

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR ANNABA-UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار عنابة

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

ETUDE EXPERIMENTALE DES DEFORMATIONS RESEDUELLES GLOBALE DANS UN TUBE EN PEHD

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE MECANIQUE

SPECIALITE : MECANIQUE DES MATERIAUX

PRESENTE PAR :

DAOUDI NABIL

DIRECTEUR DU MEMOIRE : Pr.CHAOUI KAMEL

DEVANT LE JURY

Président :

Pr : CHAOUL.K

Examineurs :

Pr : HAMADACHE .H

Pr : AMIRAT. A

Mr: BOUNAMOUS .B

Année 2018-2019

DEDICACES

Je dédie ce mémoire a :

Ma très chère femme, qui n'a cessé de me soutenir
moralement et m'encouragé durant ce cycle d'étude

Mes enfants : ghizlaine, ranime, et mon nouveau-né Ahmed

A ma mère

A mes frères

A man belle mère et ses enfants

A mes collègues de travail et particulièrement au commissariat
de sidi Salem et exceptionnellement à l'officier de police
bouaouadja fouez

Nabil

REMERCIEMENTS

*Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur **Chaoui Kamel**
Pour avoir accepté d'être rapporteurs de ce mémoire.*

*Je remercie également Monsieur **Niou Slimane** (de l'université
d'Annaba), Monsieur **Zeghibe.N**, Monsieur **Ben Gharsallah**, de
l'université Badji Mokhtar), pour leur contribution à l'avancée de ce
travail. Et aussi les jurys Monsieur **Amirat.A**, Monsieur
Hamadache.H, Monsieur **Bounamous.B**.*

*Plus généralement, je tiens à remercier tous les enseignants qui
m'ont aidé et qui m'enseignée durent les trois années*

Table des matières

Dédicaces	
Remerciements	
Table des matières	
Introduction générale	

CHAPITRE 1 : Bibliographie sur le matériau polyéthylène Et les contraintes résiduelles

1-Le Polyéthylène.....	1
1-1 Synthèse du PE – Historique.....	2
1-2 Le polyéthylène haute densité (PEHD).....	3
1-3 Caractéristiques mécaniques.....	3
1-4-1 Mises en forme des polymères.....	4
1-5 L'extrusion des tubes en PEHD.....	5
1-4 Le polyéthylène : un choix durable.....	7
1-5 Cycle de vie du tube PE (Polyéthylène).....	8
1-6 Avantages et Inconvénients du PEHD.....	8
2-1 Introduction aux contraintes résiduelles.....	9
2-2 Définition des contraintes résiduelles.....	9
2-3 Types des contraintes résiduelles.....	10
2-3-1 Selon l'échelle.....	10
2-3-1-1 Type I : contraintes résiduelles macroscopiques.....	10
2-3-1-2 Type II et III : contraintes résiduelles microscopique.....	10
2-3-2 Selon la cause :.....	11
2-3-2-1 Contraintes résiduelles thermiques.....	11
2-4-Méthodes génératrices des contraintes résiduelles.....	12
2-5-Méthodes de mesure des contraintes résiduelles.....	12
2-5-1- Méthodes non-destructives.....	12
2-5-2 Les méthodes destructives.....	13
2-5-3 Les Avantages et les inconvénients des méthodes de mesure des contraintes résiduelles.....	13

CHAPITRE 2 : Méthodes Expérimentales pour la Mesure des Déformations Résiduelles dans les Tubes en HDPE

2-1-Méthode de sectionnement	15
2-2- Méthode Expérimentale.....	16

2-2-1-Mesure de la déformation due aux contraintes résiduelles.....	16
2-3-Matériau.....	17
2-4- Préparation des éprouvettes d'essais.....	17
2-5-Procédure Expérimentale.....	21
2-6-Mesure de la déformation en fonction du temps.....	22

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION DES MESURES DE DEFORMATIONS RESIDUELLES

3-1Introduction	25
3-2 Résultats et discussion	25
3-2.1 Comportement de ΔD en fonction du temps, du diamètre et de L/D	25
3-2.2 Comportement de ε en fonction du temps, du diamètre et de L/D	27
3-2.2 Comportement de ε en fonction de $\ln t$	33
3-2-4 comparaisons de ε en fonction de t et en fonction de diamètre	38
3-2-5 Courbes de tendance.....	40
CONCLUSIONS.....	41
Liste des figures	42
Liste des tableaux.....	43
REFERENCES.....	45
ANNEXES.....	46

Résumé

La génération de contraintes internes à travers les parois de tubes extrudés est une des conséquences du procédé de fabrication thermomécanique des tubes en HDPE. Dans le but d'étudier l'évolution des déformations provoquées par ces contraintes résiduelles, des éprouvettes en anneaux ont été préparées au laboratoire à partir d'un tube de Polyéthylène de Haute Densité (HDPE) et tronçonnés suivant une génératrice longitudinale. Les éprouvettes ont été classées en deux types pour diamètre 90 mm et diamètre 110 mm. La procédure expérimentale consiste à mesurer la déformation au cours du temps en fonction de la largeur (longueur) de l'éprouvette. Il a été observé qu'à partir d'une période de 5 jours, on constate que la valeur de déformation évolue vers un plateau indiquant la tendance vers une constante. Cette observation est encore supportée par des valeurs de L/D allant vers un ratio de 2. Plus le diamètre est grand et plus cette tendance est vérifiée. On peut assumer qu'on évolue vers un état de déformation plane. Les courbes déformation-temps montrent un comportement de fluage typique des matériaux viscoélastiques semi-cristallins comme le HDPE.

Abstract

The generation of internal stresses through the walls of extruded tubes is one of the consequences of the thermo mechanical manufacturing process of the HDPE tubes. In order to study the evolution of the deformations caused by these residual stresses, ring specimens were prepared in the laboratory from a tube of High Density Polyethylene (HDPE) and cut along a longitudinal generative. The specimens were classified into two types for diameter 90 mm and diameter 110 mm. The experimental procedure consists of measuring the deformation over time in relation to the width (length) of the test piece. It has been observed that from a period of 5 days, it is found that the deformation value evolves towards a plateau indicating the tendency towards a constant. This observation is still supported by L / D values going to a ratio of 2. The larger the diameter, the more this trend is verified. We can assume that we are moving towards a flat state of deformation. Deformation-time curves show typical creep behavior of semi-crystalline viscoelastic materials such as HDPE.

LISTE DES FIGURES

Figure1-1 : Matière première PE sous forme de granules et tube PEHD.....	3
Figure1- 2 : Schémas de profilés avec leurs filières.....	6
Figure 1-3 : Représentation des installations d'extrusion des tubes PEHD.....	7
Figure 1-4 : Deux exemples de profilés creux d'une extrudeuse	7
Figure2-1 : découpe suivant la génératrice et profil de contrainte avant l'ouverture.....	16
Figure2-2 : Tour parallèle universel.....	18
Figure2-3 : montage mixte (Mandrin + poupée + Mandrin en bois).....	18
Figure2-4 : l'opération de coupe de tube PEHD.....	19
Figure2-5 : Eprouvettes forment des couronnes (anneau) de diamètre 90mm.....	20
Figure2-6 : des éprouvettes forme de couronnes (anneau) de \varnothing 110.....	21
Figure 2-7 : éprouvette non chevauchée après sectionnement.....	21
Figure 2-8 : Schéma représentatif de l'angle (60°) de sectionnement	21
Figure 3-8 : éprouvette avant et après sectionnement.....	22
Figure : 4-1 : une réglette millimétrique et flexible.....	23
Figure 3-1 : 3 essais de mesures pour chaque cas en fonction du temps, du diamètre et du rapport L/D.....	27
Figure 3-2 : Courbes de déformation en fonction du temps et de la longueur pour diamètre 90 mm ; a) Longueur 9 mm ; b)- Longueur 45 mm ; c)- Longueur 90 mm ; d)- Longueur 135 mm ; e)- Longueur 180 mm	30
Figure 3-3 : courbes de déformation en fonction du temps pour diamètre 110 a)-Longueur 11 mm, b)- Longueur 55 mm c)- Longueur 110 mm ; d)- Longueur 165 mm ; e)- Longueur 220 mm.....	32
Figure 3-4 : courbes de ε en fonction du $\ln(t)$ pour diamètre 90 mm pour différentes longueurs a)-Longueur 9 mm ; b)- Longueur 45 mm ; c)- Longueur 90 mm ; d)- Longueur 135 mm ; e)- Longueur 180 mm.....	35
Figure 3-5 : courbes de ε en fonction du $\ln(t)$ pour diamètre 110 mm pour différentes longueurs.....	37
Figure 3-6 : Courbes de comparaison des déformations on fonction du $\ln(t)$ de diamètres 90 et 110 pour des longueurs différentes	40
Figure 3-7 : Courbes de tendance pour diamètre 90 des longueurs variées.....	42
Figure 3-8 : Courbes de tendance pour diamètre 110 des longueurs variées.....	44

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1: Principales propriétés des différents types de PE	2
Tableau I. 2 : Classification du polyéthylène selon MRS.....	4
Tableau 1-3 : Origine et niveau des contraintes internes dans les polymères.....	10
Tableau 3- 1 : Caractéristiques Technique du HDPE-100.....	17
Tableau 3-2 : Codification et largeurs des éprouvettes usinées en forme de couronnes (Diamètre 90).....	19
Tableau 3-3 : Codification et largeurs des éprouvettes usinées en forme de couronnes (Diamètre 110).....	20
Tableau 3.1a : Dimensions géométriques des éprouvettes d'essais $\phi=90\text{mm}$	25
Tableau 3.1b : Dimensions géométriques des éprouvettes d'essais $\phi=110\text{mm}$	26

Introduction :

Depuis plusieurs décennies, les matériaux polymères ont vu leur utilisation croître dans divers domaines à travers le monde. Les applications liées aux canalisations sous pression (transport d'eau potable, d'eau chaude, d'eaux usées ou encore de gaz) en sont un exemple frappant. En effet, leur facilité de mise en œuvre, leur faible coût de production et leurs caractéristiques mécaniques intéressante et variées, sont autant d'atouts qui ont conduit les opérationnels à privilégier ce type de matériau.

Cependant, ces structures en polymère doivent être conçues et dimensionnées de façon à supporter les contraintes (mécaniques et environnementales) auxquelles elles sont exposées pendant le service. Pour mieux prédire leur ruine, il est donc important de bien connaître le comportement mécanique des polymères, ainsi que leur mode d'endommagement, en fonction du type de chargement qu'ils subissent. Aussi, il faut bien comprendre leur structure et leur morphologie en fonction des conditions de fabrication. Ces dernières imposent des contraintes internes liées aux différents gradients de température subis lors de l'extrusion ou du moulage.

Parmi les matériaux polymères utilisés dans le transport de fluide, on peut citer le polyéthylène haute densité (HDPE), qui représente depuis les années 1990, une part importante dans les nouveaux branchements reliant les compteurs des abonnés au réseau de distribution d'eau potable ou de gaz naturel. Le réseau de distribution de l'eau potable en Algérie s'agrandit régulièrement. Actuellement, la plus part des communes sont desservies par un réseau dont la taille atteint environ 170000 km. Les premiers réseaux de distribution étaient essentiellement constitués de tubes en acier et en fonte, mais depuis l'introduction du polyéthylène pour la fabrication des canalisations de l'eau potable à la fin des années 80, son utilisation ne cesse de s'accroître. Le choix du polyéthylène (PE) pour la fabrication des tubes de distribution de devenu un nécessité pour les entreprises d'eau et de gaz.

Le polyéthylène est un thermoplastique semi-cristallin. La déformation plastique des thermoplastiques semi-cristallins a longtemps constitué un sujet d'actualité pour la communauté scientifique. Un comportement qui se caractérise par une grande diversité apparente dans les mêmes conditions expérimentales, on peut retrouver un grand nombre de types de comportement, à savoir la viscoélasticité, l'hyper-élasticité, l'élasto-plasticité ... etc. La complexité microstructurale des polymères semi-cristallins pose de sérieux problèmes. En effet, bien que le cisaillement plastique à volume constant soit toujours considéré dans la littérature comme le processus majeur qui contrôle la plasticité. Les aspects de recherche scientifique impliquant différents matériaux en polyéthylènes sont multiples et ont attiré à

des domaines variés. Il sont utilisés en tant que pièces mécaniques, prothèses médicales, accessoires de voitures, d'avions, dans les réseaux de transport d'eau et d'hydrocarbures, comme revêtements sur des câbles et sur des pipelines, dans les systèmes de drainage en agriculture, en géothermie comme membranes, isolants thermiques ou électriques et dans tant d'autres applications. Pour ces raisons, la production du matériau polyéthylène à partir d'hydrocarbures est constamment en augmentation (matériau vierge) et des quantités énormes sont récupérées après usage pour réutilisation (matériau recyclé).

Actuellement, entre 7 et 10% de la production mondiale est exploitée dans la production de tubes en polyéthylène basse densité (LDPE), moyenne densité (MDPE), haute densité (HDPE) et sous formes de polyéthylènes de haut ou très haut poids moléculaire (HMWPE ou UHMWPE). Dans le domaine de transport de fluides (liquides et gaz), la recherche actuelle a montré que les tubes en copolymères de HDPE représentent la meilleure solution en termes de résistance mécanique et de durabilité face aux agressions chimiques de l'environnement. La problématique des propriétés mécaniques des structures tubulaires en HDPE alimente de manière continue par le biais de résultats importants les thématiques qui touchent à l'hétérogénéité des propriétés, à la vie en fatigue, en fluage, aux effets des environnements agressifs (acides, hydrocarbures, alcalins, eau, huiles minérales...), à l'effet de la chaleur, à la durabilité aux contraintes résiduelles et à la fiabilité suite aux sollicitations du sol d'enfouissement...

Les méthodes de caractérisation des propriétés intrinsèques se sont vues aussi évoluer pour faire la meilleure représentation de chaque usage et de ses retombées scientifiques et économiques. Comme les études de modélisation du comportement mécanique se basent sur les résultats expérimentaux, chaque mesure et chaque information acquise après utilisation dans des conditions réelles de service devient de valeur. Elles sont utilisées dans le but d'extraire des modèles valables dans des limites dictées par les conditions d'essai comme dans le cas de la résistance à la fissuration, la vie en fatigue, le fluage et la relaxation.

Le Laboratoire de Recherche en Mécanique des Matériaux et en Maintenance Industrielle de l'UBM Annaba a initié plusieurs études expérimentales et de modélisation en relation avec les tubes en polyéthylène destinés à la distribution de gaz naturel et au transport d'eau. Les résultats présentent des caractéristiques du comportement instantané et aussi à long terme (rupture ou relaxation de contraintes résiduelles). Certaines études ont porté sur la rupture, sur les contraintes résiduelles, la fatigue, l'usinage des PE, l'évolution des propriétés mécaniques, le soudage bout à bout, la dégradation et propriétés de surface. L'objectif général est d'examiner les thèmes suivants :

- Trouver des approches expérimentales pour l'étude de l'évolution des propriétés à travers la paroi d'un tube extrudé.
- Mettre au point la méthode appropriée pour la préparation d'éprouvettes usinage pouvant rendre compte de l'état réel existant dans la paroi tubulaire (conditions de coupe et d'influence sur les résultats).
- Adapter les techniques de mesure issues des applications avec les aciers vers les conditions des polyéthylènes et savoir interpréter les différences (rugosité, efforts de coupe, propriétés mécaniques, dégradation...)
- Etablir le profil des contraintes ou déformations résiduelles dans les nouvelles résines en HDPE et leur influence sur les propriétés mesurées.
- Etendre la plage des propriétés vers des mesures plus complexes comme l'énergie de rupture (critique) (K_{Ic} ou J_{Ic}), le travail irréversible (W_i) de déformation et les paramètres de dégradation (OIT...).
- Caractériser l'interaction tube HDPE avec les environnements de service (sol d'enfouissement, fluides transportés, effet de joints de soudure, de la température, de la pression de service, de la rugosité, des effets de la manutention et du transport des tubes...)

Dans ce travail, on s'intéresse aux déformations résiduelles et l'effet du rapport L/D sur la constance des valeurs de déformation obtenues. Le travail présenté est structuré en 3 parties : (1) une bibliographie sur le matériau polyéthylène et les contraintes résiduelles, (2) une partie décrivant les méthodes expérimentales et enfin (3) une partie qui présente et discute les résultats obtenus.

