

*REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE*  
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Mouloud Mammeri- Tizi-Ouzou  
Faculté du Génie de la Construction  
Département de Génie Mécanique



# MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

*En vue de l'obtention du diplôme*  
*Master Académique*  
*Option : Construction Mécanique*  
*Thème :*

*INFLUENCE DES PARAMETRES  
TECHNOLOGIQUES INTERIEUR ET  
EXTERIEUR SUR LA QUALITE DE LA MOUSSE  
POLYURETHANE RIGIDE DANS  
LES REFRIGERATEURS*

**Dirigé par :**

M<sup>r</sup> HAMOUR

**Présenté par :**

M<sup>lle</sup> TAFERRANT Fazia

M<sup>lle</sup> HAMOUDA Ouerdia

**Année Universitaire : 2016-2017**

# Remerciements

*Nous commençons par remercier Dieu le tout puissant de nous avoir  
donné le courage, la volonté, l'amour du savoir et surtout  
la patience pour pouvoir produire ce modeste travail.*

*Nous tenons à présenter nos vifs remerciements à :  
Tous ce qui nous a aidés et pris en charge théoriquement et pratiquement.*

*Notre promoteur M<sup>r</sup> HAMOUR*

*M<sup>r</sup> ACHER, Qui nous a vraiment aidés*

*Tous les enseignants.*

*Enfin j n'oublie pas de dire merci à toutes les personnes qui ont contribués  
de loin ou de prés.*

*Merci*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à:*

*Tous ceux qui sont chers à mes yeux  
Mes très chers parents et ma grand-mère*

*Mon cher mari*

*Mes chères sœurs et leurs enfants*

*Mes chers frères : « Hacène et ces enfants et Idir*

*Toute ma famille et ma belle famille*

*Tous mes amis (es)*

*Mes collègues du travail*

*Ma binôme et toute sa famille*

*Fazia*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à:*

*Tous ceux qui sont chers à mes yeux*

*La mémoire de mes parents.*

*Ma chère sœur*

*Mes chers frères et leurs enfants*

*Toute ma famille*

*Tous mes amis (es)*

*Mes collègues de travail*

*Ma binôme et toute sa famille*

*Ouerdia*

## Liste des figures

Figure I.1 : le CT mètre ou appareil de mesure de la conductivité thermique (ENIEM) .....	15
Figure II.1. Indice de Fluidité (MFI).....	24
Figure II.2. Machine de traction.....	26
Figure II.3. Mouton CHARPY.....	27
Figure II.4. Eprouvette de CHARPY.....	27
Figure II.5. Machine de dureté.....	28
Figure II.6. Différents types de copolymères.....	30
Figure. III.1: Méthode d'application de la mousse de polyuréthane injectée dans le domaine... de l'isolation du bâtiment .....	38
Figure. III.2: Comportement en compression de mousses PUR. ....	38
Figure III.3. Iso cyanate.....	41
Figure III.4. Polyol.....	44
Figure III.5. Cyclopentane.....	47
Figure. III.6: Principaux emplois des mousses des polyuréthanes.....	54
Figure. IV.1. Salle MPU atelier uréthane RII.....	56
Figure. IV.2. Mélange de polyol.....	56
Figure. IV.3. Obtention de la mousse polyuréthane au niveau d'atelier uréthane RII.....	58
Figure. IV. 4. Expansion libre de la mousse polyuréthane.....	59
Figure. IV.5. Échantillon prélevé au centre de bloc de mousse.....	60
Figure. IV.6. calibre cylindrique.....	60
Figure. IV.7. Papier verre.....	60
Figure. IV.8. Éprouvette cylindrique homogène.....	60
Figure. IV.9. Pied à coulisse.....	61
Figure. IV.10. Formation de la mousse polyuréthane.....	62
Figure. IV.11. Mousse mélangée avec l'eau.....	63

Figure. IV.12.Mousse mélange avec l'huile.....	64
Figure IV.13. Tête d'injection de la mousse (utilisée à l'ENIEM).....	67
Figure IV.14.Prélèvement d'échantillon du Porte moussée.....	68
Figure IV.15.Prélèvement d'échantillon du l'armoire moussée.....	69
Figure IV.16.microscope optique.....	72
Figure IV.17 .L'pareil de mesure de la conductivité thermique utilisé à l'ENIEM .....	74
Figure IV.18 .Eprouvette carrée.....	75
Figure IV.19. Moules de réfrigérateurs utilisés à l'ENIEM.....	78

## **Liste des tableaux**

Tableau I.1 : Les isolants thermique.....	16
Tableau II.1 : Point de fusion de quelques polymères.....	25
Tableau II.2 : Les matières thermoplastiques les plus courantes et leurs domaines d'utilisation.....	31
Tableau II. 3: Les élastomères les plus courants et leurs domaines d'utilisation.....	32
Tableau II.4: Les matières thermodurcissables les plus courantes et leur domaines d'utilisation.....	34
Tableau III.1 : Coefficient d'isolation thermique pour différents matériaux.....	40
Tableau III.2 : Application des iso cyanates.....	42
Tableau III.3 : Les valeurs de PACO et PRG des CFC.....	48
Tableau III.4 : Les valeurs de PACO et PRG des HCFC.....	49
Tableau III.5 : Les valeurs de durée de vie, de PACO et PRG des HFC.....	50

---

Introduction Générale .....	1
Présentation de l'entreprise ENIEM .....	2

## Chapitre I

### L'isolation thermique

I.1.Introduction .....	10
I.2.Le transfert thermique .....	10
I.2.1.Conduction thermique .....	10
I.2.2.Convection thermique.....	11
I.2.3.Rayonnement .....	11
I.3.Les matériaux isolants .....	11
I.3.1 Quelques exemples d'isolants et leurs applications .....	12
I.4.Les supers isolants .....	14
I.5.Caractérisation de l'isolant thermique.....	15
I.5.1.Le coefficient de conductivité thermique $\lambda$ d'un matériau .....	15
I.5.2.La résistance thermique .....	17

## Chapitre II

### Généralités sur les polymères

II.1.Introduction .....	19
II.2.Historique .....	19
II.3.Définition .....	19
II.4. Classification selon la morphologie .....	20
II.4.1. Les polymères amorphes .....	20
II.4.2. Les polymères semi-cristallins .....	20
II.4.3. Classification selon la structure.....	20
II.4.3.1. Structure linéaire .....	21
II.4.3.2. Structure ramifié.....	21
II.4.3.3. Structure réticulé .....	21
II.5. Caractéristiques des polymères .....	22

II.5.1. Elasticité .....	22
II.5.1.1. Comportement élastique.....	22
II.5.1.2. Comportement plastique .....	22
II.6. Propriétés des polymères.....	23
II.6.1. Masse volumique.....	23
II.6.2. Indice de fluidité.....	23
II.6.3. Propriétés thermiques .....	24
II.6.3.1. Température de fusion.....	24
II.6.3.2. Température de ramollissement Vicat.....	25
II.6.4. Propriétés mécaniques.....	25
II.6.4.1. Contrainte au seuil d'écoulement en traction.....	25
II.6.4.2. Résistance à la rupture.....	26
II.6.4.3. Allongement à la rupture.....	26
II.6.4.4. Module de Young en traction.....	27
II.6.4.5. Résistance au choc .....	27
II.6.4.6. Dureté.....	27
II.7. Les plastiques .....	29
II.7.1. Définition .....	29
II.7.2. Les familles des plastiques .....	30
II.7.2.1. Les thermoplastiques.....	30
II.7.2.2. Les élastomères .....	32
II.7.2.3. Les thermodurcissables .....	33

## Chapitre III

### Mousse polyuréthane rigide

III.1. Historique.....	35
III.2. Introduction.....	35
III.3. Généralités sur les mousses de polyuréthane.....	35
III.3.1. La mise en œuvre des polyuréthanes .....	36
III.4. Type de mousses polyuréthane .....	36
III.4.1. Mousses souples.....	36
III.4.2. Mousses semi-rigides.....	37

III.4.3. Mousses rigides.....	37
III.5. Conductivité thermique.....	39
III.5.1. Coefficient thermique pour différents types de mousses.....	40
III.6. Définition de la mousse polyuréthane rigide .....	40
III.7.Matières premières rentrant dans la formulation des polyuréthannes .....	41
III.7.1. Les isocyanate .....	41
III.7.1.1 Les iso cyanates aromatiques (HDI, IPDI) .....	41
III.7.1.2.Toluène di iso cyanate (TDI) .....	41
III.7.1.3. Le diphenyle méthane di iso cyanate (MDI).....	42
III.7.2.Les polyols (polymères poly-hydroxylés) .....	43
III.7.2.1. Les polyols polyéthers .....	43
III.7.2.2.Les Polyols polyesters.....	44
III.7.2.3. Les composants rentrants dans la composition chimique des polyols.....	45
III.7.3. Cyclo pentane:(C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> ) .....	47
III.7.3.1 .L'eau .....	51
III.8.Domaine d'utilisation de la mousse polyuréthane .....	51
III.9. Conclusion .....	54

## Chapitre IV

### Procédés d' Elaboration des matériaux

IV.1. Introduction.....	55
IV.2.Principe .....	56
IV.3. Etude pratique.....	56
IV.3.1.Procédé de fabrication des mousses de polyuréthane à ENIEM .....	57
IV.3.1.1.Elaboration de la mousse au niveau de l'atelier .....	56
IV.3.1.2. Préparation des composants de la mousse .....	59
IV.4.Essais effectués au niveau de laboratoire .....	59
IV.4.1.Densité libre.....	59
IV.4.1.1. Calcule de la densité libre pour la formulation suivante .....	61
IV.4.1.2.Influence de H <sub>2</sub> O sur la densité libre .....	63
IV.4.1.3.Influence d'huile sur la densité libre .....	63
IV.4.1. 4.Influence de la température sur la viscosité de polyol .....	64

---

IV.4.1.5. Influence de la température sur la densité de polyol .....	65
IV.4.1. 6. Influence de cyclopentane sur la viscosité de polyol.....	66
IV.4.1.7. Influence de cyclopentane sur la densité de polyol .....	67
IV.5. Calcul de la densité en panneau .....	67
VI.5.1. Densité en panneau en fonction la densité libre pour une même masse injectée .....	71
IV.6. Micro structure de la mousse polyuréthane .....	72
IV.7. Calcul de la conductivité thermique .....	74
VI.7.1. Influence de conductivité thermique en fonction la densité en panneau .....	76
VI.8. Essai de compression .....	77
VI.8.1. Résistance à la compression .....	77
IV.8.2. Comportement en compression de mousse PUR.....	78
IV.9. Influence de la température des moules sur la qualité de la mousse .....	78
Conclusion générale.....	80
Références bibliographiques .....	82

## **Introduction Générale**

Depuis la découverte des polyuréthanes dans les années trente, leurs domaines d'application n'ont cessé de s'élargir : mousses souples ou rigides, revêtements, élastomères, colles, adhésifs, bains de couches, encres et vernis...

Les polyuréthanes, polymères thermodurcissables, occupent une place privilégiée dans l'industrie. Ils résultent de la réaction de polymérisation chimique d'un iso cyanate avec des groupements portant un hydrogène mobile (principalement des groupements hydroxyle), par exemple des fonctions alcool. Pour obtenir des matériaux alvéolaires, il faut coupler cette réaction exothermique à un dégagement gazeux (chimique ou physique) qui permet la création d'alvéoles de gaz en surpression au sein du polymère (donc son expansion) tant que le polyuréthane n'est pas complètement polymérisé.

Cependant, du fait de la complexité des couplages thermo-chimio-rhéologiques prenant place lors de la mise en œuvre ainsi que de la géométrie parfois complexe des moules utilisés, le contrôle et l'optimisation des procédés s'avère difficile. Les modèles analytiques que l'on peut trouver dans la littérature sont insuffisants pour rendre compte de la complexité des phénomènes.

Au sein de l'entreprise ENIEM on utilise la mousse polyuréthane rigide pour isolation thermiques des réfrigérateurs, conservateur et congélateurs, mais comme ce procédé est très spécial au même temps compliqué, parfois on a de mal à obtenir une mousse de qualité suite à la mauvaise maîtrise de ses paramètres.

Notre travail est réparti en quatre chapitres :

Après une introduction générale et une présentation de l'entreprise nationale de l'industrie électroménagère (ENIEM), le premier chapitre traite les généralités sur Isolation Thermique, où on trouve des définitions de cette dernière.

Le second chapitre portera les Généralités sur les polymères et leurs procédés d'élaboration.

Nous citerons dans le troisième chapitre mousse polyuréthane rigide. La partie expérimentale sera détaillée dans le chapitre quatre où nous exposons les différents paramètres technologiques qui influent sur la qualité de la mousse PUR

Enfin une synthèse du travail sera donnée dans la conclusion générale.



## Chapitre I

# ISOLATION THERMIQUE

## I.1.Introduction[1]

L'isolation thermique désigne l'ensemble des techniques mises en œuvre pour limiter les transferts de chaleur entre un milieu chaud et un milieu froid. Elle est utilisée dans de nombreux domaines incluant notamment : le bâtiment, l'industrie, l'automobile et la chaîne du froid.

En thermique, un isolant est un matériau ayant une faible conductivité thermique. Il s'oppose aux transferts de chaleur (ouate de cellulose, laine de roche, laine de verre, bois, caoutchouc, polystyrène, matériaux poreux, papier journal etc.).

Parmi les matériaux utilisés dans l'isolation thermique, nous citerons à titre d'exemple le polyuréthane rigide ou la mousse polyuréthane.

Le développement des isolants en polyuréthane rigide a commencé dans les années trente après quoi leur faible densité, leur excellente résistance à l'eau et leur rigidité fut utilisée pour améliorer la flottabilité dans l'industrie marine.

La reconnaissance ultérieure de leur très faible conductivité thermique et de leur résistance aux huiles et aux produits chimiques, (par exemple au styrène), a favorisé leur développement dans le domaine de l'isolation thermique industrielle.

## I.2. Le transfert thermique

La chaleur se transmet par 3 modes:

- Conduction
- Convection
- Rayonnement

### I.2.1.Conduction thermique

C'est la transmission de la chaleur au sein de la masse d'un corps solide, des points les plus chauds vers les points les moins chauds, par suite du contact des particules entre elles et sans déplacement apparent de matière. La propagation de la chaleur par conduction dépend essentiellement du matériau considéré.

**Exemple:** Transmission de la chaleur à travers une paroi, dont les températures des deux faces sont différentes.

### I.2.2. Convection thermique

La transmission de la chaleur s'effectue suite au mouvement d'un fluide.

**Exemple:** Transmission de la chaleur de l'air chaud en mouvement à une paroi moins chaude placée dans son flux. Si le mouvement du fluide est causé par la différence de densité, due à des variations de température, la convection est dite naturelle.

**Exemple:** Echange de chaleur entre l'air d'un local fermé non ventilé et une caisse placée dans ce local.

Si le mouvement du fluide est provoqué par un moyen mécanique, la convection est dite forcée.

**Exemple:** Echange de chaleur entre l'air d'un local mécaniquement ventilé et une caisse placée dans ce dernier.

### I.2.3. Rayonnement

C'est la transmission de la chaleur d'un corps à un autre moins chaud, par ondes électromagnétiques, à travers l'espace qui les sépare.

## I.3. Les matériaux isolants

Les matériaux employés doivent posséder plusieurs qualités: une très faible conductivité thermique, non hygroscopique, un pouvoir de réflexion important. Un matériau est considéré comme isolant si sa conductivité thermique est inférieure à  $0,065 \text{ W/m. } ^\circ\text{C}$

Les principaux matériaux isolants mis en œuvre dans la conception d'emballages et matériels isothermes de transport et de stockage sont les suivants:

- Mousse polyuréthane (mousse de PU).
- Polystyrène expansé extrudé.
- Panneaux rigides de polyuréthane (panneaux de PU).
- Polystyrène expansé (PSE).
- Mousse de polyéthylène expansé extrudé (mousse de PEEE).

D'autres matériaux existent, mais sont plutôt utilisés dans d'autres domaines comme le bâtiment: fibres de verre, laine de roche, liège expansé, mousses phénoliques, chlorure de polyvinyle expansé, élastomères mousses, poudres isolantes.

### I.3.1 Quelques exemples d'isolants et leurs applications

#### a- Polystyrène

Le polystyrène est le polymère obtenu par polymérisation des monomères de styrène. C'est un matériau solide à 20°C et pâteux à 120°C, qui fond entre 150°C et 170°C. Il est inflammable et combustible avec une température d'auto-inflammation d'environ 490°C.

Il est également soluble dans les hydrocarbures chlorés et aromatiques. Ce matériau dur, cassant et transparent se décline en différents types de polystyrènes aux applications multiples. Il est utilisé notamment pour réaliser des emballages, des jouets et des maquettes.

#### - Application

Les principales utilisations du polystyrène dans la vie courante sont :

- les boîtiers de CD en PS cristal.
- les couverts et verres en plastique en PS choc.
- les emballages alimentaires (comme les pots de yaourt).
- les emballages des appareils fragiles en PSE.
- Isolation thermique des bâtiments sous forme expansée ou extrudée.

#### b- Laine de verre

La laine de verre est un produit naturel ayant d'excellentes caractéristiques d'isolation et des propriétés physiques hors du commun. Elle résiste au feu, et elle est chimiquement neutre, n'absorbe pas, légère, tendre, facile à travailler et résistante au vieillissement.

#### - Application

- Isolation des conduites
- Isolation des réservoirs
- Isolation des toits, des plafonds,
- Isolation des cuisinières (le cas de l'unité cuisson ENIEM)

#### c- Ouate de cellulose

Ouate de cellulose, également connue sous le nom d'« isolant de cellulose » ou « isolant cellulosique », est un matériau de construction isolant (dit « éco matériau ») très prisé en éco construction.

#### - Présentation de matériau

La ouate de cellulose est obtenue à partir de papiers recyclés. Elle est fabriquée par un broyage du papier, plus particulièrement de journaux neufs invendus et/ou de chutes de

coupes de papiers neufs d'imprimerie. Les particules métalliques sont extraites, puis on y ajoute des additifs. On procède ensuite au raffinage, à l'emballage et à la palettisation. Généralement de couleur grise, la ouate de cellulose existe néanmoins en couleur blanche. La ouate de cellulose est utilisée comme isolant depuis les années 1930 aux Etats-Unis et en Scandinavie.

#### **- Application**

La ouate de cellulose sous forme de panneau ou en vrac, est utilisée comme isolant thermique des murs, planchers, combles perdus, rampants. Sa mise en œuvre est adaptée aussi bien pour des constructions traditionnelles que dans la construction neuve.

#### **d- Laine de chanvre**

Le chanvre est une plante souvent cultivée sans pesticides, ni insecticides dont on extrait les fibres transformées en laine pour l'isolation. On y ajoute un liant synthétique qui assure sa souplesse et sa résistance dans le temps.

La laine de chanvre se présente sous forme de rouleaux souples ou de panneaux semi-rigide. Elle est conditionnée en épaisseur allant de 40 à 120 mm

#### **- Application**

La laine de chanvre s'utilise pour l'isolation du toit, l'isolation des toitures, des combles des murs ou des cloisons, des rampants, des murs, et parfois du sol.

On préférera la laine de chanvre fabriquée avec des plantes cultivées sans traitement phytosanitaire issues de l'agriculture biologique.

#### **e- Liège expansé**

Le liège expansé ou « liège noir » est issu du chêne liège de méditerranée d'au moins 30 ans d'âge. Pour sa fabrication, seule l'écorce est utilisée. La récolte se fait tous les 7 ou 8 ans. Une fois l'écorce du chêne liège récoltée, elle est réduite en granules. Ces dernières sont chauffées à 300°C avec de la vapeur d'eau pour qu'elles se dilatent et s'agglomèrent entre elles. Les granules de l'écorce du liège se collent alors grâce à l'action de leur propre résine (la subérine). C'est grâce à l'air enfermé dans les cellules fermées que le pouvoir isolant est conféré au liège expansé. Il est utilisé depuis plus de 150 ans en isolation thermique

#### **- Application**

Le liège expansé s'utilise aussi bien dans la construction neuve que dans la restauration de bâtiments traditionnels. On l'utilise pour les murs et les combles ainsi que pour

l'isolation des sols, sous allés, des planchers, des doubles-cloisons. Pour les supports de couverture et pour les rampants, on utilisera le liège expansé sous forme de panneau rigide.

#### **f- Laine de coco**

Le **coco** est surtout connu pour son utilisation dans l'industrie du meuble. Ses applications en isolation thermo-acoustique, encore confidentielles, sont très intéressantes. Au plan écologique, la transformation de la fibre de coco est exemplaire. Le processus de fabrication, de la récolte des noix au matériau isolant, exclut tout produit chimique, excepté le sel de bore servant au traitement insecticide et anti-feu.

#### **g- Mousse polyuréthane rigide**

Les mousses flexibles sont particulièrement utilisées en ameublement (assises des sièges et canapés), les mousses rigides sont intégrées aux murs rideaux, ou des panneaux d'isolation (panneaux sandwich) utilisés dans le bâtiment ou dans l'électroménager (parois de réfrigérateurs ou des chambres froides par exemple). L'ordre de grandeur de la conductivité thermique de la mousse de polyuréthane se situe entre 0,023 et 0,028  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ .

Sous la forme de mousse expansée, les mousses de polyuréthanes sont largement utilisées pour leur qualité d'isolation thermique, leur adhérence sur tout support, leur pouvoir de flottaison, leur capacité à remplir les vides quels qu'ils soient et à permettre des emballages sur mesure, légers et solides. Leur utilisation est efficace aussi pour remplir un vide de bas de caisse de voiture et éviter que la rouille ne s'y propage en faisant barrière à l'eau de pluie. On remplit le caisson et la mousse se propage dans les interstices comblant les « perforations ».

#### **Application**

- Utilisée comme colle.
- Ameublement.
- Industrie automobile.
- Décoration.
- Isolant pour les appareils électroménagers qui fera l'objet de notre travail.

### **I.4. Supers isolants**

Les supers isolants sont des matériaux possédant un meilleur pouvoir isolant que l'air sec.

Ces nouveaux matériaux issus de la nanotechnologie permettent d'atteindre des coefficients de conductivité thermique 4 à 5 fois inférieurs à celui des isolants couramment utilisés.

Plusieurs nouvelles techniques à base de silice, de polyuréthane léger ou de polystyrène ont été déjà utilisées.

Les panneaux sous vide sont des supers isolants microporeux sous vide. Cette technique ancienne et connue est utilisée essentiellement en bonbonnes (bouteille Thermos technique ancienne et connue et est utilisée essentiellement en bonbonnes (bouteille Thermos vase Dewar). Elle voit se développer de nouveaux produits sur le marché. Ces techniques sont actuellement essayées dans des éléments plats. Plusieurs compositions à base de silice, polyuréthane léger sont présentes dans ces matériaux issus de la chimie.

Parmi les supers isolants microporeux, nous citerons les panneaux sous vide (VIP)

## I.5. Caractérisation de l'isolant thermique

Pour connaître la qualité d'un isolant, il faut connaître certaines valeurs dont le coefficient lambda et la résistance thermique. Par définition, les isolants ne conduisent pas la chaleur. La manière dont un matériau conduit la chaleur s'appelle la conductivité thermique.

### I.5.1. Coefficient de conductivité thermique $\lambda$ d'un matériau

Le coefficient de conductivité thermique  $\lambda$  d'un matériau est la quantité de chaleur écoulee (transmise) par conduction à travers un corps par unité de temps, unité de surface, unité d'épaisseur et degré de différence de température. Il se mesure en Watt par mètre Kelvin (ou W/m.K).

La valeur de  $\lambda$  dépend de nombreux paramètres physiques comme la porosité, la masse volumique, la pression et la température.

Plus le coefficient  $\lambda$  d'un matériau est petit, plus ce matériau est isolant.

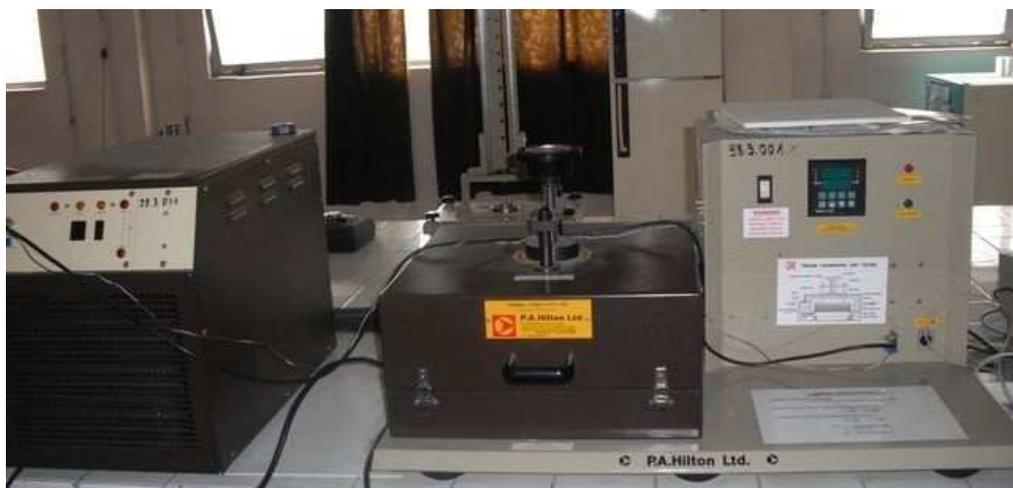


Figure I.1 : le CT mètre ou appareil de mesure de la conductivité thermique (ENIEM)

D'autres isolants avec leurs conductivités thermiques sont résumés dans le tableau suivant :

**Tableau I.1 : Les isolants thermiques**

	Masse volumique P	Conductivité thermique $\lambda$	Capacité thermique $\rho c$
Notation et unité	Kg/m <sup>3</sup>	W/(m.K)	Wh/ (m <sup>3</sup> .K)
<b>Matériaux d'isolation</b>			
Verre	25 à 30	1,20	
Polystyrène expansé	30 à 300	0,038	12
	15 à 30	1,042	09
	07 à 15	0,050	04
Plystyrène extrudé	20 à 30	0,028	
Polyuréthane (panneaux)	30	0,030	12
Polyuréthane (mousse)	27 à 60	0,039	17
Laine de verre	40 à 150	0,039	27
	15 à 40	0,041	08
	07 à 15	0,050	03
Laine de roche	40 à 200	0,045	34
	25 à 40	0,044	09
	15 à 25	0,050	06
Vermiculite	75 à 130	0,06 à 0,08	
Liège de cellulose	20 à 30	0,043	11
Liège expansé	100 à 150	0,049	65
Panneaux de chanvre	20 à 30	0,039	
Laine de coton en rouleaux	20	0,040	
Laine de mouton	20 à 50	0,060	16
	10 à 20	0,065	07

<b>Matériaux de construction à isolation répartie</b>			
Béton cellulaire	775 à 825	0,29	222
	575 à 625	0,21	167
	375 à 425	0,14	111
Béton de chanvre	400 à 450	0,11	213
Brique alvéolée (mono-mur)	700 à 750	0,12	202
Terre-paille	300 à 400	0,11	136
<b>Autres matériaux</b>			
Parpaing de ciment	850 à 950	0,9	250
Brique de terre cuite pleine	2300 à 2400	1,04	653
	1600 à 1700	0,64	458
Pisé	1770 à 2000	1,10	785

### I .5.2.Résistance thermique

Il faut savoir que les matériaux s'opposent à une « résistance thermique ». Celle d'un matériau isolant est généralement d'autant plus élevée que son épaisseur est grande et que son coefficient de conductivité ( $\lambda$ ) est faible. Cette résistance thermique R est calculée ainsi :

$$R = e / \lambda$$

R : s'exprime en  $m^2.K/W$ .

e : l'épaisseur du matériau exprimée en m.

$\lambda$  : la conductivité thermique.

Pour choisir un produit isolant ou d'isolation, on prendra en compte cette résistance thermique appelée R. Elle figure sur l'étiquette des produits. Plus R est important, plus le produit est isolant. Le coefficient global de transfert thermique (ou de transfert de chaleur) K : est la quantité de chaleur transmise à travers une unité de surface, par unité de temps et par degré de différence de température.

$$\mathbf{K} = \lambda / e$$

**K** : s'exprime en  $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ . Il s'appelle également coefficient global de transmission de chaleur.

Ce dernier ne tient pas compte de la convection et du rayonnement.

Pour caractériser les performances d'un matériau, on détermine le coefficient global de transfert thermique **K** ou la résistance thermique **R**.

$$\mathbf{R} = 1 / \mathbf{K}$$

l'inverse de **K** est exprimé en  $\text{m}^2 \cdot \text{C/W}$ .

Plus **K** est faible, plus le matériel est globalement isolant,

Plus **R** est élevé, plus le matériel est performant.

## Chapitre II

### GENERALITES SUR LES POLYMERES

#### II.1. Introduction

Le plus souvent synthétiques, quelquefois naturelles, les matières plastiques doivent leur essor à leur large gamme de caractéristiques, dures, molles ou élastiques, transparentes ou opaques, isolantes et quelquefois conductrices, plus ou moins résistantes aux conditions agressives de leur usage, toujours légères. C'est la nature particulière de leurs molécules en forme de chaîne, ainsi que la variété des modes d'assemblage qu'elles adoptent, qui est à l'origine de cette diversité.

Les polymères, appelés communément "matières plastiques", sont indissociables de notre environnement et de notre vie pratique. Ils se sont imposés dans tous les domaines de nos activités, des plus visibles aux plus cachés, des objets les plus banals jusqu'à des applications techniques sophistiquées, en passant par leur utilisation dans les produits d'hygiène ou alimentaires.

#### II.2. Historique [2]

Les polymères naturels ont été parmi les premiers matériaux utilisés par l'homme comme les bois et fibres végétales, cuir, tendons d'animaux, laine etc.

La notion de macromolécule n'est apparue que tardivement dans l'histoire de science des matériaux. Bien que présagée par certains chercheurs au début de XIX<sup>ème</sup> siècle, ce n'est que vers les années 1920-1930 que l'idée de macromolécule est acceptée par les chercheurs.

Les développements industriels consécutifs de la science macromoléculaire ont été accélérés ensuite par la seconde Guerre mondiale, quand les Etats-Unis ont été privés de leur approvisionnement en caoutchouc naturel en provenance d'Asie du Sud-Est, lors de leur entrée en guerre, ils ont lancé un immense programme de recherche visant à trouver des substituts de synthèse des plastiques.

