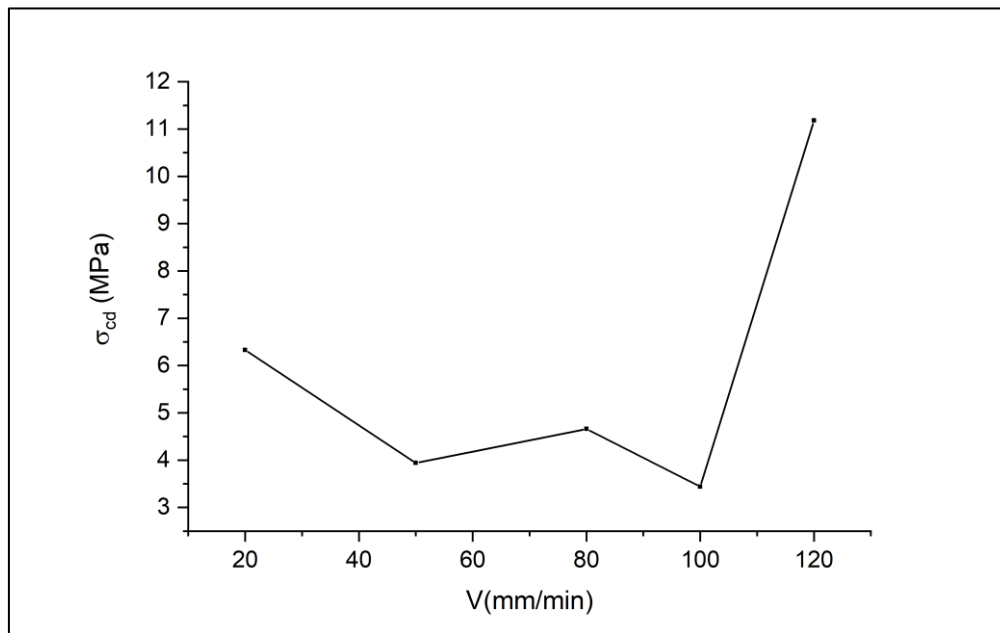


Figure II.16 Comportement de la contrainte d'étirage à froid en fonction de la vitesse.

- Graphique de σ_f en fonction de la vitesse : L'allure est croissante et décroît à $v=120\text{mm/min}$.

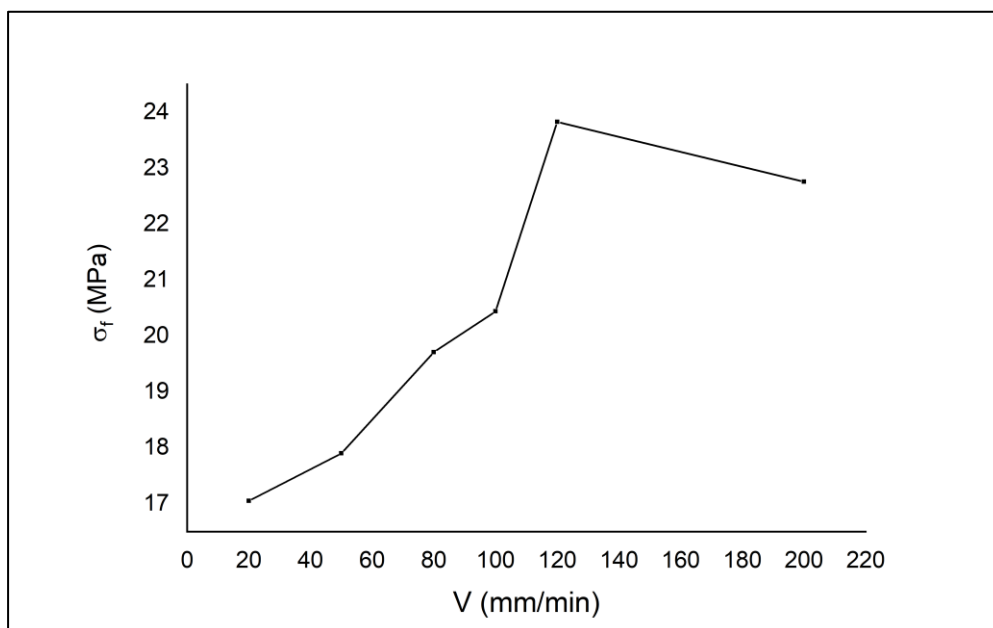


Figure II.17 Comportement de la contrainte à la rupture au cœur d'augmentation de vitesse.

Dans certains cas, cette dernière valeur devrait être refaite plusieurs fois pour confirmer cette diminution. Mais dans ce cas, cette mesure n'a été effectuée qu'une seule fois dans ces conditions. Ce qui ne permet pas de conclure définitivement.

A la vitesse de la traverse $v=200$ mm/min, le comportement de rupture change a cause de la zone d'étirage a froid non-existe. Aussi pour la déformation, l'allure diminue progressivement.

- Graphique de la pente de durcissement en fonction de la vitesse : allure décroissante jusqu'à $v=100$ mm/min et ensuite croît rapidement.

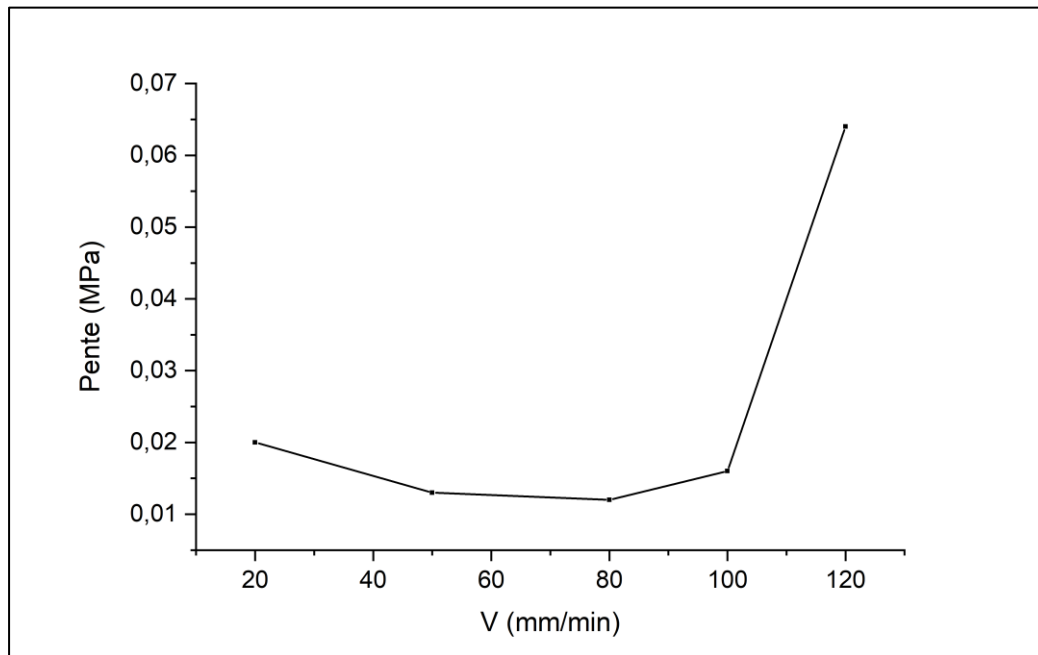


Figure II.18 Comportement de la pente d'étirage a froid au coure d'augmentation de vitesse.

Normalement, cette pente est une indication sur l'accélération ou la décélération de l'activité de l'orientation des chaines lors de la dernière phase de la courbe de traction.

Calcul du Travail (élastique et plastique) :

C'est un calcul des surfaces sous la courbe contrainte-déformation. L'outil utilisé est « Origin 2019b ». Nous avons découpé la surface à calculer en 4 parties :

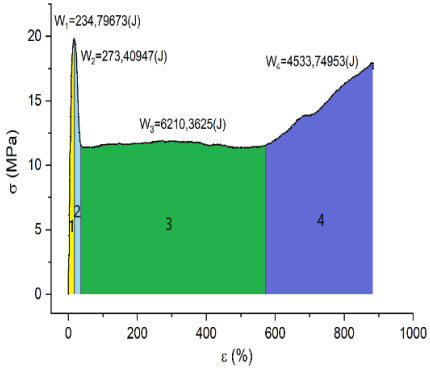
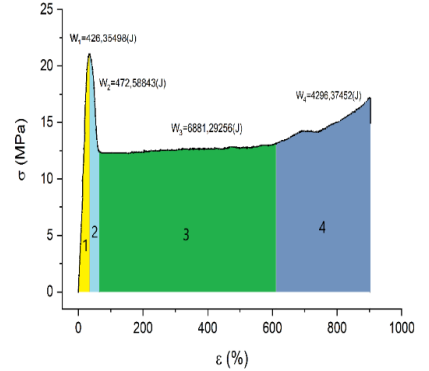
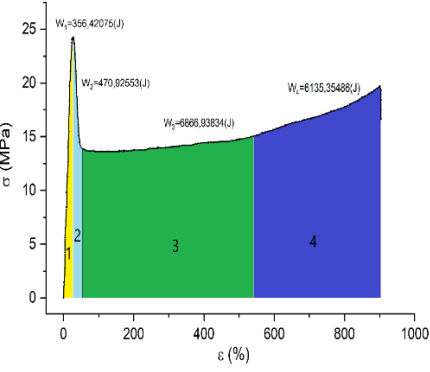
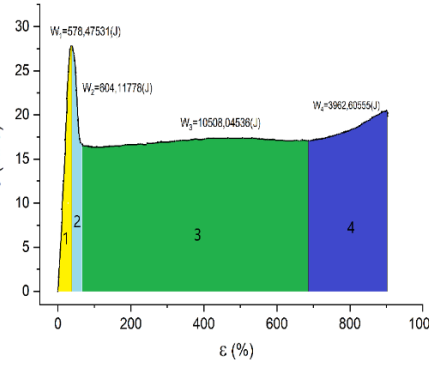
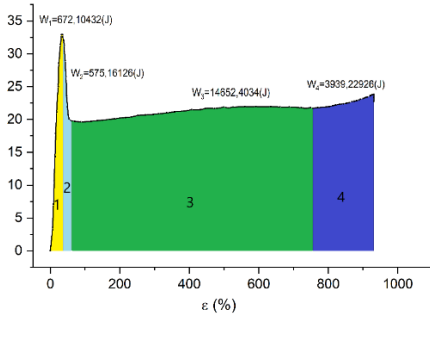
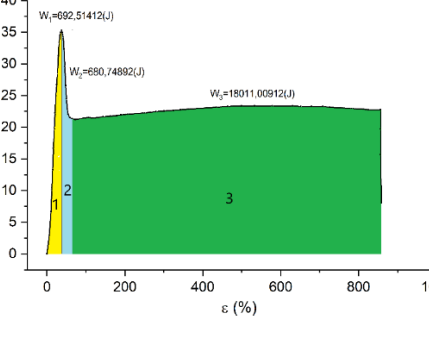
$W1=W_{\text{élastique}}$ (Joule).