CHAPITRE 1
**Bibliographie sur le matériau
polyéthylène et les contraintes résiduelles**

1- Le Polyéthylène :

L'introduction du polyéthylène « PE » dans la fabrication des tubes de pression remonte à la fin des années 60, où la société « BRITISH GAS » utilisa ces tubes, pour la première fois pour ses canalisations de gaz.

Dans la période entre 1970 et 1990, ce matériau a connu une véritable révolution conduisant à de nouvelles générations de grandes performances ayant une durée de vie de plus de 100 ans, une durée qui dépasse largement la limite de tolérance demandée par les normes qui est de l'ordre de 50 ans. Ce développement confère au PE d'être le matériau le plus adéquat pour les systèmes de tubes de pression notamment pour le transport du gaz et de l'eau potable, et par conséquent d'être de plus en plus utilisé en remplaçant les matériaux traditionnels tels que la fonte et l'acier.

Les atouts des tubes en PE sont nombreux entre autres leur grande capacité d'écoulement avec un minimum de perte de pression, le coût et le temps d'installation sont réduits et l'assemblage est simple et ferme assurant un minimum de fuites. Ceux-ci leur permettent de conquérir d'importantes parts du marché mondial, et en particulier le marché européen des tubes.

Ces avantages ont amené les secteurs algériens de gaz et d'eau à inclure de plus en plus les tubes en PE dans leurs programmes pour l'extension des réseaux de distribution du gaz et de l'eau potable ainsi que pour la réhabilitation des anciennes canalisations, et cela à partir de la fin des années 90.

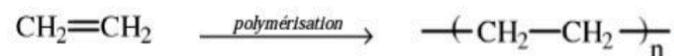
De nos jours, il existe environ 20 entreprises algériennes qui fabriquent les tubes de pression en PE. La gamme actuellement produite va du diamètre 20 au diamètre 630 mm avec des pressions de service jusqu'à 16 bars. Parmi lesquelles, cinq entreprises (STPM CHIALI, TUBEX, MAPROGAZ, K-PLAST et PROFIPLAST, SARL TUBOGAZ) sont actuellement agréées par la société « SONELGAZ » pour la fourniture des tubes pour le transport du gaz.

La cherté de la matière première ainsi que sa non disponibilité sur le marché algérien ont conduit les fabricants de tubes à investir dans la récupération de leurs déchets de production plus particulièrement les fabricants de tubes de grand diamètre, en raison de l'importance de la quantité de déchets issue de la production. La résine ainsi récupérée est mélangée avec la résine vierge puis réintroduite dans le même cycle de transformation afin de

Produire de nouveaux tubes pour des applications similaires ou pour d'autres moins exigeantes.

1-1- Synthèse du PE – Historique

Le polyéthylène (PE) est un polymère appartenant à la famille des polyoléfines dont la formule générique est donnée ci-dessous : où R et R' sont soit des atomes d'hydrogène (cas du PE), soit des groupements alkyles. Le polyéthylène est obtenu par polymérisation des monomères d'éthylène :



Il existe différents modes de polymérisation : le procédé "haute pression" et les procédés "basses pressions". Les conditions de synthèse du polyéthylène influent énormément sur la structure du produit final. Le PE est semi-cristallin à la température ambiante, c'est-à-dire que deux phases coexistent : une phase amorphe caoutchoutique, et une phase cristalline (rigide).

On classe habituellement les PE, selon leurs propriétés à 23 °C données au Tableau 1, en trois types :

- Le PE basse densité (PEbd)
- Le PE moyenne densité (PEmd)
- Le PE haute densité (PEhd)

Tableau I.1 : Principales propriétés des différents types de PE

Propriétés	Unités	PEbd	PEmd	PEhd
Masse volumique	g.cm-3			
Cristallinité	%	g.cm-3 0,915 à 0,935	0,93 à 0,945	0,945 à 0,970
Température de Fusion	°C	< 40	40 à 60	60 à 80
Température de transition vitreuse	°C	105 à 115	-	118 à 146
Contrainte à la rupture	MPa	8 à 15	18 à 28	26 à 40
Allongement à	%	150 à 1000	200 à 1200	20 à 1000

rupture				
---------	--	--	--	--

Le taux de cristallinité du polyéthylène est intimement lié à sa densité : un PE sera d'autant plus dense qu'il est cristallin. Cette structure confère au PEHD de bonnes propriétés mécaniques élastiques dues à des modules très élevés (module d'Young E ou de cisaillement G par exemple), c'est pourquoi il est principalement utilisé pour la fabrication de produits rigides (tubes, flacons par exemple). Le PEBD quant à lui, a des applications plus restreintes, comme des produits souples (films, sachets...).

1-2- Le polyéthylène haute densité (PEHD) :

Le polyéthylène haute densité (PEHD) a été synthétisé en 1953 par le chimiste allemand Karl Ziegler, les propriétés des polyéthylènes dépendent essentiellement de trois paramètres structuraux à savoir : la cristallinité, la masse moléculaire et la distribution des masses moléculaires.



Figure 1-1 : Matière première PE sous forme de granules et tube PEHD

Le taux de cristallinité est élevé dans le cas du PEHD homopolymère, du à la structure linéaire de ses chaînes qui se replient facilement pour former des cristallites. L'incorporation des branches courtes dans les chaînes linéaires, favorisant l'encombrement stérique, abaisse la cristallinité. La diminution du taux de cristallinité amené a la diminution de la densité, et par conséquent a l'augmentation de certaines propriétés mécaniques comme la résistance au choc [3].

Le PEHD à l'état fondu présente un comportement viscoélastique non linéaire, cela signifie que sa viscosité diminue avec l'augmentation du cisaillement. Lors de l'extrusion, le polyéthylène est soumis à un gradient de vitesse de cisaillement, du cylindre de

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

La mesure de l'indice de fluidité à chaud (IF) permet d'estimer la viscosité à une vitesse de cisaillement donnée [5]. La rigidité et la dureté du PEHD augmentent avec la densité, et donc avec la cristallinité. La rigidité est mesurée au moyen de module d'élasticité qui varie d'environ 1600 MPa (dans le cas du PEHD, Le point de fusion du PEHD se situe entre 120 et 136°C. La conductivité thermique et le coefficient de dilatation thermique linéaire sont fonction du taux de cristallinité, ils sont plus élevés pour les homopolymères que les copolymères. Il résiste bien aux acides forts (les acides inorganiques) et les bases fortes (les solutions salines), mais il est attaqué par les acides oxydants (les acides nitriques concentrés) [6].

1-3- Caractéristiques mécaniques

Les résines polyéthylène sont classées en fonction de leur résistance à long terme (MRS : Minimum Required Strength) :

Tableau I. 2 : Classification du polyéthylène selon MRS

Classification MRS suivant ISO	MRS, MPa	Résistance hydrostatique à LT, à 20°C ; MPa
PEhd 3ème génération PE 100	10.0	8.0
PEhd 2ème génération PE 80	8.0	6.3
PEhd 1ère génération PE 63	6.3	5.0
PEhd PE 40	4.0	3.2
PEhd PE132	3.2	2.5

La résistance hydrostatique à long terme à 20°C est définie par la contrainte minimum requise à long terme (MRS), sur laquelle est appliqué un coefficient de sécurité (C = 1,25 pour l'eau).

1-4- Mises en forme des polymères :

Les techniques de transformation des plastiques dépendent de la nature des polymères et de la destination des produits finis. Quelques méthodes sont régulièrement utilisées pour la fabrication des pièces et des objets en polymère. Les principaux procédés de fabrication industrielle sont : l'injection, l'injection soufflage, l'extrusion, l'extrusion

Soufflage, le thermoformage, etc. Dans ce qui va suivre et pour notre étude nous allons nous intéresser au phénomène d'extrusion des tubes.

L'extrudeuse seule ne saurait suffire à garantir la qualité du produit.

D'autres éléments intervenant le long de la ligne de fabrication auront un rôle important à jouer. En plus du groupe d'extrusion (extrudeuse et tête), on retrouvera dans toutes les lignes des dispositifs de dosage, des bacs de refroidissement, des éléments de mesure de diamètre et des bobinoirs (stockage en bobine pour des tuyaux de faible diamètre) ou des scies (stockage en segment de longueurs fixes).

1-5- Extrusion des tubes en PEHD :

L'extrusion est un procédé de fabrication mécanique par lequel un matériau mis sous pression est contraint de traverser une filière (outillage), qui lui donnera la forme d'un profilé de grande longueur. Ce procédé donne des pièces aux formes encore plus précises, que celles qui sont réalisées avec l'estampage ou le matriçage et présentent des états de surface excellents, ce qui permet souvent de les utiliser sans usinage complémentaire.

L'extrusion s'applique à divers produits comme les métaux, les matières plastiques, les caoutchoucs, les matériaux composites et même produits alimentaires (les pattes). Elle permet d'obtenir des formes très complexes et des profilés creux, figure 1-2

Pour les tubes en PEHD, l'extrusion donc est un processus technologique continu (une injection continue). Elle transporte le long du cylindre (fourreau) la matière du point d'alimentation à la filière, elle plastifie grâce au malaxage et à la chaleur (la température maximale d'extrusion pour les polymères de commodité est 2300C) ; elle fait augmenter la pression et force la matière à passer par une filière qui donne la forme désirée.

En sortie de filière, le polymère encore fondu subit un étirage isotherme à l'air libre sur une distance variable de quelques centimètres. Avec une certaine portée, l'extrudât est encore dans un état visqueux, un rapide refroidissement est nécessaire pour éviter une déformation ou un fléchissement désagréable ; ceci est obtenu par passage dans un calibre.

La surface extérieure du tube encore chaude, en contact avec la surface intérieure froide de l'alésage du calibreur, se refroidit plus vite que les autres surfaces intérieures du

Tube ; un gradient de température est perceptible, provoquant un changement structural instantané radial ; des zones cristallines peuvent naître. Ceci a été expliqué par le procédé de production des tubes basé sur un système convecteur d'écoulement d'eau avec un gradient de température, qui produit des contraintes résiduelles.

On ajoute aussi, que ce processus de fabrication des tubes est voulu mécaniquement. Évidemment, le calibre froid a également d'autres avantages lors du refroidissement, il génère une double structure amorphe/semi cristalline alliant les bonnes propriétés mécaniques. Ainsi, au contact du calibre une zone plus amorphe (zone de peau) se crée en surface, assure la ductilité du matériau.

Celle-ci enveloppe une zone semi cristalline au cœur plus résistante, ce qui donne au matériau de bonnes propriétés mécaniques et notamment une bonne tenue aux efforts de flexion et de compression, dont nos tubes enterrés sont soumis réellement.

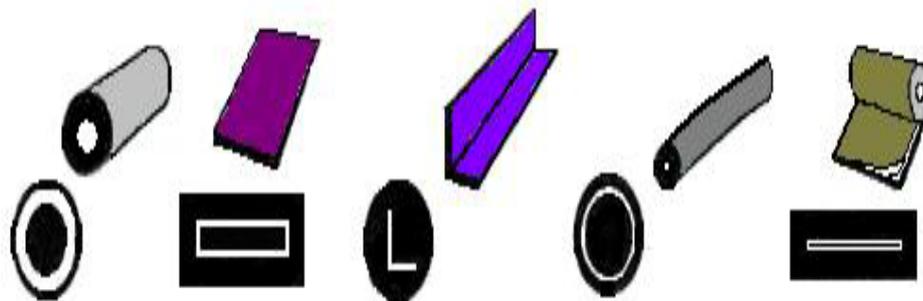


Figure 1-2 : Schémas de profils avec leurs filières.

Si le refroidissement est rapide et d'une manière homogène, le caractère amorphe sera largement favorisé.

La température de cristallisation a également une influence sur la morphologie cristalline, si cette température est basse, la germination est favorisée mais la vitesse de croissance sera faible et on obtient plusieurs zones cristallines de petites tailles. Si la température est élevée, peu de germes naissent et l'agitation thermique favorise la croissance, ce qui donne alors un petit nombre de zones cristallines de grande taille.

Cette situation génère aussi un gradient de contraintes qui existeront sous diverses façons et influenceront différemment les résines du tube durant la vie de service.



Figure 1-3 : Représentation des installations d'extrusion des tubes PEHD

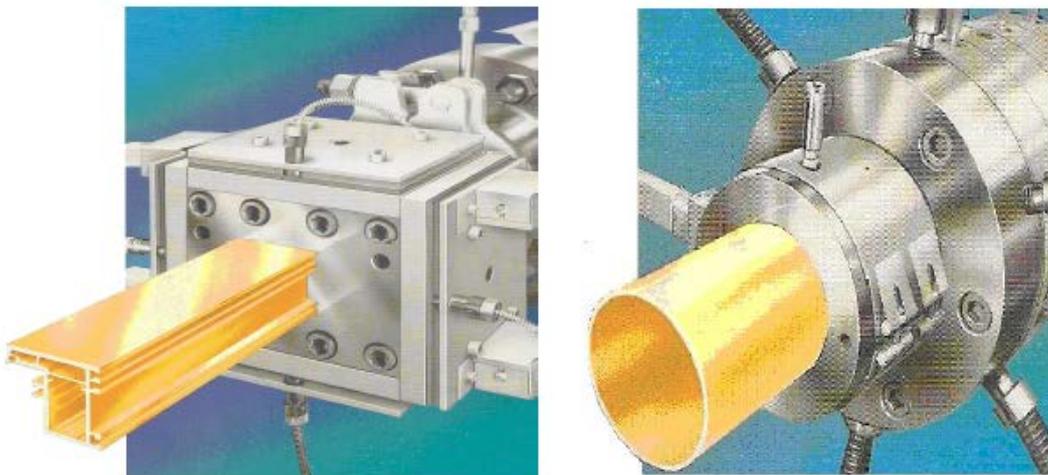


Figure 1-4 : Deux exemples de profilés creux d'une extrudeuse.

1-6- Le polyéthylène : un choix durable

Le PEHD est utilisé depuis plus de 30 ans à grande échelle pour la réalisation de réseaux hydrauliques de toutes sortes et sa fiabilité exceptionnelle n'est plus à démontrer. Le PEHD possède donc des caractéristiques mécaniques supérieures et permet de fabriquer des

tubes de pression nominale plus élevée (jusqu'à 25 bar) avec épaisseurs réduites. La contribution du PE à l'amélioration du rendement des réseaux est importante et durable :

- Homogénéité des tubes et raccord offrant la garantie d'une absence de corrosion par le terrain.
- Flexibilité lui permettant d'accepter sans dommage les éventuels mouvements du terrain.
- Raccordement par soudage afin d'éliminer le maximum de joints enterrés tout en renforçant mécaniquement la canalisation.
- Résistance durable à la pression et aux surpressions alliées à une durée de vie importante : 16 bar à 50 ans à 20°C et avec un coefficient de sécurité à l'éclatement supérieur à 3.
- Performance hydraulique durable : encrassement insignifiant, pertes de charges réduites et haute résistance à l'abrasion.

1-7- Cycle de vie du tube PE (Polyéthylène)

La production de tubes et canalisations polyéthylène PEHD n'émet aucun rejet dans l'environnement. 100% des rebuts de production sont recyclés sur site et l'eau servant au refroidissement des canalisations produites circule en circuit fermé. En conséquence, aucun rejet n'est à craindre pour l'environnement.

La fiabilité du polyéthylène PEHD en termes d'étanchéité surclasse tous les autres matériaux. Sa flexibilité lui permet de s'adapter à tous les terrains, sans risque de casse ou de fuites. Le réseau soudé, son taux de défaillance est proche de ZERO, même sous contraintes. C'est un matériau extrêmement résistant, ce qui explique son expansion sous tous les climats et permet de préserver de manière considérable la ressource en eau. Le polyéthylène est le matériau le plus utilisé au monde pour sa fiabilité.

1-8- Avantages et Inconvénients du PEHD :

- Avantages :

- Mise en œuvre aisée.
- Excellentes propriétés d'isolation électrique.
- Résistance aux chocs.

