

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère De L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté de Génie de la Construction

Département de Génie Mécanique

mémoire de fin d'études

**En vue de l'obtention du diplôme de Master 2
en Génie Mécanique**

Option : Sciences des Matériaux

**Comparaison des propriétés elasto-plastiques
d'une géomembrane PEHD locale et d'une
géomembrane PEHD importée**

**Application à l'étanchéité d'une station
d'épuration**

Proposé par :

Mr. SALHI Ahmed

Réalisé par :

M^{elle} GHERBAS Nouria

Devant le jury :

Président : Mr. FILALI Said

Promoteur : Mr. SALHI Ahmed

Examineur : Mr. MOHELBI Mouloud

Promotion 2017 / 2018



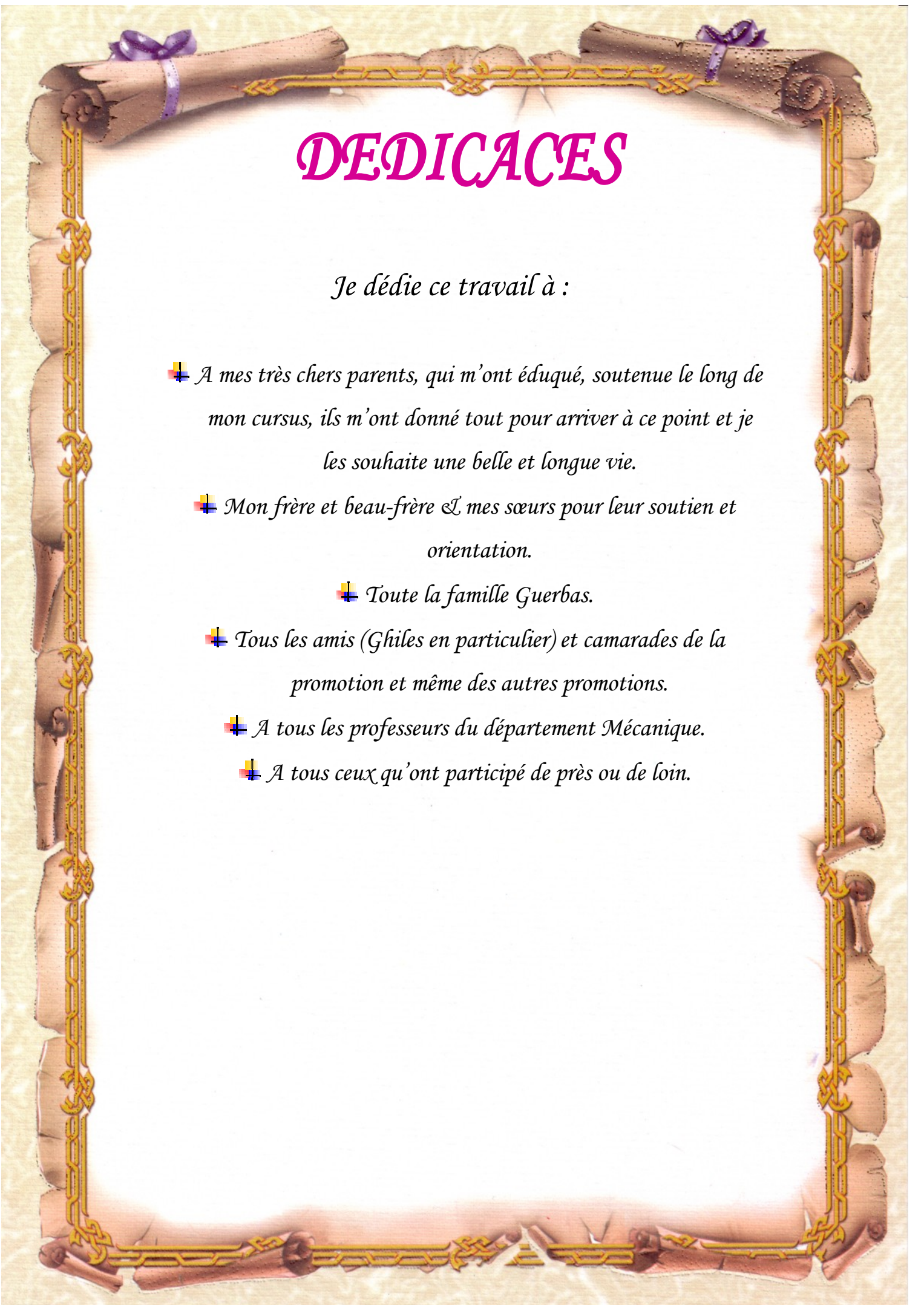
Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord le bon Dieu qui m'a donné le courage et la volonté pour réaliser ce travail.

Je tiens encore à remercier mon encadreur : Monsieur SALHI Ahmed pour son aide et orientation.

Je tiens encore à remercier tout le personnel du laboratoire EDM ainsi que les employés de la société CNTC.

Je tiens encore à exprimer mes sincères sentiments, envers tous les membres de ma famille, ma mère, mon père, mes sœurs, mon frère et sa femme, mes nièces et mon beau-frère Nadjji. Aussi à tous mes amis(es) qui m'ont prêté aide et confort.



DEDICACES

Je dédie ce travail à :

+ A mes très chers parents, qui m'ont éduqué, soutenue le long de mon cursus, ils m'ont donné tout pour arriver à ce point et je les souhaite une belle et longue vie.

+ Mon frère et beau-frère & mes sœurs pour leur soutien et orientation.

+ Toute la famille Guerbass.

+ Tous les amis (Ghiles en particulier) et camarades de la promotion et même des autres promotions.

+ A tous les professeurs du département Mécanique.

+ A tous ceux qu'ont participé de près ou de loin.

Table des matières

Sommaire

I. Introduction générale	1
---------------------------------------	----------

PARTIE I: Partie bibliographique

CHAPITRE I : Généralités sur les polymères

I.1. Introduction.....	3
I.2. Définition	3
I.2.1. Polymère	3
I.2.2. La polymérisation	3
I.3 Différents types de matières lastiques	4
I.3.1 Les thermoplastiques	4
I.3.2 Le polypropylène (PP)	5
I.3.3 Les Polyéthylènes (PE)	6
I.3.4 Les polyoléfines.....	7
I.3.5 Les thermodurcissables	8
I.3.6 Les élastomères	9
I.4.Les différents types des polymères.....	9
I.4.1. Homopolymères.....	9
I.4.2. Copolymères	10
I.5.Les propriétés des polymères.....	10
I.5.1.Les Propriétés chimiques des polymères	10
I.5.2.Les Propriétés physiques des polymères	11
I.5.3. Propriétés mécaniques	11
I.6.Conclusion	11

CHAPITRE II Généralité sur les géomembranes

II.1. Introduction géomembrane	12
II.2. Définition de la géomembrane	12
II.3 Fonction et nature	12
II.4.Fabrication et matériaux de base	12

Table des matières

II.4.1 Fabrication	12
II.4.2 Matériaux de base.....	14
II.5.Les différents types de géomembranes.....	16
II.5.1. le Polyéthylène (PE)	16
II.5.2 Structure	16
II.5.3 Les différents types PE	16
II.5.4 Géomembrane PEHD	17
II.5.5.Géomembrane PVC-P	18
II -6 Conclusion	21

Chapitre III. Généralité sur la Géomembrane Polyéthylène

III.1. Introduction géomembrane PE.....	22
III.2.Survol d'un cahier des charges typique d'une géomembrane de polyéthylène	22
III.3. Structure moléculaire du polyéthylène (PE)	24
III.4. Aspects phénoménologiques de dégradation du polyéthylène	25
III.5. Additifs	25
III.6. Caractérisation Mécanique de la Géomembrane	26
III.7. Aspects Thermiques et Température de Transition Vitreuse	26
III.8. Conception et spécification des geomembranes de polyéthylène vis-à-vis de la du rabilité	27
III.8.1Règles communes de soudages des geomembranes	28
III.8.2 Mode d'assemblage des geomembranes	28
III.9.Conclusion	30

Partie pratique

Caractérisation de la geomembrane PEHD

I. Introduction.....	31
I-1 la réalisation des échantillons.....	31
I.2. Machine d'essai de traction	31
1.2.1 Les dimensions des éprouvettes utilisées	32
1.3 Essai de traction	32
I.3.1 Machine d'essai de traction	32
1.3.2 Etaps de réalisation de l'essai de Traction.....	33
1.4 Caractérisation mécanique via des essais de traction uniaxiale	34
I.4.1. Courbe contrainte déformation selon le couple paramétrique ($\theta=0^0$; $V=10\text{mm/mn}$)	34
I.4.2 Courbe contrainte déformation selon le couple paramétrique ($\theta=35^0$; $V=10\text{mm/mn}$).....	35
I.4.3 Courbe contrainte déformation selon le couple paramétrique ($\theta=45^0$; $V=10\text{mm/mn}$).....	36
I.4.4 Courbe contrainte déformation selon le couple paramétrique ($\theta=90^0$; $V=10\text{mm/mn}$).....	37
I.5 Propriétés mécaniques d'une géomembrane PEHD importée soumis à une traction avec une vitesse de sollicitation constante ($v=10\text{mm/min}$).....	38
1.5.1 Comparaison et analyse des proprietes mécaniques obtenues pour les deux types de geomembrane	38

Introduction générale

Introduction:

Géomembranes en polyéthylène haute densité (PEHD) ont connu un développement important ces dernières années. Nombreuses élaborations de polymères ont été faites, les plus utilisés sur le plan industriel: l'étanchéité conventionnelle d'une faible variabilité intrinsèque, en mettant l'accent sur les difficultés spécifiques qui apparaissaient sur les matériaux naturels.