#### II.3. Définition [3], [4]

Les polymères sont des matériaux à molécules géantes résultant de l'assemblage de molécules élémentaires appelées monomères. Les chaînes obtenues par la répétition de ces monomères vont avoir des tailles et des masses molaires très importantes, typiquement supérieures à  $10000 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ , masse à partir de laquelle les polymères vont donner un matériau sans mécanique du terme. Les polymères sont dans l'ensemble peu denses, compte

tenu de leur origine organique et, par la suite, de la présence d'éléments constitutifs légers (Carbone, Oxygène, Hydrogène, Azote). La liaison covalente des carbones est à la base de la notion de polymère. Il s'agit d'une liaison forte d'environ 100 à 450 kJ/mol (438 kJ/mol pour la liaison carbone-carbone). Par conséquent, les polymères possèdent une élasticité élevée dans le sens de la chaîne macromoléculaire.

Les polymères diffèrent des simples macromolécules parce qu'ils résultent de l'enchaînement aléatoire de monomères alors que les macromolécules (ADN, protéines) sont issues d'une succession codifiée d'éléments précis [3].

Parmi les matières plastiques, on distingue les homopolymères, répétition d'une unique structure moléculaire, et les copolymères, succession de plusieurs structures différentes.

Les homopolymères désignent donc des polymères fabriqués à partir d'un seul type de monomère, comme par exemple les polyéthylènes PE et polystyrène PS. Dès qu'au moins deux types de monomère participent à la formation des macromolécules, on parlera de Copolymères. C'est le cas du styrène-butadiène. La variété des copolymères est très importante. Ces matériaux possèdent des propriétés physico-chimiques et mécaniques intermédiaires avec celles obtenues sur les homopolymères correspondants.

## **II.4. Classification selon la morphologie**

On peut classer les polymères selon leur morphologie microscopique en polymères amorphes et semi-cristallin.

### **II.4.1. Les polymères amorphes**

Ils n'ont pas d'ordre apparent (structure semblable à un liquide) et pas de température de fusion précise, mais ils présentent une phase de ramollissement. Ils sont caractérisés par un faible retrait, une tenue au choc, une tenue dimensionnelle et une résistance au fluage.

### **II.4.2. Polymères semi-cristallins**

Ils ont une structure ordonnée dans une matrice amorphe. Le taux de cristallinité donne l'importance de la structure cristalline dans l'ensemble de la matière. Ce taux dépend de la matière et du refroidissement lors du moulage. Ils ont une bonne tenue à la fatigue, un faible coefficient de frottement, une bonne tenue chimique.

### **II.4.3. Classification selon la structure**

Les macromolécules sont obtenues par assemblage répétitif de motifs (monomères) associés, selon les conditions, en structures linéaires, ramifiées ou réticulées

### II.4.3.1. Structure linéaire

Les molécules des polymères linéaires sont formées de longues chaînes de monomères reliés les uns aux autres par des liaisons chimiques. Dans certains cas, les monomères sont en outre organisés régulièrement dans l'espace, et le composé obtenu se partiellement cristallise ; on dit qu'il est semi-cristallin.

Dans le cas où la macromolécule est composée de la répétition d'un seul motif, ce qui résulte le plus souvent de la polymérisation d'un seul type de monomère, on parle de homopolymère. Quand plusieurs motifs différents sont répétés, on parle de copolymère. On distingue ensuite plusieurs types de copolymères suivant l'organisation entre les différents monomères. Dans le cas le plus fréquent, on a un copolymère statistique où les différents monomères se mélangent en fonction de la réactivité et de la concentration de ceux-ci les propriétés mécaniques sont alors dans la moyenne. En revanche, dans un copolymère séquencé (anglicisme copolymère à blocs est parfois utilisé) ou copolymère alterné, il peut y avoir combinaison des propriétés mécaniques :

- **Copolymère statistique** : ABBAAAABBBABABAABABAB

- **Copolymère séquencé** : AAAAAAAAAABBBBBBBB

- **Copolymère alterné** : ABABABABAB

### II.4.3.2. Structure ramifié

Les polymères ramifiés se caractérisent par la présence de chaînes latérales qui sont raccordées aux chaînes principales. Faisant partie intégrante de la chaîne principale, les ramifications résultent des réactions latérales qui surviennent lors de la synthèse du polymère. Les ramifications latérales amoindrissent le potentiel de compaction d'une chaîne et, par conséquent, la masse volumique du polymère. Les polymères qui adoptent une structure linéaire peuvent aussi être ramifiés.

### II.4.3.3. Structure réticulé

Les monomères trifonctionnels, à trois liaisons covalentes actives, forment des réseaux tridimensionnels appelés polymères réticulés. Par ailleurs, les polymères comportant de très nombreuses liaisons transversales sont aussi des polymères réticulés.

De tels matériaux possèdent des propriétés mécaniques et thermiques distinctives; Elles sont plus rigides et résistent mieux au fluage. Les époxydes et les phénols formaldéhydes appartiennent à ce groupe.

## II.5. Caractéristiques des polymères [5]

Le développement de l'utilisation des matières plastiques dans tous les secteurs d'activités s'explique par le fait que les polymères sont, par leur caractéristiques, en parfaite adéquation avec les applications envisagées ; chaque polymère ayant des propriétés qui lui sont propres.

Les polymères ont remplacé d'autres matériaux par leur :

- Elasticité.
- Légèreté.
- Mise en forme.

### II.5.1. Elasticité

#### II.5.1.1. Comportement élastique

Il correspond à de petits déplacements réversibles des atomes autour de leur position d'équilibre dans le réseau cristallin. Sous l'action d'une force, les atomes s'écartent. Une réaction due aux forces de liaison tendant à les rapprocher provoque la réaction.

Pour les polymères non étirés et non renforcés, les caractéristiques d'élasticité sont indépendantes de la direction et le comportement élastique est linéaire.

Ce n'est pas le cas pour certains polymères pour lesquels le module d'Young varie avec l'amplitude de la déformation du fait de l'orientation des chaînes macromoléculaires, ce comportement correspond à des lois d'élasticité non linéaire.

#### II.5.1.2. Comportement plastique

Lorsque la limite d'élasticité est dépassée, les atomes du réseau cristallin ont changé de place sous l'action d'un effort de cisaillement.

La prise en compte des défauts du cristal, notamment des dislocations, est indispensable pour comprendre le comportement plastique.

Lorsqu'une déformation plastique est provoquée, on constate que la résistance à la déformation augmente car les dislocations interagissent entre elles et de nouvelles dislocations prennent naissance, venant augmenter les interactions, cette augmentation de la résistance à la déformation plastique est appelé l'écrouissage.

Si on relâche l'effort qui a provoqué la plasticité, on constate un retour élastique: le domaine élastique s'étend jusqu'à la contrainte qui était appliquée précédemment, ce qui se traduit par une augmentation de la limite élastique.

Ce phénomène est limité par l'apparition de microcavités qui provoquent une diminution de la section résistante et conduisent à la rupture ductile.

## II.6. Propriétés des polymères

### II.6.1. Masse volumique

La masse volumique est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité de volume. Elle est généralement notée par les lettres grecques  $\rho$  (rhô). Elle est déterminée par le rapport :

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Où  $m$  est la masse de la substance homogène occupant un volume  $V$ .

L'unité de mesure de la masse volumique  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  ou  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .

La masse volumique varie selon plusieurs paramètres. Elle dépend notamment de la température.

### II.6.2. Indice de fluidité

Indice de Fluidité (IF) ou Le Melt Flow Index (MFI), est une méthode communément utilisée dans l'industrie des plastiques pour la caractérisation des matériaux thermoplastiques, surtout les polyoléfines. Elle permet d'estimer leur extrudabilité, par ailleurs elle renseigne sur la masse moléculaire moyenne de l'échantillon. L'appareil est essentiellement un plastomère à extrusion à poids, la masse est écoulee à travers une filière cylindrique d'une matière thermoplastique à l'état fondu, dans des conditions définies de température et de pression, ensuite on mesure la masse écoulee pendant un temps donné (valeur du débit massique exprimée en g/10 min).



Figure II.1. Machine indice de Fluidité (MFI) utilisé à ENIEM (LABO)

### II.6.3. Propriétés thermiques

#### II.6.3.1. Température de fusion

Le point de fusion ou la température de fusion d'un corps représente la température à une pression donnée, à laquelle un élément pur ou un composé chimique fond c'est-à-dire passe de l'état solide à l'état liquide.

Il est possible de déterminer la nature d'une substance (identification) par la mesure de sa température de fusion. C'est pourquoi la température de fusion est une propriété caractéristique de la matière.

Tableau II.1 : Point de fusion de quelques polymères

Type	Sigles	Point de fusion
Acrylonitrile butadiène styrène	ABS	130 °C
Polyamide 6	PA6	220 °C
Polycarbonate	PC	230 °C
Polyester thermoplastique	PET	255 °C
Polyester thermoplastique transparent	PETG	255 °C
Polyétheréthercétone	PEEK	220 °C
Polyéthylène basse densité	PEBD	~ 100 °C
Polyéthylène haute densité 300	PEHD	130 °C
Polypropylène	PP	PP 163 °C
Polystyrène	PS	160 °C
Polychlorure de vinyle	PVC	125 °C

### ***II.6.3.2. Température de ramollissement Vicat***

Le point de ramollissement Vicat ou la dureté Vicat indique, par la mesure d'un enfoncement de 1 mm d'une aiguille donnée, la température à laquelle la résistance mécanique d'une matière thermoplastique devient insuffisante. Le point Vicat est lié à la résistance du matériau. Le dispositif est appelé appareil de Vicat.

## **II.6.4. Propriétés mécaniques**

### ***II.6.4.1. Contrainte au seuil d'écoulement en traction***

La limite d'élasticité est la contrainte à partir de laquelle un matériau cesse de se déformer d'une manière élastique, réversible et commence donc à se déformer de manière irréversible.

Pour un matériau fragile, c'est la contrainte à laquelle le matériau se rompt, notamment du fait de ses microfissures internes.

Pour un matériau ductile, les déformations subies au-delà de la limite d'élasticité restent permanentes, ce sont des déformations plastiques. Elles se mesurent ou se vérifient habituellement à l'aide d'un essai de traction.



Figure II.2. Machine de traction

#### ***II.6.4.2. Résistance à la rupture***

La résistance à la traction, ou charge maximale, est définie par la contrainte  $\sigma_m$  correspondant à la contrainte maximale sur la courbe de traction. Cette valeur est en général différente de la charge à la rupture à cause du phénomène de striction. Pour des applications pratiques, c'est la résistance à la traction  $\sigma_m$  qui est couramment utilisée et qui caractérise la résistance d'un matériau.

#### ***II.6.4.3. Allongement à la rupture***

L'allongement à la rupture noté  $A\%$  est une caractéristique sans dimension des matériaux. Elle définit la capacité d'un matériau à s'allonger avant de rompre lorsqu'il est sollicité en traction.

Un allongement à la rupture élevé caractérise un matériau ductile, par contre un allongement à la rupture faible caractérise un matériau fragile.

#### II.6.4.4. Module de Young en traction

Le module d'Young ou module d'élasticité (longitudinale) ou encore module de traction est la constante qui relie la contrainte de traction (ou de compression) et le début de la déformation d'un matériau élastique isotrope.

#### II.6.4.5. Résistance au choc

La résistance au choc mesure la résistance du matériau à la rupture brutale, deux essais sont fréquemment utilisés : **Charpy et Izod**, donne une valeur en quantité d'énergie dissipé (joule).



Figure II.3. Mouton CHARPY

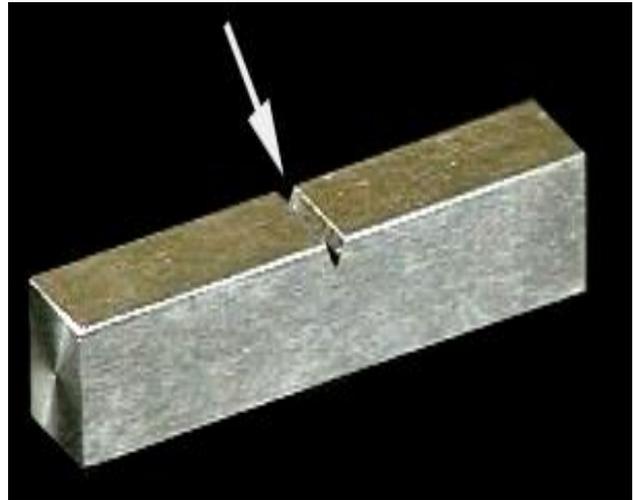


Figure II.4. Eprouvette de CHARPY

#### II.6.4.6. Dureté

La dureté d'un matériau définit la résistance qu'oppose une surface de l'échantillon à la pénétration d'un poinçon il existe une grande variété d'essais de dureté possibles, ils sont très utilisés en contrôle qualité pour comparer ou estimer la résistance ou la rigidité des matériaux.



Figure II.5. Machine de dureté

- **Exemple des polymères :**

- Polymères issus de la polymérisation d'un seul monomère (polyéthylène, PVC, téflon, polypropylène, polyacrylates, plexiglas).
- Polymères issus d'une polycondensation, donc de deux substances (nylon, orlon, PET, résine urée-formol, bakélite, résine mélamine).
- Polymères naturels (cellulose, amidon, lignine du bois) et les polymères artificiels (majorité).
- Polymères fabriqués en masse, et d'autres fabriqués en émulsion (colle à bois, peintures acryliques).
- Polymères solubles dans l'eau (polyvinyle alcool, slime, gomme arabique, gomme guar pour crème glacée, pepsine pour confiture).
- Polymères simples faits à partir de monomères purs (voir les précédents) et des copolymères faits à partir d'un mélange de monomères peu différents les uns des autres (copolymère d'éthylène et de propylène).
- Polymères composites. Ce sont des polymères thermoplastiques dans lesquels on a incorporé des solides à chaud. (tuyaux de canalisation et pneus de voiture contenant du carbone, semelles de ski et raquettes de tennis contenant des fibres de carbone, polyéthylène contenant de l'amidon pour le rendre biodégradable).

- Existence d'une série unique des silicones qui n'adhèrent sur aucune matière connue.  
Dans notre travail, on s'intéresse beaucoup plus aux plastiques en particulier les thermodurcissables.

## II.7. Les plastiques

### II.7.1. Définition [6]

Le terme "matière plastique" réfère premièrement à un état de fusion à haute viscosité, ce qui est une propriété importante pour la transformation.

Un deuxième élément de la définition est la structure organique de cette matière. Leur structure chimique est proche de celle d'une matière organique naturelle, d'origine animale ou végétale. Les matières premières pour la synthèse des plastiques sont d'ailleurs des fractions ou des dérivés du pétrole, lui-même résidu d'un monde animal et végétal abondant dans un passé lointain.

Le troisième aspect est la structure macromoléculaire, le chimiste fait la synthèse des plastiques en liant entre eux des composants chimiques élémentaires appelés les monomères.

Ces monomères sont des molécules simples, composées de quelques atomes. Les nouvelles structures ainsi obtenues, les macromolécules ou « polymères » contiendront des milliers d'atomes. Cette technique de synthèse est appelée en général « polymérisation ».

On distingue deux types de polymères, les homopolymères, qui sont la répétition d'une unique structure moléculaire et les copolymères, qui sont la répétition de plusieurs structures différentes.

Ils existent plusieurs types de copolymères suivant la manière dont les motifs monomères sont répartis dans les chaînes moléculaires (voir la figure I.1).

- Copolymère statistique : les différents motifs monomères se mélangent en fonction de la réactivité et de la concentration de ceux-ci.
- Copolymère séquencé : il peut être un copolymère à blocs ou un copolymère alterné.

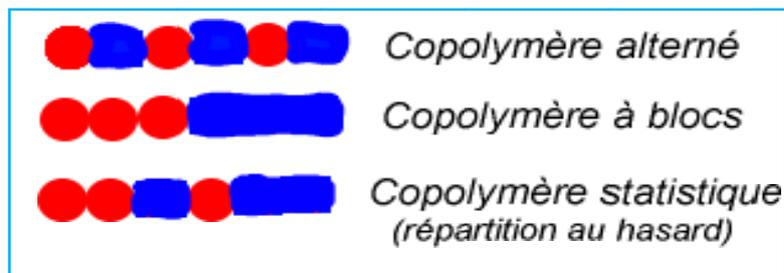


Figure II.6. Différents types de copolymères

## II.7.2. Les familles des plastiques

### II.7.2.1. Les thermoplastiques

Les matériaux thermoplastiques ou thermoplastes sont des solides généralement solubles, formés de chaînes distinctes bien compactes, liées entre elles par des seules liaisons secondaires (forces de **van der Waals** ou dipolaires, liaisons d'hydrogène, etc.) et mis en forme (même de façon répétitive) par chauffage et refroidissement.

Le polymère thermoplastique se ramollit lorsqu'elle est chauffée au-dessus d'une certaine température, mais qui, au-dessous, redevient dure ( $T_g$  température de transition vitreuse) Une telle matière conservera donc toujours de manière réversible sa thermo-plasticité initiale. Cette qualité rend le matériau thermoplastique potentiellement recyclable (après broyage). Cela implique que la matière ramollie ne soit pas thermiquement dégradée et que les contraintes mécaniques de cisaillement introduites par un procédé de mise en forme ne modifient pas la structure moléculaire et que L'état de ramollissement permet leur déformation sous l'action de contraintes mécaniques, cette déformation étant figée par le refroidissement.

On citera les polymères thermoplastiques les plus utilisés dans le tableau suivant:

**Tableau II.2 : Les matières thermoplastiques les plus courantes et leurs domaines d'utilisation.**

NOM SCIENTIFIQUE	ABREVIATION	NOM COMMERCIAL	MATIERES PREMIERES	APPLICATIONS
VINYLIQUES 1. Acétate de polyvinyle	PVAC	Movolith Velit Vinylbel	acétylène ou éthylène + acide acétique	finition pour mur et sol, adjuvant pour béton
2. Chlorure de vinyle	PVC	Benic Hostalit Vinoflex	acétylène ou éthylène  + chlore	tubes flexibles, tuyaux, gouttières, tôles ondulées, profilés, planchettes, volets, châssis de fenêtres, feuilles, carrelages, membranes pour toitures
POLYOLEFINES 1. Polyéthylène  * faible densité  * haute densité	PE  PELD  PEHD	Lupolen  Escorene  Finathène	éthylène	tubes flexibles, tuyaux, mousse pour étanchéité de joints, mousse pour isolation de conduites, mousse pour isolation acoustique.
2. Polypropylène	PP	Hostalen PPEltex PP Carlona	propylène	tuyaux (eaux chaudes, liquides agressifs)
STYRENIQUES Polystyrène	PS	Styropor Vestypor styron	benzène + éthylène	isolation thermique, béton léger...

**II.7.2.2. Les élastomères [7], [8]**

Les élastomères sont composés de macromolécules linéaires de grande souplesse, les liaisons chimiques forcent les macromolécules à revenir immédiatement à leur configuration originale après une déformation, de là leur comportement caoutchouteux à une température de transition vitreuse. Ils sont utilisés dans plusieurs domaines comme la fabrication de pneumatiques, bondes transporteuses (les tuyaux), joints, gants médicaux, chaussures, etc. Ils existent des matériaux comme les polyuréthanes qui sont sous forme de thermdurcissables aussi que d'élastomères.

**Tableau II. 3: Les élastomères les plus courants et leurs domaines d'utilisation**

Nom Scientifique	Abreviation	Nom commercial	Matières premières	Applications
Caoutchouc-styrène-butadiène	SBR	buna-S GR-S	styrène + butadiène	employé généralement pour remplacer le caoutchouc naturel
Caoutchouc-isoprène	IR	GR-I	isoprène	moules (fabriqués par injection)
Caoutchouc-butadiène	BR	GR-B	butadiène	où la durabilité et la résistance à l'usure sont importantes
Caoutchouc-polysulfure	PR	thiocol GR-P	tétrasulfure de soude  + anhydride	idem  mastics plastiques pour jointoyer

Caoutchouc-éthylène-propène	EPR EPDM	nordel	éthylène + propène	moules, pièces de fermetures, membrane de toitures, pièces restant constamment au contact de l'air, des intempéries des fluctuations de température et des agents chimiques...
-----------------------------	-------------	--------	--------------------	--

Ils existent aussi des matériaux qui appartient à une classe qui se situe entre les thermoplastiques et les élastomères d'ailleurs cette classe de matériaux, appelés les élastomères thermoplastiques, ils ont des propriétés intermédiaires.

### ***II.7.2.3. Les thermodurcissables [7], [8]***

Les thermodurcissables ont un réseau macromoléculaire tridimensionnel, ce dernier résulte de la réticulation des polymères linéaires (monodimensionnels). Ils sont souvent préparés par la réticulation de deux composants (dont l'un est une résine) qui réagissent sous l'action de la chaleur en présence de réactifs ce qui conduit à leur durcissement de façon irréversible, la structure tridimensionnelle formée est stable et elle présente une résistance thermomécanique et chimique ; Cette structure est très rigide et résistante à la température.

Un matériau thermodurcissable ne peut être mis en œuvre qu'une seule fois et devient infusible et insoluble après polymérisation. Une fois durci, sa forme ne peut plus être modifiée, un chauffage éventuel ne permettra pas de le fondre c'est-à-dire qu'il n'est pas recyclable, mais on peut l'incorporer dans d'autres matériaux comme renfort.

Les matériaux thermodurcissables sont généralement plus résistants que les matériaux thermoplastiques. On leur reconnaît une très bonne résistance diélectrique, mécanique, et à la chaleur et ils gardent leur rigidité et leurs autres propriétés mécaniques jusqu'à la température de décomposition.

On citera les polymères thermodurcissables les plus utilisés dans le tableau suivant

**Tableau II.4: Les matières thermodurcissables les plus courantes et leur domaines d'utilisation.**

Nom scientifique	Abreviation	Nom commercial	Matières premières	Applications
POLYURETHANE	PUR	DuromerBaydur	polyalcools + polyisocyanates	colles, laques, profils de fenêtres, mousse d'isolation...
PHENOPLASTE 1. Phénol-formaldéhyde	PF	Bakélite Hostaset Durez	Phénol + formaldéhyde	colles, moules, interrupteurs, mousse d'isolation...
2. Mélamine-formaldéhyde	MF	Formica RésopolUltrapas	Mélamine + formaldéhyde	colles, recouvrements minces et durs...
POLYESTER	UP	Leguval Palatal	acide maléique + glycérol	Tubes flexibles, gouttières, coupoles, tôles ondulées, profilés de bord de toitures, élément de façade, réservoirs, fosses septiques, finition de sol, laques...
RESINE EPOXY	EP	AralditEpikoteLek utherm	épichlorhydrine (chlore et éthylène) + diphénylpropane (phénol et acétone)	colles, isolateurs, finition de murs et de sols, réparation de béton...

Parmi les thermodurcissables, on trouve la mousse polyuréthane rigide qui fera l'objet de notre travail dans le chapitre III.

## Chapitre III

### MOUSSE POLYURETHANE RIGIDE

#### III.1. Historique [9]

En 1849 la réaction de moussage fut découverte par Charles Adelphe Wurtz, la fabrication du premier frigo électrique a été réalisée en 1913 et la première commercialisation en masse de frigos été en 1927 par la société "General Electric ". La première synthèse de l'uréthane été réalisée par Otto Bayer en Allemagne en 1937 et sa production industrielle n'a commencé qu' à partir de 1940 en raison du manque de ressources par la Seconde Guerre mondiale. Les technologies de l'uréthane ont été amenées aux Etats-Unis en 1953 par Jean-Pierre Abbat et Fritz Hartmann. La première planche de surface en polyuréthane a été fabriquée et utilisée pour la première fois en 1950. l'introduction des nouveaux produits synthétiques comme le CFC, HCFC, HFC été dans les années 1970. En 1987 le Protocole de Montréal a imposé la diminution et la fin de la production des CFC . Avec les technologies modernes, les agents gonflants sont aujourd'hui plus avantageux qu'à l'époque, on peut citer parmi eux le cyclopentane qu'on utilise actuellement pour l'expansion des mousse polyuréthanes rigides qui assurent l'isolation thermique des réfrigérateurs à l'ENIEM.

#### III.2. Introduction

Les polyuréthanes occupent une place privilégiée dans le domaine des polymères, en raison de leurs propriétés et domaines d'applications.

La mousse de polyuréthane est l'isolant le plus efficace et le plus performant disponible sur le marché. Elle procure un rendement supérieur à tous autres types d'isolant. [10, 11].

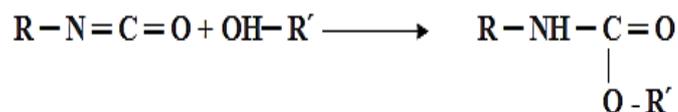
Elle présente la particularité d'être l'un des produits plastiques actuels que le transformateur moule directement à partir de monomères (les autres matières étant utilisées essentiellement à partir de polymères) [12]

Grâce à leurs caractéristiques et à la relative facilité de leur mise en œuvre, Les polyuréthanes, sont des produits dont l'évolution n'est pas encore terminée.

#### III.3. Généralités sur les mousses de polyuréthane

Un polyuréthane est un polymère d'uréthane, c'est une molécule organique. On appelle uréthane, ou plus couramment « carbamate », tout composé produit par la réaction d'un isocyanate et d'un alcool selon la réaction de base suivante :

**Iso cyanate + Polyol  $\longrightarrow$  Uréthane**



### III.3.1. La mise en œuvre des polyuréthanes

Les mousses de polyuréthane résultent de la réaction chimique d'un polyisocyanate avec des groupements ayant un hydrogène mobile, principalement des groupements hydroxyles. Cette réaction exothermique peut s'accompagner d'un dégagement gazeux, qui permet une expansion plus ou moins marquée de la mousse. D'autres réactions permettent d'obtenir des réseaux plus ou moins structurés. Ces réactions facilitées par des catalyseurs s'effectuent rapidement et à température ambiante, ce qui permet des cycles rapides de production, en grandes quantités.

Les polyuréthanes sont des matériaux dont les performances sont très variées selon les associations chimiques que l'on réalise, on trouvera aussi bien des variétés thermoplastiques que les variétés thermodurcissables ou élastomères [13]

Cette facilité des poly iso cyanates à réagir pour donner des polyuréthanes, et également des polyuries, permet une très large gamme d'applications s'accompagnant d'une grande variété de duretés et de masses volumiques.

Cela va de produits très souples et légers (dossiers d'ameublement) à des produits de hautes caractéristiques mécaniques (élément de cœur artificiel, pièce structurale d'automobile), sans oublier les peintures et adhésifs. Les mousses souples (légèreté et souplesse) et les mousses rigides (rigidité et bonne isolation thermique) constituent les tonnages les plus élevés de ce polymère. D'autres applications couvrent tous les secteurs de la vie industrielle et domestique.

## III.4. Type de mousses polyuréthane

### III.4.1. Mousses souples

Parmi ces mousses on trouve les mousses souples en bloc ; leur masse volumique est de 10 à 60 Kg/m<sup>3</sup>. Les cellules sont en majeure partie ouvertes (95%). On les obtient à partir de polyesters ou de polyéthers et de TDI [14].

A la sortie de la tête de mélange, le produit est déposé sur une courroie transporteuse recouverte de papier. La montée de la mousse s'effectue alors que la courroie progresse (épaisseur maximale 1m). Ces mousses servent en automobile (sièges en mousses découpées), literie (matelas), ameublement, textile, (tissu avec mousse contrecollée).

On peut trouver aussi les mousses souples moulées ; elles sont obtenues à base de polyéthers. Les moules métalliques défilent sous la tête doseuse de la machine de mélange. Le moule refermé est envoyé en étuve (8 à 20 min de 140 à 190 °C).

La mousse est démoulée. Ces mousses trouvent des applications dans le transport (sièges, accoudoirs, appuie-tête pour train, voitures, avions...) dans l'ameublement (fauteuils) dans les loisirs (jouets, poupées, ours, intérieurs de chaussures de ski) [15].

### **III.4.2. Mousses semi-rigides**

Ce sont des mousses intermédiaires entre les qualités souples et rigides. La caractérisation essentielle de ces mousses est leur pouvoir amortissant. Elles peuvent être fabriquées en blocs continus et sont alors essentiellement à base de polyester. Découpées, elles servent à la confection de divers articles tel le rembourrage des pare soleil de voiture [16]. On les rencontrera avec ou sans peau intégrée, les mousses à peau intégrée (cœur cellulaire à peau compacte) permettent la réalisation directe de pièces d'aspect. On injecte un mélange avec un agent physique d'expansion. Les moules métalliques sont froids (20 à 30°C) et leur inertie chimique empêche la gazéification de l'agent moussant (réalisation d'une peau compacte) alors qu'à cœur, la réaction exothermique favorise sa gazéification (température d'ébullition du produit dépassée).

On obtient ainsi des accoudoirs, planches de bord, volants automobiles [15].

- La densité des mousses semi-rigides varie de 30 à 90 Kg/m<sup>3</sup>.
- La résistance à la traction de 1,5 à 203 Kg/m<sup>3</sup>.
- L'allongement à la rupture de 70 à 85 %.
- L'élasticité au choc de 20 à 40 % [69].

### **III.4.3. Mousses rigides**

La mousse présente un matériau idéal lorsqu'il s'agit de remplir des cavités dans le but de l'isolation thermique (par exemple entre l'enveloppe intérieure et le carter extérieur d'un réfrigérateur ou l'isolation d'un tuyau métallique par expansion de mousse entre le tuyau et un chemisage en tôle) ou d'isoler des parois, même verticales, par des revêtements, lorsqu'il s'agit aussi de fabriquer des panneaux sandwichs.

Leur intérêt réside dans la facilité de mise en œuvre: coulée ou projection, et par la possibilité de pouvoir réaliser l'expansion à température ambiante.

Les mousses de polyuréthane rigide (PUR) sont utilisées depuis longtemps pour la réalisation de matériaux de structure et de revêtements divers [17, 18].

Il n'y a pas de cuisson mais les moules doivent être préchauffés au moins entre 40-49°C. Selon le produit on trouvera la mise en œuvre manuelle, le moulage par injection réaction, la projection au pistolet

Ces mousses rigides ont d'excellentes propriétés d'isolation thermique dans une large plage de température (-30 °C, +70 °C).

La résistance chimique est bonne et l'accrochage pendant le moussage est satisfaisant sur le bois, béton, métal, céramique....