- Grande inertie chimique.
- Qualité alimentaire
- Perte du caractère perméable des PE que ce soit à l'eau, mais aussi à l'air et aux hydrocarbures

- Inconvénients :

- Sensibilité aux UV en présence d'oxygène.
- Sensibilité à la fissure sous contrainte
- Mauvaise tenue à la chaleur.
- Collage important. [3]

2-1 Introduction aux contraintes résiduelles

Les thermoplastiques issus du moulage-injection contiennent des contraintes résiduelles qui existent dans l'objet avant sa mise en service, et qui sont la conséquence du taux de refroidissement différentiel (profil de température non uniforme). Bien que ces contraintes soient généralement trouvées dans les polymères, leur ampleur peut être extrêmement difficile à prévoir car ils dépendent d'un large éventail de variables, y compris la conception du moule, la matière et les paramètres de traitement. Ces contraintes peuvent réduire considérablement la durée de vie des produits de polymère, augmentant la probabilité d'instabilité dimensionnelle (déformation) et de l'environnement (fissuration sous contrainte).

2-2 Définition des contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles peuvent être définies comme étant les contraintes qui subsistent dans une matière après la fabrication et de la transformation de la matière en l'absence de forces extérieures ou des gradients thermiques. Elles sont en équilibre sur toute la section transversale du matériau et contribuent à son énergie potentielle. Les contraintes résiduelles peuvent également être produites par une charge de service, ce qui conduit à une déformation plastique non homogène dans la pièce ou l'échantillon. Les contraintes résiduelles peuvent être définies comme étant des contraintes macro ou micro et les deux peuvent être présents dans un composant en une seule fois. L'origine et le niveau des contraintes résiduelles sont résumés dans le tableau 1-3 :

Tableau 1-3 : Origine et niveau des contraintes internes dans les polymères.

Source	Origine	Paramètre	Niveau
Propriétés intrinsèques du matériau			
Anisotropie	Expansion thermique	d/dT	Meso
Hétérogénéité	Expansion volumique	dV / dT	Micro
Conditions de mise en œuvre			
Gradient thermique Peau-cœur	Volume change avec le temps	dV / dT	Macro
Morphologie Peau-cœur	Changement du volume total	$(dV / dT)_{total}$	Macro
Conditions environnementales			
Expansion thermique	Gradient de température	dT/dz	Macro

2-3 Types des contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles peuvent être classées selon l'échelle sur laquelle elles s'auto équilibrent (type I, II ou III), ou par la cause (par exemple de variation thermique, d'écoulement ou élastique)

2-3-1 Selon l'échelle :

2.3-1-1 Type I : contraintes résiduelles macroscopiques

Les contraintes résiduelles proviennent d'inadaptations entre les différentes régions. Dans de nombreux cas, ces inadaptations s'étendent sur de grandes distances, par exemple, celles causées par la déformation plastique non uniforme d'une barre coudée. Elles peuvent également provenir de gradients thermiques nets, par exemple, celles provoquées par les opérations de soudage, de traitement thermique, au cours du refroidissement, ou sous l'effet de la pression de maintien lors du moulage par injection.

2-3-1-2 Type II et III : contraintes résiduelles microscopiques :

Ce sont les contraintes résiduelles qui varient à l'échelle du grain (contraintes inter granulaires de type II) ou à l'échelle atomique (type III). Dans ces cas, les zones d'inadaptations s'étendent sur des dimensions microscopiques ou submicroscopiques. Des contraintes de type II, faible niveau, existe presque toujours dans les matériaux poly cristallins

Simplement du fait que les propriétés élastiques et thermiques des grains voisins, orientés différemment, sont différentes.

Des contraintes plus importantes se produisent à l'échelle du grain lorsque la microstructure contient plusieurs phases ou bien quand une transformation de phase a lieu. La catégorie de type III comprend, généralement, les contraintes dues à la cohérence au niveau des interfaces et des champs de contraintes de dislocation. Ceci se produit, par exemple, pendant le durcissement de pièce à matrice thermodurcissable.

2-3-2 Selon la cause :

2-3-2-1 Contraintes résiduelles thermiques

Des contraintes résiduelles thermiques apparaissent si la dilatation ou la contraction thermique d'une pièce est entravée. Pour les matériaux polymères, les contraintes thermiques ont pour origine :

- Une distribution irrégulière de la température pendant le refroidissement de la matière fondue.
- Une variation de la température appliquée à la pièce finie.
- Un équilibre impossible entre dilatation et contraction.
- Une différence de coefficients de dilatation thermique dans le cas de la combinaison de matériaux.

Lors de la mise en forme des thermoplastiques, la pièce finie est refroidie d'une température très supérieure à la température de ramollissement jusqu'à température ambiante. La zone de peau, proche de la paroi du moule ou en contact avec l'air après le démoulage et qui refroidit par conséquent rapidement, est la première à atteindre la zone de vitrification, d'où une augmentation du module d'élasticité. La zone de peau est donc plus rigide et sa relaxation est lente.

La contraction thermique de la zone de cœur, dont le refroidissement est retardé, est alors ralentie. Ceci explique l'apparition de contraintes résiduelles de tension dans la zone de cœur et de contraintes résiduelles de compression dans la zone de peau. La formation des contraintes thermiques Plusieurs effets se superposent dans les conditions normales de refroidissement des thermoplastiques semi- cristallins. Dans la zone de peau, la cristallisation est gênée par la vitesse élevée de refroidissement. Dans la zone de cœur, le refroidissement

Ralenti et retardé permet d'obtenir un taux de cristallinité plus élevé, d'où une augmentation non négligeable de la masse volumique, l'augmentation de la masse volumique, qui peut être interprétée comme une diminution du volume, entraîne la formation de contraintes internes supplémentaires.

Un recuit à une température inférieure à la température de fusion peut accroître le taux de cristallinité de la zone de peau. A la suite de cela, les contraintes internes de compression et donc les contraintes internes de tension dans la zone de cœur disparaissent, ceci peut conduire simultanément, à la suite d'une post-cristallisation et de la croissance des cristallites, à une augmentation de la masse volumique et à une modification de la topologie avec la formation de cavités autour des sphérolites.

Ces modifications superficielles peuvent être accompagnées du développement de contraintes internes de tension microscopiques entre les sphérolites. Les contraintes internes de refroidissement les plus importantes se développent dans un moule froid pendant les procédés de moulage par injection des thermoplastiques.

2-4- Méthodes génératrices des contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles sont introduites presque par toutes les techniques utilisées dans la transformation des polymères, telles que le moulage par injection, l'extrusion, etc. A l'échelle du laboratoire, on connaît deux méthodes valables permettant l'introduction de contraintes résiduelles dans le polymère, qui sont le refroidissement non uniforme (trempes thermique), et la déformation plastique non uniforme (laminage à froid).

2-5- Méthodes de mesure des contraintes résiduelles

2-5-1- Méthodes non-destructives :

Les méthodes non-destructives sont fondées sur les relations entre les caractéristiques physique ou cristallographique du matériau et le champ des contraintes résiduelles existant dans la pièce parmi ces méthodes nous pouvons citer :

- la méthode par diffraction des rayons x
- la méthode par ultrasons
- La méthode par effet barkhausie

2-5-2- Les méthodes destructives

Ces méthodes sont de loin les plus répandues, car elles permettent d'étudier tous les plastiques. Il s'agit pour la plupart de méthodes mécaniques dans lesquelles on analyse les courbures ou les déformations induites par une perturbation du milieu (perçage d'un trou, pelage de couches successives). Nous avons relevé essentiellement trois techniques, mais seules les deux premières rencontrent un véritable succès dans la mesure où leur interprétation physique est très claire [7] :

- A)- Technique d'enlèvement de couche ou méthode de la flèche
- B)- méthodes du Laser à excimères
- C)- La technique de perçage d'un trou "Hole Drilling Method"
- D)- La méthode de relaxation de contrainte

2-5-3 Les Avantages et les inconvénients des méthodes de mesure des contraintes résiduelles

Les différentes méthodes de mesure des contraintes ont chacune des avantages et inconvénients pratiques et techniques. En effet, la technique d'enlèvement de couche, l'équation (I.1) montre que la valeur en peau est directement reliée à la pente de la courbe. En conséquence, il est nécessaire d'effectuer un pelage très fin en peau. Ceci est bien sûr assez subjectif et l'on peut regretter que cette méthode soit imprécise là où la contrainte est importante à connaître pour l'expérimentateur. L'opération est répétée N fois, ce qui modifie l'état des contraintes internes.

La préparation d'échantillons comporte des opérations de découpage et d'usinage qui accentuent l'incertitude de la méthode. En plus, cette méthode, nécessite beaucoup de temps est difficile à interpréter est incapable de fournir des informations quantitatives pour des buts comparatifs. Généralement, pour les matériaux non transparents, le choix est limité aux tests destructifs.

La méthode de perçage de trou a été la seule méthode destructive qui a permis de mesurer le champ de contrainte résiduelle biaxial à la surface du matériau ; mais c'est une technique semi-destructive et elle nécessite un équipement de test et une calibration plus compliqués. Elle a produit des données plus extensives (mais plus difficiles à analyser) que

Les autres techniques. La méthode de la photoélasticité semble la plus pratique ; cette méthode est non destructive et très utile pour l'évaluation du champ de contrainte longitudinal dans les Échantillons trempés. Sa principale limite est le caractère uni axial de cette mesure, ainsi que le fait qu'elle est limitée aux seuls matériaux opaques [13].

CHAPITRE 2

Méthodes Expérimentales pour la Mesure des Déformations Résiduelles dans les Tubes en HDPE

Les techniques de caractérisations des propriétés pour les polymères sont cosignées dans des normes et des standards qui l'objet de révisions de manières périodiques. Il est établi que les propriétés des pièces mécaniques sont amplement influencées par les modes de production et de fabrication de la matière et de la pièce respectivement. Les technologies actuelles de production des tubes en polyéthylène destinés au transport et à la distribution de l'eau ou du gaz naturel reposent sur le procédé d'extrusion à partir d'un flux de matière porté à la température de fusion. Le refroidissement de la géométrie désirée se fait en général par des douches d'eau continues véhiculant de manière convective la chaleur avec l'eau de refroidissement. Cette situation génère un état de contraintes internes dont la magnitude est importante et l'effet se redistribue de la surface externe jusqu'à l'enveloppe interne du tube.

Ainsi, la géométrie finale de la pièce donne lieu à un comportement spécifique du matériau PE tubulaire et conditionne le mode de rupture. Suivant l'état de contraintes planes ou de déformations planes qui caractérisent le tube en PE durant l'essai, le mécanisme de fissuration passe de ductile à fragile et dans ce cas, la durée de vie de l'ouvrage de transport ou de distribution du gaz est indiquée en fonction de la résistance représentée par la ténacité, K_{IC} .

2-1-Méthode de sectionnement :

La méthode de sectionnement fait appel au principe de relaxation des contraintes. Lorsqu'une composante est sectionnée, les contraintes résiduelles présentes à l'intérieur du matériau se relâchent. On peut alors mesurer ces relâchements et calculer les contraintes résiduelles. Il existe deux approches pour mesurer les contraintes résiduelles avec la méthode du sectionnement : L'utilisation des contraintes ou l'utilisation des déformations surfaciques comme paramètres.

Dans la première approche, ce sont les contraintes de sectionnement qui servent de mesurée. Cette approche est appelée « **Sectionning method** ». Pour mesurer une pièce en

trois dimensions, les distributions de contraintes sur les nouvelles surfaces exposées, avant les sectionnements, sont évaluées à partir des relaxations de déformations observées sur la surface pendant le sectionnement. Le sectionnement est successivement répété sur la composante jusqu'à ce qu'on n'observe plus de déformations.

La seconde approche focus surtout sur la source des contraintes résiduelles qu'on appelle 'déformation inhérente'. En se basant sur cette approche, les déformations inhérentes sont directement évaluées à partir des déformations observées sur la surface de l'objet et les contraintes résiduelles peuvent être estimées à l'aide de relations contraintes-déformations dans le domaine élastique. De nos jours, c'est cette approche qui est la plus utilisée.

Elle permet de mesurer plus facilement un modèle tridimensionnel et elle permet également de prévenir la propagation des erreurs de mesures. La méthode de sectionnement est surtout utilisée dans le contrôle de la qualité. C'est bien entendu une méthode destructive.

2-2- Méthode Expérimentale :

2-2-1 Mesure de la déformation due aux contraintes résiduelles :

La méthode la plus simple pour évaluer les contraintes ortho-radiales dans un tube consiste à découper le tube suivant la génératrice et à mesurer l'angle ou le diamètre après ouverture comme montré dans la Figure 2-1.

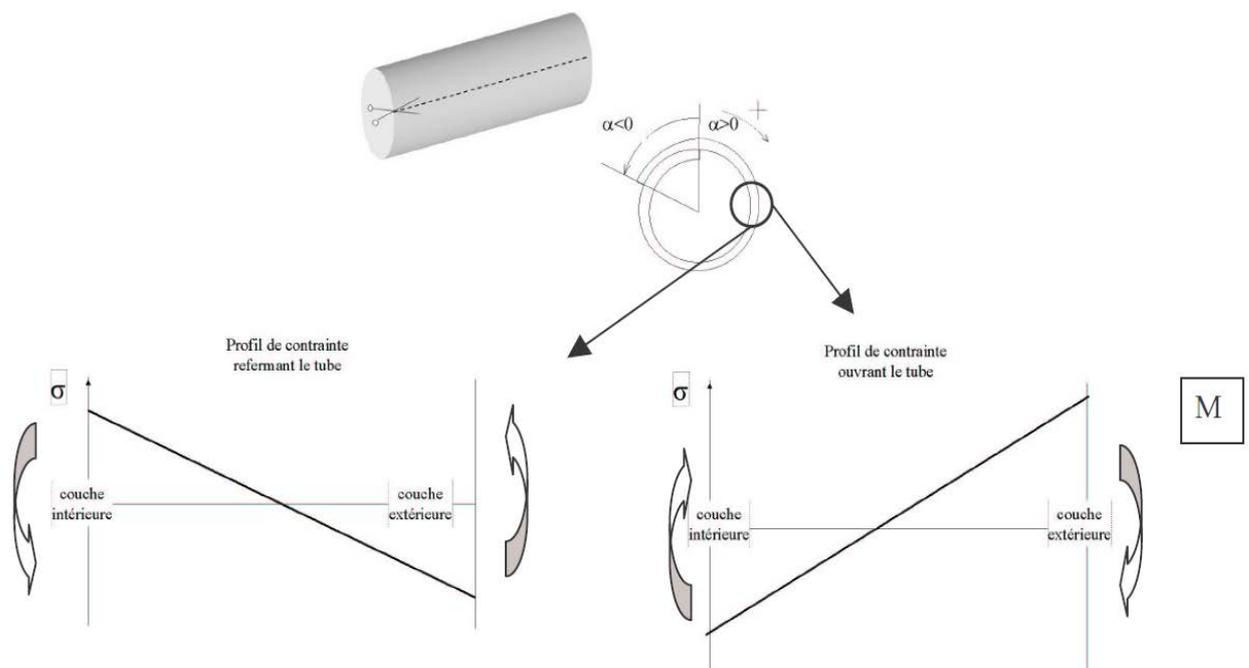


Figure 2-1 : Découpe suivant la génératrice et profil de contrainte avant l'ouverture

Cette méthode est en particulier utilisée sur le site de production afin de contrôler les contraintes résiduelles en fonction des paramètres du procédé. Si la couche extérieure est en traction, le moment produit par le profil de contraintes résiduelles va avoir tendance à ouvrir

Le tube ($\alpha > 0$). A l'opposé si la couche externe est en compression le tube va se refermer ($\alpha < 0$) Cette méthode étant mise en œuvre simplement, elle introduit peu d'artefacts expérimentaux [8].

2-3- Matériau :

Le matériau est le polyéthylène à haute densité, HDPE-100 dans sa forme tubulaire ayant un SDR=17 avec deux diamètres : le premier diamètre ayant un extérieur 110 mm, et le deuxième 90 mm, extrudé et pigmenté en noir. Ils sont destinés à la distribution de l'eau potable et ont été fabriqués par l'entreprise Algérienne de TUBOGAZ.