L'objectif essentiel de la geomembrane est la protection de l'environnement, et tout particulièrement de la ressource en eau, nécessite souvent la mise en œuvre d'étanchéités fiables pour différentes sortes d'ouvrages. Qu'il s'agisse d'ouvrages de stockage d'eau ou de déchets, cette étanchéité est de plus en plus fréquemment assurée par des produits simples: les géomembranes pourtant, derrière cette apparente simplicité, sont des produits très techniques possédant des caractéristiques particulières, que ni le prescripteur, ni l'utilisateur ne doivent ignorer.

L'industrie des géomembranes s'est intéressée non seulement à l'amélioration du produit mais aussi à la compréhension des mécanismes de dégradation du polyéthylène (le matériau majeur) dans sens spécifique de leur application, ainsi au moyen de contrôler leur divergence.

Dans le cadre d'une contribution au domaine des géomembranes, nous avons exposé dans ce Mémoire un travail qui consiste à comparer des propriétés élasto-plastiques d'une géomembrane PEHD locale et d'une géomembrane PEHD importée: Application à l'étanchéité d'une station d'épuration.

Des échantillons et éprouvettes ont été prélevées, puis soumises à la caractérisation mécanique avec les différentes sollicitations qui sont observées sur les courbes contraintes-déformations et physicochimique en exposant les géomembranes à la dégradation oxydative en service via la détermination de

Introduction

l'OIT (Oxydative Induction Time) conformément à la norme ASTM D-3895) afin de mesurer leur résistance ces dernières.

Chapitre I

Généralités sur polymères

1. Introduction :

Les polymères nous entourent et tiennent de plus en plus de place dans notre vie quotidienne, on les retrouve sur plusieurs formes: synthétiques, naturelles...etc. Les matières plastiques doivent leur diversité à leur large gamme de caractéristiques: dures, molles ou élastiques, transparentes ou opaques, isolantes et quelquefois conductrices, toujours légères plus ou moins résistantes aux conditions agressives selon l'usage, ainsi qu'à la nature particulière de leurs molécules en forme de chaîne, et la variété des modes d'assemblage qu'elles adoptent.

1.1 Définition (1):

I.2.1. Polymère:

Un polymère est une macromolécule de nature organique ou inorganique, constituée d'unités de monomères qui se répètent pour former une chaîne liées par des liaisons chimiques covalentes, leur masse molaire est importante, elle peut être supérieure à 10 000 g/mol.

PE : $-(CH_2-CH_2)_n$ -avec **n** un entier (degré de polymérisation)

(CH₂-CH₂) l'unité de répétition (Monomère)

On distingue deux types de polymères :

- **Homopolymère:**

C'est un polymère qui comporte des motifs monomères tous identiques.

- **Copolymère :**

C'est un polymère qui comporte des motifs monomères de deux ou plus sortes différentes.

I.2.2. La polymérisation [02] :

La polymérisation est une réaction chimique aléatoire, elle a pour rôle de créer les liants entre les (n) monomères de masse moléculaire faible qui forme le polymère.

Les noyaux des monomères sont souvent constitués d'un atome de carbone (molécules organiques) ou d'un atome de silicium (polymères siliconés).

On distingue deux réactions de polymérisation:

- **La réaction de polycondensation:**

C'est une réaction de polymérisation par étape, elle consiste à libérer un sous-produit de la réaction (souvent de l'eau...).

- **Lapolymérisation en chaîne :**

C'est le résultat de la formation d'un centre actif A^* qui a pour rôle de fixer successivement un nombre (n) de molécules de monomère, comme suit :



Le polymère obtenu présente un degré de polymérisation $n+1$.

I.3 Différents types de matières plastiques [03] :

Les polymères présentent des caractéristiques mécaniques, propriétés physiques, rhéologie propres, ces différents états dépendent principalement de la nature chimique du polymère et de la température. On distingue trois classes :

- Les thermoplastiques (qui peuvent être partiellement cristallisés).
- Les thermodurcissables.
- Les élastomères

I.3.1. Les thermoplastiques :

Les thermoplastiques sont des matériaux souples, malléables, ils changent de forme sous l'effet de la chaleur, et durcissent quand on les refroidit. Comme cette transformation est réversible, ces matériaux conservent leurs propriétés et ils sont facilement recyclables.

Le polymère de base est constitué par une macromolécule linéaire, reliée par des liaisons faibles qui peuvent être rompues sous l'effet de la chaleur ou de fortes contraintes, ce qui génère le glissement des macromolécules les unes par

rapport aux autres pour prendre une forme différente, lorsque la matière refroidit, les liaisons se reforment et les thermoplastiques gardent la nouvelle forme, ci-dessous exemples de thermoplastiques :



Figure I.3 Produits Divers



Figure I.4 Panneaux Thermoplastiques

I.3.2. Le polypropylène (PP) :

Il est considéré comme thermoplastique et comme fibre, facile à colorer et n'absorbe pas l'eau. Il est souvent utilisé dans l'industrie automobile (pare-chocs, tableaux de bord, habillage de l'habitacle), dans le mobilier de jardin, aussi pour fabriquer des boîtes à aliments qui résistent au lave-vaisselle, car il ne fond pas en dessous de 160°C. Le polypropylène est aussi utilisé dans la fabrication de fibres synthétiques (tapis, moquettes, cordes, ficelles) mais aussi pour les emballages alimentaires en raison de son aspect brillant et de sa résistance (flacons, films, pots). Par contre, le polypropylène film est un des plastiques

usuels les plus difficiles à recycler surtout s'il est imprimé. Le contrôle de la polymérisation par catalyse permet de jouer sur la structure enfin de produire du polypropylène élastomère.

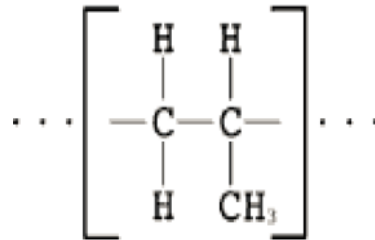


Figure I.4 composition chimique de polypropylène(PP).



Figure I.5 Objet fabrique par polypropylène

I.3.3 Les Polyéthylènes (PE) :

C'est un matériau d'extrême importance sur le plan économique et écologique. Grâce à sa structure chimique simple, le polyéthylène prime sur la plupart des matériaux, il détient le tiers de la production plastique car il peut être réutilisé. Le recyclage des produits usés en PE a pris de plus en plus d'importance (sacs poubelle....etc). Le polyéthylène est translucide, inerte, facile à manier et résistant au froid. On distingue différents polyéthylènes classés en fonction de leur densité, et dépend du nombre et de la longueur des ramifications présentes dans le matériau.

On distingue deux familles: le PEBD ou polyéthylène basse densité et le PEHD polyéthylène haute densité.

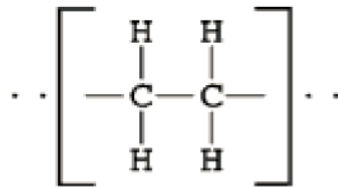


Figure I.6 Composition chimique de polythène(PE).



Figure I.7 Objets fabriqués par polythène(PE)

II.3.4 Les polyamides (PA) :

C'est la première matière plastique découverte en 1938. La variété dans sa longueur des chaînes, nous permet d'obtenir différents types de PA qui se distingue par des chiffres exemple :

PA 6.6 est le nylon

Vu leur bon comportement mécaniques, thermiques et chimiques, les polyamides sont utilisés dans divers domaines (pièces moulées dans l'appareillage, ménager, automobile, des tapis et des moquettes, la robinetterie, la serrurerie, des engrenages, des textiles (lingerie et voilages)...) l'inconvénient principal de tous les polyamides est qu'ils sont hydrophiles, ce qui freine leur usage pour certaines pièces mécaniques.



Figure I.8 Objets fabriqués en Polyamides(PA)

I.3.5 Les thermodurcissables :

Les thermodurcissables sont différents des thermoplastiques, on les trouvent sous forme de poudres ou de résines, de leur refroidissement ou par l'action de durcisseurs. Leurs formes sont définitives et irréversibles au premier refroidissement, ils ne se ramollissent plus une fois moulés. Sous de trop fortes températures, ils se dégradent et brûlent (carbonisation). Les monomères de ces polymères sont organisés en de longues chaînes, ils sont liés par un grand nombre de liaisons chimiques solides et tridimensionnelles, impossible de rompre et se renforcent quand le plastique est chauffé.

En raison des liaisons croisées et des pontages qui les composent très résistants, elles empêchent tout glissement entre les chaînes.

Les thermodurcissables sont très utilisés, les plus connus sont les:

Polyuréthanes, les polyesters, les phénoplastes, les aminoplastes, les élastomères, les résines époxydes et phénoliques.