Les mousses rigides se rencontrent dans l'isolation thermique. En choisissant une expansion physique adéquate, On obtient des panneaux fabriqués en usine pour l'électroménager (réfrigérateur) le bâtiment ou des produits à mettre en œuvre sur place [remplissage

d'espace creux en bâtiment ou projection sur murs, plafonds ...isolation de combles inaccessibles), Comme le montre la figure III.1:

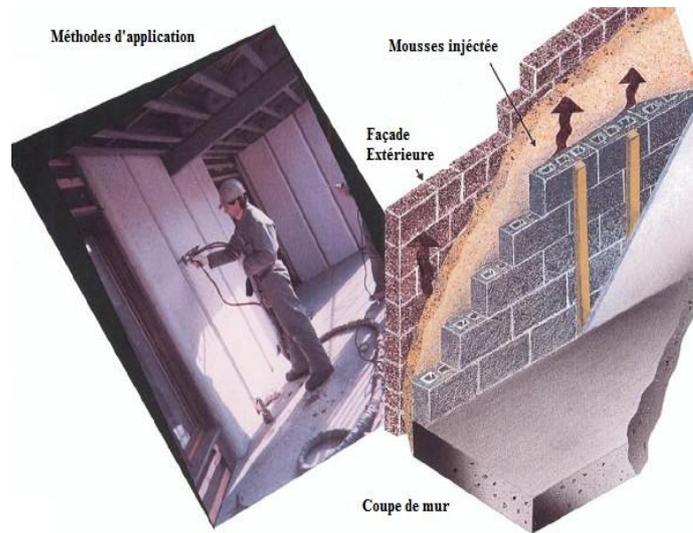


Figure. III.1: Méthode d'application de la mousse de polyuréthane injectée dans le domaine de l'isolation du bâtiment [19].

La figure III.2 nous montre le comportement en compression de la mousse de polyuréthane

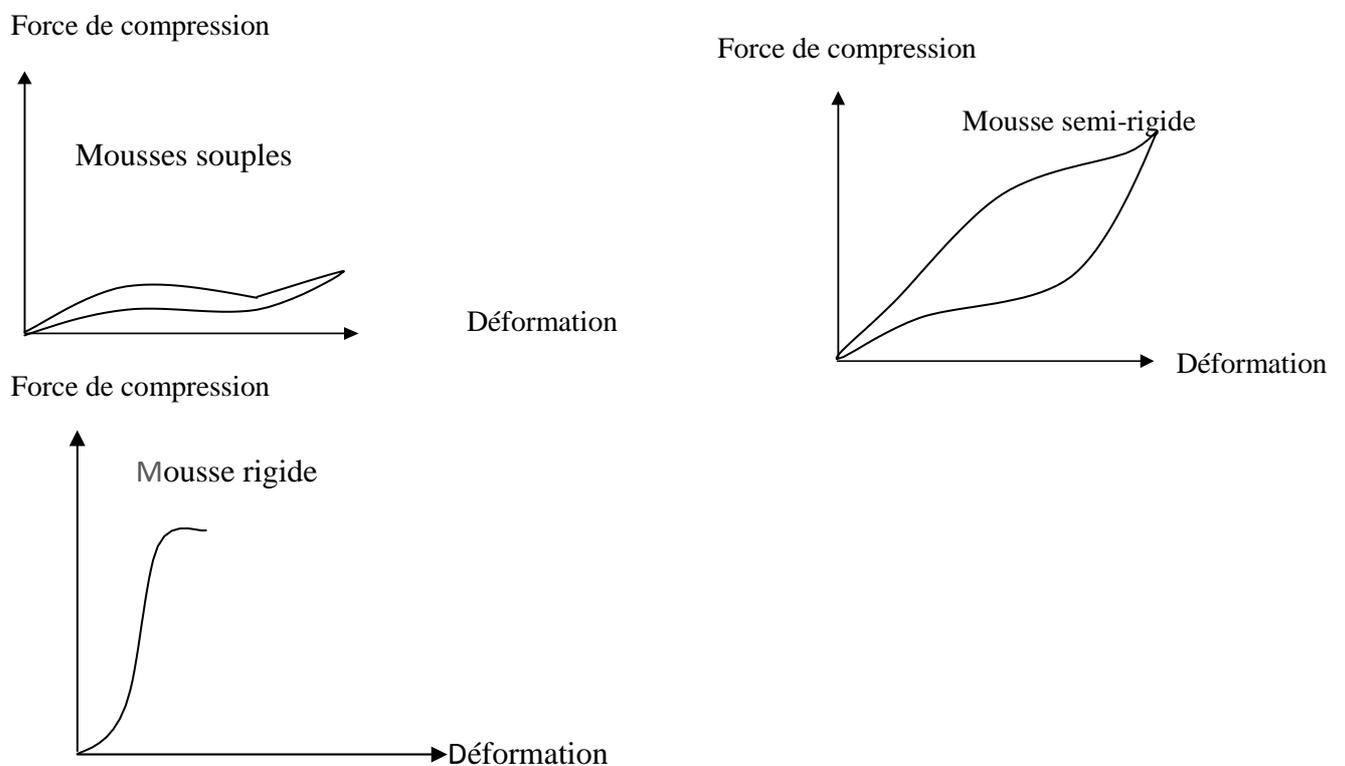


Figure. III.2: Comportement en compression de mousses PUR. ...) [15]

### III.5. Conductivité thermique

La conductivité thermique ( $\lambda$ ) est une caractéristique propre à chaque matériau. Elle indique la quantité de chaleur qui se propage par conduction thermique :

- en 1 seconde,
- à travers 1 m<sup>2</sup> d'un matériau,
- épais d'un 1 m,
- lorsque la différence de température entre les deux faces est de 1 K (1 K = 1 °C).

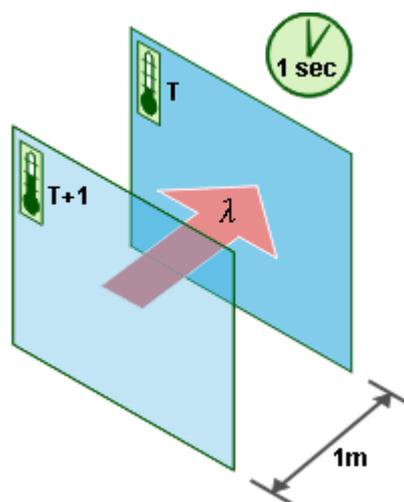
La conductivité thermique s'exprime en **W/mK**.

Plus la conductivité thermique est élevée, plus le matériau est conducteur de chaleur. Plus elle est faible, plus le produit est isolant.

Ce coefficient n'est valable que pour les matériaux homogènes. Il n'a pas de sens pour les matériaux hétérogènes à travers desquels la chaleur se propage en même temps par conduction, convection et rayonnement.

Le coefficient de conductivité thermique  $\lambda$  d'un matériau varie en fonction de la température et de l'humidité de celui-ci.

Les documentations technico commerciales des matériaux devront donc préciser avec la valeur de la conductivité thermique  $\lambda$ , les conditions dans lesquelles cette valeur est obtenue (et utilisable!). On tâchera de s'approcher des valeurs normales d'utilisation (Température entre 10 °C et 20 °C).



### III.5.1. Coefficient thermique pour différents types de mousses

Tableau III.1 : Coefficient d'isolation thermique pour différents matériaux

Isolant	Coefficient d'isolation Kcal/m <sup>2</sup> /h/°C/m)
Mousse rigide de PUR (expansée au N)	0.014-0.018
Mousse rigide de PUR (expansée au CO <sub>2</sub> )	0.025-0.30
Mousse rigide urée formol	0.032
Mousse rigide Polystyrène et phénolique	0.034
Laine de verre et de roche	0.035
Liège expansé	0.037
Aggloméré fibres minérales	0.040
Bois aggloméré	0.055

### III.6. Définition de la mousse polyuréthane rigide [20]

La mousse est un polymère dont les alvéoles, ouverts ou fermés, qui sont produits par l'expansion chimique ou physique d'un gaz, lui assurent une propriété très recherchée qui est l'**isolation thermique**.

La mousse polyuréthane rigide "PUR" est l'association de deux composants liquides principaux qui sont : le polyol et poly iso cyanate mélangé avec un agent d'expansion, ce dernier provoque l'augmentation de volume des vides au sein du polymère.

La partie (A) est un liquide visqueux qui a couleur foncée, appelé iso cyanate, la partie (B) est aussi un liquide visqueux avec une couleur ambre, d'une apparence miel collant et peut avoir une forte odeur d'ammoniacale, communément appelé polyol, lorsque les liquides (A) et (B) sont mélangés, il en résulte une couleur ambre, mélange épais qui régite en quelques secondes pour former une mousse dure, cette réaction se produit, en présence d'agent gonflant appelé aussi l'agent d'expansion qui est le cyclopentane qui provoque l'augmentation de volume des vides au sein du polymère, cette réaction dégage une importante quantité de chaleur dont une partie sert à faire évaporer les liquides volatils (agents gonflants), assurant ainsi l'expansion du mélange réactionnel et sa transformation en mousse.

### III.7. Matières premières rentrant dans la formulation des polyuréthanes

#### III.7.1. Les iso cyanate

Parmi les iso cyanates les plus utilisés pour la fabrication des mousses de polyuréthane on trouve les iso cyanates aromatiques, plus au moins réactifs selon leur structure et leur degré de purification ce sont essentiellement:

Le diphenyle méthane di iso cyanate (MDI) et ses homologues supérieurs largement utilisés pour la fabrication des mousses rigides (mousses pour isolation thermique).

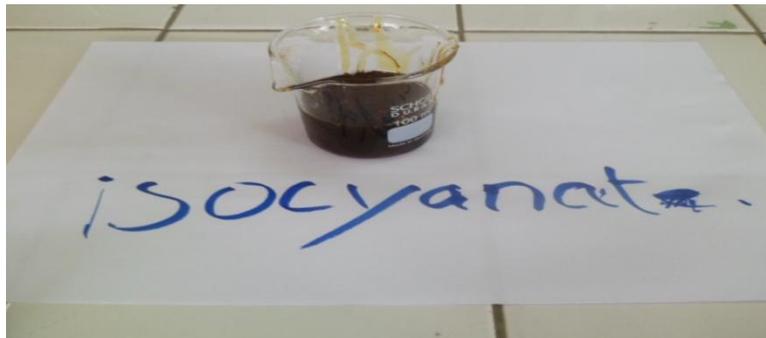


Figure III.3. Iso cyanate

##### III.7.1.1 Les iso cyanates aromatiques (HDI, IPDI)

Ils sont réservés aux produits ne devant pas jaunir au cours du vieillissement (peintures) [13].

On utilise un mélange MDI + TDI pour les mousses hautes élasticités ou haute résilience [15].

Les iso cyanates aliphatiques très toxiques et de prix élevé sont réservés aux applications devant résister à la lumière.

##### III.7.1.2. Toluène di iso cyanate (TDI)

Le composé de base est le toluène. IL subit une opération de nitration puis l'action du phosgène  $\text{COCl}_2$  permet l'obtention du groupement réactif.

Le processus de fabrication permet l'obtention d'un mélange d'isomères dans le rapport 80/20:

- 80% molaire de TDI-2,4, c'est-à-dire avec une position para réactive et une ortho peu réactive ;
- 20% molaire de TDI-2,6, c'est-à-dire avec deux positions *ortho* peu réactives. C'est un produit très fluide ( $h = 3 \text{ MPa} \cdot \text{s}$ ) avec une odeur très forte.

Ces produits peuvent être utilisés séparément ou en mélange. Ce sont des liquides bouillant à 106-107°C sous pression atmosphérique, mais ayant des points de solidification entre 5°C et 21° C, suivant la teneur en isomère : 2-6

Point d'inflammation: 127°C.

Ils sont surtout employés dans la fabrication des mousses à base de polyesters ou de polyéthers. [16]

**III.7.1.3. Le diphenyle méthane di iso cyanate (MDI)**

Le MDI pur est le diphenyle méthane di iso cyanate-4,4'. Il est peu stable à température ambiante et fond à 38 °C. Il di merise à faible température et précipite, ce qui rend son stockage difficile et nécessite la réalisation de produits modifiés. Il sert surtout à la fabrication des élastomères de polyuréthane par réaction avec des polyesters, à base d'acide adipique et de tri-éthylène-glycol. En raison de sa faible tension de vapeur, il agit moins sur l'organisme que les précédents. [16]

Le produit le plus courant est le MDI brut avec *n* voisin de 2,7. Il s'agit d'un produit brun visqueux Il nécessite des opérations de réglage de fonctionnalité, réactivité et viscosité. Chaque variété de MDI est spécifique à une application bien définie.

**Tableau III.2. Application des iso cyanates**

<b>Di isocyanates et poly isocyanates utilisés dans les applications de polyuréthane</b>	<b>Champs d'application</b>
<b>TDI, PMDI</b>	Mousse souple par extrusion et moulage
<b>TDI, PMDI</b>	Mousse rigide, collage sur place
<b>PMDI</b>	Mousse rigide, moulage, extrusion et vaporisation
<b>PMDI, HDI</b>	Liant
<b>MDI et PMDI</b>	Élastomères Moulage par injection
<b>MDI, TDI, NDI, HMDI, TMXDI</b> <b>Prépolymères</b>	Élastomères Moules d'élastomères
<b>HDI, TDI et IPDI</b> <b>Poly iso cyanates et HMDI Poly iso cyanates</b>	Revêtements Peinture à deux composantes

<b>MDI, TDI,</b>	Revêtements flexibles à une Composante, apprêt et scellant
<b>PMDI</b>	Mousse rigide de structure

### III.7.2. Les polyols (polymères poly-hydroxylés)

Un polyol est défini par deux paramètres principaux :

- Nombre de groupements réactifs intervenant dans la réaction :

Il s'exprime sous la forme d'indice d'hydroxyde  $I_{OH}$ , ou le nombre de fonctions OH par kilogramme de produit  $f_{OH}$  /kg.

- Fonctionnalité

Nombre de fonctions réactives : 2 pour un diol, 4 pour un quadrol.

L'affinité du groupement iso cyanate avec les atomes d'hydrogène et la possibilité industrielle d'obtenir des produits hydroxylés conduisent à l'utilisation d'une grande variété de polyols pour la formation du réseau uréthane.

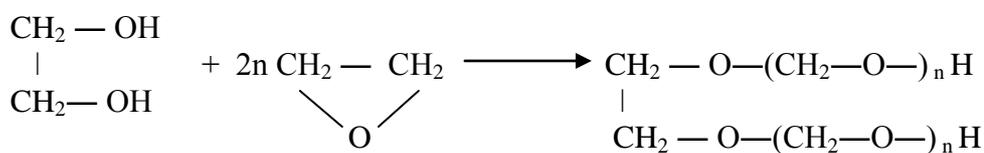
Deux types de polyols sont couramment utilisés dans la chimie des polyuréthanes :

#### III.7.2.1. Les polyols polyéthers

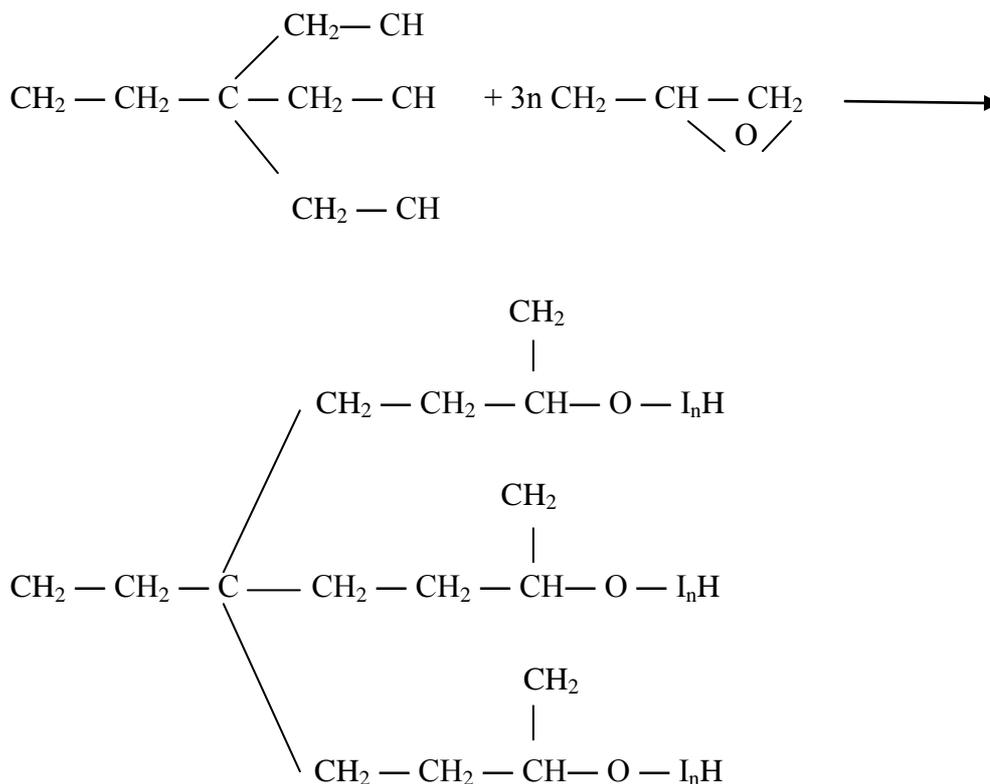
Ce sont les polyols les plus utilisés, donnent des produits plus élastiques. ) [13]

Les mousses de polyuréthane fabriquées à base des polyéthers résistent à l'humidité [15]

Exemples de polyéthers:



**Diol + Oxyde d'éthylène Triol**



Triol + Oxyde de propylène

**III.7.2.2. Les Polyols polyesters**

Pour certaines applications (fabrications des isolants ignifuges), il est nécessaire d'utiliser des composés ayant une bonne tenue à chaud et une bonne résistance à l'abrasion. L'emploi de polyols polyesters est alors recommandé. [10]  
 Il s'agit de produits résultant de la polycondensation de polyols sur des polyacides (ou leurs anhydrides).

Ils portent une meilleure tenue chimique, ils offrent une bonne résilience et une bonne tenue aux huiles, aux essences [15]. cependant leur principal inconvénient est la tendance à l'hydrolyse limitant la résistance dans des conditions sévères d'humidité.



Figure III.4 : Polyol

### III.7.2.3. Les composants rentrants dans la composition chimique des polyols

#### a- Les Catalyseurs

La formation de polyuréthanes et le dégagement de gaz carbonique ont lieu naturellement avec une vitesse de réaction assez lente. Il est nécessaire d'activer ces réactions, tout en évitant des réactions secondaires néfastes à la qualité du réseau. Il existe deux types de systèmes catalytiques.

#### b- Les catalyseurs aminés

La présence d'un doublet électronique sur l'azote permet aux amines, principalement les amines tertiaires, de jouer un rôle primordial dans la formation du gel et de l'expansion. La formule devra être établie en cherchant l'obtention d'une réaction très fluide (répartition homogène dans le moule) et d'une polymérisation la plus rapide possible [21].

Les amines diffèrent selon:

- L'encombrement stérique ;
- La volatilité et l'odeur ;
- La longueur de la chaîne et la structure ;
- La solubilité dans le milieu.

L'amine la plus utilisée est la tri éthylène diamine,

Dans le domaine des mousses souples, on trouve aussi le bis-2-di méthyle amino éthyle éther, Octoate stanneux [14].

Dans le cas des mousses rigides, l'amine la plus utilisée est la DMCHA (diméthylcyclohexyl amine).

#### c- Les catalyseurs métalliques

Dans le cas des mousses dites classiques, il est nécessaire d'activer fortement la réaction uréthane. En effet, les polyols utilisés sont à faible teneur en OH primaires. On utilise pour cela des sels métalliques d'étain ( $\text{Sn}^{++}$ ) Ce produit est utilisé à très faible concentration ; sa valeur conditionne la qualité de la mousse. L'inconvénient de ce produit est un manque de stabilité et une forte tendance à l'hydrolyse.

Dans le cas des mousses rigides, le sel d'étain utilisé est le di butyle dilaurate d'étain (DBTDL) d'autres sels métalliques sont parfois employés (acétate de potassium, sels de calcium, etc.). [14]

**d- Tensioactifs ou silicones**

Lors de la production de la mousse, un gaz est dispersé dans un liquide. Le produit doit être stabilisé pour éviter la réunion de bulles, ce qui ferait retomber la mousse (*collapsa*). Si la catalyse accélère la réaction et contribue à une stabilité chimique, les tensioactifs ou silicones jouent, eux, un rôle de stabilisation physico-chimique (interactions physiques avec la matrice). Durant la phase de réalisation de la mousse (expansion), on peut schématiser leur action:

- Nucléation et émulsification des produits, ce qui favorise le mélange des constituants
- Stabilisation du liquide en expansion (bulle) ;
- Dispersion des particules solides dans la matrice polymères ;
- Contrôle de l'ouverture des cellules.

Ce rôle est plus crucial dans le domaine des mousses souples, qui sont à cellules ouvertes [10].

**e- Réticulants**

Le passage aux polyols très réactifs à la fois dans les mousses souples et dans les élastomères ne permet pas l'emploi de catalyseurs métalliques, qui sont trop puissants. Il est cependant nécessaire d'utiliser des réticulants. Ce sont des monomères mono ou di fonctionnels, possédant des fonctions alcool ou amine. Leur rôle est double : ils réagissent avec l'iso cyanate pour donner des liaisons qui relient les segments entre eux et apportent une plus grande stabilité du réseau. Dans le cas des amines (diamines), l'azote joue également un rôle catalytique. Ces produits à forte teneur en fonctions réactives consomment beaucoup d'iso cyanates et sont souvent très hygroscopiques. Leur emploi doit donc être maîtrisé.

**f- Agents Ignifugeants ou retardants**

Les polyuréthanes sont des produits alvéolaires ayant souvent une masse volumique très faible. Comme tous les produits de ce type, ils sont inflammables.

Dans les formulations, on cherchera à améliorer le comportement au feu, en retardant ou en inhibant la propagation de la combustion. [22]

Ainsi on rajoute des additifs retardant pour améliorer le pouvoir ignifugeant de la mousse de polyuréthane.

### III.7.3. Cyclo pentane:(C<sub>5</sub>H<sub>10</sub>)

Les pentanes (n-pentane, cyclopentane et iso pentane) sont des liquides facilement combustibles dont les vapeurs forment des mélanges explosifs avec l'air. Leur utilisation comme agents gonflants exige donc de prendre certaines précautions de sécurité entraînant des investissements supplémentaires



Figure III.5. Cyclopentane

Le cyclopentane demeure liquide entre -94°C et 49°C.

**Remarque :** mais il ya d'autres agents gonflants qu'on peut citer qui sont:

#### ➤ Les CFC

Les CFC sont très stables, dans la nature ils ne se décomposent quasiment pas et restent inchangés dans l'atmosphère pendant de nombreuses décennies. Cette inertie est favorable dans les machines à froid car ces liquides restent sans dégradation. Mais lorsqu'ils se déplacent dans la stratosphère, ils seront décomposés par les UV, où ils libèrent les atomes de chlore qui attaquent alors la couche d'ozone. Un seul atome de chlore peut détruire au moins 100.000 molécules d'ozone avant de rencontrer une autre molécule avec laquelle il se lie pour former une substance à longue durée de vie. Ils contribuent donc fortement au réchauffement climatique. La fabrication de ces composés est progressivement éliminé par le Protocole de Montréal, on va citer les CFC les plus courants en industries ainsi que leurs durées de vie dans l'atmosphère, leurs PACO et leurs PRG dans le tableau suivant :

Tableau III.5 : valeurs de PACO et PRG des CFC

Nom chimique	Vie (année)	formules	PACO	PRG (100ans)
CFC-11 Trichlorofluorométhane	<b>45</b>	$\text{CCl}_3\text{F}$	<b>1.0</b>	<b>4600</b>
CFC-12 Dichlorodifluorométhane	<b>100</b>	$\text{CCl}_2\text{F}_2$	<b>1.0</b>	<b>10600</b>
CFC-113 Trichlorotrifluoroéthane	<b>85</b>	$\text{C}_2\text{Cl}_3\text{F}_3$	<b>0.8</b>	<b>6000</b>
CFC-114 Dichlorotétrafluoroéthane	<b>300</b>	$\text{C}_2\text{Cl}_3\text{F}_3$	<b>1.0</b>	<b>9800</b>
CFC-115 Chloropentafluoroéthane	<b>1700</b>	$\text{C}_2\text{Cl}_3\text{F}_3$	<b>0.6</b>	<b>7200</b>

### ➤ Les HCFC

Les hydro chlorofluorocarbures (HCFC) sont des molécules chimiques composées de carbone, de chlore, de fluor et d'hydrogène. Elles sont moins stables que les CFC, À cause de leur durée de vie limitée, les HCFC appauvrissent la couche d'ozone dans une moindre mesure (2% à 5 % de celui des CFC), et leur effet de serre est également amoindri (10% à 25%). Les HCFC sont surtout utilisés comme agents gonflants pour les mousses d'isolation, comme frigorigène en réfrigération et en climatisation, comme solvants de dégraissage, ainsi que pour la lutte contre les incendies. Leur production est en diminution à cause des accords de Montréal. On remplace ces substances par des HFC. Voici une liste

Tableau III.6. Les valeurs de PACO et PRG des HCFC

Nom chimique	Vie (année)	formules	PACO	PRG (100ans)
HCFC-22 Chlorodifluorométhane	<b>11.9</b>	CHClF <sub>2</sub>	<b>0.055</b>	<b>1700</b>
HCFC-123 2,2-dichloro-1,1,1-trifluoroéthane	<b>1.4</b>	CF <sub>3</sub> -CHCl <sub>2</sub>	<b>0.02</b>	<b>120</b>
HCFC-124 2-chloro-1,1,1,2-tétrafluoroéthane	<b>6.1</b>	CF <sub>3</sub> -CHClF	<b>0.022</b>	<b>620</b>
HCFC-141b 1,1-dichloro-1-fluoroéthane	<b>9.3</b>	CCl <sub>2</sub> F-CH <sub>3</sub>	<b>0.11</b>	<b>700</b>
HCFC-142b 1-chloro-1,1-difluoroéthane	<b>19</b>	CClF <sub>2</sub> -CH <sub>3</sub>	<b>0.065</b>	<b>2400</b>
HCFC-225ca 1,1-dichloro-2,2,3,3,3-pentafluoropropane	<b>2.1</b>	CHCl <sub>2</sub> -CF <sub>2</sub> -CF <sub>3</sub>	<b>0.025</b>	<b>180</b>
HCFC-225cb 1,3-dichloro-1,2,2,3,3-pentafluoropropane	<b>6.2</b>	CClF <sub>2</sub> -CF <sub>2</sub> -CHClF	<b>0.033</b>	<b>320</b>

### ➤ Les HFC

Les hydrofluorocarbures (HFC) sont des molécules chimiques, composées de carbone, de fluor et d'hydrogène. Les HFC sont des alternatives de rechange aux CFC et aux HCFC en raison du fait qu'ils ne contiennent aucun atome de chlore responsable de la dégradation de l'ozone. Les HFC sont peu toxiques, économiques et sans danger pour l'utilisateur.

Les pouvoirs publics et l'industrie soutiennent leur utilisation au niveau mondial, dans des applications qui répondent à des besoins environnementaux et industrielles importants, dont l'isolation thermique (la réfrigération, la climatisation). Il a été démontré que les HFC présentent un autre problème environnemental qui est l'augmentation de l'effet de serre. Il serait souhaitable de limiter également la production de HFC pour les remplacer par des gaz sans effet de serre et non nuisibles pour l'environnement, ou par d'autres technologies ou méthodes qui assurent plus de performance, d'efficacité énergétique, et de durée de vie plus longue.

Dans le tableau suivant on citera les valeurs des PRG (dans 100 ans) et PACO ainsi que les durées de vie dans l'atmosphère des HFC les plus utilisés.

**Tableau III.7 : valeurs de durée de vie, de PACO et PRG des HFC**

Nom chimique	Vie (année)	formules	PACO	PRG (100ans)
HFC-23 Trifluorométhane	<b>264</b>	$\text{CHF}_3$	<b>0</b>	<b>12 000</b>
HFC-32 Difluorométhane	<b>5</b>	$\text{CH}_2\text{F}_2$	<b>0</b>	<b>550</b>
HFC-125 1,1,1,2,2- Pentafluoroéthane	<b>29</b>	$\text{C}_2\text{HF}_5$	<b>0</b>	<b>3 400</b>
HFC-134a 1,1,1,2- Tétrafluoroéthane	<b>13.8</b>	$\text{CH}_2\text{FCF}_3$	<b>0</b>	<b>1 300</b>
HFC-143a 1,1,2- Trifluoroéthane	<b>52</b>	$\text{CF}_3\text{CH}_3$	<b>0</b>	<b>4 300</b>
HFC-152a 1,1-difluoroéthane	<b>1.4</b>	$\text{CHF}_2\text{-CH}_3$	<b>0</b>	<b>120</b>
HFC-227ea 1,1,1,2,3,3,3- Heptafluoropropane	<b>33</b>	$\text{CHF}_2\text{-CH}_3$	<b>0</b>	<b>3 500</b>
HFC-245fa 1,1,1,3,3- pentafluoropropane	<b>7.2</b>	$\text{C}_3\text{H}_3\text{F}_5$	<b>0</b>	<b>950</b>
HFC-365mfc 1,1,1,3,3- pentafluorobutane	<b>9.9</b>	$\text{C}_4\text{H}_5\text{F}_5$	<b>0</b>	<b>890</b>

### III.7.3.1. L'eau

La particularité des polyuréthanes réside dans la réaction de l'eau sur l'isocyanate, qui libère du gaz carbonique et forme des fonctions urée. Cependant, la teneur en eau est limitée à la fois par l'exothermicité de la réaction et par la qualité du réseau final obtenu.

## III.8. Domaine d'utilisation de la mousse polyuréthane

Le polyuréthane est présent dans tous les domaines de la vie courante. La première planche de surface en polyuréthane a été fabriquée et utilisée pour la première fois dans les années 1950. Il est principalement utilisé dans les garnitures de meubles, les matelas, les composants isolants et de design dans la construction, etc. Nombre d'entre elles sont :

### ❖ Protection des barrages

De plus en plus de barrages et de digues sont protégés contre les tempêtes par une solution à base de polyuréthane.

### ❖ Ameublement

Le polyuréthane est également employé dans la fabrication de meubles (coussins, assises de sièges) et pour protéger les bordures des meubles à des fins de sécurité comme de longévité.