$W2=W_{\text{assouplissement}}$; retour après le Maximum et avant étirage (Joule).

$W3= W_{\text{cold drawing}}$ (Joule).

$W4=W_{\text{plastique}}$ ou durcissement plastique ou orientation des chaines (Joule).

Tableau II.4 : Calculs des W_i pour chaque vitesse ($V=20-200$ mm/min)

	
<p>Figure II.19 Calcul de travail pour 20 m/min.</p>	<p>Figure II.20 Calcul de travail pour 50 m/min.</p>
	
<p>Figure II.21 Calcul de travail pour 80 m/min.</p>	<p>Figure II.22 Calcul de travail pour 100 m/min.</p>
	
<p>Figure II.23 Calcul de travail pour 120 m/min.</p>	<p>Figure II.24 Calcul de travail pour 200 m/min.</p>

Dans ce dernier graphe ($V=200$ mm/min), on remarque qu'il n'y a que de 3 zones, car la zone d'étirage à froid n'existe plus à cette importante vitesse de traverse.

Pour l'étape suivante, on va tracer les différents travaux en fonction de toutes les vitesses. On organise les résultats dans un tableau comme suit :

Tableau II.5 Représentation des différents W_i en fonction des vitesses.

Vitesses (mm/min)	W1 (J)	W2 (J)	W3 (J)	W4 (J)
20	234,79	273,41	6210,36	4533,75
50	426,35	472,58	6881,29	4296,37
80	356,42	470,92	6866,94	6135,35
100	578,47	604,12	10508,05	3962,51
120	672,1	575,16	14652,4	3939,3
200	692,51	680,74	18011,01	/

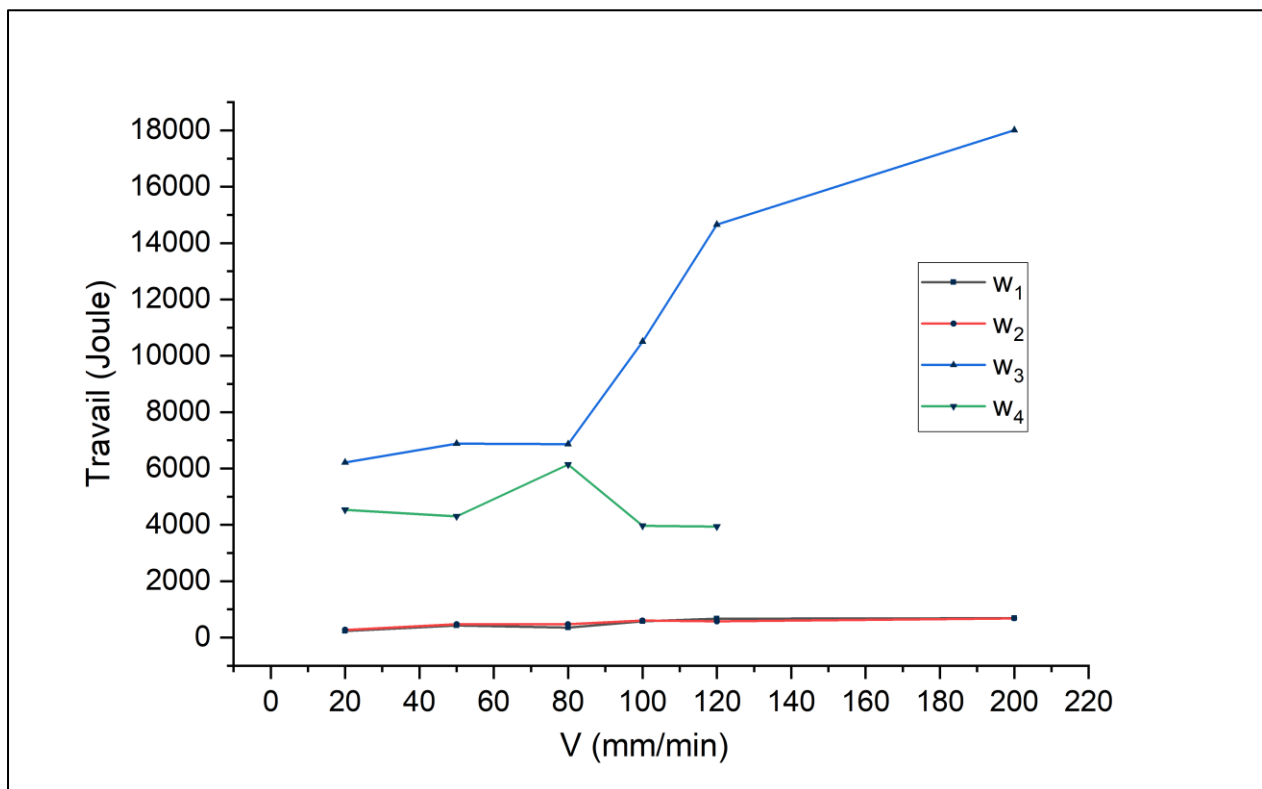


Figure II.25 Représentation des différentes travail en fonction des différents vitesses.

De manière générale, les W_i sont très influencés par la vitesse d'essai. Les écarts deviennent importants à mesure de la vitesse devient importante.

Dans la zone 1 qui représente l'élasticité de la matière, c.à.d que les déformations sont réversibles, l'effet de la vitesse est très réduit. Ce qui est normal car le matériau est prêt à recouvrir sa forme initiale. Mais à mesure que v devient importante, les W_i (irréversibles) sont de plus en plus grands. Ceci est vrai surtout pour le paramètre W_3 . Quand une zone n'apparaît plus, la valeur de W décrit comme dans le cas de W_4 .

Conclusion

Sur la base des résultats expérimentaux obtenus sur des tubes HDPE après des essais de traction, les conclusions suivantes sont établies :

- L'augmentation de la vitesse de la traverse entraîne une augmentation du module d'élasticité apparent et de la limite d'élasticité.
- Le pourcentage de déformation jusqu'à la rupture diminue avec l'augmentation de la vitesse de la traverse.
- Les travaux (élastique et plastique) sont très influencés par la vitesse d'essai. Les écarts deviennent importants à mesure de la vitesse devient importante. Dans la zone élastique, les déformations sont réversibles alors l'effet de la vitesse est très limité.

Chapitre III :

**ETUDE DE L'EFFET DE LA TEMPERATURE
SUR LA PRESSION D'ECLATEMENT
DU TUBE HDPE**

III.1 Introduction

Les tubes en polyéthylène haute densité (HDPE) sont des produits très utilisés par l'industrie et les collectivités pour différents besoins. De nombreuses études portant sur les caractéristiques du HDPE ont été réalisées depuis les années 1950. Lors de l'utilisation de ces matériaux, de nombreuses spécifications doivent être vérifiées pour éviter les dommages matériels et les pertes de production dues à des erreurs de conception et à de mauvaises mises en œuvre.

Dans ce chapitre, on va étudier la détermination de la température maximale critique pour l'utilisation des tubes en HDPE sous pression. Le matériau polymère a subi différents tests de pression à différents paramètres physiques tels que la température (T°) et la pression (P), pour le connaître la résistance et la durée de vie.

III.2 Base théorique sur l'utilité de ce test de pression

III.2.1 Appareil de pression hydrostatique

C'est un appareil utilisé pour tester sous pression hydrostatique les canalisations en HDPE ou en PVC conformément à l'ISO 1167. Pour maintenir le temps en prévision d'une pression, il doit être sous la constante hydrostatique stipulée. Dans ce cas, pour que les éprouvettes éclatent en un minimum de temps, la pression doit être suffisamment grande. Pendant l'application, on doit vérifier que la pression augmente lentement et progressivement et que la valeur requise n'est pas dépassée [47].

Il y a d'autres standards conformément à l'ISO 13480 pour des autres essais qui étudient la résistance à la propagation lente des fissures. Par exemple, il y a la Méthode d'essai avec le cône. Ensuite, on réalise des calculs pour des profondeurs de pénétration de la fissure dans différentes éprouvettes [47-48].

III.2.2 Principe de l'essai :

Le principe de l'essai, repose sur l'introduction d'un gradient de pression calculé à température de base (20°C) dans le tube jusqu'à éclatement. Les essais de pression ont été effectués en variant la température.

La température limite est la température maximale à laquelle le tube HDPE peut résister. En fixant les bouts du tube aux embouts qui correspondent à son diamètre en le mettant dans un bac et en réglant la température correspondante à chaque essai.

Après un certain temps, le temps de résistance du tube est déterminé et affiché sur l'appareil à la chute de pression, ce qui implique une rupture. Les résultats sont regroupés pour les différentes courbes [49].

III.2.3 Analyse des défaillances observées

Au niveau de la chaîne de production d'autres chercheurs se sont intéressés aux dommages [50-51], en outre, certains chercheurs se sont concentrés sur les défaillances et les risques liés aux tubes en HDPE utilisés pour la réhabilitation sans tranchée et les nouvelles technologies de construction [52-53]. D'autres ont étudié la défaillance et la rupture du matériau HDPE [54]. Cette partie est la plus étudiée en raison de la forte demande des clients des tubes en HDPE.

