

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار  
عنابة

Faculté des sciences de l'Ingénieur  
Département de Génie Mécanique

Mémoire de Magister

**COMPORTEMENT MECANIQUE ET RUPTURE  
DU HDPE SOUS ENVIRONNEMENTS  
CONTROLES**

Option  
Mécanique de la Rupture

Par  
ALIMI LATIFA

DIRECTEUR DE THESE : Kamel CHAOUI Pr U. Annaba

Devant le jury

Président: N. ZEGHIB Pr U. Annaba  
Examineurs : L. BOULANOUAR Pr U. Annaba  
A. H. SOUABI MC U. Annaba

Année : 2007

# Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à*

*La mémoire de ma très chère et bien aimée sœur Meriem*

*Mes précieux parents qui ont su toujours me réconforter et  
me soutenir, qui m'ont guidé vers le droit chemin pour que je  
devienne un jour ce que je suis et qui m'ont couvert d'estime et  
d'amour tout au long de mon existence*

*Mes frères, Youcef et Réda*

*Mes sœurs, Nabila, Souad, Sana, Sihem, Dalinda*

## **Remerciements**

*Je remercie vivement Monsieur Kamel CHAOUI Professeur au département de Génie Mécanique de l'Université de Annaba pour son aide scientifique et matérielle et surtout pour son suivi régulier et son assistance jusqu'à la fin de cette recherche, ainsi que pour les encouragements qu'il n'a cessé d'apporter à mes travaux durant cette période.*

*J'adresse aussi mes vifs remerciements à Monsieur Nacer Eddine ZEGHIB, Professeur au département de Mécanique à l'Université de Annaba d'avoir accepté de présider mon jury de soutenance.*

*Je remercie également Monsieur Abdelhamid SOUABI Maître de conférence au département de physique à l'Université de Annaba d'avoir pris le soin d'examiner ce travail et me faire l'honneur de participer au jury.*

*Je remercie profondément Monsieur Lakhdar BOULANOUAR Professeur au département de mécanique à l'Université de Annaba d'avoir pris le soin d'examiner ce travail et me faire l'honneur de participer au jury.*

*Je remercie également l'ensemble de l'entreprise nationale Sonelgaz .*

*Je remercie également Monsieur Otman YALESSE Maître de conférence au département de Mécanique à l'Université de Guelma pour son aide précieuse.*

*Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur Aziz Technicien à l'université de Guelma pour son aide précieuse.*

*J'exprime également toute ma reconnaissance envers l'ensemble des membres du laboratoire "LR3MI", notamment Messieurs Rabia KHELIF, Abdelaziz AMIRAT, Aboubaker BOUNAMOUS, Ouzine BOUSSAID et Mohhieddine BENGHARSSALLAH, leur contribution a été essentielle dans la réalisation de ce travail.*

*Je remercie vivement mes chères amies Najet KIASS, Wafia GABBECHÉ, Mounia KADDECHE, Souheila REHAB pour leur soutien.*

*Je remercie toute ma promo, notamment mes amis Mounir, Walid, Wahid, Fatiha, Lotfi, Smain, Rahim, Latifa et Widad.*

*Je remercie mes enseignants du Département de Mécanique et Monsieur Kamel BEY chef de Département de Mécanique.*

*Enfin, je remercie énormément tous ceux qui ont participé de près ou de loin et qui ont contribué à l'élaboration de ce travail.*

## Résumé

De nos jours, les résines de polyéthylène de haute densité (HDPE) sont généralement transformées en tubes et assemblages à grande échelle pour construire des réseaux de transport et de distribution de gaz naturel.

Les matériaux polymères sont largement utilisés par des applications industrielles diverses comme le transport de liquides sous pression.

Plusieurs recherches sont axées sur la mise au point de nouvelles résines résistantes et durables dans les environnements agressifs. C'est le cas du polyéthylène de haute densité. Cette étude concerne la préparation et l'essai des éprouvettes standards usinées dans des conditions spécifiques. La Norme adoptée est ISO 527. L'effet des milieux agressifs comme les solvants à base de benzène et les bases est discuté en fonction des durées d'exposition. Les résultats sont exprimés sous forme de propriétés mécaniques standards ( $E, \sigma_y, \sigma_{CD}, \sigma_u, \epsilon_y \dots$ ). Il ressort que l'altération est importante et varie proportionnellement à la durée

d'exposition. L'atténuation de  $E$  et de  $\sigma_y$  peut arriver jusqu'à 25% de la valeur de départ. Au niveau mécanismes, il est avancé la dégradation des chaînes moléculaires (segmentation) et aussi le durcissement qui favorise la fragilisation sous l'effet de forces externes.

## Abstract

Nowadays, the high density polyethylene resins (HDPE) are generally transformed into pipes and assemblies on a large scale to build the natural gas distribution and transmission systems

The polymeric materials are largely used by various industrial applications like the transport of liquids under pressure.

Several researches are centred on the development of new resistant and durable resins in the aggressive environments. It is the case of the high-density polyethylene. This study relates to the preparation and the test of the standards specimens machined under specific conditions. The adopted norm is ISO 527. The effect of the corrosive conditions like solvents containing benzene and the bases is discussed according to the exposure times.

The results are expressed in the form of mechanical properties standards ( $E, \sigma_y, \sigma_{CD}, \sigma_u, \epsilon_y \dots$ ). It arises that deterioration is significant and varies proportionally at the exposure time. Attenuation of  $E$  and  $\sigma_y$  can arrive up to 25% of the starting value. On the level mechanisms, it is advanced the degradation of the molecular chains (segmentation) and also the hardening which supports the hardening under the effect of external forces.

## ملخص

لقد شهدت صناعة اللدائن تطورا ملحوظا في عصرنا الحالي، لا سيما مادة البوليثيلين العالي الكثافة (HDPE) الذي يستخدم في مجال شبكات الأنابيب الناقلة والموزعة للغاز الطبيعي.

يتمحور هذا العمل التجريبي حول ثلاثة أهداف. الغاية الأولى تتمثل في دراسة كيفية توزع الخصائص الميكانيكية عبر جدار أنبوب مصنوع من البوليثيلين العالي الكثافة ووجه إلى نقل الغاز الطبيعي. تعتمد الطريقة المقترحة على تقطيع الأنابيب وتحضير العينات وفق لتعليمات ISO 527.

إن الهدف الثاني هو الدراسة التجريبية لتأثير العناصر الكيميائية الموجودة في التربة على الخصائص الميكانيكية لأنابيب البوليثيلين. لقد تمت مناقشة النتائج عن طريق المنحنيات البيانية إجهاد-تشوه ومدة الغمس. تُظهر الأوساط المكونة من محاليل مذيبة انخفاضا معتبرا في الخصائص الميكانيكية ( $E, \sigma_y, \sigma_{CD}, \sigma_u, \epsilon_y \dots$ ) لأنابيب الغاز المدفونة. مما يتسبب في تغيير بنيوي يقلل من صلابة الجملة. انخفاض  $E$  و  $\sigma_y$  ممكن أن يصل إلى 25% من القيمة البدائية.

## *Table des matières*

**Résumé**  
**Remerciements**  
**Dédicaces**

### **CHAPITRE I. Etude bibliographique sur la rupture des tubes en polyéthylène**

|   |    |
|---|----|
| I.1. Introduction   | 1  |
| I.2. Matériaux polymère   | 3  |
| I.2.1. Définition   | 3  |
| I.2.2. Classification des polymères   | 4  |
| I.2.2.1. Point de vue thermomécanique   | 4  |
| I.2.2.2. Point de vue de la structure physique  | 5  |
| I.2.3. Processus d'élaboration des polymères  | 9  |
| I.2.4. Structure moléculaire  | 10 |
| I.2.5. Le matériau polyéthylène   | 11 |
| I.2.5.1. Structure et propriétés  | 11 |
| I.2.5.2. Types de polyéthylène  | 12 |
| I.2.5.3. Mise en œuvre des PE   | 13 |
| I.3. Procédés de fabrication des tubes en matière plastique   | 15 |
| I.4. Application des plastiques en tuyauterie   | 15 |
| I.5. Classification des tubes en polyéthylène   | 17 |
| I.6. Caractéristiques des tubes en polyéthylène   | 18 |
| I.7. Rupture des polymères  | 20 |
| I.7.1. Rupture fragile  | 21 |
| I.7.2. Rupture ductile  | 21 |
| I.7.3. Comportement mécanique   | 22 |
| I.7.4. Historique et objet de la mécanique de la rupture  | 25 |
| I.7.4.1. Etendu de la zone d'Irwin  | 27 |
| I.7.4.2. Description du champ des contraintes à l'extrémité d'une fissure à l'aide du facteur d'intensité de contrainte | 28 |
| I.7.4.3. Qualités et défauts des polymères semi-cristalins  | 31 |

### **CHAPITRE II. Usinage et préparation d'éprouvettes d'essai**

|   |    |
|---|----|
| II.1. Introduction  | 33 |
| II.2. Comportement des polymères vis à vis de l'usinage     | 34 |
| II.3. Conditions d'usinage des polymères haute densité HDPE | 37 |

|  |    |
|--|----|
| II.4. Facteurs influençant la qualité de surface en tournage   | 38 |
| II.5. Procédure expérimentale  | 39 |
| II.5.1. Matériau   | 38 |
| II.5.2. usinage des enveloppes   | 39 |
| II.5.3. conditions d'usinage et évolution de la rugosité   | 40 |
| II.5.4. usinage du HDPE-80   | 41 |
| II.5.5. Evolution de la rugosité du HDPE-80  | 42 |
| II.5.6. Evolution de la cristallinité  | 43 |
| II.5.7. Evolution de la dureté   | 44 |
| II.6. Conclusion   | 46 |
| <br>   |    |
| <b>CHAPITRE III. Etude de l'évolution des propriétés mécaniques à travers la paroi du tube sur la base d'éprouvettes normalisée ASTM</b> |    |
| III.1. Introduction  | 47 |
| III.2. Approche expérimentale  | 52 |
| III.2.1. Matériau  | 52 |
| III.2.2. Préparation des éprouvettes de traction   | 52 |
| III.2.3. Procédure expérimentale   | 54 |
| III.2.4. Résultats et Discussions  | 55 |
| III.3. Conclusion  | 70 |
| <br>   |    |
| <b>CHAPITRE IV. Effet de quelques milieux chimiques sur les propriétés mécaniques du tube sur la base d'éprouvettes normalisées ASTM</b> |    |
| IV.1. Introduction   | 71 |
| IV.2. Approche expérimentale   | 74 |
| IV.2.1. Matériau   | 74 |
| IV.2.2. Préparation des éprouvettes  | 74 |
| IV.2.3. Environnement  | 74 |
| IV.2.4. Conditions expérimentales  | 75 |
| IV.3. Résultats et discussions   | 75 |
| IV.4. Conclusion   | 86 |
| <br>   |    |
| <b>Conclusion générale</b>   | 87 |
| <br>   |    |
| <b>Références bibliographiques</b>   |    |

**Liste des figures.****Chapitre I : Etude bibliographique sur la rupture des tubes en polyéthylène**

**Figure I.1:**Distribution des applications mondiales en PE [4].

**Figure I.2:**Domaines d'applications du PE durant l'année 2006 : a) USA et b) EU [4]

**Figure I.3:**Evolution de l'installation des pipes en PE dans l'industrie de distribution de gaz en Algérie [4].

**Figure I.4:**Interpénétration de structure en pelote [6].

**Figure I.5:**a) Aspect microscopique du polyéthylène avec juxtaposition de lames cristallines et de régions amorphes (filaments) [9], b) Sphérolite, microstructure des polymères semi-cristallins [10]

**Figure I.6:**Grandes étapes de la fabrication des plastiques [6]

**Figure I.7:**Structure macromoléculaire du polyéthylène linéaire (PE-HD) [7] a) Schéma de la structure d'une chaîne et disposition spatiale des atomes, b) modèle d'un segment macromoléculaire.

**Figure I.8:**Représentation d'une machine d'extrusion des tubes [16].

**Figure I.9:**Modes de défaillance prédominants dans un tube en HDPE [4].

**Figure I.10:**Rupture de tube en PE sous pression hydrostatique : a) rupture ductile, b) rupture fragile [24,31].

**Figure I.11:**Coube contrainte-déformation d'un polymère semi-cristallin [29]

**Figure I.12:**Trou elliptique dans une plaque chargée en traction [29]

**Figure I.13:**Modèle simple de déformation plastique à la pointe de la fissure, avec ou sans correction d'Irwin [19]

**Figure I.14:**Définition des axes (x, y) et des coordonnées (r,  $\theta$ ) [30]

**Figure I.15:**Définition des modes de sollicitation [29]

**Figure I.16:**Contrainte  $\sigma_{yy}(\theta = 0)$  perpendiculaire au plan de fissuration [30]

**Chapitre II : Usinage et préparation des éprouvettes d'essai**

**Figure II.1:**Tube de distribution d'eau et de gaz en polyéthylène [33]

**Figure II.2:** Réservoirs de carburant en polyéthylène [33]

**Figure II.3:**Emballage pour aliments consommables en polyéthylène [33]

**Figure II.4:**Prothèse médicale en polyéthylène [42]

**Figure II.5:**Géométrie type d'un outil de tournage [24]

**Figure II.6:**Préparation des éprouvettes, (a) Prélèvement des éprouvettes dans le sens radial, (b) Localisation des éprouvettes dans la direction axiale, (c) Localisation des éprouvettes dans le sens radial.

**Figure II.7:**Comportement des critères de rugosités en fonction des paramètres du régime de coupe : a) Vitesse de coupe  $V_c$ , b) Profondeur de passe  $ap$ , et c) Avance  $f$  [21].

**Figure II.8:**opérations de tournage du tube HDPE-80: (a) alésage, (b) chariotage

**Figure II.9:**feuille extraite du HDPE-80 après tournage

**Figure II.10:**Evolution de la rugosité à l'extérieur et à l'intérieur d'un tube de gaz en HDPE

**Figure II.11:**Comparaison des taux de cristallinité entre la surface interne et la surface externe de tubes en HDPE.

**Figure II.12:**Evolution de la dureté à travers la paroi d'un tube de gaz en HDPE.

### *Chapitre III : Etude de l'évolution des propriétés mécaniques à travers la paroi du tube sur la base d'éprouvettes normalisées*

**Figure III.1:**Distributions possibles des contraintes résiduelles à travers la paroi d'un tube :  
a) Compression sur le côté extérieur, b) Compression sur les deux côtés [49]

**Figure III.2:**Distribution de la contrainte résiduelle à travers la paroi du tube [50]

**Figure III.3:**Evolution de la déformation à travers la paroi du tube HDPE 80

**Figure III.4:**Sens de découpage des éprouvettes de traction : 1. Eprouvettes découpées dans le sens longitudinal, 2. Eprouvettes découpées dans le sens transversal

**Figure III.5:**Eprouvette haltère de traction selon la norme ASTM D 638 type 4 [53]

**Figure III.6:**Eprouvettes de traction découpées dans les deux directions ; longitudinale et transversale

**Figure III.7:**Courbes  $\sigma$ - $\epsilon$  de 3 éprouvettes HDPE appartenant à une même couche obtenues par le logiciel TestXpert. (1) début d'étirage à froid, (2) fin d'étirage et (3) début du durcissement plastique.

**Figure III.8:**Comparaison des courbes  $\sigma$ - $\epsilon$  obtenues pour le lot 1 couvrant l'ensemble de l'épaisseur du tube en HDPE.

**Figure III.9:**Evolution du module d'élasticité à travers la paroi d'un tube de gaz en HDPE pour deux lots : lot 1 éprouvettes longitudinales, lot 2 éprouvettes latérales.

**Figure III.10:**Evolution de la contrainte à l'écoulement à travers la paroi d'un tube de gaz en HDPE pour deux lots : lot 1 éprouvettes longitudinales, lot 2 éprouvettes latérales.

**Figure III.11:**Evolution de la contrainte nominale d'étirage à travers la paroi d'un tube de gaz en HDPE pour deux lots : lot 1 éprouvettes longitudinales, lot 2 éprouvettes latérales.

**Figure III.12:**Evolution de la déformation à l'écoulement à travers la paroi d'un tube de gaz en HDPE pour deux lots : lot 1 éprouvettes longitudinales, lot 2 éprouvettes latérales.

**Figure III.13:**Evolution de la déformation à la rupture à travers la paroi d'un tube de gaz en HDPE pour deux lots : lot 1 éprouvettes longitudinales, lot 2 éprouvettes latérales

**Figure III.14:**Evolution de l'étendue du palier d'étirage à froid à travers la paroi d'un tube de gaz en HDPE pour deux lots : lot 1 éprouvettes longitudinales, lot 2 éprouvettes latérales.

**Figure III.15:**Etapas de formations des craquelures pour un polymère semi cristallin selon FRIEDRICH [58].

**Figure III.16:**Déformation dans les zones diagonales des sphérolites : (a) état non déformé (b) extension de la phase amorphe (c) fragmentation des lamelles cristallines (d) alignement des fragments selon la direction d'étirage [58]

**Figure III.17:**Microstructure d'une craquelure [58]

**Figure III.18:**Relation entre  $\sigma$  et  $\varepsilon$  à l'écoulement, ( $\overline{\sigma}_y$  et  $\overline{\varepsilon}_y$  sont les valeurs moyennes autour de 2 écarts-type) pour deux lots d'éprouvettes découpées : a) dans la direction longitudinale, b) dans la direction latérale.

**Figure III.19:**Relation entre  $\sigma$  et  $\varepsilon$  au début de l'étirage, ( $\overline{\sigma}_y$  et  $\overline{\varepsilon}_y$  sont les valeurs moyennes autour de 2 écarts-type) pour deux lots d'éprouvettes découpées : a) dans la direction longitudinale, b) dans la direction latérale.

#### ***Chapitre IV : Effet de quelques milieux chimiques sur les propriétés mécaniques du HDPE***

**Figure IV.1:**Tube enfoui avec son backfill de terre [66]

**Figure IV.2:**Résultats de l'interaction des tubes HDPE avec les fluides transportés ou l'environnement externe, rupture d'un tube d'eau (grand diamètre) [66].

**Figure IV.3:**Courbes  $\sigma$ - $\varepsilon$  de 3 éprouvettes HDPE appartenant à une même couche obtenues par le logiciel TestXpert. (1) zone élastique, (2) zone de propagation de la striction et (3) début du durcissement plastique.

**Figure IV.4:**Courbe Contrainte- déformation de la couche interne d'un tube en HDPE exposé 7 jours à plusieurs environnements

**Figure IV.5:**Courbe Contrainte- déformation de la couche intermédiaire d'un tube en HDPE exposé 7 jours à plusieurs environnements

**Figure IV.6:**Courbe Contrainte- déformation de la couche extérieure d'un tube en HDPE exposé 7 jours à plusieurs environnements

**Figure IV.7:**Evolution du module d'élasticité à travers la paroi d'un tube de gaz en HDPE pour des éprouvettes immergées dans plusieurs environnements

**Figure IV.8:**Evolution de la déformation à l'écoulement à travers la paroi d'un tube de gaz en HDPE pour des éprouvettes immergées dans plusieurs environnements

**Figure IV.9:**Evolution de la contrainte à l'écoulement à travers la paroi d'un tube de gaz en HDPE pour des éprouvettes immergées dans plusieurs environnements

**Figure IV.10:**Evolution de la déformation à la rupture à travers la paroi d'un tube de gaz en HDPE pour des éprouvettes immergées dans plusieurs environnements

**Figure IV.11:**Taux d'absorption liquide à travers la paroi d'un tube en HDPE pour des éprouvettes immergées dans différents milieux

## *Liste des tableaux.*

### *Chapitre I : Etude bibliographique sur la rupture des tubes en polyéthylène*

**Tableau I.1:**Taux de cristallinité et masse volumique de différents thermoplastiques dans les états 100% cristallin, 100% amorphe et semi-cristallin [7]

**Tableau I.2:**Caractéristiques des polymères selon l'organisation de la molécule [4]

**Tableau I.3:**Propriétés mécaniques et thermiques des polyéthylènes[12].

**Tableau I.4:**Propriétés des plastiques et des matériaux traditionnels employés en transport de fluides [20]

**Tableau I.5:**Dimension de tubes en polyéthylène (basse densité) [21].

**Tableau I. 6:**Dimension de tubes en polyéthylène (haute densité) [21].

### *Chapitre II : Usinage et préparation des éprouvettes d'essai*

**Tableau II.1:**Tournage du polyéthylène [24]

**Tableau II.2:**Echelle des différentes mesures de dureté avec conversion.

**Tableau II.3:**Les relations entre les caractéristiques fondamentales du PE et les propriétés du matériau [41]

### *Chapitre III : Etude de l'évolution des propriétés mécaniques à travers la paroi du tube sur la base d'éprouvettes normalisées*

**Tableau III.1:**Module d'élasticité, résistance au seuil d'écoulement de différentes couches d'un tube de gaz en HDPE-80

**Tableau III.2:** Module d'élasticité, résistance au seuil d'écoulement, taux de cristallinité de 3 couches du tube PEMD [19].

**Tableau III.3:**propriétés mécaniques du tube HDPE-80 suivant la direction de prélèvement des éprouvettes.

**Tableau III.4:**Listing montrant les coefficients de détermination et les niveaux de probabilité d'erreur (p) entre les variables choisies en fonction de l'épaisseur du tube pour un lot d'éprouvettes longitudinales ; (\*) indique un niveau d'erreur statistique acceptable

**Tableau III.5:**Listing montrant les coefficients de détermination et les niveaux de probabilité d'erreur (p) entre les variables choisies en fonction de l'épaisseur du tube pour un lot d'éprouvettes transversales; (\*) indique un niveau d'erreur statistique acceptable

### *Chapitre IV : Effet de quelques milieux chimiques sur les propriétés mécaniques à travers la paroi du tube sur la base d'éprouvettes normalisées*

**Tableau IV.1:**Produits chimiques attaquant les tubes PE et liquides absorbés par ce matériau [63]

**Tableau IV.2:**Variation des propriétés mécaniques de la couche interne d'un tube de gaz en HDPE exposé à différents environnements.

**Tableau IV.3:** Variation des propriétés mécaniques de la couche intermédiaire d'un tube de gaz en HDPE exposé à différents environnements.

**Tableau IV.4:** Variation des propriétés mécaniques de la couche externe d'un tube de gaz en HDPE exposé à différents environnements

**Tableau IV.5:** Taux d'absorption liquide par couche.

## ***Introduction générale.***

Il y a encore trois décennies, personne ne pouvait imaginer l'essor et l'importance que prendraient les matières plastiques dans la vie courante de l'humanité. A cette époque, seules quelques propriétés bien précises étaient connues et réservées à la fabrication de films, de fibres, de revêtements, ou encore de produits à bas prix. Aujourd'hui, les connaissances sur la nature et la structure des polymères et leurs propriétés permettent, en choisissant les produits de base, le type de liaisons et d'architecture moléculaire, de modifier à volonté et avec une extrême précision les propriétés du plastique à élaborer. Chaque décennie fait donc apparaître son lot de nouvelles matières qui génèrent des utilisations toujours inédites et toujours plus sophistiquées.

Aujourd'hui, les différentes résines de polyéthylène de haute et moyenne densité sont généralement transformées en tubes et assemblages à grande échelle pour construire des réseaux de transport et de distribution d'eau et de gaz naturel.

La rupture est un problème auquel l'homme aura à faire aussi longtemps qu'il fabriquera des structures. Actuellement, ce problème est critique surtout avec le développement technologique de structures complexes qui utilisent des matériaux hétérogènes et de différentes natures. Cette situation est aussi rendue difficile par les techniques d'assemblage ou de soudage qu'il faut inventer pour réduire les risques d'interaction. Les avancées dans la connaissance de la mécanique de la rupture permettent aujourd'hui de mieux prévenir le risque de rupture en ayant recours à des méthodes de calcul parfois conservatives mais optimisées.

Dans ce thème, il est proposé d'investiguer expérimentalement quelques propriétés mécaniques d'un tube de transport de gaz en HDPE-80 à travers la totalité de sa paroi. Ce travail est divisé en quatre parties: dans le chapitre I est détaillée une étude bibliographique sur la rupture des tubes en PE, leur utilisation dans l'industrie de transport de gaz naturel, chapitre II représente les différentes étapes réalisées pour la préparation des éprouvettes d'essai, le polyéthylène nécessite quelques spécificités à prendre en compte lors de la conception, les conditions optimales adoptées pour réaliser les différentes opérations d'usinage sont extraites d'une étude spécialisée réalisée par M. Kaddeche sur des résines de HDPE-100 et HDPE-80. le chapitre III montre une étude expérimentale sur le comportement mécanique des tubes en PE en utilisant des éprouvettes standards et enfin le chapitre IV une

étude est développée pour investiguer expérimentalement la dégradation des propriétés mécaniques des tubes de transport de gaz en PE dans quelques milieux agressifs. Cette étude est complétée par des essais sur des éprouvettes soumises à des environnements oxydants. L'objectif est de rechercher l'interaction entre les environnements chimiques représentant l'agressivité des sols d'enfouissement. Quelques propriétés obtenues après exposition du matériau au solvant organique, à une solution acide, à l'huile synthétique DOT3, à l'eau sont ensuite comparées à celles laissées dans l'air ambiant.

## **I.1.Introduction**

Au cours des dernières décennies, les domaines d'utilisation des matériaux polymères se sont considérablement diversifiés. Bien que l'industrie de transformation des polymères ne mobilise que quelques pour cents de la production pétrolière et gazière, elle représente un immense tonnage au point d'être susceptible de polluer l'environnements [1]. 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 en raison de son coût relativement faible, sa facilité d'installation et de sa durabilité à long terme vis-à-vis de la dégradation due aux effets de l'environnement, par rapport aux systèmes à base de cuivre et d'acier [2,3]. En 2003, parmi les 44 millions de tonnes de PE produites dans le monde entier, approximativement 40% étaient des HDPE. Plus de 90% de la production de PE est consommée par six principales applications, y compris 50% pour des films et des feuilles, approximativement 25% pour les produits moulés et juste 6% pour des pipes. Ces données illustrent le développement entrepris par le PE en tant que remplacement potentiel des métaux et des matériaux semblables pour des applications techniques spécifiques dans les pièces de rechange, les éléments de machine et les enduits comme indiqué dans la figure I.1. Les applications des pipes sont très diversifiées car il est possible de les employer pour la construction des réseaux pour transporter des fluides sous pression tels que l'eau potable et le gaz naturel ou pour l'irrigation agricole et aussi dans l'industrie pétrochimique. Les principales utilisations des pipes de PE sont comparées pour le cas des Etats-Unis (figure I.2a) et l'EU (figure I.2b) pour l'année 2003, et on observe que les réseaux de gaz naturel et d'eau potable viennent bien derrière les applications de drainage des sols. La partie réservée pour la distribution de gaz naturel est importante et est en augmentation constante. Dans un pays comme l'Algérie, l'utilisation des pipes en plastique est en croissance très rapide tandis que les pipes en acier et en fonte sont en nette régression car ils deviennent coûteux et difficiles à maintenir (figure I.3) [4].

En dépit de l'acceptation du polyéthylène (PE) comme alternative économique, la sûreté de fonctionnement reste une question fondamentale, et son utilisation requiert notamment l'aptitude à déterminer les propriétés en fonction de l'utilisation et des conditions de service requises par le dimensionnement. Les études de fiabilité en conception et en fonctionnement commencent à apparaître car la question de sûreté est posée avec sérieux. Les défaillances qui ont causé des pertes humaines et des pertes de production ne sont plus acceptées au vu des demandes croissantes sur les débits et les pressions de gaz.

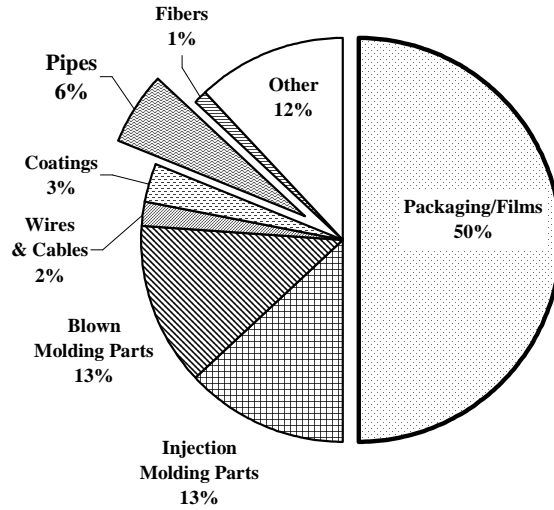


Figure I.1. Distribution des applications mondiales en PE [4].

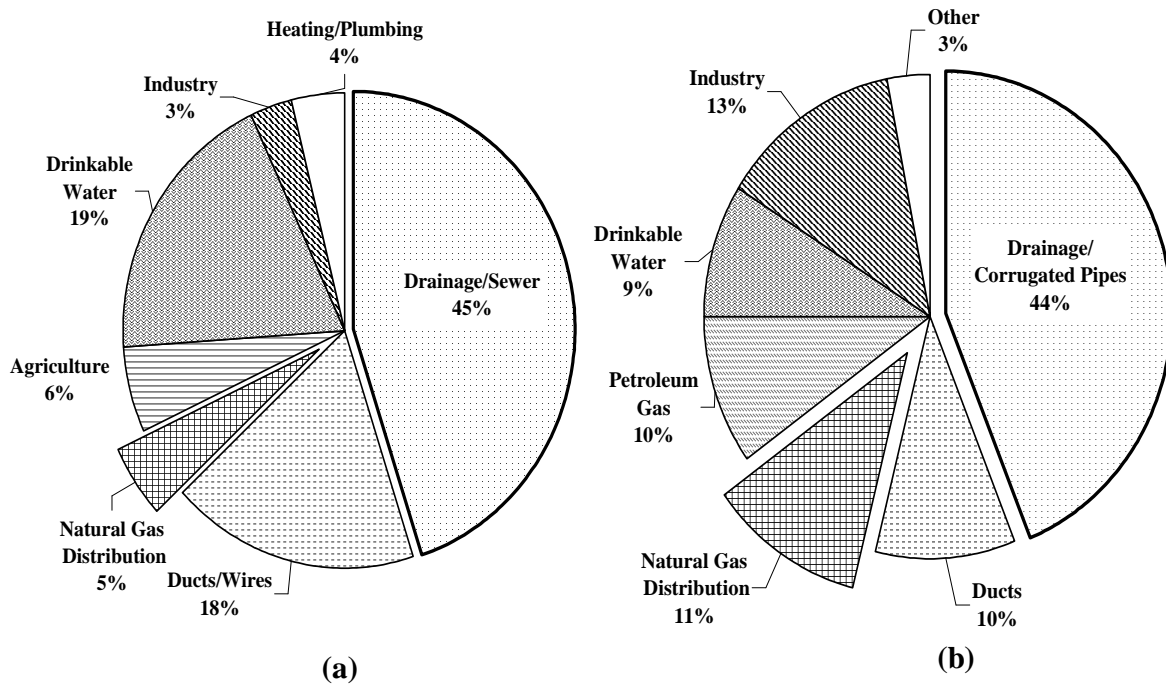
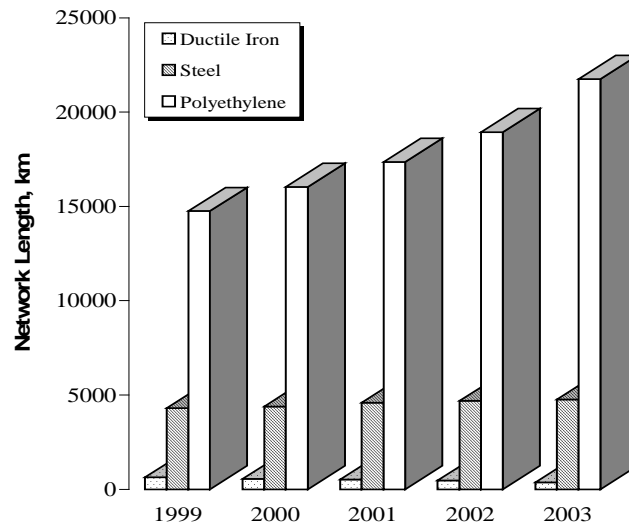


Figure I.2 : Domaines d'applications du PE durant l'année 2006 : a) USA et b) EU [4]



**Figure I.3 :** Evolution de l'installation des pipes en PE dans l'industrie de distribution de gaz en Algérie [4].

## I.2. Matériaux polymères

Une matière plastique est un mélange contenant une matière de base, susceptible d'être moulée ou qui a été moulée. La matière de base est en général un mélange de macromolécules ou hauts polymères organiques ou semi-organiques à caractère résineux ; résultant le plus souvent d'une réaction naturelle ou artificielle de polycondensation ou de polymérisation [5].