Tableau 2- 1 : Caractéristiques Technique du HDPE-100

Propriétés HDPE100	Valeur	Norme
Masse volumique [kg/m ³]	956 à 961	ISO 1183
Indice de fluidité MFI [g/10min]	0.2 à 0.5	ISO 1133
Module d'élasticité [N/mm ²]	≈ 1200	DIN 53457
Charge à la rupture [N/mm ²]	≈ 24	ISO 6259
Allongement à la rupture %	>500	ISO 6259
Dureté Shore à 20°C [-]	59	ISO 868
Résilience à 23°C [J/m ²]	>600	ASTM D256

2-4- Préparation des éprouvettes d'essais :

La technique de préparation des éprouvettes consiste à tronçonner le tube par un tour universel en variant l'avancement dans le sens longitudinal. Pour maintenir le tube pendant l'usinage, un mandrin en bois est préparé pour être emboîté par le tube. L'outil à tronçonner

Chapitre 2 :

Méthodes Expérimentales pour la Mesure des Déformations Résiduelles dans les Tubes en HDPE

utilisé est en acier et de 5 mm d'épaisseur. Pour minimiser l'effet de la chaleur résultante au tronçonnage, la vitesse choisie a été 45 tpm.



Figure 2-2 : Tour parallèle universel.



Figure2-3 : montage mixte (Mandrin + poupée + Mandrin en bois)

Les éprouvettes choisies ont la forme de couronnes (anneau) d'une largeur variée. Les deux tubes sont découpés en des anneaux par une lame de cutter montée dans le porte-outil d'un tour à faible vitesse.



Figure2-4 : l'opération de coupe de tube PEHD

. Les dimensions retenues pour les deux diamètres (110 et 90) sont des longueurs variées (0.1ϕ , 0.2ϕ , 0.3ϕ , 0.4ϕ , 0.5ϕ , 1ϕ , 1.5ϕ , 2ϕ) comme présenté dans les tableaux 3-2 et 3-3.



Figure2-5 : Eprouvettes sous forme des couronnes (anneau) de diamètre 90mm.

Tableau 3-2 : Codification et largeurs des éprouvettes usinées en forme de couronnes (Diamètre 90).

Numéro d'éprouvette	Largeur (mm)	Numéro d'éprouvette	Largeur (mm)
SR1	9	SR1	45
SR2		SR2	

SR3	(0,1 ϕ)	SR3	
SR1	18	SR1	90
SR2	(0,2 ϕ)	SR2	(1 ϕ)
SR3		SR3	
SR1	27	SR1	135
SR2	(0,3 ϕ)	SR2	(1,5 ϕ)
SR3		SR3	
SR1	36	SR1	180
SR2	(0,4 ϕ)	SR2	(2 ϕ)
SR3		SR3	



Figure2-6 : Eprouvettes sous forme de couronnes (anneau) de \varnothing 110.

Tableau 3-3 : Codification et largeurs des éprouvettes usinées en forme de couronnes (Diamètre 110).

Numéro d'éprouvette	Largeur (mm)	Numéro d'éprouvette	Largeur (mm)
SR1	11	SR1	55
SR2		SR2	

SR3		SR3	
SR1	22	SR1	110
SR2		SR2	
SR3		SR3	
SR1	33	SR1	165
SR2		SR2	
SR3		SR3	
SR1	44	SR1	220
SR2		SR2	
SR3		SR3	

2-5- Procédure Expérimentale

Les essais présentés ont été réalisés au LR3MI université d'Annaba. Les éprouvettes préparées à partir du tube d'eau potable ont été découpées suivant une génératrice, avec un angle de 60° (figure 2-8), parce que nos éprouvettes ont une épaisseur important qui gaine le chevauchement.



Figure 2-7 : éprouvette non chevauchée après sectionnement

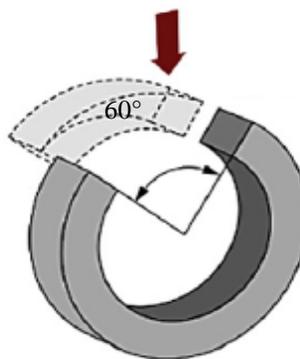


Figure 2-8 : Schéma représentatif de l'angle (60°) de sectionnement

2-6- Mesure de la déformation en fonction du temps :

Après découpe longitudinale de l'enveloppe avec un angle de 60°, elle commence de se rétracter dans la direction de la circonférence et il en résulte une déflexion en fonction du temps. La déformation dans ce cas d'étude est la variation de périmètre extérieur de l'éprouvette par rapport au périmètre extérieur initial. A l'instant t_i , elle est donnée par la relation :

$$\varepsilon = \frac{Dt_0 - Dt_i}{Dt_0} \quad (1)$$

Où :

Dt_0 et Dt_i sont les diamètres à 0 s et à t_i respectivement.

La relation entre la déflexion δ et la déformation est déduite comme suit

D'où :

$$\delta t_i = \pi(Dt_0 - Dt_i) \quad (2)$$

$$\varepsilon t_i = \frac{\delta t_i}{\pi Dt_0} \quad (3)$$

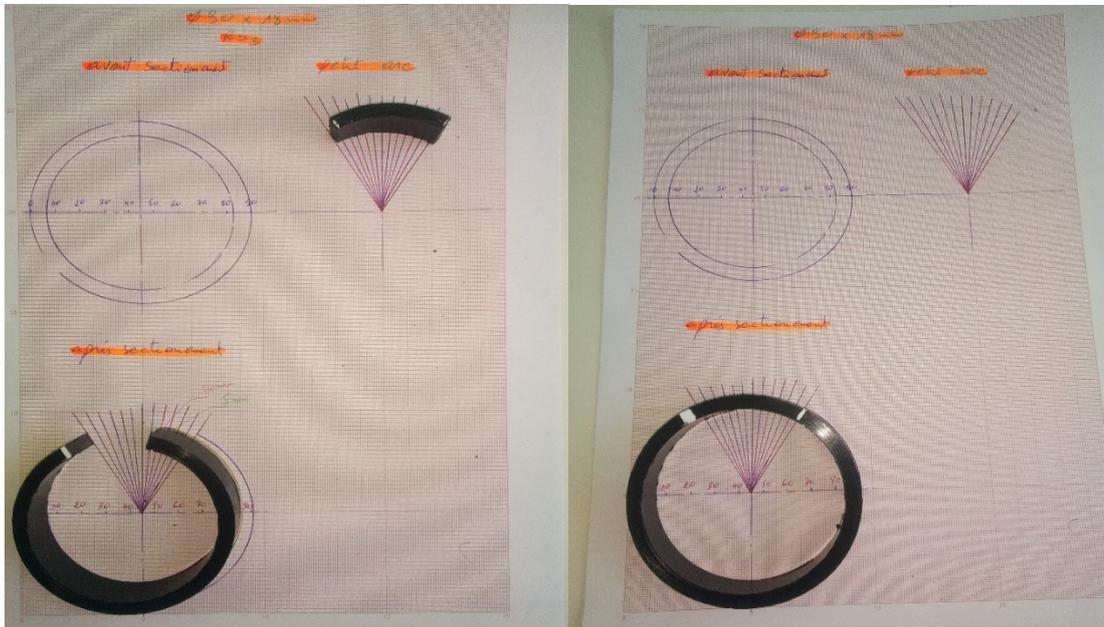


Figure 3-8 : éprouvette avant et après sectionnement

Chapitre 2 :

Méthodes Expérimentales pour la Mesure des Déformations Résiduelles dans les Tubes en HDPE

À partir de la relation (éq. 3), la déformation de l'éprouvette est calculée pour chaque (t) . Les résultats obtenus sont présentés dans les Tableaux (annexes). Les courbes $\varepsilon = f(t)$ avec les mesures d'autres études sont montrées dans les Tableaux (annexes).

La valeur de la déflexion résultante à la rétraction a été mesurée à l'aide d'une règle millimétrique et flexible (figure 4-1) afin d'épouser la forme de l'éprouvette curviligne et enregistrée en fonction du temps correspondant et aussi en prend l'angle d'ouverture du tube après la sectionnement à l'aide d'un papier millimétrique par le traçage de périmètre extérieur et la limite d'angle d'ouverture.



Figure : 4-1 : une règle millimétrique et flexible

Chapitre 3

Résultats et Discussion des Mesures de Déformations Résiduelles

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION DES MESURES DE DEFORMATIONS RESIDUELLES

3-1 Introduction : Dans le chapitre précédent (Chapitre 2), nous avons expliqué la procédure expérimentale qui consiste à préparer des éprouvettes sous la forme d'anneaux cylindriques à partir du tube en HDPE destiné à la distribution d'eau potable. Deux diamètres 90mm et 110mm ont été choisis avec des longueurs variables dans le but d'étudier la constance de la valeur mesurée de la déformation résiduelle circonférentielle. Les éprouvettes désignées à cette étude ont la forme de couronnes (ring specimens) ayant différentes largeurs. La technique utilisée pour la préparation de ces éprouvettes consiste à tronçonner le tube sur le tour d'usinage en variant l'avancement dans le sens radial (opération de dressage).

Le matériau HDPE est un thermoplastique sensible aux effets extérieurs comme la chaleur et l'humidité et reste généralement ductile dans les conditions normales du laboratoire. Par conséquent, pour minimiser l'effet de la chaleur résultante du tronçonnage, une vitesse de coupe minimale a été adoptée. Après l'obtention des éprouvettes, les mesures de chevauchement du diamètre (ΔD) en fonction du temps ont été enregistrées pendant 7 jours à l'aide d'une règle millimétrique flexible et dessinées sur un papier millimétrique.

Dans ce chapitre, les mesures expérimentales sont présentées et discutées. La partie résultats et discussions est organisée autour du comportement-déformation en fonction du temps, du diamètre et du rapport L/D.

3-2 Résultats et discussion :

3-2.1 Comportement de ΔD en fonction du temps, du diamètre et de L/D :

Les géométries choisies en fonction de D et du rapport L/D sont présentées dans les Tableaux 3.1a et 3.1b. Ces 2 tableaux englobent l'ensemble des éprouvettes testées.

Tableau 3.1a : Dimensions géométriques des éprouvettes d'essais $\phi=90$ mm.

Caractéristique du tube	L (mm)	L/D	Désignation (3 éprouvettes)			Désignation de la moyenne
$\phi 90$ SDR14 e=6,4 mm	9	0,1	0,1RS ₁	0,1RS ₂	0,1RS ₃	0,1<RS>
	18	0,2	0,2RS ₁	0,2RS ₂	0,2RS ₃	0,2<RS>
	27	0,3	0,3RS ₁	0,3RS ₂	0,3RS ₃	0,3<RS>
	36	0,4	0,4RS ₁	0,4RS ₂	0,4RS ₃	0,4<RS>
	45	0,5	0,5RS ₁	0,5RS ₂	0,5RS ₃	0,5<RS>
	90	1	1RS ₁	1RS ₂	1RS ₃	1<RS>
	135	1,5	1,5RS ₁	1,5RS ₂	1,5RS ₃	1,5<RS>
	180	2	2RS ₁	2RS ₂	2RS ₃	2 <RS>

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION DES MESURES DE DEFORMATIONS RESIDUELLES

Tableau 3.1b : Dimensions géométriques des éprouvettes d'essais $\phi=110\text{mm}$.

Caractéristique du tube	L (mm)	L/D	Désignation (3 éprouvettes)			Désignation de la moyenne
$\phi 110$ SDR16 e=6,6 mm	11	0,1	0,1RS ₁	0,1RS ₂	0,1RS ₃	0,1 <RS>
	22	0,2	0,2RS ₁	0,2RS ₂	0,2RS ₃	0,2 <RS>
	33	0,3	0,3RS ₁	0,3RS ₂	0,3RS ₃	0,3 <RS>
	44	0,4	0,4RS ₁	0,4RS ₂	0,4RS ₃	0,4 <RS>
	55	0,5	0,5RS ₁	0,5RS ₂	0,5RS ₃	0,5 <RS>
	110	1	1RS ₁	1RS ₂	1RS ₃	1 <RS>
	165	1,5	1,5RS ₁	1,5RS ₂	1,5RS ₃	1,5 <RS>
	220	2	2RS ₁	2RS ₂	2RS ₃	2 <RS>

Pour les éprouvettes de diamètre 90 et 110, chaque cas compte 8 positions de mesure (3 éprouvettes ont été examinées dans chaque position de longueur donnée). Dans une étape ultérieure, nous allons essayer de voir quel est l'effet de L/D sur la constance de la valeur calculée de la déformation.

L'allongement en fonction du temps et du diamètre est présenté dans la Figure 3-1. Chaque figure compte 2 diamètres et 3 essais pour un cas donné de L/D. L'allongement est calculé selon l'équation (2) du chapitre 2. La Figure 3.1 présente les courbes de chevauchement en fonction de du temps et de longueur pour deux diamètres différents $\phi 90$ et $\phi 110$. Dans la figure 3-1a, nous avons tracé le chevauchement (δ ou ΔD) en fonction du temps (t) et du diamètre pour les 3 éprouvettes différentes dans chaque cas et pour L/D=0,1. Pour D=90 mm, il y a plus de dispersion que pour D=110mm. L'écart entre les séries de courbes générées est important pour L/D=0,1. Par contre, la dispersion est maximale pour L/D=1. A titre indicatif, les valeurs de l'écart décroissent avec le temps. A t =10 (s), l'écart relatif est égal à 0,95 et à t = 7 jours, il chute à 0,61. De même, pour L/D=1 à t=10(s) l'écart est de 0,57 et à 7 jours il est de 0,37. Enfin, pour L/D =2, il passe de 0,53 à 0,48 pour le même intervalle de temps. Dans la notation, 9*90 représente le rapport L/D=9/90=0,1. A cette valeur sont associées 3 essais identiques pour tester la reproductibilité du phénomène de la libération des contraintes résiduelles circonférentielles et voir la dispersion. Ces 3 essais sont notés RS1, RS2 et RS3. Similairement, le même travail est fait avec le cas D=110mm.

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION DES MESURES DE DEFORMATIONS RESIDUELLES

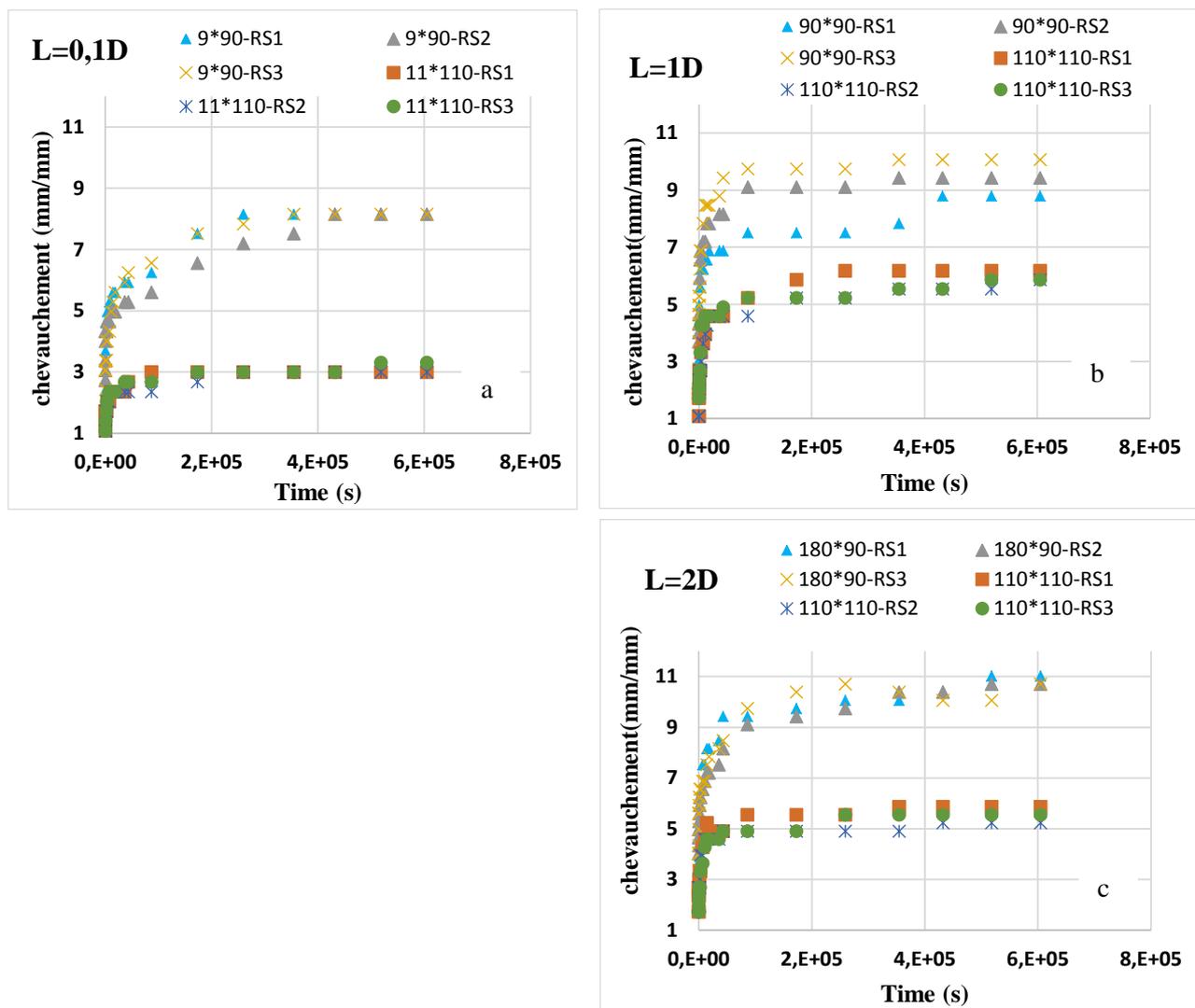


Figure 3-1 : 3 essais de mesures pour chaque cas en fonction Du temps, du diamètre et du rapport L/D.