### ❖ L'industrie automobile

Que ce soit dans les sièges, les appuie-têtes, les accoudoirs, les volants, les toits ou les tableaux de bord le polyuréthane est particulièrement employé dans l'industrie automobile. L'industrie automobile est également très friande de mousse PU ayant pour rôle l'isolation thermique et acoustique.

### ❖ Les colles

Les polyuréthanes sont à la base de la fabrication de colles plus particulièrement pour assembler le bois ou le collage des semelles de chaussures. L'avantage principal de ce type de colle est sa résistance à l'eau. La mousse de polyuréthane est aussi un excellent matériau de collage utilisé astucieusement dans le bâtiment en la détournant de son usage premier pour par exemple coller des panneaux d'isolation sur des cloisons.

### ❖ Sport:

#### ◆ La natation

Les premiers modèles de combinaisons 100% polyuréthane conçues lors des compétitions en 2008. Qui, enfilés par les meilleurs nageurs du monde, ils ont apporté

un gain considérable en termes de performances. Ces produits ont été interdits par La Fédération Internationale de Natation (FINA) à partir du début de l'année 2010.

◆ **Les chaussures de sport**

La coopération entre notre filiale Elastogran et la société ADIDAS illustre bien, par exemple, comment on met en pratique son axiome « Nous aidons à la réussite de nos clients ». Nos experts en matériaux travaillent main dans la main avec les spécialistes des chaussures chez ADIDAS. Que ce soit lors des tests en chambre froide ou des essais de fatigue, nos collaborateurs tiennent compte des besoins et des souhaits des clients et les transposent dans des solutions concrètes d'amélioration et de perfectionnement des produits.

◆ **Rollers**

En 1973, les patins à roulettes ont été améliorés et popularisés par l'introduction de roulettes en polyuréthane thermoplastique (TPU) puis, plus tard, de chaussons en TPU, on les appelle aujourd'hui rollers.

❖ **Décoration**

La mousse de polyuréthane est un matériau exceptionnel pour réaliser des éléments de décorations (fausses poutres, décors, sculptures, ...) qui sont ensuite peints ou recouverts de matière type crépis, etc.

❖ **Nautisme**

Les qualités d'élasticité, de résistance à l'humidité et ses capacités de flottaison font du polyuréthane un matériau fort utilisé dans l'industrie nautique. Ainsi, certaines planches de surf ou planches à voile sont construites autour d'un noyau de polyuréthane. Les boudins des cerfs-volants utilisés pour le kitesurf sont également fabriqués en polyuréthane. De même la coque des bateaux est souvent constituée de mousse de polyuréthane intégrée à une double peau de fibre de verre.

❖ **Gants chirurgicaux**

De nombreux modèles sont fabriqués à partir du polyuréthane. Ils présentent l'intérêt d'être moins générateurs d'allergies que le latex tout en présentant de parfaits critères de qualité.

❖ **Industrie**

Les films de polyuréthane sont utilisés pour protéger de la corrosion, l'abrasion et l'érosion de nombreux types d'équipements (ailes d'avions, trains, automobiles, pales d'éoliennes, ...).

**◆ Isolation thermique industrielle**

Isolation de cuves et réservoirs, de canalisations, de conduites de chauffage urbain et de locaux frigorifiques car grâce à l'introduction des polyuréthanes dans les réfrigérateurs actuels sont 60 % plus efficaces que les réfrigérateurs d'il y a 15 ans ;

**◆ Isolation automobile**

Isolation thermique de véhicules frigorifiques ferroviaires et routiers, y compris les conteneurs.

**❖ Tissus**

Polyuréthane thermoplastique élastomère, De nombreux vêtements sont fabriqués à base de polyuréthane dont les propriétés extensibles en font un produit très adapté aux vêtements de sport.

**❖ Laques, peintures et vernis**

Les Polyuréthanes sont largement utilisés dans les enduits, laques, peintures et vernis que cela soit dans le bâtiment, l'ameublement ou la protection du bois.

**❖ Bâtiment**

- ✓ Panneaux sandwich à parements rigides en bardage et toiture
- ✓ Plaques isolantes à parements souples pour toitures, murs, plafonds et sols
- ✓ Matériaux isolants et de construction découpés dans des blocs
- ✓ Mousse à projeter sur place pour l'isolation et l'étanchéifiassions.

**❖ Ames pour composites**

- ✓ Les applications pour les composites sont :
- ✓ Les bateaux polyesters.
- ✓ Les panneaux autoportants.

**❖ Emballage**

- ✓ En moussant un PUR autour de l'objet à protéger dans un emballage rigide
- ✓ Les applications dans l'emballage sont :
- ✓ Le remplissage : flocons, chips, feuilles, blocs.
- ✓ Le calage amortissant.

### ❖ Électroménager

Isolation thermique de réfrigérateurs, de congélateurs, de meubles réfrigérants à utilisation professionnelle, de ballons d'eau chaude.

Dans notre travail on s'intéresse justement à la mousse polyuréthane rigide utilisée pour l'isolation thermique des réfrigérateur, conservateurs et congélateur à ENIEM ainsi que les paramètres technologique qui nous permet d'avoir une bonne qualité de la mousse ainsi qu'une bonne isolation thermique.

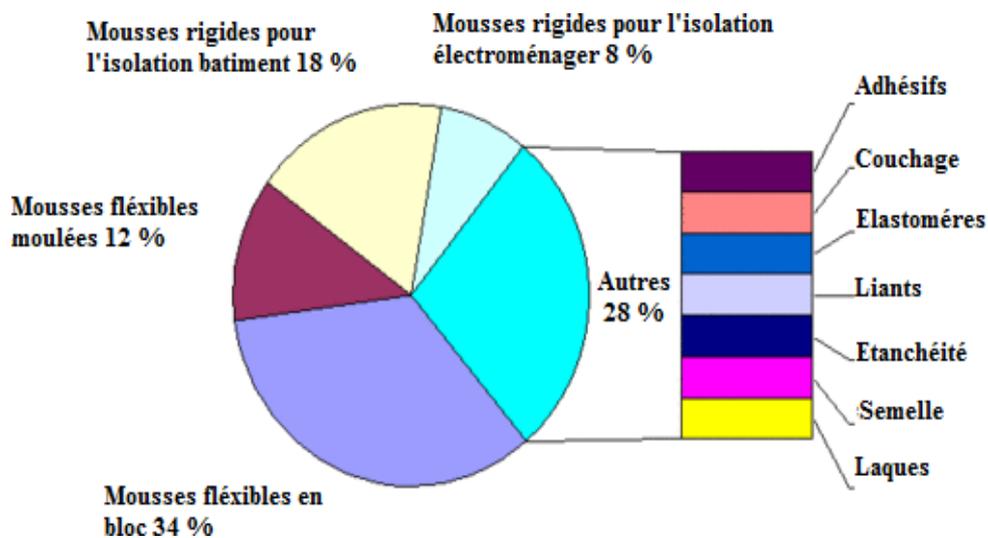


Figure. III.5: Principaux emplois des mousses des polyuréthane

### III. 9. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de mieux connaître les mousses de polyuréthane, les matières premières rentrant dans leur recette de préparation ainsi que les diverses applications que peuvent trouver ces matériaux.

La mousse de polyuréthane faisant objet de notre étude est une mousse rigide destinée pour l'isolation thermique des réfrigérateurs petit et grand model fabriqués à l'Entreprise Nationale des Industries de l'Electroménager (ENIEM) de TIZI-OUZOU.

## Chapitre IV

### PROCEDES D'ELABORATION DES MATERIAUX

#### IV.1. Introduction

Pour obtenir une bonne mousse de qualité répondant à exigence de l'entreprise ; il est judicieux de trouver la recette idéale dans le but de minimiser le tût de rebuts et afin d'éviter la surconsommation. Celle- ci ne peut être obtenue ou réalisée que si toutes les conditions sont réunies telle que :

- ❖ Respect de la formulation donnée par le fournisseur ainsi que les densités.  
Densité du produit (polyol).  
Densité libre de la mousse.  
Densité en panneau de la mousse.
- ❖ Température des moules.
- ❖ Temps de démoulage.
- ❖ Temps d'injection (quantité de mousse à injecter).
- ❖ Réglage des pompes doseuses.
- ❖ Pression de mélange (au niveau de la tête d'injection).
- ❖ Condition des stockages : Température, humidité.
- ❖ Bon dégraissage des tôles (impuretés).
- ❖ Température des composants (polyol, iso cyanate).

Dans notre travail on s'intéresse à la qualité de la mousse, une fois que les paramètres technologiques ci-dessus sont respectés. Le non respect de ces paramètres devient une problématique. Ces problématiques sont des facteurs qui influent négativement sur la qualité de la mousse (l'expansion, réactivité de la mousse). Pour confirmer, des essais pratiques ont été effectués en agissant sur la variation de certaines paramètres influents sur la bonne qualité de la mousse, talque :

- Température des composants.
- Température des moules.
- Introduction de l'huile dans la formulation.
- Introduction de l'eau.
- Influence de pourcentage du cyclopentane sur la qualité de la mousse.
- Influence de la densité libre sur la densité en panneau et de la qualité.
- Influence de la densité en panneau sur la conductivité thermique.

## IV.2. Principes

L'objectif de travail est d'avoir une bonne mousse ainsi qu'une bonne isolation thermique.

## IV.3. Etude pratique

### IV.3.1. Procédés de fabrication des mousses de polyuréthane au niveau de l'ENIEM

- **Formulation de la mousse selon le fournisseur :**

Polyol	100pp
Cyclopentane	14pp
Iso cyanate	142pp

#### IV.3.1.1. Elaboration de la mousse au niveau de l'atelier



Figure. IV.1 : Salle MPU atelier uréthane RII

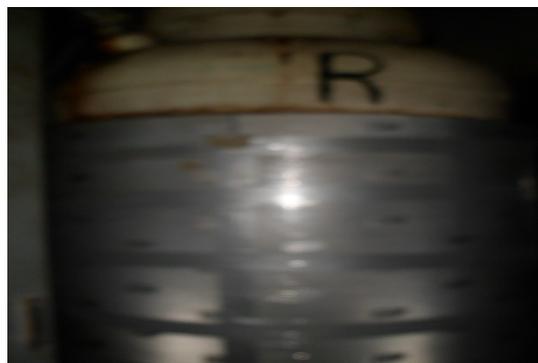
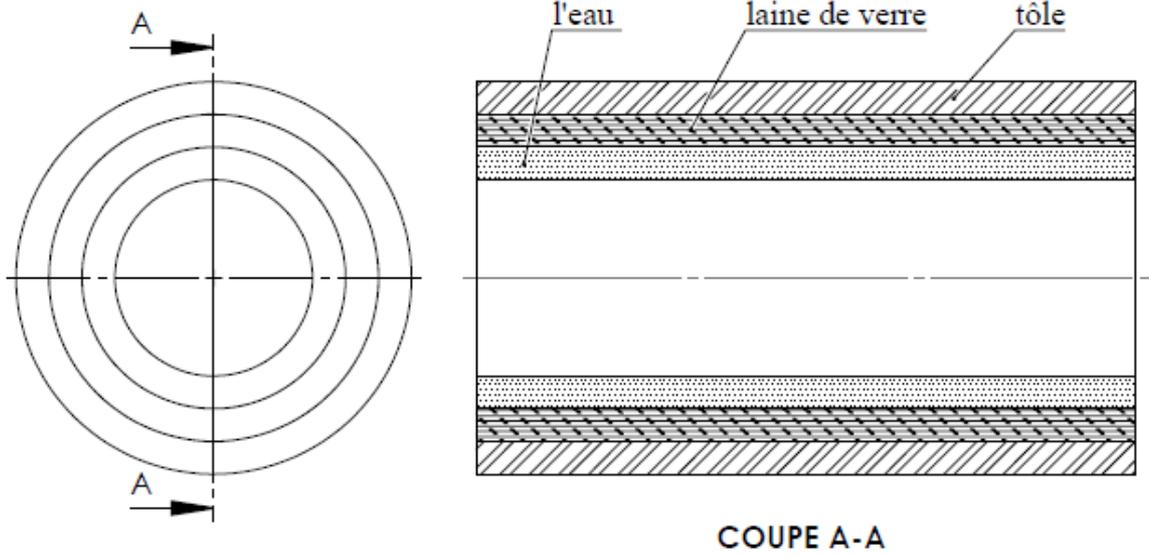


Figure. IV.2 : Mélange de polyol



Coupe de réservoir

Salle MPU (Mousse polyuréthane rigide)

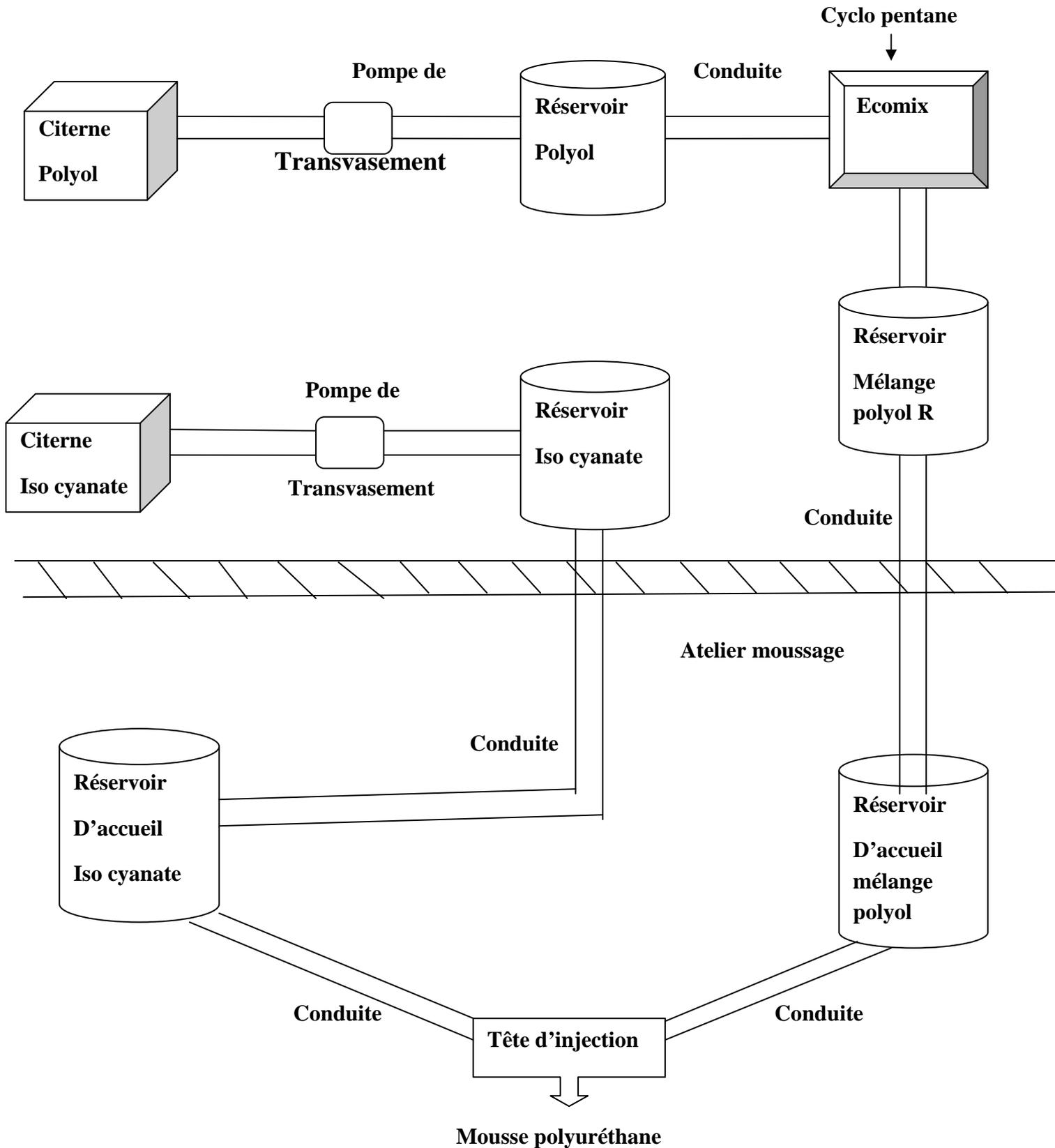
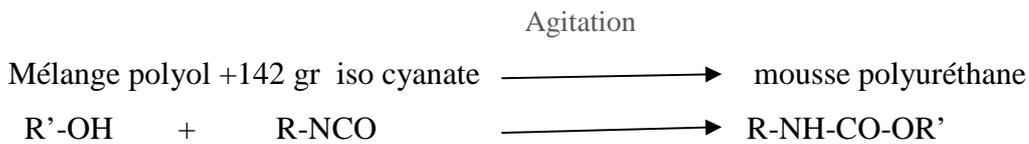
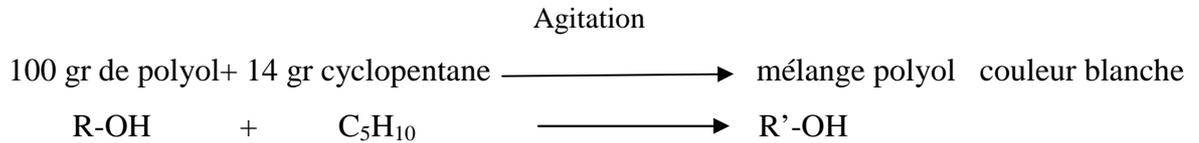
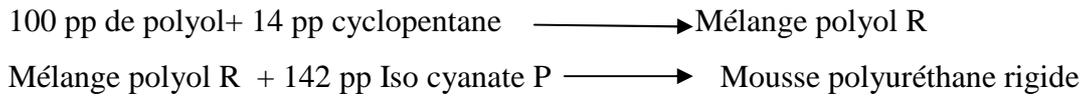


Figure. IV.3 : Obtention de la mousse polyuréthane au niveau d'atelier uréthane RII

**IV.3.1.2. Préparation des composants de la mousse****IV.4. Essais effectués au niveau de laboratoire****IV.4.1. Densité libre**

Le principe consiste d'injecter dans un sachet polyéthylène une quantité de mousse qu'on laisse s'expanser librement pour former un bloc solide au bout de quelques secondes qu'on appelle mousse polyuréthane rigide.



**Figure. IV. 4 : Expansion libre de la mousse polyuréthane**

Après environ 1 heure de temps ou plus, on découpe un morceau au milieu de bloc dans le sens de l'expansion.



**Figure. IV.5 : Échantillon prélevé au centre de bloc de mousse**

-A l'aide d'un calibre cylindrique on découpe par la suite des éprouvettes cylindriques semi homogènes.



**Figure. IV.6 : calibre cylindrique**

A l'aide du papier émeri (papier verre), on procède au polissage des éprouvettes afin de les rendre cylindriques et homogènes.



**Figure. IV.7 : Papier verre**



**Figure. IV.8 : Éprouvette cylindrique**

A l'aide d'un pied à coulisse, on mesure la hauteur et le diamètre de chaque éprouvette.

Puis à l'aide d'une balance de précision, on pèse chaque éprouvette pour avoir leurs masses



**Figure. IV.9 : Pied à coulisse**

**Nb:** on a besoin des masses, des hauteurs et des diamètres pour pouvoir calculer la masse volumique et ainsi que la densité pour chaque éprouvette.

**IV.4.1.1. Calcule de la densité libre sur la formulation suivante :**

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Polyol} = 100 \text{ pp} \\ \text{Cyclopentane} = 14 \text{ pp} \\ \text{Iso cyanate} = 142 \text{ pp} \end{array} \right.$$



Figure. IV.10 : Formation de la mousse polyuréthane

**Données :**

Forme d'éprouvette : cylindrique

Diamètre d'éprouvette : 49,4mm

Densité demandée : 0,023 à 0,025

Volume d'un cylindre :  $V = \pi d^2 H / 4$

N° d'échantillon	m (gr)	h (cm)	$\rho$ (gr/cm <sup>3</sup> ).10 <sup>-3</sup>	$\rho$ moy. (gr/cm <sup>3</sup> ).10 <sup>-3</sup>
1	2,23	4,72	24,67	24 ,26
2	2,08	4,49	24,19	
3	2,04	4,45	23,93	

$$\rho_{\text{moy}} = d_{\text{moy}} = 24,26 \cdot 10^{-3}$$

**Résultats obtenus**

Sachant que la valeur de la densité libre exigée pour l'armoire du réfrigérateur doit être incluse dans l'intervalle  $[23 \cdot 10^{-3} \text{ } 25 \cdot 10^{-3}]$  et comme les valeurs trouvées appartiennent à cette intervalle donc la densité conforme implique un bon respect de la formulation.

**IV.4.1.2. Influence de  $H_2O$  sur la densité libre**

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Polyol} = 100 \text{ pp} + 5 \text{ pp } H_2O \\ \text{Cyclopentane} = 14 \text{ pp} \\ \text{Iso cyanate} = 142 \text{ pp} \end{array} \right.$$

La valeur de la densité libre expérimentale calculée est de 0,020, de telles conditions, on peut dire que la présence de l'eau, provoque une diminution de densité libre et un rétrécissement de la mousse (Figure IV.11).



**Figure. IV.11 : Mousse mélangée avec l'eau**

**IV.4.1.3. Influence d'huile sur la densité libre :**

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Polyol} = 100 \text{ pp} + 5 \text{ pp huile} \\ \text{Cyclopentane} = 14 \text{ pp} \\ \text{Iso cyanate} = 142 \text{ pp} \end{array} \right.$$

On remarque que la densité ne peut être mesurée, vue la non stabilité de la mousse (mauvaise formation de la mousse).

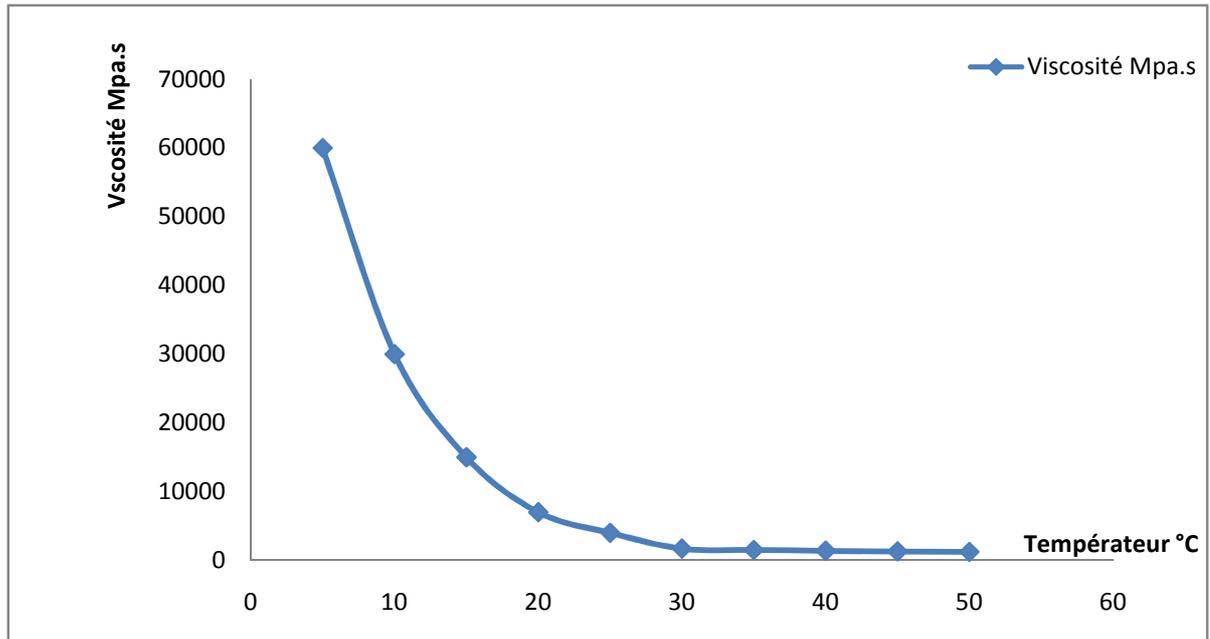


Figure. IV.12 : Mousse mélange avec l'huile

#### *IV.4.1. 4. Influence de la température sur la viscosité du polyol*

- **Viscosité**

Sous l'effet des forces d'interaction entre les molécules de fluide et des forces d'interaction entre les molécules de fluide et celles de la paroi, chaque molécule de fluide ne s'écoule pas à la même vitesse. La viscosité mesure la résistance d'un fluide au changement de forme: la viscosité détermine la vitesse de mouvement du fluide (par exemple, la vitesse de déplacement d'une cuillère dans un bol: plus le liquide est visqueux, plus le mouvement est lent). L'addition d'une faible quantité de substance en suspension ou en solution peut augmenter grandement la viscosité du liquide. La viscosité moléculaire est désignée par  $\mu$ ; elle est exprimée en  $N.s.m^{-2}$ . Les liquides ont une viscosité supérieure à celle des gaz. La viscosité varie en sens inverse de la température.

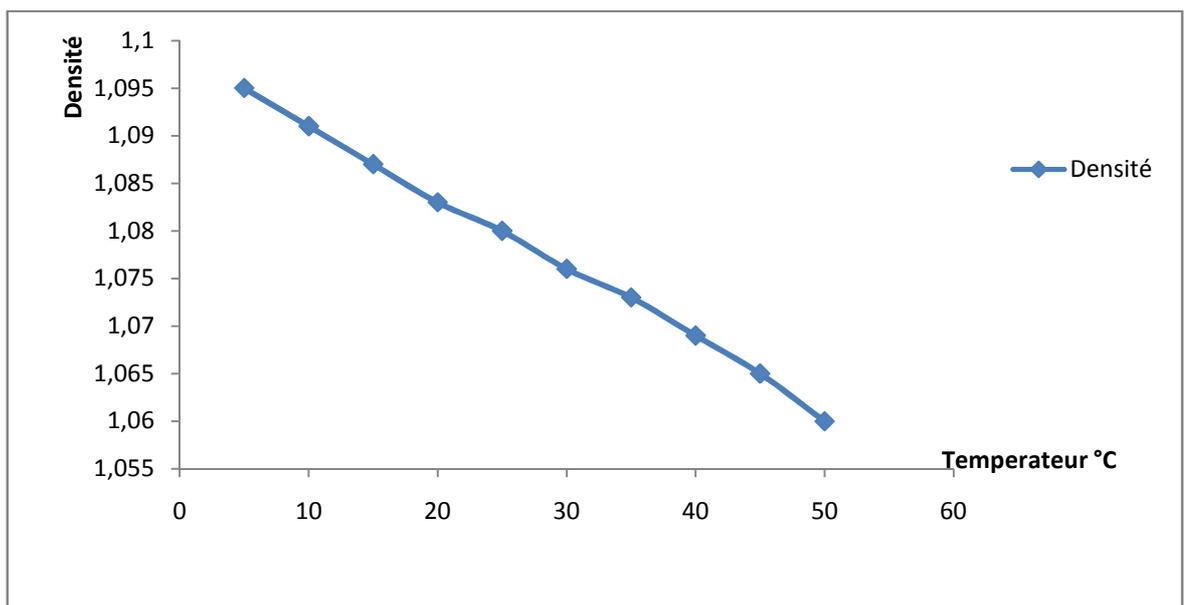


**Diagramme IV.1. Influence de la température sur la viscosité du polyol**

Température augmente  $\longrightarrow$  Viscosité diminue

$22^{\circ}\text{C} \geq T \geq 18^{\circ}\text{C}$  : Mousse bien mélangée (Polyol bien mélangé avec cyclopentane et avec iso cyanate), on obtient une mousse de qualité, donc bonne isolation thermique.

#### ***IV.4.1.5. Influence de la température sur la densité du polyol***



**Diagramme IV.2. Influence de la température sur la densité du polyol**

Température augmente  $\longrightarrow$  Densité diminue

$24 \geq T \geq 18$  : Mousse bien mélangée (Polyol bien mélangé avec cyclopentane et avec iso cyanate), on obtient une mousse de qualité, donc bonne isolation thermique.

#### IV.4.1.6. Influence de cyclopentane sur la viscosité du polyol :

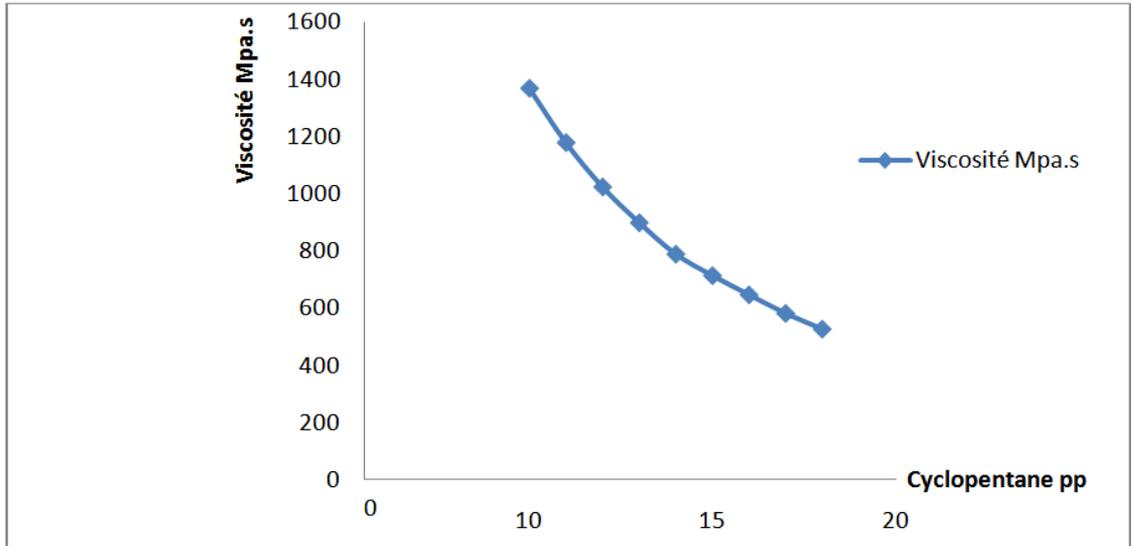


Diagramme IV.3. Influence du cyclopentane sur la viscosité du polyol

#### IV.4.1.7. Influence de cyclopentane sur la densité du polyol

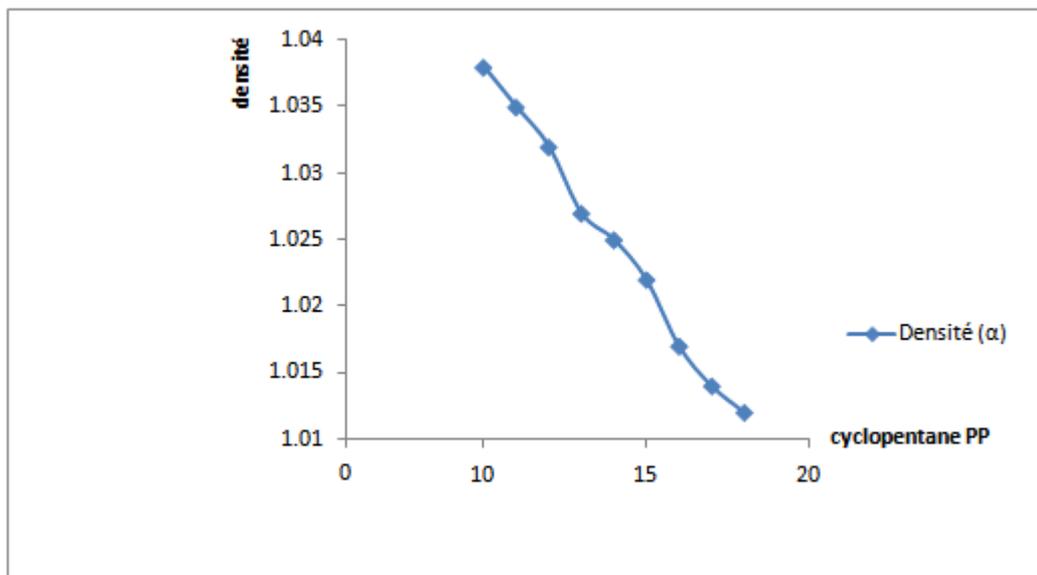


Diagramme IV.4. Influence du cyclopentane sur la densité du polyol

Pour les deux cas (densité et viscosité) on remarque :

**13pp** ≤ **C<sub>5</sub>H<sub>10</sub>** ≤ **15pp**, nous avons un très bon mélange de polyol (R- OH + C<sub>5</sub>H<sub>10</sub>)

La mousse obtenue est homogène

**C<sub>5</sub>H<sub>10</sub>** ≤ **13 pp**

Manque de fluidité de la mousse, expansion lente, manque de mousse (Armoires et portes non remplies).