Nous devons donc être capables de détecter les dommages prématurés qui peuvent être générés sur les tubes en HDPE, et de répondre aux préoccupations majeures de la plupart des clients qui utilisent ce type de tubes. Ces dommages prématurés peuvent avoir plusieurs causes, telles que la réduction de l'épaisseur, causée par l'abrasion, l'attaque chimique ou l'affaiblissement du matériau en raison de l'exposition aux rayons UV du soleil. Il peut également résulter de défauts intrinsèques spéciaux du matériau, générés lors de la préparation de la résine ou du processus de production.

De nombreux concepts de défaillance des tubes en HDPE ont été étudiés au fil des ans. A partir de la structure moléculaire et de la caractérisation mécanique du matériau HDPE [55-56]. Ensuite, l'étude des limites de fatigue et la prédiction de la durée de vie du HDPE ont été engagées [57-58]. En outre, l'évaluation des dommages causés au HDPE a été réalisée dans le cadre de nombreux travaux [59-60]. La fatigue par rupture est la cause de 50 à 90% des défaillances mécaniques, selon Fatemi [61] pour les métaux et Kinloch [62] pour les polymères.

Bien que la norme ISO 9080, prévoit une extrapolation de la durée de vie de 50 ans et que la norme ASTM D 2837, prévoit 11 ans, ces défaillances peuvent entraîner des accidents graves au niveau des systèmes de tuberie sous pression, tels que des fuites, des

ruptures ou des éclatements. C'est pourquoi nous devons déterminer les dommages probables d'un tube HDPE sous pression.

On va utiliser le temps avant l'échec. Lors des tests expérimentaux, nous avons enregistré les pressions d'éclatement et les temps avant défaillance. Le temps avant défaillance a été utilisé pour évaluer les dommages. Cette approche considère une précharge de fatigue, des encoches artificiels, et ensuite nous évaluons la durée de vie résiduelle par un test standard comme celui de la pression d'éclatement [59-60].

Les résultats obtenus sont représentés dans un graphique pour montrer l'évolution des dommages de toutes sortes. Cette évolution des dommages nous a permis de déterminer la fraction de vie critique qui représente la réduction d'épaisseur ultime autorisée. De plus, cette représentation est la meilleure façon de détecter les étapes de l'initiation, de la montée et de l'accélération des dommages. En sachant cela, nous pouvons prévoir le temps de maintenance et de remplacement des tubes usagés.

III.3 Conditions expérimentales

III.3.1 Principe

L'objectif principal des tests de pression d'éclatement est de pouvoir déterminer la résistance du tube HDPE grâce à sa pression d'éclatement. L'essai a été effectué 21 éprouvettes de HDPE à différent type (63 PN10, 63PN16, 63PN20) de longueurs qui ne doit pas dépasser cinq fois le diamètre du tube selon le code ASTM D1599, une épaisseur différente suivant l'ordre ($e = 3,8$ mm, $e=5,8$, $e=7,1$). Le matériau a été soumis à plusieurs températures variant (entre 35°C et 65°C), et aussi sous trois différentes pressions (15,9 Bar, 25,1 Bar et 31,5Bar) qui est calculé à basse température ($T=20^{\circ}\text{C}$).

Pour assurer le test d'éclatement, nous avons utilisé une machine de test de la pression hydrostatique (Figure III.4) donnant la possibilité d'éclater des tubes en HDPE. Elle est équipée d'une pompe à eau d'alimentation. Ensuite, nous avons monté les échantillons préparés dans les embouts hydrauliques et nous les avons reliés au tube à haute pression.

Le principe du contrôle de la pression est que nous augmentons la pression jusqu'à ce que nous obtenions une grande chute de celle-ci qui nous informe de la rupture. Ainsi, un contrôle n'est pas valable si l'on constate l'un des problèmes ci-dessous :

- Chute de pression instantanée et rapide.
- Fuites visibles sur les parois du tube.
- Fuite aux extrémités du tube.

III.3.2 Préparation des éprouvettes

- Des éprouvettes doivent être découpées de manière que leurs extrémités soient perpendiculaires à l'axe de tube.
- La longueur libre l_0 de chaque éprouvette entre les embouts doit être égale à au moins trois fois le diamètre extérieur des tubes.
- Nettoyer et sécher les éprouvettes afin d'éliminer toute trace de saleté d'huile, de cire ou autre impureté.
- Placer les embouts choisis pour l'essai (embout de type a) aux bouts du tube (figure III.1).

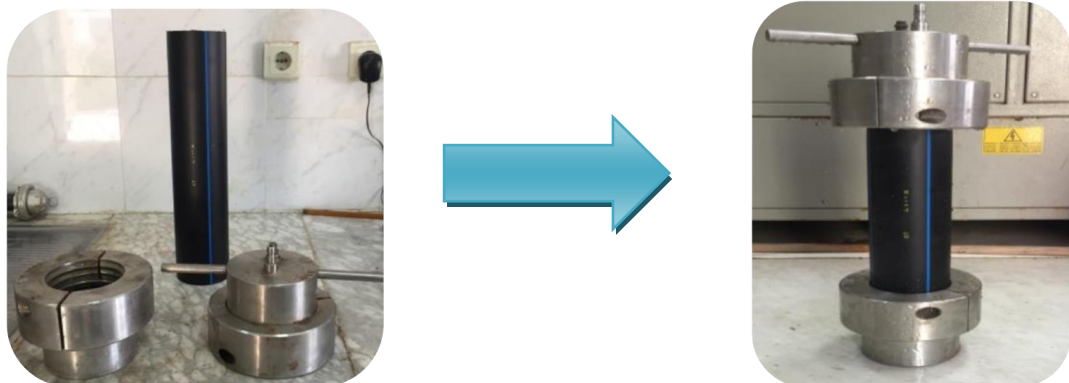


Figure III.1 Embouts fixé aux bouts du tube.

III.3.3 Appareillage

- Réservoir rempli d'eau.
- Equipement de suspension : permettant de suspendre les éprouvettes dans le réservoir.
- Générateur de pression : permettant d'appliquer la pression nécessaire.
- Thermomètre : pour contrôler la conformité à la température.
- Chronographe pour l'enregistrement de la durée de l'application de la pression (Figure III.2).

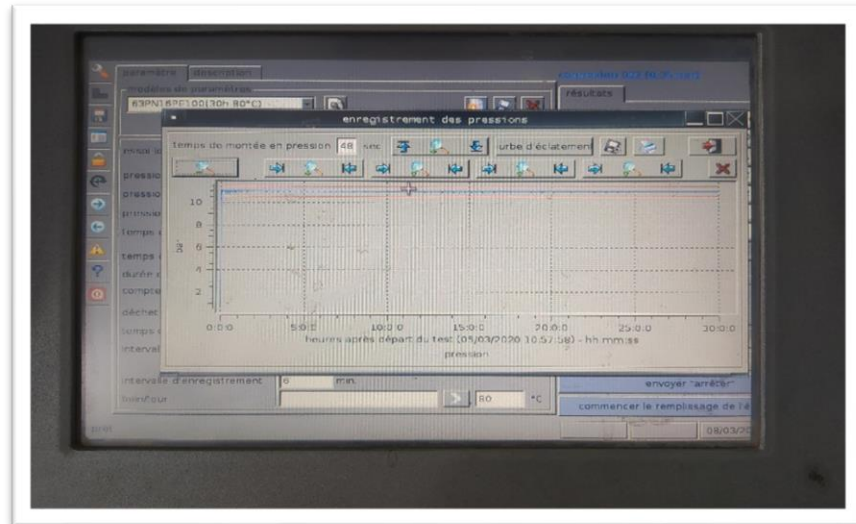


Figure III.2 chronographe.



Figure III.3 Machine test de la pression hydrostatique (éclatement).

III.3.4 Mode opératoire

- Purger l'air et remplir les éprouvettes avec de l'eau (l'eau dans l'eau).
- Placer les éprouvettes de façon verticale dans le bassin du test qui déjà contient de l'eau conditionnée.
- Démarrer le chronographe puis en arrêter l'essai lorsqu'une rupture se produit (bouche de poisson), puis enregistrer les.

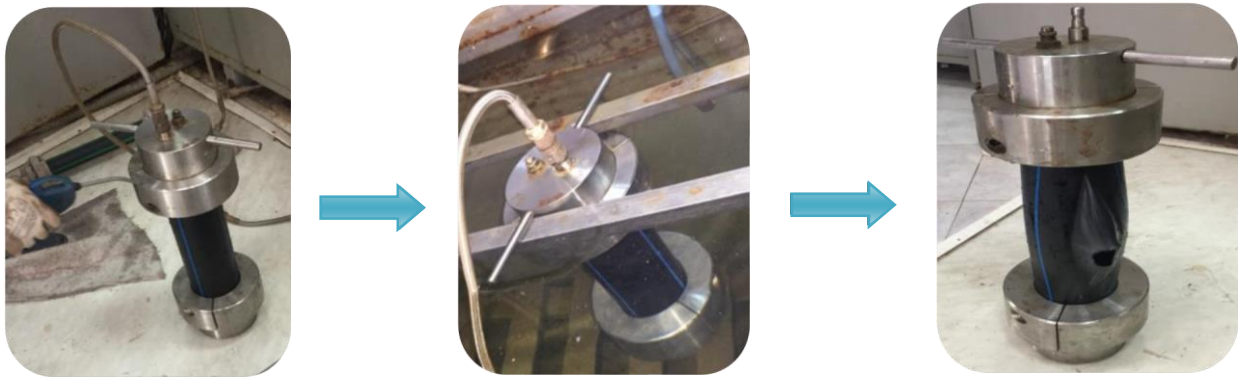


Figure III.4 Etapes d'essai.

III.4 Résultats

Toutes les pressions d'essai sont calculées sur la base d'une température de 20°C ; qui est la température de réservoir d'eau.