Les matériaux de synthèse comportent les plastiques proprement dits (ou plastomères) diffusés le plus souvent à l'état de produits moulés, les fibres textiles issues de polymères, les élastomères, à l'exclusion du caoutchouc naturel. Les matières plastiques elles-même regroupent les plastiques de synthèse et les plastiques artificiels : celluloses (ces derniers sont devenus d'un usage marginal). On peut estimer que les plastiques ou fibres artificielles sont issues de produits polymérisés par la nature.

### I.2.1. Définition

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'un atome de

carbone (ou de silicium dans le cas des polymères siliconés). On distingue les polymères issus d'éléments naturels tels que le latex, le bois, ou le coton et les polymères obtenus par synthèse organique à partir d'éléments tels que le charbon, ou les hydrocarbures gazeux. Les polymères, substances organiques macromoléculaires, sont obtenus par l'assemblage des monomères de base. Cette opération s'appelle la réaction de polymérisation [6].

### **I.2.2. Classification des polymères**

Les matériaux polymères sont classés suivant différents critères. 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 le premier cas, les notions de matériaux semi-cristallins et de matériaux amorphes sont introduites ; dans le second, c'est la structure moléculaire en chaîne d'atome qui est à prendre en considération [1,5].

#### **I.2.2.1 Point de vue thermomécanique**

Lorsqu'un corps macromoléculaire à structure linéaire est chauffé, il se ramollit. Au contraire, il se fixe dans sa forme, s'il est refroidi et l'opération reste réversible. En conséquence, le matériau est appelé *thermoplastique* ou *plastomère*. La transformation d'un tel produit nécessitera, après chauffage, de le mettre en forme dans un moule froid pour le fixer, et les déchets éventuels seront récupérables; réversibilité du phénomène. Par contre, si la température d'un corps macromoléculaire se présentant sous l'aspect d'un réseau tridimensionnel est élevée, il est fixé directement de façon irréversible dans sa forme chauffée car la chaleur rigidifie les pontages du réseau. Le matériau est dit *thermodurcissable* ou *duromère*. La mise en œuvre est opérée en moule chauffé et les chutes éventuelles sont perdues ; irréversibilité du phénomène. Les chaînes courtes facilitent la transformation alors que les chaînes longues améliorent les propriétés mécaniques [7].

Les thermoplastiques sont constitués de macromolécules linéaires ou ramifiées, liées entre elles par des liaisons physiques. Ces matières sont solides à température ambiante. Elles se ramollissent à la chaleur jusqu'à un état plastique dans lequel elles se laissent se déformer plus facilement. Ce processus est réversible, c'est-à-dire que les thermoplastiques se rigidifient de

nouveau au refroidissement. Selon la régularité de leur chaîne, ces polymères peuvent cristalliser (thermoplastiques semi-cristallins) ou non (thermoplastiques amorphes).

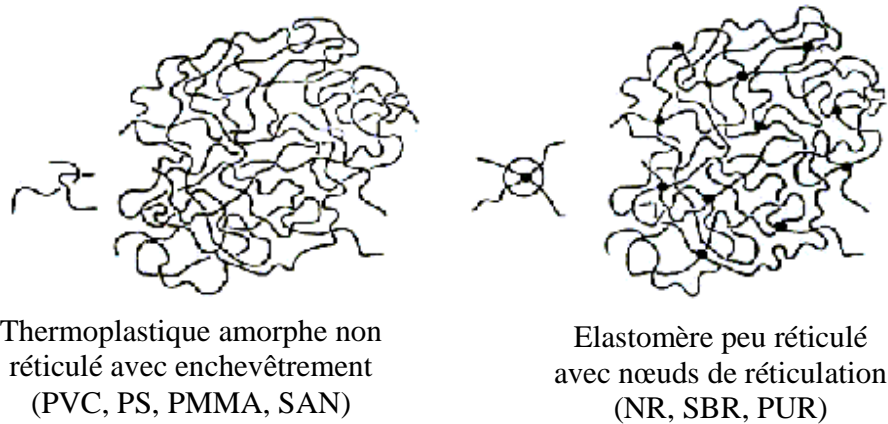
Les thermodurcissables sont, contrairement aux thermoplastiques et en raison de leur structure, le plus souvent rigides. Ils sont stables même à des températures relativement élevées et présentent en général une bonne tenue vis-à-vis des milieux agressifs. Ils ne sont pas fusibles puisque, même si les liaisons physiques peuvent être éliminées sous un certain apport de chaleur, les liaisons chimiques sont conservées et excluent le glissement des chaînes les unes par rapport aux autres .

Les élastomères sont des composés macromoléculaires dont les propriétés sont étroitement liées à leur nature chimique et au caractère aléatoire de la distribution des chaînes moléculaires. Ils se distinguent par les faibles valeurs des forces d'attraction entre les chaînes et des modules d'élasticité à température ambiante et surtout par leur capacité élevée de déformation. Le caoutchouc naturel et les caoutchoucs synthétiques appartiennent à cette famille qui constitue apparemment une classe distincte [6,7, 8].

### **I.2.2.2. Point de vue de la structure physique**

#### **a) Polymère amorphe**

Dans les polymères amorphes, les macromolécules adoptent une conformation de type « pelote statistique » à l'état liquide, mais aussi après refroidissement jusqu'à l'état vitreux. La taille des pelotes est quasi identique, que le matériau soit à l'état liquide ou à l'état vitreux, ou que les macromolécules soient dissoutes dans un solvant chimiquement inerte. La masse volumique d'une macromolécule individuelle dans la conformation du type pelote est approximativement égale à un centième de celle du polymère à l'état solide. Les macromolécules dans la conformation de types pelote statistique peuvent, selon les conditions auxquelles elles sont soumises, s'entrelacer, s'enchevêtrer, mais aussi créer des nœuds chimiques (réticulation) à certains endroits (figure I.4) [6]. Les segments de chaînes peuvent comporter jusqu'à 1000 atomes entre deux nœuds du réseau d'un élastomère faiblement réticulé, jusqu'à 20 atomes environ pour une matière thermo durcie fortement réticulée.



**Figure I.4 :** Interpénétration de structure en pelote [6].

### b) Polymères Semi –Cristallins

Du point de vue thermodynamique, un thermoplastique semi-cristallin est considéré comme un système ouvert, c'est-à-dire où un échange d'énergie avec l'extérieur est possible. L'état de ce système peut être défini par son enthalpie libre. Plus la valeur de l'enthalpie libre est faible, plus l'état du système est stable. Un changement d'état, par exemple une transition de l'état fondu amorphe à l'état solide cristallin ou une postcristallisation, peut être décrit par la variation de l'enthalpie  $\Delta H$  et de celle de l'entropie  $\Delta S$  d'après l'équation suivante, qui fait aussi intervenir la température  $T$  :

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad [I.1]$$

L'entropie d'un système dépend du nombre d'états possibles et réalisables, plus précisément de la probabilité d'existence de ces états. L'augmentation des empilements parallèles des chaînes dans les cristallites et l'augmentation associée de l'ordre entraînent une diminution de l'entropie. L'entropie d'une macromolécule libre est de ce fait plus élevée que celle d'une chaîne dont l'extrémité est immobilisée dans une cristallite. Un segment de chaîne mobile ne peut pas occuper, entier, les sites d'un réseau cristallin, comme par exemple les atomes dans un métal, mais seulement liaison par liaison. La variation d'entropie n'est donc pas identique pour tous les segments. L'entropie des segments de chaînes qui s'empilent, mais également celle des segments macromoléculaires n'ayant pas encore cristallisé, varie au cours de la cristallisation. L'importance de la variation d'entropie dépend donc aussi de la liberté de mouvement des

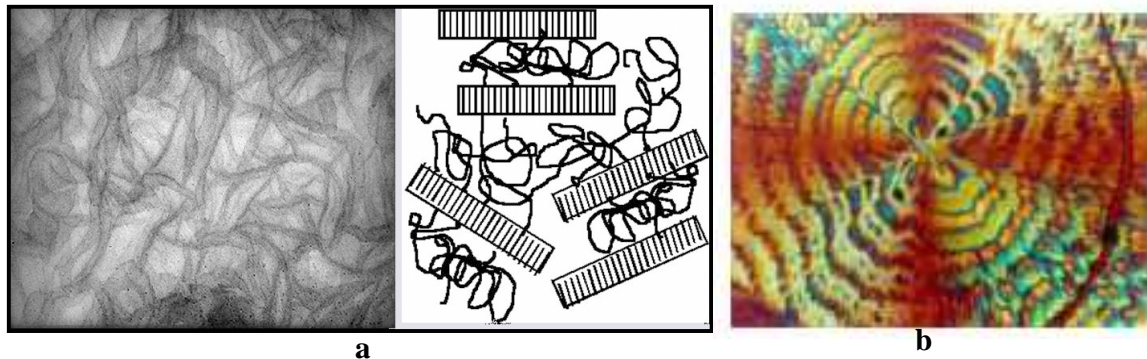
segments de chaînes non ordonnés, de leur longueur libre et de leurs points de fixation éventuels. Un système correspondant à un thermoplastique semi-cristallin est le plus stable lorsque  $\Delta G$  atteint sa valeur minimale. La variation de l'enthalpie  $\Delta H$  est calculée à partir de la variation de l'énergie interne  $\Delta U$  et de la variation volumique du travail  $W$  (donné par  $P \cdot \Delta V$ ).

$$\Delta H = \Delta U - P \cdot \Delta V \quad [I.2]$$

La pression  $P$  est le plus souvent constante et égale à la pression atmosphérique.  $\Delta V$  est la variation de volume du système entier pendant la transformation. L'énergie interne  $U$  consiste premièrement en une composante intramoléculaire, qui correspond à l'énergie potentielle, deuxièmement en une composante intermoléculaire, qui prend en compte les interactions macromoléculaires, et troisièmement en une composante cinétique, qui représente l'énergie de vibration. La composante intermoléculaire est la plus faible dans le cas d'un empilement parallèle des macromolécules dans les cristallites. Un arrangement parallèle complet n'est, en règle générale, pas possible dans les polymères.

Les zones amorphes des thermoplastiques semi-cristallins sont composées de boucles de chaînes repliées pénétrant dans les cristallites, et de chaînes traversant plusieurs cristallites, d'extrémités de chaînes libres. L'enthalpie et l'entropie sont nettement plus élevées dans les zones amorphes que dans les zones cristallines. Elles dépendent toutes deux de la température, mais de façon différente. L'accès d'un polymère, susceptible de cristalliser, à l'état qui correspond à la plus basse enthalpie libre est donc fonction de la température.

L'aptitude des polymères à cristalliser, c'est-à-dire la capacité des chaînes à s'arranger régulièrement et parallèlement, dépend de leur structure chimique. Les chaînes moléculaires qui cristallisent le mieux sont les chaînes non ramifiées, sans ou avec si possible peu de groupement latéraux volumineux, ou alors dans le cas régulièrement répartis le long du squelette. Le PE linéaire, le PET, le PTFE et le PP isotactique sont des exemples de polymères possédant une structure cristalline. Un certain nombre de plastiques cristallisent mal ou pas du tout, à cause de substituants irrégulièrement répartis et/ou relativement volumineux. C'est le cas du PVC atactique, du PMMA et du PS. La cristallinité partielle d'un polymère semi-cristallin peut être définie comme la juxtaposition de zones amorphes et de zones cristallines comme montré dans la Figure I.5(a) [7]. La figure I.5(b) illustre la micro structure des polymères semi cristallins



**Figure I.5 :** a) Aspect microscopique du polyéthylène avec juxtaposition de lames cristallines et de régions amorphes (filaments) [9], b) Sphérolite, microstructure des polymères semi-cristallins [10]

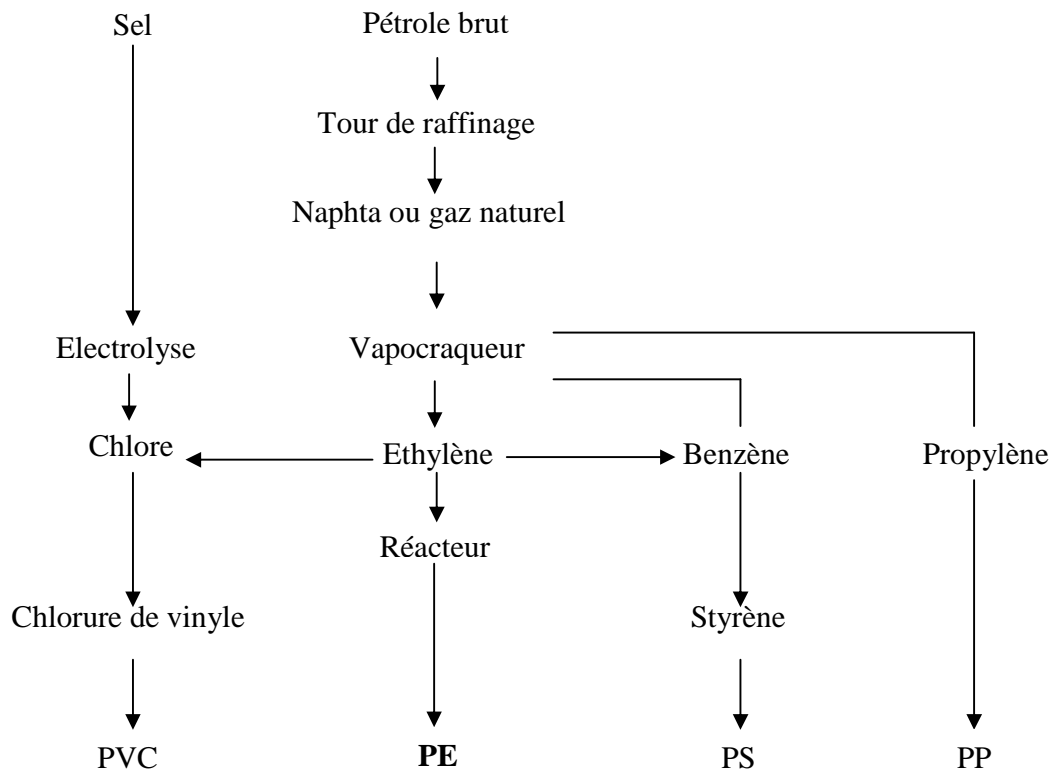
Les taux de cristallinité usuels de quelques thermoplastiques sont représentés sur le Tableau I.1, la cristallisation est accompagnée d'une variation de la masse volumique.

**Tableau I.1 :** Taux de cristallinité et masse volumique de différents thermoplastiques dans les états 100% cristallin, 100% amorphe et semi-cristallin [7]

| Matériau polymère   | Taux de cristallinité [%] usuel | Masse volumique [g/cm <sup>3</sup> ] |                    |                  |
|---|---------------------------------|--------------------------------------|--------------------|------------------|
|   |                                 | $\rho_c$ (cristallin)                | $\rho_a$ (amorphe) | $\rho$ (usuelle) |
| Polyamide (PA 66)   | 35-45                           | 1.24                                 | 1.07               | 1.14             |
| Polyamide (PA 6)  |                                 | 1.23                                 | 1.08               | 1.14             |
| Poly(oxyméthylène) (POM)                                      | 70-80                           | 1.54                                 | 1.25               | 1.41             |
| Poly(téréphtalate d'éthylène) (PET)                           | 30-40                           | 1.50                                 | 1.33               | 1.38             |
| Poly(téréphtalate de butylène) (PBT)                          | 40-50                           | -                                    | -                  | 1.3              |
| Polypropylène (PP), principalement chaînes isotactiques       | 70-80                           | 0.95                                 | 0.85               | 0.905            |
| Polypropylène (PP), taux plus important de chaînes atactiques | 50-60                           | 0.95                                 | 0.85               | 0.896            |
| Polyéthylène haute densité (PEHD)                             | 70-80                           | 1.0                                  | 0.85               | 0.95             |
| Polyéthylène basse densité (PELD)                             | 45-55                           | 1.0                                  | 0.85               | 0.92             |

### I. 2. 3. Processus d'élaboration des polymères

Actuellement les matières plastiques sont essentiellement produites à partir de la pétrochimie, le cycle suivant est le plus souvent déployé figure I.6 :



**Figure I.6 :** Grandes étapes de la fabrication des plastiques [6]

A partir de naphta, le producteur de plastiques prépare par vapocraquage (ou reformage) les grands intermédiaires de la pétrochimie, dont les monomères qui, sous l'effet de pression, température, catalyseurs deviendront des polymères (polycondensats), qui constituent les matières plastiques proprement dites, que l'on utilisera dans la transformation [6]. Le passage du monomère au polymère (combinaisons de monomères) se fait de trois façons :

- polymérisation
- polycondensation
- polyaddition

### I. 2. 4. Structures moléculaires

D'une façon générale, les propriétés physiques d'une matière première sont données par l'intensité et l'ordonnement des groupements moléculaires (forces de liaison). Aussi, le matériau sera d'autant plus résistant que les chaînes seront longues et les points de raccordements nombreux. Les atomes extérieurs par contre, définissent les propriétés chimiques du matériau, Par conséquent :

- Les chaînes peuvent être linéaires et denses, conférant au produit une certaine rigidité ou ramifiée, moins dense et souple ;
- Les réseaux tridimensionnels sont en quelque sorte des chaînes réticulées par pontage donnant une meilleure tenue de la structure en température.

Il existe deux classes de polymères : les polymères amorphes et cristallins qui donnent également des caractéristiques différentes voir Tableau I.2.

**Tableau I.2 :** Caractéristiques des polymères selon l'organisation de la molécule [4]

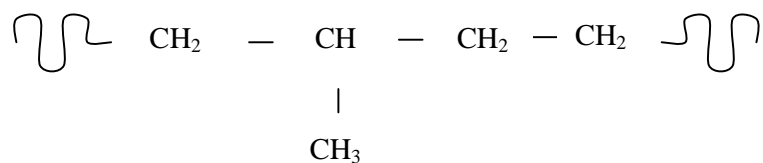
| polymère  | Caractéristiques   | molécule   | Classe      |
|---|--|--|-------------|
| PS –SAN<br>ABS<br>PMM<br>PC<br>PPO - PSU<br>PPS<br>PVC (état intermédiaire) | -Faible retrait, stabilité dimensionnelle, tenue au fluage et au choc<br>-Résistance mécanique dépendante de la température<br>-Difficile à étirer (peu de fibre ou de film)<br>-Plage de ramollissement, grande fluidité<br>-Cycle rapide                                     | Inorganisées : chaînes très ramifiées, désordonnées ou pelotes | Amorphe     |
| PEHD<br>PP – PET<br>PBT – PA<br>POM - PFE                                   | -Tenue chimique (en particulier aux hydrocarbures et solvants)<br>-Résistance à la fatigue dynamique<br>-Bonne propriétés d'écoulement (possibilité de fibre ou de film)<br>-Point de fusion franc<br>-Faible coefficient de friction<br>-Moindre déformation sous température | Organisées : alignées, ordonnées, symétriques                  | Cristalline |

## I.2.5. Le matériau polyéthylène

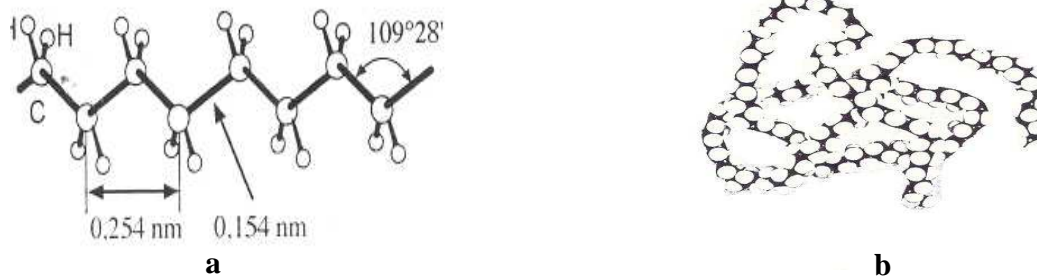
### I.2.5.1. Structure et propriétés

Les polyéthylènes (PE) possèdent l'une des structures chimiques les plus simples de tous les polymères. Ce sont des matériaux thermoplastiques semi cristallins qui représentent un enchaînement de groupe (-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-) [8]. Ils sont obtenus par polymérisation d'éthylène gazeux. Ce dernier est polymérisé en présence d'un comonomère (butène, pentène, hexène, octène...etc.). Divers procédés sont utilisables pour cette polymérisation, au nombre desquelles nous citerons : la déshydratation de l'alcool éthylique sur l'alumine, l'hydrogénation de l'acétylène et le cracking des hydrocarbures aliphatiques se trouvant dans le naphta (pétrole brut) et les gaz naturels. Cette dernière s'effectue à haute température, vers 800°C. L'éthylène doit être soigneusement purifié, pour le débarrasser de diverses impuretés gazeuses comme : CO, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, S...qui pourraient jouer le rôle d'inhibiteurs de polymérisation, en rompant les chaînes de polymère, au fur et à mesure de leur formation [11, 12].

D'après la norme ASTM D-1248, les polyéthylènes sont classés comme suit : les PE qui ont les densités comprises entre 0.910 g cm<sup>-1</sup> et 0.925 g cm<sup>-1</sup> sont de type I ; polyéthylène à basse densité (*LDPE*). La rangée de 0.926 à 0.940 est le type II, polyéthylène moyenne densité (*MDPE*). Les rangées de 0.941 à 0.959 sont classifiées sous le type III et +0.960 comme type IV, sont appelées polyéthylène haute densité (*HDPE*) [13]. Cette classification est devenue fondamentale dans l'industrie des tubes. Dans ce thème, nous sommes intéressés par les polyéthylènes de haute densité. Ces polyéthylènes (PEHD) sont des polymères non ou très peu branchés, courts ou longs, fabriqués surtout à basse et moyenne pressions par amorçage ionique. Ils sont représentés par la formule chimique suivante [14].



La figure I.7.b représente le modèle d'un segment macromoléculaire de polyéthylène de haute densité; la chaîne est dans la réalité environ dix fois plus longue. Les atomes d'hydrogène (petits cercles) sont liés latéralement aux atomes de carbone (grands cercles), ce qui confère une allure en zigzag à la macromolécule [7].



**Figure I.7 :** Structure macromoléculaire du polyéthylène linéaire (PE-HD) [7] a) Schéma de la structure d'une chaîne et disposition spatiale des atomes, b) modèle d'un segment macromoléculaire.

En l'absence de contraintes, le polyéthylène haute densité peut supporter une température de 110 à 120°C, stérilisation par exemple, cette température décroît sous charge et augmente avec la réticulation. Le passage de la température de transition vitreuse est d'autant moins sensible que le polyéthylène est plus cristallin. La fusion des polyéthylènes est étalée car la température de fusion augmente avec la masse volumique. Les PE brûlent avec une flamme bleutée et ils « gouttent ». La sensibilité dimensionnelle est indépendante de la reprise d'humidité très faible <0.2% [15].

### I. 2. 5. 2. Types de polyéthylène

Suivant les procédés de polymérisation d'éthylène, on obtient deux types distincts de polyéthylène:

- Les procédés à haute pression : fournissant le polyéthylène à basse densité (PEBD)
- Les procédés à basse pression : fournissant un polymère légèrement plus dense, le polyéthylène à haute densité (HDPE).

Les propriétés les plus importantes de ces types sont rassemblées dans le Tableau I.3.

**Tableau I.3** : Propriétés mécaniques et thermiques des polyéthylènes[12].

| Propriété   | PEBD      | PEHD      |
|---|-----------|-----------|
| Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )                        | 0.91–0.94 | 0.95–0.98 |
| Module de Young (20°C, 100s) (GPa)                          | 0.15–0.24 | 0.55–1.00 |
| Résistance à la traction (MPa)                              | 7-17      | 20-30     |
| Ténacité (20°C) (MPa m <sup>1/2</sup> )                     | 1-2       | 2-5       |
| Température de transition vitreuse T <sub>g</sub> (°K)      | 270       | 300       |
| Température de ramollissement T <sub>s</sub> (°K)           | 355       | 390       |
| Chaleur massique (J Kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )      | 2250      | 2100      |
| Conductivité thermique (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ) | 0.35      | 0.52      |
| Coefficient de dilatation thermique (M K <sup>-1</sup> )    | 160-190   | 150-300   |

Les propriétés des polyéthylènes dépendent des paramètres structuraux comme la cristallinité, la masse volumique et la distribution des masses molaires, de la conception de la pièce et des conditions d'utilisation comme la durée des charges appliquées, la nature des contraintes de sollicitation et la température. L'introduction de branchements courts dans la chaîne carbonée, favorisant l'encombrement stérique, abaisse la masse volumique du HDPE et sa cristallinité.

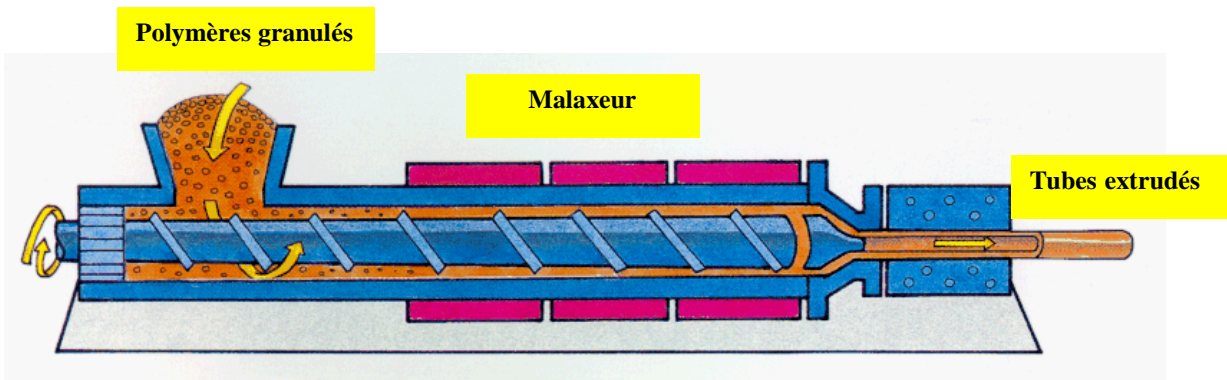
### I. 2. 5. 3. Mise en œuvre du PE

Pendant la mise en œuvre, le polymère est mélangé à différents produits (stabilisants, lubrifiants, plastifiants, charges..) pour élaborer une formulation qui se présente le plus souvent sous forme de poudre ou de granulés. Cette formulation est ensuite fondue (cas des polymères semi-cristallins ou plastifiés (cas des polymères amorphes), à la fois par conduction thermique depuis les parois de l'outillage de mise en forme et par dissipation d'énergie mécanique. Cette matière thermoplastique très visqueuse est ensuite forcée dans un outillage qui va donner une première forme au produit (tube, film...), elle est ensuite mise en forme et alors refroidie, dans certain cas étirée ou bi-étirée, pour obtenir le produit final. De ce processus de mise en forme, des paramètres d'étirage et de refroidissement vont dépendre la structure cristalline du polymère et

de l'orientation de la phase amorphe. Etant donné leur faible conductivité thermique et leur viscosité élevée, les matériaux polymères ne se laissent pas mettre en œuvre comme des matériaux traditionnels. Il faut en effet provoquer leur fusion, puis les mettre sous une pression suffisante pour pouvoir les forcer au travers des outillages de mise en forme.

Les machines d'extrusion (figure I.8) sont des équipements de mise en œuvre les plus utilisés et au travers desquelles, la plus grande quantité de matières thermoplastiques est mise et forme. Les éléments actifs de ces machines sont une ou plusieurs vis enfermées dans un Foureau, dont la température peut être contrôlée par des éléments chauffants et refroidissant. Ces vis sont entraînées par un moteur électrique (parfois hydraulique) à vitesses variables au travers d'un réducteur et d'un dispositif d'accouplement [8].

L'extrusion est une technique de fabrication continue de feuilles, de plaques, de tubes et de profilés. La matière plastique est introduite, sous forme de poudre ou de granulés, dans un cylindre chauffé. A l'intérieur de celui-ci tourne une vis sans fin assurant le transport et l'homogénéisation de la masse fondue. Cette masse plastique est ensuite pressée à travers une matrice d'extrusion ou une filière, qui donne la forme finale à la section de l'extrudat. Le produit extrudé est refroidi puis coupé en longueur.



**Figure I.8 :** Représentation d'une machine d'extrusion des tubes [16].

Le PEHD peut être transformé par d'autres techniques :

- \* Extrusion de films par technique "Chill – Roll";
- \* Production de fils et de fibres à partir de film extrudé – soufflés (fibrillation) ;
- \* Production de fils par filage.

### **I. 3. Procédés de fabrication des tubes en matières plastiques**

*-Tubes stratifiés :* Leur fabrication s'effectue à partir d'une feuille de papier, d'une étoffe textile, ou d'un tissu de verre, préalablement imprégnés d'une solution de matière plastique, par trempage ou projection au pistolet. L'enroulement sous tension de la feuille autour d'un mandrin donne naissance à un rouleau dont l'épaisseur varie avec le nombre de tours. Ce rouleau est ensuite polymérisé et aggloméré par passage dans une étuve, ou mieux par moulage dans un moule approprié, serré entre les plateaux chauffants d'une presse hydraulique. Des tubes stratifiés peuvent être fabriqués à froid avec certaines matières plastiques liquides dont la prise est obtenue par mélange avec un catalyseur.

*-Tubes coulés:* Ce procédé de fabrication est peu employé. La matière plastique, se présentant sous forme liquide (solution, émulsion, polymérisation incomplète), est versée dans un moule adéquat dans lequel elle se refroidit, soit à froid grâce à un catalyseur convenable, soit à chaud par introduction du moule dans une étuve, soit par les deux moyens combinés.

*-Tubes centrifugés:* Ce procédé est utilisé avec les polyméthacrylates. La matière est projetée par centrifugation contre un moule cylindrique chauffé, animé d'un mouvement de rotation. Le tube est retiré après refroidissement.

Divers autres moyens de fabrication de tubes en matières plastiques ont été proposés et sont même parfois en essai semi-industriel. Une autre tendance exploite les armatures tissées en forme de tubes, dont la résistance mécanique est considérable et qui sont noyées ensuite dans le plastique, pour obtenir l'étanchéité, la rigidité, la résistance à la corrosion [17].

### **I. 4. Application des plastiques en tuyauterie**

La discipline du développement technologique des canalisations de gaz exige l'amélioration continue sur plusieurs fronts. Les chercheurs prévoient un futur où les systèmes de gaz sont plus fiables, et plus économiques que ceux d'aujourd'hui. Afin de réduire le coût et d'améliorer l'efficacité du contrôle de fuite de gaz naturel, GRI (Gas Research Institute) a étudié l'utilisation de capteurs sensibles à distance, et des techniques de formation d'image de fuite par laser qui tirent profit des propriétés spectrales infrarouges d'absorption du gaz naturel. Des systèmes prototypes ont été établis et ont montré l'efficacité de ce procédé. D'autres chercheurs ont réussi de fabriquer un matériau magnétique pour des tubes de PE. Cette technologie facilite la localisation ainsi que l'installation des canalisations. En ce qui concerne le contrôle des réseaux,

plusieurs méthodes de détection ont été développées parmi lesquelles on cite brièvement : techniques basées sur l'emploi de satellite afin de détecter les éboulements potentiels qui sont dangereux ; appareillage de contrôle de pression qui fournit une méthode simple et beaucoup plus rapide pour surveiller et enregistrer l'évolution de la pression, le temps et la température dans un tronçon de canalisation. Pour la préparation en "direct" des lignes de gaz à l'intérieur du tube, un système robotique automatisé est développé et manipulé à distance économisant le temps et assurant la sécurité des personnes [18].

Le polyéthylène de basse densité (LDPE) est souvent transformé par extrusion en profilés et en tubes. Les tuyaux en LDPE ont des diamètres rarement supérieurs à 100 mm et sont très appréciés en agriculture, car n'ayant pas la rigidité du PVC et ils peuvent être réceptionnés sur les lieux d'utilisation sous forme de rouleaux. Ils sont déroulés en tranchée sur de grandes longueurs. Le polyéthylène est en général coloré en noir de carbone fortement dispersé, ceci afin d'éviter un vieillissement prématuré. Il est extrudé sur monovis 15 ou 20 D, avec un taux de compression de 3 et une température entre 150°C (entrée) et 200°C (filière).

Le HDPE donne des produits plus rigides. On peut, par mélange avec le LDPE, obtenir des tubes de rigidités intermédiaires entre les rigidités des deux qualités de PE. Le mélange des granulés se fait en toutes proportions et l'extrusion ne donne pas lieu à des difficultés particulières [19].