Figure I.8 Objets fabriqués en thermodurcissables

I.3.6 Les élastomères :

Ce polymère et le caoutchouc ont les mêmes capacités élastiques, ils sont employés dans la fabrication (des coussins, isolants, semelles de chaussures, pneus)

Un élastomère est constitué de longues chaînes moléculaires repliées sur elles-mêmes.

Le glissement des molécules les unes sur les autres sous l'action d'une contrainte entraîne la déformation du matériau. L'élasticité du matériau est obtenue par vulcanisation, qui est un procédé de cuisson et de durcissement, il permet de créer un réseau tridimensionnel plus ou moins rigide, tout en gardant la flexibilité des chaînes moléculaires, on introduit durant cette opération le soufre, le carbone et différents agents chimiques.

On distingue plusieurs formulations permettant de produire des caoutchoucs de synthèse selon l'utilisation spécifique.

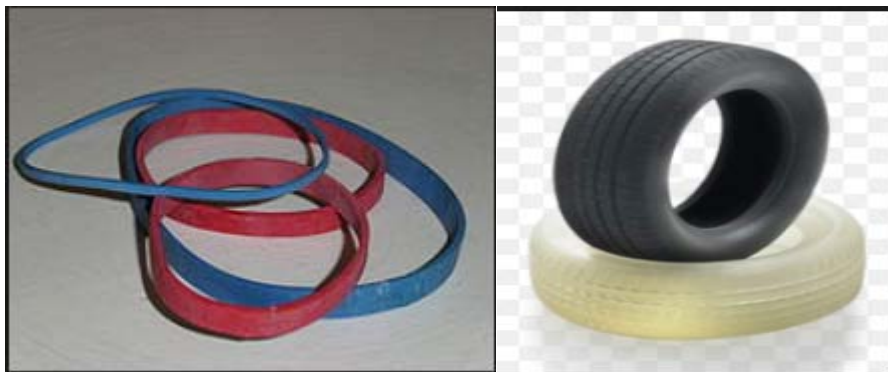


Figure I.8 Objets fabriqués en élastomères

I.4. Les différents types des polymères [02] :

On distingue deux types de polymères :

I.4.1. Homopolymères :

C'est un polymère issu d'une seule espèce, la chaîne est composée de (n) motifs monomères identiques.

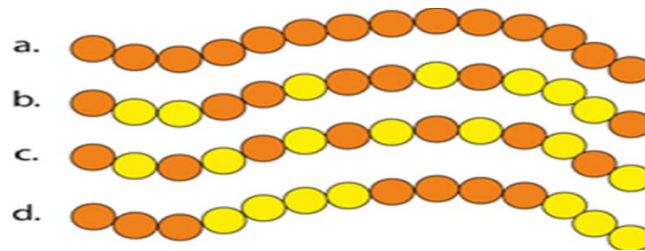


Figure I.9 Schéma désigne les chaînes Homopolymères

I.4.2. Copolymère :

C'est un polymère dont la chaîne est composée de deux ou plus de motifs monomères différentes.

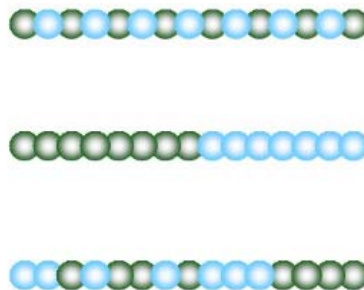


Figure I.10 Schéma désigne les cas de Copolymère

I.5. Les propriétés des polymères [04] :

I.5.1. Les Propriétés mécaniques des polymères :

Les propriétés mécaniques des polymères dépendent du type de contrainte appliquée, cette dernière engendre le désordre des chaînes et la création d'une nouvelle structure du réseau ce qui implique des nouvelles propriétés du polymère, à savoir :

- L'élasticité caoutchoutique
- Le comportement viscoélastique à l'état fondu
- Un comportement à la fois vitreux et ductile à l'état solide.

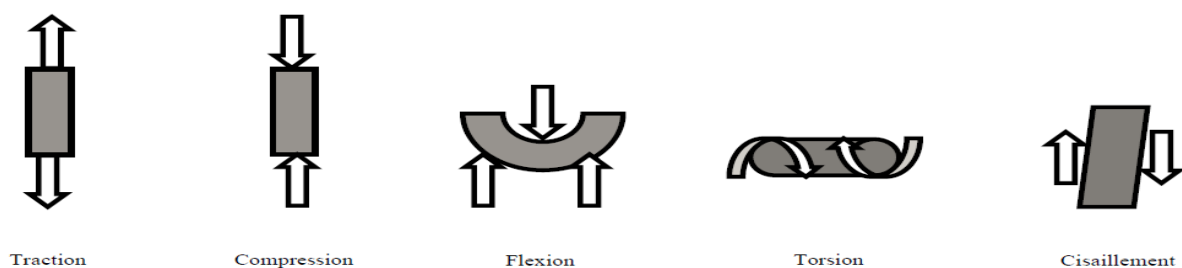


Figure I.11 Schéma désigne les différentes sollicitations

I.5.2. Les Propriétés physiques des polymères :

L'action de l'eau sur les polymères engendre plusieurs phénomènes, parmi eux: la plastification, gonflement, ...etc.

Les molécules d'eau s'introduisent dans le réseau macromoléculaire et détruisent les liaisons secondaires entre groupements polaires ce qui induit à l'altération des propriétés mécaniques.

I.5.3. Les Propriétés chimiques des polymères :

La composition chimique des polymères joue un rôle important dans leur comportement chimique, ainsi que leur accessibilité aux agents extérieurs, l'action des produits chimiques sur le matériau, puis du Comportement au feu qui est une attaque chimique à température élevée. Ce pendant des réactifs utilisés comme solvants peuvent être des agents d'attaque chimique, les liaisons chimiques peuvent être dégradées chimiquement sous l'action des acides à température élevée.

I.6. Conclusion :

Cette première partie a été consacrée sur les généralités des polymères, leur mode de synthèse, leur utilisation, et les différentes propriétés mécaniques, physiques et chimiques (comportement à l'eau). Les polymères sont considérés comme une branche de la chimie, il suffit de maîtriser les mécanismes pour obtenir un matériau adapté.

Introduction générale

II.1. Introduction :

Le développement de la géomembrane et son utilisation ne cesse de se développer ces dernières années, particulièrement dans le but de préserver l'environnement.

Les géomembranes s'inscrivent dans le cadre de l'emploi de matériaux synthétiques dans le domaine de la géotechnique et du génie civil.

II.2. Définition de la géomembrane (définition AFNOR NF P84-500) : (5)

C'est un matériau géosynthétique, fabriqué en forme de nappe, mince, souple, continu, étanche aux liquides même sous contraintes. En termes de techniques: les produits de faible épaisseur fonctionnelle (< 1 mm), les produits dont l'étanchéité est assurée uniquement par un matériau argileux, ne sont considérés comme des géomembranes.

II.3 Fonction et nature (6) :

La fonction de la géomembrane est de protéger la structure d'étanchéité vis-à-vis des agressions mécaniques. Ces composants doivent être non polluants, exempts de végétation, compatibles chimiquement avec la structure d'étanchéité.

Une structure support est prévue pour toute utilisation de géomembrane, elle permet la stabilité du processus lors des travaux de réalisation et la durée de service d'un ouvrage, répartitions des efforts transmis avec des déformations acceptables par là.

II.4. Fabrication et matériaux de base : (5)

II.4.1 Fabrication:

Toute fabrication d'un matériau nécessite la fabrication des matériaux de base, dans le cas des géomembranes le processus comprend:

- La résine de base thermoplastique ou élastomérique ainsi que
- Les plastifiants ou agents de vulcanisation.

On distinguera deux grandes méthodes de fabrication :

▪ **L'extrusion :**

L'extrusion ou soufflage est un procédé dans lequel un cylindre de thermoplaste est extrudé puis tiré longitudinalement et transversalement par soufflage, cette méthode est utilisée pour la fabrication des membranes simples avec ou sans pli renforcé.

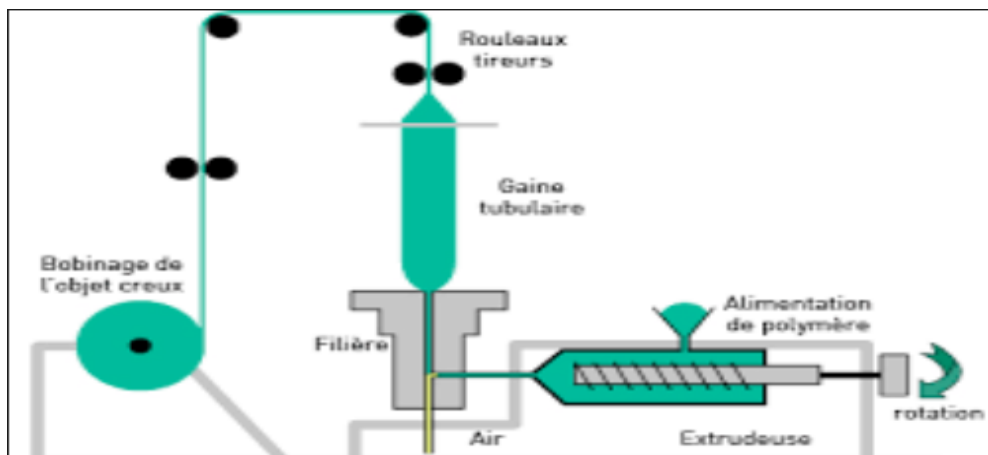


Figure II.1 Procédé d'extrusion pargonflage

▪ **Le calandrage :**

C'est une méthode par colaminage de différentes épaisseurs de produits, elle est utilisée pour la réalisation des géomembranes multipliés et bitumineuses.