Tableau III.1 Durée de la résistance des tubes HDPE en mode pression pour la température de 35°C à 65°C. le type de polymère 63 PN10 avec une épaisseur ($e = 3,8$ mm).

Température (°C)	35	40	45	50	55	60	65
Pression d'essai (15,9 Bar)	91	83	62	33	14	6	2
Temps de résistance avant la rupture (Heure)							

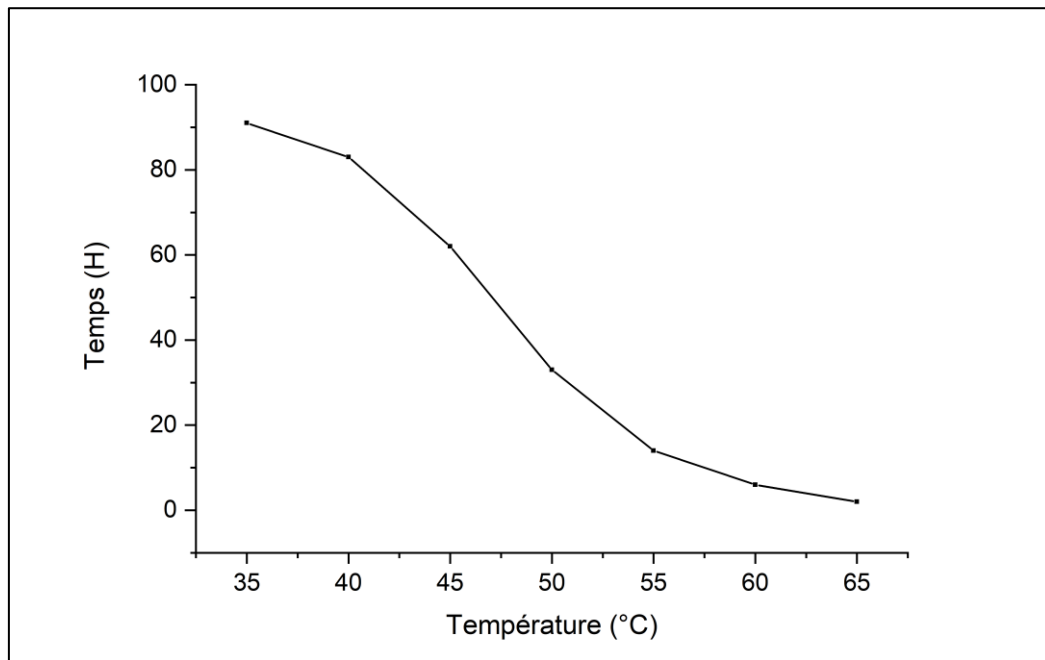


Figure III.5 Le temps de la résistance des tubes HDPE en mode pression pour des températures allant de 35°C à 65°C (P=15,9Bar).

Tableau III.2 Durée de la résistance des tubes HDPE en mode pression pour la température de 35°C à 65°C. le type de polymère 63 PN16 avec une épaisseur (e = 5,8 mm)

Température (°C)	35	40	45	50	55	60	65
Pression d'essai (25,1 Bar)	96	84	65	38	19	8	3
Temps de résistance avant la rupture (Heure)							

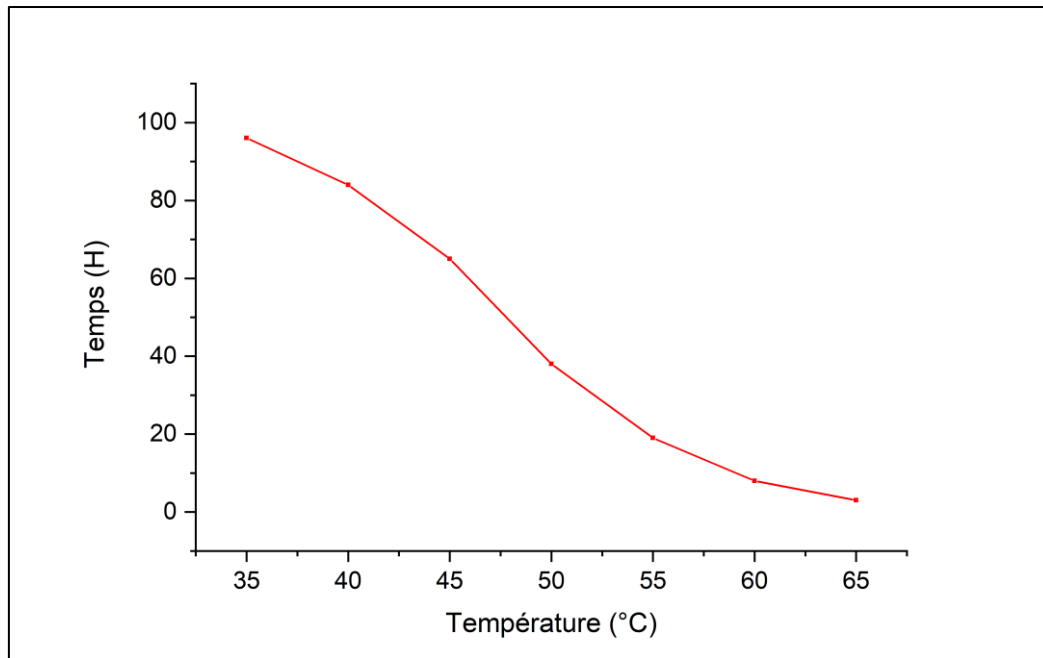


Figure III.6 Le temps de la résistance des tubes HDPE en mode pression pour des températures allant de 35°C à 65°C (P=25,1Bar).

Tableau III.3 Durée de la résistance des tubes HDPE en mode pression pour la température de 35°C à 65°C. le type de polymère 63 PN20 avec une épaisseur (e = 7,1 mm).

Température (°C)	35	40	45	50	55	60	65
Pression d'essai (31,5 Bar)	98	86	66	31	16	8	2
Temps de résistance avant la rupture (Heure)							

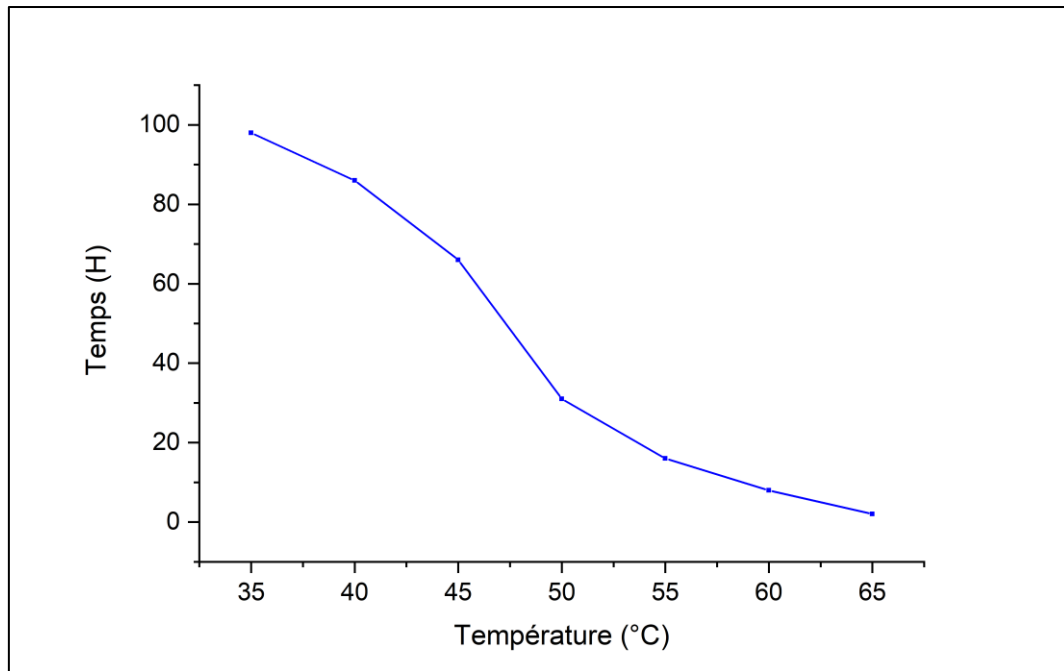


Figure III.7 Le temps de la résistance des tubes HDPE en mode pression pour des températures allant de 35°C à 65°C (P=31,5Bar).

III.5 Discussion

Pour la discussion on prendre les trois cas en même temps.

Tableau III.4 Durée de la résistance des trois tubes HDPE en mode pression pour la température de 35°C à 65°C de tous les cas.