L'extrusion des granulés sur monovis 20 à 25 D est faite à un taux de compression de 3-3.5 et une température d'extrusion de 200° (entrée) à 240°C (filière). Les PE de moyenne densité sont aussi sollicités comme le HDPE dans des conditions similaires. Les applications sont nombreuses et intéressantes parmi lesquelles, il y a :

- Conduites de transport de pétrole, fuel, gaz, eau salée;
- Conduite de transport de pâtes cellulosiques;
- Conduites de ventilation et de dépoussiérage; Irrigation et drainage dans les cultures;
- Tubes de protection des câbles téléphonique.

Le Tableau I.4 donne les propriétés des plastiques et des matériaux traditionnels employés en tuyauterie.

**Tableau I.4 :** Propriétés des plastiques et des matériaux traditionnels employés en transport de fluides [20]

| Matériau                                | Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> ) | Coefficient de dilatation thermique, (10 <sup>-6</sup> /°C) | Conductivité thermique, (W·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> ) | Résistance à la traction MPa (ASTM D 638) | Module d'élasticité (GPa) (ASTM D 638) |
|---|--------------------------------------|---|--|---|--|
| Thermoplastiques                        | 0,09-1,80                            | 50-180  | 0,14-0,5   | 23-50                                     | 1,0-3,1                                |
| Thermodurcissables                      | 1,30-2,00                            | 22-31   | 0,19-0,26  | 62  | 0,90-19                                |
| Aluminium                               | 2,70                                 | 23  | 220  | 76  | 69                                     |
| Laiton                                  | 8,50                                 | 19  | 120  | 500                                       | 100                                    |
| Cuivre                                  | 8,75                                 | 17  | 390  | 220                                       | 120                                    |
| Métaux ferreux (Fonte et aciers divers) | 7,20-7,85                            | 12-16   | 33-52  | 160-1400                                  | 90-270                                 |
| Plomb                                   | 11,35                                | 30  | 35   | 17  | 14                                     |
| Béton                                   | 1,80-2,50                            | 11  | -  | 1,4-3,4                                   | 14-34                                  |

## I. 5. Classification des tubes en PE

Tous les tubes plastiques ont une classification qui dicte les propriétés primaires du matériau à base de sa résine. Selon la norme ASTM D-3350, les tubes sont classés suivant leur densité, indice de fusion, module de flexion, résistance à la traction au seuil de l'écoulement plastique, résistance à la fissuration sous contrainte, résistance hydrostatique à 23°C, stabilisateurs de pigments et stabilité aux rayons ultraviolets. L'essai hydrostatique de design (HDB) est une évaluation de la plus importante propriété. Cet essai renseigne sur les propriétés à long terme du matériau. En référence aux normes ISO, le polyéthylène est défini par la MRS, (Minimum Required Strength) : qui est la résistance minimale que le polyéthylène doit garantir après 50 ans de service à une température de 20°C (Tableau I.5). Celle-ci s'appelle aussi résistance hydrostatique à long terme à 20°C. Les tubes sont caractérisés aussi par le rapport dimensionnel standardisé SDR (Standard Dimension Ratio) qui est le nombre arrondi exprimant le rapport du diamètre extérieur minimal à l'épaisseur nominale moyenne mesurée directement sur le tube [21].

### I.6. Caractéristiques des tubes en PE

Après la fabrication du tube, on doit effectuer plusieurs essais pour déterminer ses propriétés mécaniques les plus importantes. Chaque tronçon de tube doit être certifié en indiquant sa composition chimique et en vérifiant sa résistance. Une maintenance adéquate implique l'inspection continue des fuites, le contrôle de la dégradation, la prévention d'endommagement, et des programmes de réduction des risques de ruine [22]. Les Tableaux I.5 et I.6 représentent les caractéristiques dimensionnelles des tubes en polyéthylène basse et haute densités respectivement.

**Tableau I.5 :** Dimension de tubes en polyéthylène (basse densité) [21].

| Diamètre    |             | Masse au mètre<br>(g) | Pression de service<br>à 20 °C bar | Diamètre    |             | Masse au mètre<br>(g) | Pression de<br>service à 20°C bar |
|-------------|-------------|-----------------------|------------------------------------|-------------|-------------|-----------------------|-----------------------------------|
| $\Phi_1$ mm | $\Phi_2$ mm |                       |                                    | $\Phi_1$ mm | $\Phi_2$ mm |                       |                                   |
| 4           | 6           | 24                    | 10                                 | 21          | 25          | 138                   | 4                                 |
|             | 6           | 15                    | 6                                  | 21          | 32          | 435                   | 10                                |
| 5           | 7           | 18                    | 6                                  | 25          | 32          | 298                   | 6                                 |
|             |             |                       |                                    | 27          | 32          | 220                   | 4                                 |
| 5           | 8           | 27                    | 10                                 |             |             |                       |                                   |
| 6           | 8           | 21                    | 4                                  | 26          | 40          | 688                   | 10                                |
|             |             |                       |                                    | 31          | 40          | 476                   | 6                                 |
| 6           | 9           | 32                    | 6                                  | 34          | 40          | 331                   | 4                                 |
| 8           | 10          | 27                    | 4                                  | 33          | 50          | 1051                  | 10                                |
|             |             |                       |                                    | 39          | 50          | 729                   | 6                                 |
| 8           | 11          | 41                    | 6                                  | 42          | 50          | 549                   | 4                                 |
| 10          | 14          | 70                    | 6                                  | 42          | 63          | 1642                  | 10                                |
|             |             |                       |                                    | 49          | 63          | 1168                  | 6                                 |
| 12          | 16          | 81                    | 6                                  | 53          | 63          | 864                   | 4                                 |
| 13          | 20          | 172                   | 10                                 | 59          | 75          | 1597                  | 6                                 |
| 15          | 20          | 131                   | 6                                  | 63          | 75          | 1234                  | 4                                 |
| 16          | 20          | 108                   | 4                                  |             |             |                       |                                   |
|             |             |                       |                                    | 76          | 90          | 1734                  | 4                                 |
| 16          | 25          | 275                   | 10                                 |             |             |                       |                                   |
| 19          | 25          | 161                   | 6                                  | 93          | 110         | 2370                  | 4                                 |
| Série gaz   |             |                       |                                    |             |             |                       |                                   |
| 12          | 17          | 108                   | 8                                  | 33          | 42          | 593                   | 6                                 |
| 15          | 21          | 161                   | 8                                  | 40          | 49          | 597                   | 5                                 |
| 20          | 27          | 246                   | 7                                  | 50          | 60          | 819                   | 4                                 |
| 20          | 34          | 358                   | 6                                  | 60          | 70          | 968                   | 4                                 |

**Tableau I. 6 :** Dimension de tubes en polyéthylène (haute densité) [21].

| Diamètre       |                | Masse<br>au mètre<br>(g) | Pression de service<br>à 20 °C<br>bar | Diamètre       |                | Masse<br>au mètre<br>(g) | Pression de<br>service à 20 °C<br>bar |
|----------------|----------------|--------------------------|---------------------------------------|----------------|----------------|--------------------------|---------------------------------------|
| $\Phi_i$<br>mm | $\Phi_e$<br>mm |                          |                                       | $\Phi_i$<br>mm | $\Phi_e$<br>mm |                          |                                       |
| 6              | 10             | 50                       | 10                                    | 45,6           | 63             | 1460                     | 16                                    |
| 8              | 12             | 62                       | 10                                    | 51,4           | 63             | 1020                     | 10                                    |
| 12             | 16             | 89                       | 10                                    | 55,8           | 63             | 657                      | 6                                     |
| 13             | 16             | 70                       | 6                                     | 58             | 63             | 550                      | 4                                     |
| 16             | 20             | 114                      | 10                                    | 54,2           | 75             | 2070                     | 16                                    |
| 17             | 20             | 89                       | 6                                     | 61,2           | 75             | 1450                     | 10                                    |
| 18             | 25             | 232                      | 16                                    | 66,4           | 75             | 934                      | 6                                     |
| 20,4           | 25             | 164                      | 10                                    | 69,2           | 75             | 650                      | 4                                     |
| 21,6           | 25             | 126                      | 6                                     | 65             | 90             | 2980                     | 16                                    |
| 23             | 32             | 380                      | 16                                    | 73,6           | 90             | 2060                     | 10                                    |
| 26,2           | 32             | 263                      | 10                                    | 79,8           | 90             | 1330                     | 6                                     |
| 28             | 32             | 190                      | 6                                     | 83             | 90             | 1060                     | 4                                     |
| 28,8           | 40             | 592                      | 16                                    | 79,6           | 110            | 4430                     | 16                                    |
| 32,6           | 40             | 413                      | 10                                    | 90             | 110            | 3070                     | 10                                    |
| 35,4           | 40             | 267                      | 6                                     | 97,4           | 110            | 2010                     | 6                                     |
| 36,2           | 50             | 913                      | 16                                    | 100            | 110            | 1600                     | 4                                     |
| 41             | 50             | 629                      | 10                                    | 90,4           | 125            | 5720                     | 16                                    |
| 44,2           | 50             | 420                      | 6                                     | 102,2          | 125            | 3980                     | 10                                    |
| 46             | 50             | 302                      | 4                                     | 110,8          | 125            | 2570                     | 6                                     |
|                |                |                          |                                       | 115,2          | 125            | 1860                     | 4                                     |
| Série gaz      |                |                          |                                       |                |                |                          |                                       |
| 15             | 21             | 162                      | 16                                    | 33             | 42             | 506                      | 10                                    |
| 20             | 27             | 247                      | 16                                    | 40             | 49             | 601                      | 10                                    |
| 26             | 34             | 360                      | 10                                    | 50             | 60             | 825                      | 6                                     |

## I. 7. Rupture des polymères

Les polymères ont une large gamme de comportements mécaniques. Fragiles à basse température, ils deviennent plastique puis viscoplastiques, puis encore caoutchouteux et enfin visqueux. Au fur et à mesure que la température augmente, entre  $-20^{\circ}\text{C}$  et  $+20^{\circ}\text{C}$ , un polymère peut passer par tous les états mécaniques. Son module et sa résistance à la traction peuvent varier d'un facteur supérieur à  $10^3$ . L'état mécanique d'un polymère dépend de sa masse moléculaire et de la température, ou plus précisément de l'écart entre sa température et  $T_g$ , température de transition vitreuse.

La relation entre la contrainte et le temps de rupture est schématisée sur la figure I.9 qui illustre les trois modes de défaillance prédominants dans un tube en HDPE (ruptures ductile, fragile et due à la fissuration sous contrainte dans un environnement contrôlé : ESC). Au voisinage de la température ambiante, la courbe présente deux domaines de rupture : la première partie, à forte contrainte pour laquelle la durée de vie est très sensible à la contrainte, correspond au domaine ductile. La seconde partie représente le domaine fragile pour lequel la durée de vie est beaucoup moins sensible à la contrainte [4].

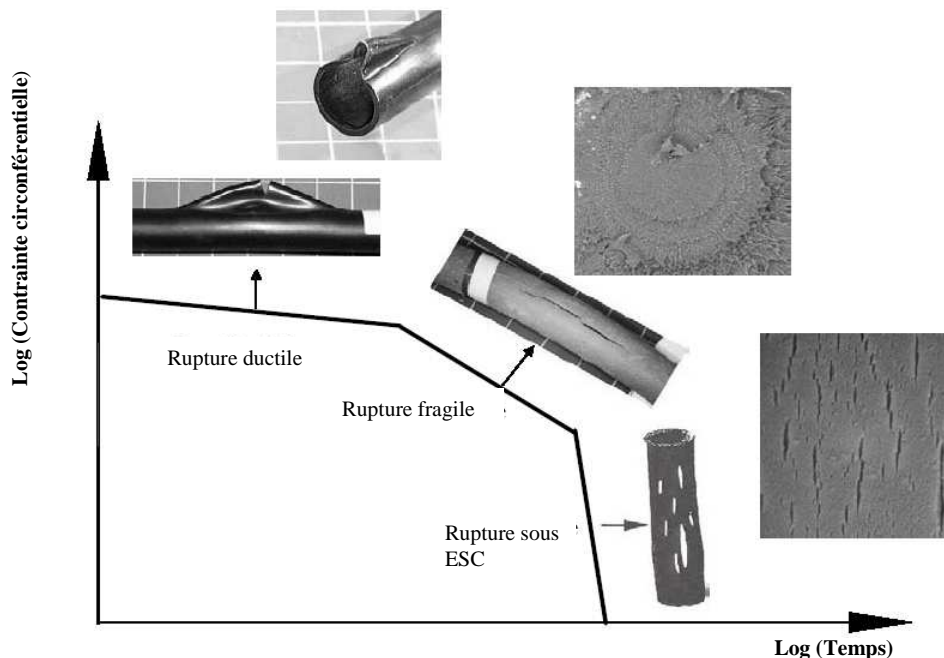


Figure I.9 : Modes de défaillance prédominants dans un tube en HDPE [4].

Les polymères peuvent présenter des dégradations géométriques sous forme de piqûres, vagues, écailles, éraflures, dépressions, dômes, rainures et striages. Ces défauts conduisent à des endommagements catastrophiques qui se terminent avec des ruptures fragiles ou ductiles [23].

### **I. 7. 1. Rupture fragile**

La fragilisation est l'aptitude à se briser sous un effort. Cette propriété est indépendante de la résistance. Le comportement fragile se caractérise par une rupture absorbant très peu d'énergie et présentant très peu de déformation plastique durant la propagation ( figure I.10) en donnant un aspect plutôt lisse de la rupture.

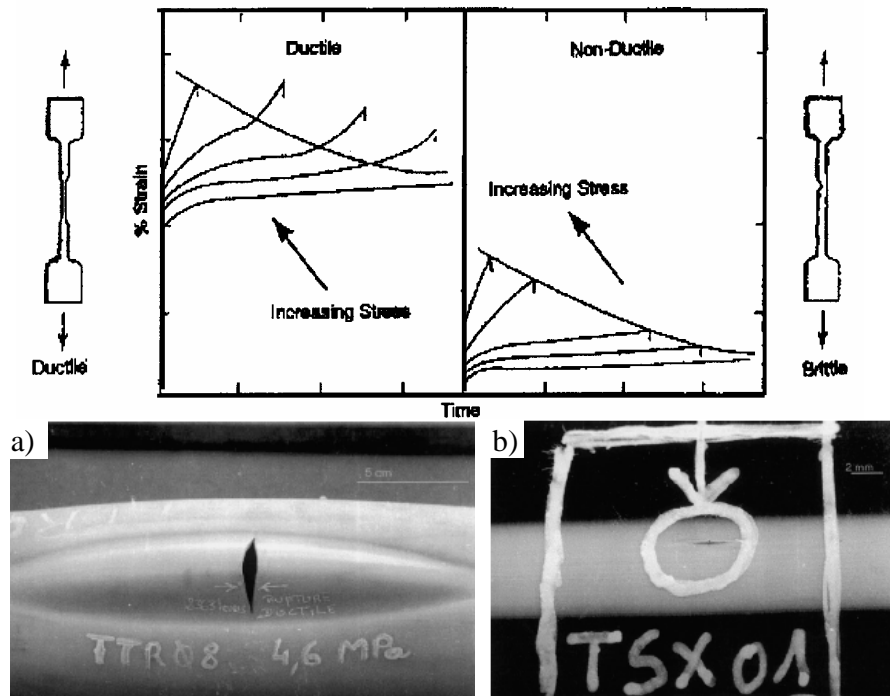
Pour un matériau parfaitement fragile, il y a absence de déformation plastique en tête au-delà de la craquelure formée sous l'action d'une contrainte homogène normale. La fissuration se propage par déchirement lorsqu'un effet de flexion se produit dû à un champ de contraintes et fait que la structure du matériau et sa résistance à la fissuration n'évolue pas au cours de la propagation. La ténacité du matériau peut alors être représentée par un paramètre critique unique ( $K_c$  ou  $G_c$ ) comme suggéré par la mécanique de la rupture linéaire élastique [24,31].

### **I. 7. 2. Rupture ductile**

Avant rupture, c'est l'étendue de la déformation plastique qui caractérise les matériaux présentant une haute ténacité et des déformations à grandes échelles. Les faciès présentent des fibrilles de grandes longueurs (supérieur à 10  $\mu\text{m}$ ). Le comportement ductile est essentiellement observé chez les thermoplastiques (PE, PP). Sous contraintes normales, la rupture se produit par la formation de craquelures liées à l'étirement des chaînes moléculaires dans le sens de l'effort. Les micro-vides qui apparaissent durant ce processus sont responsables du blanchiment des fibres.

Pour un matériau ductile, l'augmentation progressive de la déformation plastique en tête de la fissure au cours de l'amorçage et de la propagation, provoque une augmentation puis une stabilisation de sa résistance à la fissuration. La ténacité du matériau ne peut plus alors être représentée par un paramètre critique unique ( $K_{IC}$  ou  $G_{IC}$ ), mais elle peut l'être par l'une de ses courbes R ( $K_R$ ,  $G_R$  ou  $J_R$ ).  $K_C$  et  $G_C$  représentent respectivement le facteur d'intensité de contrainte critique et le facteur de restitution de l'énergie critique.

Ces matériaux se différencient par leur capacité plus ou moins grande à se déformer selon la configuration de leur arrangement macromoléculaire. Les thermoplastiques, formés de longues chaînes indépendantes non liées entre elles, peuvent être étirés et orientés dans l'axe de l'effort appliqué. Les polymères thermoplastiques sont amorphes ou semi-cristallins selon les conditions de production, de transformation et de sollicitations appliquées (température, niveau et vitesse de chargement). Les niveaux de déformation des chaînes macromoléculaires avant rupture seront plus ou moins importantes et conduisent à des mécanismes de ruptures plus ou moins ductiles [24,31].



**Figure I.10:** Rupture de tube en PE sous pression hydrostatique : a) rupture ductile, b) rupture fragile [24,31].

### **I.7.3. Comportement mécanique**

Les différents comportements des matériaux polymères sont expliqués par: la température (comparée à celle de la transition vitreuse  $T_g$  pour l'état amorphe, et à la température de fusion  $T_f$  pour l'état semi cristallin); l'isotropie ou l'orientation moléculaire et microscopique; la réticulation ou son absence et la présence de charges. On constate que le séjour prolongé dans un certain domaine de température provoque un vieillissement dit «physique», parce que recouvrable, à la différence du vieillissement chimique, qui est une modification définitive. La déformation plastique et la rupture ont aussi des modes particuliers. A cette occasion apparaîtra l'influence d'une dispersion de nodules d'élastomères dans une matrice vitreuse ou semi-cristalline [25].

Les propriétés des matériaux polymères sont beaucoup plus sensibles que celles des métaux aux influences extérieures, tel que la température, la durée, l'intensité et le type de chargement, les radiations ultraviolets, et les agents chimiques. Leur module d'élasticité est en général inférieur de deux ordres environ à celui des métaux. Les caractéristiques de résistance peuvent différer d'un ordre de grandeur seulement. Le concepteur de pièces en matière plastique est donc souvent obligé de prendre également en compte les problèmes de déformation dans le calcul de leur résistance. L'hypothèse selon laquelle les matériaux polymères peuvent être étudiés en utilisant la loi de Hooke ( $\sigma = \epsilon.E$ ), c'est-à-dire selon une dépendance linéaire entre la contrainte et la déformation, n'est toutefois satisfaite que dans des cas d'exception. Néanmoins, sans l'hypothèse d'un comportement purement élastique, la détermination des réponses de contrainte-déformation d'une pièce finie de géométrie même simple serait impossible [26].

Le comportement mécanique des matériaux est caractérisé par le type et l'amplitude de leur réponse aux forces extérieures appliquées et aux déformations en résultant. Pour les matériaux polymères, ces réponses dépendent fortement de la température, mais aussi de la vitesse et de l'intensité du chargement. Le comportement spécifique des matériaux polymères est lié au fait que les macromolécules ne réagissent pas toujours instantanément à l'application d'une sollicitation. Les différentes chaînes moléculaires constitutives tentent de répartir les contraintes imposées en se réarrangeant physiquement jusqu'à atteindre une position d'équilibre. Si la sollicitation appliquée est trop, rapide par rapport à la capacité de réarrangement des molécules, les matériaux polymères ont un comportement rigide et fragile. Si les chaînes moléculaires ont suffisamment de temps pour atteindre une position d'équilibre correspondant aux contraintes

subies, les matériaux polymères présentent un comportement souple et ductile. Pour une même application, les matériaux polymères peuvent donc se comporter de façon fragile ou ductile, selon les conditions de température et de vitesse de sollicitation [25].

*-Détermination du comportement mécanique instantané*

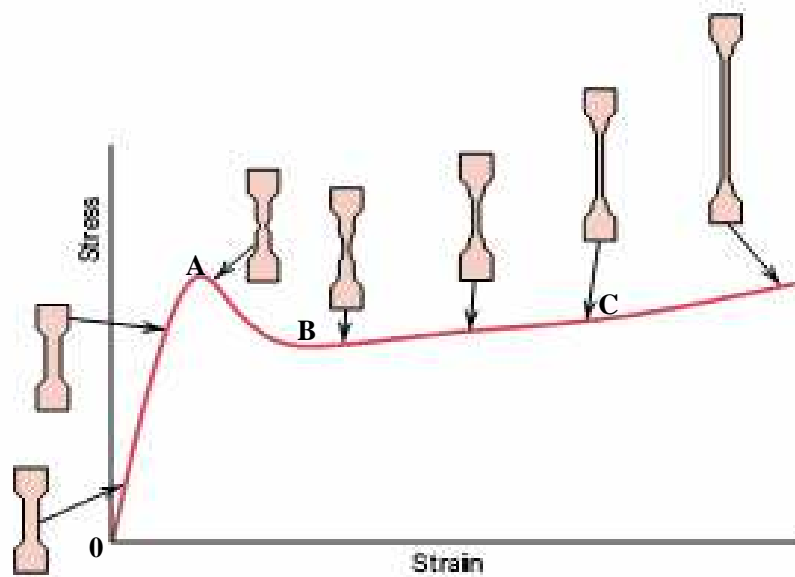
L'étude expérimentale du comportement instantané jusqu'à la rupture s'effectue le plus souvent en appliquant à une éprouvette une déformation à vitesse constante, pour différents types de sollicitations telles que traction, flexion, compression ou cisaillement, et en enregistrant la courbe charge-déplacement. Ces quatre comportements peuvent être étudiés avec le même ensemble expérimental dont seul le dispositif de fixation des éprouvettes est modifié pour répondre à chaque cas. Pour les vitesses élevées, on parlera d'essais de choc-traction ou de choc-flexion.

L'objectif des essais instantanés (à court terme) est la mesure des modules (caractéristiques linéaires ou élastiques) et des allongements et résistances selon le type de sollicitation, (caractéristiques à la rupture), autant de données figurant désormais couramment dans les fiches techniques, catalogues et banques de données informatisées. L'intérêt se limite au contrôle qualité et au choix préliminaire de matériau [23,27].

*-Détermination du comportement mécanique à long terme :*

Afin d'obtenir les caractéristiques indispensables aux calculs de prévision du comportement en service sont en conséquence de plus en plus développés des essais à long terme conduisant à déterminer de véritables caractéristiques de conception telles que module de fluage, résistance en fatigue statique ou dynamique, résistance à la fissuration sous contrainte dans divers environnement [28].

Dans notre étude la caractérisation des propriétés mécaniques s'est basée sur l'essai de traction, la figure I.11 montre l'allure typique de la courbe contrainte-déformation nominale en traction uniaxiale et l'évolution du profil de l'éprouvette tandis que celle-ci est étirée à vitesse d'allongement constante.



**Figure I.11** : Coudre contrainte-déformation d'un polymère semi-cristallin [29].

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

- ✓ De 0 à A, déformation élastique réversible due à la phase amorphe, du fait que le module d'élasticité de cette phase est plus faible que celui de la phase cristalline.
- ✓ Du point A, débute la striction qui correspond à une déformation hétérogène qui s'amorce sur un défaut au niveau de l'éprouvette.
- ✓ 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 [4].

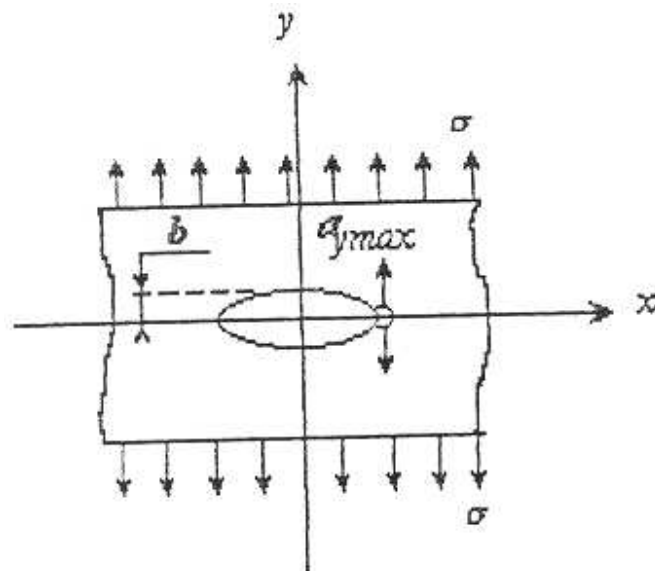
#### **I.7.4. Historique et objet de la mécanique de la rupture**

Les études qui ont été faites ont montré que le phénomène de propagation de la rupture est dû essentiellement aux défauts existants dans le matériau. Ceci est favorisé par les conditions d'exploitation : température et vitesse de sollicitation.

La théorie de la mécanique de la rupture est une approche pour estimer la stabilité des fissures qui peuvent survenir à cause des défauts internes. Elle permet de prévoir l'évolution de la fissure jusqu'à la ruine de la structure. Plusieurs approches ont été proposées :

La première approche était celle d'Inglis en 1913. Il a montré, en analysant le cas d'un trou elliptique Figure I.12, dans une plaque chargée uniformément en traction (contrainte  $\sigma$  ), que la contrainte maximale se développe dans la direction du grand axe, où le rayon de courbure minimum, est donné par :

$$\sigma_{y \max} = \sigma(1 + 2a / b) \quad [I.3]$$



**Figure I.12.** Trou elliptique dans une plaque chargée en traction [29].

Dés 1920, Griffith a montré que la rupture d'un milieu élastique, due à l'extension de la fissure, dépasse le taux de croissance de l'énergie de surface associé avec les surfaces de fissures formées, c'était la première approche énergétique, cette approche ne tient pas compte de la distribution des contraintes dans la zone contournant le bout de la fissure et que cette approche n'est applicable qu'aux matériaux fragiles. Ainsi dans une approche locale, Irwin, a développé une théorie, en tenant compte du champ de contraintes autour du bout de la fissure en introduisant un facteur appelé « facteur d'intensité de contrainte » désigné par  $K$  et sur celui-ci, il a énoncé le critère de la valeur critique  $K_C$  Irwin et Orwan ont développé, en utilisant les expressions de

Griffith, une théorie qui tient compte de la déformation plastique limitée au voisinage de la pointe d'une fissure. En 1970, les études de N.Q.SON, LE MAITRE et CHABOCHE, ont montré que les phénomènes essentiels de la rupture se situent au voisinage de la fissure (au bout de la fissure) et qu'il est possible d'étudier le milieu fissuré à l'aide des variables intrinsèques. L'étude dans le domaine non linéaire est entamée la première fois et développée par Rice, où il a introduit une intégrale de contour appelé « Intégral J » pour représenter la singularité des contraintes à la pointe de la fissure. En faisant des essais sur les polymères, Andrews a développé une théorie généralisée de la mécanique de la rupture en tenant compte des effets non linéaires et anélastiques.

La mécanique linéaire de la rupture est basée sur l'analyse élastique du champ de contrainte en présence de petite zone de déformation ; ainsi, elle est applicable surtout aux matériaux élastiques fragiles : acier à haute résistance, les verres et quelques matériaux hétérogènes tels que le béton et le bois. Avec la présence de la plasticité ou viscoplasticité, on entre dans le domaine non linéaire de la rupture qui est applicable surtout aux matériaux ductiles comme les aciers à bas carbone, les aciers inoxydables et certains alliages d'aluminium et les polymères [30].

#### I.7.4.1. Etendu de la zone plastique selon Irwin

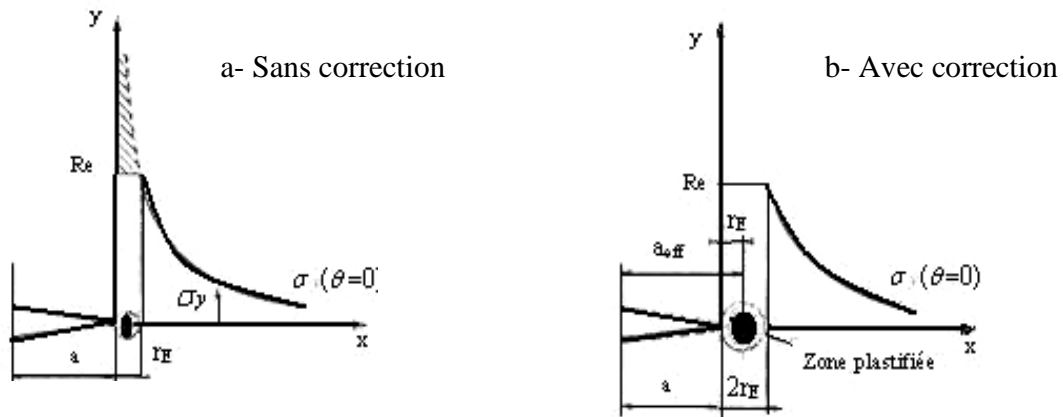
La zone plastique à fond de fissure est en fait plus étendue, car le matériau doit supporter localement une force supplémentaire correspondant à l'aire hachurée (figure I.13) d'après Irwin, la structure se comporte comme si elle contenait une fissure de longueur effective  $a_{eff}$  égale à :

$$a_{eff} = a + r_E \quad [I.4]$$

Par exemple, l'expression de  $K_I$  correspondant au cas d'une plaque infinie est modifiée comme suit :

$$K_I = \sigma_\alpha \sqrt{\pi(a + r_E)} \quad \text{avec} \quad r_E = \frac{K_I^2}{2\pi R_e^2} \quad [I.5]$$

De façon plus générale, le facteur d'intensité des contraintes doit être corrigé pour tenir compte de la plasticité en extrémité de fissure [19].



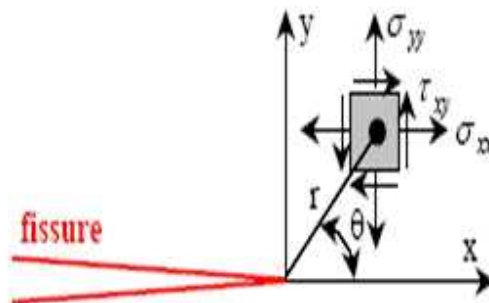
**Figure I.13 :** Modèle simple de déformation plastique à la pointe de la fissure, avec ou sans correction d'Irwin [19].

#### I.7.4.2. Description du champ des contraintes à l'extrémité d'une fissure à l'aide du facteur d'intensité des contraintes

La forme générale du champ des contraintes au voisinage de l'extrémité d'une fissure dans un matériau dont le comportement est élastique et linéaire est de la forme [19] :

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) + \varepsilon(r) \quad [I.6]$$

$r$  et  $\theta$  étant les coordonnées polaires du point considéré (figure I.14) par rapport à l'extrémité de la fissure,  $i$  et  $j$  indiquant les différentes composantes de contraintes  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  et  $\tau_{xy}$  dans le plan.



**Figure I.14 :** Définition des axes  $(x, y)$  et des coordonnées  $(r, \theta)$  [30]

Au voisinage immédiat de l'extrémité de la fissure, les contraintes présentent une singularité en  $1/\sqrt{r}$ , c'est à dire lorsque  $r \rightarrow 0$  elles tendent vers l'infini comme  $1/\sqrt{r}$ . Le second terme de la relation [I.6] est alors négligeable. La zone la plus critique est donc au voisinage immédiat de l'extrémité de la fissure et on ne considère alors que les termes en  $1/\sqrt{r}$ , autrement dit que les champs de contraintes asymptotiques qui sont donc de la forme [30]:

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad [I.7]$$

Ces champs asymptotiques peuvent être décrits à l'aide de l'approche de Westergaard. Selon le mode de sollicitation considéré - mode I, II ou III : figure I.15. - ils s'expriment à l'aide des facteurs d'intensité des contraintes  $K_I$ ,  $K_{II}$  et  $K_{III}$ .