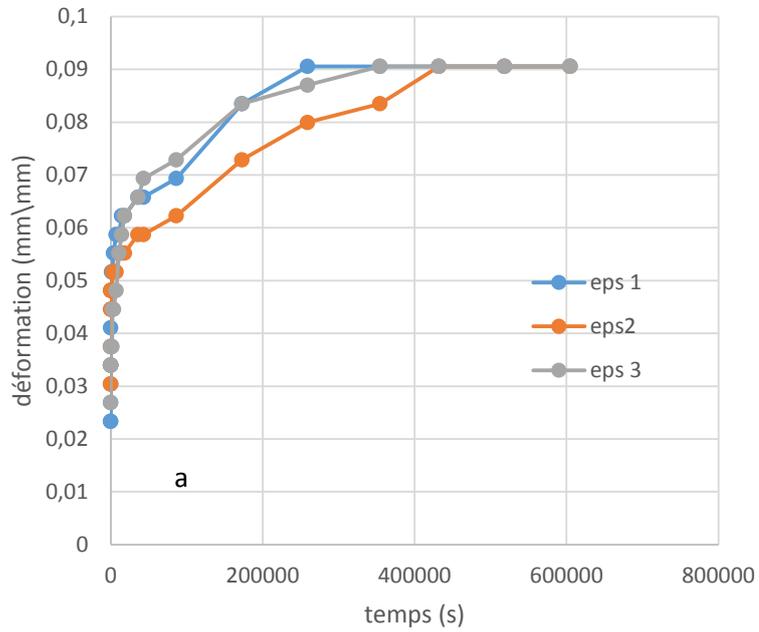
En allant vers les Figs 3b et 3c, les notations deviennent alors pour D=90mm, les premiers essais, L/D=1 et L/D=2 ; 90*90-RS1 et 180*90-RS1. Quand D=110mm, on a : 110*110-RS1 et 220*110-RS1.

3-2.2 Comportement de ε en fonction du temps, du diamètre et de L/D :

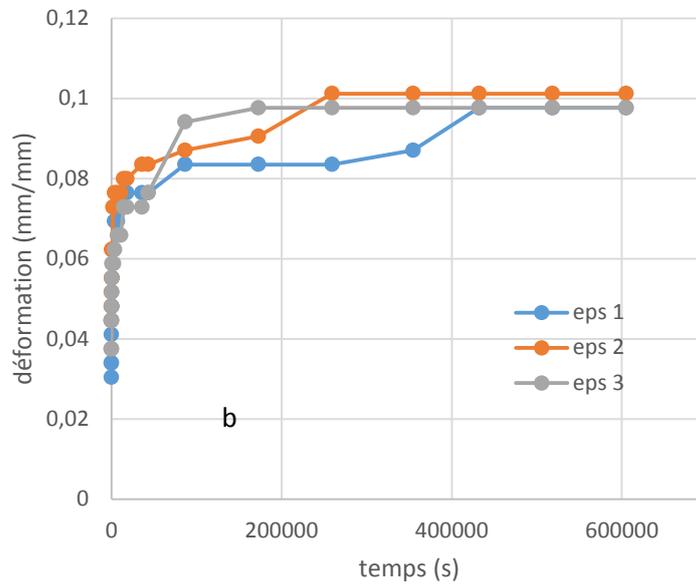
En faisant appel à la notion invariante de la déformation, le même traitement est adopté pour la déformation en fonction du temps. Dans les Figures 3-2a, b, c, d et e pour diamètre D90 et les Figure 3-3a, b, c, d et e pour diamètre D110, on présente la déformation en fonction de temps pour différents L/D.

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION DES MESURES DE DEFORMATIONS RESIDUELLES

L=0,1D

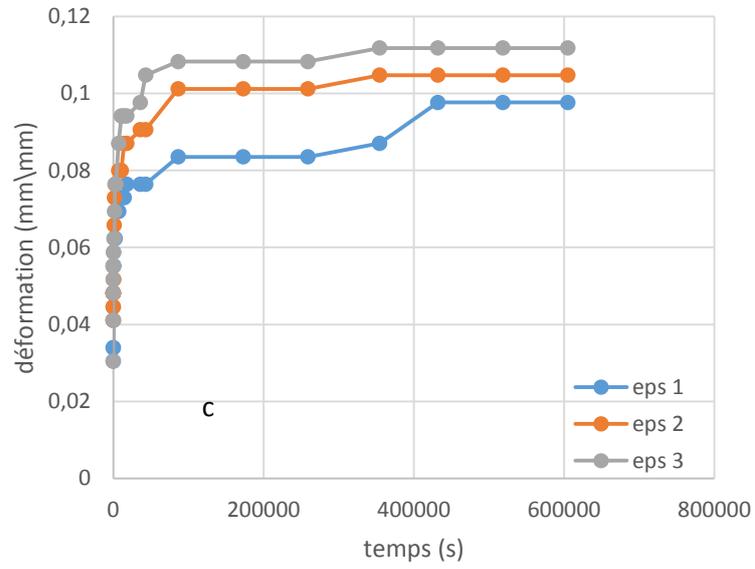


L=0,5D

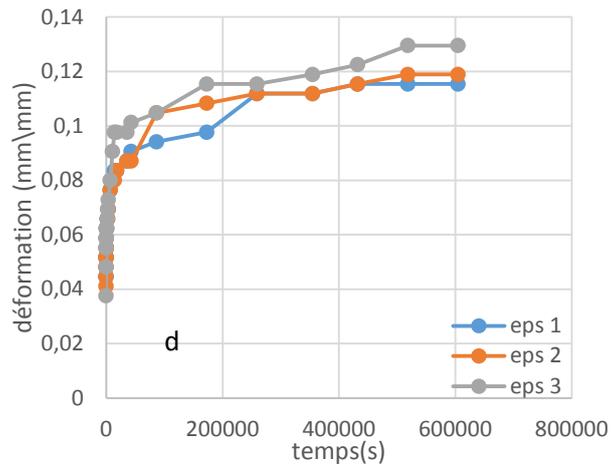


CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION DES MESURES DE DEFORMATIONS RESIDUELLES

L=1D



L=1,5D



CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION DES MESURES DE DEFORMATIONS RESIDUELLES

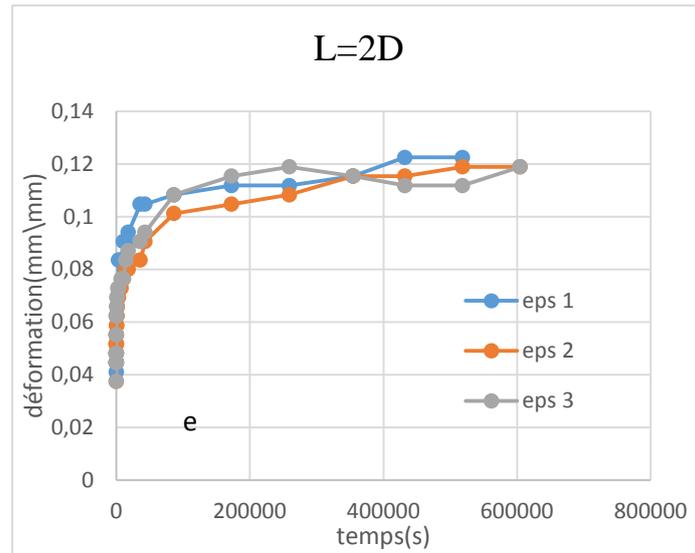
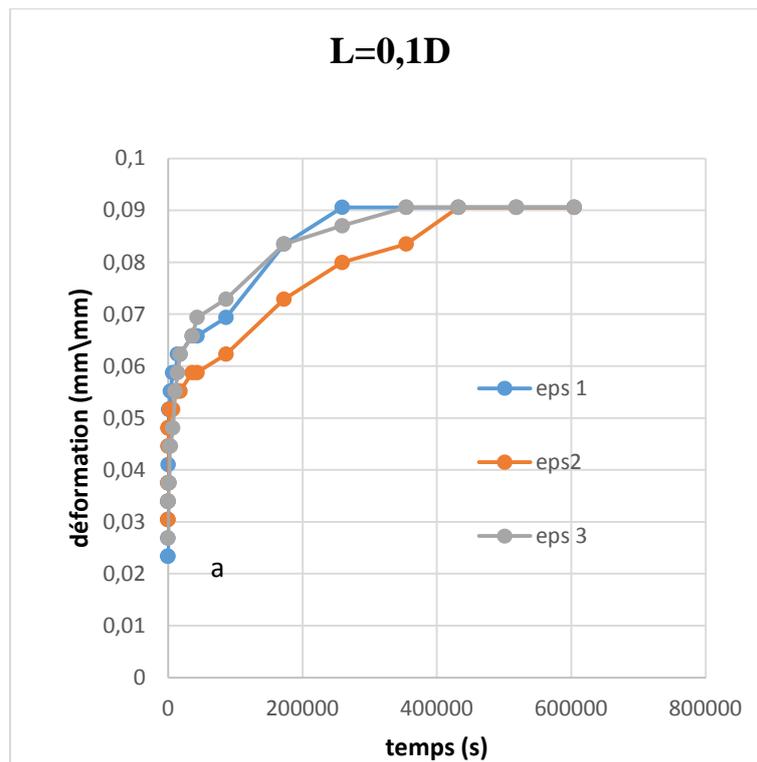
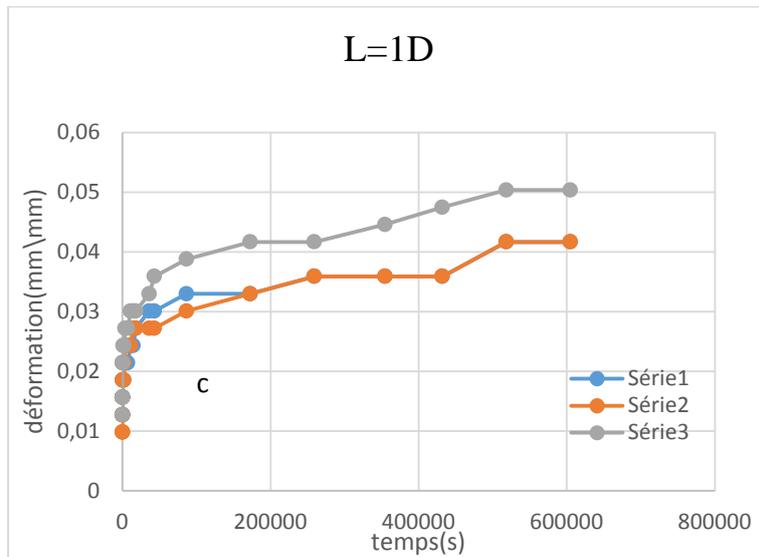
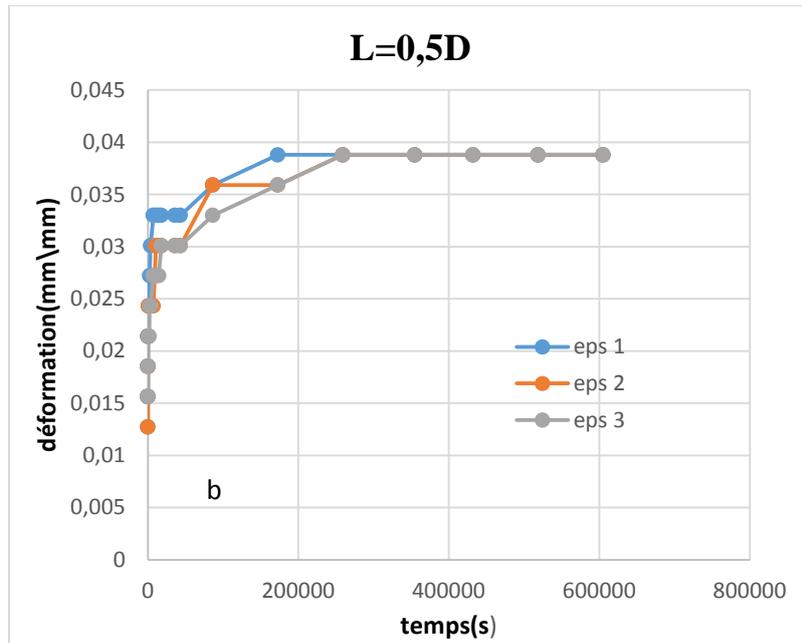


Figure 3-2 : Courbes de déformation en fonction du temps et de la longueur pour Diamètre 90 mm ; a) Longueur 9 mm ; b)- Longueur 45 mm. ; c)- Longueur 90 mm. ; d)- Longueur 135 mm ; e)- Longueur 180 mm.



CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION DES MESURES DE DEFORMATIONS RESIDUELLES



CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION DES MESURES DE DEFORMATIONS RESIDUELLES

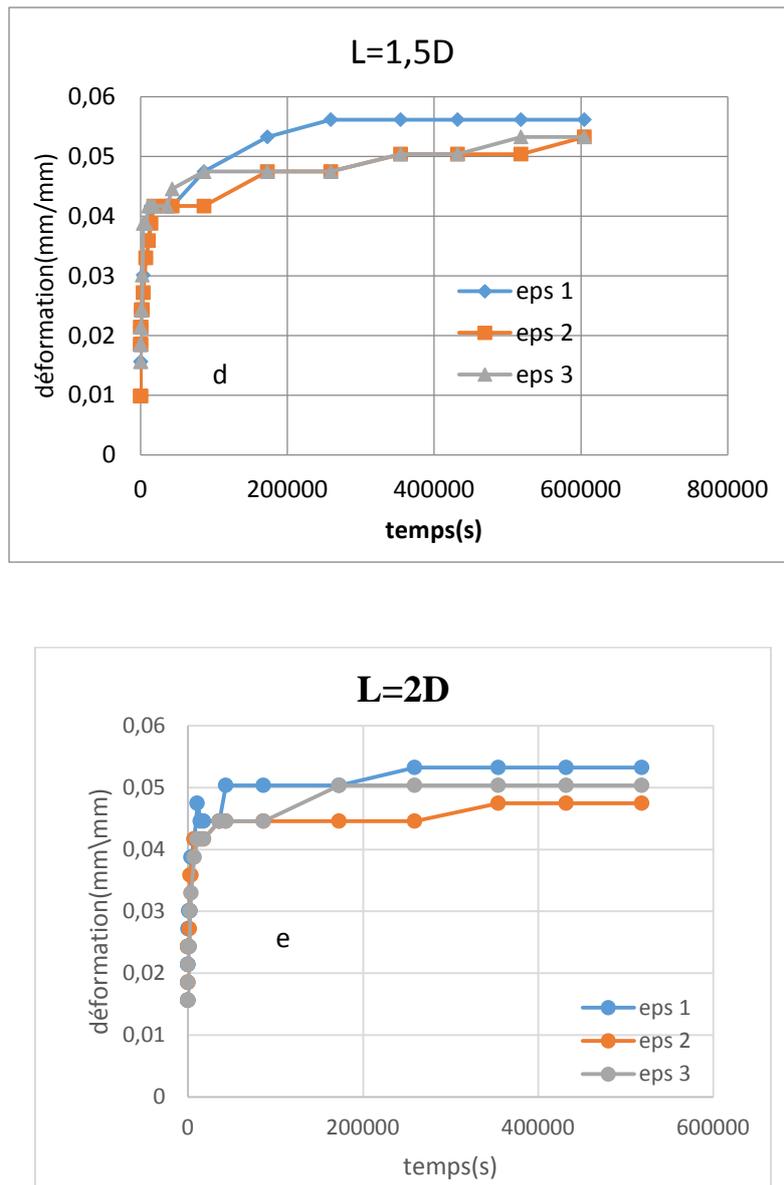


Figure 3-3 : courbes de déformation en fonction du temps pour diamètre 110

a)-Longueur 11 mm, b)- Longueur 55 mm. c)- Longueur 110 mm. ;
d)- Longueur 165 mm ; e)- Longueur 220 mm