Température (°C)	35	40	45	50	55	60	65
Pression d'essai (15,9 Bar) HDPE 63 PN10 ; (e = 3,8 mm)	91	83	62	33	14	6	2
Pression d'essai (25,1 Bar) HDPE 63 PN16; (e = 5,8 mm)	96	84	65	38	19	8	3
Pression d'essai (31,5 Bar) HDPE 63 PN20 ; (e = 7,1 mm)	98	86	66	31	16	8	2
	Temps de résistance avant la rupture (Heures)						

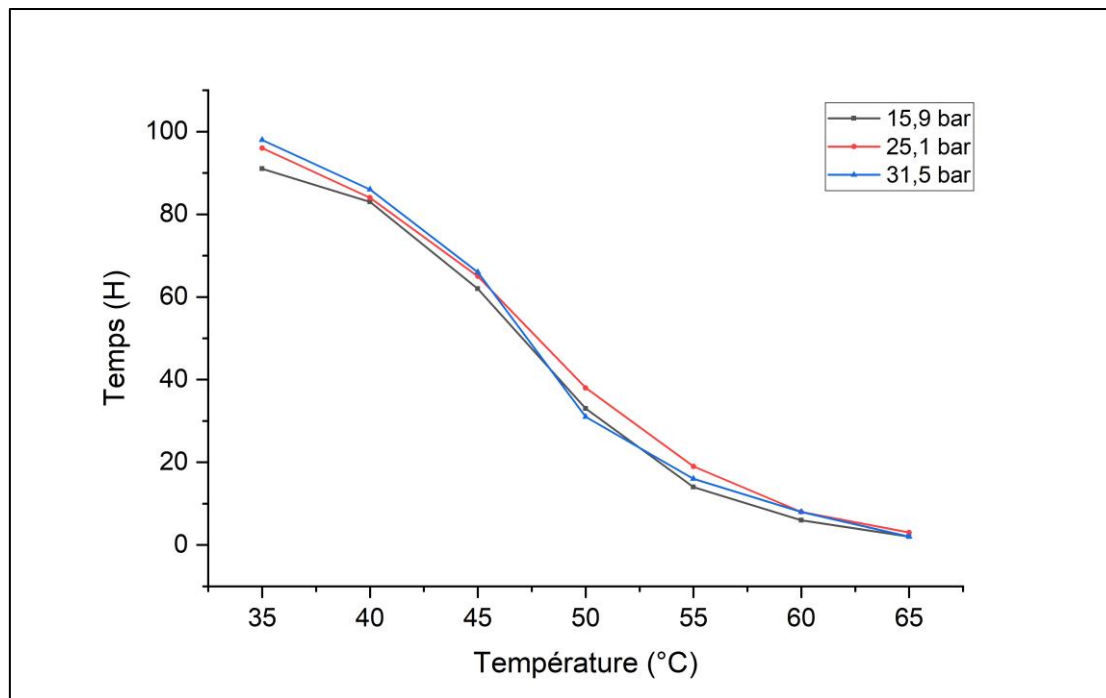


Figure III.8 Le temps de la résistance des tubes HDPE en mode pressions pour des températures allant de 35°C à 65°C.

A 35°C, l'échantillon qui a une grande épaisseur (7,1mm pour 63 PN20) implique un grand temps à la rupture, donc il résiste le plus par rapport à celui qui a une petite épaisseur (3,8 mm pour 63 PN10). Avec le rapport :

$$(98 - 91 \text{ H}) / 98 \text{ H} = 0,07.$$

La durée de vie est 7,1%

$$\text{A } 45^\circ\text{C} : (66 - 69 \text{ H}) / 66 \text{ H} = 0,061.$$

Durée de vie est 6,1%.

- De 45 à 55°C :

$$\text{Pour : } e = 7,1 \text{ mm} : (66 - 16 \text{ H}) / 66 \text{ H} = 0,75.$$

Durée de vie est 75%.

$$e = 5,8 \text{ mm} : (65 - 19 \text{ H}) / 65 \text{ H} = 0,70.$$

Durée de vie est 70%.

$$e = 3,8 \text{ mm} : (62 - 14 \text{ H}) / 62 \text{ H} = 0,77$$

Durée de vie est 77%.

- De 55 à 65°C :

Pour les deux épaisseurs $e=7,1$ mm et $e=3,8$ mm : $(2 - 2H) / 2H = 0$

Les 3 cas montrant ces diminutions de la durée de vie sont différents. La plus rapide est avec le plus petit écart, c'est le cas ($e = 5,8$ mm) de (77%) et en seconde position il y a celle de ($e=7,1$ mm).

En plus entre 45 et 55°C, il y a de grands changements pour $e=7,1$ mm :

$$(66 - 31H) / 66H = 0,53 = 53\%.$$

$$(65 - 38H) / 65H = 0,42 = 42\%.$$

$$(62 - 38H) / 62H = 0,46 = 46\%.$$

Ils montrent tous clairement que la fraction de vie critique pour la première étape (35 à 45°C) est comprise entre 0 et 20 %. La deuxième étape (45 à 55°C); c'est le stade où l'on atteint la fraction de vie critique de 70%.

Conclusion

Dans cette étude, nous avons exploité les essais d'éclatement de tubes en HDPE en variant la température d'essai (bain) et en considérant une pression d'essai statique. Les valeurs nominales des pressions d'essai sont 15,9 ; 21,5 et 31,5 bars. On a remarqué que pour le PN 10, la chute de la durée de vie (en heures) s'étale de 91h jusqu'à 2 h lorsque la température d'essai augmente de 35 à 65°C. Pour les PN 16 et PN 20, ces diminutions de durées de vie s'échelonnent respectivement de 96h à 3h et de 98h à 2h. Ces résultats indiquent que la norme est respectée dans la correspondance entre les pressions d'essai et les épaisseurs minimales requises pour chaque cas. Pour les tubes en HDPE, le « Standard Dimension Ratio » (noté SDR) est un le rapport entre le diamètre extérieur (nominal) et l'épaisseur minimale (garantie) pour un service fiable des tubes. En effet, dans les cas des 3 pressions utilisées (15,9 ; 21,5 et 31,5 bars) les SDR correspondants sont 16,57 ; 10,86 et 8,87. Ces valeurs sont bien connues dans les standards. Ce sont des tubes avec SDR : 17 ; 11 et 9. Tous fabricants doivent obéir à ces standards lors de la fabrication de tubes HDPE.

CONCLUSION GENERALE

Cette étude est composée de 3 parties. Dans la première partie nous avons revu la bibliographie sur les polymères et surtout ceux destinés à la fabrication de tubes en HDPE. Nous avons trouvé qu'au moins cinq paramètres spécifiques régissent la qualité des tubes en HDPE comme expliqué dans la *Figure I.4* présentant une représentation schématique du développement des propriétés des tubes en HDPE. Il y a :

- (i) la résistance minimale requise (*Minimum Required Strength* ou MRS; MPa),
- (ii) la résistance à la propagation de fissures (*Rapid Crack Propagation* ou RCP; mm/min.),
- (iii) la résistance à la propagation lente de fissure (*Slow Crack Growth* ou SCG; mm/min),
- (iv) la résistance à la déformation par écoulement (ex : *Melt Flow Index* ou MFI; g/10min.),
- (v) (v) la rigidité (*Stiffness*, ex : E; MPa).

Ensuite, la bibliographie nous a permis de comprendre qu'il y a 3 régions (ou zones) successives qui décrivent la durée de vie d'un tube sous l'effet de son environnement de service. C'est la représentation d'essais de la forme de ce qui a été exposé dans la Chapitre II qui est adoptée avec des courbes logarithmiques mettant en relation la contrainte circonférentielle appliquée et le temps de rupture (ou d'éclatement, à T° constante). Ceci correspond à une colonne du *Tableau III.4* :

- (i) La région A est caractérisée par un mécanisme de rupture plutôt ductile (*large scale plastic deformation*),
- (ii) suivie de la région B (*quasi-brittle failure*)
- (iii) et enfin la région C (*brittle failure*). Ceci est bien résumé dans la *Figure I.7*.

Dans la seconde partie, nous avons étudié l'effet de la vitesse de chargement sur quelques propriétés mécaniques. Nous avons considéré 9 propriétés usuelles extraites de la courbe contrainte-déformation en ajoutant l'évolution du travail de rupture (W_e , W_p ...). Les données expérimentales n'étaient pas suffisantes pour sortir avec des tendances réelles et certaines pour les différentes propriétés. Mais les tendances apparentes sont respectées dans certains cas comme la rigidité et la contrainte maximale (*Tableaux II.2 et II.3*). La littérature nous permis de faire des comparaisons avec une étude similaire qui a considéré 8 vitesses. Nous avons trouvé de bonnes correspondances. Seulement, il faut augmenter le nombre d'essais pour avoir une conclusion nette. Pour les travaux de rupture (W_i), de manière générale, ils sont très influencés par la vitesse d'essai et les écarts deviennent importants à

mesure de la vitesse devient importante. Par contre, dans la zone élastique, comme les déformations sont réversibles alors l'effet de la vitesse sur W_i reste limité.

Dans la dernière partie, nous avons exploité des essais d'éclatement de tubes HDPE à des différentes pressions et températures. On a remarqué que pour le PN 10, la chute de la durée de vie (en heures) s'étale de 91h jusqu'à 2 h lorsque la température d'essai augmente de 35 à 65°C. Pour les PN 16 et PN 20, ces diminutions de durées de vie s'échelonnent respectivement de 96h à 3h et de 98h à 2h. Ces résultats indiquent que la norme est respectée dans la correspondance entre les pressions d'essai et les épaisseurs minimales requises pour chaque cas. Ceci est en totale cohérence avec le ratio SDR (*Standard Dimension Ratio*). Ces valeurs sont bien connues dans les standards des tubes et qui sont SDR : 17 ; 11 et 9.

Références bibliographiques

- [1] M. Reyne, Technologie des plastiques, HERMES, Paris, 1998.
- [2] Gas Research Institute, Pipeline Statistics, Distribution and Transmission, Annual Mileage Totals, (www.gri.org/pub), Chicago 2002.
- [3] R. Khelif, Etude et analyse de la rupture des tubes en polyéthylène pour le transport de gaz : optimisation par la fiabilité, Thèse de Doctorat, université de Annaba, avril 2006.
- [4] M. Carrega, Les polymères de la molécule à l'objet, EDP Science, Cedex, France, 1999.
- [5] Hehn O. (2006) "Analyse expérimentale et simulation thermomécanique du Soudage bout à bout de tubes de polyéthylène". Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris.
- [Norme ISO 4437] "Canalisations en polyéthylène (PE) pour réseaux de distribution de Combustibles gazeux – série métrique – spécifications".
- [Norme EN 12201-1] (2011) "Systèmes de canalisations en plastique pour l'alimentation en eau et pour les branchements et les collecteurs d'assainissement avec pression - Polyéthylène (PE)- Partie 1 : généralités".
- [6] Gaube E., Diedrich G., Müller W., 1976. In: Hessel J., 50 years for polyethylene piping, 3R International, Vol.45, 2006.
- [7] Cazenave J., Sur le compromis rigidité/durabilité du polyéthylène haute densité en relation Avec la structure de chaîne, la microstructure et la topologie moléculaire issues de la Cristallisation, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, Lyon, 2005.
- [8] Fina Chemicals, Bimodal polyethylene pipe resin with hexene comonomer, Document Technique, 1998,
- [9] Solvay Polyolefins, Eltex PE100, Document Technique, 1998.
- [10] Hubert L., David L., Séguéla R., Vigier G., Degoulet C., Germain Y., Physical and mechanical properties of polyethylene for pipes in relation to molecular architecture, I. Microstructure and crystallization kinetics, Polymer, Vol.42, 2001
- [11] Kitao K., Effect of entanglement on brittle-ductile transition in polyethylene, Polymer Engineering and Science, Vol. 41, July 2001.
- [12] Krishnaswamy R.K., Lamborn M. J., The Influence of process history on the ductile failure of polyethylene pipes subject to continuous hydrostatic pressure, Advances in Polymer Technology, Vol.24, 2005.
- [13] Sun X., Shen H., Xie B., Yang W., Yang M., Fracture behavior of bimodal polyethylene: Effect of molecular weight distribution characteristics, Polymer, Vol. 52, 2011.
- [14] Lustiger A., The molecular mechanism of slow crack growth in polyethylene, These de doctorate, Drexel University, Philadelphia, 1985.