**C<sub>5</sub>H<sub>10</sub>** ≥ **15 pp**, on obtient une mousse non homogène suivie d'un débordement au niveau des portes et armoires, densité libre diminue (< 0.023) avec un grand risque de rétrécissement.

#### IV.5.Calcul de la densité en panneau

- **1-Porte**

On prélève de chaque partie de la porte (partie supérieure et partie inférieure) des morceaux sous forme rectangulaires ou carrés, puis à l'aide de calibre cylindrique, on découpe des éprouvettes semi-cylindrique non homogène puis on suit la même méthode de calcul que c'elle appliquée précédemment pour la densité libre.



Figure IV.13. Tête d'injection de la mousse (utilisée à l'ENIEM)



Figure IV.14 : Prélèvement d'échantillon du Porte moussée

- **Partie supérieure**

N° d'échantillon	m (gr)	h (cm)	$\rho$ (gr/cm <sup>3</sup> ).10 <sup>-3</sup>	$\rho_{\text{moy.}}$ (gr/cm <sup>3</sup> ).10 <sup>-3</sup>
1	1,89	2,94	33,56	33,63
2	2,10	3,24	33,84	
3	1,61	2,51	33,50	

$$\rho_{\text{moy}} = d_{\text{moy}} = 33,63 \cdot 10^{-3}$$

- **Partie inferieure**

N° d'échantillon	m (gr)	h (cm)	$\rho$ (gr/cm <sup>3</sup> ). 10 <sup>-3</sup>	$\rho_{\text{moy.}}$ (gr/cm <sup>3</sup> ).10 <sup>-3</sup>
1	1,78	2,76	33,68	33,50
2	2,06	3,21	33,51	
3	1,94	2,04	33,32	

$$\rho_{\text{moy}} = d_{\text{moy}} = 33,5 \cdot 10^{-3}$$

**Densité moyenne globale de la porte est :**

$$(33,63 \cdot 10^{-3} + 33,5 \cdot 10^{-3}) / 2 = 33,56 \cdot 10^{-3}$$

Densité demandée :  $[33 \cdot 10^{-3}, 35 \cdot 10^{-3}]$

**Conclusion :**

D'après le résultat obtenu, on remarque que la valeur trouvée appartient à l'intervalle ci-dessus, donc nous avons une mousse de qualité ainsi qu'une bonne isolation thermique

## 2-Armoire:

On prélève de chaque partie de l'armoire [paroi latérale droite (supérieure et inférieure), paroi latérale gauche (supérieure et inférieure), face de dessus, face de dessous et panneau arrière (supérieur et inférieur)] des morceaux sous forme rectangulaire ou carrés, et on refait le même travail que précédemment comme pour la densité libre densité



Figure IV.15 : Prélèvement d'échantillons du l'armoire moussé

❖ **Paroi latérale droite supérieure**

$$\rho_{\text{moy}} = 34,51 \cdot 10^{-3}$$

$$d_{\text{moy}} = \rho_{\text{moy}} = 34,51 \cdot 10^{-3}$$

❖ **Paroi latérale droite inférieure**

$$\rho_{\text{moy}} = 33,55.10^{-3}$$

$$d_{\text{moy}} = \rho_{\text{moy}} = 33,55.10^{-3}$$

Densité moyenne pour la paroi latérale droite est : **34,03.10<sup>-3</sup>**

❖ **Paroi latérale gauche supérieure**

$$\rho_{\text{moy}} = 34,63.10^{-3}$$

$$d_{\text{moy}} = \rho_{\text{moy}} = 34,63.10^{-3}$$

● **Paroi latérale gauche inférieure**

$$d_{\text{moy}} = \rho_{\text{moy}} = 33,71.10^{-3}$$

Densité moyenne pour la paroi latérale gauche est : **33,71.10<sup>-3</sup>**

● **Face dessus (congélateur)**

$$d_{\text{moy}} = \rho_{\text{moy}} = 34,43.10^{-3}$$

● **Face de dessous**

$$d_{\text{moy}} = \rho_{\text{moy}} = 34,47.10^{-3}$$

● **Panneau arrière supérieure**

$$d_{\text{moy}} = \rho_{\text{moy}} = 34,84.10^{-3}$$

● **Panneau arrière inférieure**

$$d_{\text{moy}} = \rho_{\text{moy}} = 34,95.10^{-3}$$

Densité moyenne pour le panneau arrière est : **34,89.10<sup>-3</sup>**

Densité moyenne globale pour l'armoire est : **34,39.10<sup>-3</sup>**

## Conclusion

Sachant que la valeur de la densité en panneau exigée pour l'armoire du réfrigérateur doit être incluse dans l'intervalle  $[33.10^{-3} \ 35.10^{-3}]$  et comme les valeurs trouvées appartiennent à cette intervalle, donc la densité en panneau est conforme, donc nous avons une mousse de qualité ainsi qu'une bonne isolation thermique.

### VI.5.1. Densité en panneau en fonction la densité libre pour une même masse injectée

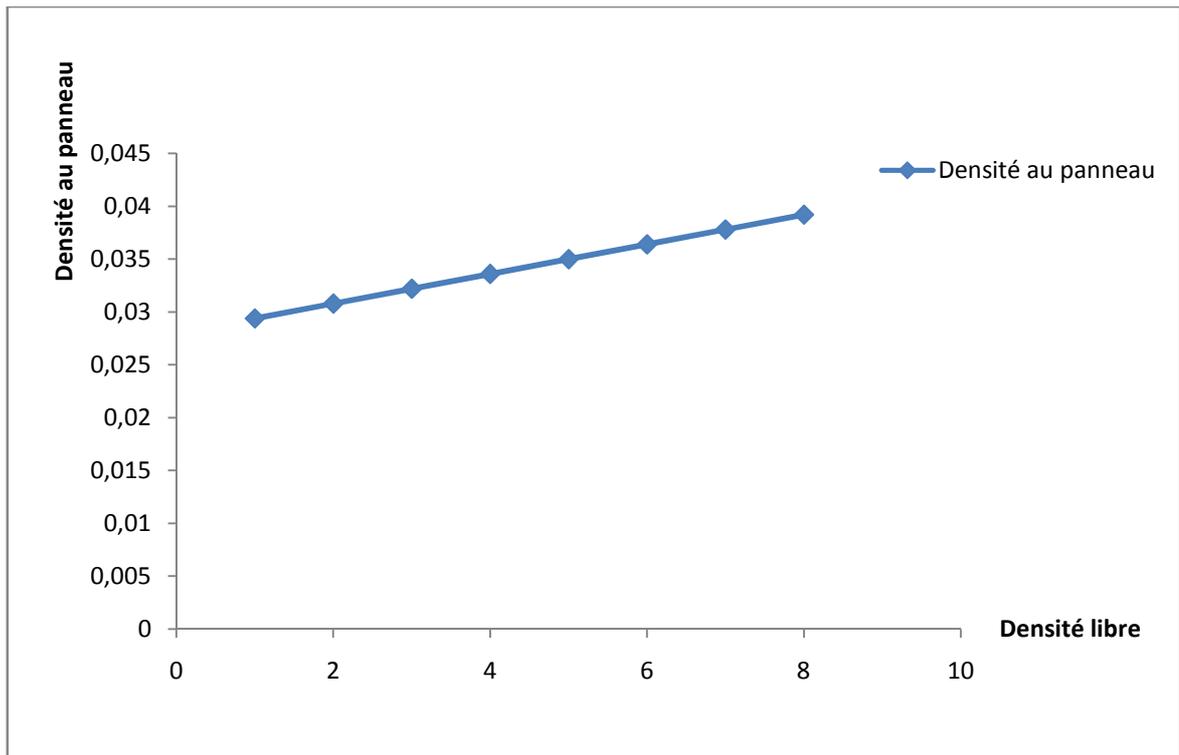


Diagramme IV.5. Densité en panneau en fonction la densité libre

Augmentation de la densité libre au dessus de  $25.10^{-3}$  provoque une surconsommation de la mousse et sa diminution au dessous  $23.10^{-3}$ , provoque un débordement et un rétrécissement de la mousse.

## IV.6. Micro structure de la mousse polyuréthane

Le microscope optique est un instrument d'optique muni d'un objectif et d'un oculaire qui permet de grossir l'image d'un objet de petites dimensions (se qui caractérisé son grossissement) et de séparer les détails de cette image (et son pouvoir de résolution) afin qu'il soit observable par l'œil humain. Il est utilisé en biologie, pour observer les cellules, les tissus, en pétrographie pour reconnaître les roches, en métallurgie et en métallurgie et en métallographie pour examiner la structure d'un métal ou d'un alliage.



Figure IV.16 : Microscope optique

### Résultats obtenus par un microscope optique

Les micrographies suivantes représentent les échantillons d'une mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane vues au microscope optique avec les densités suivantes :

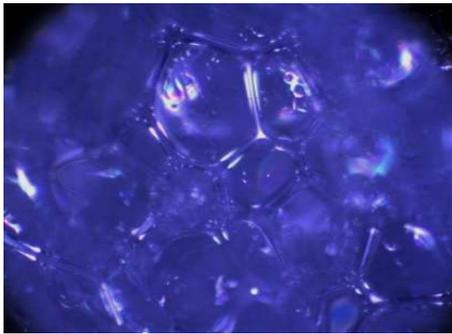
Echantillon I  $\rightarrow d = 0,033$  à  $0,035$

Echantillon II  $\rightarrow d > 0,035$

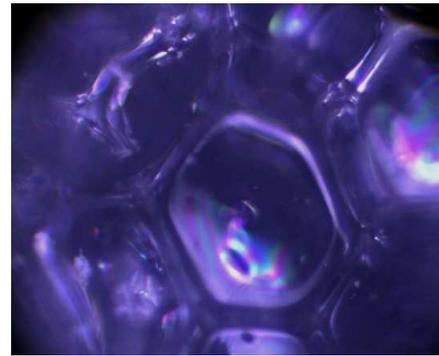
Echantillon III  $\rightarrow d < 0,033$

Ces trois échantillons sont observés au microscope optique avec le même agrandissement (X100) puis (X200) afin de mettre en évidence la structure et la forme de ces cellules qui sont représentés par les figures ci-dessous

a- Pour une densité en panneau variable entre 0,033 à 0.035

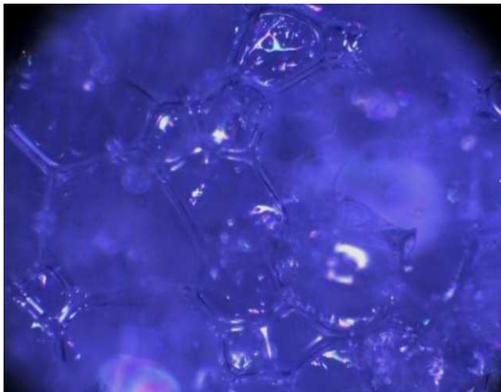


**Agrandissement 100**

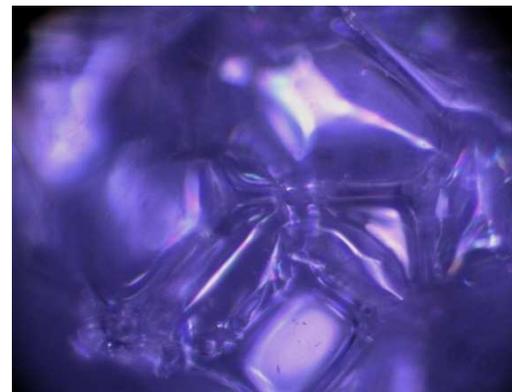


**Agrandissement 200**

b- Pour une densité en panneau supérieure à 0.035

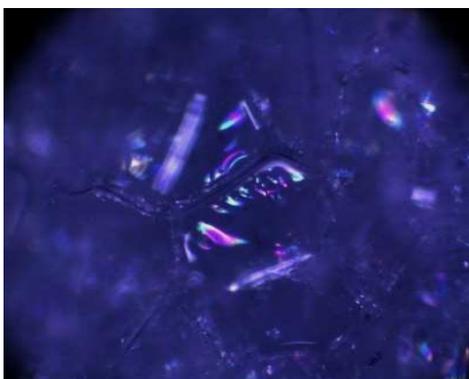


**Agrandissement x 100**

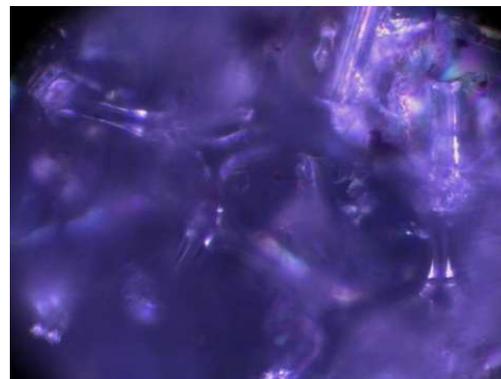


**Agrandissement x 200**

c- Pour une densité en panneau inférieures à 0.033



**Agrandissement x 100**



**Agrandissement x 200**

**Interprétation des résultats :**

Pour des densités allant de 0.033 à 0.035, on remarque que la forme des cellules est uniforme, ce qui rend la mousse plus stable et homogène dans le temps.

Pour des densités inférieures à 0.033, la taille des cellules est plus importante que celles de densités allant de 0.033 à 0.035 et de formes non uniformes ce qui rend la mousse instable (rétrécissement).

Pour des densités supérieures à 0.035, les cellules deviennent plus au moins homogènes mais très denses, ce qui rend la mousse très stable dans le temps mais moins isolante que celle obtenue pour des densités allant de 0.033 à 0.035.

**IV.7. Calcul de la conductivité thermique**

L'appareil de mesure de la conductivité thermique utilisé à l'ENIEM est constitué de trois unités qui sont : L'unité d'affichage, l'unité centrale et l'unité qui contient deux plaques de différentes températures.



Figure IV.17 .L'appareil de mesure de la conductivité thermique utilisé à l'ENIEM

$$\lambda = \frac{Is.((K1+(K2.Tmoy))+((K3+(K4.Tmoy)).HFM) + ((K5+(K6.Tmoy)HFM^2))}{dt}$$

HFM : sortie débitmètre en mv

T<sub>1</sub> : température de la plaque chaude

T<sub>2</sub> : température de la plaque froide

T<sub>3</sub> : température de réfrigérant

T<sub>moy</sub> : (T<sub>1</sub>+T<sub>2</sub>)/2

**Constantes d'étalonnages sans silicone avec :**

K<sub>1</sub>= -12,7377                      K<sub>4</sub> = 0.0459

K<sub>2</sub>= 0.2364                         K<sub>5</sub> = 0,0567

K<sub>3</sub>= 3,3452                         K<sub>6</sub>= -0.0007

**Constantes d'étalonnages avec silicone**

K<sub>1</sub>= -30,7912                      K<sub>4</sub> = -0,0055

K<sub>2</sub>= 0.6087                         K<sub>5</sub> = 0,0132

K<sub>3</sub>= 6,5376                         K<sub>6</sub>= 0.0004

Les inconnus :

T<sub>2</sub> ? et HFM ?

**Application numérique**

Exemple de calcul

**Sans silicone**

Forme de l'éprouvette : c'est une éprouvette carrée de dimensions 300mm x 300m36,7mm,



Figure IV.18 .Eprouvette carrée

Voire les valeurs sur le tableau :

T <sub>2</sub>	17,9	17,6	17,3	17,1	17	17	17	17	17	17	17	17	
HFM	3,91	3,87	3,36	3,22	3,23	3,23	3,23	3,23	3,23	3,24	03,26	3,25	3,29

Is =3,67cm    T1=30°C    T2= 17°C    T3= 18°C

HFM= 3,23 mv    dt =13°C    Tmoy =23,5°C

**Application numérique**

$$(k1+ (k2.Tmoy)) = (-12, 7377+ (0,2364.23,5)) =-7,1823$$

$$((K3+5K4.Tmoy).HFM) = ((3, 3452+ (0,0459.23,5)).3,23) = 14,2890355$$

$$((K5+ (K6.Tmoy)).HFM^2) = (( 0,0567 + (-0,0007.23,5)).10,4329) = 0,419924225$$

$$\lambda = \frac{0.0367.(-7,1823+14,2890355+0,419924225)}{13} =0.02127 \text{ w/mk}$$

**VI.7.1.Influence de conductivité thermique en fonction la densité en panneau**

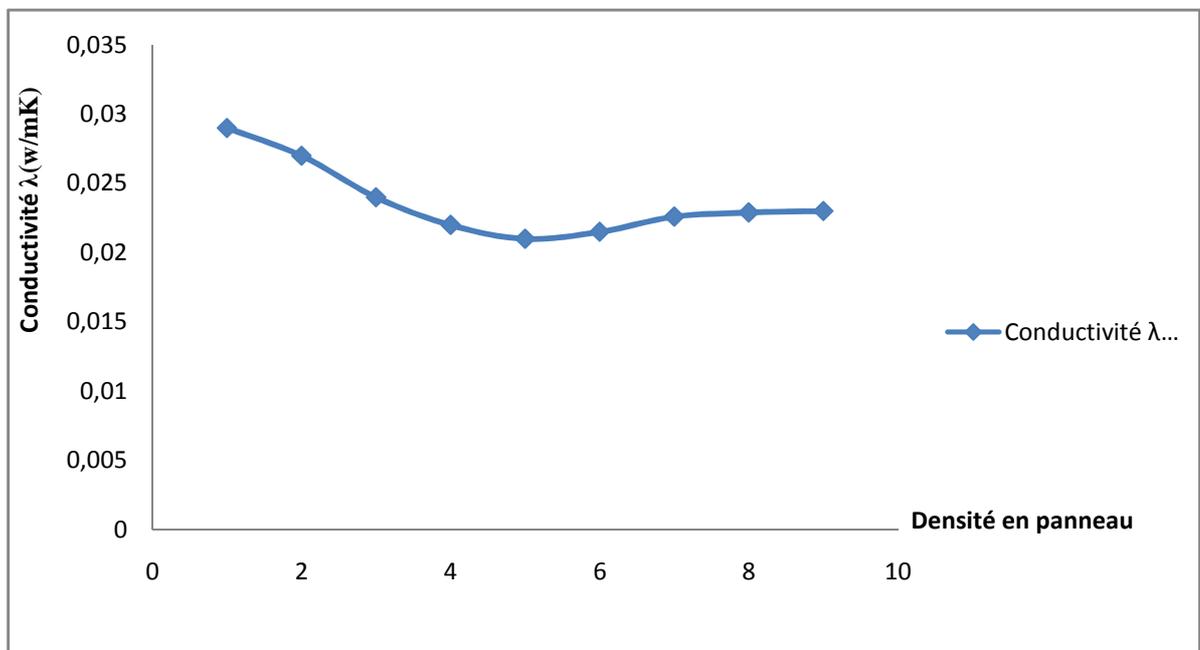


Diagramme IV.6.Influence de conductivité thermique en fonction la densité en panneau

On remarque que la conductivité thermique  $\lambda$  diminue avec l'augmentation de la densité en panneau jusqu' au point 0,034, pour quelle reprenne légèrement par la suite.

Le rétrécissement risque d'augmenter avec la diminution de la densité en panneau  $< 0,034$ .

## IV.8. Essai de compression

### IV.8.1. Résistance à la compression

Après avoir mesuré la dimension de l'éprouvette cylindrique de diamètre  $\approx 50\text{mm}$ , on la comprime à une vitesse de  $10\text{mm/mn}$  dans le sens de la hauteur à l'aide d'une machine de compression et puis, on calcule sa résistance à la compression qui est donnée par la formule suivante.

$$P_C = \frac{F_C}{A}$$

où

$P_C$  : résistance à la compression ( $\text{kg/cm}^2$ ) (valable jusqu'à la troisième décimale )

$A$  : surface de réception de pression ( $\text{cm}^2$ )

$F_C$  : charge au moment de 10% de la déformation due à la compression (kg).

Cependant, dans le cas où la charge à la limite d'élasticité est inférieure à la charge de 10% de distorsion,  $F_C$  représente la charge à la limite d'élasticité.

### IV.8.2. Comportement en compression de mousse PUR

La résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la densité en panneau, elle diminue avec la diminution de cette dernière surtout pour la densité inférieure à 0,033. L'évolution de la mousse en compression est représentée dans le diagramme suivant.

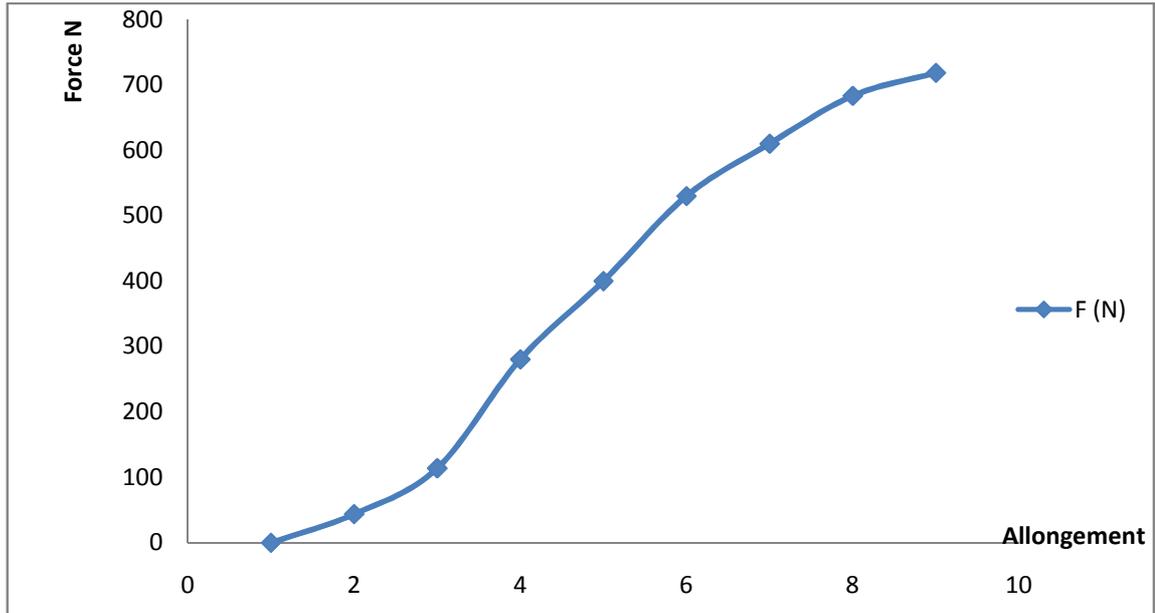


Diagramme IV.7. Comportement en compression de mousse PUR

## IV.9. Influence de la température des moules sur la qualité de la mousse

### Température idéale : 40°C à 49°C

- Pour des températures inférieures à 40°C : mauvaise expansion de la mousse et risque du mauvais remplissage
- Pour des températures supérieures à 49°C: expansion rapide avec évaporation de cyclopentane suivi d'un débordement de mousse.

La figure suivante représente les moules utilisés pour le moussage des armoires des réfrigérateurs de l'entreprise ENIEM.



Figure IV.18. Moules de réfrigérateurs utilisés à l'ENIEM

• **Résumé sur l'influence des températures sur les caractéristiques de la mousse.**

Température	Viscosité	Densité	Mélange de mousse	Expansion De la mousse	Fluidité de la mousse	Densité libre	Conductivité	Isolation thermique
18 à 22°C	Bonne ≈6000mpa.s	Bonne ≈1,081	Bon	Bonne	Bonne	0,023-0.025	0.021w/mk	Bonne
>22°C	Diminue	Diminue	Bien mélangé mais la qualité est mauvaise	Rapide	Très fluide	<0,023	Augmente	Mauvaise
<18	Augmente	Augmente	Mauvais	Lente	Très fluide	<0,025	Augmente	Moins bonne

• **Résumé sur l'influence de cyclopentane sur les caractéristiques de la mousse**

cyclopentane	Viscosité	Densité	Mélange de mousse	Expansion De la mousse	Fluidité de la mousse	Densité libre	conductivité	Isolation thermique
14	Bonne ≈790mpa.s	Bonne ≈1,025	Bon	Bonne	Bonne	0,023-0.025	0.021w/mk	Bonne
>14	Diminue	Diminue	Bien mélangé mais la qualité est mauvaise	Rapide et volumineuse	Très fluide	<0,023	Augmente	Mauvaise avec risque de rétrécissement de la mousse
<14	Augmente	Augmente	Bon	Lente	Moins fluide	<0,025	Augmente	Mauvaise



## **Conclusion générale**

La mousse de polyuréthane rigide est le matériau isolant le plus employé de par le monde pour les réfrigérateurs et congélateurs. Ses propriétés isolantes sont un aspect essentiel de la conservation à basse température des aliments aux stades de la transformation, du stockage et de la distribution au consommateur. Sans la réfrigération isolée au polyuréthane, environ 50 % de l'alimentation mondiale pourrirait, ce qui aurait un impact considérable sur nos vies de tous les jours et sur le secteur alimentaire.

En plus de leurs excellentes propriétés isolantes, les polyuréthanes offrent des qualités exceptionnelles pour la conception de réfrigérateurs. Ceci est dû au fait que la même matière – le polyuréthane – peut être utilisée à la fois pour l'habillage et pour l'isolation du réfrigérateur. La seule différence réside dans la densité de la matière. Les polyuréthanes utilisés pour les portes de réfrigérateur permettent aux fabricants de réaliser les deux pièces avec une seule surface pleine, sans vide. Les polyuréthanes sont particulièrement utiles du point de vue de la conception car une seule application de revêtement suffit pour une finition de surface impeccable. Aucune autre finition n'est nécessaire.

pour avoir cette mousse de qualité, notre travail nous a permis justement de déterminer les paramètres technologiques que l'opérateur ou l'ingénieur doit connaître et maîtriser en temps, car le non respect d'un seul paramètre pourrait être fatal pour la qualité de l'isolation thermique, ces paramètres sont :

1-la température : soit de stockage au magasin soit au moment d'utilisation à l'atelier, cette température doit être entre 18°C et 22°C

2-la formulation : la formulation doit être respectée à la lettre.

3-le temps d'injection : il faut bien étudier la masse exacte de mousse à injecter à fin d'éviter le manque de mousse, la surconsommation et le débordement et d'avoir une densité en panneau recherchée.

4-le temps de démoulage : il faut étudier bien le temps de fin de réaction pour la mousse pour pouvoir démouler la porte ou l'armoire si non on aura la déformation de ces dernières.

5-les pressions de mélange : doivent être bien étudiées afin de d'avoir un mélange de mousse bien homogène

6-entretien des têtes d'injection : il faut les nettoyer après chaque usage

7-nettoyage des moules après chaque opération au cas de débordement pour éviter l'usure de ces derniers

8-les réservoirs des composants que ça soit polyol ou isocyanate doivent être étanches pour éviter l'introduction de l'eau, d'humidité et des huiles à l'intérieur ou même lors d'intervention sur les réservoirs.

9-bon dégraissage des portes et des armoires.

10-l'entretien de la pompe de dosage.

11-les températures des moules (40° et 49°).