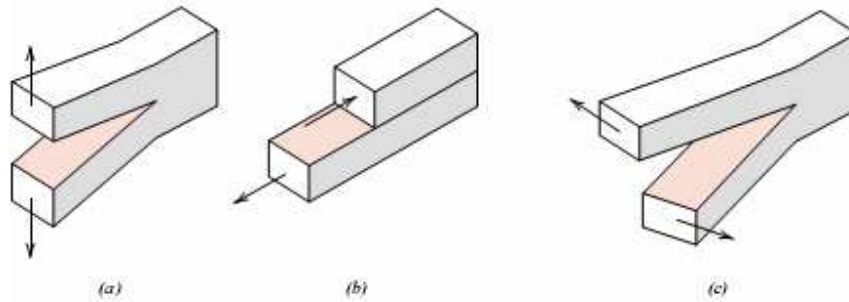


Figure I.15 : Définition des modes de sollicitation [29]

### En mode I

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_{yy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \end{aligned} \quad [I.8]$$

**En mode II**

$$\begin{aligned}
 \sigma_{xx} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \\
 \sigma_{yy} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \\
 \tau_{xy} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)
 \end{aligned} \tag{I.9}$$

**En mode III**

$$\begin{aligned}
 \sigma_{13} &= -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \\
 \sigma_{23} &= \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2}
 \end{aligned} \tag{I.10}$$

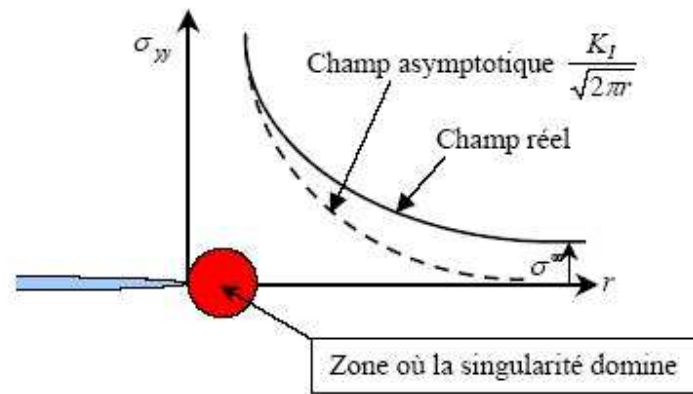
Lorsque la structure fissurée est sollicitée dans les 3 modes simultanément, en appliquant le principe de superposition en élasticité linéaire, il en découle :

$$\sigma_{ij}^{(total)} = \sigma_{ij}^{(I)} + \sigma_{ij}^{(II)} + \sigma_{ij}^{(III)} \tag{I.11}$$

Considérons maintenant le mode I seul par exemple. Lorsque  $\theta = 0$ , c'est à dire lorsqu'on se place dans le plan de la fissure, au voisinage immédiat et en aval de l'extrémité de celle-ci, on a d'après les relations [I.8] :

$$\sigma_{xx}(\theta = 0) = \sigma_{yy}(\theta = 0) = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \tag{I.12}$$

Le plan  $(x, y)$  de la fissure est donc principal pour le mode I. La figure I.16 est une représentation schématique de la variation de  $\sigma_{yy}(\theta = 0)$ .



**Figure I.16 :** Contrainte  $\sigma_{yy}(\theta = 0)$  perpendiculaire au plan de fissuration [30]

Cette figure illustre la zone où la singularité domine c'est à dire lorsque la contrainte varie comme  $1/r$  relation [I.12]. Au-delà de cette zone, on retrouve les conditions limites loin de la zone fissurée et la contrainte  $\sigma_{yy}$  tend alors progressivement vers la contrainte appliquée  $\sigma^a$ .

Le facteur d'intensité des contraintes (FIC)  $K_I$  définit l'amplitude de la zone de singularité. Les contraintes dans cette zone augmentent proportionnellement à  $K_I$  qui caractérise alors complètement les conditions à l'extrémité de la fissure ; si le  $K_I$  est connu, on peut déterminer les champs des contraintes, des déformations et des déplacements en fonction des coordonnées  $(r, \theta)$ . Le FIC est un des concepts les plus importants de la mécanique de la rupture [30].

Actuellement et avec le développement des méthodes de calcul, la mécanique de la rupture devient un outil indispensable dans le calcul structural surtout pour les structures à danger, comme les conduites de transport des hydrocarbures où les fuites et les explosions sont généralement catastrophiques.

#### I.7.4.3. Qualités et défauts des polymères semi-cristallins

Les matériaux semi-cristallins, surtout s'ils sont chargés, présentent une bonne rigidité jusqu'au voisinage de la fusion ; le fluage sous une charge permanente sera cependant inévitable au-dessus de la transition vitreuse. Le phénomène est d'autant moins marqué que le taux de cristallinité est

élevé et un recuit après fabrication est favorable. La masse molaire du polymère et sa distribution sont les facteurs essentiels.

Les polymères les plus cristallins résistent mieux aux solvants, car ceux-ci ne pénètrent guère que par les parties amorphes, principalement au-dessus de la transition vitreuse [29]. Les polymères semi-cristallins sont susceptibles de s'orienter par étirage, ce qui augmente le module d'Young dans cette direction. La partie amorphe s'oriente aussi mais la partie cristalline bloque cette orientation au-dessus de la transition vitreuse. La résistance à l'impact est en général bonne dans la même zone de température. Fondu, les polymères semi-cristallins sont fluides, surtout si la masse molaire n'est pas très élevée. C'est une propriété intéressante car la mise en œuvre sera facilitée sans que les propriétés mécaniques du solide soient trop basses.

Les inconvénients à signaler pour l'usage des polymères semi cristallins sont corrélatifs de leurs avantages : ils présentent du retrait au moulage à cause du changement de volume qui accompagne la cristallisation et, si le retrait est inhomogène à cause d'orientations préférentielles au moulage, les objets ont tendance à se déformer par gauchissement. L'enthalpie de fusion étant importante, la quantité de chaleur à évacuer au moulage et la faible conductivité des polymères organiques augmentent la durée du cycle. La faible viscosité du polymère fondu est une gêne pour la tenue des parois pour la fabrication de corps creux par soufflage et pour l'extrusion de tubes. On y remédie en augmentant la masse molaire du polymère utilisé donc sa viscosité.

Parmi les structures influencées par ces défauts et par la rupture il y a les tubes en HDPE de transport de gaz naturel [19,29]. L'étude de la rupture passe par une caractérisation de base des propriétés mécaniques et surtout de l'hétérogénéité à travers la paroi des tubes en plastique.

## II.1. Introduction:

Il y a encore trois décennies, personne ne pouvait imaginer l'essor et l'importance que prendraient les matières plastiques dans la vie courante de l'humanité. A cette époque, seules quelques propriétés bien précises étaient connues et réservées à la fabrication de films, de fibres, de revêtements, ou encore de produits à bas prix. Aujourd'hui, les connaissances sur la nature et la structure des polymères et leurs propriétés permettent, en choisissant les produits de base, le type de liaisons et d'architecture moléculaire, de modifier à volonté et avec une extrême précision les propriétés du plastique à élaborer.

Chaque décennie fait donc apparaître son lot de nouvelles matières qui génèrent des utilisations toujours inédites et toujours plus sophistiquées. Ainsi, les matières plastiques permettent-elles tout et son contraire : elles sont isolantes et conductrices, légères et résistantes, souples mais solides, transparentes et opaques. Elles sont pratiques, esthétiques, sûres et économiques. Grâce à elles, des problèmes techniques auparavant insolubles ont trouvé des solutions dans les secteurs de la santé, du transport, du bâtiment et de la décoration, de l'agriculture et des loisirs au sens le plus large du terme. Capables de répondre aux exigences de la haute technologie, elles résistent à des conditions d'utilisation très difficiles (températures élevées ou contraintes mécaniques importantes). Leur résistance alliée à leur légèreté sont des atouts majeurs dans des domaines comme l'aéronautique, l'aérospatiale, l'automobile... et la médecine où elles remplacent un organe déficient de façon durable, efficace et en totale biocompatibilité avec le corps humain [32].



**Figure II.1 :** tube de distribution d'eau et de gaz en polyéthylène [33].



**Figure II.2 :** réservoirs de carburant en polyéthylène [33].



**Figure II.3 :** emballage pour aliments consommables en polyéthylène [33].



**Figure II.4 :** Prothèse médicale en polyéthylène [42].

Une matière plastique est un mélange constitué par une résine de base additionnée éventuellement de plastifiants, de colorants, et de charges : textiles, fibres de verre, poudres, silices, etc. Tous ces produits vont rendre les matières plastiques plus abrasives [34]. Comme les polymères usuels ne sont généralement pas conducteurs électriques, l'usinage par électroérosion n'est donc plus possible. D'autre part, l'usinage par ultrasons convient aux métaux durs, ce qui n'est pas le cas des plastiques. Cela limite les procédés à l'usinage conventionnel, souvent qualifié d'usinage par enlèvement de copeaux et à la découpe par laser ou au jet d'eau [35].

## **II.2. Comportement des polymères vis avis de l'usinage:**

La production de pièces en matières plastiques doit prendre en compte, à part égale, les conditions de fabrication, les caractéristiques propres du matériau, le type de sollicitation et les conditions d'utilisation, ainsi que les interactions entre ces différents critères. Les

précautions essentielles consistent à éviter toute déformation. Il faut penser aussi que l'effort d'usinage est inférieur à celui nécessaire pour usiner une pièce similaire en acier; il n'est donc pas nécessaire de serrer la pièce plastique avec le même effort. Les plastiques sont plus souples et fléchissent d'avantage que les aciers; c'est pourquoi les profondeurs de passe et les avances ne doivent pas être excessives.

Par fois le refroidissement n'est pas nécessaire, c'est le cas de certains usinages de matières plastiques à faible coefficient de frottement tels que le polyéthylène. Dans ce cas très particulier, il peut être intéressant de prévoir quand même un soufflage d'aire comprimé pour repousser le copeau et éviter qu'il ne vienne s'enrouler autour de l'outil. Il est en effet fréquent que le copeau ne se fragmente pas pendant l'usinage.

Le point de fusion et la conductibilité thermique des plastiques, en général, sont des valeurs inférieures à celles des métaux et il est donc nécessaire de limiter au minimum la chaleur engendrée en diminuant la friction. Des outils émoussés ou bien des tranchants qui raclent plutôt qu'ils ne coupent provoquent un dégagement de chaleur excessif, qui risque de générer des contraintes internes préjudiciables à géométrie et à la fiabilité de la pièce finie. Les arêtes des outils doivent donc être toujours parfaitement affûtées et la dépouille doit être suffisante pour garantir que seul l'arête de coupe soit en contact avec la pièce usinée. On obtient généralement les meilleurs résultats en travaillant à très grandes vitesses avec une faible avance et des outils bien affûtés et lisses.

Pour les pièces de faibles sections, une passe trop profonde est susceptible de provoquer son fléchissement. L'utilisation d'une lunette est conseillée pour les pièces assez longues, et pour les plastiques ayant un point de fusion bas, la lunette sera équipée de galets car des sabots risqueraient de porter la pièce en fusion. L'emploi d'un fluide de refroidissement est indispensable pour la réalisation de ces pièces.

Lors du tournage de pièces de précision, il faut éviter soigneusement toute surchauffe de la pièce tournée, faute de quoi on s'expose à réaliser une passe excessive due à la dilatation thermique de l'ébauche. Les mesures des pièces doivent toujours être effectuées à température ambiante, car le coefficient de dilatation dans le cas des plastiques est parfois jusqu'à 10 fois supérieur à celui de l'acier. Dans ces cas, on peut également travailler avec refroidissement par fluide, quoi que, par ailleurs certains plastiques se travaillent aussi bien sans refroidissement [17].

Parmi les caractéristiques des polymères qui ont une influence sur les opérations d'usinage il y a:

**-La dilatation et la conductivité thermique;** Les matières plastique non chargées ont des coefficients de dilatation thermique généralement compris entre 50 et 200  $\mu\text{m}/\text{m.k}$ . ce sont des matériaux isolants, la combinaison de ces deux caractéristiques, fait que la chaleur engendrée par l'opération d'usinage reste concentrée sur la zone usinée et entraîne une déformation thermique importante, voire un risque de dégradation thermique.

**-Le module d'élasticité et la dureté;** Les plastiques sont très souples par rapport aux aciers (modules compris entre 1000 et 2000 Mpa) et beaucoup moins durs ce qui impose, par exemple, des précautions de serrage particulières pour ne pas déformer la pièce ni en marquer la surface.

**-Les contraintes internes:** Les pièces plastiques contiennent souvent des contraintes internes après moulage, dues, en particulier, au retrait de la matière passant de l'état liquide à l'état solide. Il arrive fréquemment que l'usinage modifie la répartition de ces contraintes. Dans une étude il a été prouvé que le tournage préserve la rigidité mais perd beaucoup sur  $\epsilon_f$  et  $\sigma_y$ . Des précautions doivent par conséquent être prises pour qu'il n'y ait pas d'accumulation de contraintes susceptibles d'entraîner des fissurations. Un des remèdes peut être de pratiquer un recuit des pièces après moulage. La vitesse de refroidissement est un élément essentiel pour réduire les contraintes internes. Plus la température de recuit est élevée, plus la baisse de température doit être lente. Parfois, l'usinage est réalisé après dégrossissage d'une ébauche. Dans ce cas, l'ébauche est généralement sans contraintes internes car celles-ci sont libérées lors du dégrossissage.

**-L'usure des outils:** Une grande partie des plastiques non chargés ont un comportement autolubrifiant et ne créent pas d'usure importante des outils. Par contre, Ceux qui comportent des charges minérales (verre) ont tendance à accentuer l'usure des outils traditionnels d'usinage par enlèvement de copeaux.

**-L'hygrométrie:** Certains polymères absorbent un taux important d'humidité (polyamide, par exemple). Les phénomènes d'absorption ne sont pas instantanés mais se produisent au bout de quelques minutes, voire de quelques heures. Cela modifie les caractéristiques mécaniques et dimensionnelles. Cette évolution entre l'instant où on usine le polymère (échauffement donc séchage) et celui où on l'utilise (ambiance humide éventuellement donc dimensions différentes). Il faut donc tenir compte du comportement du polymère en présence d'humidité, de la présence ou non d'un liquide de refroidissement, de l'ambiance hygrométrique de l'atelier, du fait que l'échauffement dû à l'usinage va sécher le matériau en surface, etc....

Il faut se méfier des réactions chimiques des lubrifiants chlorés avec certains thermoplastiques (les polystyrènes et les polycarbonates sont attaqués superficiellement par le chlore) [34].

-*L'électrostatique*: Certains plastiques développent des charges électrostatiques superficielles importantes par frottement, qui attire les copeaux ou la poudre issus de l'usinage [36].

### II.3. Conditions d'usinage du polyéthylène haute densité HDPE :

Les matériaux d'outils, peuvent être en acier rapide qui a le coût le moins cher à l'achat. Ils ont une durée de vie moins longue, surtout avec les matériaux renforcés de fibre de verre. Ou de carbure, qui a la plus grande résistance à l'abrasion que les aciers rapides et il est d'un bon rapport prix/usure. Pendant l'usinage, Parfois le refroidissement n'est pas nécessaire. C'est le cas de certain usinage de matières plastique à faible coefficient de frottement, par exemple polyéthylène. La précaution essentielle consiste à éviter toute déformation. Il faut penser aussi que l'effort d'usinage est inférieur à celui nécessaire pour usiner une pièce similaire en acier ; il n'est donc pas nécessaire de serrer la pièce avec le même effort. Ce qui nous à pousser d'utiliser des montages spéciaux . Les mesures des cotes doivent toujours être effectuées après retour de la pièce à la température ambiante. Une tolérance de 0.1 à 0.2% de la cote nominale est accessible sans précautions spéciales.

La figure (II.5) définit différent angle d'un outil de tour, les autres paramètres de coupes sont illustrés sur le Tableau (II.1) [24, 34].

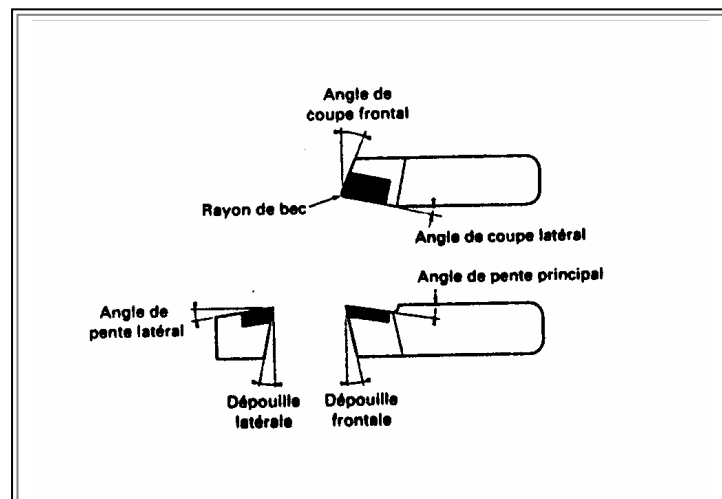


Figure II.5 : Géométrie type d'un outil de tournage [24].

**Tableau II.1** : Tournage du polyéthylène [24].

|              | Dépouille<br>(degré) | Pente d'affûtage<br>(degré) | Avance<br>(mm/tr) | Vitesse de coupe<br>(m/min) |
|--------------|----------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------------------|
| Polyéthylène | 5 à 15               | 0 à 15                      | 0.05 à 0.5        | 200 à 500                   |

#### **II.4. Facteurs influençant la qualité de surface en tournage:**

Dans le tournage la surface engendrée n'est pas rigoureusement cylindrique, elle comporte des sillons hélicoïdaux résultants de la forme plus ou moins pointue de l'outil de coupe et du mouvement hélicoïdal outil/pièce. Ces sillons ont un profil d'autant plus profond que le rayon du bec de l'outil est faible. Par ailleurs ils sont d'autant plus larges que l'avance par tour est grande [37, 38].

D'autre part, la forme de la surface engendrée par l'outil peut être affectée par les perturbations de la trajectoire de l'outil par rapport à la pièce, occasionnées par des vibrations importantes de l'un de ces éléments (ou des deux). Lorsque les conditions dynamiques (flexibilité et inertie des éléments, insuffisance d'amortissement mécanique) sont telles que les vibrations oscillatoires de cette trajectoire deviennent autoentretenues il en résulte des perturbations périodiques de la surface découpée. Elles prennent la forme de marques ou de stries plus ou moins accusées, qui peuvent modifier sensiblement la rugosité du profil idéal défini par la trajectoire théorique de l'outil.

Plusieurs facteurs affectent la qualité et l'intégrité de la surface en tournage. Ces derniers peuvent être classés en facteurs concernant le matériau de la pièce à usiner (dureté, propriétés métallurgique...), facteurs liés à l'outil de coupe (composition chimique du matériau, géométrie...) et les paramètres de coupe. La qualité de la surface est influencée par la dureté et les propriétés du matériau usiné. Il est prouvé que la rugosité de la surface diminue avec l'augmentation de la dureté de la pièce, pour le matériau polyéthylène elle est très inférieure à celle des matériaux coupant, ce qui n'influe donc guère sur la durée de vie de l'outil de coupe.

Theile et al. ont prouvé que la géométrie de l'outil de coupe présente un impact important sur la contrainte résiduelle et risque de provoquer des vibrations. Une arête arrondie favorise l'apparition des contraintes compressives. D'autre part le rayon du bec de l'outil a un effet considérable sur l'intégrité de la surface en diminuant la hauteur des stries.

En effet la rugosité est inversement proportionnelle au rayon. Les paramètres de coupe ont des effets considérables sur la qualité de surface obtenue en tournage ; L'augmentation de la vitesse de coupe et la diminution de l'avance permettent la diminution de la rugosité et améliorent la qualité de la surface. Du point de vue théorique, la profondeur de passe a moins d'importance que l'avance. Pour un outil correctement affûté, la rugosité est directement liée à la valeur de l'avance par tour. Pour le cas du polyéthylène, le tournage présente les caractéristiques suivantes: Angle de dépouille : 5 à 15° ; Pente d'affûtage : 0 à 15° ; Avance : 0.05 à 0.5 (mm/tr) et Vitesse de coupe : 200 à 500 (m/min) [21].

## **II.5.Procédure Expérimentale:**

### **II.5.1. Matériau**

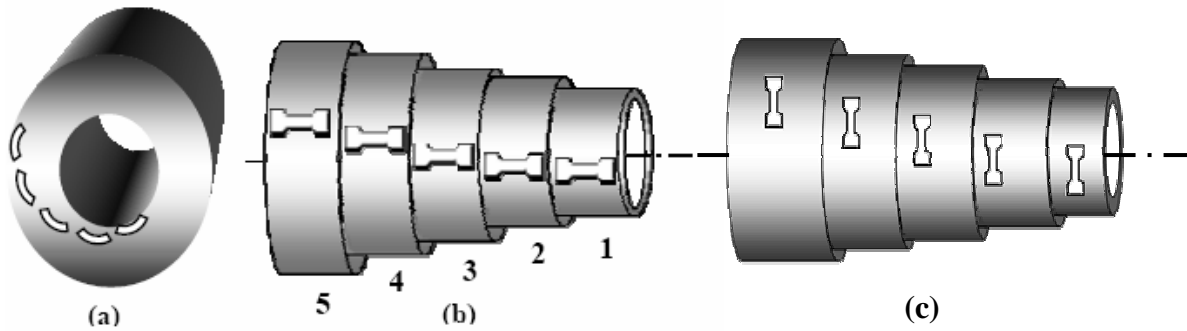
Le matériau utilisé dans cette étude est un tube en HDPE-80 ayant un SDR de 11 avec un diamètre extérieur de 125 mm et 11,4 mm d'épaisseur, extrudé et pigmenté en noir. Il est destiné à la distribution du gaz naturel et a été fourni par l'entreprise nationale SONELGAZ. Il est conçu pour des réseaux de 4 bars de service et peut supporter des pressions d'essai hydraulique de 6 et 10 bars effectives.

### **II.5.2. Usinage des enveloppes en PE**

Afin de mesurer les propriétés mécaniques dans chaque couche du tube, les éprouvettes utilisées ont été directement extraites à partir du tube pour conserver l'histoire thermomécanique intrinsèque, en obéissant à une méthodologie de préparation reproductible et en minimisant les contraintes de contact durant l'opération automatique d'usinage.

Le HDPE est un thermoplastique sensible aux efforts extérieurs, il ne demande pas de grands efforts de serrages sur le mandrin. Ce qui a poussé à créer des montages spéciaux pour travailler dans les meilleures conditions. Ainsi, plusieurs opérations de chariotage et d'alésage sont réalisées afin d'extraire des feuilles dont l'épaisseur moyenne ne dépasse pas les 2.5mm. La paroi du tube est divisée en 5 niveaux, et à partir de chaque niveau une couche est extraite figure II.6. L'usinage a été réalisé sur un tour TOS TRENCIN modèle SN40, de puissance 6.6KW sur broche. Pour réaliser les opérations de chariotage quatre mandrins en bois de diamètres croissants 100mm, 102mm, 104mm, 106mm ont été fabriqués, et chaque mandrin est réalisé dans le but de maintenir le tube. Les contraintes d'ancrage sont uniformément distribuées par l'utilisation de quatre larges coussinets métalliques entre la surface externe du mandrin et les mâchoires. Deux vis sont fixées entre le mandrin et le tube pour éliminer tout

glissement de ce dernier, et pour éviter tout déplacement radial du montage rotatif, le mandrin a été également soutenu par une poupée mobile. Pour les opérations d'alésage, un tube en acier ajusté au diamètre extérieur a été utilisé et fixé avec deux vis afin d'éviter toute déformation du tube HDPE.



**Figure II.6:** Préparation des éprouvettes, (a) Prélèvement des éprouvettes dans le sens radial, (b) Localisation des éprouvettes dans la direction axiale, (c) Localisation des éprouvettes dans le sens radial.

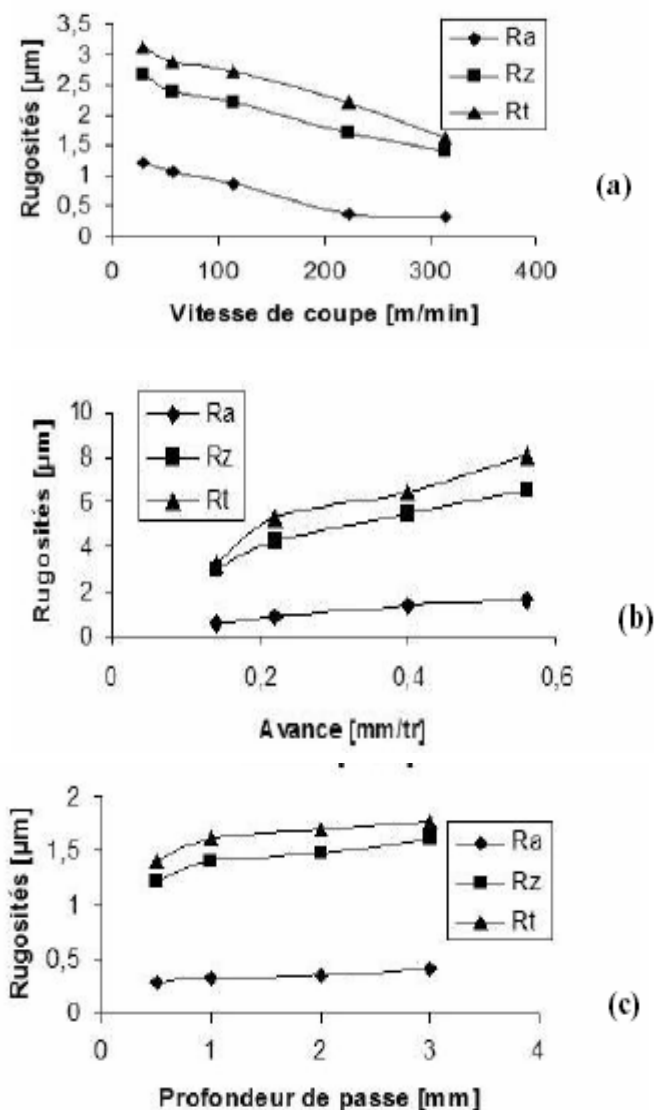
### II.5.3. Conditions d'usinage et évolution de la rugosité

Dans une étude précédente [21], la caractéristique de la qualité de la surface usinée a été limitée aux trois critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_t$  et  $R_z$ ). La figure II.7 (a,b,c) exprime l'influence des éléments du régime de coupe ( $V_c$ ,  $a_p$  et  $f$ ) sur la rugosité obtenue. L'augmentation de la vitesse améliore la qualité de la surface usinée surtout pour les valeurs entre 113 et 314m/min, accompagnée d'une légère élévation de la température (14 à 15°C) pour une vitesse de coupe de 28m/min et (19 à 20°) pour une vitesse de 314m/min, on remarque aussi une diminution des efforts de coupe (de 0,3kN à 0,1kN) pour les mêmes conditions de coupe, traduisant ainsi une stabilité relative du système usinant. Par contre, les augmentations de la profondeur de passe et de l'avance contribuent à l'élévation de la rugosité. Il est constaté que l'avance est le facteur le plus déterminant de la qualité des surfaces usinées dans le cas du polyéthylène HDPE-100.

Les conséquences de l'influence des paramètres du régime de coupe sur la rugosité ( $R_a$ ) obtenues peuvent être résumées comme suit: L'augmentation de l'avance de 0,14 à 0,40mm/tr et celle de la profondeur de passe de 0,5 à 1,0mm font accroître la rugosité d'environ 2.4 et 1.05 fois, respectivement, alors que l'accroissement de la vitesse de coupe de 223 à 314 m/min la fait baisser de 1.1 fois [24, 21].

### II.5.4. Usinage du HDPE 80

Concernant la résine utilisée dans notre étude HDPE-80 et en consultant la littérature pour réaliser les différentes opérations de tournage (chariotage et alésage) nous avons opté pour un régime de coupe qui va dans le sens favorable à un état de surface lisse et régulier à travers la paroi du tube ; vitesse de rotation 355tr/min, une avance  $f$  de 0.56mm/tr et une profondeur de 01mm, pour les opérations de chariotage nous avons utilisé un outil en acier rapide, et pour les opérations d'alésage un outil en carbure métallique, la température dans la zone de coupe était entre 18 et 20°C. Il faut prendre en considération que la variation du diamètre pendant les différentes opérations de tournage engendre la variation de la vitesse de coupe,  $V_c = f(D)$ .



**Figure II.7 :** Comportement des critères de rugosités en fonction des paramètres du régime de coupe : a) Vitesse de coupe  $V_c$ , b) Profondeur de passe  $a_p$ , et c) Avance  $f$  [21].



**Figure II.8** : opérations de tournage du tube HDPE-80: (a) alésage, (b) chariotage.

La figure II.9 montre la feuille extraite directement du tube HDPE-80 après tournage



**Figure II.9** : feuille extraite du HDPE-80 après tournage.

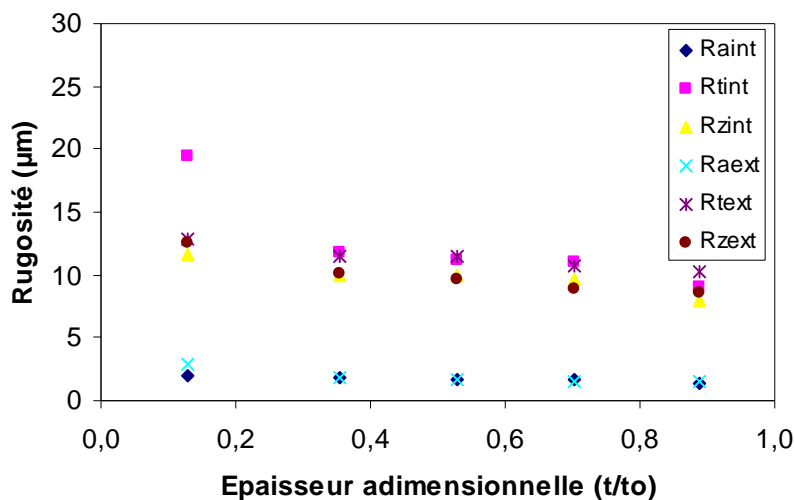
### II.5.5. Evolution de la rugosité du HDPE 80

Après la récupération des enveloppes des mesures de rugosité ont été faites sur chaque couche avec un rugosimètre SurfTest 301 de marque Mitutoyo, muni d'un palpeur en diamant, avec un rayon de pointe de  $5\mu\text{m}$ , se déplaçant linéairement sur la surface mesurée. Chaque palpage est de  $0.8\text{ mm}$  ce qui donne une longueur totale de mesure de  $4\text{ mm}$ . La plage de mesure des critères de rugosité est de ( $0.05$  à  $40\mu\text{m}$ ) pour  $R_a$  (la rugosité arithmétique moyenne) et de ( $0.3$  à  $160\mu\text{m}$ ) pour  $R_t$  (la rugosité quadratique moyenne qui est la racine carrée de la valeur moyenne des sommes au carré des aspérités sur toute la longueur

d'analyse) et Rz (la hauteur du pic maximal). Pour plus de précision, toutes les mesures de rugosité sont obtenues directement sur la même machine et sans démontage de la pièce.

Les données collectées à partir des différentes couches ont permis de tracer les courbes suivantes qui montrent la variation des trois critères de rugosité Ra, Rt et Rz à travers la paroi du tube de HDPE, à l'intérieur et à l'extérieur de chaque couche extraite.

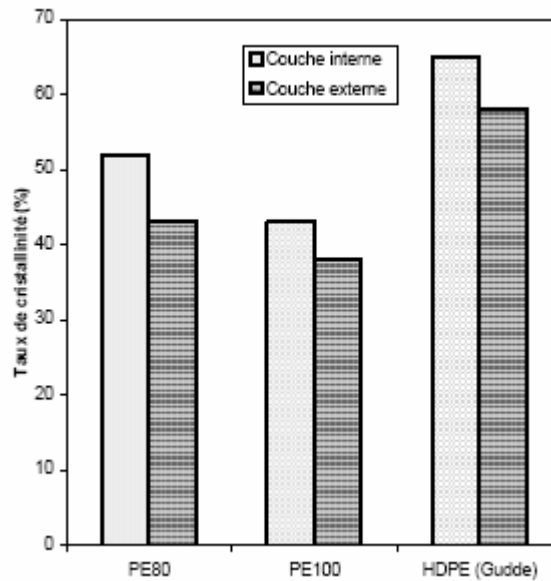
La variation dans les rugosités à l'intérieur et à l'extérieur du tube revient au procédé de fabrication, la paroi externe du tube extrudé est en contact direct avec la filière d'extrusion d'où l'apparition d'une rugosité plus remarquable dans la paroi externe du tube figure II.10.