- [15] Hamouda H.B.H., Simoes-betbeder M., Grillon F., Blouet P., Billon N., Riques R., Creep damage mechanisms in polyethylene gas pipes, *Polymer*, Vol.42, 2001.
- [16] Barker M.B., Bowman J.A., Bevis M., The performance and cause of failure of polyethylene pipes subjected to constant and fluctuating internal pressure loadings, *Journal of Materials Science*, Vol.18, 1983.
- [17] Choi B-H., Chudnovsky A., Paradkar R., Michie W., ZhouZ., Cham P-M., Experimental and theoretical investigation of stress corrosion crack (SCC) growth of polyethylene pipes *Polymer Degradation and Stability*, Vol.94, 2009.
- [18] Gedde U. W., Viebke J., Leijstrom H., Ifwarson M., Long-term properties of hot-water polyolefin pipes- A review, *Polymer Engineering and Science*, Vol.34, 1994.
- ISO 9080, *Plastics piping and ducting systems - Determination of the long-term hydrostatic strength of thermoplastics materials in pipe form by extrapolation*, 2003.
- [19] Hoang E.M., Lowe D., Lifetime prediction of a Blue PE100 water pipe, *Polymer Degradation and Stability*, Vol.93, 2008.
- [20] Frank A., Pinter G., Lang R. W., Prediction of the remaining life time of polyethylene pipes after up to 30 years in use, *Polymer Testing*, Vol.28, 2009.
- [21] Bost J., *Matière plastiques, Technologie-Plasturgie, Tome 2, 2ème Ed*, Lavoisier Ed, Paris, 1982.
- [22] Puissant S., *Lignes d'extrusion de tubes - Étapes de fabrication, Techniques de l'ingénieur AM3642*, 2009.
- [23] Trifonova D., Drouillon P., Ghanem A., Vancso1 G. J., Morphology of extruded high-density polyethylene pipes studied by Atomic Force Microscopy, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.66, 1997.
- [24] J. Rietsch, B. Bouette. The compression yield behaviors of polycarbonate over a wide range of strain rates and temperatures, (1990).
- [25] I. Teraoka, *Polymer Solutions, An introduction to physical properties*, Ed. Polytechnic University Brooklyn, New York, (2002).
- [26] R. Yallaoui, F. Mellahi « étude de la diffusion d'un antioxydant phénolique au sein de la matrice d'un composite à base de HDPE », *Mémoire master en génie des procédés, université de Bejaia*, 2016.
- [27] S. Pospisil, et J. Nespurek. Chain-breaking stabilizer in polymers: the current status. *Polym. Degradation Stab*, 1995.
- [28] Dasari, A., et Misra, R.D.K., "On the Strain Rate Sensitivity of Matériaux "Polyéthylène haute densité et polypropylènes *Science et ingénierie A*, Vol. 358, 2003.

- [29] D. Broek, Elementary Engineering Fracture Mechanics, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, Netherlands, 1986.
- [30] T.L. Anderson, Fracture Mechanics - Fundamentals and Applications, third ed., CRC Press 2004.
- [31] R.W. Hertzberg, R.P. Vinci, J.L. Hertzberg, Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials, fifth ed., John Wiley & Sons, New York, USA, 2012 (Avril 2012).
- [32] S. Nikolov, D. Raabe, Yielding of polyethylene through propagation of chain twist defects: temperature, stem length and strain-rate dependence, *Polymer* 47 (5) (2006) 1696-1703 (22 February).
- [33] A.S. Argon, T. Kazmierczak, Rate mechanisms of plasticity in semi-crystalline, *Polyethylene* 46 (25) (2005) 11798-11805 (28 novembre).
- [34] P. Flueller, J.F. Mandell, F.J. McGarry, Preliminary Study of the Applicability of Plane Strain Fracture Toughness Test Technique to Plastic Pipe Materials Technological Planning Program Report 79.1, Cairo university/Massachusetts Institute of Technology, 1978.
- [35] R. Gensler, C.J.G. Plummer C. Grein, H. H Kausch, Influence of the loading rate on the fracture resistance of isotactic polypropylene and impact modified isotactic polypropylene, *Polymer* 41 (10), 2000.
- [36] M.K.V. Chan, J. G. Williams, J-Intégral études sur l'amorçage de fissures d'un polyéthylène haute densité résistant, *Int. J. Fract.* 23(2), 1983.
- [37] Popelar, C.F., "Characterization of Mechanical Properties for Polyethylene Gas Pipe Materials", these de maîtres, Graduate School of the Ohio State University, 1989.
- [38] Greco, R., Muccarello, G., Ragosta, G., et Martuscell, E., "Properties of Polyethylene-Propylene Blends Part 1 Thermal Swelling and Mechanical Characterization of Extruded Unoriented Specimens" *Journal of Materials Science*, Vol.15, 1980,
- [39] Tang, M., Greco, R., Ragosta, G. et Cimmino, S., "Properties of Polyethylene-Propylene Blends Part 3 Mechanical Characterization of Ultra drawn Fibres" *Journal of Materials Science*, Vol. 18, 1983.
- [40] Dusunceli, N., et Colak, O. U., "The Effects of Manufacturing Techniques on viscoelastic and viscoplastic behavior of high-Density Polyethylene (HDPE)" *Materials and Design*, Vol. 29, 2008.
- [41] SADOUN Sofiane, contribution à l'étude expérimentale d'un polyéthylène à haute densité (HDPE) – effet de la température et de la vitesse de déformation. Mémoire Magister, Université BADJI MOKHTAR-Annaba. 2007.
- [42] R. Yallaoui, F. Mellahi, étude de la diffusion d'un antioxydant phénolique au sein de la matrice d'un composite à base de HDPE, Mémoire master en génie des procédés, université de Bejaia ,2016.

- [43] Julien Cazenave, thèse de doctorat, « le compris rigidité/durabilité du Polyéthylène haute densité en relation avec la structure de chaîne, la microstructure et la topologie moléculaire issues de la cristallisation » ; Institut National Appliqué de Lyon, France.
- [44] H.H. Kaush, et al, *Crazing in semi crystalline thermoplastics*, Journal of macromolecular science, part B-physics.
- [45] A. Peterlin, *Molecular model of darning polyethylene and polypropylene*, Journal of materials science.
- [46] Tarek EL-Bagory, *Comportement mécanique des matériaux de tubes en polyéthylène soudés et non soudés*, article. 2013.
- [47] Zeggai Hanane, *Etude de la fissuration des canalisations en polyéthylènes haute densité*. Mémoire master, université des sciences et de la technologie d'Oran. 2014.
- [48] Fatima Majid, Mohamed Elghorba, *HDPE pipes failure analysis and damage modeling*, Article. 2016.
- [49] SLAIM Assam el Mokhtar, *Etude du comportement mécanique et détermination des paramètres limites des tubes en PVC*, Mémoire Master, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem. 2019.
- [50] L. a. Utracki, R. Gendron, *Pressure oscillation during extrusion of polyethylene. II*, J. Rheol. 28 601, 1984.
- [51] C. Rauwendaal, *Polymer Extrusion 5E*, 2014. Hanser Publishers, 2014.
- [52] E. Kuliczowska, M. Gierczak, *buckling failure numerical analysis of HDPE pipes used for the trenchless rehabilitation of a reinforced concrete sewer*, 2013.
- [53] M. Gierczak, *The qualitative risk assessment of MINI, MIDI and MAXI horizontal directional drilling projects*, Tunn. Undergr. Space, 2014.
- [54] C. Zhang I. a. N. D. Moore, *Nonlinear mechanical response of high-density polyethylene. Partie I: experiment investigation and model evaluation*, poly. Eng. Sci. 1997.
- [55] N. Kiass, R. Khelif, L. Boulanouar, K. Chaoui, *Experimental approach to mechanical property variability through a high-density polyethylene gas pipe wall*, 2005. J.Appl. Polym. Sci. 1997.
- [56] S. Rehab-Bekkouche, W. Ghabeche, M. Kaddeche, N. Kiass, K. Chaoui, *Mechanical behaviour of machined polyethylene filaments subjected to aggressive chemical environments*, Mechanika. 2009
- [57] S. Boros, *Long-term hydrostatic strength and design of thermoplastic piping compounds*, J. ASTM Int. 8. 2011.

[58] P. Huta, G. Pinter, A. Frank, I. Mitev, A numerical methodology for lifetime estimation of HDPE pressure pipes, Eng. Fract. Mech. 78. 2011.

[59] F. Bogard, P. Lestriez, Y.Q. Guo, Numerical modeling of fatigue damage and fissure propagation under cyclic loadings, Int. J. Damage Mech. 17. 2007.

[60] a. G. Frank, R.W. Pinter, Lang, prédiction de la durée de vie restante des tubes en polyéthylène après une utilisation pouvant aller jusqu'à 30 ans, Polym. Test. 28. 2009.