Il est observé que la déformation comme prévu augmente avec t et elle va vers un plateau au temps importants. Ce qui veut dire que le processus est décéléré. Mais à mesure que L/D devient important, la déformation correspondante et encore plus grande. Dans les premiers stades, la déformation augmente d'une manière rapide et par la suite, elle devient plus lente jusqu'à la stabilisation vers une déformation limite. On constate aussi qu'il y a une dispersion importante pour les valeurs intermédiaires de ε . Aussi la déformation diminue avec

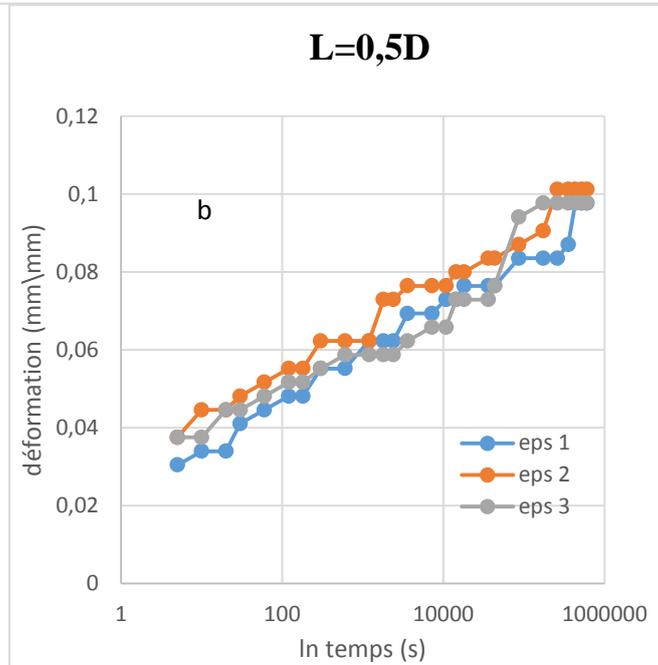
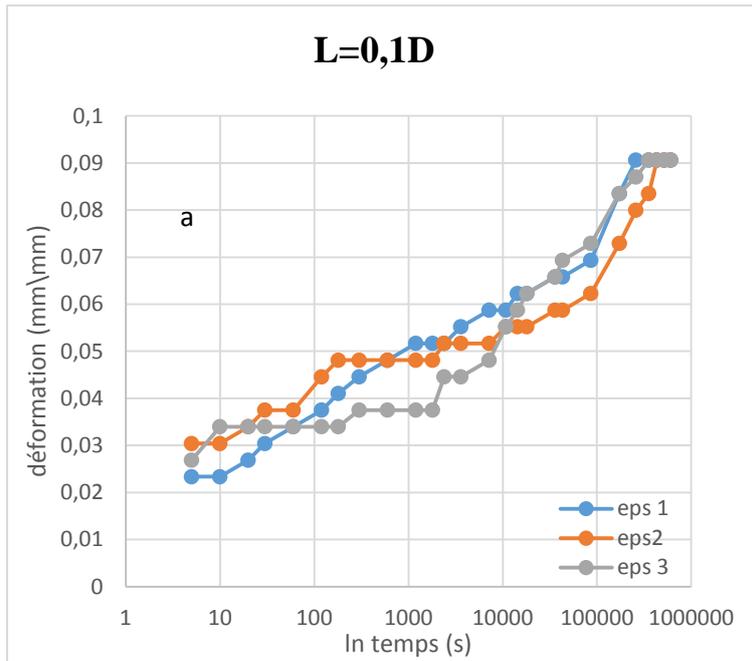
CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION DES MESURES DE DEFORMATIONS RESIDUELLES

l'augmentation de la largeur puis elle devient presque constante. Enfin, avec l'augmentation de la largeur de l'anneau (L/D), la libération des contraintes diminue de manière significative dans le temps.

3-2.2 Comportement de ε en fonction de $\ln t$:

L'utilisation de $\ln(t)$ contribue à réduire les écarts de temps (t) pour voir le comportement de la déformation(ε). En général on l'approche par une droite comme montré dans les figures 3.4 et 3.5.

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION DES MESURES DE DEFORMATIONS RESIDUELLES



CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION DES MESURES DE DEFORMATIONS RESIDUELLES

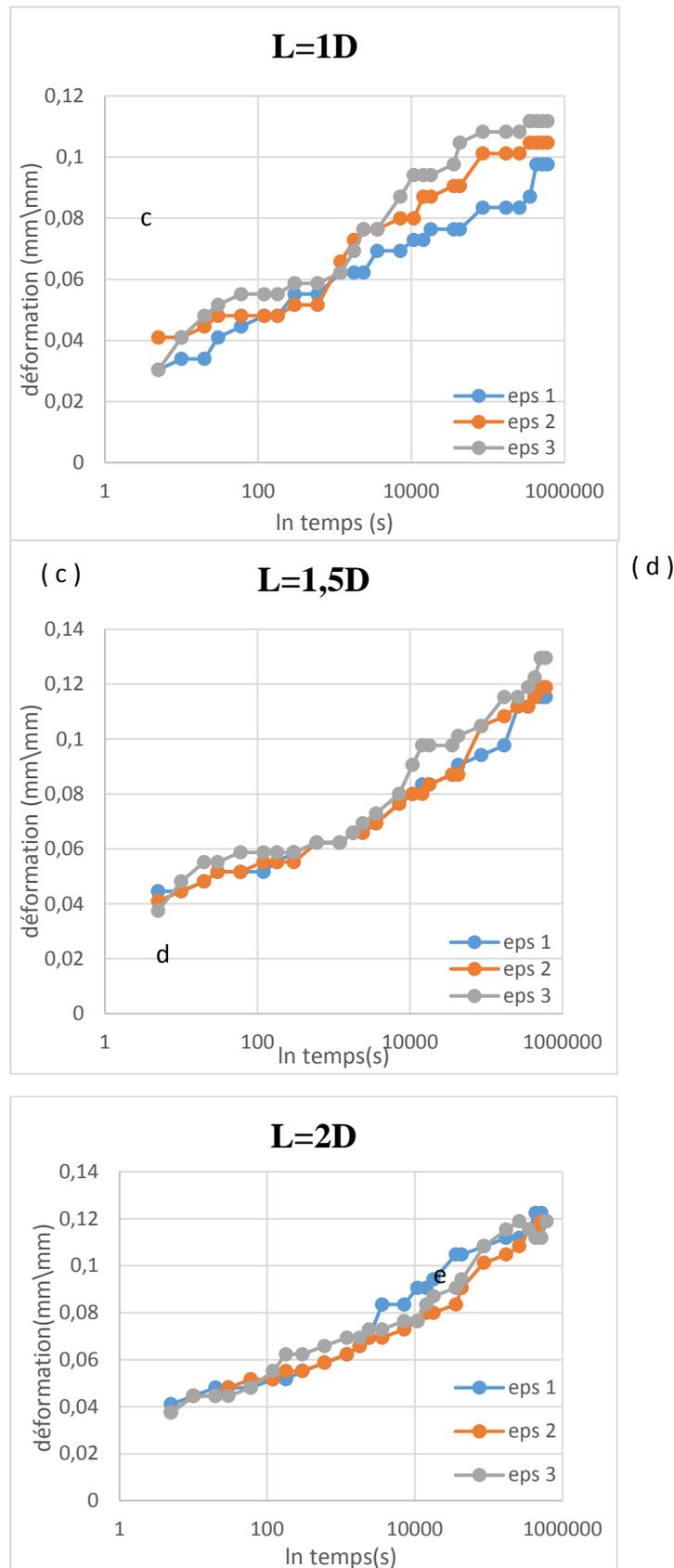
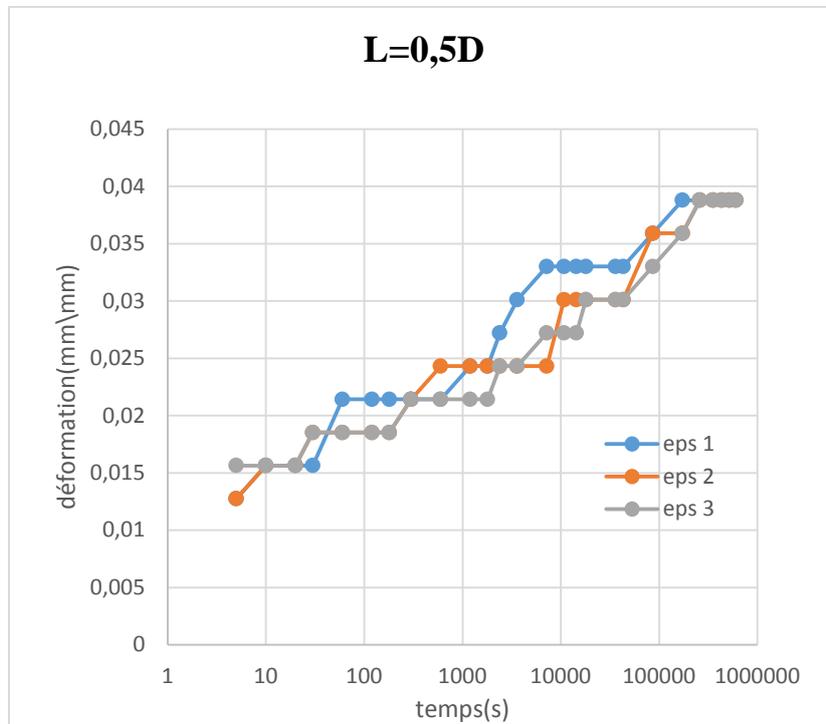
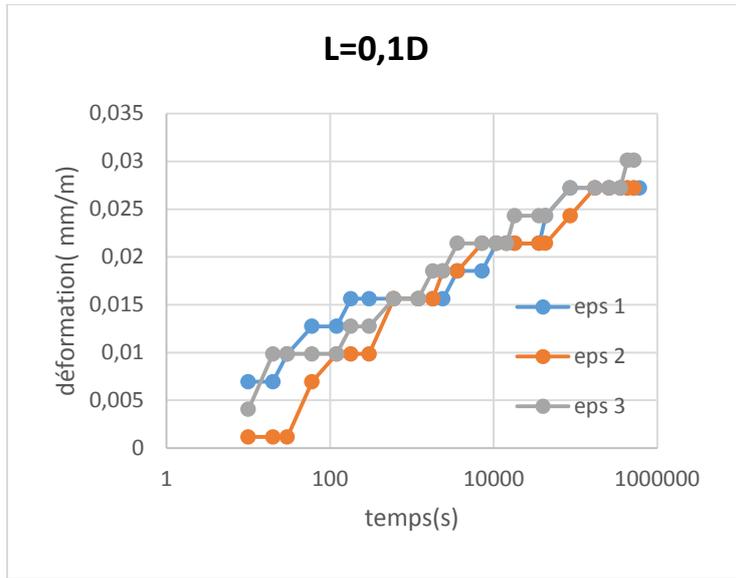


Figure 3-4 : courbes de ε en fonction du $\ln(t)$ pour diamètre 90 mm pour différentes longueurs
 a)-Longueur 9 mm ; b)- Longueur 45 mm ; c)- Longueur 90 mm ; d)- Longueur 135 mm ;
 e)- Longueur 180 mm