**Figure II.10 :** Evolution de la rugosité à l'extérieur et à l'intérieur d'un tube de gaz en HDPE.

### II.5.6. Evolution de la cristallinité

Lors de fabrication des tubes, la chaleur de fusion est enlevée par refroidissement par contact direct (la conduction associée à la convection), le processus de solidification prend place avec un gradient de température qui crée des variances morphologiques des contraintes internes entre la surface externe et la surface interne. Au fait, la surface externe se refroidit rapidement alors que celle de l'intérieur prend plus de temps. Au niveau moléculaire, il se forme une phase amorphe en externe alors que la cristallisation prend tout son temps du côté intérieur du tube. Les mesures expérimentales réalisées par DSC sont indiquées dans la figure II.11. Cette structure explique en partie les comportements des 2 surfaces du HDPE [17,39].



**Figure II.11:** Comparaison des taux de cristallinité entre la surface interne et la surface externe de tubes en HDPE.

### II.5.7. Evolution de la dureté

Des mesures de la dureté ont été réalisées pour donner des informations complémentaires toujours dans le but de mieux comprendre le comportement du HDPE.

Les mesures ont été faites avec un duromètre numérique Hardmatic HH-401 de marque Mitutoyo composé d'une tête de mesure avec pénétrateur sous forme d'une bille en acier avec un diamètre de 14 mm, pour les différentes échelles de dureté Rockwell B, Rockwell C, Vickers, Shore, et Brinell et conformément à la norme ASTM A956-96, la plage de mesure des différentes échelles de dureté est représentée sur le Tableau II.2.

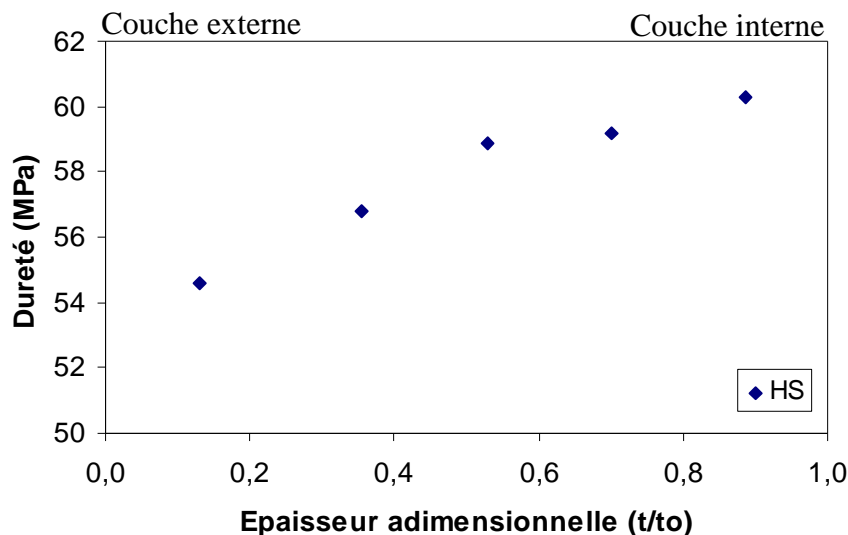
**Tableau II.2 :** Echelle des différentes mesures de dureté avec conversion.

| Echelle de la dureté | Matériaux durs | Matériaux mous |
|----------------------|----------------|----------------|
| <b>HL</b>            | 200~900        | 200~900        |
| <b>HV</b>            | 80~940         | 43~196         |
| <b>HB</b>            | 80~647         | 40~173         |
| <b>HRC</b>           | 20,0~68,0      | -              |
| <b>HRB</b>           | 38,4~99,5      | 13,5~95,3      |
| <b>HS</b>            | 30,1~99,5      | -              |

Le polyéthylène haute densité a une dureté relativement faible car il peut être rayé à l'ongle. Sa dureté varie relativement peu d'une résine à l'autre et augmente avec la cristallinité [40].

A travers la paroi du tube en HDPE la dureté est variable, elle diminue de l'intérieur vers l'extérieur du tube, cette réduction est aussi reliée au procédé de fabrication, refroidissement rapide de la surface externe, et aussi au taux de cristallinité élevé de la surface interne. La figure II.12 montre clairement la variation de la dureté à travers la paroi du tube.

La littérature aussi confirme l'augmentation de la dureté avec le taux de cristallinité comme montré dans le Tableau II.2.



**Figure II.12:** Evolution de la dureté à travers la paroi d'un tube de gaz en HDPE.

**Tableau II.3:** Les relations entre les caractéristiques fondamentales du PE et les propriétés du matériau [41].

| Propriétés                                     | Augmentation de la cristallinité (Augmentation de la densité) | Augmentation du poids moléculaire (diminution de l'indice de fluidité) | Elargissement de la distribution du poids moléculaire |
|--|---|--|---|
| Rigidité (module d'élasticité)                 | Augmente  | –  | –   |
| Dureté   | Augmente  | –  | –   |
| Contrainte à la traction au seuil d'écoulement | Augmente  | –  | –   |
| Résistance à la rupture en traction            | Augmente  | Augmente   | –   |
| Allongement à la rupture                       | Diminue   | –  | –   |
| Température de ramollissement                  | Augmente  | Augmente   | Augmente  |
| Résistance au choc                             | Diminue   | Augmente   | Diminue   |
| Dureté à basse température                     | Diminue   | Augmente   | Augmente  |
| Perméabilité                                   | Diminue   | –  | –   |
| Résistance à la fissuration sous contrainte    | Diminue   | Augmente   | Augmente  |
| Résistance chimique                            | Augmente  | –  | –   |
| Résistance aux intempéries                     | –   | Augmente   | –   |
| Flux / procédé (mise en œuvre)                 | –   | Diminue  | Augmente  |

## **II.6. Conclusion.**

Cette étude montre que l'usinage des tubes de polyéthylène présente quelques spécificités à prendre en compte lors de la conception. A travers la paroi du tube les valeurs des duretés et des rugosités sont variables conséquence du procédé de fabrication et refroidissement non uniforme sur la totalité du tube lors de son extrusion.

### **III.1. Introduction:**

Le choix du polyéthylène (PE) pour la fabrication des tubes de distribution du gaz découle des nombreux avantages technico-économiques procurés par ce matériau. Le PE est un matériau léger, ce qui facilite les opérations de manutention et de mise en oeuvre sur le terrain. Il possède une bonne résistance à la corrosion, quelles que soient les conditions au sol, ce qui permet d'éviter les surcoûts dus à l'application d'une protection passive ou active. De plus, les systèmes en PE supportent les effets des mouvements du sol dus aux instabilités et aux grandes variations de température. Du fait de leur bonne résistance à la fissuration, les canalisations en PE présentent un degré de fiabilité élevé dans des conditions d'utilisations normales. Dans ces conditions leur durée de vie est estimée à plus de 50 ans sur la base de courbes de régression construites à partir d'essais accélérés en pression hydraulique [43].

Les technologies de préparation des tubes en polyéthylène destinés au transport et distribution 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 obtenue se fait en général par des douches d'eau véhiculant de manière convective la chaleur. Cette situation génère un état de contraintes internes importantes qui se redistribuent de la surface externe jusqu'à l'enveloppe interne. Ainsi la géométrie de l'éprouvette influe le comportement du matériau et conditionne le mode de rupture et le rend fragile ou ductile suivant l'état de contraintes planes ou déformations planes qui caractérisent l'éprouvette [44]. Au cours d'un procédé de mise en oeuvre, les différentes conditions de refroidissement local peuvent conduire à différentes morphologies sur l'épaisseur de l'échantillon [45].

Les contraintes internes sont les plus fortes, juste après leur apparition et donc les plus dangereuses pour les pièces finies. Le fait que les contraintes internes conduisent ou non à des processus de rupture dépend de la résultante des sollicitations extérieures et des contraintes internes qui relaxent au cours du temps. Aucune rupture ne se produit si la somme des contraintes subies par la pièce durant toute sa durée de vie reste, à tout moment, inférieure à la résistance en fluage ou à la durabilité du matériau [46,47].

W. M. Baldwin avait défini les contraintes résiduelles comme étant des contraintes qui subsistent dans les pièces mécaniques en l'absence de tout chargement extérieur, et sont généralement le résultat d'une déformation plastique non homogène entre le cœur et la peau,

introduite par un procédé de fabrication. Les contraintes résiduelles sont d'origine mécanique, thermique, elles augmentent avec l'augmentation de la température de refroidissement, ou métallurgique. Ces contraintes, préexistantes dans le matériau, se trouvent à un état d'équilibre statique. Grâce à la capacité de relaxation des matériaux polymère ils sont plus ou moins important, en fonction du temps et de la température [48].

Une conséquence de la fabrication des tubes en polyéthylène de haute densité (HDPE) est la génération des contraintes internes « résiduelles » dans la matière, dans le but de caractériser l'évolution des déformations occasionnées par ces contraintes. Le tube HDPE-80 est divisé en cinq couches et à partir de chaque couche un spécimen est extrait après différentes opérations de tournage comme expliqué dans le chapitre II. Les éprouvettes désignées à cette étude ont une épaisseur moyenne de 2.5mm d'une largeur moyenne de 130mm et de diamètres extérieurs croissants 102,56 mm, 104,8 mm, 106,75 mm, 108,15 mm, 114 mm.

Pour décharger les contraintes résiduelles des éprouvettes, celles-ci ont été découpées suivant une génératrice, en utilisant la même lame et en gardant la même façon de sectionnement pour tous les spécimens. Après l'opération d'usinage, des déformations en forme de courbures ont été observées dans tous les spécimens. Dès le sectionnement, l'enveloppe du tube commence à se rétracter et il en résulte une déflexion au cours du temps. La valeur de la déflexion résultante à la rétraction a été mesurée à l'aide d'une règle millimétrique transparente et flexible, la mesure a été instantanée, et enregistrée avec le temps correspondant. En effet, la déflexion ne représente pas la déformation, plutôt c'est la variation de la périphérie de l'anneau qui diminue au cours du temps. La déformation dans notre cas est la variation du diamètre extérieur de l'éprouvette par rapport au diamètre extérieur initial. La déformation à l'instant  $t = t_i$  est donnée selon la relation suivante:

$$\varepsilon_{ti} = \frac{D_{t0} - D_{ti}}{D_{t0}} \quad \text{[III.1]}$$

où  $D_{t0}$  et  $D_{ti}$  sont les diamètres extérieurs de l'éprouvette à l'instant  $t = 0$  (temps initial) et à l'instant  $t = t_i$  respectivement. La relation entre la déflexion et la déformation  $\varepsilon_{ti}$  est déduite comme suit :

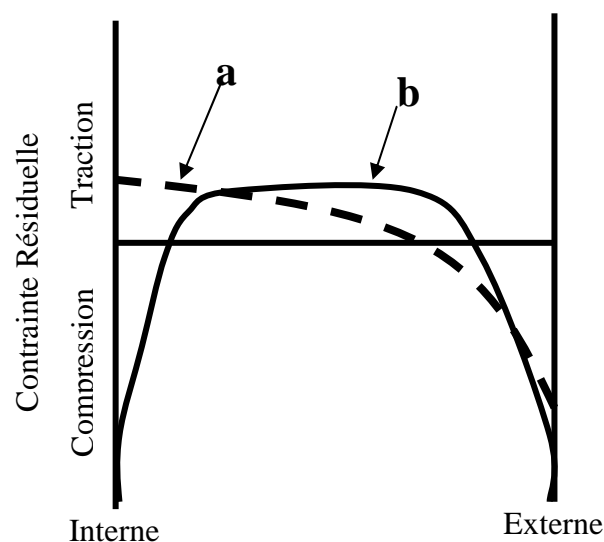
$$\delta_{ti} = (D_{t0} - D_{ti}) \pi \quad \text{[III.2]}$$

où  $\delta_{ii}$  est la déflexion de l'éprouvette à l'instant  $t = t_i$  de (1) et (2), la déformation est déduite comme suit :

$$\varepsilon_{ii} = \frac{\delta_{ii}}{\pi D_{i0}} \quad \text{[III.3]}$$

L'effet des contraintes résiduelles sur le comportement mécanique des métaux et céramiques a été bien étudié dans le passé. Les contraintes résiduelles influent sur la force de rupture fragile, la vie en fatigue et la corrosion sous tension [49].

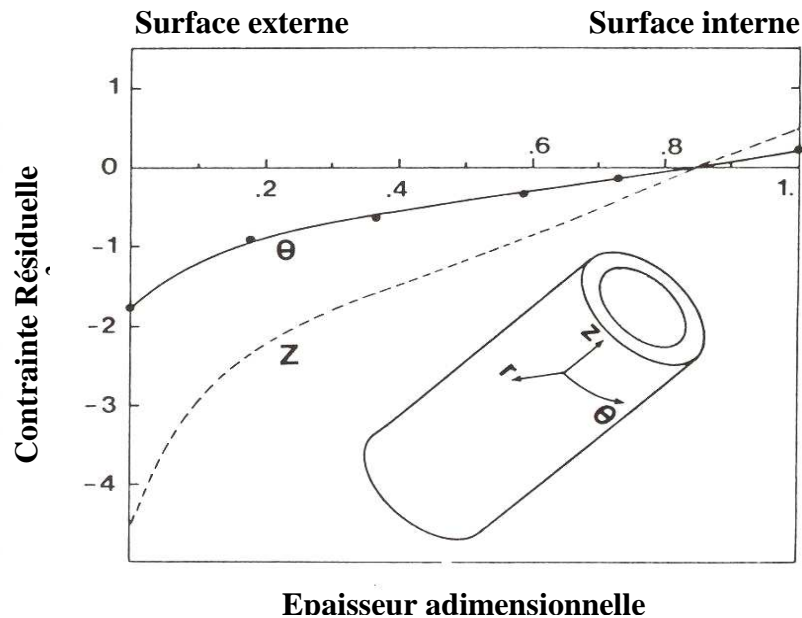
A travers la paroi du tube les contraintes résiduelles peuvent être de compression sur le côté extérieur et de traction sur le côté intérieur figure III.1 (a), comme elles peuvent être de compression sur les deux côtés et de traction au cœur de ce dernier figure III.1 (b).



**Figure III.1 :** Distributions possibles des contraintes résiduelles à travers la paroi d'un tube : a) Compression sur le côté extérieur, b) Compression sur les deux côtés [49].

L'effet des contraintes résiduelles est bénéfique si elles sont compressives, et défavorable si elles sont positives. Les contraintes résiduelles de compression font diminuer les charges externes et octroient au matériau une grande déformation globale avant la rupture, qui peut atteindre 1000 %. En revanche, les contraintes de traction s'ajoutent aux charges appliquées et font diminuer la durée de vie du matériau. Toutefois l'effet de la cristallinité est dominant par rapport à celui des contraintes résiduelles, notamment en ce qui concerne la

déformation du matériau [17], la figure III.2 illustre la distribution des contraintes résiduelles dans le tube.



**Figure III.2 :** Distribution de la contrainte résiduelle à travers la paroi du tube [50].

Les différentes valeurs des déformations mesurées à partir des spécimens et sur chaque couche ont permis de tracer la courbe suivante qui montre l'évolution des déformations à travers la paroi du tube et en fonction du temps ; figure III.3.

A travers la paroi du tube des différences ont été constatées dans les différentes valeurs calculées des déformations, la figure III.3 montre que la plus grande déformation appartient au spécimen extrait directement de la cinquième couche, autrement dit la couche la plus externe et qui est en contact direct avec les douches de refroidissement, ces dernières génèrent des contraintes intenses. Dans le cas des tubes extrudés, il est admis que les contraintes résiduelles et les variations de la morphologie sont les conséquences du processus de fabrication qui ne permet pas la dissipation thermique progressive [51]. La nécessité d'avoir des dimensions géométriques homogènes en terme de diamètre et d'épaisseur qui sont représentées par le facteur SDR (Specific Dimension Ratio), impose un refroidissement rapide. En conséquence, des contraintes de compression dans le processus d'extrusion sont générées sur les couches externes du tube tandis que les couches internes développent des contraintes positives. La résistance à la propagation de fissure est amplement influencée par l'état et la magnitude de ces contraintes résiduelles. En outre, il a été montré que la

propagation de fissures est plus lente dans les couches externes soumises à des contraintes résiduelles de compression [52].

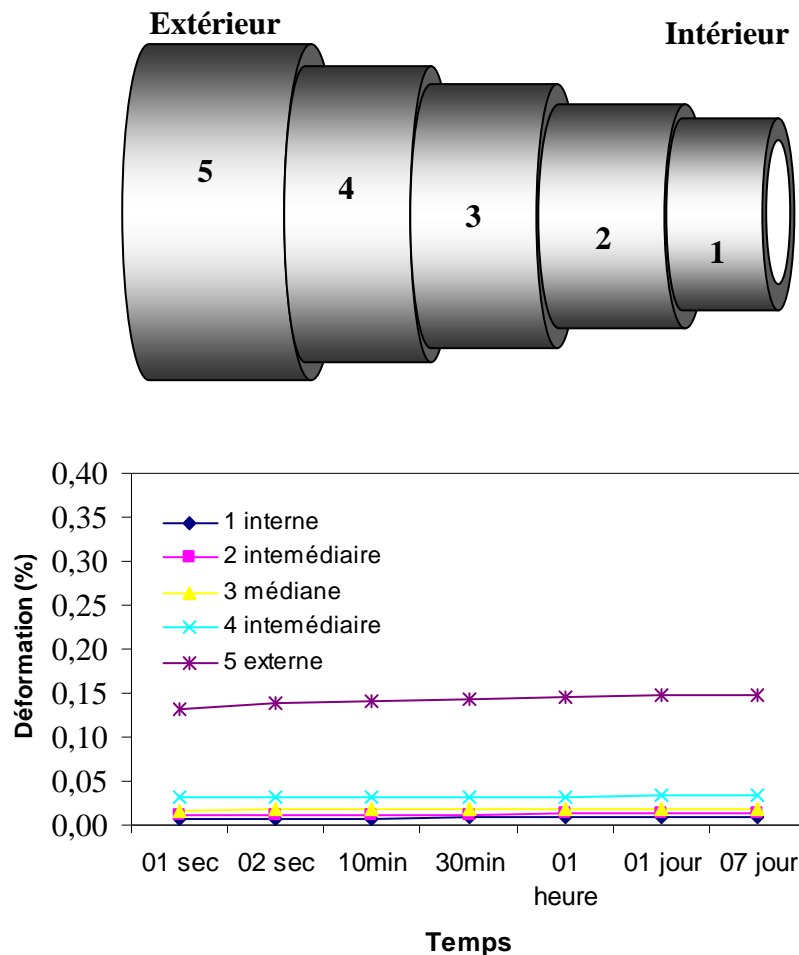


Figure III.3 : Evolution de la déformation à travers la paroi du tube HDPE-80.

En conséquence l'identification et la compréhension de l'évolution des propriétés mécaniques dans le tube lui-même nécessite des essais de traction. Ces derniers sont essentiels pour la détermination des lois de comportement. En effet c'est les seuls qui procurent un état de contrainte uni axiale et qui n'exigent donc pas une interprétation par le calcul en méthode inverse. En premier lieu ils permettent de déterminer des caractéristiques normalisées des matériaux, souvent exigées dans les cahiers des charges : limites d'élasticité, charge et allongement de rupture. En second lieu, on en déduit la relation rationnelle entre contrainte et déformation [24].

La courbe contrainte-déformation isole une phase de déformation élastique, au cours de laquelle l'éprouvette se déforme sous une force de traction, puis retrouve sa forme initiale à l'arrêt de la force. Vient ensuite une phase de déformation plastique au cours de laquelle l'éprouvette soumise à une force de traction se déforme, mais elle ne retrouve pas exactement sa forme initiale à l'arrêt de la traction. Finalement, lorsque la traction persiste survient une rupture de l'éprouvette au point de rupture. L'aire du schéma située sous la courbe représente l'énergie absorbée par l'éprouvette testée, et reflète sa dureté ou sa résistance mécanique [5].

Dans ce chapitre, il est proposé d'investiguer expérimentalement quelques propriétés mécaniques d'un tube de transport de gaz en HDPE-80 à travers la totalité de sa paroi.

## **III.2. Approche expérimentale:**

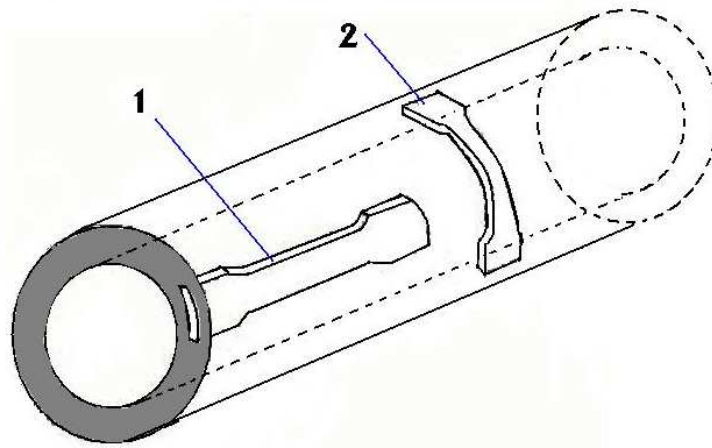
### **III.2.1. Matériau**

Le matériau utilisé dans cette étude est un tube en HDPE-80 ayant un SDR de 11, un diamètre extérieur de 125 mm et une épaisseur de 11,4 mm. Il est extrudé, pigmenté en noir, et destiné à la distribution du gaz naturel. Il a été fourni par l'entreprise nationale SONELGAZ. Il est conçu pour des réseaux à 4 bars de service et peut supporter des pressions d'essai hydraulique de 6 et 10 bars effectives.

### **III.2.2. Préparation des éprouvettes de traction**

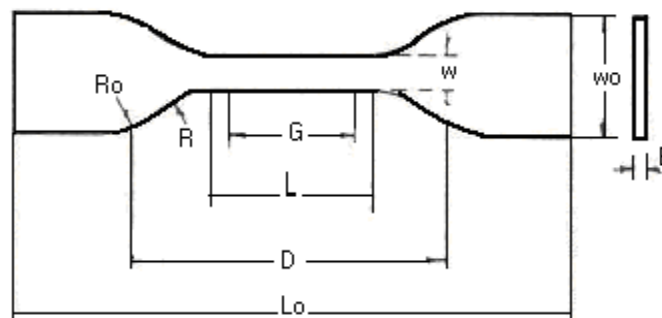
Afin de mesurer les propriétés mécaniques dans chaque couche du tube, les éprouvettes utilisées ont été directement extraites à partir du tube pour conserver l'histoire thermomécanique intrinsèque, en obéissant à une méthodologie de préparation reproductible et en minimisant les contraintes de contact durant l'opération automatique d'usinage.

Les éprouvettes utilisées dans les essais de traction sont directement extraites à partir des feuilles du HDPE-80 obtenues par tournage (chapitre II). Les éprouvettes de traction ont été découpées au niveau de L'ENIP Sonatrach (Skikda), suivant la norme ASTM D-638 type 4 dans deux sens perpendiculaires, voir la figure III.4.



**Figure III.4 :** Sens de découpage des éprouvettes de traction : 1. Eprouvettes découpées dans le sens longitudinal, 2. Eprouvettes découpées dans le sens transversal.

La figure III.5 illustre la forme et les dimensions du spécimen utilisé.



**Figure III.5 :** Eprouvette haltère de traction selon la norme ASTM D 638 type 4 [53].

Avec :

|  |                    |
|--|--------------------|
| $w$ : Largeur de la partie étroite             | $(6 \pm 0.5)$ mm   |
| $L$ : Longueur de la partie étroite parallèle. | 33 mm              |
| $w_0$ : Largeur aux extrémités, min.           | $(19 \pm 6)$ mm    |
| $L_0$ : Longueur totale, min.                  | 115 mm             |
| $G$ : Longueur de référence.                   | $(25 \pm 0.13)$ mm |
| $D$ : Distance initiale entre mâchoires.       | $(64 \pm 5)$ mm    |
| $R$ : Rayon de filet.                          | 14 mm              |
| $R_0$ : Rayon externe.                         | $(25 \pm 1)$ mm    |
| $B$ : Epaisseur de l'éprouvette.               | $\leq 4$ mm        |

Chaque éprouvette est identifiée géométriquement et spatialement dans la paroi du tube selon le cylindre initial pris comme référence et en utilisant une approche volumétrique [54].

### **III.2.3 Procédure expérimentale**

Les éprouvettes ont été soumises à des essais de traction monotones avec une machine d'essai universelle Zwick, Type Zwicki 1120 particulièrement conçu pour la caractérisation des polymères avec une cellule de charge de 2 kN. Une vitesse d'essai de 100 mm/min a été utilisée. Le déroulement des essais a été contrôlé par le logiciel TestXpert® Version 9.0 qui a permis de les effectuer exactement de la même manière en se basant sur les recommandations générales de ASTM D-638. Afin d'atteindre la rupture finale de l'éprouvette, la longueur calibrée choisie a été de 64 mm adaptée à la géométrie de l'éprouvette, et à la course maximale de la machine. L'acquisition des données sur ordinateur a été assurée en temps réel par une interface RS232. L'analyse statistique instantanée a été réalisée sur demande pendant chaque acquisition de données suivant un programme d'essai précédemment déclaré. Cette étape a assuré le calcul des moyennes et des écarts-type pour chaque ensemble d'éprouvettes appartenant à une même couche et constituant la courbe moyenne contrainte-déformation. Toutes les éprouvettes ont été testées à la température ambiante, elles sont réparties en deux lots, le 1<sup>er</sup> représente des éprouvettes découpées dans le sens longitudinal (lot 1) et le 2<sup>nd</sup> des éprouvettes découpées dans le sens latéral (lot 2) figure III.6

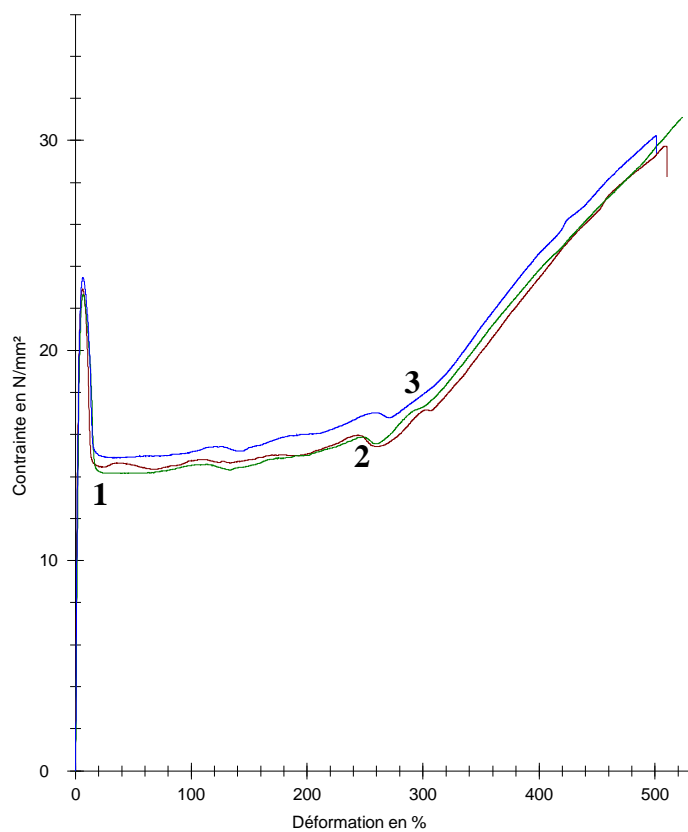


**Figure III.6 :** Eprouvettes de traction découpées dans les deux directions ; longitudinale et transversale.

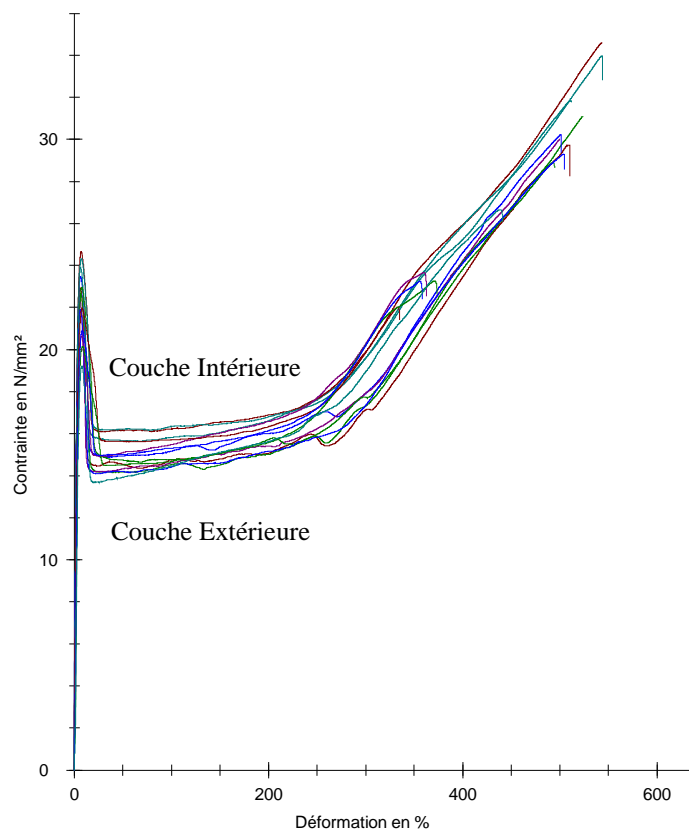
### **III.2.4. Résultats et discussion**

La figure III.7 montre l'allure typique de la courbe contrainte-déformation ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) nominale en traction uniaxiale pour des éprouvettes étirées à des vitesses d'allongement constantes, les courbes sont délivrées par le rapport du logiciel TestXpert<sup>®</sup>. Trois zones distinctives caractérisent le comportement : (a) une région élastique linéaire qui montre la déformation élastique du matériau due à la phase amorphe, du fait que le module de cette phase est beaucoup plus faible que celui de la phase cristalline, (b) une région d'étirage à froid montrant plus de 500% de déformation et (c) une déchirure ultime du matériau associée à la rupture finale. Cette courbe identifie le comportement typique des polymères semi-cristallins, qui sont généralement plus ductiles particulièrement entre  $T_g$  et  $T_m$  et subissent l'étirage à froid avant la rupture ultime. Les observations attentives indiquent que l'étirage à froid commence juste après le point d'écoulement et avant le point 1. Après le point 2, le durcissement plastique a lieu provoquant l'augmentation de la contrainte et les cristallites finissent par se fragmenter en une structure fibreuse fortement anisotrope alignée dans le sens d'étirement [45,55].

Afin d'étayer les variations dans la paroi du tube, la comparaison de courbes ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) correspondantes à toutes les positions moyennes montre que l'allure générale est très semblable et les 3 zones observées sont préservées. En plus, il est remarqué qu'une tendance est établie à mesure que les courbes évoluent de la couche interne vers l'extérieur (Figure III.8).



**Figure III.7 :** Courbes  $\sigma$ - $\epsilon$  de 3 éprouvettes HDPE appartenant à une même couche obtenues par le logiciel TestXpert. (1) début d'étirage à froid, (2) fin d'étirage et (3) début du durcissement plastique.

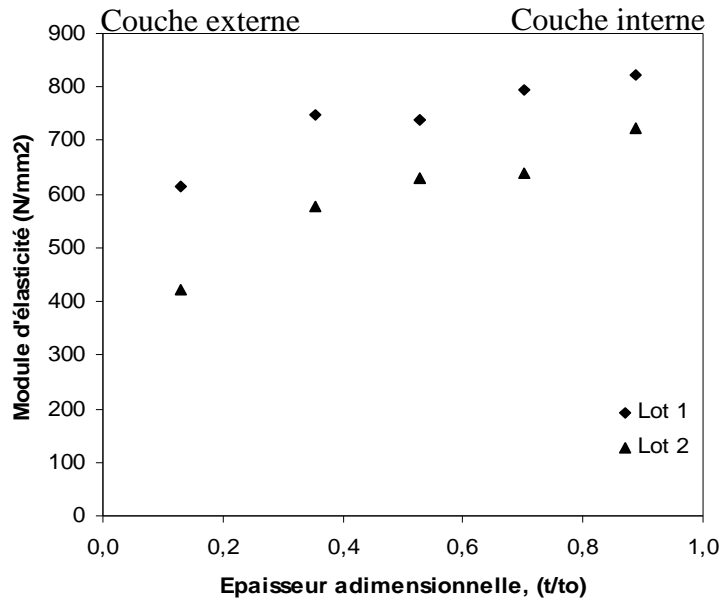


**Figure III.8 :** Comparaison des courbes  $\sigma$ - $\epsilon$  obtenues pour le lot 1 couvrant l'ensemble de l'épaisseur du tube en HDPE.