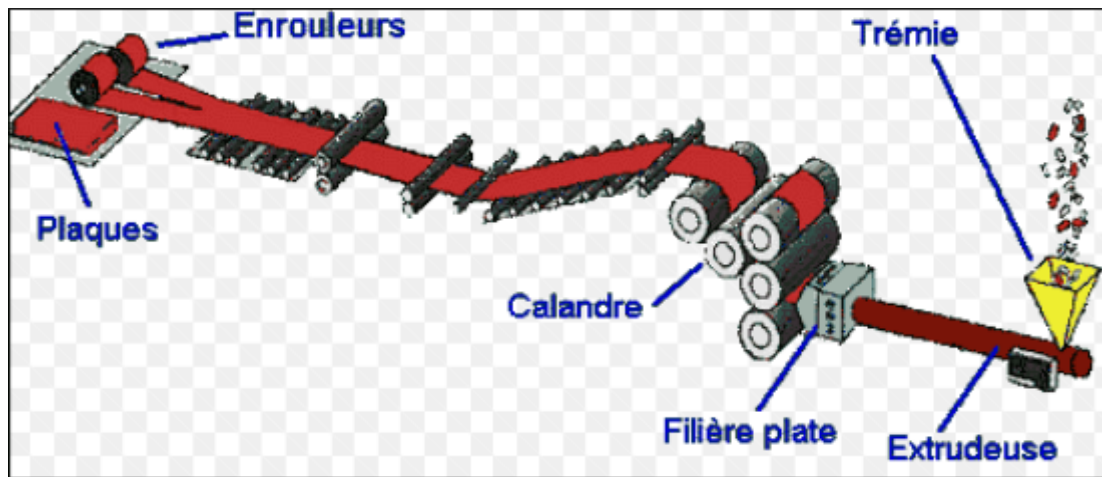


Figure II.2 Procédé de Calandrage.

II.4.2 Matériaux de base :

- **Polymères de synthèse : (7)**

Ils sont obtenus par polymérisation de molécules monomères, de masse moléculaire élevée, leur variété est extrême et ce sont eux qui seront le plus souvent considérés dans la fabrication des géomembranes. Ils peuvent être classés de la manière suivante (les symboles entre parenthèses sont consacrés par l'usage en France) :

- **les thermoplastiques :**

Polychlorure de vinyle (PVC); PVC résistant aux huiles (PVC-OR), thermoplaste PVC nitrile (PVC-NT), alliage éthylène inter polymère (AEI).

- **les thermoplastiques cristallins :**

Polyéthylène basse densité (PEhd); polyéthylène haute densité (PEhd), alliage polyéthylène haute densité (PEhd-A), polyéthylène moyenne densité polyéthylène linéaire basse densité, polypropylène.

➤ **les élastomères :**

Caoutchouc isoprène-iso butylène (IIR) communément appelé caoutchouc butyl, éthylène-propylène diène monomère (EPDM), polychloroprène (CR).

➤ **les élastomères thermoplastiques :**

Polyéthylène chloré (PE-C), alliage polyéthylène chloré (PE-C-A), polyéthylène chlore sulfoné (PE-C-S) appelé couramment Hypalon ; éthylène propylène diène ter polymère thermoplastique (EPDM-T).

▪ **Matériaux bitumineux :**

Ils sont obtenus par le mélange de plusieurs hydrocarbures de produits naturels ou bien de sous-produits de distillation du pétrole, d'une masse moléculaire élevée. Ils présentent un comportement viscoélastique, que leur déformation peut dépendre de la charge appliquée, la durée d'application ainsi que la température.

Type	Matériau de base	Abréviation
Thermoplastique	Polyéthylène chloré Copolymère d'éthylène vinyle acétate Polyéthylène ¹ Polypropylène ¹ Polychlorure de vinyle	CM EVM PE (PEHD ou PEBD) PP PVC
Caoutchoucs thermoplastiques	Polyéthylène chlorosulfoné Copolymère d'éthylène-propylène	CSM EPM
Thermodurcissable	Polyisobutylène Polychloroprène Monomère d'éthylène-propylène-diène Caoutchouc isobutène-isoprène Caoutchouc butadiène-nitrile acrylique	PIB CR EPDM IIR NBR

¹ Le Polyéthylène et le Polypropylène peuvent être désignés par le terme générique Polyoléfines.

Figure II.4 Tableau représentatif des différentes familles de géomembranes en polymère (9)

II.5. Les différents types des géomembranes : (7)

II.5.1. le Polyéthylène (PE) :

Applications d'imperméabilisation. Il présente des propriétés optimisant le coût, la résistance mécanique, chimique et aux ultraviolets en plus de permettre une soudure parfaite entre deux feuilles de matériau.

De nos jours, c'est la membrane la plus communément utilisée dans les structures de confinement, et ce pour diverses applications. Le polyéthylène haute densité (série PEHD TM400) est le matériel le plus résistant qui soit grâce à sa densité supérieure, alors que le polyéthylène basse densité (série PEBDL TM800) se caractérise par sa flexibilité idéale pour les applications où les tassements peuvent être importants.

II.5.2 Structure :

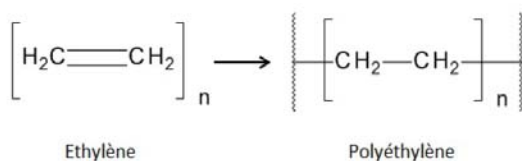


Figure II.3 Schéma représentatif du polyéthylène.

II.5.3 Les différents types PE : (8)

Le polyéthylène existe sous des formes différentes avec des propriétés mécaniques différentes, elles sont régies par des ramifications, cristallinité et surtout poids moléculaire.

Les trois principaux types de polyéthylène les plus connus sont :

- **Polyéthylène haute densité (PEHD) :**

C'est une molécule plus linéaire avec très peu de chaînes latérales causées par ramification, et ces chaînes latérales sont généralement très courtes par rapport à LDPE.

- Polyéthylène basse densité (PEBD).
- Polyéthylène basse densité (PELD):

Certains des atomes de carbone sont attachés à trois atomes de carbone au lieu de deux, cela provoque une branche sur laquelle d'autres chaînes de polyéthylène sont attachées. Ces branches sont relativement longues et s'entrecroisent et se lient avec d'autres molécules de polyéthylène.

Ces trois types sont différenciés par la structure de la molécule, qui à son tour impacte sur sa densité d'où le nom.

II.5.4 Domaine d'application :

HDPE est utilisé pour les sacs à provisions, les sacs de rangement aussi utilisé pour fabriquer des meubles en plastique, l'isolation. Il est légèrement plus dur et plus rigide que les autres types de polyéthylène, on le distingue par le symbole ci-dessous.



PEBD est de nature mou, cireux, brillant et lisse au toucher. Il est utilisé pour la fabrication des sacs, pellicule d'emballage, sacs à sandwich, bouteilles compressibles, on le distingue par le symbole ci-dessous.



II.5.5 Géomembrane :

Les géomembranes sont des lames imperméables utilisées comme barrières hydrauliques. Les géomembranes sont fabriquées en différentes épaisseurs et sont emballées en rouleaux joints par des techniques de thermofusion, soudure, adhésifs, vulcanisation. Il existe différents types de géomembranes:

Type de geomembranes	Abreviation	Type de polymere	Le poids approximatif de la resine en %	Remarque
High-density polyethylene	HDPE	Thermoplastic	95-98	-Bonne resistance aux UV et aux produits chimiques - La résistance au vieillissement est fonction de la nature et de la qualité des additifs utilisés
Linear low-density polyethylene	LLDPE	Thermoplastic	94-96	-Une resistance moyenne aux UV et aux produits chimiques -bonne flexibilité et allongement

Poly vinylchloride	PVC	Thermoplastic	30-40	-bonne flexibilité à toutes les T° -il se dégrade facilement - Résine: % craie < 0,5 % du poids total - Allongement à rupture > 270% selon NFP 84-501 - Résistance aux UV : 4500MJ/m ² suivant ISO 4892-2 (tube xénon),
Chlorosulphonat edpolyethylene	CSPE	Thermoplastic	40-60	-difficile à réparer à cause de la une cause de la vulcanisation
Ethylenepropyle nedieneterpolym er	EPDM	Thermoplastic	25-30	-bonne flexibilité Composition: -Polymère : > 25% - Noir de carbone : > 25% -Charges minérales

				: < 25% -Noir de carbone + charge minérales < 55 % -L'épaisseur courante de ce type de géomembrane est de 1,02 à 2,3 mm (selon la norme ASTM D5199).
Polypropylene (flexible)	FPP	Thermoplastic	85-96	-très flexible et facile à réparer - Résine: au moins 85% de résine vierge -Variation des caractéristiques mécaniques: <10% (hors allongement à la rupture)

Figure II.4 Tableau des Geomembranes et leurs caractéristiques (10)

II.6 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons évoqué des généralités sur la géomembrane, nous avons cité.