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION DES MESURES DE DEFORMATIONS RESIDUELLES



CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION DES MESURES DE DEFORMATIONS RESIDUELLES

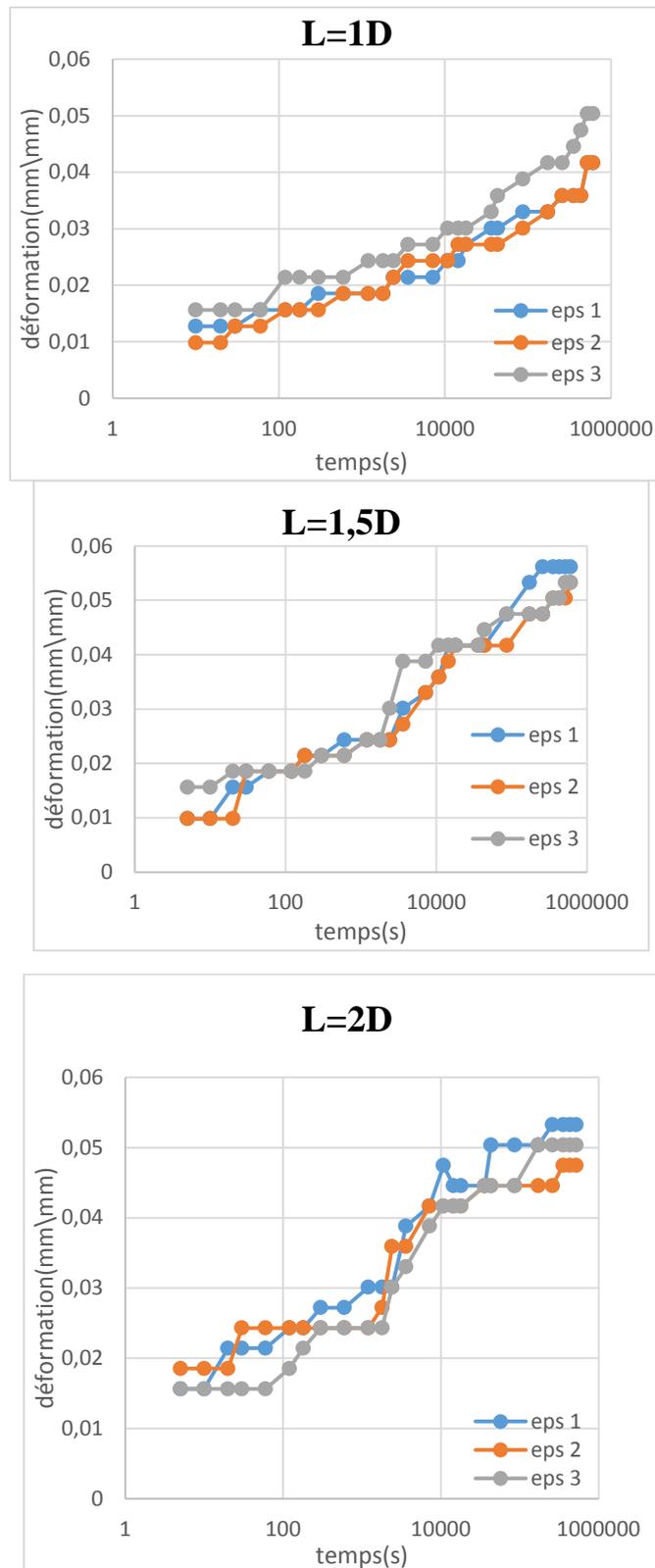


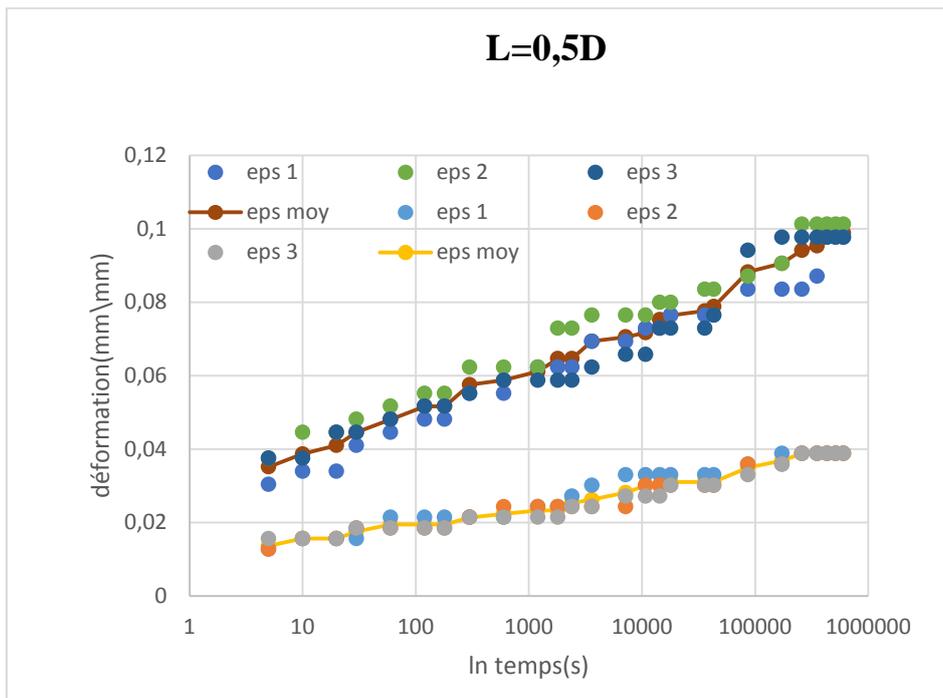
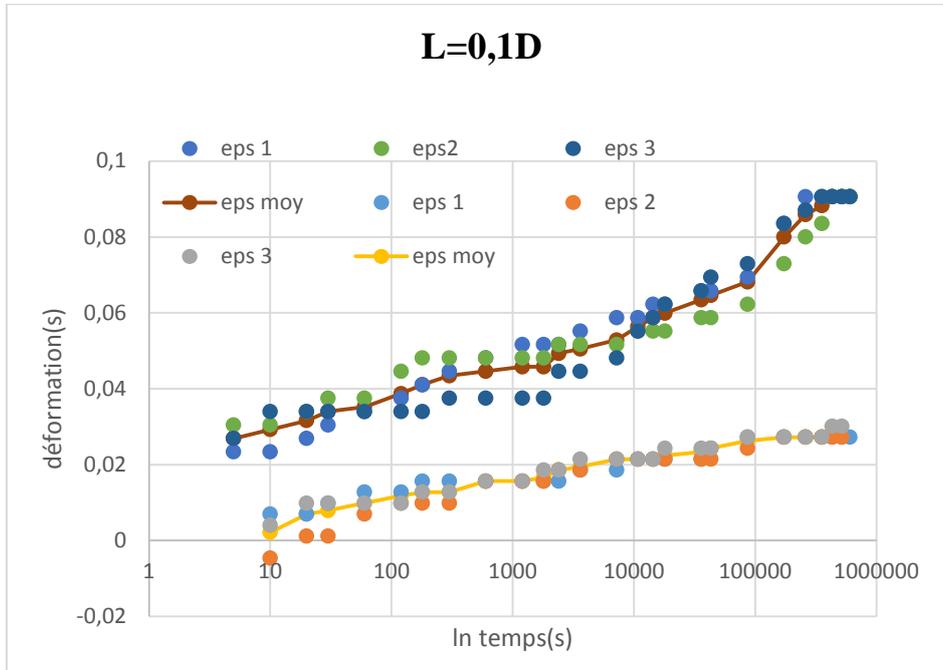
Figure 3-5 : courbes de ϵ en fonction du $\ln(t)$ pour diamètre 110 mm pour différentes longueurs.

Pour l'échelle $\ln(t)$, il y a une linéarité de la déformation en fonction du temps écoulé.

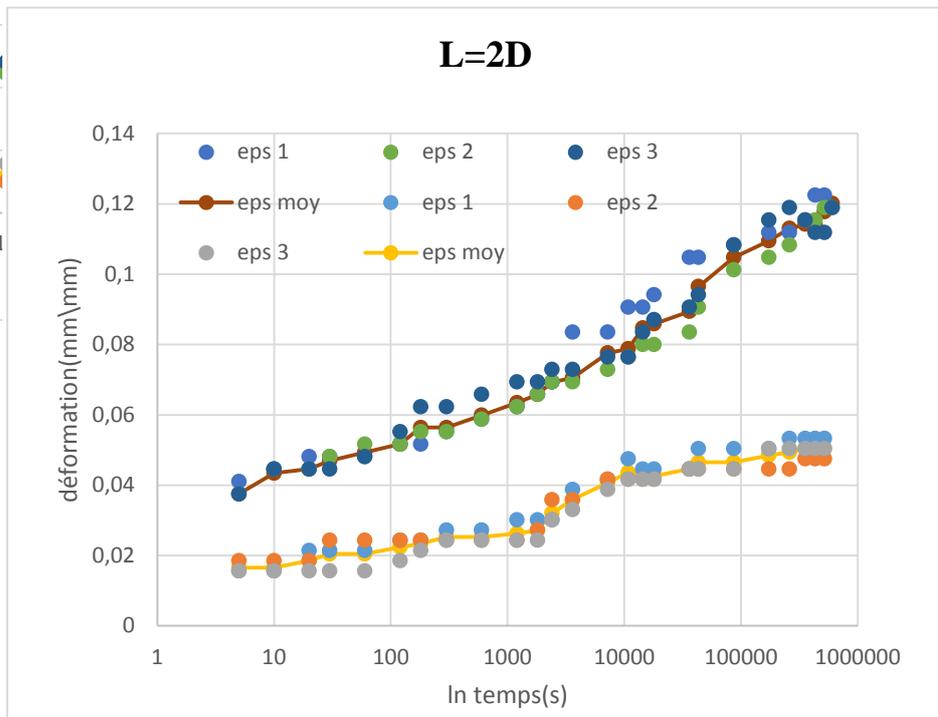
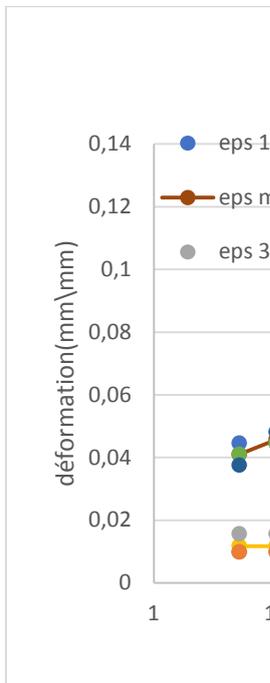
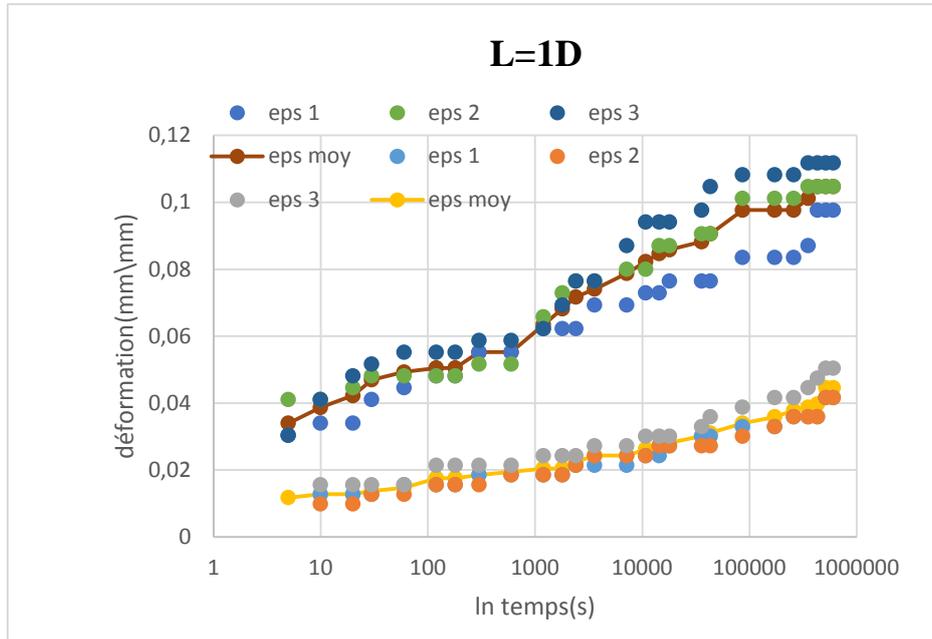
CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION DES MESURES DE DEFORMATIONS RESIDUELLES

3-2-4 comparaisons de ϵ en fonction de t et en fonction de diamètre :

D'après les figures (3-6) on remarque que la déformation augmente quand on augmente la longueur des éprouvette. Aussi, l'écart entre les deux courbes augmente chaque fois quand la longueur de l'éprouvette croît.



CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION DES MESURES DE DEFORMATIONS RESIDUELLES



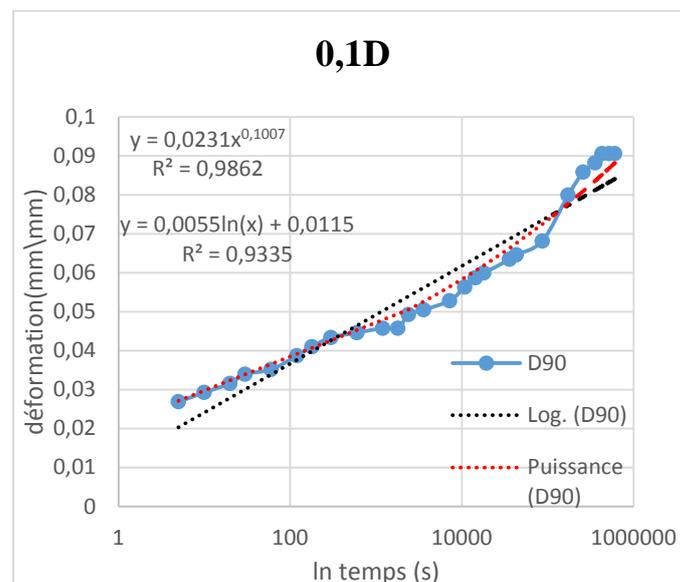
CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION DES MESURES DE DEFORMATIONS RESIDUELLES

(e)

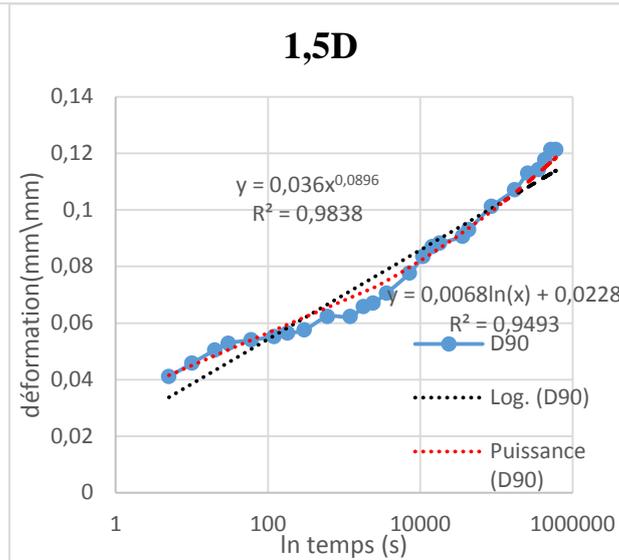
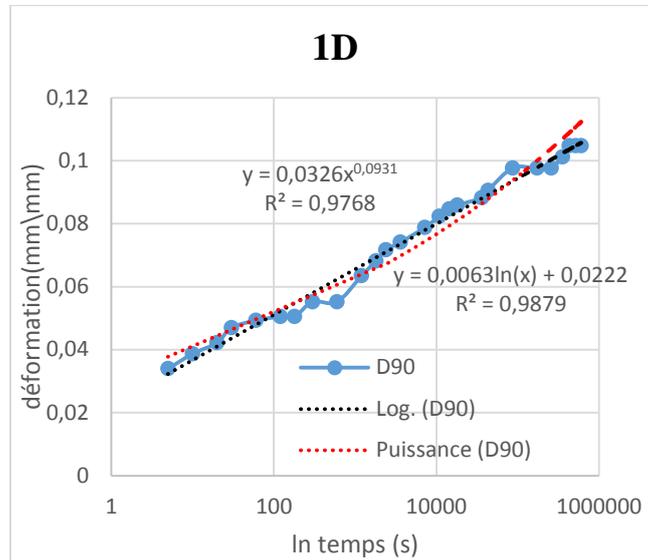
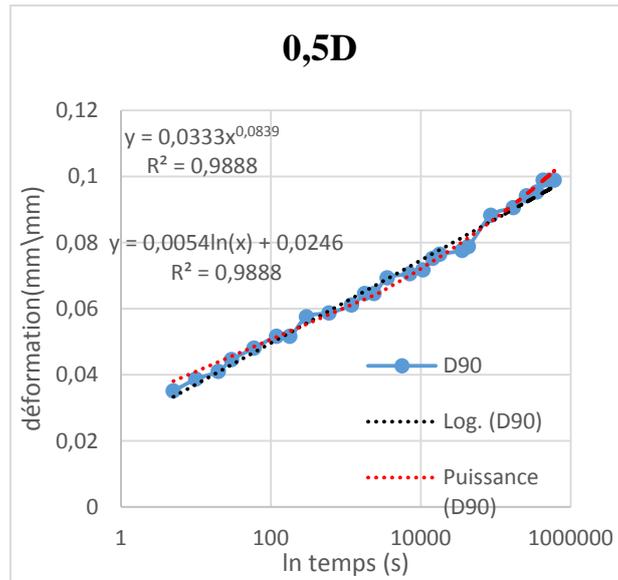
Figure 3-6 : Courbes de comparaison des déformations on fonction du ln(t) de diamètres 90 et 110 pour des longueurs différentes

3-2-5 Courbes de tendance :

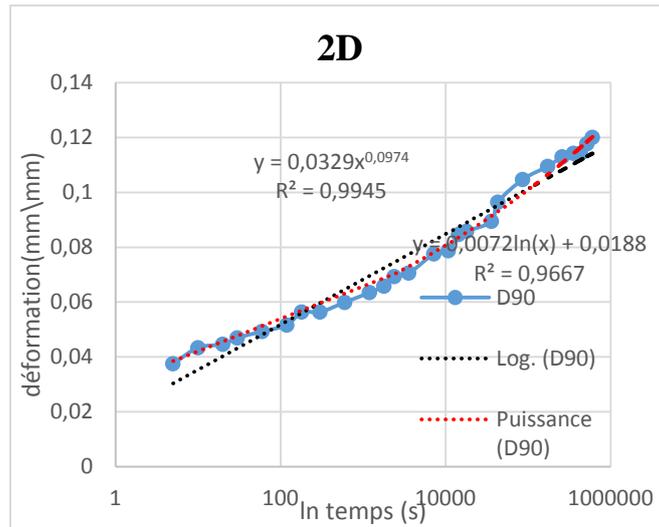
D'après les courbes et équations obtenues ; on remarque que le coefficient de correction el attendre une valeur verre 1 qui ne constat que l'erreur et plus petit



CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION DES MESURES DE DEFORMATIONS RESIDUELLES

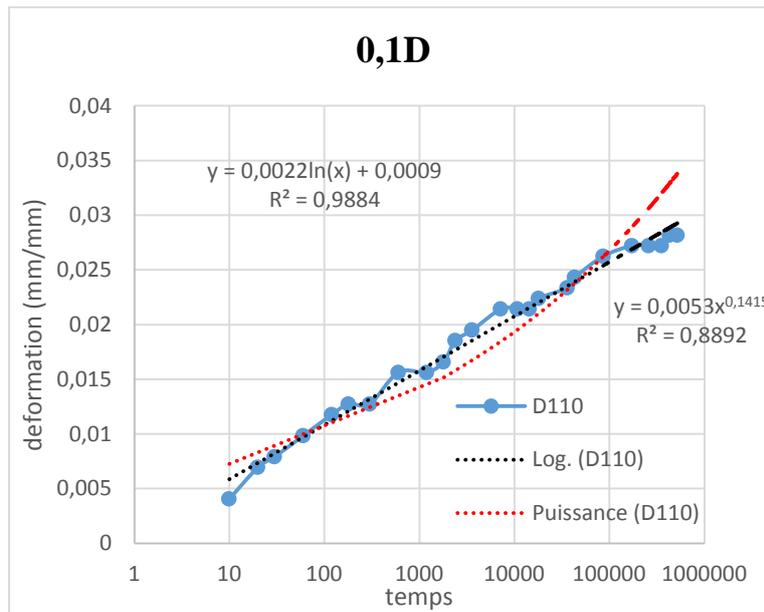


CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION DES MESURES DE DEFORMATIONS RESIDUELLES

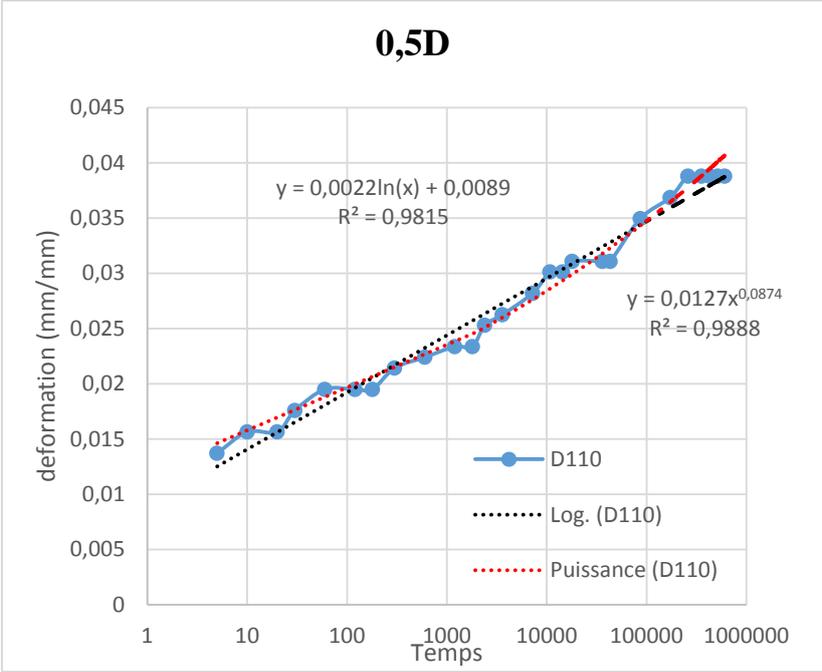


(e)

Figure 3-7 : Courbes de tendance pour diamètre 90 des longueurs variées.