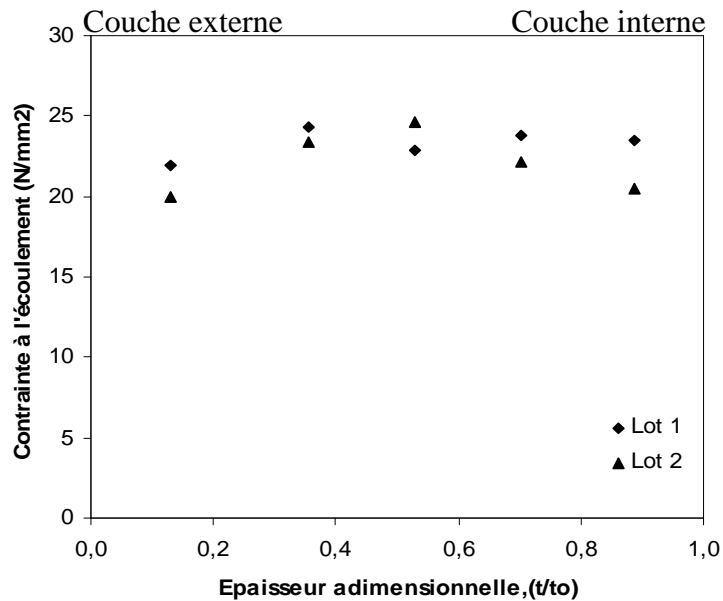
Afin d'étudier cette variabilité, les propriétés mécaniques courantes sont calculées et enregistrées par le logiciel pour chaque couche de l'enveloppe et pour deux lots différents ; le 1<sup>er</sup> lot regroupant des éprouvettes découpées dans le sens longitudinal et le 2<sup>nd</sup> regroupant des éprouvettes découpées dans le sens radial .

Pour le module d'élasticité et la contrainte d'écoulement (Figures III.9 et III.10), il y a une diminution apparente des 2 propriétés en allant de l'intérieur vers les couches externes du tube. Dans la région s'étendant entre 30 et 70% (2<sup>ème</sup>, 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> couche) d'épaisseur du tube, un plateau est observé indiquant probablement une zone qui n'a pas été complètement affectée par le transfert thermique pendant l'extrusion particulièrement pour les tubes obtenus par extrusion et rapidement refroidi à l'eau à partir de la surface externe [54]. De l'autre côté, la surface intérieure a eu suffisamment de temps pour se refroidir par convection libre. La plupart des équations prévoient une augmentation de  $E$  et de  $\sigma_y$  avec la cristallinité mais dans ce cas, il est impératif de souligner que le cas du cylindre est différent car un gradient de

température contrôle le système thermodynamique transitoire pendant le refroidissement [56,57].

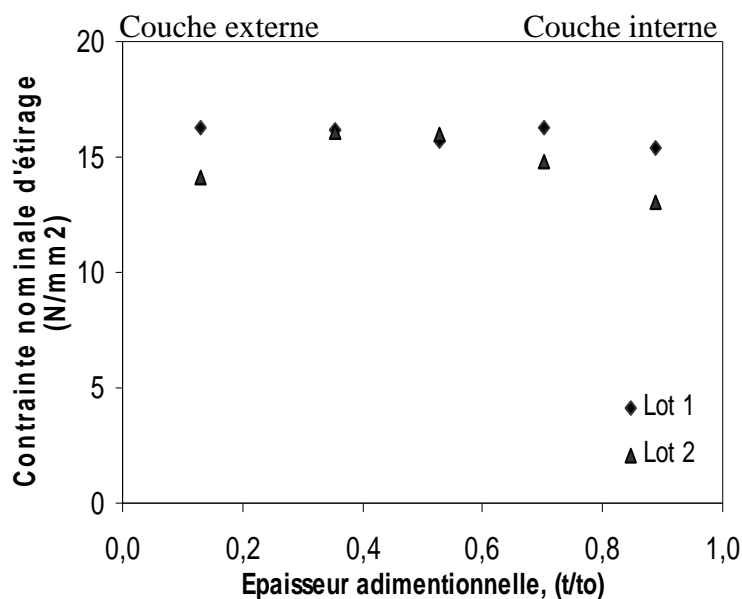


**Figure III.9:** Evolution du module d'élasticité à travers la paroi d'un tube de gaz en HDPE pour deux lots : lot 1 éprouvettes longitudinales, lot 2 éprouvettes latérales.



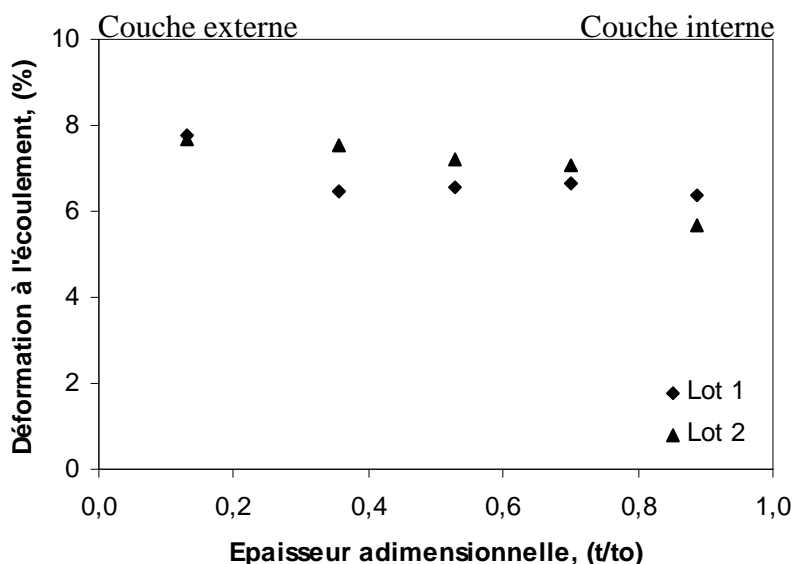
**Figure III.10:** Evolution de la contrainte à l'écoulement à travers la paroi d'un tube de gaz en HDPE pour deux lots : lot 1 éprouvettes longitudinales, lot 2 éprouvettes latérales.

La figure III.11 montre aussi que la contrainte nominale d'étirage à froid adopte la même allure que le module d'élasticité et la contrainte à l'écoulement, elle diminue de l'intérieur vers l'extérieur du tube, cette diminution est régie par la cristallinité élevée de la couche intérieure de la paroi.

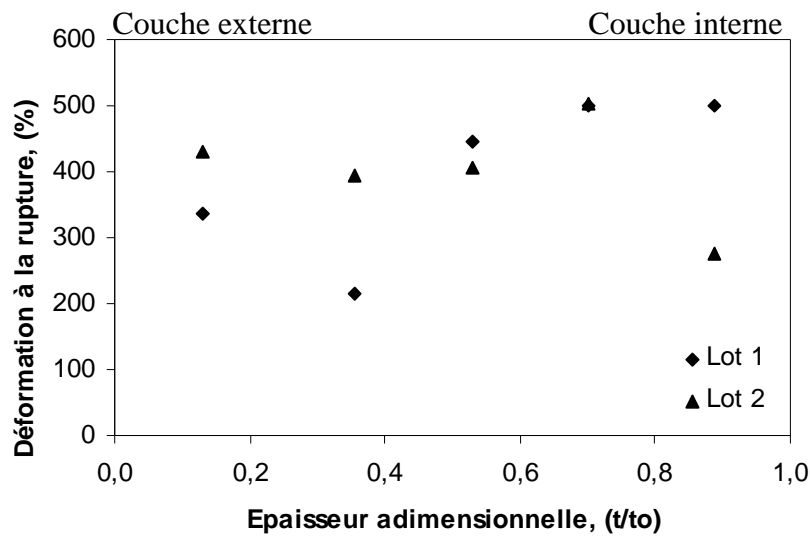


**Figure III.11 :** Evolution de la contrainte nominale d'étirage à travers la paroi d'un tube de gaz en HDPE pour deux lots : lot 1 éprouvettes longitudinales, lot 2 éprouvettes latérales.

La figure III.12 montre qu'il y a une bonne corrélation entre la limite d'élasticité et la déformation à l'écoulement  $\epsilon_y$  pour les deux lots d'éprouvettes, et qui indique que la déformation augmente de l'intérieur du tube vers l'extérieur. Pour les mesures des déformations à la rupture  $\epsilon_f$ , les corrélations avec la limite d'élasticité ne sont pas toujours évidentes pour les deux lots, comme montrée dans la figure III.13.

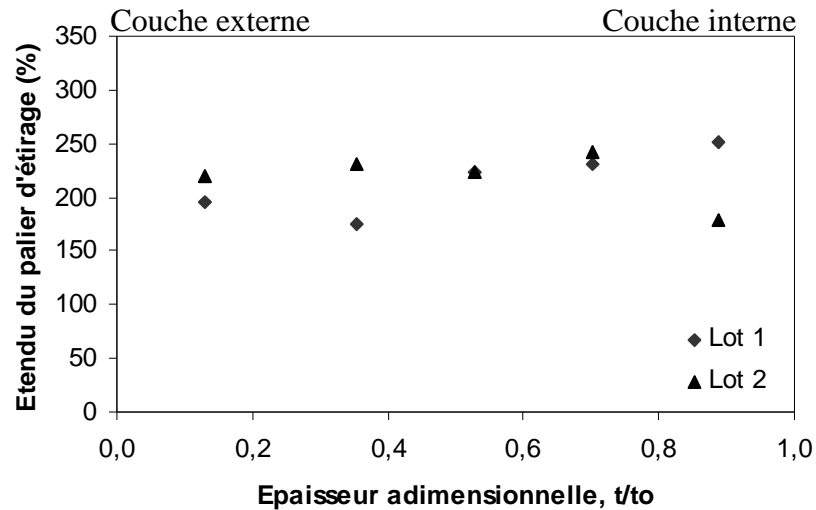


**Figure III.12 :** Evolution de la déformation à l'écoulement à travers la paroi d'un tube de gaz en HDPE pour deux lots : lot 1 éprouvettes longitudinales, lot 2 éprouvettes latérales.



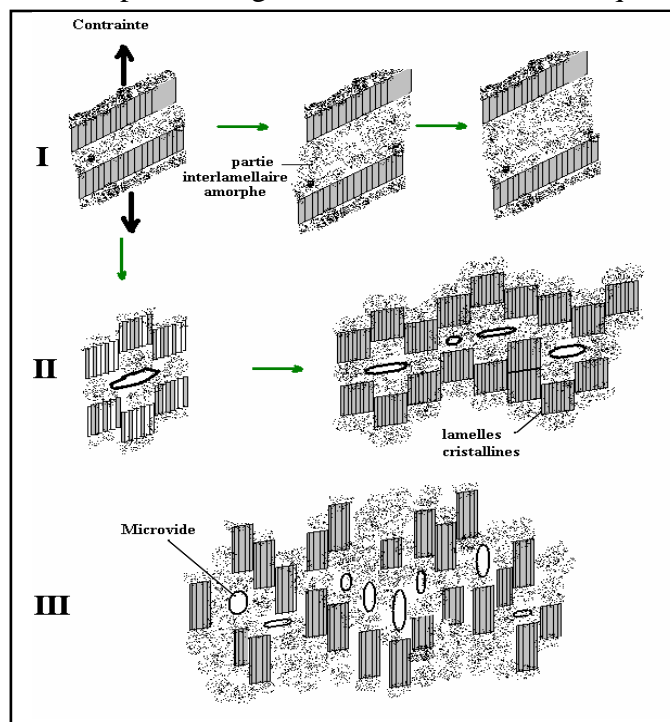
**Figure III.13 :** Evolution de la déformation à la rupture à travers la paroi d'un tube de gaz en HDPE pour deux lots : lot 1 éprouvettes longitudinales, lot 2 éprouvettes latérales.

L'étendue du palier d'étirage à froid exprimé en % est illustrée dans la figure III.14. on remarque que le lot 1 est plus représentatif que le lot 2, la valeur de l'étendu diminue de l'intérieur vers l'extérieur de la paroi du tube. L'étirage à froid se produit par deux mécanismes. Dans le premier cas, il s'initie au milieu de l'éprouvette en un seul endroit et la striction conséquente se propage progressivement vers les mors. Alternativement, dans d'autres cas, le début d'étirage est caractérisé par une multitude de sites soumis au phénomène de la striction se développant indépendamment et puis, fusionnant ensemble. Pendant ce processus, la courbe ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) en temps réel a montré des fluctuations (pics), l'apparition d'un pic correspond en général à la disparition d'un faisceau de matière. Toute fois une striction se forme, la charge diminue ; l'étirement d'un faisceau de matière comprise entre deux strictions requiert une augmentation de la contrainte dans cette phase, les cristallites se déforment plastiquement et subissent un cisaillement plastique localisé dans les plans de glissement [17].



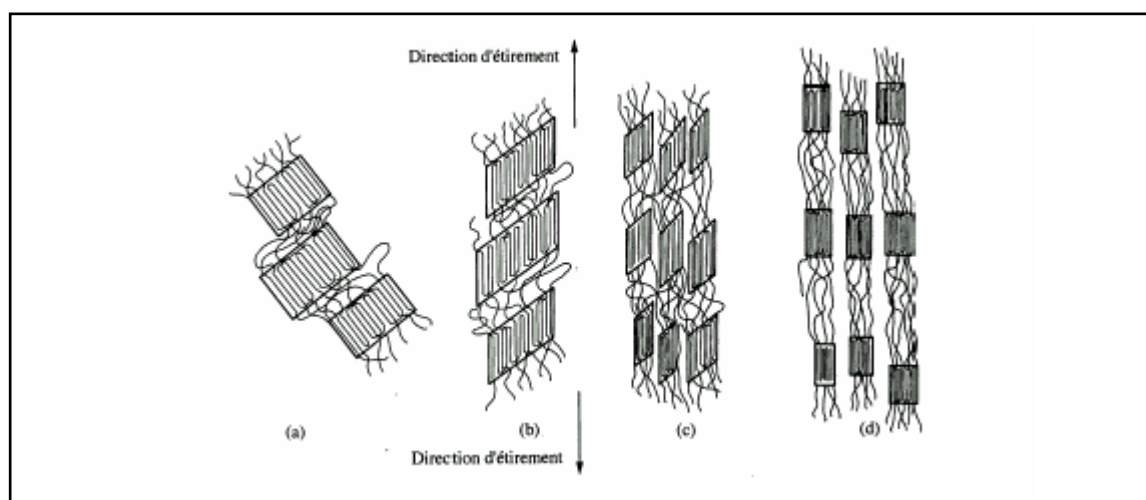
**Figure III.14** : Evolution de l'étendue du palier d'étréage à froid à travers la paroi d'un tube de gaz en HDPE pour deux lots : lot 1 éprouvettes longitudinales, lot 2 éprouvettes latérales.

Les propriétés mécaniques sont peu affectées par la taille des sphérolites, mais plutôt par celle des lamelles cristallines. Durant la propagation de la striction, les sphérolites sont totalement détruites pour donner lieu à une structure fibrillaire. Comme le montre la partie I de la figure III.15, la séparation des lamelles cristallines causée par l'application d'une contrainte présentant une composante normale favorise la création de micro vides dans la partie inter lamellaire amorphe à l'origine de la formation des craquelures [58].



**Figure III.15** : Etapes de formations des craquelures pour un polymère semi cristallin selon FRIEDRICH [58].

Dans l'étape II, quand la contrainte a atteint une valeur critique (seuil d'écoulement) la phase cristalline se déforme et des blocs de 10 à 30 nm se détachent du cristal. La phase cristalline peut se déformer suivant plusieurs modes (maclage mécanique, transformation de phase), mais c'est le glissement cristallin qui est le mode de déformation majoritaire car il peut engendrer de grandes déformations. A cause de ce processus d'écoulement local, des défauts submicroniques de forme ellipsoïdale se créent entre les lamelles. Ces défauts ont tendance à causer une augmentation de contraintes dans leur environnement latéral, ayant pour conséquence des rubans lamellaires au cours du processus de déformation local. Ainsi la probabilité de formation de vides aussi bien que de fibrilles entre ces micro vides est accrue. La troisième étape, le dépliage des chaînes à partir des surfaces de fracture des blocs cristallins interconnectés, conduit à l'extension complète de ces fibrilles. La figure III.16 (d) montre le phénomène d'alignement des blocs selon la direction d'étirage.



**Figure III.16** : Déformation dans les zones diagonales des sphérolites : (a) état non déformé (b) extension de la phase amorphe (c) fragmentation des lamelles cristallines (d) alignement des fragments selon la direction d'étirage [58].

Par conséquent, la formation de la craquelure (schématisée figure III.17) est un phénomène de cavitation, au cours duquel le matériau passe d'une structure sphérolitique à une structure de fibrilles fortement étirées et entourées de nombreux vides. Le développement de ces craquelures, dans les plans perpendiculaires à l'axe de sollicitation, se fait par extraction de la matière à partir des surfaces et par extension des vides entre les fibrilles au fur et à mesure que la contrainte interne augmente.

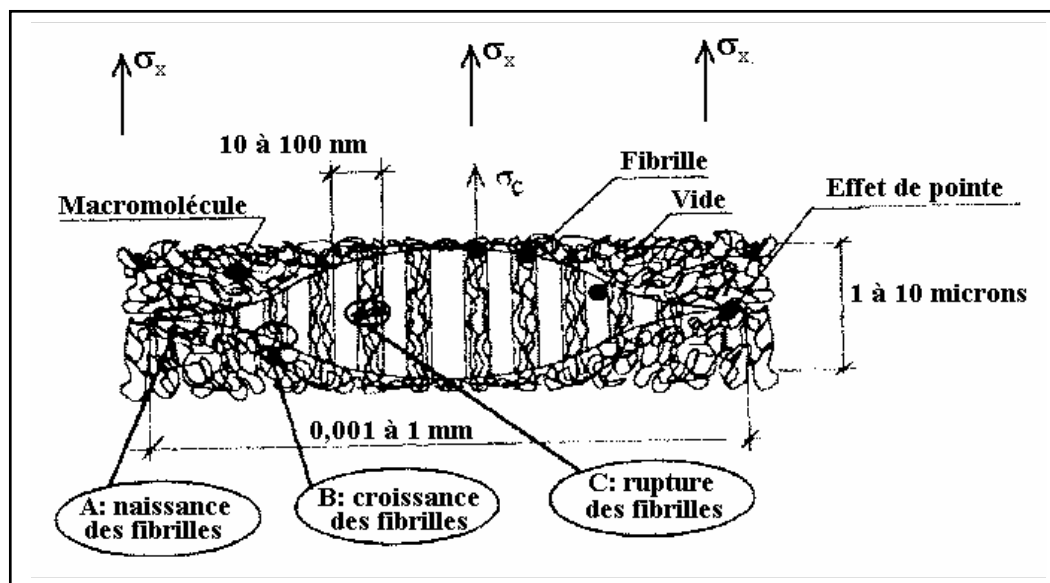


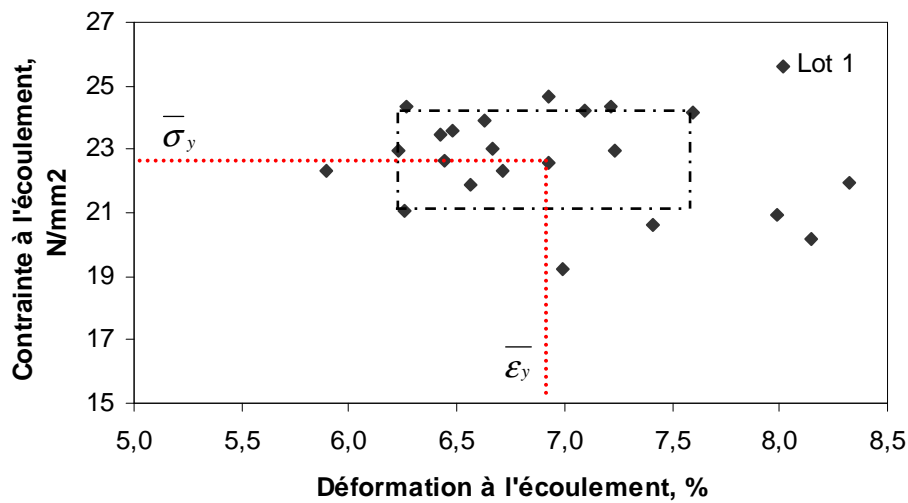
Figure III.17 : Microstructure d'une craquelure [58].

La rupture des matériaux semi cristallins, intervient par création d'une fissure au sein de la craquelure, par rupture des fibrilles, une fois que celles-ci ont atteint leur étiabilité maximale. Les causes de rupture des fibrilles dans le polyéthylène sont un sujet de controverse car deux approches s'opposent. La première suppose une rupture par reptation des chaînes à savoir glissement et désenchevêtrement des molécules repliées. La seconde considère la rupture des chaînes enchevêtrées présentes dans les fibrilles. La controverse tient au fait qu'il y a une forte analogie entre la rupture inter lamellaire et le craquelage des polymères vitreux. En effet, pour des températures proches de  $T_g$  (température de transition vitreuse) et des masses proches de la masse critique, les fibrilles peuvent rompre par glissement de chaîne dans les matériaux à l'état vitreux. Pour les polymères semi cristallins de haute masse molaire, il semblerait qu'à  $T_g < T < T_f$ , la phase cristalline empêche le glissement moléculaire dans les chaînes de craquelures et que celles-ci rompent plutôt par rupture de chaîne que par désenchevêtrement, des radicaux libres ayant été détectés lors de l'étirage de polyéthylène [45].

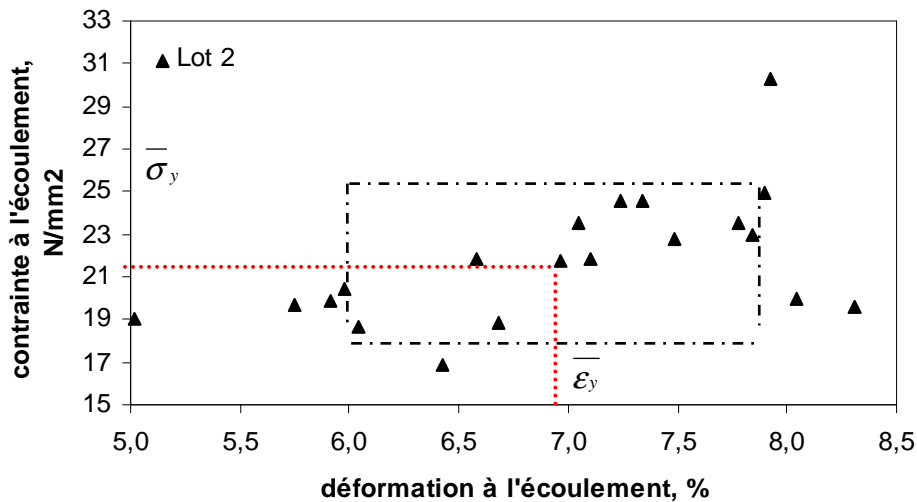
Une analyse statistique a été effectuée sur les données obtenues afin de valider les tendances et de voir si les deux lots d'éprouvettes acceptent une distribution normale. Toutes les données ont été soumises à la distribution normale et la dispersion autour de la moyenne a été analysée. Deux points caractéristiques représentés par  $(\sigma_y, \epsilon_y)$  seuil de l'écoulement, et le début de l'étirage sont considérés. Les valeurs moyennes et les écarts type sont calculés et montrés dans les Figures III.18 et III.19. La zone fermée représente des variations à 2 écarts-

type autour de la valeur moyenne et est destinée à estimer la constance en calculant le % de points englobés. Les valeurs obtenues sont toutes supérieures à 60 %, indiquant approximativement que plus de la moitié des données obtenues, accepte bien une distribution normale. Les calculs réalisés sont basés sur l'écart type (S) qui mesure la dispersion des données autour de la moyenne ( $\bar{X}$ ).

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{(n-1)}} \quad \text{[III.4]}$$

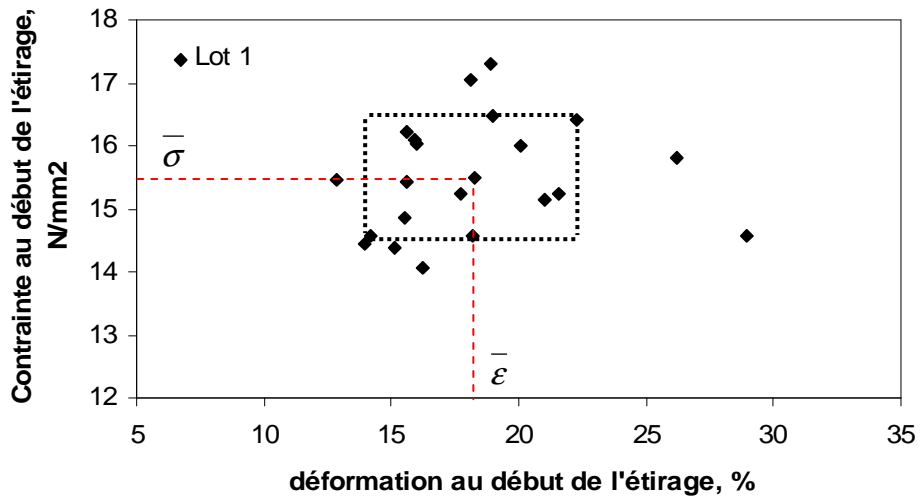


(a)

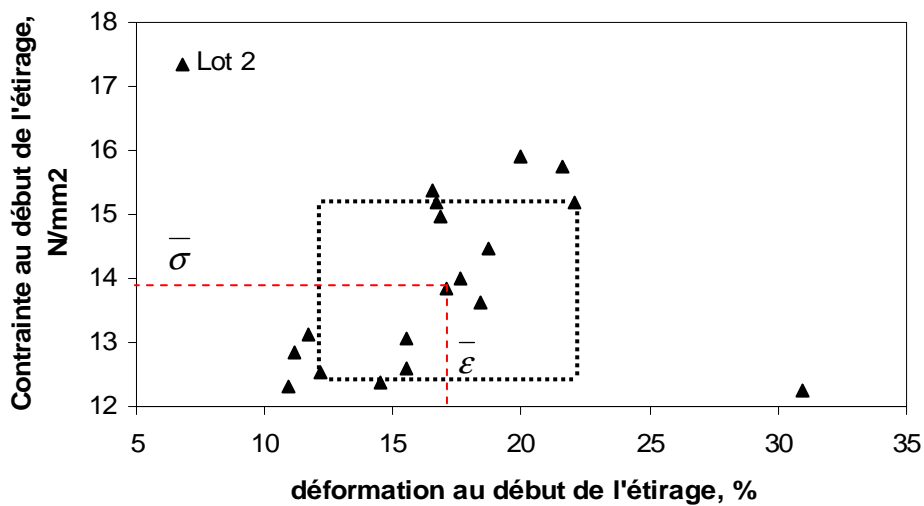


(b)

**Figure III.18 :** Relation entre  $\sigma$  et  $\varepsilon$  à l'écoulement, ( $\bar{\sigma}_y$  et  $\bar{\varepsilon}_y$  sont les valeurs moyennes autour de 2 écarts-type) pour deux lots d'éprouvettes découpées : a) dans la direction longitudinale, b) dans la direction latérale.



(a)



(b)

**Figure III.19 :** Relation entre  $\sigma$  et  $\epsilon$  au début de l'étréage, ( $\bar{\sigma}_y$  et  $\bar{\epsilon}_y$  sont les valeurs moyennes autour de 2 écarts-type) pour deux lots d'éprouvettes découpées : a) dans la direction longitudinale, b) dans la direction latérale.

Le Tableau III.1 représente quelques propriétés données par le logiciel Test Expert pour des éprouvettes extraites de différentes couches à travers la paroi du tube ; notamment le module d'élasticité et la contrainte au seuil d'écoulement.

**Tableau III.1** : Module d'élasticité, résistance au seuil d'écoulement de différentes couches d'un tube de gaz en HDPE-80.

| Couche            | Module d'élasticité (MPa) | Contrainte au seuil d'écoulement (MPa) |
|-------------------|---------------------------|--|
| Intérieure        | 822,07                    | 23,47                                  |
| Intermédiaire     | 793,16                    | 23,77                                  |
| Médiane (moyenne) | 739,12                    | 22,88                                  |
| Intermédiaire     | 746,60                    | 24,34                                  |
| Extérieure        | 615,47                    | 21,95                                  |

Dans une étude de J. Eiber, où il a testé des éprouvettes enlevées dans la couche intérieure, moyenne et, extérieure du tube en PEMD par des essais de traction et de diffraction par les rayons X. Il a trouvé que les éprouvettes de la couche intérieure ont des modules d'élasticité, des résistances au seuil d'écoulement et des taux de cristallinité plus élevés que ceux des autres couches, notamment la couche extérieure.

Lorsque le tube sort de la filière d'extrudeuse, il est encore dans un état visqueux et il faut le refroidir. Ceci est obtenu par passage dans un calibre. Puisque la surface extérieure du tube est en contact avec la surface intérieure refroidie de l'alésage du calibre, elle se refroidit plus vite que la surface intérieure du tube ; et par conséquent le développement des zones cristallisées du PE a le temps suffisant dans cette surface [19].

Le Tableau III.2 donne les résultats typiques des modules d'élasticité, des résistances au seuil d'écoulement (contrainte qui correspond à 2% de la déformation) et des taux de cristallinité de 3 couches du tube en PEMD.

**Tableau III.2** : Module d'élasticité, résistance au seuil d'écoulement, taux de cristallinité de 3 couches du tube PEMD [19].

| Couche     | Module d'élasticité (MPa) | Résistance au seuil d'écoulement (MPa) | Taux de cristallinité (%) |
|------------|---------------------------|--|---------------------------|
| Intérieure | 796,5                     | 29,77                                  | 61,47                     |
| Moyenne    | 789,6                     | 29,95                                  | 56,39                     |
| Extérieure | 777,9                     | 29,39                                  | 57,98                     |

Pour montrer un peu l'influence du sens de prélèvement des éprouvettes sur les propriétés mécaniques, d'après les résultats obtenus par le logiciel Test Expert, il est trouvé à chaque fois, que les éprouvettes découpées dans la direction longitudinale sens de l'extrusion du tube donnent de meilleurs propriétés que celles découpées dans la direction circonférentielle du tube. Les différentes propriétés mécaniques dans les deux sens de prélèvement sont représentées dans le Tableau III.3.

**Tableau III.3** : propriétés mécaniques du tube HDPE-80 suivant la direction de prélèvement des éprouvettes.

| Direction de prélèvement de l'éprouvette Propriétés              | Longitudinale | Transversale |
|--|---------------|--------------|
| Limite élastique, $R_{p0,2} [N / mm^2]$                          | 15,87         | 13,75        |
| Contrainte au seuil d'écoulement, $\sigma_y [N / mm^2]$          | 23,47         | 20,44        |
| Contrainte en traction à la rupture, $\sigma_B [N / mm^2]$       | 32,12         | 31,22        |
| Contrainte en traction, $\sigma_M [N / mm^2]$                    | 32,15         | 31,31        |
| Déformation en traction au seuil d'écoulement, $\epsilon_y [\%]$ | 6,36          | 5,66         |
| Déformation nominale à la rupture en traction, $\epsilon_f [\%]$ | 501,40        | 275,45       |
| Contrainte nominale d'étirage, $\sigma_{CD} [N / mm^2]$          | 15,44         | 13,05        |
| Module d'élasticité en traction, module de Young, $E [N / mm^2]$ | 822,07        | 723,20       |

Les données livrées par le logiciel TestXpert® ont permis de réaliser une étude statistique en se basant sur le logiciel Statistica® (version 5.1), la qualité de l'ajustement a été examinée avec le test de Fisher-Snedecor pour un niveau de probabilité d'erreur présélectionné de  $p \leq 0,05$ . Les corrélations acceptées sont indiquées avec une étoile. Les tableaux III.4 et III.5 réalisés sur deux lots d'éprouvettes prélevées dans deux directions (lot 1 direction longitudinale, lot 2 direction transversale) ont confirmés qu'il existe une très forte corrélation entre la majorité des propriétés mécaniques notamment  $E$ ,  $R_{p0,1}$ ,  $R_{p0,2}$ ,  $\sigma_y$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $\sigma_{CD}$ . Les corrélations impliquant les déformations à la rupture  $\varepsilon_f$  n'ont pas montré des tendances linéaires.