Les procédés de fabrication (l'extrusion et le calandrage), aussi les différents types de géomembrane qui existe sur le marché, et leurs caractéristiques.

Chapitre III

Généralité sur la Géomembranes Polyéthylène

III.1.Introduction:

La nature paraffinique du PEHD, en fait de lui un matériau avec de bonnes propriétés physiques et mécaniques.

Les polyoléfines sont très sensibles à l'orientation, c'est à dire que les propriétés mécaniques sont améliorées, si les macromolécules sont orientées dans la direction de la sollicitation.

De leur aspect blanc laiteux et de toucher cireux, les polyoléfines sont opaques en forte épaisseur, et transparents en films. Bien que souvent utilisées comme contenant ou comme emballage, le monde de l'industrie s'est intéressé dans le développement des géomembranes de polyéthylène exclusivement dans le but de réduire la conductivité hydraulique des terrassements et depuis elles représentent un des systèmes d'étanchéité les plus sophistiqués et efficaces connus à ce jour.

Grâce à leur excellente résistance à la friabilité en basses températures et leur protection supérieure à la dégradation aux ultraviolets, elles ont prouvées une fiabilité environnementale.

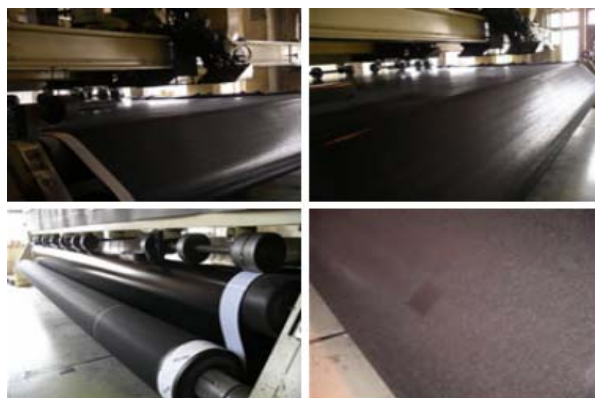
III.2. La Géomembrane PEHD:(11)

Les géomembranes en polyéthylène haute densité PEHD (ou HDPE) sont utilisées comme barrière contre les liquides dans la construction des tunnels et des structures souterraines, des canaux, réservoirs, des barrages, etc.

Ci-dessous les étapes de fabrication schématisée:



EXTRUSION LISSE



EXTRUSION TEXTUREE



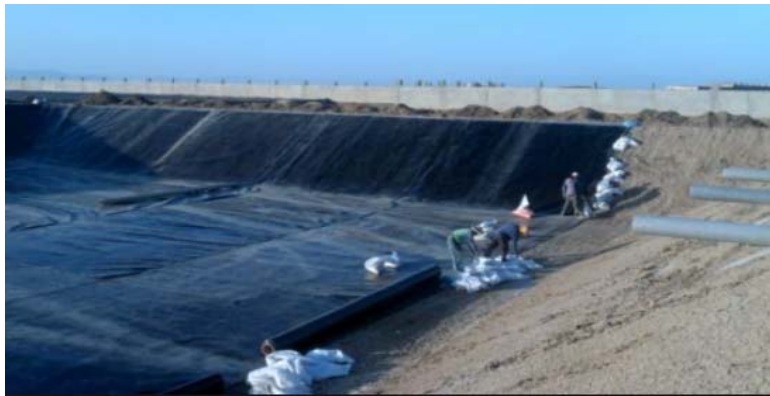
SOUFFLAGE

Figure III-1: étapes de fabrication de la Géomembrane PEHD (11)

III.3.Domaine d'application: (12)

L'utilisation de la géomembrane PEHD est diversifiée, on distingue les domaines suivants:

- Isolation des ouvrages hydrauliques:
 - Barrages, bassins, canaux, fosses...
 - Fondation cuvelages, tunnels,
 - Tranches couvertes



- Isolation des ouvrages de confinement des matières solides et liquides:
 - Installations de Stockage de Déchets
 - Ouvrages de génie civil enterres



- Isolations dans le domaine environnemental :
 - Ouvrages contre la pollution d'origine routière et autoroutière
 - Fossés et terre-pleins centraux)
 - Les ouvrages souterrains (tunnel, trémies routières), protection de nappes phréatiques
 - Protection de plate-forme ferroviaire



III.4.Caractérisation Mécanique de la Géomembrane:

Géomembrane PEHD est caractérisée par son seuil d'écoulement et de rupture, si on dépasse sa limite élastique, on risque l'endommagement du matériau.

Ces deux caractéristiques, seuil et rupture, se situent respectivement à des déformations de l'ordre de 10% (de 10 à 14 selon les produits) et de 700% environ si on considère une sollicitation uni axiale (dans une seule direction).

Dans la mise en œuvre des geomembranes PEHD, il est important d'utiliser une matière lisse pour obtenir des coefficients de frottements plus importants et de prendre en considération l'allongement au seuil et non pas l'allongement à la rupture.

Lorsque la géomembrane est tendue avant l'application, il faudra prévoir l'allongement sous le poids après application qui ne dépasse pas les 10%.

Il est important de noter que la soudeuse de PEHD a montré que celui-ci est un matériau qui brûle facilement en dégageant une fumée noire, non nocive.

Il est conseillé de se rapprocher d'un professionnel qui peut proposer différentes formulations adaptées selon l'application, qui présentent la résistance aux produits chimiques et pour la tenue aux UV.

III.5 Vieillessement chimique : (13)

Le vieillissement de la geomembrane est tenue par la dégradation chimique des polymères. On distingue deux cas, vieillissement en milieu anaérobie et/ou aérobie selon l'environnement du site considérée.

Les géomembranes en PEHD vieillissent peu en milieu anaérobie, en revanche, la présence d'oxygène engendre des réactions d'oxydation qui conduisent à des ruptures de chaînes moléculaires à l'origine de la fragilisation des matériaux.

III.6 Biodégradation du PE: (13)

Selon le Comité Européen de Normalisation (CEN), la *biodégradation* est définie comme engendrée par une activité biologique, particulièrement des attaques enzymatiques, entraînant un changement significatif dans la structure chimique du matériau.

Bien que les géosynthétiques en polyéthylène soient souvent considérés comme inertes biologiquement dans les conditions d'utilisation en centre de deux articles sur la biodégradation des plastiques et notamment du polyéthylène indiquent cependant que, même si ces molécules sont particulièrement résistantes à la biodégradation, de nombreuses études récentes ont montré que certains microorganismes sont capables de dégrader le polyéthylène préoxydé voir même vierge. Or, l'utilisation des polymères sont souvent au contact d'une population riche et diversifiée de microorganismes.

III.7 Les avantages et les inconvénients des différents types de géomembranes: (14)

Chaque famille de geomembrane possède ses propres spécificités dues à sa composition, dans la mesure où l'étanchéité des produits actuellement commercialisés n'est pas à remettre en cause, la comparaison des différents types de géomembrane s'appuie essentiellement sur:

Avantages:

- La résistance physico-chimique (elle assure l'adéquation entre la geomembrane et l'application)
- La facilité de mise en œuvre.
- Bonne aptitude au raccordement qui facilite la réalisation de joints résistants et étanches.
- Présentent une bonne soudabilité
- Nécessite pas d'assouplissant ni halogène
- Haute résistance à l'usure
- Résistance aux microorganismes, aux racines et aux rongeurs
- Hautes flexibilité
- Neutralité physiologique

Inconvénients :

- Dégradation par les rayons ultra-violets (UV) (dégradation photolytique)
- Oxydation par l'air
- Dégradation thermique et liquides tels que l'eau, les hydrocarbures, les acides...

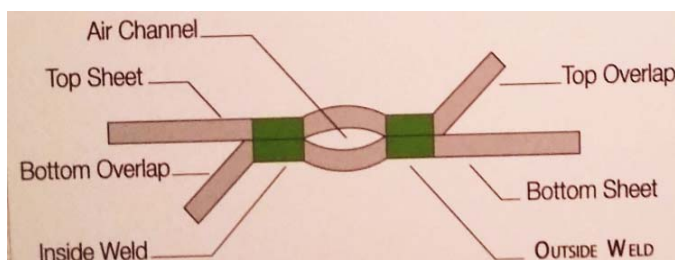
III.8 Le soudage de la geomembrane : (15)

La qualité de l'assemblage des geomembranes est en partie responsable de la qualité du fonctionnement. L'assemblage doit être de telle sorte que le joint soit étanche, résistant, fiable et durable, sachant que les caractéristiques mécaniques des joints sont étroitement liées aux caractéristiques mécaniques de la geomembrane.

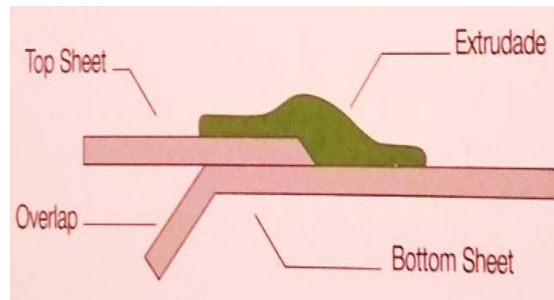


Réalisation d'assemblages en PEHD – Double soudure, extrusion

Les soudures sont réalisées par machine automatique à coin chauffant formant un double cordon de soudure qui peut être contrôlé par mise en pression du canal central.