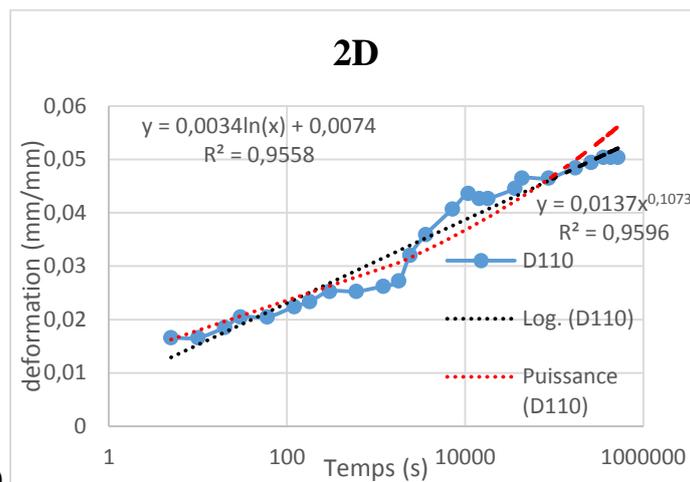
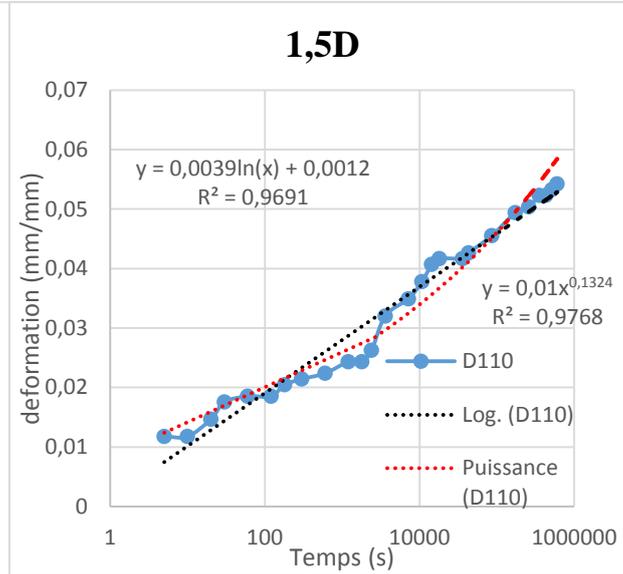
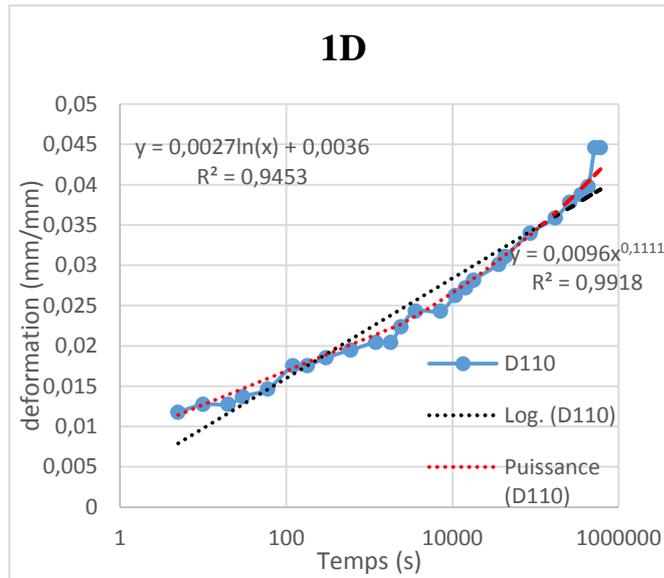


CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION DES MESURES DE DEFORMATIONS RESIDUELLES



(a)(b)

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION DES MESURES DE DEFORMATIONS RESIDUELLES



(c)(d) (e)

Figure 3-8 : Courbes de tendance pour diamètre 110 des longueurs variées

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION DES MESURES DE DEFORMATIONS RESIDUELLES

Les 2 équations de fit utilisées sont logarithmique et puissance ; $Y=ALnt + B$ et $Y = C t^{\alpha}$.

A, B et C sont des constantes déterminées statistiquement et α un exposant positif. Les coefficients de corrélations sont tous adéquats pour les 2 modèles.

En analysant la variation de la déformation en fonction du temps, on voit que la déformation évolue vers une valeur plus ou moins constante. Ce qui indique que plus le rapport L/D est grand plus la méthode utilisée est bonne pour la mesure des déformations résiduelles.

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION DES MESURES DE DEFORMATIONS RESIDUELLES

CONCLUSIONS :

Cette étude a permis d'investiguer l'allure des déformations résiduelles par la méthode du sectionnement d'anneaux de tubes en HDPE. L'étude a considéré 2 diamètres différents le 90mm et le 110mm.

Les conclusions suivantes peuvent être énoncées :

1. Les déformations résiduelles maximale sont de l'ordre de 0.04% jusqu'à environ 0.15%
2. Les grandes valeurs de ε sont associées au diamètre 90 mm car il est libre de se déformer par rapport à un diamètre plus grand comme le 110 mm. La forme géométrique impose ses conditions sur la libération des contraintes internes.
3. La comparaison des écarts entre déformation initiale et celle à 7 jours est intéressante.

En effet :

L/D	ε à t= 10s	ε à t=7j	Ecart ε : 10s	Ecart ε : 7j
0.1	D :90 ; 0.01	0.03	0.01	0.06
	D :110 ; 0.02	0.09		
1	D :90 ; 0.01	0.05	0.03	0.06
	D :110 ; 0.04	0.11		
2	D :90 ; 0.02	0.05	0.02	0.07
	D :110 ; 0.04	0.12		

L'écart à 7 jours est toujours plus grand que l'initial et il évolue vers une limite (courbes logarithmiques).

4. Les courbes $\varepsilon=f(\ln(t))$ donnent lieu à des corrélations exploitable sous les formes logarithmique et puissance.
5. Pour D=90mm et L/D=0.1, on a obtenu :

$$\varepsilon=0.023t^{0.100} \quad \text{avec } R^2=0.986$$

$$\varepsilon=0.05Lnt + 0.110 \quad \text{avec } R^2=0.933$$

Pour D=110mm et L/D=0.1, on a obtenu :

$$\varepsilon=0.005 t^{0.141} \quad \text{avec } R^2=0.889$$

$$\varepsilon=0.002Lnt + 0.00 \quad \text{avec } R^2=0.988$$

Ceci montre des coefficients de détermination très satisfaisants.

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION DES MESURES DE DEFORMATIONS RESIDUELLES

6. Cette étude peut être étendue à des diamètres plus importants comme $D : 200\text{mm}$ ou 300mm . Ceci permettra de voir si l'effet observé sera toujours de la même nature et si les formes de refroidissements sont toujours respectées.

Références bibliographiques

[1].mémoire mastère –**talhi fatma Zohra**-Etude de l'effet des cycles de transformation Sur les propriétés des tubes en PE pour réseaux de distribution GAZ & EAU-ANNEE 2008

[2]. J. Cazenave, « 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 » ; thèse de doctorat, Institut National Appliqué de Lyon, France

[3]. **S. Keddar**, « Vieillissement thermique du polyéthylène haute densité : Comportement Mécanique et structurale », mémoire master, université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen- (2014).

[4]- . **H.B.H. Hamouda**, « Endommagement et fissuration en fluage de polyéthylène extrudés : approche locale-approche globale », Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 267 p (2000).

[5]. **L. Hubert**, « Propriétés physiques et mécaniques du polyéthylène pour application tube en relation avec l'architecture moléculaire », thèse de doctorat, Ecole doctorale matériaux de Lyon, Villeurbanne : INSA de Lyon, 143 p (2001).

[6]. **A. Tidjani**, « Comparison of formation of oxidation products during photo-oxidation of linear low density polyethylene under different natural and accelerated weathering conditions. Polymer Degradation and Stability»,(2000).

[7] -TESE- **Olivier Parant**- Étude expérimentale et calcul des contraintes résiduelles dans des tubes extrudés en polyéthylène- 4 Jan 2010.

[8]-**N. KIAS K. CHAOUI** CARACTÉRISATION EXPÉRIMENTALE DES DÉFORMATIONS RÉSIDUELLES DANS LES TUBES EN POLYETHYLENE DE HAUTE DENSITÉ- Sciences & Technologie B – N°22, Décembre (2004).

[9]- **S. NIOU 1, S. AZZOUZ 1 , K. CHAOUI 1, A. AZZI 2** ÉTUDE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE DU TUBE HDPE SOUDÉ BOUT-A-BOUT

[10]- Measurement of residual stresses by relaxation methods Stéphane AUGER * - Raymond BUISSON ** * CETIM **Consultant

Les annexes

Tableaux de mesure de chevauchement de diamètre L/D=0,1-D90

Mesure	Temps [s]	RS1			RS2			RS3			Couche	1	2	3	Couche	1	2	3	eps moy	
		Pti[mm]	Angle ti	Di new[mm]	Pti[mm]	Angle ti	Di new	Pti[mm]	Angle ti	Di new[mm]										Temps [s]
1	5	276		87,880882	274	15	87,261146	275	14	87,579678	5	2,1019108	2,7388535	2,4203822	2,4203822	5	0,023354565	0,030431706	0,026893135	0,0268931
2	10	276		87,880882	274	15	87,261146	273	14	86,9426752	10	2,1019108	2,7388535	3,0573248	2,6326964	10	0,023354565	0,030431706	0,033970276	0,0292522
3	20	275		87,579678	273	17	86,942675	273	14	86,9426752	20	2,4203822	3,0573248	3,0573248	2,8450106	20	0,026893135	0,033970276	0,033970276	0,0316112
4	30	274		87,2611465	272	17	86,624204	273	15	86,9426752	30	2,7388535	3,3757962	3,0573248	3,0573248	30	0,030431706	0,037508846	0,033970276	0,0339703
5	60	273	20	86,9426752	272	17	86,624204	273	15	86,9426752	60	3,0573248	3,3757962	3,0573248	3,163482	60	0,033970276	0,037508846	0,033970276	0,0351498
6	120	272	20	86,6242038	270	18	85,987261	273	15	86,9426752	120	3,3757962	4,0127389	3,0573248	3,4819533	120	0,037508846	0,044585987	0,033970276	0,0386884
7	180	271	22	86,3057325	269	18	85,66879	273	15	86,9426752	180	3,6942675	4,3312102	3,0573248	3,6942675	180	0,041047417	0,048124558	0,033970276	0,0410474
8	300	270	22	85,9872611	269	20	85,66879	272	16	86,6242038	300	4,0127389	4,3312102	3,3757962	3,9065817	300	0,044585987	0,048124558	0,037508846	0,0434065
9	600	269	22	85,6687898	269	20	85,66879	272	16	86,6242038	600	4,3312102	4,3312102	3,3757962	4,0127389	600	0,048124558	0,048124558	0,037508846	0,044586
10	1200	268	23	85,3503185	269	20	85,66879	272	17	86,6242038	1200	4,6496815	4,3312102	3,3757962	4,118896	1200	0,051663128	0,048124558	0,037508846	0,0457655
11	1800	268	24	85,3503185	269	20	85,66879	272	17	86,6242038	1800	4,6496815	4,3312102	3,3757962	4,118896	1800	0,051663128	0,048124558	0,037508846	0,0457655
12	2400	268	25	85,3503185	268	22	85,350318	270	17	85,8072611	2400	4,6496815	4,6496815	4,0127389	4,4373673	2400	0,051663128	0,051663128	0,044585987	0,0493041
13	3600	267	25	85,0318471	268	23	85,350318	270	17	85,8072611	3600	4,9681529	4,6496815	4,0127389	4,5435244	3600	0,055201699	0,051663128	0,044585987	0,0504836
14	7200	266	25	84,7133758	268	24	85,350318	269	19	85,6687898	7200	5,2866242	4,6496815	4,3312102	4,7558386	7200	0,058740269	0,051663128	0,048124558	0,0528427
15	10800	266	29	84,7133758	267	25	85,031847	267	20	85,0318471	10800	5,2866242	4,9681529	4,9681529	5,07431	10800	0,058740269	0,055201699	0,055201699	0,0563812
16	14400	265	29	84,3943045	267	25	85,031847	266	20	84,7133758	14400	5,6050955	4,9681529	5,2866242	5,2866242	14400	0,062278839	0,055201699	0,058740269	0,0587403
17	18000	265	30	84,3943045	267	26	85,031847	265	25	84,3943045	18000	5,6050955	4,9681529	5,6050955	5,3927813	18000	0,062278839	0,055201699	0,062278839	0,0599198
18	36000	264	30	84,0764331	266	26	84,713376	264	25	84,0764331	36000	5,9235669	5,2866242	5,9235669	5,7112527	36000	0,06581741	0,058740269	0,06581741	0,0634584
19	43200	264	30	84,0764331	266	26	84,713376	263	29	83,7579618	43200	5,9235669	5,2866242	6,2420382	5,8174098	43200	0,06581741	0,058740269	0,06935598	0,0646379
20(1)	86400	263	30	83,7579618	265	30	84,394304	262	31	83,4394304	86400	6,2420382	5,6050955	6,5605096	6,1358811	86400	0,06935598	0,062278839	0,072894551	0,0681765
21(2)	172800	263	35	82,4840764	262	32	83,43943	263	31	82,4840764	172800	7,5159236	6,5605096	7,5159236	7,1974522	172800	0,083510262	0,072894551	0,083510262	0,0799717
22(3)	259200	257	38	81,8471338	260	35	82,802548	258	32	82,1656051	259200	8,1528662	7,1974522	7,8343949	7,7282378	259200	0,090587403	0,079971691	0,087048832	0,0858693
23(4)	354600	257	37	81,8471338	259	35	82,484076	257	32	81,8471338	354600	8,1528662	7,5159236	8,1528662	7,940552	354600	0,090587403	0,083510262	0,090587403	0,0882284
24(5)	432000	257	40	81,8471338	257	37	81,847134	257	33	81,8471338	432000	8,1528662	8,1528662	8,1528662	8,1528662	4E+05	0,090587403	0,090587403	0,090587403	0,0905874
25(6)	518400	257	40	81,8471338	257	37	81,847134	257	33	81,8471338	518400	8,1528662	8,1528662	8,1528662	8,1528662	5E+05	0,090587403	0,090587403	0,090587403	0,0905874
26(7)	604800	257	40	81,8471338	257	37	81,847134	257	35	81,8471338	604800	8,1528662	8,1528662	8,1528662	8,1528662	6E+05	0,090587403	0,090587403	0,090587403	0,0905874