**Tableau III.4 :** Listing montrant les coefficients de détermination et les niveaux de probabilité d'erreur (p) entre les variables choisies en fonction de l'épaisseur du tube pour un lot d'éprouvettes longitudinales ; (\*) indique un niveau d'erreur statistique acceptable.

|                    | Position              | Module                | Y-stress<br>0.1%      | Y-stress<br>0.2%      | Y-strain              | Y-stress              | Cold-dra<br>stress    | Cold-dra<br>strain    | Failure-<br>strain   | Failure-<br>stress |
|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|--------------------|
| Module             | 0,963929*<br>P=0,0023 | --                    |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                      |                    |
| Y-stress<br>0.1%   | 0,999972*<br>P=0,0009 | 0,963642*<br>P=0,0023 | --                    |                       |                       |                       |                       |                       |                      |                    |
| Y-stress<br>0.2%   | 0,999872*<br>P=0,0009 | 0,960113*<br>P=0,0020 | 0,999886*<br>P=0,0009 | --                    |                       |                       |                       |                       |                      |                    |
| Y-strain           | 0,999821*<br>P=0,0009 | 0,968669*<br>P=0,0018 | 0,999755*<br>P=0,0009 | 0,999449*<br>P=0,0009 | --                    |                       |                       |                       |                      |                    |
| Y-stress           | 0,999719*<br>P=0,0009 | 0,960172*<br>P=0,0020 | 0,999811*<br>P=0,0009 | 0,999870*<br>P=0,0009 | 0,999284*<br>P=0,0009 | --                    |                       |                       |                      |                    |
| Cold-dra<br>stress | 0,999884*<br>P=0,0009 | 0,966914*<br>P=0,0026 | 0,999882*<br>P=0,0009 | 0,999669*<br>P=0,0009 | 0,999932*<br>P=0,0009 | 0,999606*<br>P=0,0009 | --                    |                       |                      |                    |
| Cold-dra<br>strain | 0,866042*<br>P=0,0266 | 0,919522*<br>P=0,0099 | 0,867917*<br>P=0,0257 | 0,863079*<br>P=0,0273 | 0,871276*<br>P=0,0241 | 0,869168*<br>p=0,0259 | 0,872333*<br>P=0,0232 | --                    |                      |                    |
| Failure-<br>strain | 0,739041<br>P=0,0939  | 0,808175<br>P=0,0528  | 0,741365<br>P=0,0921  | 0,735140<br>P=0,0965  | 0,744702<br>P=0,0894  | 0,744476<br>P=0,0904  | 0,746021<br>P=0,0896  | 0,964715*<br>P=0,0024 | --                   |                    |
| Failure-<br>stress | 0,993875*<br>P=0,0003 | 0,936367*<br>P=0,0066 | 0,993686*<br>P=0,0003 | 0,994928*<br>P=0,0004 | 0,992332*<br>P=0,0002 | 0,993591*<br>P=0,0003 | 0,992669*<br>P=0,0002 | 0,811919*<br>P=0,0501 | 0,665376<br>P=0,1495 | --                 |

**Tableau III.5 :** Listing montrant les coefficients de détermination et les niveaux de probabilité d'erreur (p) entre les variables choisies en fonction de l'épaisseur du tube pour un lot d'éprouvettes transversales; (\*) indique un niveau d'erreur statistique acceptable.

|                        | Position              | Module                | Y-stress<br>0.1%      | Y-stress<br>0.2%      | Y-stress              | Y-strain              | Cold-dra<br>stress    | Cold-dra<br>strain    | Failure-<br>strain   | Failure-<br>stress |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|--------------------|
| Module                 | 0,895742*<br>P=0,0165 | --                    |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                      |                    |
| Y-stress<br>0.1%       | 0,998909*<br>P=0,0008 | 0,903100*<br>P=0,0143 | --                    |                       |                       |                       |                       |                       |                      |                    |
| Y-stress<br>0.2%       | 0,998853*<br>P=0,0008 | 0,901007*<br>P=0,0141 | 0,999982*<br>P=0,0009 | --                    |                       |                       |                       |                       |                      |                    |
| Y-<br>stress           | 0,998583*<br>P=0,0008 | 0,891405*<br>P=0,0171 | 0,999538*<br>P=0,0009 | 0,999693*<br>P=0,0009 | --                    |                       |                       |                       |                      |                    |
| Y-<br>strain           | 0,999695*<br>P=0,0009 | 0,904967*<br>P=0,0134 | 0,999521*<br>P=0,0009 | 0,999871*<br>P=0,0009 | 0,998749*<br>P=0,0008 | --                    |                       |                       |                      |                    |
| Cold-<br>dra<br>stress | 0,999346*<br>P=0,0009 | 0,900386*<br>P=0,0140 | 0,999876*<br>P=0,0009 | 0,999400*<br>P=0,0009 | 0,999622*<br>P=0,0009 | 0,999707*<br>P=0,0009 | --                    |                       |                      |                    |
| Cold-<br>dra<br>strain | 0,917071*<br>P=0,0107 | 0,750563<br>P=0,0860  | 0,900178*<br>P=0,0140 | 0,900494*<br>P=0,0140 | 0,904185*<br>P=0,0134 | 0,909573*<br>P=0,0129 | 0,905653*<br>P=0,0135 | --                    |                      |                    |
| Failure-<br>strain     | 0,860554*<br>P=0,0280 | 0,670574<br>P=0,1450  | 0,843129*<br>P=0,0353 | 0,844060*<br>P=0,0354 | 0,851349*<br>P=0,0321 | 0,852141*<br>P=0,0312 | 0,850742*<br>P=0,0320 | 0,978071*<br>P=0,0018 | --                   |                    |
| Failure-<br>stress     | 0,991199*<br>P=0,0001 | 0,919230*<br>P=0,0109 | 0,993622*<br>P=0,0003 | 0,993194*<br>P=0,0003 | 0,990508*<br>P=0,0000 | 0,992943*<br>P=0,0002 | 0,992184*<br>P=0,0002 | 0,865290*<br>P=0,0265 | 0,787413<br>P=0,0637 | --                 |

### **III.3. Conclusion**

Cette étude a permis d'étudier la distribution des propriétés mécaniques à travers la paroi du tube de gaz en HDPE. Une approche expérimentale est mise en œuvre pour déterminer les différences locales. Il est constaté que les propriétés représentant des contraintes augmentent de l'extérieur vers des couches intérieures. Ceci est expliqué par l'évolution de la cristallinité puisque le processus de fabrication implique un refroidissement différentiel et aussi une génération de contraintes résiduelles. En termes de déformations, les tendances ne sont pas tout à fait évidentes. D'autre part, la relation entre la contrainte d'écoulement et le module d'élasticité est caractérisée par une forte corrélation linéaire croissante. La variation des propriétés mécaniques à travers la paroi reflète la complexité de la hiérarchie structurelle dans le HDPE et contribue à la compréhension de son comportement à long terme.

## **IV. 1. Introduction**

La durabilité étant la capacité d'un matériau à conserver longtemps ses qualités et caractéristiques d'origine, les entreprises de distribution d'eau et de gaz naturel accordent beaucoup d'attention à la performance et à la durabilité des conduites dans leurs projets de construction de réseaux de canalisations enfouis. Cette durabilité participe à la réduction considérable des coûts de maintenance et de réhabilitation [59].

L'utilisation des polymères est devenue de plus en plus courante dans de multiples domaines d'activités. Le choix d'un matériau polymère se fait désormais parmi un large éventail d'espèces polymères associées à de nombreuses possibilités de mise en forme. La légèreté et le faible coût des polymères en font des matériaux de large utilisation, chaque domaine d'activité exploitant des propriétés spécifiques répondant à leur cahier des charges. La stabilité de ces propriétés dans le temps est un facteur déterminant pour une utilisation industrielle [60]. Le HDPE est employé dans le transport du gaz naturel pour les lignes de distribution et d'écoulement, aussi bien que dans quelques nouvelles applications comme les composites produits d'acier et de fibres. Les données disponibles indiquent que la durée de vie minimale est de 50 ans dans des applications typiques de drainage et de transport lorsqu'il est enfoui [61]. En service, les tubes en polyéthylène subissent des charges internes et des charges externes qui provoquent des déformations et altèrent les propriétés mécaniques. Ces propriétés sont aussi influencées par la nature de l'environnement de service. Les solutions chimiques acides ou alcalines, hydrocarbures fluides, essence, huile de lubrification, carburant, kérosène, détergents, agents de blanchiment et autres sont souvent stockés et vendus dans des emballages de polyéthylène de haute densité pour des durées relativement courtes. Parfois même le HDPE est utilisé dans le revêtement des tubes en béton et en acier pour améliorer leurs tenues dans des environnements corrosifs en contact avec la terre [62].

La dégradation peut être le résultat de la perméabilité du polymère qui est matérialisée par la dissolution dans le tube en polyéthylène et le gaz, le liquide ou la vapeur diffuse dans un milieu de concentration plus faible. Dans le cas de certains hydrocarbures liquides ceci peut entraîner l'altération des propriétés physiques ; la résistance à la traction peut être réduite de 10%, la rigidité de 25%, et le gonflement radial et axial de 5%. Dans les tubes sous pression quand la perméabilité des hydrocarbures liquides dépasse 5%, il est recommandé d'ajouter un facteur de correction de 5% à la contrainte hydrostatique de conception [63].

Les propriétés des tubes sont aussi influencées par la nature de l'environnement de service. En 1992, la CERF (Civil Engineering Research Foundation) publia des informations

comparant les matériaux usuels enfouis qui ont des vies de service fondamentalement influencées par les facteurs (1) pH du sol, (2) résistivité du sol, (3) pH de l'eau, (4) présence des sels ou composés corrosifs, (5) sédiments d'érosion et (6) vitesse d'écoulement [17].

Les conduites en PVC et en HDPE présentent, dans la plupart des milieux corrosifs, une bonne résistance aux attaques chimiques et biologiques. De plus, ils résistent le mieux à l'abrasion. Les autres caractéristiques spécifiques aux conduites en plastique sont le fluage, la fragilité aux basses températures et la dégradation due aux rayons UV. Quant à la performance à long terme, il est tôt de tirer des conclusions en raison de la jeunesse relative du produit [64]. Certains types de polyéthylène peuvent se fissurer ou se fendiller lorsqu'ils sont soumis à des contraintes d'un niveau donné ou exposés à certains produits chimiques. Ce phénomène est appelé Craquelure sous l'effet de contraintes et/ou de l'environnement [65].

La surface paraffinique du polyéthylène haute densité lui assure un faible coefficient de friction. Sa résistance à l'abrasion augmente avec la masse molaire et la cristallinité ; elle est remarquable pour les HDPE de masse molaire très élevée. Cette bonne résistance chimique est exploitée pour le transport des matières dangereuses dans des fûts extrudés-soufflés en polyéthylène haute densité de masse molaire élevée. La résistance chimique augmente avec le taux de cristallinité et, dans une moindre mesure, avec la masse molaire ; elle diminue fortement quand la température augmente. En revanche, le HDPE gonfle légèrement dans les solvants aliphatiques et davantage dans les solvants aromatiques dans lesquels il se dissout partiellement à haute température. Il est attaqué par les substances très oxydantes telles que les halogènes et les acides minéraux oxydants concentrés (acides nitrique et perchlorique, et oléums) [40].

Les conditions de transport, d'installation et de service des tubes sont en grande partie responsables du mode de rupture (figure IV.1 et figure IV.2), celles-ci incluent la charge du sol (ou le déplacement), la contrainte (ou la déformation), la température et la composition d'un environnement agressif ; gazeux, liquide ou solide. Ce phénomène de rupture sous l'effet de l'environnement et des contraintes (*Environmental Stress Cracking*) ou ESC est l'une des causes principales de l'endommagement des canalisations d'eau potable ou de gaz naturel (GN). La rupture se produit après la propagation accélérée d'une fissure suite à l'action combinée d'une contrainte multi-axiale et d'un environnement agressif [67].



**Figure IV.1 :** Tube enfoui avec son backfill de terre [66].



**Figure IV.2 :** Résultats de l'interaction des tubes HDPE avec les fluides transportés et l'environnement externe, rupture d'un tube d'eau (grand diamètre) [66].

Le Tableau IV.I énumère quelques produits chimiques qui attaquent les tubes en PE, ainsi que certains liquides qui sont absorbés par leur paroi. La perméabilité aux hydrocarbures peut causer une réduction pas moins 10% de la résistance à la traction, et aussi environ 25% de la rigidité. L'hydrocarbure en liquide peut légèrement réduire la résistance à long terme du PE [63].

**Tableau IV.1** : Produits chimiques attaquant les tubes PE et liquides absorbés par ce matériau [63].

| <b>Attaque chimique</b>   |  |  |   |
|---|--|--|---|
| Oxydants<br>Acide Sulfurique<br>Émettant de la vapeur<br>Chlore                     | Aqua Regia<br>Acide Nitrique<br>50%  | Brome<br>Peroxydes<br>Organiques                     | Acide Chromique/<br>Sulfurique<br>Concentré de Phénol |
| <b>Absorption liquide</b>   |  |  |   |
| Hydrocarbures Liquides<br>Carburant Diesel<br>Hydrocarbures<br>Aliphatiques Toluène | Benzène d'Aniline<br>Butyrate d'Éthyle de Diméthylamine<br>Essence<br>Xylène | Carbone Furfural de<br>Tétrachlorure<br>Nitrobenzène |   |

L'objectif de ce travail est l'étude expérimentale de l'influence de certains milieux agressifs pouvant se trouver dans l'environnement et qui conduisent à l'altération des propriétés des tubes en HDPE. En même temps, l'étude sert à déterminer l'influence des milieux chimiques à travers la paroi du tube. Les résultats sont exprimés en fonction des propriétés mécaniques usuelles en usant du comportement contrainte-déformation.

## IV.2. Approche expérimentale

### IV.2.1 Matériau

Le matériau utilisé dans cette étude est un tube en HDPE-80 ayant un SDR de 11, un diamètre extérieur de 125 mm et une épaisseur de 11,4 mm. Il est extrudé, pigmenté en noir, et destiné à la distribution du gaz naturel. Il a été fourni par l'entreprise nationale SONELGAZ. Il est conçu pour des réseaux à 4 bars de service et peut supporter des pressions d'essai hydraulique de 6 et 10 bars effectives.

### IV.2.2 Préparation des éprouvettes

Les éprouvettes utilisées dans cette étude sont des éprouvettes standards de traction extraites directement du tube HDPE-80, découpées dans les deux directions longitudinale et transversale comme expliqué dans le Chapitre III.

### IV.2.3 Environnements

Les environnements choisis sont une combinaison entre la nature des sols et les différents agents chimiques:

- Solvant organique, mélange de Toluène-Méthanol (50-50).
- Acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) concentré à 1,28%.
- Huile synthétique (DOT3).
- Eau potable (traitée).

#### IV.2.4 Conditions expérimentales

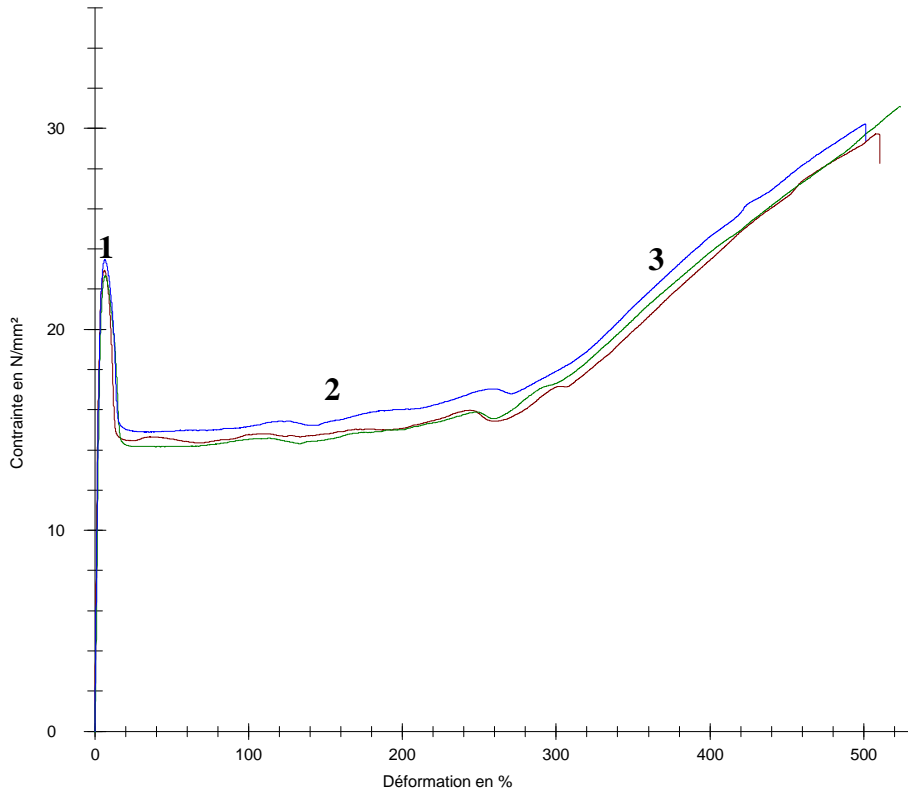
- Pesée de toutes les éprouvettes avant immersion dans les environnements choisis à l'aide d'une balance électronique DENVER Instrument, d'une précision 0.01g et de portée maximale de 2000g.
- Immersion des éprouvettes dans les milieux pendant 7 jours dans des conteneurs étanches.
- Retrait des éprouvettes, nettoyage à l'eau et séchage.
- Pesée de toutes les éprouvettes après extraction des environnements

Les éprouvettes ont été soumises à des essais de traction monotones avec une machine d'essai universelle Zwick, Type Zwicki 1120 particulièrement conçue pour la caractérisation des polymères avec une cellule de charge de 2 kN. Une vitesse d'essai de 100 mm/min a été utilisée et à la température ambiante du laboratoire. Le déroulement des essais a été contrôlé par le logiciel TestXpert® Version 9.0 qui a permis de les effectuer exactement de la même manière en se basant sur les recommandations générales de ASTM D-638.

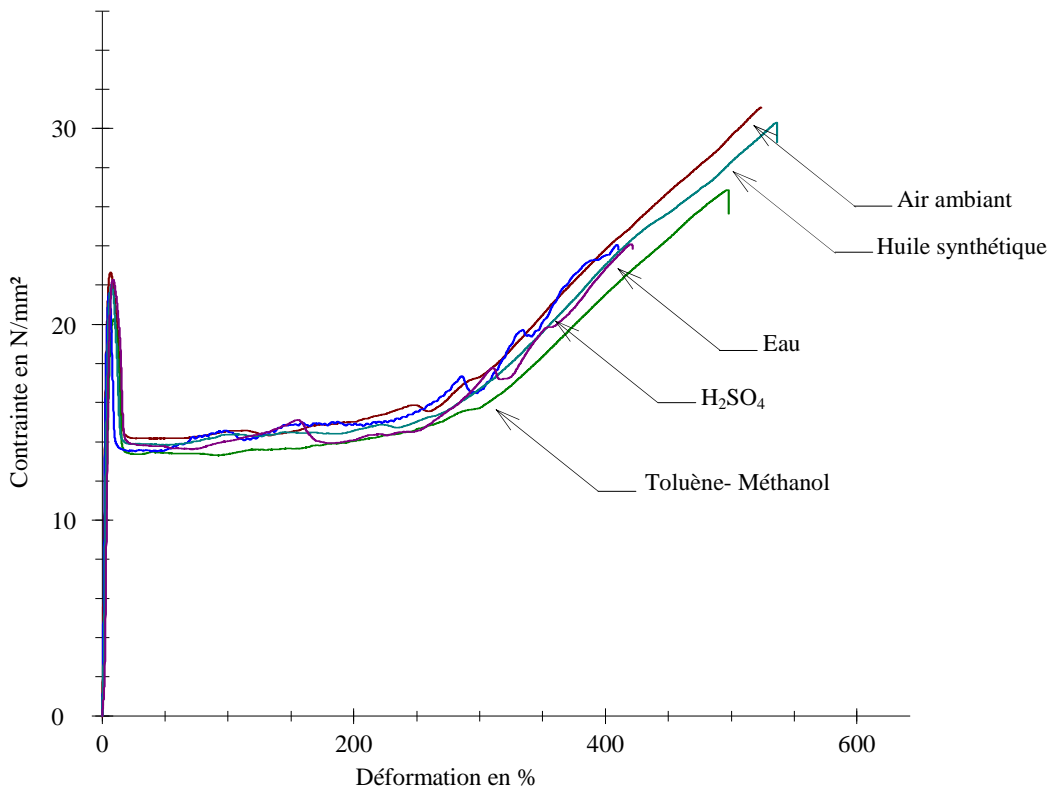
#### IV.3 Résultats et discussions

Les environnements ont montré qu'ils ont une certaine influence sur les comportements des éprouvettes soumises à la traction uniforme. En effet, la relation ( $\sigma:\epsilon$ ) représente un comportement caractéristique de ce type de polymère où 3 zones distinctes sont observées figure IV.3 :

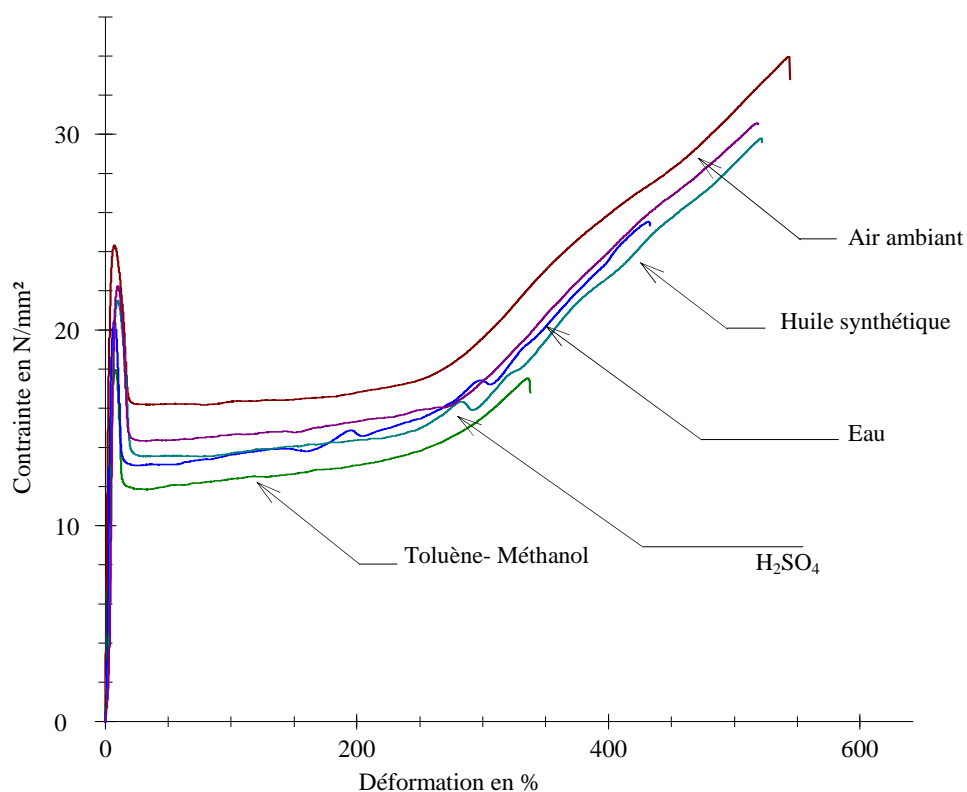
(1) zone de comportement élastique, (2) zone de propagation de la striction ( $\sigma_{max}$  constante et étirage à froid) et (3) zone plastique de sur-étirage. Les Figures IV.4, IV.5 et IV.6, illustrent les comportements du HDPE soumis à l'air libre et à différents environnements agressifs. A l'air libre, les propriétés sont les meilleures. Bien que l'allure des courbes soit semblable dans les cas considérés, des différences majeures sont évidentes en termes de dispersion et de valeurs caractéristiques pour des éprouvettes prélevées par exemple dans trois couches à travers l'épaisseur du tube (interne, intermédiaire et externe).



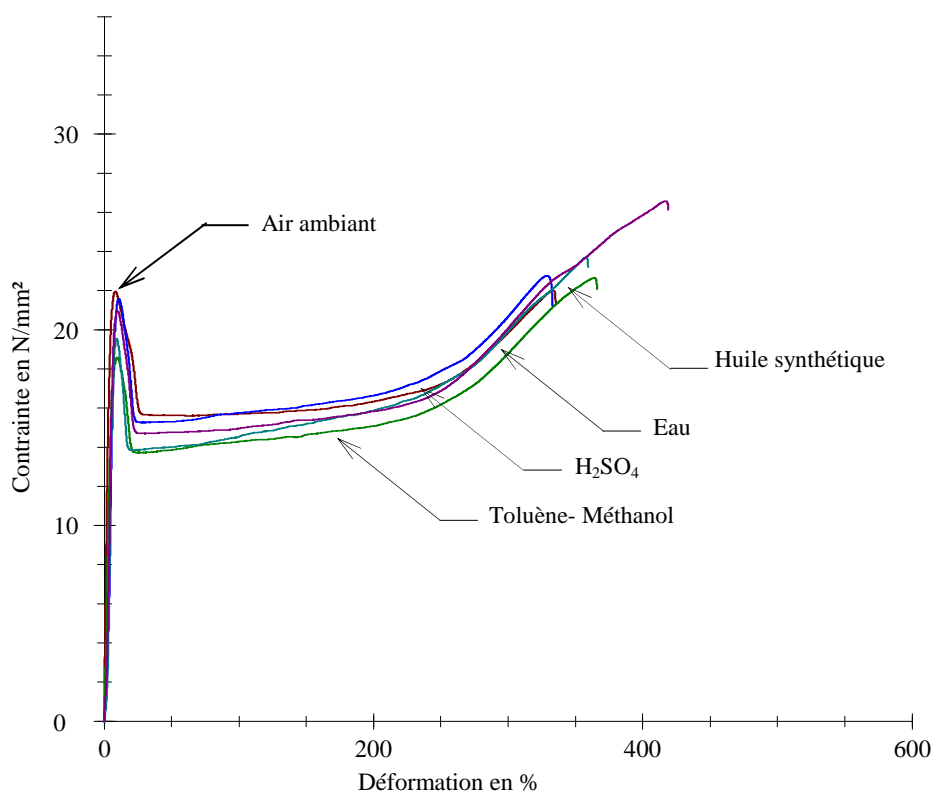
**Figure IV.3 :** Courbes  $\sigma$ - $\epsilon$  de 3 éprouvettes HDPE appartenant à une même couche obtenues par le logiciel TestXpert. (1) zone élastique, (2) zone de propagation de la striction et (3) début du durcissement plastique.



**Figure IV.4 :** Courbe Contrainte-déformation de la couche interne d'un tube en HDPE exposé 7 jours à plusieurs environnements.



**Figure IV.5 :** Courbe Contrainte-déformation de la couche intermédiaire d'un tube en HDPE exposé 7 jours à plusieurs environnements.



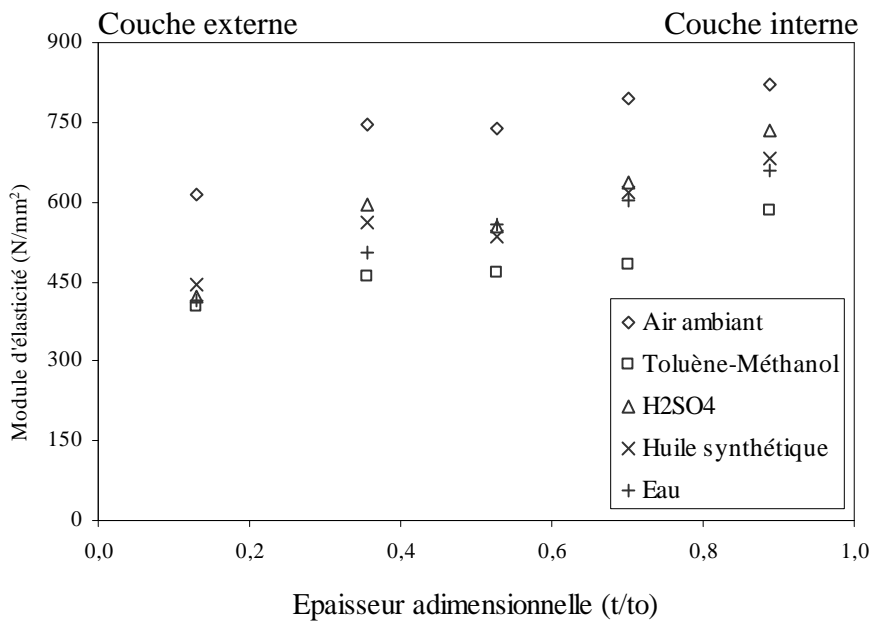
**Figure IV.6 :** Courbe Contrainte-déformation de la couche extérieure d'un tube en HDPE exposé 7 jours à plusieurs environnements

A travers la paroi du tube il est observé une divergence dans les valeurs d'une couche par rapport à une autre, au niveau des propriétés mécaniques caractéristiques des HDPE certaines valeurs ( $E$ ,  $\epsilon_y$ ,  $\sigma_y$ ) se sont complètement effondrées dans des milieux aussi oxydants comme le mélange Toluène – Méthanol.

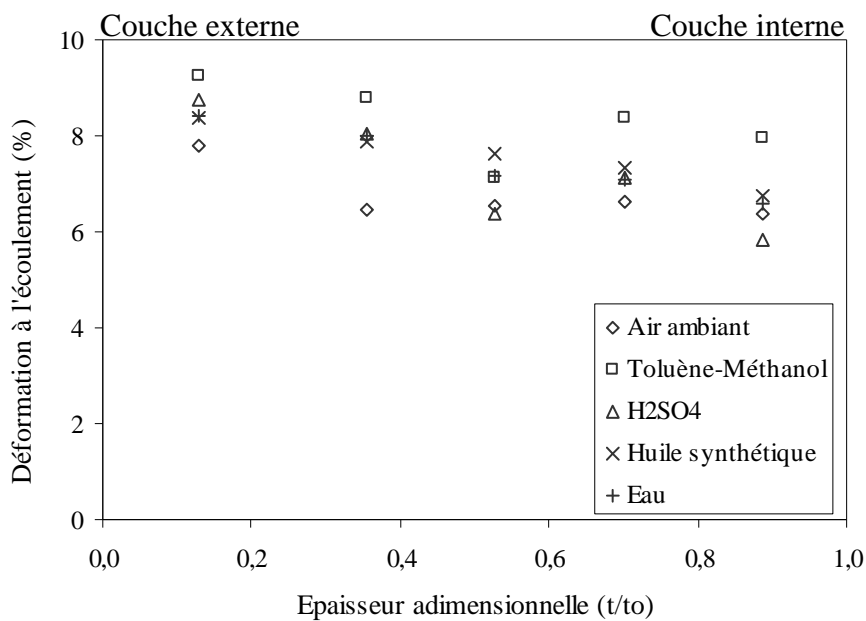
L'affaiblissement du module  $E$  et de  $\epsilon_y$  est affirmé également pour toutes les couches du tube comme illustré dans les Figures IV.7, IV.8 et IV.9. Ces trois propriétés adoptent la même évolution à travers la paroi du tube ; elles augmentent en allant de l'extérieur vers l'intérieur du tube. L'effet du mélange Toluène-méthanol reste prépondérant et ce résultat est aussi confirmé dans la littérature spécialisée étudiant les comportements des polymères vis-à-vis des solvants organiques [40].