[61] A. Fatemi, N. Shamsaei, Multiaxial fatigue: an overview and some approximation models for life estimation, Int. J. Fatigue 33. 2011.

[62] a. J. Kinloch, R.J. Young, Fracture Behaviour of Polymers, Composite Structures, 1983.

ISO 6259-1, Tubes en matières thermoplastiques — Détermination des caractéristiques en traction, Partie 1 : Méthode générale d'essai, 2015.

ISO 1167-1, Tubes, raccords et assemblages en matières thermoplastiques pour le transport des fluides Détermination de la résistance à la pression interne, Partie 1 : Méthode générale, 2006.

ISO 13480, Tubes en polyéthylène, Résistance à la propagation lente des fissures, Méthode d'essai avec le cône, 1997.

EN 12201, Systèmes de canalisations en plastique pour l'alimentation en eau et pour les branchements et les collecteurs d'assainissement avec pression - Polyéthylène (PE), 2011.

EN ISO 1452, Systèmes de canalisations en plastique pour l'alimentation en eau, pour branchements et collecteurs d'assainissement enterrés et aériens avec pression - Poly (chlorure de vinyle) non plastifié (PVC-U), 2010.

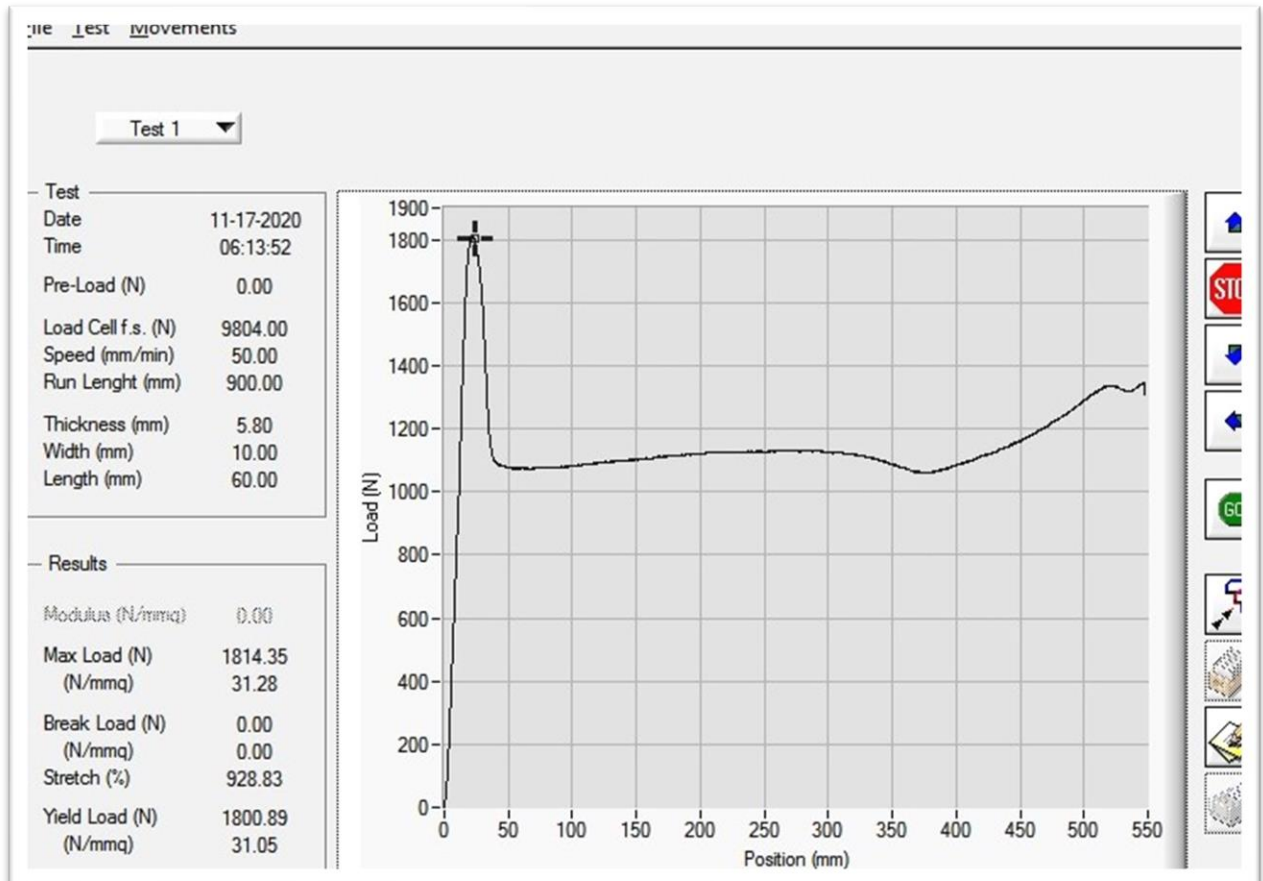
ISO 9001, Systèmes de management de la qualité — Exigences, 2015.

ISO 5893, Appareils d'essai du caoutchouc et des plastiques — Types pour traction, flexion et compression (vitesse de translation constante) — Spécifications, 2019.

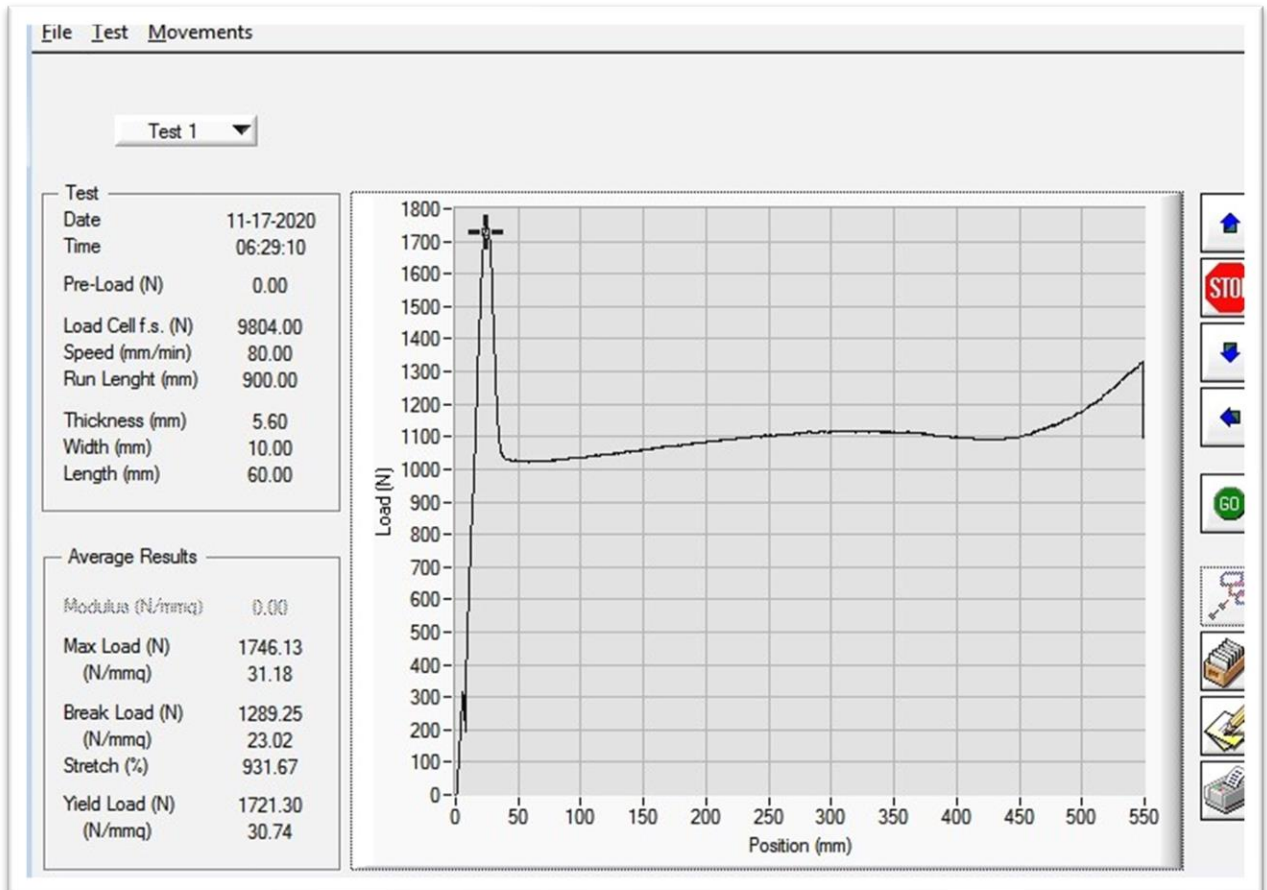
ASTM D1599, Standard Test Method for Resistance to Short-Time Hydraulic Pressure of Plastic Pipe, Tubing, and Fittings. 2018.