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] Techniques sciences N°8, Faites connaissance avec les produit d'isolation thermique dans le cadre du projet de certification en Algérie
- [2] Yves Marotel:Techniques de l'ingénieur, traité plastique et composites AM3
- [3] Techniques de l'ingénieur, traité plastiques et composites, Polypropylènes AM3220.
- [4] Sites [http://perso.univ-rennes1.fr/jean-luc.audic/Cour\\_polym.pdf](http://perso.univ-rennes1.fr/jean-luc.audic/Cour_polym.pdf).
- [5] Techniques de l'ingénieur, traité plastiques et composites, injection des thermoplastiques A3680, A3690 et thermoformage A3660.
- [6] J.P.Trotignon, J.Verdu, M.Piperaud, A.Dobraczynski, R.Quatremer et J.P.Trotignon Matières plastiques : Structures - propriétés - mise en œuvre et normalisation AFNOR 4<sup>e</sup> édition.
- [7] William D. Callister, Jr Science et génie des matériaux, édition MODULO, ISBN 26891136687-X
- [8] Hans-Henning Kausch, Nicole Heymans, Christopher John Plumer et Pierre Decroly. Matériaux polymères, propriétés mécaniques et physiques (principe de mise en œuvre).Presses polytechnique et universitaires romande 2001, ISBN2-88074-415-6
- [9] Thierry Gallauziaux et David Fedullo, le grand livre de l'isolation, Eyrolle, 2009, ISBN 978 - 2 - 212-12404-0
- [10] Bikard1 J, Bouayad1, 2 R, Agassant11 J.F. 27-31 aout 2007 , Caractérisation de mousses de polyuréthanes au cours du procédé de fabrication - CEMEF - Ecole des Mines de Paris1 – France 18eme Congres Français de Mécanique Grenoble.
- [11] Yves M ; 01/2000, plastiques et composites ; polyuréthannes ; Techniques De L'ingénieur ; Dossier AM 342
- [12] Maurice R ; 1998, Technologie des plastiques ; 3 ème édition revue et augmentée. Edition Hermes, Paris.
- [13] Chrétien G, Hatat D ; 1990, Initiation aux plastiques et Composites ; Edition : Lavoisier .Tec 8 Doc Infoplast, Paris.
- [14] Gilles A, 2003, Fabrication et transformation de mousse de polyuréthane.Angerville, la Campagne, le 31 juillet

- [15] Trotignon J.P, Verdu J, Dobraraczynsk A, i Piperaud M, 1996, Précis matières plastiques / Structure / Propriétés / Mise en œuvre / Normalisation : Edition : Afnor / Nathan, Paris.
- [16] Jean B, 1985, Matières plastiques ; Chimie Application ; 2 éme édition revue et augmentée ; Edition : Lavoisier : Tec 8, Doc, Paris.
- [17] Saunders J. H. et Frisch K. C. (1962), Polyurethanes. . Part I, Chemistry. Interscience-Wiley, New York.
- [18] Saunders J. H. et Frisch K. C. (1964), Polyurethanes, Part II, Technology. Interscience-Wiley, New York.
- [19] L'Isolant polyuréthane rigide, données techniques et commerciales Kingspan Tarec Industrial Insulation.
- [20] Jean-François Sacadura Initiation aux transferts thermiques, Lavoisier, Paris 1993, ISBN 2-85206-618-1
- [21] Barbeau .P 1998, étude de la structure et des propriétés de réseaux polyuréthanes acrylates photopolymérisés , thèse de doctorat, Lyon :INSA de Lyon, ,292 p
- [22] DUQUESN. S, 2001, étude des procédés d'ignifugation de substrats polymères par revêtement intumescent-application aux polyuréthanes-thèse de doctorat, université des sciences et technologies de Lille 1.

---

Introduction Générale .....	1
Présentation de l'entreprise ENIEM .....	2

## Chapitre I

### L'isolation thermique

I.1.Introduction .....	10
I.2.Le transfert thermique .....	10
I.2.1.Conduction thermique .....	10
I.2.2.Convection thermique.....	11
I.2.3.Rayonnement .....	11
I.3.Les matériaux isolants .....	11
I.3.1 Quelques exemples d'isolants et leurs applications .....	12
I.4.Les supers isolants .....	14
I.5.Caractérisation de l'isolant thermique.....	15
I.5.1.Le coefficient de conductivité thermique $\lambda$ d'un matériau .....	15
I.5.2.La résistance thermique .....	17

## Chapitre II

### Généralités sur les polymères

II.1.Introduction .....	19
II.2.Historique .....	19
II.3.Définition .....	19
II.4. Classification selon la morphologie .....	20
II.4.1. Les polymères amorphes .....	20
II.4.2. Les polymères semi-cristallins .....	20
II.4.3. Classification selon la structure.....	20
II.4.3.1. Structure linéaire .....	21
II.4.3.2. Structure ramifié.....	21
II.4.3.3. Structure réticulé .....	21
II.5. Caractéristiques des polymères .....	22

---

II.5.1. Elasticité.....	22
II.5.1.1. Comportement élastique.....	22
II.5.1.2. Comportement plastique.....	22
II.6. Propriétés des polymères.....	23
II.6.1. Masse volumique.....	23
II.6.2. Indice de fluidité.....	23
II.6.3. Propriétés thermiques.....	24
II.6.3.1. Température de fusion.....	24
II.6.3.2. Température de ramollissement Vicat.....	25
II.6.4. Propriétés mécaniques.....	25
II.6.4.1. Contrainte au seuil d'écoulement en traction.....	25
II.6.4.2. Résistance à la rupture.....	26
II.6.4.3. Allongement à la rupture.....	26
II.6.4.4. Module de Young en traction.....	27
II.6.4.5. Résistance au choc.....	27
II.6.4.6. Dureté.....	27
II.7. Les plastiques.....	29
II.7.1. Définition.....	29
II.7.2. Les familles des plastiques.....	30
II.7.2.1. Les thermoplastiques.....	30
II.7.2.2. Les élastomères.....	32
II.7.2.3. Les thermodurcissables.....	33

## Chapitre III

### Mousse polyuréthane rigide

III.1. Historique.....	35
III.2. Introduction.....	35
III.3. Généralités sur les mousses de polyuréthane.....	35
III.3.1. La mise en œuvre des polyuréthanes.....	36
III.4. Type de mousses polyuréthane.....	36
III.4.1. Mousses souples.....	36
III.4.2. Mousses semi-rigides.....	37

III.4.3. Mousses rigides.....	37
III.5. Conductivité thermique.....	39
III.5.1. Coefficient thermique pour différents types de mousses.....	40
III.6. Définition de la mousse polyuréthane rigide .....	40
III.7.Matières premières rentrant dans la formulation des polyuréthannes .....	41
III.7.1. Les isocyanate .....	41
III.7.1.1 Les iso cyanates aromatiques (HDI, IPDI) .....	41
III.7.1.2.Toluène di iso cyanate (TDI) .....	41
III.7.1.3. Le diphenyle méthane di iso cyanate (MDI).....	42
III.7.2.Les polyols (polymères poly-hydroxylés) .....	43
III.7.2.1. Les polyols polyéthers .....	43
III.7.2.2.Les Polyols polyesters.....	44
III.7.2.3. Les composants rentrants dans la composition chimique des polyols.....	45
III.7.3. Cyclo pentane:(C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> ) .....	47
III.7.3.1 .L'eau .....	51
III.8.Domaine d'utilisation de la mousse polyuréthane .....	51
III.9. Conclusion .....	54

## Chapitre IV

### Procédés d' Elaboration des matériaux

IV.1. Introduction.....	55
IV.2.Principe .....	56
IV.3. Etude pratique.....	56
IV.3.1.Procédé de fabrication des mousses de polyuréthane à ENIEM .....	57
IV.3.1.1.Elaboration de la mousse au niveau de l'atelier .....	56
IV.3.1.2. Préparation des composants de la mousse .....	59
IV.4.Essais effectués au niveau de laboratoire .....	59
IV.4.1.Densité libre.....	59
IV.4.1.1. Calcule de la densité libre pour la formulation suivante .....	61
IV.4.1.2.Influence de H <sub>2</sub> O sur la densité libre .....	63
IV.4.1.3.Influence d'huile sur la densité libre .....	63
IV.4.1. 4.Influence de la température sur la viscosité de polyol .....	64

---

IV.4.1.5. Influence de la température sur la densité de polyol .....	65
IV.4.1. 6. Influence de cyclopentane sur la viscosité de polyol.....	66
IV.4.1.7. Influence de cyclopentane sur la densité de polyol .....	67
IV.5. Calcul de la densité en panneau .....	67
VI.5.1. Densité en panneau en fonction la densité libre pour une même masse injectée .....	71
IV.6. Micro structure de la mousse polyuréthane .....	72
IV.7. Calcul de la conductivité thermique .....	74
VI.7.1. Influence de conductivité thermique en fonction la densité en panneau .....	76
VI.8. Essai de compression .....	77
VI.8.1. Résistance à la compression .....	77
IV.8.2. Comportement en compression de mousse PUR.....	78
IV.9. Influence de la température des moules sur la qualité de la mousse .....	78
Conclusion générale.....	80
Références bibliographiques .....	82

## **Introduction Générale**

Depuis la découverte des polyuréthanes dans les années trente, leurs domaines d'application n'ont cessé de s'élargir : mousses souples ou rigides, revêtements, élastomères, colles, adhésifs, bains de couches, encres et vernis...

Les polyuréthanes, polymères thermodurcissables, occupent une place privilégiée dans l'industrie. Ils résultent de la réaction de polymérisation chimique d'un iso cyanate avec des groupements portant un hydrogène mobile (principalement des groupements hydroxyle), par exemple des fonctions alcool. Pour obtenir des matériaux alvéolaires, il faut coupler cette réaction exothermique à un dégagement gazeux (chimique ou physique) qui permet la création d'alvéoles de gaz en surpression au sein du polymère (donc son expansion) tant que le polyuréthane n'est pas complètement polymérisé.

Cependant, du fait de la complexité des couplages thermo-chimio-rhéologiques prenant place lors de la mise en œuvre ainsi que de la géométrie parfois complexe des moules utilisés, le contrôle et l'optimisation des procédés s'avère difficile. Les modèles analytiques que l'on peut trouver dans la littérature sont insuffisants pour rendre compte de la complexité des phénomènes.

Au sein de l'entreprise ENIEM on utilise la mousse polyuréthane rigide pour isolation thermiques des réfrigérateurs, conservateur et congélateurs, mais comme ce procédé est très spécial au même temps compliqué, parfois on a de mal à obtenir une mousse de qualité suite à la mauvaise maîtrise de ses paramètres.

Notre travail est réparti en quatre chapitres :

Après une introduction générale et une présentation de l'entreprise nationale de l'industrie électroménagère (ENIEM), le premier chapitre traite les généralités sur Isolation Thermique, où on trouve des définitions de cette dernière.

Le second chapitre portera les Généralités sur les polymères et leurs procédés d'élaboration.

Nous citerons dans le troisième chapitre mousse polyuréthane rigide. La partie expérimentale sera détaillée dans le chapitre quatre où nous exposons les différents paramètres technologiques qui influent sur la qualité de la mousse PUR

Enfin une synthèse du travail sera donnée dans la conclusion générale.



## **1. Présentation de l'entreprise ENIEM**

L'Entreprise Nationale des Industries Électroménagères **ENIEM** est née après la restriction de l'entreprise mère SONELEC le 02 janvier 1983. Cette dernière a été renommée en Août 1971.

En 1989, l'entreprise a connu une baisse brusque de production due à la concurrence du marché. Cette situation a provoqué sa transformation, en société par action dont le but est d'améliorer la recherche et le développement de ses produits, à l'échelle nationale.

Connu aujourd'hui, le leader de l'électroménager en Algérie, et cela, dans divers domaines tels que :

- La climatisation, la cuisson, la réfrigération et la conservation (Oued Aissi).
- Sanitaire (Miliana).
- Filiale lampe (Mohammedia).

Elle est située dans la zone industrielle AISSAT IDIR de Oued Aissi, à 7 Km du chef-lieu de la wilaya Tizi-Ouzou, à proximité de la route nationale. Ce qui facilite son accès. Sa direction générale est située à la sortie sud-ouest, de la ville de Tizi-Ouzou.

Le champ d'activité de l'entreprise ENIEM consiste en la conception, la fabrication et la commercialisation des produits électroménagers, ainsi que la prise en charge de la fonction service après-vente. Actuellement, l'entreprise ENIEM est constituée de :

- La direction générale (D.G).
- L'unité froid (U.F).
- L'unité cuisson (U. Cuis).
- L'unité climatisation (U.C.L).
- L'unité prestation technique (U.P.T).
- L'unité commerciale (U.C).

L'entreprise ENIEM aujourd'hui a une importante gamme de production, ces produits sont :

- Les réfrigérateurs petit et grand modèle (R.P.M et R.G.M).
- Le congélateur vertical.
- Le combiné.
- Cuisinières à 4 et 5 feux.
- Climatiseurs

Ces produits sont destinés au grand public et la distribution se fait par des agents agréés dont la liste se trouve au niveau de l'unité commerciale (Département vente).

## **2.Objectif social et champ d'activité**

ENIEM est leader de l'Electroménager en Algérie. Elle possède des capacités de production et une expérience de plus de 30 ans dans la fabrication et le développement dans les différentes branches de l'électroménager.

Elle assure également la commercialisation et le service Après-vente de ses appareils.

## **3. Principales missions et activités de l'entreprise**

### **3.1 Direction générale**

La direction générale est responsable de la stratégie et du développement de l'entreprise.

Elle exerce son autorité hiérarchique et fonctionnelle sur l'ensemble des directions et des unités.

### **3.2 Unité froid**

La mission globale de l'unité est de produire et développer les produits froids domestiques. Ses activités sont:

- Transformation des tôles.
- Traitement et revêtement des surfaces (peinture, plastification).
- Injection plastique et polystyrène.
- Fabrication de pièces métalliques.
- Isolation (moussage).
- Thermoformage.
- Assemblage.

### **3.3 Unité cuisson**

La mission principale de l'unité est de produire et développer la cuisson à gaz électrique ou mixte et tout produit de technologie similaire. Ses activités sont :

- Transformation de la tôle.
- Traitement et revêtement de surface (Zingage, Chromage).
- Assemblage.

### **3.4 Unité climatiseur**

La mission globale de l'unité est de développer les produits de climatisation.

### **3-5 Unité commerciale :**

Sa mission principale est la commercialisation des produits de l'entreprise et d'assurer le service après vente. Ses activités sont :

- marketing
- vente
- service après vente
- gestion des produits finis

### **3-6 Unité prestation technique :**

Elle a pour mission de fournir de la prestation technique et des services nécessaires aux unités de production. Ses activités sont :

- Conception et réalisation des outils/moules
- Usinage des différentes pièces de rechange
- Etalonnage
- Gestion d'énergies et de fluides
- Entretien des bâtiments
- Neutralisations des rejets industriels
- Transport de marchandise
- surveillance de site (gardiennage)
- prestation sociale.

ENIEM possède deux autres filiales qui sont :

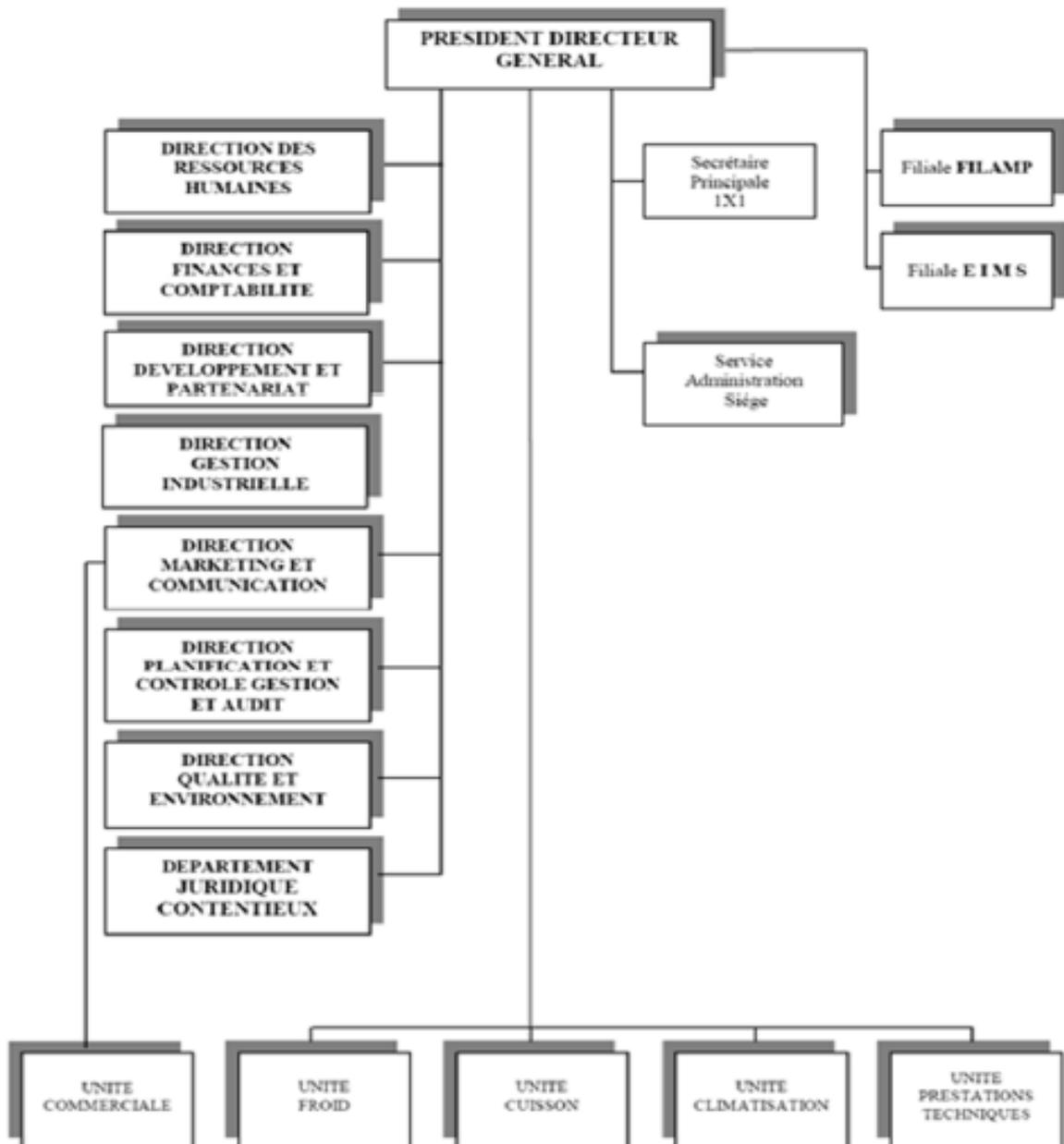
### **3.5 Unité sanitaire**

L'unité sanitaire de Miliana est acquise par l'entreprise ENIEM en l'an 2000. Elle n'entre pas dans le champ de certification de l'entreprise. La mission globale de l'unité est de produire et développer les produits sanitaires (Baignoires, lavabos ...).

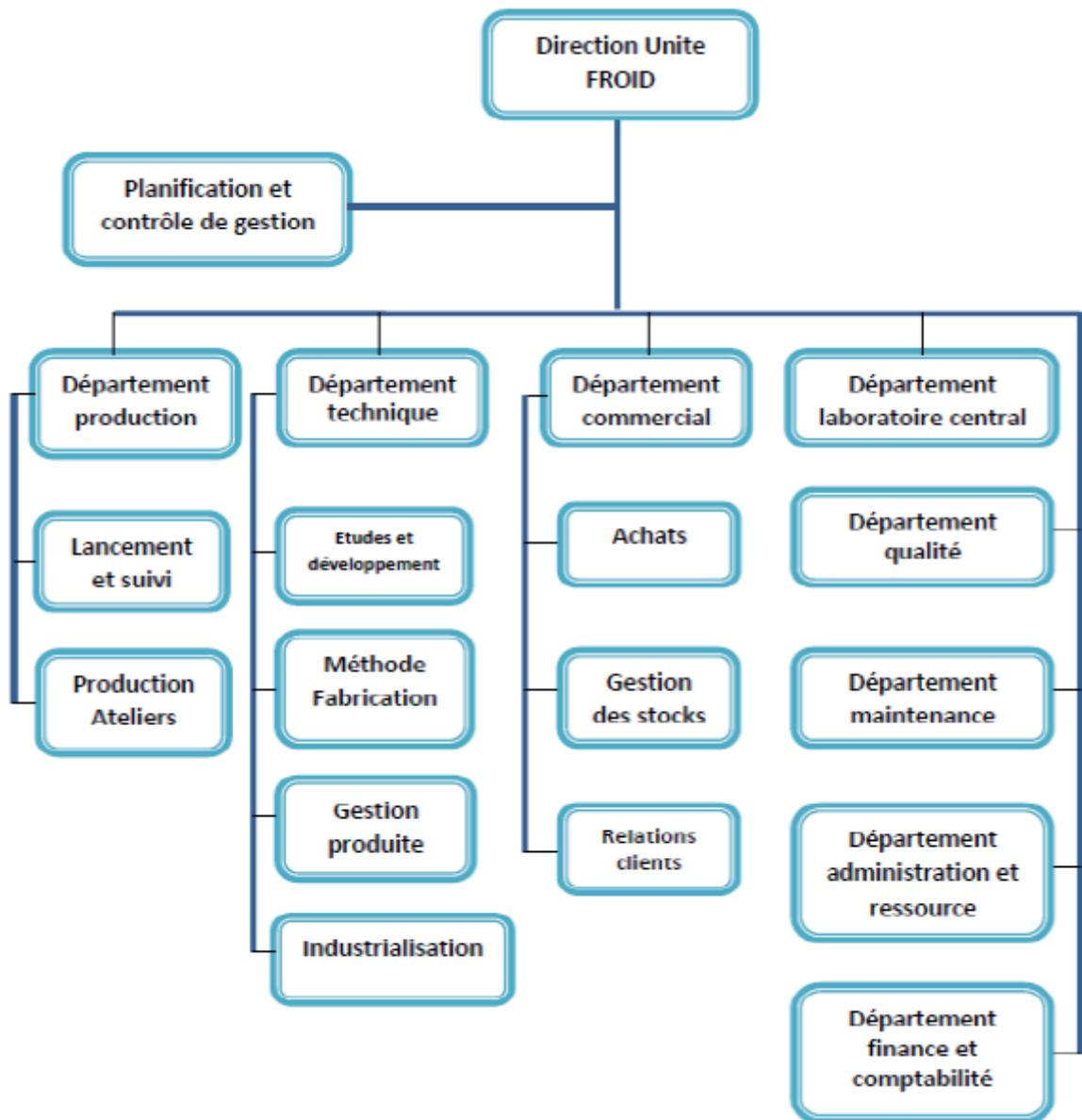
### **3.6 Filiale Filamp**

L'Unité Lampe de Mohamma (U.L.M) qui a démarré en février 1979, pour fabriquer des lampes d'éclairage domestique ainsi que des lampes de réfrigérateurs. Cette unité est devenue une filiale à 100%, à l'ENIEM, le 01/01/1997. Cette filiale est dénommée «**FILAMP**».

## ORGANIGRAMME GENERAL DE L'ENIEM



## Organigramme de l'unité froid



## **4. Politique de l'entreprise.**

L'ENIEM est certifiée ISO 14001/2004 ENVIRONNEMENT et ISO 9001/2008 QUALITÉ.

### **4.1. Politique qualité**

L'entière satisfaction durable du client constitue pour l'entreprise, l'objectif principal. Face aux enjeux économiques, l'**ENIEM** a mis en œuvre et a développée un système de management, de la qualité conforme au référentiel international ISO 9001/2008. Cette politique qualité basée sur l'amélioration continue des processus se manifeste par la volonté de la Direction Générale à :

- Comprendre les besoins présents et futurs de ses clients et y répondre efficacement en mettant à leur disposition des produits et des services compétitifs.
- Développer la culture de l'entreprise et le professionnalisme de son personnel.
- Améliorer en continu, l'efficacité du système management de la qualité.

#### **4.1.1. Engagement de la direction**

Pour mettre en œuvre sa politique, la Direction Générale de l'ENIEM s'engage à :

- Se conformer aux exigences légales et réglementaires, en vigueur.
- Appliquer et respecter les dispositions et procédures établies.
- Fournir les ressources nécessaires pour atteindre ses objectifs.

#### **4.1.2. Objectifs de l'entreprise**

Pour faire aboutir les missions précitées, l'ENIEM se fixe les objectifs suivants :

- Accroître la satisfaction des clients.
- Améliorer les compétences du personnel.
- Réduire les rebuts.
- Augmenter la valeur de la production.
- Améliorer le chiffre d'affaire.

## **4.2. Politique environnementale**

La politique environnementale de l'ENIEM s'inscrit dans le développement durable en intégrant un management proactif dans le domaine de la protection de l'environnement. Pour y parvenir, l'ENIEM se base sur la prévention de toute pollution, la préservation des ressources, la sensibilisation et la formation, la responsabilisation et l'implication de son personnel. Pour cela, l'ENIEM a décidé de s'engager dans une démarche volontaire d'amélioration continue, en mettant en place un système de management environnemental, selon le référentiel ISO 14001/2004. La direction générale met à disposition, les moyens nécessaires pour la réussite de ce projet.

## Chapitre I

# ISOLATION THERMIQUE

## I.1.Introduction[1]

L'isolation thermique désigne l'ensemble des techniques mises en œuvre pour limiter les transferts de chaleur entre un milieu chaud et un milieu froid. Elle est utilisée dans de nombreux domaines incluant notamment : le bâtiment, l'industrie, l'automobile et la chaîne du froid.

En thermique, un isolant est un matériau ayant une faible conductivité thermique. Il s'oppose aux transferts de chaleur (ouate de cellulose, laine de roche, laine de verre, bois, caoutchouc, polystyrène, matériaux poreux, papier journal etc.).

Parmi les matériaux utilisés dans l'isolation thermique, nous citerons à titre d'exemple le polyuréthane rigide ou la mousse polyuréthane.

Le développement des isolants en polyuréthane rigide a commencé dans les années trente après quoi leur faible densité, leur excellente résistance à l'eau et leur rigidité fut utilisée pour améliorer la flottabilité dans l'industrie marine.

La reconnaissance ultérieure de leur très faible conductivité thermique et de leur résistance aux huiles et aux produits chimiques, (par exemple au styrène), a favorisé leur développement dans le domaine de l'isolation thermique industrielle.

## I.2. Le transfert thermique

La chaleur se transmet par 3 modes:

- Conduction
- Convection
- Rayonnement

### I.2.1.Conduction thermique

C'est la transmission de la chaleur au sein de la masse d'un corps solide, des points les plus chauds vers les points les moins chauds, par suite du contact des particules entre elles et sans déplacement apparent de matière. La propagation de la chaleur par conduction dépend essentiellement du matériau considéré.

**Exemple:** Transmission de la chaleur à travers une paroi, dont les températures des deux faces sont différentes.

### I.2.2. Convection thermique

La transmission de la chaleur s'effectue suite au mouvement d'un fluide.

**Exemple:** Transmission de la chaleur de l'air chaud en mouvement à une paroi moins chaude placée dans son flux. Si le mouvement du fluide est causé par la différence de densité, due à des variations de température, la convection est dite naturelle.

**Exemple:** Echange de chaleur entre l'air d'un local fermé non ventilé et une caisse placée dans ce local.

Si le mouvement du fluide est provoqué par un moyen mécanique, la convection est dite forcée.

**Exemple:** Echange de chaleur entre l'air d'un local mécaniquement ventilé et une caisse placée dans ce dernier.

### I.2.3. Rayonnement

C'est la transmission de la chaleur d'un corps à un autre moins chaud, par ondes électromagnétiques, à travers l'espace qui les sépare.

## I.3. Les matériaux isolants

Les matériaux employés doivent posséder plusieurs qualités: une très faible conductivité thermique, non hygroscopique, un pouvoir de réflexion important. Un matériau est considéré comme isolant si sa conductivité thermique est inférieure à  $0,065 \text{ W/m. } ^\circ\text{C}$

Les principaux matériaux isolants mis en œuvre dans la conception d'emballages et matériels isothermes de transport et de stockage sont les suivants:

- Mousse polyuréthane (mousse de PU).
- Polystyrène expansé extrudé.
- Panneaux rigides de polyuréthane (panneaux de PU).
- Polystyrène expansé (PSE).
- Mousse de polyéthylène expansé extrudé (mousse de PEEE).

D'autres matériaux existent, mais sont plutôt utilisés dans d'autres domaines comme le bâtiment: fibres de verre, laine de roche, liège expansé, mousses phénoliques, chlorure de polyvinyle expansé, élastomères mousses, poudres isolantes.

### I.3.1 Quelques exemples d'isolants et leurs applications

#### a- Polystyrène

Le polystyrène est le polymère obtenu par polymérisation des monomères de styrène. C'est un matériau solide à 20°C et pâteux à 120°C, qui fond entre 150°C et 170°C. Il est inflammable et combustible avec une température d'auto-inflammation d'environ 490°C.

Il est également soluble dans les hydrocarbures chlorés et aromatiques. Ce matériau dur, cassant et transparent se décline en différents types de polystyrènes aux applications multiples. Il est utilisé notamment pour réaliser des emballages, des jouets et des maquettes.

#### - Application

Les principales utilisations du polystyrène dans la vie courante sont :

- les boîtiers de CD en PS cristal.
- les couverts et verres en plastique en PS choc.
- les emballages alimentaires (comme les pots de yaourt).
- les emballages des appareils fragiles en PSE.
- Isolation thermique des bâtiments sous forme expansée ou extrudée.

#### b- Laine de verre

La laine de verre est un produit naturel ayant d'excellentes caractéristiques d'isolation et des propriétés physiques hors du commun. Elle résiste au feu, et elle est chimiquement neutre, n'absorbe pas, légère, tendre, facile à travailler et résistante au vieillissement.

#### - Application

- Isolation des conduites
- Isolation des réservoirs
- Isolation des toits, des plafonds,
- Isolation des cuisinières (le cas de l'unité cuisson ENIEM)

#### c- Ouate de cellulose

Ouate de cellulose, également connue sous le nom d'« isolant de cellulose » ou « isolant cellulosique », est un matériau de construction isolant (dit « éco matériau ») très prisé en éco construction.

#### - Présentation de matériau

La ouate de cellulose est obtenue à partir de papiers recyclés. Elle est fabriquée par un broyage du papier, plus particulièrement de journaux neufs invendus et/ou de chutes de

coupes de papiers neufs d'imprimerie. Les particules métalliques sont extraites, puis on y ajoute des additifs. On procède ensuite au raffinage, à l'emballage et à la palettisation. Généralement de couleur grise, la ouate de cellulose existe néanmoins en couleur blanche. La ouate de cellulose est utilisée comme isolant depuis les années 1930 aux Etats-Unis et en Scandinavie.

#### **- Application**

La ouate de cellulose sous forme de panneau ou en vrac, est utilisée comme isolant thermique des murs, planchers, combles perdus, rampants. Sa mise en œuvre est adaptée aussi bien pour des constructions traditionnelles que dans la construction neuve.

#### **d- Laine de chanvre**

Le chanvre est une plante souvent cultivée sans pesticides, ni insecticides dont on extrait les fibres transformées en laine pour l'isolation. On y ajoute un liant synthétique qui assure sa souplesse et sa résistance dans le temps.

La laine de chanvre se présente sous forme de rouleaux souples ou de panneaux semi-rigide. Elle est conditionnée en épaisseur allant de 40 à 120 mm

#### **- Application**

La laine de chanvre s'utilise pour l'isolation du toit, l'isolation des toitures, des combles des murs ou des cloisons, des rampants, des murs, et parfois du sol.