Les soudures aux points particuliers (points triples, rustines...) sont réalisées par extrusion, par apport de matériaux.



III.8.1 Règles communes de soudages des geomembranes :

L'opération d'assemblage nécessite un recouvrement préalable entre les geomembranes, la largeur minimale de recouvrement est fonction de la nature de la geomembrane et de la technique d'assemblage utilisée, elle est supérieure à la largeur effective d'assemblage.

Ce processus constitue des points délicats, Il doit être effectué avec le maximum de soin, Il est interdit de le réaliser :

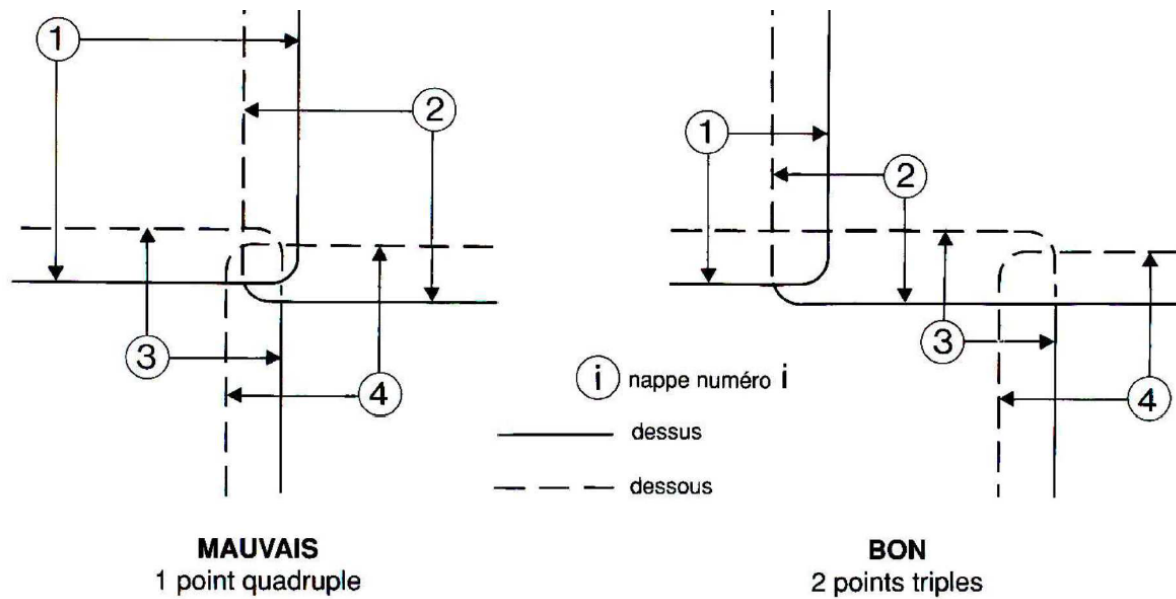
- Sous la pluie ou sous l'eau,
- Sous la neige,
- Dans la boue,
- Par vent violent,
- Par températures extrêmes.

III.8.2 Mode d'assemblage des geomembranes:

L'assemblage des différents types de geomembranes nécessite le respect des dimensions à savoir le recouvrement ainsi que la largeur, le tableau ci-dessous illustre les différents cas utilisés:

Mode d'assemblage		PVC-P	PP-F	PEHD	Bitume	EPDM
Double soudure automatique	Recouvrement	> 10 cm	> 15 cm	> 15 cm		
	Largeur de soudure	2 fois 12 mm minimum (+ canal central)	2 fois 12 mm minimum (+ canal central)	2 fois 12 mm minimum (+ canal central)		
Soudure manuelle	Recouvrement	> 10 cm	> 15 cm			
	Largeur de soudure	25 à 50 mm	25 à 50 mm			
Extrusion	Recouvrement		> 3 cm	> 3 cm		
	Largeur de soudure		Largeur du cordon d'apport	Largeur du cordon d'apport		

Chalumeau	Recouvrement				> 20 cm	
	Largeur de soudure				Totalité du recouvrement	
« Tape »	Recouvrement					> 10 cm
	Largeur d'assemblage					54 à 71 mm



Recouvrements et assemblages multiples

III-9 Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons exposés les généralités sur les geomembranes, les domaines où sont appliquées, aussi nous avons parlé des modes d'assemblages et les règles y afférents. Les geomembranes subissent un contrôle très strict au niveau du laboratoire par des tests de dernière génération permettant de vérifier la conformité aux normes internationales en vigueur.

Caractérisation de la geomembrane PEHD

I. Caractérisation de la geomembrane PEHD :

I.1. Introduction :

Cette partie est consacrée à l'élaboration des échantillons de geomembranes PEHD, et aux différentes sollicitations mécaniques auxquelles seront soumises.

Ces sollicitations nous permettront de caractériser les propriétés mécaniques qui composent les deux types de geomembranes (locale et importée).

I.2 Elaboration échantillons :

Les échantillons utilisés sont à la base de la matière première PEHD, sans utilisation de charges, ni de plastifiants, ni résines recyclées, produites par extrusion à filière plate suivant des critères très strictes et avec un minimum de variation d'épaisseur.

La société ALGM a mis à notre disposition des échantillons afin de réaliser les essais souhaités dans ce projet.

Ci-dessous les propriétés mécaniques du PEHD selon Hert (1982):

Propriétés	PEhd
Contraire au seuil d'écoulement –traction- (MPa)	25-30
Résistance repture (MPa)	30-35
Allongement	500-1100
Module d'élasticité en traction (MPa)	800-1100
Dureté shore D	66

Tableau. I-1 : les propriétés mécaniques du PEHD

Afin de mener les différents essais, le centre national de textile et du cuir (CNTC), nous a effectué le découpage des éprouvettes sous forme de films, qui ont été réalisées par l'utilisation d'un balancier et un emporte-pièce normalisé.

Ci-dessous les dimensions de l'éprouvette initiale :



Réalisation des éprouvettes à différents angles découpées à CNTC



Schéma des dimensions de l'éprouvette

Caractérisation de la geomembrane PEHD

Afin de déterminer les caractéristiques mécaniques usuelles de la geomembrane PEHD, nous avons réalisé l'essai de traction avec une vitesse de sollicitation constante ($V=10\text{mm/min}$) avec différents angles de découpe.

*angle de découpe longitudinal ($\theta=0^\circ$)

*angle de découpe transversal ($\theta=90^\circ$)

*angle de découpe ($\theta=35^\circ$)

*angle de découpe ($\theta=45^\circ$)

1.2.1 Les dimensions des éprouvettes utilisées :

Dimensions d'éprouvette	Valeurs	Unité
Longueurs entre les extrémités (L_0)	80	MM
Largeur (l)	20	MM
Epaisseur (e)	2	MM
Section initiale (S_0)	40	MM

1.3 Essai de traction :

L'essai de traction est un essai qui consiste à placer une éprouvette d'un matériau entre les mors de la machine de traction, cette dernière impose une déformation croissante à vitesse constante et mesure l'effort nécessaire pour telle déformation jusqu'à sa rupture, cet essai est pratiqué à température ambiante 20°C , puis on enregistre l'allongement et la force appliquée, qu'on convertit en déformation et contrainte.

1.3.1 Machine d'essai de traction :

L'essai de traction nous permettra de déterminer le comportement élastique du matériau, mesurer le degré de résistance à la rupture, et ce dans un état de contrainte uniaxiale.

L'exécution des essais de traction ont été réalisés sur la machine de traction IBERTEST mode UIB.100/W qui se trouve au niveau du laboratoire de RDM de génie civil, faculté de Génie de la Construction de l'UMMTO.

C'est une machine universelle, elle permet de réaliser des essais de traction, compression,

Flexion ...et....

Sa capacité de chargement est de 100 KN, l'équipement est composé de deux parties :

1. Bâti d'essais
2. Système de contrôle et d'acquisition des données



Figure :Machine de traction

1.3.2 Etaps de réalisation de l'essai de Traction :

Avant la mise en marche de l'équipement, nous avons paramétré le logiciel WINTEST intégré dans l'ordinateur, qui est connecté à la machine de traction.

Les paramètres enregistrés sont :

- 1- Vitesse de chargement : 10mm/mn (vitesse constante pour l'ensemble des essais réalisés).
- 2- Les dimensions de l'éprouvette
- 3- La température

Ensuite, on prépare les éprouvettes par angle de découpe, puis on positionne chacune entre les mors tout en gardant l'axe longitudinal de l'éprouvette et l'axe de la machine alignés.

Puis on impose un déplacement de la traverse supérieure à la vitesse de 10mm/min, qui est contrôlé par un système hydraulique, un extensomètre mesure l'allongement de l'éprouvette et un dynamomètre mesure l'effort, le résultat est visualisé sur un écran ou une table traçante via un système d'acquisition de données géré par le logiciel WINTEST nous fournit directement le diagramme représentant l'évolution de la force en fonction du déplacement (Force [KN] - Course [mm]), ces informations s'enregistrent au fur et à mesure de l'essai.