ANNEXES

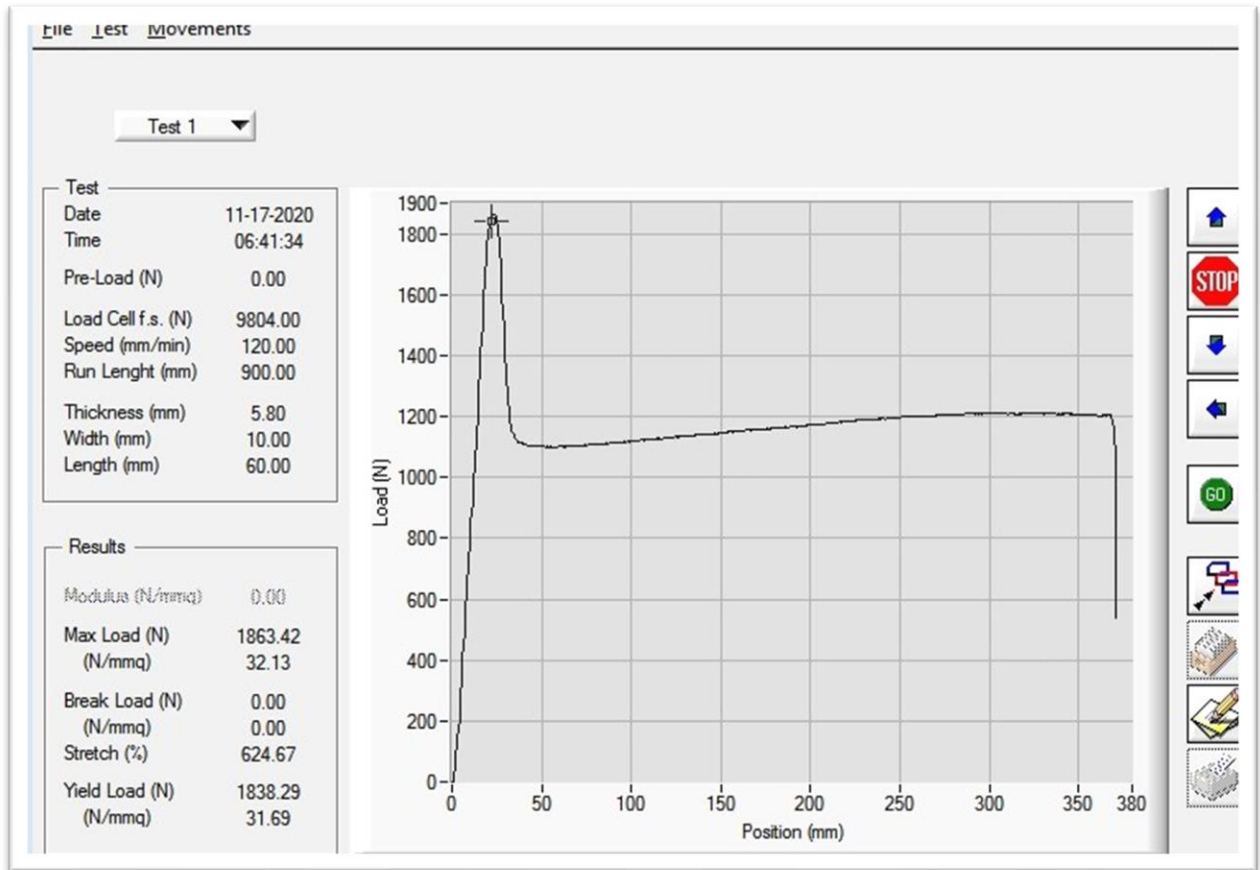
Annexe A : Courbe Charge (N) – Déplacement (mm) à 50 mm/min.



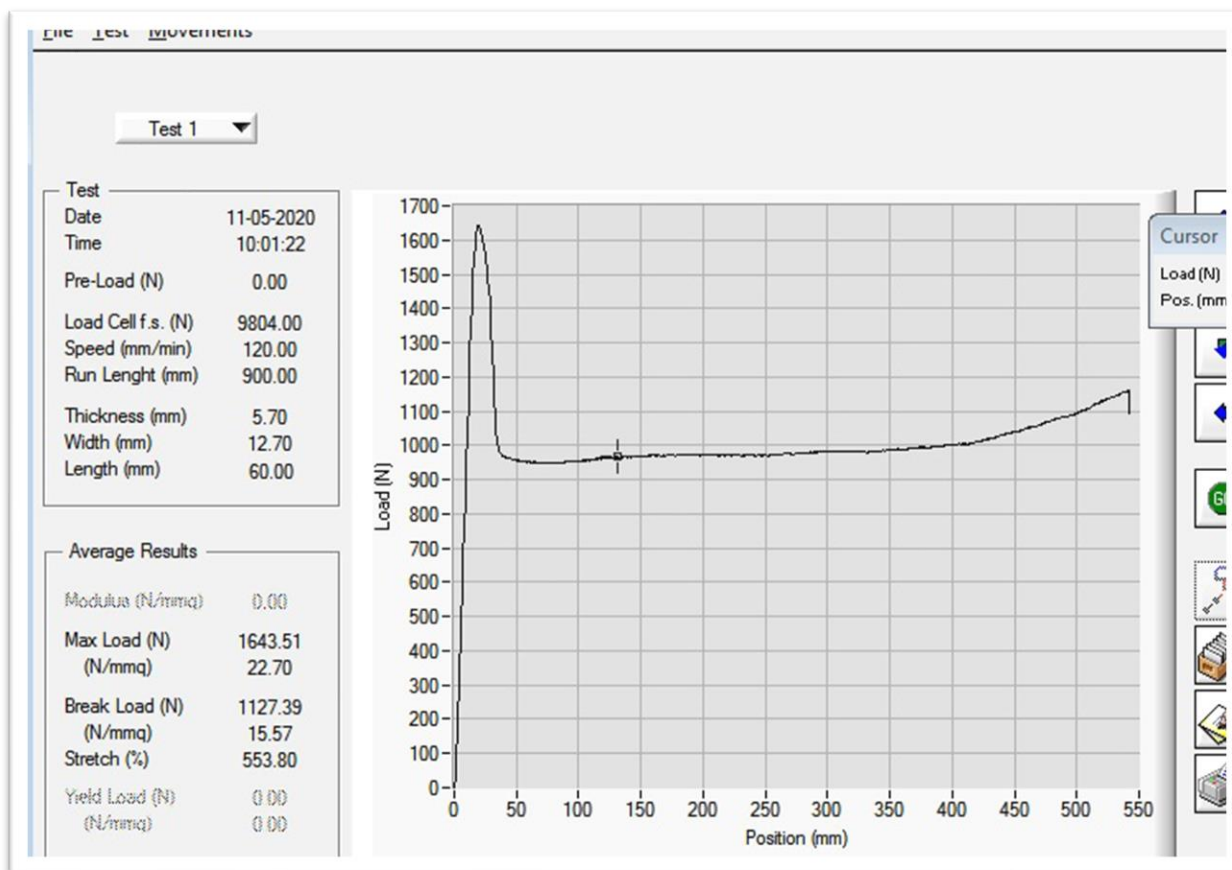
Annexe B : Courbe Charge (N) – Déplacement (mm) à 80 mm/min.



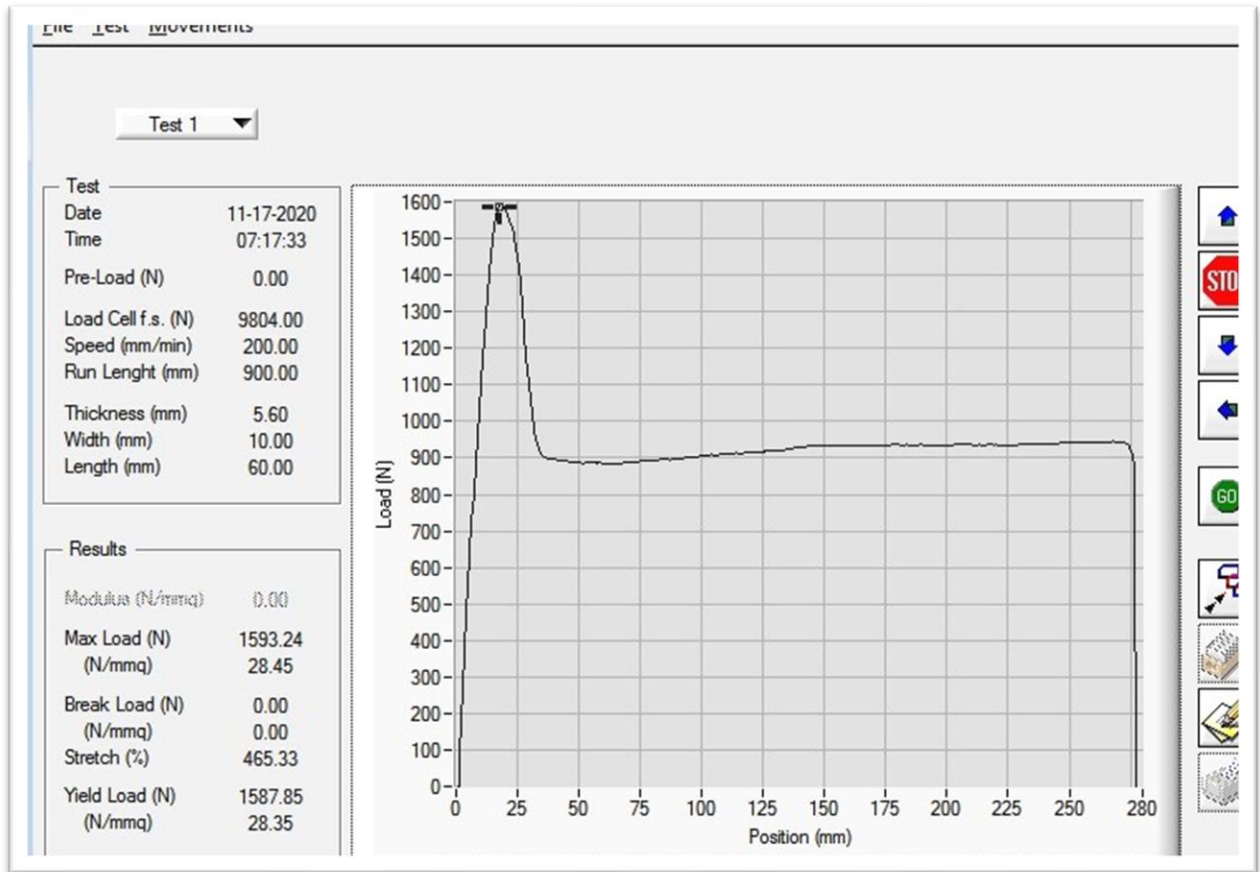
Annexe C : Courbe Charge (N) – Déplacement (mm) à 120 mm/min.



Annexe D : Courbe Charge (N) – Déplacement (mm) à 120 mm/min.



Annexe E : Courbe Charge (N) – Déplacement (mm) à 200 mm/min.



Annexe F : Courbe Charge (N) – Déplacement (mm) à 120 mm/min.