On préférera la laine de chanvre fabriquée avec des plantes cultivées sans traitement phytosanitaire issues de l'agriculture biologique.

#### **e- Liège expansé**

Le liège expansé ou « liège noir » est issu du chêne liège de méditerranée d'au moins 30 ans d'âge. Pour sa fabrication, seule l'écorce est utilisée. La récolte se fait tous les 7 ou 8 ans. Une fois l'écorce du chêne liège récoltée, elle est réduite en granules. Ces dernières sont chauffées à 300°C avec de la vapeur d'eau pour qu'elles se dilatent et s'agglomèrent entre elles. Les granules de l'écorce du liège se collent alors grâce à l'action de leur propre résine (la subérine). C'est grâce à l'air enfermé dans les cellules fermées que le pouvoir isolant est conféré au liège expansé. Il est utilisé depuis plus de 150 ans en isolation thermique

#### **- Application**

Le liège expansé s'utilise aussi bien dans la construction neuve que dans la restauration de bâtiments traditionnels. On l'utilise pour les murs et les combles ainsi que pour

l'isolation des sols, sous allés, des planchers, des doubles-cloisons. Pour les supports de couverture et pour les rampants, on utilisera le liège expansé sous forme de panneau rigide.

#### **f- Laine de coco**

Le **coco** est surtout connu pour son utilisation dans l'industrie du meuble. Ses applications en isolation thermo-acoustique, encore confidentielles, sont très intéressantes. Au plan écologique, la transformation de la fibre de coco est exemplaire. Le processus de fabrication, de la récolte des noix au matériau isolant, exclut tout produit chimique, excepté le sel de bore servant au traitement insecticide et anti-feu.

#### **g- Mousse polyuréthane rigide**

Les mousses flexibles sont particulièrement utilisées en ameublement (assises des sièges et canapés), les mousses rigides sont intégrées aux murs rideaux, ou des panneaux d'isolation (panneaux sandwich) utilisés dans le bâtiment ou dans l'électroménager (parois de réfrigérateurs ou des chambres froides par exemple). L'ordre de grandeur de la conductivité thermique de la mousse de polyuréthane se situe entre 0,023 et 0,028  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ .

Sous la forme de mousse expansée, les mousses de polyuréthanes sont largement utilisées pour leur qualité d'isolation thermique, leur adhérence sur tout support, leur pouvoir de flottaison, leur capacité à remplir les vides quels qu'ils soient et à permettre des emballages sur mesure, légers et solides. Leur utilisation est efficace aussi pour remplir un vide de bas de caisse de voiture et éviter que la rouille ne s'y propage en faisant barrière à l'eau de pluie. On remplit le caisson et la mousse se propage dans les interstices comblant les « perforations ».

#### **Application**

- Utilisée comme colle.
- Ameublement.
- Industrie automobile.
- Décoration.
- Isolant pour les appareils électroménagers qui fera l'objet de notre travail.

### **I.4. Supers isolants**

Les supers isolants sont des matériaux possédant un meilleur pouvoir isolant que l'air sec.

Ces nouveaux matériaux issus de la nanotechnologie permettent d'atteindre des coefficients de conductivité thermique 4 à 5 fois inférieurs à celui des isolants couramment utilisés.

Plusieurs nouvelles techniques à base de silice, de polyuréthane léger ou de polystyrène ont été déjà utilisées.

Les panneaux sous vide sont des supers isolants microporeux sous vide. Cette technique ancienne et connue est utilisée essentiellement en bonbonnes (bouteille Thermos technique ancienne et connue et est utilisée essentiellement en bonbonnes (bouteille Thermos vase Dewar). Elle voit se développer de nouveaux produits sur le marché. Ces techniques sont actuellement essayées dans des éléments plats. Plusieurs compositions à base de silice, polyuréthane léger sont présentes dans ces matériaux issus de la chimie.

Parmi les supers isolants microporeux, nous citerons les panneaux sous vide (VIP)

## I.5. Caractérisation de l'isolant thermique

Pour connaître la qualité d'un isolant, il faut connaître certaines valeurs dont le coefficient lambda et la résistance thermique. Par définition, les isolants ne conduisent pas la chaleur. La manière dont un matériau conduit la chaleur s'appelle la conductivité thermique.

### I.5.1. Coefficient de conductivité thermique $\lambda$ d'un matériau

Le coefficient de conductivité thermique  $\lambda$  d'un matériau est la quantité de chaleur écoulee (transmise) par conduction à travers un corps par unité de temps, unité de surface, unité d'épaisseur et degré de différence de température. Il se mesure en Watt par mètre Kelvin (ou W/m.K).

La valeur de  $\lambda$  dépend de nombreux paramètres physiques comme la porosité, la masse volumique, la pression et la température.

Plus le coefficient  $\lambda$  d'un matériau est petit, plus ce matériau est isolant.

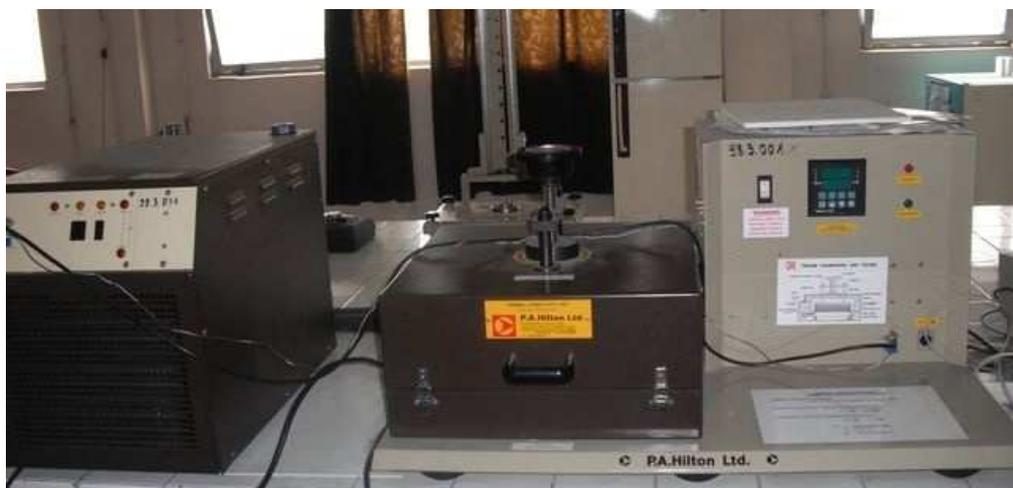


Figure I.1 : le CT mètre ou appareil de mesure de la conductivité thermique (ENIEM)

D'autres isolants avec leurs conductivités thermiques sont résumés dans le tableau suivant :

**Tableau I.1 : Les isolants thermiques**

	Masse volumique P	Conductivité thermique $\lambda$	Capacité thermique $\rho c$
Notation et unité	Kg/m <sup>3</sup>	W/(m.K)	Wh/ (m <sup>3</sup> .K)
<b>Matériaux d'isolation</b>			
Verre	25 à 30	1,20	
Polystyrène expansé	30 à 300	0,038	12
	15 à 30	1,042	09
	07 à 15	0,050	04
Plystyrène extrudé	20 à 30	0,028	
Polyuréthane (panneaux)	30	0,030	12
Polyuréthane (mousse)	27 à 60	0,039	17
Laine de verre	40 à 150	0,039	27
	15 à 40	0,041	08
	07 à 15	0,050	03
Laine de roche	40 à 200	0,045	34
	25 à 40	0,044	09
	15 à 25	0,050	06
Vermiculite	75 à 130	0,06 à 0,08	
Liège de cellulose	20 à 30	0,043	11
Liège expansé	100 à 150	0,049	65
Panneaux de chanvre	20 à 30	0,039	
Laine de coton en rouleaux	20	0,040	
Laine de mouton	20 à 50	0,060	16
	10 à 20	0,065	07

Matériaux de construction à isolation répartie			
Béton cellulaire	775 à 825	0,29	222
	575 à 625	0,21	167
	375 à 425	0,14	111
Béton de chanvre	400 à 450	0,11	213
Brique alvéolée (mono-mur)	700 à 750	0,12	202
Terre-paille	300 à 400	0,11	136
Autres matériaux			
Parpaing de ciment	850 à 950	0,9	250
Brique de terre cuite pleine	2300 à 2400	1,04	653
	1600 à 1700	0,64	458
Pisé	1770 à 2000	1,10	785

### I .5.2.Résistance thermique

Il faut savoir que les matériaux s'opposent à une « résistance thermique ». Celle d'un matériau isolant est généralement d'autant plus élevée que son épaisseur est grande et que son coefficient de conductivité ( $\lambda$ ) est faible. Cette résistance thermique  $R$  est calculée ainsi :

$$R = e / \lambda$$

$R$  : s'exprime en  $m^2.K/W$ .

$e$  : l'épaisseur du matériau exprimée en m.

$\lambda$  : la conductivité thermique.

Pour choisir un produit isolant ou d'isolation, on prendra en compte cette résistance thermique appelée  $R$ . Elle figure sur l'étiquette des produits. Plus  $R$  est important, plus le produit est isolant. Le coefficient global de transfert thermique (ou de transfert de chaleur)  $K$  : est la quantité de chaleur transmise à travers une unité de surface, par unité de temps et par degré de différence de température.

$$\mathbf{K} = \lambda / e$$

**K** : s'exprime en  $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ . Il s'appelle également coefficient global de transmission de chaleur.

Ce dernier ne tient pas compte de la convection et du rayonnement.

Pour caractériser les performances d'un matériau, on détermine le coefficient global de transfert thermique **K** ou la résistance thermique **R**.

$$\mathbf{R} = 1 / \mathbf{K}$$

l'inverse de **K** est exprimé en  $\text{m}^2 \cdot \text{C/W}$ .

Plus **K** est faible, plus le matériel est globalement isolant,

Plus **R** est élevé, plus le matériel est performant.

## Chapitre II

### GENERALITES SUR LES POLYMERES

#### II.1. Introduction

Le plus souvent synthétiques, quelquefois naturelles, les matières plastiques doivent leur essor à leur large gamme de caractéristiques, dures, molles ou élastiques, transparentes ou opaques, isolantes et quelquefois conductrices, plus ou moins résistantes aux conditions agressives de leur usage, toujours légères. C'est la nature particulière de leurs molécules en forme de chaîne, ainsi que la variété des modes d'assemblage qu'elles adoptent, qui est à l'origine de cette diversité.

Les polymères, appelés communément "matières plastiques", sont indissociables de notre environnement et de notre vie pratique. Ils se sont imposés dans tous les domaines de nos activités, des plus visibles aux plus cachés, des objets les plus banals jusqu'à des applications techniques sophistiquées, en passant par leur utilisation dans les produits d'hygiène ou alimentaires.

#### II.2. Historique [2]

Les polymères naturels ont été parmi les premiers matériaux utilisés par l'homme comme les bois et fibres végétales, cuir, tendons d'animaux, laine etc.

La notion de macromolécule n'est apparue que tardivement dans l'histoire de science des matériaux. Bien que présagée par certains chercheurs au début de XIX<sup>ème</sup> siècle, ce n'est que vers les années 1920-1930 que l'idée de macromolécule est acceptée par les chercheurs.

Les développements industriels consécutifs de la science macromoléculaire ont été accélérés ensuite par la seconde Guerre mondiale, quand les Etats-Unis ont été privés de leur approvisionnement en caoutchouc naturel en provenance d'Asie du Sud-Est, lors de leur entrée en guerre, ils ont lancé un immense programme de recherche visant à trouver des substituts de synthèse des plastiques.

#### II.3. Définition [3], [4]

Les polymères sont des matériaux à molécules géantes résultant de l'assemblage de molécules élémentaires appelées monomères. Les chaînes obtenues par la répétition de ces monomères vont avoir des tailles et des masses molaires très importantes, typiquement supérieures à  $10000 \text{ g.mol}^{-1}$ , masse à partir de laquelle les polymères vont donner un matériau sans mécanique du terme. Les polymères sont dans l'ensemble peu denses, compte

tenu de leur origine organique et, par la suite, de la présence d'éléments constitutifs légers (Carbone, Oxygène, Hydrogène, Azote). La liaison covalente des carbones est à la base de la notion de polymère. Il s'agit d'une liaison forte d'environ 100 à 450 kJ/mol (438 kJ/mol pour la liaison carbone-carbone). Par conséquent, les polymères possèdent une élasticité élevée dans le sens de la chaîne macromoléculaire.

Les polymères diffèrent des simples macromolécules parce qu'ils résultent de l'enchaînement aléatoire de monomères alors que les macromolécules (ADN, protéines) sont issues d'une succession codifiée d'éléments précis [3].

Parmi les matières plastiques, on distingue les homopolymères, répétition d'une unique structure moléculaire, et les copolymères, succession de plusieurs structures différentes.

Les homopolymères désignent donc des polymères fabriqués à partir d'un seul type de monomère, comme par exemple les polyéthylènes PE et polystyrène PS. Dès qu'au moins deux types de monomère participent à la formation des macromolécules, on parlera de Copolymères. C'est le cas du styrène-butadiène. La variété des copolymères est très importante. Ces matériaux possèdent des propriétés physico-chimiques et mécaniques intermédiaires avec celles obtenues sur les homopolymères correspondants.

## **II.4. Classification selon la morphologie**

On peut classer les polymères selon leur morphologie microscopique en polymères amorphes et semi-cristallin.

### **II.4.1. Les polymères amorphes**

Ils n'ont pas d'ordre apparent (structure semblable à un liquide) et pas de température de fusion précise, mais ils présentent une phase de ramollissement. Ils sont caractérisés par un faible retrait, une tenue au choc, une tenue dimensionnelle et une résistance au fluage.

### **II.4.2. Polymères semi-cristallins**

Ils ont une structure ordonnée dans une matrice amorphe. Le taux de cristallinité donne l'importance de la structure cristalline dans l'ensemble de la matière. Ce taux dépend de la matière et du refroidissement lors du moulage. Ils ont une bonne tenue à la fatigue, un faible coefficient de frottement, une bonne tenue chimique.

### **II.4.3. Classification selon la structure**

Les macromolécules sont obtenues par assemblage répétitif de motifs (monomères) associés, selon les conditions, en structures linéaires, ramifiées ou réticulées

### II.4.3.1. Structure linéaire

Les molécules des polymères linéaires sont formées de longues chaînes de monomères reliés les uns aux autres par des liaisons chimiques. Dans certains cas, les monomères sont en outre organisés régulièrement dans l'espace, et le composé obtenu se partiellement cristallise ; on dit qu'il est semi-cristallin.

Dans le cas où la macromolécule est composée de la répétition d'un seul motif, ce qui résulte le plus souvent de la polymérisation d'un seul type de monomère, on parle de homopolymère. Quand plusieurs motifs différents sont répétés, on parle de copolymère. On distingue ensuite plusieurs types de copolymères suivant l'organisation entre les différents monomères. Dans le cas le plus fréquent, on a un copolymère statistique où les différents monomères se mélangent en fonction de la réactivité et de la concentration de ceux-ci les propriétés mécaniques sont alors dans la moyenne. En revanche, dans un copolymère séquencé (anglicisme copolymère à blocs est parfois utilisé) ou copolymère alterné, il peut y avoir combinaison des propriétés mécaniques :

- **Copolymère statistique** : ABBAAAABBBABABAABABAB

- **Copolymère séquencé** : AAAAAAAAAABBBBBBB

- **Copolymère alterné** : ABABABABAB

### II.4.3.2. Structure ramifié

Les polymères ramifiés se caractérisent par la présence de chaînes latérales qui sont raccordées aux chaînes principales. Faisant partie intégrante de la chaîne principale, les ramifications résultent des réactions latérales qui surviennent lors de la synthèse du polymère. Les ramifications latérales amoindrissent le potentiel de compaction d'une chaîne et, par conséquent, la masse volumique du polymère. Les polymères qui adoptent une structure linéaire peuvent aussi être ramifiés.

### II.4.3.3. Structure réticulé

Les monomères trifonctionnels, à trois liaisons covalentes actives, forment des réseaux tridimensionnels appelés polymères réticulés. Par ailleurs, les polymères comportant de très nombreuses liaisons transversales sont aussi des polymères réticulés.

De tels matériaux possèdent des propriétés mécaniques et thermiques distinctives; Elles sont plus rigides et résistent mieux au fluage. Les époxydes et les phénols formaldéhydes appartiennent à ce groupe.

## II.5. Caractéristiques des polymères [5]

Le développement de l'utilisation des matières plastiques dans tous les secteurs d'activités s'explique par le fait que les polymères sont, par leur caractéristiques, en parfaite adéquation avec les applications envisagées ; chaque polymère ayant des propriétés qui lui sont propres.

Les polymères ont remplacé d'autres matériaux par leur :

- Elasticité.
- Légèreté.
- Mise en forme.

### II.5.1. Elasticité

#### II.5.1.1. Comportement élastique

Il correspond à de petits déplacements réversibles des atomes autour de leur position d'équilibre dans le réseau cristallin. Sous l'action d'une force, les atomes s'écartent. Une réaction due aux forces de liaison tendant à les rapprocher provoque la réaction.

Pour les polymères non étirés et non renforcés, les caractéristiques d'élasticité sont indépendantes de la direction et le comportement élastique est linéaire.

Ce n'est pas le cas pour certains polymères pour lesquels le module d'Young varie avec l'amplitude de la déformation du fait de l'orientation des chaînes macromoléculaires, ce comportement correspond à des lois d'élasticité non linéaire.

#### II.5.1.2. Comportement plastique

Lorsque la limite d'élasticité est dépassée, les atomes du réseau cristallin ont changé de place sous l'action d'un effort de cisaillement.

La prise en compte des défauts du cristal, notamment des dislocations, est indispensable pour comprendre le comportement plastique.

Lorsqu'une déformation plastique est provoquée, on constate que la résistance à la déformation augmente car les dislocations interagissent entre elles et de nouvelles dislocations prennent naissance, venant augmenter les interactions, cette augmentation de la résistance à la déformation plastique est appelé l'écrouissage.

Si on relâche l'effort qui a provoqué la plasticité, on constate un retour élastique: le domaine élastique s'étend jusqu'à la contrainte qui était appliquée précédemment, ce qui se traduit par une augmentation de la limite élastique.

Ce phénomène est limité par l'apparition de microcavités qui provoquent une diminution de la section résistante et conduisent à la rupture ductile.

## II.6. Propriétés des polymères

### II.6.1. Masse volumique

La masse volumique est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité de volume. Elle est généralement notée par les lettres grecques  $\rho$  (rhô). Elle est déterminée par le rapport :

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Où  $m$  est la masse de la substance homogène occupant un volume  $V$ .

L'unité de mesure de la masse volumique  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  ou  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .

La masse volumique varie selon plusieurs paramètres. Elle dépend notamment de la température.

### II.6.2. Indice de fluidité

Indice de Fluidité (IF) ou Le Melt Flow Index (MFI), est une méthode communément utilisée dans l'industrie des plastiques pour la caractérisation des matériaux thermoplastiques, surtout les polyoléfines. Elle permet d'estimer leur extrudabilité, par ailleurs elle renseigne sur la masse moléculaire moyenne de l'échantillon. L'appareil est essentiellement un plastomère à extrusion à poids, la masse est écoulee à travers une filière cylindrique d'une matière thermoplastique à l'état fondu, dans des conditions définies de température et de pression, ensuite on mesure la masse écoulee pendant un temps donné (valeur du débit massique exprimée en g/10 min).



Figure II.1. Machine indice de Fluidité (MFI) utilisé à ENIEM (LABO)

### II.6.3. Propriétés thermiques

#### II.6.3.1. Température de fusion

Le point de fusion ou la température de fusion d'un corps représente la température à une pression donnée, à laquelle un élément pur ou un composé chimique fond c'est-à-dire passe de l'état solide à l'état liquide.

Il est possible de déterminer la nature d'une substance (identification) par la mesure de sa température de fusion. C'est pourquoi la température de fusion est une propriété caractéristique de la matière.

Tableau II.1 : Point de fusion de quelques polymères

Type	Sigles	Point de fusion
Acrylonitrile butadiène styrène	ABS	130 °C
Polyamide 6	PA6	220 °C
Polycarbonate	PC	230 °C
Polyester thermoplastique	PET	255 °C
Polyester thermoplastique transparent	PETG	255 °C
Polyétheréthercétone	PEEK	220 °C
Polyéthylène basse densité	PEBD	~ 100 °C
Polyéthylène haute densité 300	PEHD	130 °C
Polypropylène	PP	PP 163 °C
Polystyrène	PS	160 °C
Polychlorure de vinyle	PVC	125 °C

### ***II.6.3.2. Température de ramollissement Vicat***

Le point de ramollissement Vicat ou la dureté Vicat indique, par la mesure d'un enfoncement de 1 mm d'une aiguille donnée, la température à laquelle la résistance mécanique d'une matière thermoplastique devient insuffisante. Le point Vicat est lié à la résistance du matériau. Le dispositif est appelé appareil de Vicat.

## **II.6.4. Propriétés mécaniques**

### ***II.6.4.1. Contrainte au seuil d'écoulement en traction***

La limite d'élasticité est la contrainte à partir de laquelle un matériau cesse de se déformer d'une manière élastique, réversible et commence donc à se déformer de manière irréversible.

Pour un matériau fragile, c'est la contrainte à laquelle le matériau se rompt, notamment du fait de ses microfissures internes.

Pour un matériau ductile, les déformations subies au-delà de la limite d'élasticité restent permanentes, ce sont des déformations plastiques. Elles se mesurent ou se vérifient habituellement à l'aide d'un essai de traction.



Figure II.2. Machine de traction

#### ***II.6.4.2. Résistance à la rupture***

La résistance à la traction, ou charge maximale, est définie par la contrainte  $\sigma_m$  correspondant à la contrainte maximale sur la courbe de traction. Cette valeur est en général différente de la charge à la rupture à cause du phénomène de striction. Pour des applications pratiques, c'est la résistance à la traction  $\sigma_m$  qui est couramment utilisée et qui caractérise la résistance d'un matériau.

#### ***II.6.4.3. Allongement à la rupture***

L'allongement à la rupture noté  $A\%$  est une caractéristique sans dimension des matériaux. Elle définit la capacité d'un matériau à s'allonger avant de rompre lorsqu'il est sollicité en traction.

Un allongement à la rupture élevé caractérise un matériau ductile, par contre un allongement à la rupture faible caractérise un matériau fragile.

#### II.6.4.4. Module de Young en traction

Le module d'Young ou module d'élasticité (longitudinale) ou encore module de traction est la constante qui relie la contrainte de traction (ou de compression) et le début de la déformation d'un matériau élastique isotrope.

#### II.6.4.5. Résistance au choc

La résistance au choc mesure la résistance du matériau à la rupture brutale, deux essais sont fréquemment utilisés : **Charpy et Izod**, donne une valeur en quantité d'énergie dissipé (joule).



Figure II.3. Mouton CHARPY

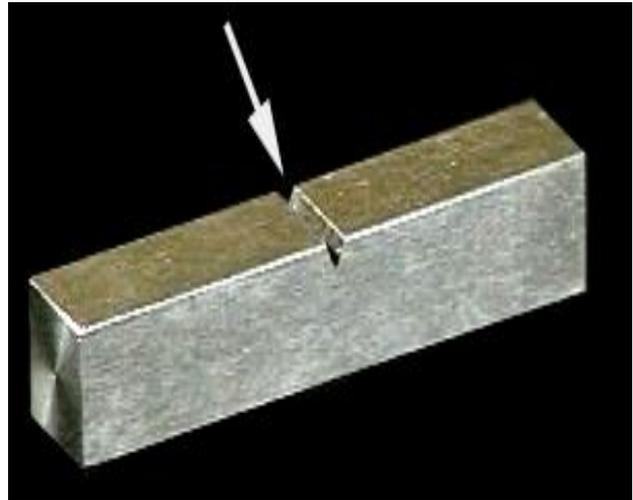


Figure II.4. Eprouvette de CHARPY

#### II.6.4.6. Dureté

La dureté d'un matériau définit la résistance qu'oppose une surface de l'échantillon à la pénétration d'un poinçon il existe une grande variété d'essais de dureté possibles, ils sont très utilisés en contrôle qualité pour comparer ou estimer la résistance ou la rigidité des matériaux.



Figure II.5. Machine de dureté

- **Exemple des polymères :**

- Polymères issus de la polymérisation d'un seul monomère (polyéthylène, PVC, téflon, polypropylène, polyacrylates, plexiglas).
- Polymères issus d'une polycondensation, donc de deux substances (nylon, orlon, PET, résine urée-formol, bakélite, résine mélamine).
- Polymères naturels (cellulose, amidon, lignine du bois) et les polymères artificiels (majorité).
- Polymères fabriqués en masse, et d'autres fabriqués en émulsion (colle à bois, peintures acryliques).
- Polymères solubles dans l'eau (polyvinyle alcool, slime, gomme arabique, gomme guar pour crème glacée, pepsine pour confiture).
- Polymères simples faits à partir de monomères purs (voir les précédents) et des copolymères faits à partir d'un mélange de monomères peu différents les uns des autres (copolymère d'éthylène et de propylène).
- Polymères composites. Ce sont des polymères thermoplastiques dans lesquels on a incorporé des solides à chaud. (tuyaux de canalisation et pneus de voiture contenant du carbone, semelles de ski et raquettes de tennis contenant des fibres de carbone, polyéthylène contenant de l'amidon pour le rendre biodégradable).

- Existence d'une série unique des silicones qui n'adhèrent sur aucune matière connue.  
Dans notre travail, on s'intéresse beaucoup plus aux plastiques en particulier les thermodurcissables.

## II.7. Les plastiques

### II.7.1. Définition [6]

Le terme "matière plastique" réfère premièrement à un état de fusion à haute viscosité, ce qui est une propriété importante pour la transformation.

Un deuxième élément de la définition est la structure organique de cette matière. Leur structure chimique est proche de celle d'une matière organique naturelle, d'origine animale ou végétale. Les matières premières pour la synthèse des plastiques sont d'ailleurs des fractions ou des dérivés du pétrole, lui-même résidu d'un monde animal et végétal abondant dans un passé lointain.

Le troisième aspect est la structure macromoléculaire, le chimiste fait la synthèse des plastiques en liant entre eux des composants chimiques élémentaires appelés les monomères.

Ces monomères sont des molécules simples, composées de quelques atomes. Les nouvelles structures ainsi obtenues, les macromolécules ou « polymères » contiendront des milliers d'atomes. Cette technique de synthèse est appelée en général « polymérisation ».

On distingue deux types de polymères, les homopolymères, qui sont la répétition d'une unique structure moléculaire et les copolymères, qui sont la répétition de plusieurs structures différentes.

Ils existent plusieurs types de copolymères suivant la manière dont les motifs monomères sont répartis dans les chaînes moléculaires (voir la figure I.1).

- Copolymère statistique : les différents motifs monomères se mélangent en fonction de la réactivité et de la concentration de ceux-ci.
- Copolymère séquencé : il peut être un copolymère à blocs ou un copolymère alterné.

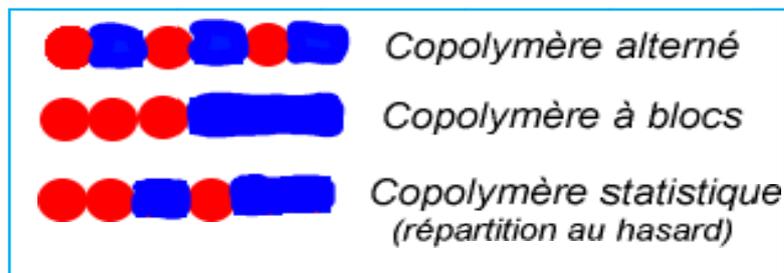


Figure II.6. Différents types de copolymères

## II.7.2. Les familles des plastiques

### II.7.2.1. Les thermoplastiques

Les matériaux thermoplastiques ou thermoplastes sont des solides généralement solubles, formés de chaînes distinctes bien compactes, liées entre elles par des seules liaisons secondaires (forces de **van der Waals** ou dipolaires, liaisons d'hydrogène, etc.) et mis en forme (même de façon répétitive) par chauffage et refroidissement.

Le polymère thermoplastique se ramollit lorsqu'elle est chauffée au-dessus d'une certaine température, mais qui, au-dessous, redevient dure ( $T_g$  température de transition vitreuse) Une telle matière conservera donc toujours de manière réversible sa thermo-plasticité initiale. Cette qualité rend le matériau thermoplastique potentiellement recyclable (après broyage). Cela implique que la matière ramollie ne soit pas thermiquement dégradée et que les contraintes mécaniques de cisaillement introduites par un procédé de mise en forme ne modifient pas la structure moléculaire et que L'état de ramollissement permet leur déformation sous l'action de contraintes mécaniques, cette déformation étant figée par le refroidissement.

On citera les polymères thermoplastiques les plus utilisés dans le tableau suivant:

**Tableau II.2 : Les matières thermoplastiques les plus courantes et leurs domaines d'utilisation.**

NOM SCIENTIFIQUE	ABREVIATION	NOM COMMERCIAL	MATIERES PREMIERES	APPLICATIONS
VINYLIQUES 1. Acétate de polyvinyle	PVAC	Movolith Velit Vinylbel	acétylène ou éthylène + acide acétique	finition pour mur et sol, adjuvant pour béton
2. Chlorure de vinyle	PVC	Benic Hostalit Vinoflex	acétylène ou éthylène  +  chlore	tubes flexibles, tuyaux, gouttières, tôles ondulées, profilés, planchettes, volets, châssis de fenêtres, feuilles, carrelages, membranes pour toitures
POLYOLEFINES 1. Polyéthylène  * faible densité  * haute densité	PE  PELD  PEHD	Lupolen  Escorene  Finathène	éthylène	tubes flexibles, tuyaux, mousse pour étanchéité de joints, mousse pour isolation de conduites, mousse pour isolation acoustique.
2. Polypropylène	PP	Hostalen PPEltex PP Carlona	propylène	tuyaux (eaux chaudes, liquides agressifs)
STYRENIQUES Polystyrène	PS	Styropor Vestypor styron	benzène + éthylène	isolation thermique, béton léger...

**II.7.2.2. Les élastomères [7], [8]**

Les élastomères sont composés de macromolécules linéaires de grande souplesse, les liaisons chimiques forcent les macromolécules à revenir immédiatement à leur configuration originale après une déformation, de là leur comportement caoutchouteux à une température de transition vitreuse. Ils sont utilisés dans plusieurs domaines comme la fabrication de pneumatiques, bondes transporteuses (les tuyaux), joints, gants médicaux, chaussures, etc. Ils existent des matériaux comme les polyuréthanes qui sont sous forme de thermodurcissables aussi que d'élastomères.