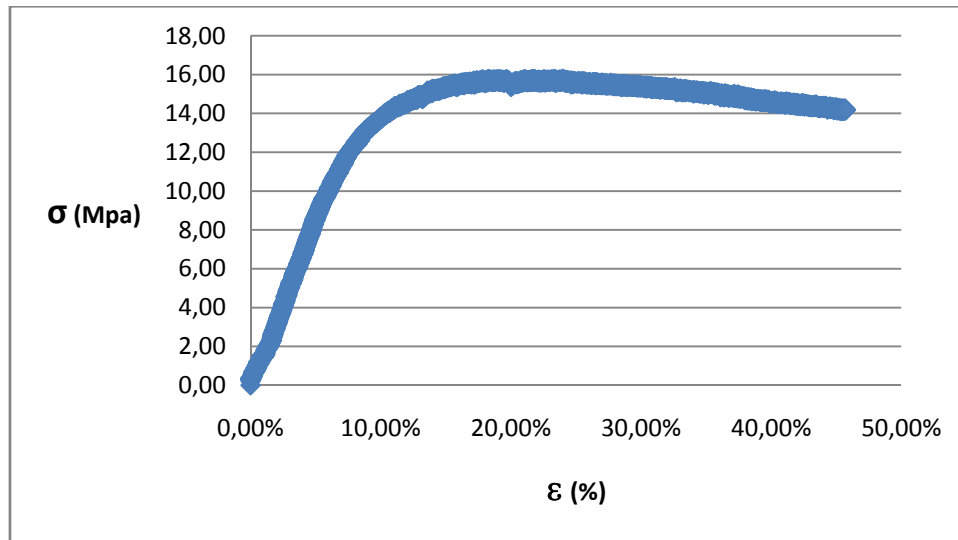
Un extensomètre mesure l'allongement de l'éprouvette et un dynamomètre mesure l'effort. Le résultat est visualisé sur un écran ou une table traçante via un système d'acquisition de données.

1.4 Caractérisation mécanique via des essais de traction uniaxiale :

Afin de nous permettre de caractériser la géomembrane et étudier son comportement lors de l'utilisation, nous avons découpé des éprouvettes dans quatre directions telles que : $\theta=0^\circ$, $\theta=35^\circ$, $\theta=45^\circ$ et $\theta=90^\circ$.

Ensuite ces éprouvettes sont sollicitées à vitesse de traction constante : $V=10\text{mm/min}$. Enfin les essais sont menés selon un protocole paramétrique associé aux quatre angles de découpe et à vitesse de sollicitation constante.

I.4.1. Courbe contrainte déformation selon le couple paramétrique ($\theta=0^\circ$; $V=10\text{mm/mn}$) :



Analyse:

L'analyse de la courbe contrainte déformation associée aux éprouvettes de la géomembrane PEHD sollicitées selon le protocole paramétrique ($\theta=0^\circ$; $V=10\text{mm/mn}$) présentent un comportement élastoviscoplastique caractérisé par des zones spécifiques.

Nous enregistrons dans un premier temps une zone élastique, ensuite une zone visqueuse et en fin une zone plastique en continue.

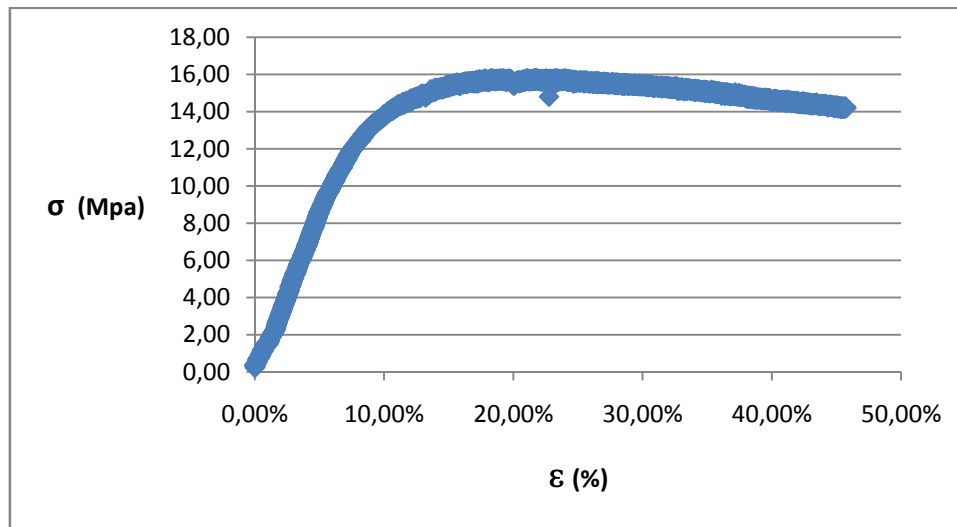
Les propriétés mécaniques usuelles, sont mentionnées dans le tableau I.4.1.

Propriétés mécaniques de la géomembrane soumis à une traction selon le couple paramétrique ($\theta=0^\circ$; $V=10\text{mm/mn}$)

Propriétés Vitesse de sollicitation	σ_y (Mpa)	σ_p (Mpa)	σ_{pd} (Mpa)	σ_{pf} (Mpa)	ϵ_y (%)	ϵ_p (%)	ϵ_{pd} (%)	ϵ_{pf} (%)	E (Mpa)
V=10mm/MN	15,77961	14,79	15,28	14,40	24,01	37,26	31,94	42,58	145,2

Tableau I.4.1 Propriétés mécaniques usuelles de la géomembrane

I.4.2 Courbe contrainte déformation selon le couple paramétrique ($\theta=35^\circ$; $V=10\text{mm/mn}$)



Analyse :

L'analyse de la courbe contrainte déformation associée aux éprouvettes de la geomembrane PEHD sollicitées selon le protocole paramétrique ($\theta=35^\circ$; $V=10\text{mm/mn}$) présentent un comportement élasticoviscoplastique caractérisé par des zones spécifiques.

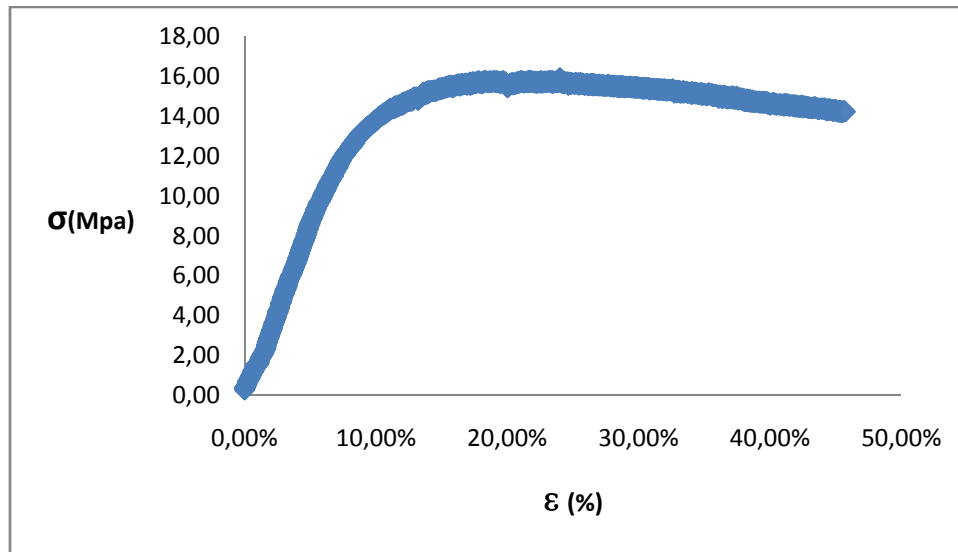
Nous enregistrons dans un premier temps une zone élastique, ensuite une zone visqueuse et en fin une zone plastique en continue.

Les propriétés mécaniques usuelles, sont mentionnées dans le tableau I.4.2.

Propriétés mécaniques de la geomembrane soumis à une traction selon le couple paramétrique ($\theta=35^\circ$; $V=10\text{mm/mn}$)

Propriétés Vitesses de solicitation	σ_y (Mpa)	σ_p (Mpa)	σ_{pd} (Mpa)	σ_{pf} (Mpa)	ϵ_y (%)	ϵ_p (%)	ϵ_{pd} (%)	ϵ_{pf} (%)	E (Mpa)
V=10mm/MN	15,79	14,83	15,20	14,43	21,79	37,745	33,26	42,23	182,3

I.4.3 Courbe contrainte déformation selon le couple paramétrique($\theta=45^\circ$; $V=10\text{mm/mn}$)



Analyse :

L'analyse de la courbe contrainte déformation associée aux éprouvettes de la geomembrane PEHD sollicitées selon le protocole paramétrique ($\theta=45^\circ$; $V=10\text{mm/mn}$) présentent un comportement élastoviscoplastique caractérisé par des zones spécifiques.