A partir des courbes livrées par le logiciel TestXpert® et en comparant les éprouvettes immergées dans des milieux agressifs avec des éprouvettes exposées à l'air ambiant quelques différences sont apparues :

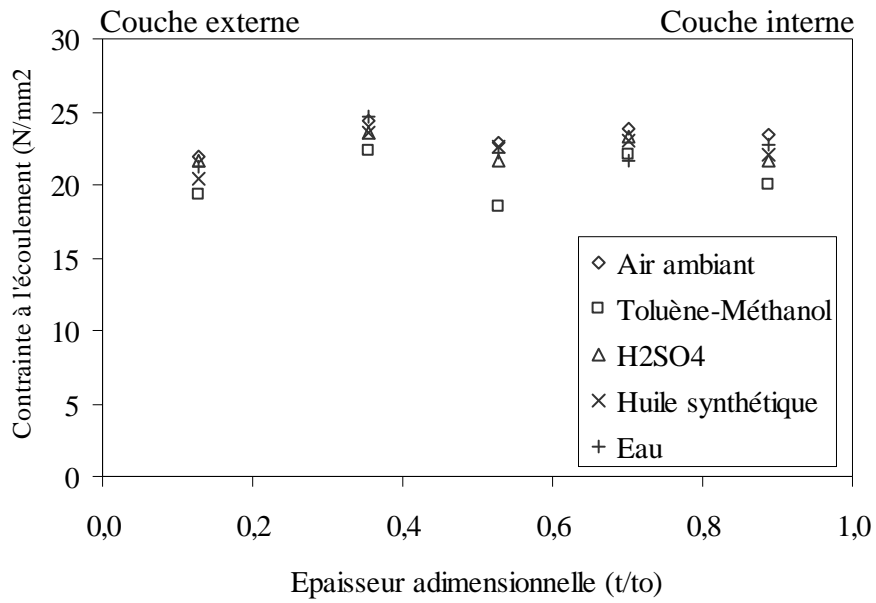
- ✓ Sur les changements de la forme de la courbe :
  - couche interne ; courbes rapprochées,  $\sigma_y$  est presque stable.
  - couche intermédiaire ; palier dispersé.
  - couche extérieure ; la partie durcissement est très réduite.
- ✓ La déformation à la rupture varie à travers la paroi elle augmente de l'extérieur vers l'intérieur du tube.
- ✓ Une instabilité est remarquée sur les différentes courbes :
  - couche interne ;  $H_2SO_4$ , eau.
  - couche intermédiaire ;  $H_2SO_4$ .
  - couche externe ; pas d'instabilité (courbes lisses).



**Figure IV.7 :** Evolution du module d'élasticité à travers la paroi d'un tube de gaz en HDPE pour des éprouvettes immergées dans plusieurs environnements.

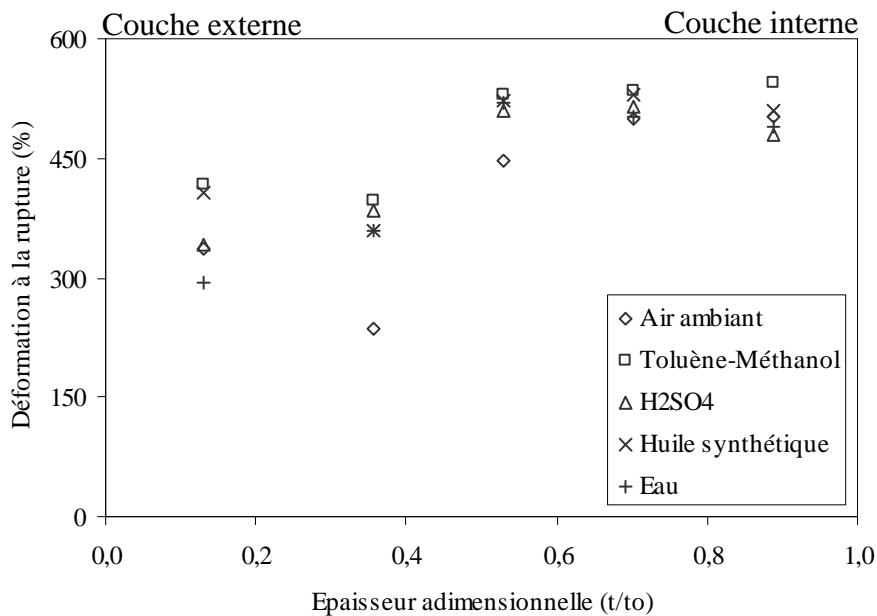


**Figure IV.8 :** Evolution de la déformation à l'écoulement à travers la paroi d'un tube de gaz en HDPE pour des éprouvettes immergées dans plusieurs environnements.



**Figure IV.9 :** Evolution de la contrainte à l'écoulement à travers la paroi d'un tube de gaz en HDPE pour des éprouvettes immergées dans plusieurs environnements.

Cependant, la déformation à la rupture  $\epsilon_r$  s'est améliorée par exposition au Toluène-Méthanol (Figure IV.10). Il est évident que les matériaux ayant des modules plus bas subissent des déformations importantes lorsqu'on les charge [23].



**Figure IV.10 :** Evolution de la déformation à la rupture à travers la paroi d'un tube de gaz en HDPE pour des éprouvettes immergées dans plusieurs environnements.

Dans les mêmes conditions, la déformation à l'écoulement  $\varepsilon_y$  a augmenté par rapport à celle obtenue à l'air ambiant. Les solvants ont un pouvoir oxydant important qui fragilise le polyéthylène, alors que l'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) a moins d'influence sur les propriétés mécaniques par rapport aux solvants organiques. L'huile synthétique présente un effet modéré bien qu'elle soit connue pour attaquer les caoutchoucs. L'association d'un environnement agressif et d'une contrainte externe fait altérer les propriétés mécaniques qui diminuent alors que la fragilité de la matière se trouve augmentée.

La comparaison dans le cas du système sol-tube polymérique est évidente et comme les déversements dans plusieurs environnements sont non contrôlés, le contact entre l'agent chimique et le tube va avoir lieu. Le phénomène d'attaque chimique ne pourra être évité et à ceci peut s'ajouter l'effet des sels agressifs naturellement contenus dans le sous-sol. Dans un travail sur les tubes en PVC et en PVC-CPE (Chlorinated polyethylene modified PVC) exposés aux vapeurs du n-hexane, d'éthanol, de toluène, et à un mélange de gaz naturel enrichi au benzène [68,69], il a été trouvé que cette agressivité se traduit par la formation de criques (crazes) qui se terminent par une dangereuse rupture fragile et des fuites de gaz dans le sol. Ce type de défaillance est expliqué au niveau moléculaire par un affaiblissement des chaînes composant le polymères dû à un agent externe ou interne comme l'oxydation jusqu'à ce que le matériau n'arrive plus à contrer les contraintes appliquées. Dans d'autres cas, il y a un changement physique dans le polymère lui-même, qui impose une redistribution des contraintes internes pour produire, en combinaison avec les forces du sol ou de l'effet des agents chimiques, une charge résultante supérieure à la résistance intrinsèque du tube. La dégradation commence toujours par une rupture des liaisons (scission primaire) qui permet ensuite la diffusion de l'oxygène et par conséquent l'altération de la structure et des propriétés mécaniques [70,71].

Le HDPE est plus cristallin et plus résistant chimiquement que le polyéthylène de basse densité, et il présente une bonne résistance à une vaste gamme de produits chimiques, le polyéthylène est par contre altéré par l'acide sulfurique, un oxydant produit en faible concentration par les bactéries aérobies. On peut s'attendre qu'une exposition prolongée à de faibles concentrations d'acide sulfurique altère les conduites en polyéthylène, notamment celles de HDPE, surtout en présence de contraintes mécaniques. Une déformation de l'ordre de 5 % à 12 % peut à elle seule provoquer une dégradation mécanique rapide [72,73]. L'immersion de HDPE dans une solution saline peut favoriser son oxydation, ce qui porte à croire que les fondants chimiques utilisés pour déglacer les routes peuvent à la longue altérer

la performance des conduites de HDPE enfouies, une fois que le sel a migré à travers la couche de terre végétale [74].

En plus d'être un hydrocarbure, le HDPE est un polymère apolaire, ce qui le rend vulnérable aux attaques des solvants apolaires comme les alcools, les détergents, les halogènes et les aromates, ainsi que des produits chimiques comme les produits pétroliers et l'essence. Ces solvants font gonfler le HDPE ou s'infiltrer à travers la paroi de la conduite. L'infiltration des solvants peut se produire en une journée ou s'étendre sur plusieurs semaines, selon la nature du produit, sa concentration, le type de sol et la qualité du matériau dont est faite la conduite. Dans certaines conditions de température et de contraintes et en présence de produits chimiques donnés, le polyéthylène peut se fendiller plus rapidement que s'il n'était pas exposé à ces produits [75].

Dans les Tableaux IV.2, IV.3, IV.4 une récapitulation des résultats est présentée avec les valeurs numériques qui montrent que les propriétés ne sont pas uniformément distribuées à travers la paroi en considérant la colonne de M1 (air ambiant). La couche intermédiaire est représentée par des valeurs comprises entre celles des 2 couches limites. Par contre les valeurs relatives à la déformation limite sont les plus importantes sur la couche externe. En général, cette couche est connue pour être soumise à des contraintes internes de compression et présente une cristallinité plus petite. En d'autres termes, l'arrangement des chaînes est moindre à cause du processus de refroidissement rapide [54].

La nature des sols d'enfouissement des réseaux de transport et distribution du gaz naturel présente un effet important sur la résistance des tubes en polyéthylène. Bien que l'allure des courbes de comportement ( $\sigma:\varepsilon$ ) soit globalement semblable, des altérations majeures sont évidentes en termes de dispersion et des limites des valeurs caractéristiques. Les solvants ont un pouvoir oxydant qui fragilise le polyéthylène. Ceci est traduit par une réduction moyenne du module d'élasticité de 59 %. La réduction du  $E$ ,  $R_{p0,2}$ , et  $\varepsilon_{CD}$  est affirmée pour toutes les couches.

**Tableau IV.2 :** Variation des propriétés mécaniques de la couche interne d'un tube de gaz en HDPE exposé à différents environnements.

| <b>Couche interne</b>                 |           |           |           |           |           |
|---------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                                       | <b>M1</b> | <b>M2</b> | <b>M3</b> | <b>M4</b> | <b>M5</b> |
| $E$<br>(N/mm <sup>2</sup> )           | 806.2     | 476.4     | 769.1     | 613.2     | 632.9     |
| $\sigma_y$<br>(N/mm <sup>2</sup> )    | 23.47     | 20.27     | 21.57     | 22.03     | 22.28     |
| $\varepsilon_y$<br>(%)                | 6.42      | 8.01      | 5.15      | 6.59      | 6.68      |
| $\varepsilon_r$<br>(%)                | 501.4     | 497.9     | 410.3     | 536.7     | 421.8     |
| $R_{p0,1}$<br>(N/mm <sup>2</sup> )    | 13,44     | 13,80     | 15,43     | 16,04     | 15,38     |
| $R_{p0,2}$<br>(N/mm <sup>2</sup> )    | 15,87     | 14,07     | 16,70     | 17,22     | 16,75     |
| $\sigma_{CD}$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 15,44     | 14,10     | 14,71     | 15,16     | 14,95     |
| $\varepsilon_{CD}$<br>(%)             | 251       | 240,12    | 220       | 221,59    | 241,21    |

**Tableau IV.3 :** Variation des propriétés mécaniques de la couche intermédiaire d'un tube de gaz en HDPE exposé à différents environnements.

| <b>Couche intermédiaire</b>           |           |           |           |           |           |
|---------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                                       | <b>M1</b> | <b>M2</b> | <b>M3</b> | <b>M4</b> | <b>M5</b> |
| $E$<br>(N/mm <sup>2</sup> )           | 720.5     | 397.9     | 548.6     | 534.5     | 555.7     |
| $\sigma_y$<br>(N/mm <sup>2</sup> )    | 24.33     | 17.98     | 20.48     | 21.51     | 22.25     |
| $\varepsilon_y$<br>(%)                | 7.22      | 7.51      | 6.17      | 7.33      | 7.18      |
| $\varepsilon_r$<br>(%)                | 544.2     | 529.4     | 433.1     | 521.8     | 518.9     |
| $R_{p0,1}$<br>(N/mm <sup>2</sup> )    | 13,65     | 13,08     | 16,96     | 18,02     | 15,49     |
| $R_{p0,2}$<br>(N/mm <sup>2</sup> )    | 15,21     | 13,61     | 17,81     | 16,82     | 16,80     |
| $\sigma_{CD}$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 15,71     | 13,59     | 14,65     | 15,30     | 15,33     |
| $\varepsilon_{CD}$<br>(%)             | 223,05    | 249,85    | 218       | 220,89    | 251,58    |

**Tableau IV.4** : Variation des propriétés mécaniques de la couche externe d'un tube de gaz en HDPE exposé à différents environnements.

| Couche externe                        |        |        |        |        |        |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                       | M1     | M2     | M3     | M4     | M5     |
| $E$<br>(N/mm <sup>2</sup> )           | 555.9  | 383.0  | 421.3  | 456.7  | 430.8  |
| $\sigma_y$<br>(N/mm <sup>2</sup> )    | 21.95  | 18.58  | 21.59  | 19.56  | 20.97  |
| $\varepsilon_y$<br>(%)                | 8.32   | 9.25   | 8.71   | 7.27   | 8.23   |
| $\varepsilon_r$<br>(%)                | 335.23 | 416.6  | 332.8  | 359.5  | 419.2  |
| $R_{p0,1}$<br>(N/mm <sup>2</sup> )    | 12,81  | 12,24  | 16,33  | 15,34  | 16,15  |
| $R_{p0,2}$<br>(N/mm <sup>2</sup> )    | 14,14  | 12,92  | 17,38  | 16,46  | 17,04  |
| $\sigma_{CD}$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 16,29  | 15,07  | 16,30  | 14,99  | 15,66  |
| $\varepsilon_{CD}$<br>(%)             | 195,51 | 186,43 | 197,23 | 157,90 | 191,17 |

M1 : Air ambiant, M2 : Toluène-Méthanol, M3 : H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, M4 : Huile synthétique DOT3, M5 : Eau.

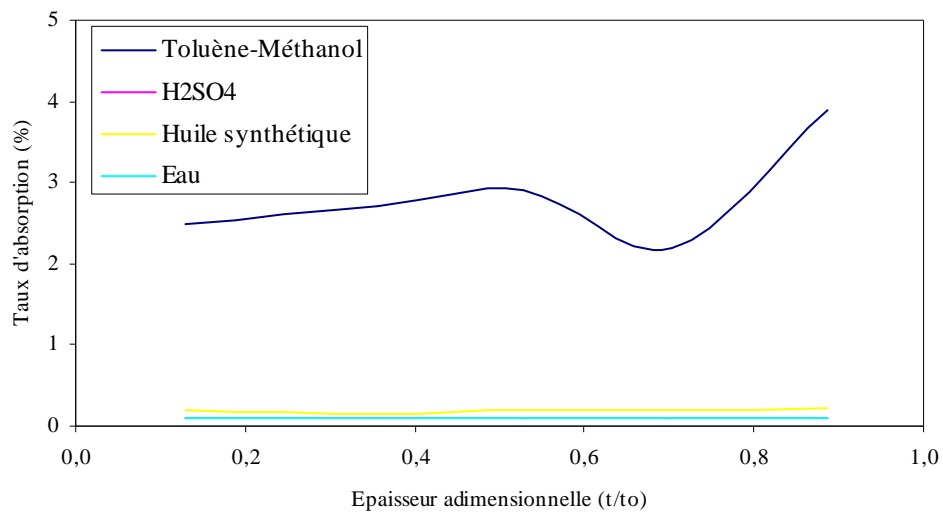
Dans le Tableau IV.5, et sur la figure IV.11, le taux d'absorption du liquide de l'environnement est présenté sous la forme d'un pourcent de variation de masse. Les résultats indiquent que le mélange Toluène-Méthanol est le plus absorbé par le HDPE, les solvants organiques font gonfler le HDPE en s'infiltrant à travers la paroi de la conduite. Le taux d'absorption a atteint 3,9% sur la couche interne qui est sensée être plus cristalline alors que sur les autres couches, ce taux varie de 2,2% jusqu'à 2,9%. Ceci est confirmé dans des travaux où des tubes en HDPE ont été exposés à l'eau enrichie en chlore et il a été démontré que la dégradation est surtout remarquable sur les 2mm intérieurs du tube [75,76,77].

Le taux d'absorption est calculé selon la formule suivante :

$$\text{Taux d'absorption} = \frac{m_f - m_i}{100} \quad \text{[IV.1]}$$

**Table IV.5 :** Taux d'absorption liquide par couche.

|                                    | $\frac{\Delta m}{m}$ (%) |          |          |          |          |
|------------------------------------|--------------------------|----------|----------|----------|----------|
| <i>Couche</i>                      | <b>1</b>                 | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> |
| <b>Toluène-Méthanol</b>            | 3,9                      | 2,2      | 2,9      | 2,7      | 2,5      |
| <b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b> | 0,1                      | 0,1      | 0,1      | 0,1      | 0,1      |
| <b>Huile synthétique</b>           | 0,22                     | 0,19     | 0,2      | 0,16     | 0,19     |
| <b>Eau</b>                         | 0,1                      | 0,1      | 0,1      | 0,1      | 0,1      |



**Figure IV.11 :** Taux d'absorption liquide à travers la paroi d'un tube en HDPE pour des éprouvettes immergées dans différents milieux.

#### IV.4 Conclusion

- ✓ Cette étude a permis d'identifier les effets des milieux (air, Toluène-Méthanol, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, huile synthétique DOT3, eau) sur le comportement du HDPE en traction monotone à 100 mm/min.
- ✓ La relation ( $\sigma:\varepsilon$ ) représente un comportement caractéristique de ce type de polymère où 3 zones distinctes sont observées :(1) zone de comportement élastique, (2) zone de propagation de la striction ( $\sigma_{\max}$  constante et étirage à froid) et (3) zone plastique de sur-étirage.
- ✓ La couche intermédiaire semble la plus dispersée surtout au niveau du palier d'étirage à froid (cold drawing).
- ✓ Parmi les solutions étudiées, le mélange toluène-méthanol (50-50) est le plus agressif le module  $E$  est réduit de 59 %, la contrainte à l'écoulement  $\sigma_y$  de 20 % par contre la déformation à l'écoulement  $\varepsilon_y$  et la déformation à la rupture  $\varepsilon_r$  sont croissantes de 8 % et 18 %.
- ✓ Au niveau de l'absorption, il a été obtenu que l'acide H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et l'eau présentent de très faibles taux d'absorption ne dépassant pas les 0,1 %, à l'inverse, l'absorption du mélange toluène-méthanol est la plus importante car elle a atteint les 4 % environ. A travers la paroi du HDPE, il apparaît que la couche interne est plus disposée à l'absorption de toluène-méthanol par rapport aux autres couches.

## ***Conclusion générale***

Les résultats collectés à partir de cette étude ont permis de souligner les points suivants :

- ✓ Cette étude montre que l'usinage des tubes de polyéthylène présente quelques spécificités à prendre en compte lors de la conception. A travers la paroi du tube les valeurs des duretés et des rugosités sont variables conséquence du procédé de fabrication et refroidissement non uniforme sur la totalité du tube lors de son extrusion.
- ✓ Cette étude a permis d'étudier la distribution des propriétés mécaniques à travers la paroi du tube de gaz en HDPE. Une approche expérimentale est mise en œuvre pour déterminer les différences locales. Il est constaté que les propriétés représentant des contraintes augmentent de l'extérieur vers des couches intérieures. Ceci est expliqué par l'évolution de la cristallinité puisque le processus de fabrication implique un refroidissement différentiel et aussi une génération de contraintes résiduelles. En termes de déformations, les tendances ne sont pas tout à fait évidentes. D'autre part, la relation entre la contrainte d'écoulement et le module d'élasticité est caractérisée par une forte corrélation linéaire croissante. La variation des propriétés mécaniques à travers la paroi reflète la complexité de la hiérarchie structurelle dans le HDPE.
- ✓ Cette étude a permis d'identifier les effets des milieux (air, Toluène-Méthanol, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, huile synthétique DOT3, eau) sur le comportement du HDPE en traction monotone à 100 mm/min.
- ✓ La relation ( $\sigma:\epsilon$ ) représente un comportement caractéristique de ce type de polymère où 3 zones distinctes sont observées : (1) zone de comportement élastique, (2) zone de propagation de la striction ( $\sigma_{\max}$  constante et étirage à froid) et (3) zone plastique de sur-étirage.

- ✓ La couche intermédiaire semble la plus dispersée surtout au niveau du palier d'étirage à froid (cold drawing).
- ✓ Parmi les solutions étudiées, le mélange toluène-méthanol (50-50) est le plus agressif le module  $E$  est réduit de 59 %, la contrainte à l'écoulement  $\sigma_y$  de 20 % par contre la déformation à l'écoulement  $\varepsilon_y$  et la déformation à la rupture  $\varepsilon_r$  sont croissantes de 8 % et 18 %.
- ✓ Au niveau de l'absorption, il a été obtenu que l'acide  $H_2SO_4$  et l'eau présentent de très faibles taux d'absorption ne dépassant pas les 0,1 %, à l'inverse, l'absorption du mélange toluène-méthanol est la plus importante car elle a atteint les 4 % environ.

A travers la paroi du HDPE, il apparaît que la couche interne est plus disposée à l'absorption de toluène-méthanol par rapport aux autres couches.

- [1] M. Carrega, *Les polymères de la molécule à l'objet*, EDP Science, Cedex, France, 1999.
- [2] Gas Research Institute, *Pipeline Statistics, Distribution and Transmission*, Annual Mileage Totals, (www.gri.org/pub), Chicago 2002.
- [3] C. Munier, E. Gaillard-Devaux, A. Tcharkhtchi, J. Verdu, *J. Mater. Sci.*, 37, 4159 2002.
- [4] 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.
- [5] R. Dekiouk, *Etude et relation de l'influence de la vitesse de déformation sur la dimension fractale et sur la ténacité dans le cas d'un Polycarbonate*, Thèse de Doctorat, Université de Metz, France, juillet 1997.
- [6] M. Reyne, *Technologie des plastiques*, HERMES, Paris, 1998.
- [7] W Gottfried, F. B. Ehvenstein, *Matériaux polymères, Structure, propriétés et application*, Hermès, Paris 2000.
- [8] H. H. Kausch, N. Heymans, C. J. Plummer, P. Decroly, *Matériaux polymères : Propriétés mécaniques et physiques Principe de mise en œuvre*. Lausanne 2001.
- [9] J. P. Courpied Delhoume, J. L. Kerboull, M. Kerboull, *Comparison of polyethylene wear in machined versus molded polyethylene in total hip prosthesis*, Rev Chir Orthop vol 86 10-14, 2000.
- [10] R. A Brooks J. R. Sharpe, J. A Wimhurst, B. J. Myer E. N. Dawes, N. Rushton, *The effect of the concentration of high-density polyethylene particles on the bone-implant interface*, J Bone Joint Surg 82-B, 95-600, 2000.
- [11] E. Showaib, A. Moet, *Mechanistic analysis of fatigue crack initiation in medium-density polyethylene*, Journal of Materials Science; 28, 3617-3625, 1993.
- [12] J. Bost, *Matières plastiques II*, Technologie-plasturgie, Technique et documentation, Paris, 1982.
- [13] R.L.Ayres, *Basic structure / Property relationship for PE pipe resins*, Tenth plastic fuel gas pipe symposium, AGA 1987.
- [14] C. A. Naudin, *Nomenclature, Classification et formules chimiques des polymères*, Technique de l'ingénieur, traité plastiques et composites, A 3035, février 1995.
- [15] M Colombié, *Pratique des matériaux industriels, propriétés, choix, utilisation*, Volume 5, DUNOD, Paris, juillet 2000.
- [16] J. Blunt, *Matières plastiques*, Extrait de la Revue DIM avril 1990
- [17] N. Kiass, *Nouvelle approche expérimentale de la variabilité des propriétés mécaniques des tubes HDPE-80*, Thèse de Doctorat, Annaba 2005.
- [18] Gas Research Institute, *Pipeline Statistics, Distribution and Transmission*, Annual Mileage Totals, Chicago 2002.
- [19] F. Akermi, *Etude de la relation entre les propriétés mécaniques et l'hétérogénéité des tubes extrudés en HDPE-100 de transport de gaz naturel par des essais de traction et d'impact mécanique*, Thèse de Magister, Annaba 2005.
- [20] A. Blaga, CBD-219-F, *National research council Canada* 1982.
- [21] M. Kaddeche, *Etude des déformations résiduelles et des propriétés mécaniques des tubes épais en HDPE-80 et HDPE-100*, Thèse de magister, Guelma 2006.
- [22] *The PE100+ Association*, Plastic Pipes, 3R international, 13, 40 2001.
- [23] F. Ashby et D.R.H. Jones, *Matériaux 2, Microstructure et mise en œuvre*, Dunod, Paris 1991.
- [24] S. Mammeri, *Détermination des conditions d'usinage du PEHD*, Thèse de Magister, Université d'Annaba, 2003.
- [25] D. Zelmati, *Etude des Propriétés Mécaniques et de la Ténacité du Polyéthylène Haute Densité Destiné au Revêtement des Pipelines de Gaz*. Thèse de Magister. Annaba 2005.
- [26] *The Wavin Gas Handbook, Performance*, Juillet 1980.
- [27] C. Chèze, *Résistance des matériaux*, Dunod, Paris 1966.

- [28] Designation ASTM D638, *Standard Test Method For Tensile Properties Of Plastics* 1982.
- [29] J. M. Schultz, *Polymer Materials*, Stress Science, p. 488, 1974.
- [30] A. Zegloul, *Concepts fondamentaux de la mécanique de la rupture*, Thèse de Doctorat, Université de Metz, France, 2004.
- [31] H. B. H. Hamouda, *Endommagement et fissuration en fluage de polyéthylène extrudés : Approche locale-Approche globale*, Thèse de Doctorat, Ecole de mines de Paris, 2000.
- [32] N. Mercury, *Données générales sur la plasturgie*, Notions générales sur les matières et les procédés 2004.
- [33] Total Petrochemicals, *Des hydrocarbures aux polymères*, Janvier 2007, [www.totalpetrochemicals.com](http://www.totalpetrochemicals.com)
- [34] J. Aubrey, *les matières plastiques*, 2005.
- [35] H. Régis,  *Tubes en matières plastiques*, Techniques de l'ingénieur, Volume A4, 1967.
- [36] A. Dessarthe,  *Usinage des polymères*, Technique de l'ingénieur, traité plastiques et composites, AM 3780, 1-14.
- [37] S. Enache, *La qualité des surfaces usinées*. Dunod, Paris, 1972
- [38] J. Calderon, *Caractérisation dynamique du système pièce-outil-machine : Usinage des pièces minces*, Thèse. INSA Lyon, 1989.
- [39] T. Trankner, M. Hedenqvist, U. W. Gedde, Structure and Crack Growth in Gas Pipes of Medium- Density and High-Density Polyethylene, *Polymer Engineering and Science*, Vol. 36, No.16, 2069-2076, 1996.
- [40] R. Dossogne, *Polyéthylène haute densité PE-HD*, Techniques de l'Ingénieur, Traité Plastiques et Composites, A 3315 1-15.
- [41] J. R. Leech, *Polyethylene resins for fuel gas piping application*, Ninth plastic fuel gas pipes symposium, AGA, 1985.
- [42] [www.nadimed.com](http://www.nadimed.com)
- [43] M. O. Hehn, *Analyse expérimentale et simulation thermomécanique du soudage bout à bout de tubes de polyéthylène*, Docteur de l'école des mines de Paris, juillet 2006.
- [44] S. Choi et L.J. Broutman, *A plane – strain tensile specimen to determine ductile – brittle transitions in PE pipe grade resins*, Ninth plastic fuel gas pipe symposium, AGA, 1985.
- [45] J. Cazenave, *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, école doctorale de matériaux de Lyon, mai 2005.
- [46] Gottfried W. Ehvenstein, Fabienne Montagne, *Matériaux polymères, Structure, propriétés et application*, Hermès, Paris 2000.
- [47] K. Chaoui, A. Moet et A. Chudnovsky, *Effects of processing conditions on the long term strength of MDPE pipes*, Tenth plastic fuel gas pipe symposium, AGA, 1987.
- [48] O. Boussaid, *Analyse détermination des contraintes résiduelles dans les tubes en aciers laminés et étirés à chaud*, Thèse de magister, Annaba 1998.
- [49] L. J. Broutman, D. E. Duvall and L. R. Nylander, L. J. B. Broutman and associates, Ltd. Chicago, *Effects of again on polyethylene gas distribution piping*, ninth plastic fuel gas pipes symposium, American Gas Association, 1987.
- [50] K. Chaoui, A. Moet, *Effects of processing conditions on the long term strength of HDPE pipes*, Ninth plastic fuel gas pipes symposium, AMERICAN GAS ASSOCIATION, 1987.
- [51] J. G. William, J. M. Hodgkinson, A. Gray, *Polym. Eng. Sci.*, 21, 822 1981.
- [52] K. Chaoui, A. Moet, A. Chudnovsky, *J. Mater. Sci.*, 22, 3879 1987.
- [53] Norme ASTM D 638-72, *Standard Method of test for; tensile properties of plastics*.
- [54] N. Kiass, et K. Chaoui, *Revue Synthèse des Sciences et de la Technologie*, Université de Annaba, 11, 25 2002.

- [55] A. Marquez-Lucero, C. G'Sell, K. W. Neale, *Polymer*, 30, 636 (1989).
- [56] J. M. Schultz, *Polymer Materials Science*, Prentice-Hall International Series, New Jersey, Chap. 11, 1974.
- [57] S. G. Luckey Jr, J. M. Henslaw, C. Dewan, G. M. Eltanany, D. Teers, *Analysis of a blow molded HDPE bottle that failed by brittle fracture*, Engineering failure Analysis, 8, 361-370, 2001.
- [58] K. Friedrich, *Crazes and shear bands in semi-crystalline thermoplastics*, Advances in Polymer Science, 52-53, 225-274, 1983.
- [59] O. Abdulsbafi, B. Kedzierski, L.O. Talberf *Durability characteristics of precast concrete box culverts*. CTL Engineering, Inc., Columbus, OH, 1995.
- [60] X. Lefebvre, *Fissuration fragile lente du Polyamide 11 : mécanisme et durée de vie en fluage*, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, décembre 2002.
- [61] J. Cazenave, R. Seguela, B. Sixou, Y. Germain, *Short-term mechanical and structural approaches for the valuation of polyethylene stress crack resistance*, Polymer, Vol. 47, 3904–3914, 2006.
- [62] PPI publication, *Chemical & Abrasion Resistance of Corrugated Polyethylene Pipe*, CPPA, Division of the Plastics Pipe Institute, Inc., Washington DC, 1997.
- [63] Technical Note, *Chemical Resistance of Driscopipe Polyethylene Piping Systems*, PD TN, N° 7, 1996.
- [64] Jack Q. Zhao, S. Kuraoka, T.H.W. Baker, *Durabilité et performance des conduites à écoulement libre : étude documentaire approfondie*, IRC Institut de Recherche en Construction, Canada 1998.
- [65] Howard, A.K. *Installation of plastic pipe using soil-cement slurry*, Buried Plastic Pipe Technology, Vol. 2, ASTM STP 1222, 41-51, 1994
- [66] R. Schouwenaars, V.H. Jacobo, E. Ramos, A. Ortiz, *Slow crack growth and failure induced by manufacturing defects in HDPE-tubes*, Engineering Failure Analysis, Vol. 14 (6), 1124-1134, 2007.
- [67] A.S. Maxwell, *Practical Guide for Designers and Manufacturers of Mouldings to Reduce the Risk of Environment Stress Cracking*, NPL Report MATC, (A) 05, mars 2001.
- [68] J. Breen, Environmental stress cracking of PVC and PVC-CPE, *Journal of Materials Science*, Vol. 29, 39-46, 1994.
- [69] J. Breen, D.J. Van Dijk, Environmental stress cracking of PVC, Effect of natural gas with different amounts of benzene. *Journal of Materials Science*, Vol. 26, 5212-5220, 1991.
- [70] J.P. Mercier, E. Maréchal, *Traité des matériaux, Chimie des polymères*, Lausanne, 1996.
- [71] J. P. Trotignon, M. Piperaud, J. Verdu et A. Dobraczynski, *Précis de matières plastiques, Structure–Propriétés, Mise en oeuvre et Normalisation*, Afnor, Nathan, 1992.
- [72] Crum, DE. *Discussim: Prediction of organic chemical permeation through PVC pipe water supplier's perspective*. Journal of the American Water Works Association, XX:65 novembre 1985.
- [73] U. Andersson, M. Ifwarson, *Results and experiences from test on PEX, PEM, PP, and PVC pipes exposed to different chemicals*, Plastic pipes X, Goteborg, 661-620, 1998.
- [74] L.M. Moore, G.P. Marshall, N.S. Allen, *Degradation and stabilisation of blue water pipe*. Polymer Degradation and Stability, 20:337-354, 1988.
- [75] PPI, *Underground Installation of polyethylene Pipe*. Plastic Pipe Institut. Washington, D.C. 1996.
- [76] J. Hassinen, M. Lundback, M. Ifwarson, U. W. Gedde, *Deterioration of polyethylene pipes exposed to chlorinated water*, Polymer degradation and stability, Vol. 84, 261-266. 2003,
- [77] J. P. Dear, N. S. Mason, *The effect of chlorine depletion of antioxidants in polyethylene*, Polymers & Polymer Composites, Vol. 9, 1, 1-13, 2001.