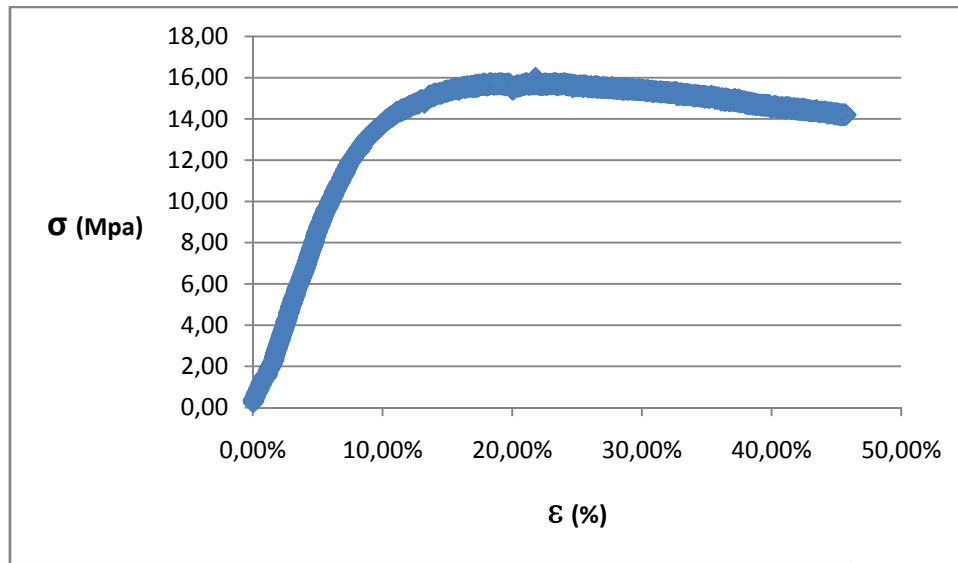
Nous enregistrons dans un premier temps une zone élastique, ensuite une zone visqueuse et en fin une zone plastique en continue.

Les propriétés mécaniques usuelles, sont mentionnées dans le tableau I.4.3.

Propriétés mécaniques de la geomembrane soumis à une traction selon le couple paramétrique ($\theta=45^\circ$; $V=10\text{mm/mn}$)

Propriétés Vitesse de sollicitation	σ_y (Mpa)	σ_p (Mpa)	σ_{pd} (Mpa)	σ_{pf} (Mpa)	ϵ_y (%)	ϵ_p (%)	ϵ_{pd} (%)	ϵ_{pf} (%)	E(Mpa)
V=10mm/MN	15,95	15,32	15,72	14,45	24,13	32,2	21,10	43,32	176,1

I.4.4 Courbe contrainte déformation selon le couple paramétrique($\theta=90^\circ$; $V=10\text{mm/mn}$)



Analyse:

L'analyse de la courbe contrainte déformation associée aux éprouvettes de lagéomembrane PEHD sollicitées selon le protocole paramétrique ($\theta=90^\circ$; $V=10\text{mm/mn}$) présentent un comportement élasticoviscoplastique caractérisé par des zones spécifiques.

Nous enregistrons dans un premier temps une zone élastique, ensuite une zone visqueuse et en fin une zone plastique en continue.

Les propriétés mécaniques usuelles, sont mentionnées dans le tableau I.4.4.

Propriétés mécaniques de lagéomembrane soumis à une traction selon le couple paramétrique ($\theta=90^\circ$; $V=10\text{mm/mn}$)

Propriétés Vitessedesollicitation	σ_y (Mpa)	σ_p (Mpa)	σ_{pd} (Mpa)	σ_{pf} (Mpa)	ϵ_y (%)	ϵ_p (%)	ϵ_{pd} (%)	ϵ_{pf} (%)	E(Mpa)
V=10mm/MN	16,03	15,35	15,71	14,45	22,05	33,08	23,06	43,11	173,8

1.5 Propriétés mécaniques d'une geomembrane PEHD importée soumise à une traction avec une vitesse de sollicitation constante ($v=10\text{mm/min}$)

Propriétés Mécaniques Angle sollicitation	σ_y (Mpa)	σ_p (Mpa)	σ_{pd} (Mpa)	σ_{pf} (Mpa)	ϵ_y (%)	ϵ_p (%)	ϵ_{pd} (%)	ϵ_{pf} (%)	E (Mpa)
0°	11.14	8.42	7.36	9.98	17.61	170.16	39.93	301.4	86.24
35°	14.61	11.76	11.46	12.11	16.26	107.01	38.71	175.31	128.47
45°	15.01	12.83	12.27	13.69	16.58	113.23	73.44	153.02	106.98
90°	15.3	12.35	12.18	13.8	12.14	72.2	21.37	123.03	101.64

1.5.1 Comparaison et analyse des propriétés mécaniques obtenues pour les deux types de geomembrane:

La geomembrane PEHD est utilisée pour assurer l'étanchéité des ouvrages de génie civil, nous avons déterminé les propriétés élastoviscoplastiques caractéristiques telles que le module de Young, la contrainte au seuil d'écoulement, les contraintes aux plateaux de plasticité, la contrainte à la rupture et les taux de déformation correspondants.

L'analyse des résultats de l'essai de traction sur les deux geomembranes (locale et importée) ont montré un comportement presque identique, élastoviscoplastique, dans les deux cas aucune rupture n'a été enregistrée. La déformation étant très importante par rapport à la course nominale de la machine de traction, ce qui conduit à statuer sur la bonne qualité de la geomembrane locale.

Conclusion générale

Conclusion générale:

Le travail effectué, exposé dans ce mémoire sur la caractérisation de la geomembrane PEHD produite localement m'a permis dans un premier temps d'approfondir mes connaissances dans les polymères et leur application.

Au cours de notre étude, nous avons déterminé les caractéristiques élastoviscoplastiques: la contrainte au seuil d'écoulement, les différentes contraintes qui constituent la plasticité à savoir: début de la plasticité et la fin de la plasticité, les taux de déformation, les résultats sont en accord avec les normes en vigueur. Nous avons constaté que les résultats s'approchent considérablement aux caractéristiques de la geomembrane importée.

Le domaine de la geomembrane est en pleine expansion, il ne cesse d'accroître surtout dans le domaine du génie civil, bâtiments, travaux publics, hydraulique, environnement et agriculture. En termes simples, L'industrie Algérienne des geosynthétiques bénéficie des techniques développées, des réglementations et des règles de bonne pratique ont été édictées par des formations à l'étranger pour une bonne mise en œuvre et le respect du comportement du matériau qui par la suite assure le bon fonctionnement.

Aujourd'hui le gouvernement favorise la production locale, et c'est une occasion de développer les moyens techniques afin de satisfaire le marché local.

- (1) **Extrait du BOEN**, THEME du programme : Vêtement et revêtement, Sous-thème: Matériaux polymères, provenance: Willay Caroline, enseignement : Physique-chimie STIDD-STL
(http://www.cndp.fr/portails-disciplinaires/fileadmin/user_upload/Physique-chimie/Ressources_RNSTL/Polymeres.pdf)(1)
- (2) La chimie des polymères, P. WEISS, 2009-2010(<http://campus.cerimes.fr/odontologie/enseignement/chap3/site/html/cours.pdf>)(2)
- (3) Dossier Enseignant. «VOYAGE EN INDUSTRIE» CAP SCIENCES 2006(http://colleges.ac-rouen.fr/signoret/IMG/pdf/differents_plastiques.pdf)(3)
- (4) thèse doctorat université de toulouse, génie des procédés et environnement, abdoulayeseyni, 2008(<http://oatao.univ-toulouse.fr/7820/1/seyni.pdf>)(4)
- (5) **Géomembranes utilisation en génie civil** par Jean-Louis BORDES, ingénieur de l'École centrale de Paris, expert, Coyne et Bellier, **Doc. C 5 430**(5)
- (6) **Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéités par géomembranes** édition de 2017(http://www.cfg.asso.fr/sites/default/files/files/publications/geomembranes_n10.pdf)(6)
- (7) Chimie et physico-chimie des polymères, Michel Fontanille -Yves Gnanou, Dunod, Paris, 2002, 2005, 2010, 2013
(<http://excerpts.numilog.com/books/9782100589159.pdf>)(7)
- (8) **American Chemistry Council 2005-2018**
(https://www.glad.com.au/DownloadDocument_9707fc09.ashx.pdf)(8)
- (9) communication de la commission Internationale des Grands Barrages (CIGB), 2009(<http://www.barrages-cfbr.eu/BackUp/Info/documentation/texte/cfg2009/cfg2009-11.pdf>)(9)
- (10) design standards N°13 Embankment Dams, chp 20 géomembranes Mars 2014(<https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/designstandards-datacollectionguides/finalds-pdfs/DS13-20.pdf>)
(<http://www.univ-valenciennes.fr/congres/RFIS2005/Presentations/Session7-2/JRodriguez-RFIS.pdf>)(10)
- (11) GETECH, spécialiste de l'étanchéité par géomembrane, édition 2009
(<http://www.getech.fr/getech-produits-fabrication.html>)(11)

- (12) PROCEDURE DE CERTIFICATION DES GEOMEMBRANES, édition SETRA-CSTR-LRPC, Mai 1999 <http://dtrf.setra.fr/pdf/pj/Dtrf/0002/Dtrf-0002035/DT2035.pdf> **(12)**
- (13) Thèse présentée pour obtenir le grade de Docteur de l'Université Paris-Est Spécialité: Structures et Matériaux par Carlota Pons, 23 Novembre 2012 (voir dans le flach disque) **(13)**
- (14) Les géomembranes Stéphane Lambert : Ingénieries – EAT – N°11 septembre 1997 – p 27 à 40 <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00461031/document> **(14)**
- (15) Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéités par geomembranes ÉDITION DE 2017 http://www.cfg.asso.fr/sites/default/files/files/publications/geomembranes_n10.pdf **(15)**