**Tableau II. 3: Les élastomères les plus courants et leurs domaines d'utilisation**

Nom Scientifique	Abreviation	Nom commercial	Matières premières	Applications
Caoutchouc-styrène-butadiène	SBR	buna-S GR-S	styrène + butadiène	employé généralement pour remplacer le caoutchouc naturel
Caoutchouc-isoprène	IR	GR-I	isoprène	moules (fabriqués par injection)
Caoutchouc-butadiène	BR	GR-B	butadiène	où la durabilité et la résistance à l'usure sont importantes
Caoutchouc-polysulfure	PR	thiocol GR-P	tétrasulfure de soude  + anhydride	idem  mastics plastiques pour jointoyer

Caoutchouc- éthylène-propène	EPR  EPDM	nordel	éthylène + propène	moules, pièces de fermetures, membrane de toitures, pièces restant constamment au contact de l'air, des intempéries des fluctuations de température et des agents chimiques...
---------------------------------	-----------------	--------	-----------------------	--

Ils existent aussi des matériaux qui appartient à une classe qui se situe entre les thermoplastiques et les élastomères d'ailleurs cette classe de matériaux, appelés les élastomères thermoplastiques, ils ont des propriétés intermédiaires.

### ***II.7.2.3. Les thermodurcissables [7], [8]***

Les thermodurcissables ont un réseau macromoléculaire tridimensionnel, ce dernier résulte de la réticulation des polymères linéaires (monodimensionnels). Ils sont souvent préparés par la réticulation de deux composants (dont l'un est une résine) qui réagissent sous l'action de la chaleur en présence de réactifs ce qui conduit à leur durcissement de façon irréversible, la structure tridimensionnelle formée est stable et elle présente une résistance thermomécanique et chimique ; Cette structure est très rigide et résistante à la température.

Un matériau thermodurcissable ne peut être mis en œuvre qu'une seule fois et devient infusible et insoluble après polymérisation. Une fois durci, sa forme ne peut plus être modifiée, un chauffage éventuel ne permettra pas de le fondre c'est-à-dire qu'il n'est pas recyclable, mais on peut l'incorporer dans d'autres matériaux comme renfort.

Les matériaux thermodurcissables sont généralement plus résistants que les matériaux thermoplastiques. On leur reconnaît une très bonne résistance diélectrique, mécanique, et à la chaleur et ils gardent leur rigidité et leurs autres propriétés mécaniques jusqu'à la température de décomposition.

On citera les polymères thermodurcissables les plus utilisés dans le tableau suivant

**Tableau II.4: Les matières thermodurcissables les plus courantes et leur domaines d'utilisation.**

Nom scientifique	Abreviation	Nom commercial	Matières premières	Applications
POLYURETHANE	PUR	DuromerBaydur	polyalcools + polyisocyanates	colles, laques, profils de fenêtres, mousse d'isolation...
PHENOPLASTE 1. Phénol-formaldéhyde	PF	Bakélite Hostaset Durez	Phénol + formaldéhyde	colles, moules, interrupteurs, mousse d'isolation...
2. Mélamine-formaldéhyde	MF	Formica RésopolUltrapas	Mélamine + formaldéhyde	colles, recouvrements minces et durs...
POLYESTER	UP	Leguval Palatal	acide maléique + glycérol	Tubes flexibles, gouttières, coupoles, tôles ondulées, profilés de bord de toitures, élément de façade, réservoirs, fosses septiques, finition de sol, laques...
RESINE EPOXY	EP	AralditEpikoteLek utherm	épichlorhydrine (chlore et éthylène) + diphénylpropane (phénol et acétone)	colles, isolateurs, finition de murs et de sols, réparation de béton...

Parmi les thermodurcissables, on trouve la mousse polyuréthane rigide qui fera l'objet de notre travail dans le chapitre III.

## Chapitre III

### MOUSSE POLYURETHANE RIGIDE

#### III.1. Historique [9]

En 1849 la réaction de moussage fut découverte par Charles Adelphe Wurtz, la fabrication du premier frigo électrique a été réalisée en 1913 et la première commercialisation en masse de frigos été en 1927 par la société "General Electric ". La première synthèse de l'uréthane été réalisée par Otto Bayer en Allemagne en 1937 et sa production industrielle n'a commencé qu' à partir de 1940 en raison du manque de ressources par la Seconde Guerre mondiale. Les technologies de l'uréthane ont été amenées aux Etats-Unis en 1953 par Jean-Pierre Abbat et Fritz Hartmann. La première planche de surface en polyuréthane a été fabriquée et utilisée pour la première fois en 1950. l'introduction des nouveaux produits synthétiques comme le CFC, HCFC, HFC été dans les années 1970. En 1987 le Protocole de Montréal a imposé la diminution et la fin de la production des CFC . Avec les technologies modernes, les agents gonflants sont aujourd'hui plus avantageux qu'à l'époque, on peut citer parmi eux le cyclopentane qu'on utilise actuellement pour l'expansion des mousse polyuréthanes rigides qui assurent l'isolation thermique des réfrigérateurs à l'ENIEM.

#### III.2. Introduction

Les polyuréthanes occupent une place privilégiée dans le domaine des polymères, en raison de leurs propriétés et domaines d'applications.

La mousse de polyuréthane est l'isolant le plus efficace et le plus performant disponible sur le marché. Elle procure un rendement supérieur à tous autres types d'isolant. [10, 11].

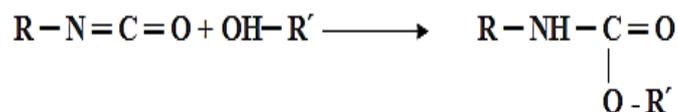
Elle présente la particularité d'être l'un des produits plastiques actuels que le transformateur moule directement à partir de monomères (les autres matières étant utilisées essentiellement à partir de polymères) [12]

Grâce à leurs caractéristiques et à la relative facilité de leur mise en œuvre, Les polyuréthanes, sont des produits dont l'évolution n'est pas encore terminée.

#### III.3. Généralités sur les mousses de polyuréthane

Un polyuréthane est un polymère d'uréthane, c'est une molécule organique. On appelle uréthane, ou plus couramment « carbamate », tout composé produit par la réaction d'un isocyanate et d'un alcool selon la réaction de base suivante :

**Iso cyanate + Polyol  $\longrightarrow$  Uréthane**



### III.3.1. La mise en œuvre des polyuréthanes

Les mousses de polyuréthane résultent de la réaction chimique d'un polyisocyanate avec des groupements ayant un hydrogène mobile, principalement des groupements hydroxyles. Cette réaction exothermique peut s'accompagner d'un dégagement gazeux, qui permet une expansion plus ou moins marquée de la mousse. D'autres réactions permettent d'obtenir des réseaux plus ou moins structurés. Ces réactions facilitées par des catalyseurs s'effectuent rapidement et à température ambiante, ce qui permet des cycles rapides de production, en grandes quantités.

Les polyuréthanes sont des matériaux dont les performances sont très variées selon les associations chimiques que l'on réalise, on trouvera aussi bien des variétés thermoplastiques que les variétés thermodurcissables ou élastomères [13]

Cette facilité des poly iso cyanates à réagir pour donner des polyuréthanes, et également des polyuries, permet une très large gamme d'applications s'accompagnant d'une grande variété de duretés et de masses volumiques.

Cela va de produits très souples et légers (dossiers d'ameublement) à des produits de hautes caractéristiques mécaniques (élément de cœur artificiel, pièce structurale d'automobile), sans oublier les peintures et adhésifs. Les mousses souples (légèreté et souplesse) et les mousses rigides (rigidité et bonne isolation thermique) constituent les tonnages les plus élevés de ce polymère. D'autres applications couvrent tous les secteurs de la vie industrielle et domestique.

## III.4. Type de mousses polyuréthane

### III.4.1. Mousses souples

Parmi ces mousses on trouve les mousses souples en bloc ; leur masse volumique est de 10 à 60 Kg/m<sup>3</sup>. Les cellules sont en majeure partie ouvertes (95%). On les obtient à partir de polyesters ou de polyéthers et de TDI [14].

A la sortie de la tête de mélange, le produit est déposé sur une courroie transporteuse recouverte de papier. La montée de la mousse s'effectue alors que la courroie progresse (épaisseur maximale 1m). Ces mousses servent en automobile (sièges en mousses découpées), literie (matelas), ameublement, textile, (tissu avec mousse contrecollée).

On peut trouver aussi les mousses souples moulées ; elles sont obtenues à base de polyéthers. Les moules métalliques défilent sous la tête doseuse de la machine de mélange. Le moule refermé est envoyé en étuve (8 à 20 min de 140 à 190 °C).

La mousse est démoulée. Ces mousses trouvent des applications dans le transport (sièges, accoudoirs, appuie-tête pour train, voitures, avions...) dans l'ameublement (fauteuils) dans les loisirs (jouets, poupées, ours, intérieurs de chaussures de ski) [15].

### **III.4.2. Mousses semi-rigides**

Ce sont des mousses intermédiaires entre les qualités souples et rigides. La caractérisation essentielle de ces mousses est leur pouvoir amortissant. Elles peuvent être fabriquées en blocs continus et sont alors essentiellement à base de polyester. Découpées, elles servent à la confection de divers articles tel le rembourrage des pare soleil de voiture [16]. On les rencontrera avec ou sans peau intégrée, les mousses à peau intégrée (cœur cellulaire à peau compacte) permettent la réalisation directe de pièces d'aspect. On injecte un mélange avec un agent physique d'expansion. Les moules métalliques sont froids (20 à 30°C) et leur inertie chimique empêche la gazéification de l'agent moussant (réalisation d'une peau compacte) alors qu'à cœur, la réaction exothermique favorise sa gazéification (température d'ébullition du produit dépassée).

On obtient ainsi des accoudoirs, planches de bord, volants automobiles [15].

- La densité des mousses semi-rigides varie de 30 à 90 Kg/m<sup>3</sup>.
- La résistance à la traction de 1,5 à 203 Kg/m<sup>3</sup>.
- L'allongement à la rupture de 70 à 85 %.
- L'élasticité au choc de 20 à 40 % [69].

### **III.4.3. Mousses rigides**

La mousse présente un matériau idéal lorsqu'il s'agit de remplir des cavités dans le but de l'isolation thermique (par exemple entre l'enveloppe intérieure et le carter extérieur d'un réfrigérateur ou l'isolation d'un tuyau métallique par expansion de mousse entre le tuyau et un chemisage en tôle) ou d'isoler des parois, même verticales, par des revêtements, lorsqu'il s'agit aussi de fabriquer des panneaux sandwichs.

Leur intérêt réside dans la facilité de mise en œuvre: coulée ou projection, et par la possibilité de pouvoir réaliser l'expansion à température ambiante.

Les mousses de polyuréthane rigide (PUR) sont utilisées depuis longtemps pour la réalisation de matériaux de structure et de revêtements divers [17, 18].

Il n'y a pas de cuisson mais les moules doivent être préchauffés au moins entre 40-49°C. Selon le produit on trouvera la mise en œuvre manuelle, le moulage par injection réaction, la projection au pistolet

Ces mousses rigides ont d'excellentes propriétés d'isolation thermique dans une large plage de température (-30 °C, +70 °C).

La résistance chimique est bonne et l'accrochage pendant le moussage est satisfaisant sur le bois, béton, métal, céramique....

Les mousses rigides se rencontrent dans l'isolation thermique. En choisissant une expansion physique adéquate, On obtient des panneaux fabriqués en usine pour l'électroménager (réfrigérateur) le bâtiment ou des produits à mettre en œuvre sur place [remplissage

d'espace creux en bâtiment ou projection sur murs, plafonds ...isolation de combles inaccessibles), Comme le montre la figure III.1:

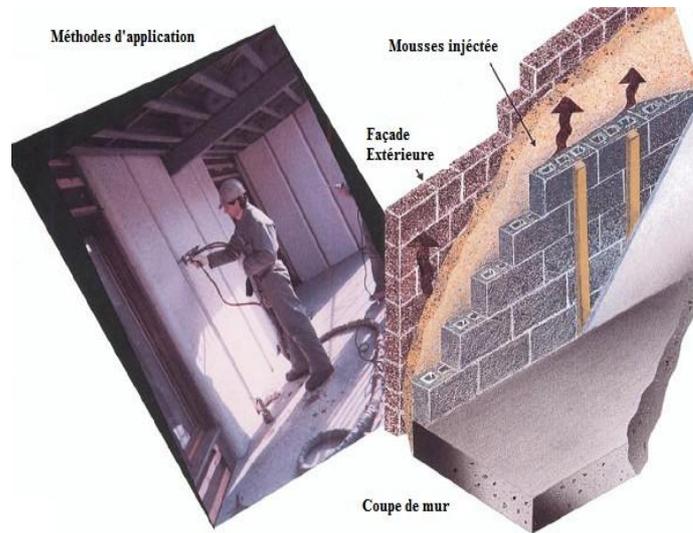


Figure. III.1: Méthode d'application de la mousse de polyuréthane injectée dans le domaine de l'isolation du bâtiment [19].

La figure III.2 nous montre le comportement en compression de la mousse de polyuréthane

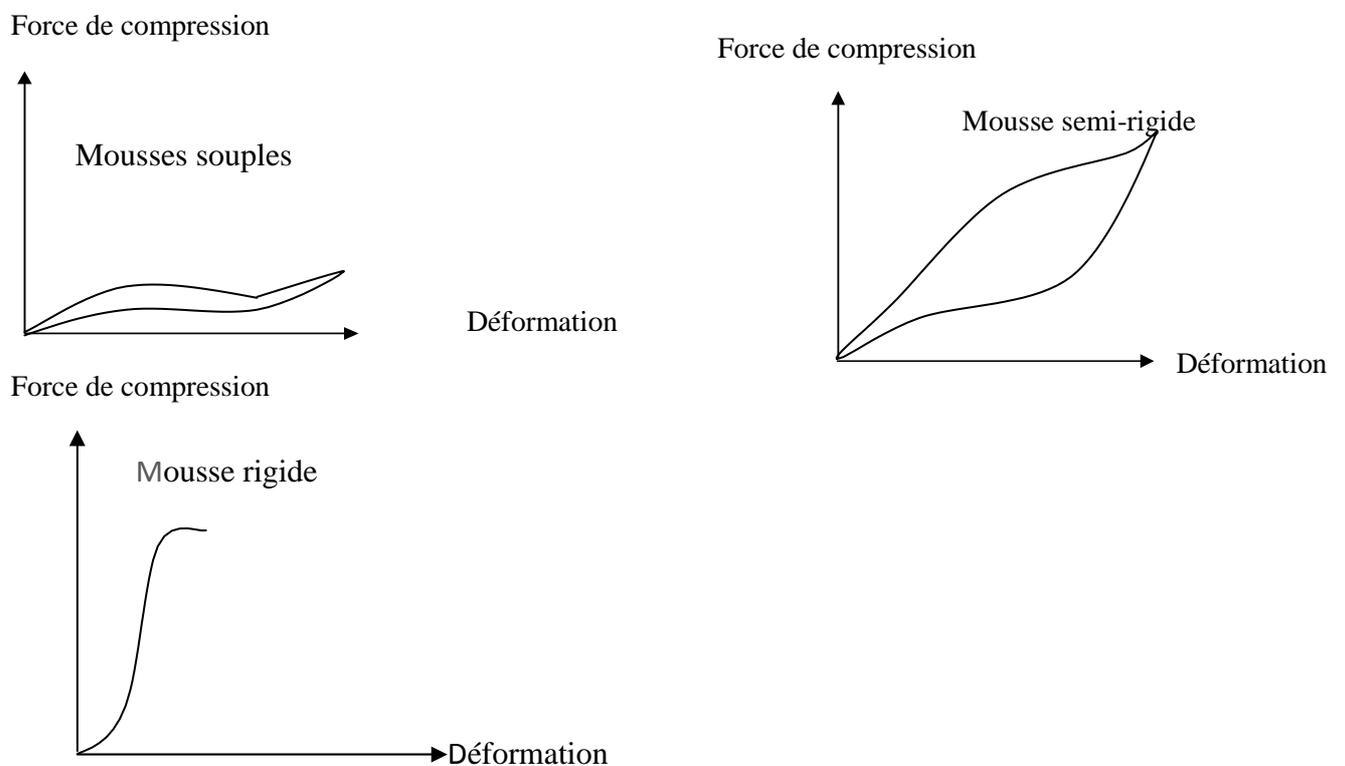


Figure. III.2: Comportement en compression de mousses PUR. ...) [15]

### III.5. Conductivité thermique

La conductivité thermique ( $\lambda$ ) est une caractéristique propre à chaque matériau. Elle indique la quantité de chaleur qui se propage par conduction thermique :

- en 1 seconde,
- à travers 1 m<sup>2</sup> d'un matériau,
- épais d'un 1 m,
- lorsque la différence de température entre les deux faces est de 1 K (1 K = 1 °C).

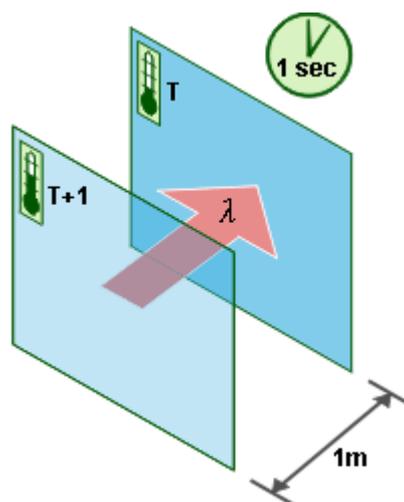
La conductivité thermique s'exprime en **W/mK**.

Plus la conductivité thermique est élevée, plus le matériau est conducteur de chaleur. Plus elle est faible, plus le produit est isolant.

Ce coefficient n'est valable que pour les matériaux homogènes. Il n'a pas de sens pour les matériaux hétérogènes à travers desquels la chaleur se propage en même temps par conduction, convection et rayonnement.

Le coefficient de conductivité thermique  $\lambda$  d'un matériau varie en fonction de la température et de l'humidité de celui-ci.

Les documentations technico commerciales des matériaux devront donc préciser avec la valeur de la conductivité thermique  $\lambda$ , les conditions dans lesquelles cette valeur est obtenue (et utilisable!). On tâchera de s'approcher des valeurs normales d'utilisation (Température entre 10 °C et 20 °C).



### III.5.1. Coefficient thermique pour différents types de mousses

Tableau III.1 : Coefficient d'isolation thermique pour différents matériaux

Isolant	Coefficient d'isolation Kcal/m <sup>2</sup> /h/°C/m)
Mousse rigide de PUR (expansée au N)	0.014-0.018
Mousse rigide de PUR (expansée au CO <sub>2</sub> )	0.025-0.30
Mousse rigide urée formol	0.032
Mousse rigide Polystyrène et phénolique	0.034
Laine de verre et de roche	0.035
Liège expansé	0.037
Aggloméré fibres minérales	0.040
Bois aggloméré	0.055

### III.6. Définition de la mousse polyuréthane rigide [20]

La mousse est un polymère dont les alvéoles, ouverts ou fermés, qui sont produits par l'expansion chimique ou physique d'un gaz, lui assurent une propriété très recherchée qui est l'**isolation thermique**.

La mousse polyuréthane rigide "PUR" est l'association de deux composants liquides principaux qui sont : le polyol et poly iso cyanate mélangé avec un agent d'expansion, ce dernier provoque l'augmentation de volume des vides au sein du polymère.

La partie (A) est un liquide visqueux qui a couleur foncée, appelé iso cyanate, la partie (B) est aussi un liquide visqueux avec une couleur ambre, d'une apparence miel collant et peut avoir une forte odeur d'ammoniacale, communément appelé polyol, lorsque les liquides (A) et (B) sont mélangés, il en résulte une couleur ambre, mélange épais qui régite en quelques secondes pour former une mousse dure, cette réaction se produit, en présence d'agent gonflant appelé aussi l'agent d'expansion qui est le cyclopentane qui provoque l'augmentation de volume des vides au sein du polymère, cette réaction dégage une importante quantité de chaleur dont une partie sert à faire évaporer les liquides volatils (agents gonflants), assurant ainsi l'expansion du mélange réactionnel et sa transformation en mousse.

### III.7. Matières premières rentrant dans la formulation des polyuréthanes

#### III.7.1. Les iso cyanate

Parmi les iso cyanates les plus utilisés pour la fabrication des mousses de polyuréthane on trouve les iso cyanates aromatiques, plus au moins réactifs selon leur structure et leur degré de purification ce sont essentiellement:

Le diphenyle méthane di iso cyanate (MDI) et ses homologues supérieurs largement utilisés pour la fabrication des mousses rigides (mousses pour isolation thermique).

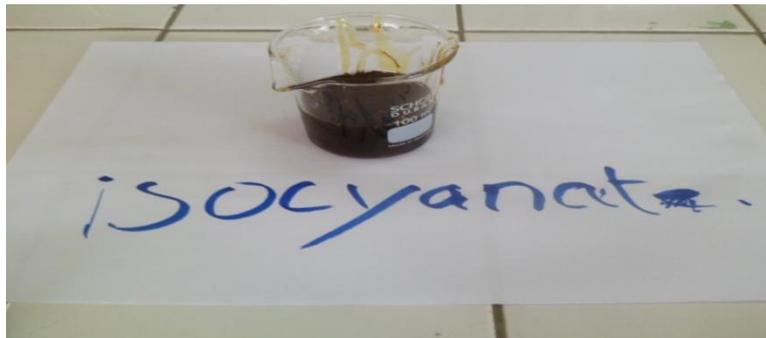


Figure III.3. Iso cyanate

##### III.7.1.1 Les iso cyanates aromatiques (HDI, IPDI)

Ils sont réservés aux produits ne devant pas jaunir au cours du vieillissement (peintures) [13].

On utilise un mélange MDI + TDI pour les mousses hautes élasticités ou haute résilience [15].

Les iso cyanates aliphatiques très toxiques et de prix élevé sont réservés aux applications devant résister à la lumière.

##### III.7.1.2. Toluène di iso cyanate (TDI)

Le composé de base est le toluène. IL subit une opération de nitration puis l'action du phosgène  $\text{COCl}_2$  permet l'obtention du groupement réactif.

Le processus de fabrication permet l'obtention d'un mélange d'isomères dans le rapport 80/20:

- 80% molaire de TDI-2,4, c'est-à-dire avec une position para réactive et une ortho peu réactive ;
- 20% molaire de TDI-2,6, c'est-à-dire avec deux positions *ortho* peu réactives. C'est un produit très fluide ( $h = 3 \text{ MPa} \cdot \text{s}$ ) avec une odeur très forte.

Ces produits peuvent être utilisés séparément ou en mélange. Ce sont des liquides bouillant à 106-107°C sous pression atmosphérique, mais ayant des points de solidification entre 5°C et 21° C, suivant la teneur en isomère : 2-6

Point d'inflammation: 127°C.

Ils sont surtout employés dans la fabrication des mousses à base de polyesters ou de polyéthers. [16]

**III.7.1.3. Le diphenyle méthane di iso cyanate (MDI)**

Le MDI pur est le diphenyle méthane di iso cyanate-4,4'. Il est peu stable à température ambiante et fond à 38 °C. Il di merise à faible température et précipite, ce qui rend son stockage difficile et nécessite la réalisation de produits modifiés. Il sert surtout à la fabrication des élastomères de polyuréthane par réaction avec des polyesters, à base d'acide adipique et de tri-éthylène-glycol. En raison de sa faible tension de vapeur, il agit moins sur l'organisme que les précédents. [16]

Le produit le plus courant est le MDI brut avec *n* voisin de 2,7. Il s'agit d'un produit brun visqueux Il nécessite des opérations de réglage de fonctionnalité, réactivité et viscosité. Chaque variété de MDI est spécifique à une application bien définie.

**Tableau III.2. Application des iso cyanates**

<b>Di isocyanates et poly isocyanates utilisés dans les applications de polyuréthane</b>	<b>Champs d'application</b>
<b>TDI, PMDI</b>	Mousse souple par extrusion et moulage
<b>TDI, PMDI</b>	Mousse rigide, collage sur place
<b>PMDI</b>	Mousse rigide, moulage, extrusion et vaporisation
<b>PMDI, HDI</b>	Liant
<b>MDI et PMDI</b>	Élastomères Moulage par injection
<b>MDI, TDI, NDI, HMDI, TMXDI</b> <b>Prépolymères</b>	Élastomères Moules d'élastomères
<b>HDI, TDI et IPDI</b> <b>Poly iso cyanates et HMDI Poly iso cyanates</b>	Revêtements Peinture à deux composantes

<b>MDI, TDI,</b>	Revêtements flexibles à une Composante, apprêt et scellant
<b>PMDI</b>	Mousse rigide de structure

### III.7.2. Les polyols (polymères poly-hydroxylés)

Un polyol est défini par deux paramètres principaux :

- Nombre de groupements réactifs intervenant dans la réaction :

Il s'exprime sous la forme d'indice d'hydroxyde  $I_{OH}$ , ou le nombre de fonctions OH par kilogramme de produit  $f_{OH}$  /kg.

- Fonctionnalité

Nombre de fonctions réactives : 2 pour un diol, 4 pour un quadrol.

L'affinité du groupement iso cyanate avec les atomes d'hydrogène et la possibilité industrielle d'obtenir des produits hydroxylés conduisent à l'utilisation d'une grande variété de polyols pour la formation du réseau uréthane.

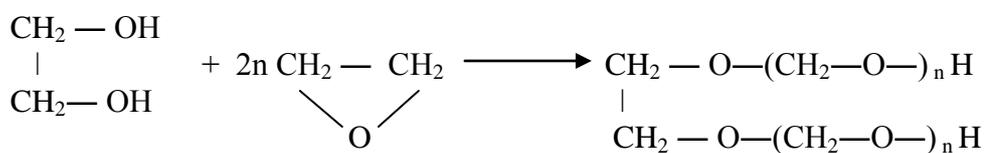
Deux types de polyols sont couramment utilisés dans la chimie des polyuréthanes :

#### III.7.2.1. Les polyols polyéthers

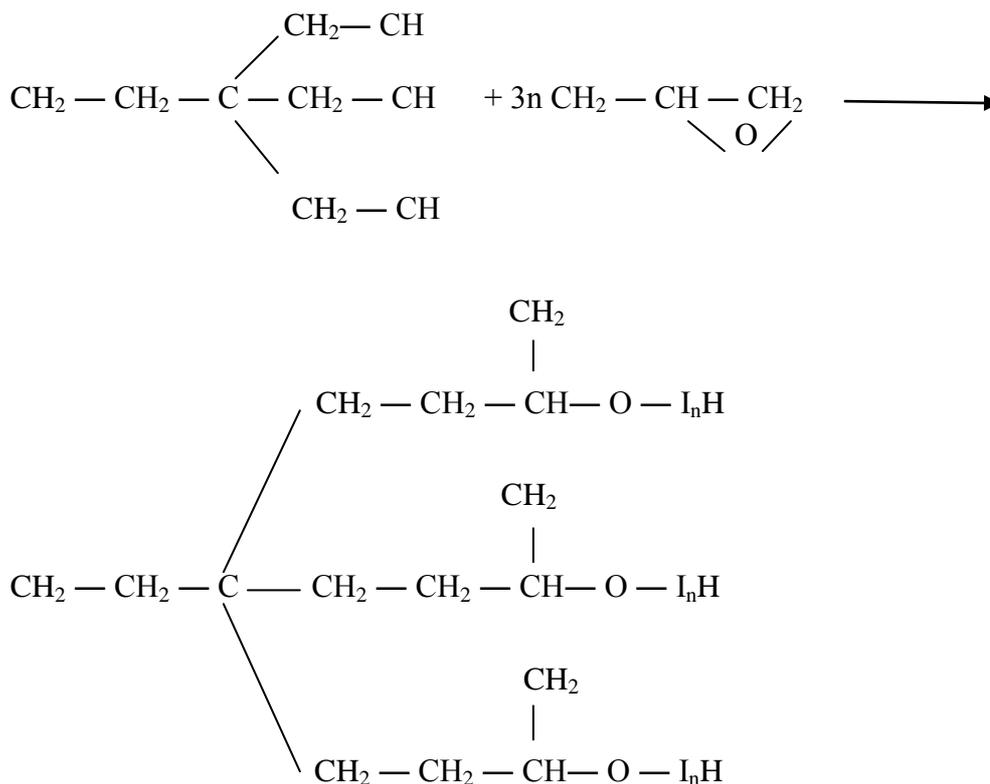
Ce sont les polyols les plus utilisés, donnent des produits plus élastiques. ) [13]

Les mousses de polyuréthane fabriquées à base des polyéthers résistent à l'humidité [15]

Exemples de polyéthers:



**Diol + Oxyde d'éthylène Triol**



Triol + Oxyde de propylène

**III.7.2.2. Les Polyols polyesters**

Pour certaines applications (fabrications des isolants ignifuges), il est nécessaire d'utiliser des composés ayant une bonne tenue à chaud et une bonne résistance à l'abrasion. L'emploi de polyols polyesters est alors recommandé. [10] Il s'agit de produits résultant de la polycondensation de polyols sur des polyacides (ou leurs anhydrides).

Ils portent une meilleure tenue chimique, ils offrent une bonne résilience et une bonne tenue aux huiles, aux essences [15]. cependant leur principal inconvénient est la tendance à l'hydrolyse limitant la résistance dans des conditions sévères d'humidité.



Figure III.4 : Polyol

### III.7.2.3. Les composants rentrants dans la composition chimique des polyols

#### a- Les Catalyseurs

La formation de polyuréthanes et le dégagement de gaz carbonique ont lieu naturellement avec une vitesse de réaction assez lente. Il est nécessaire d'activer ces réactions, tout en évitant des réactions secondaires néfastes à la qualité du réseau. Il existe deux types de systèmes catalytiques.

#### b- Les catalyseurs aminés

La présence d'un doublet électronique sur l'azote permet aux amines, principalement les amines tertiaires, de jouer un rôle primordial dans la formation du gel et de l'expansion. La formule devra être établie en cherchant l'obtention d'une réaction très fluide (répartition homogène dans le moule) et d'une polymérisation la plus rapide possible [21].

Les amines diffèrent selon:

- L'encombrement stérique ;
- La volatilité et l'odeur ;
- La longueur de la chaîne et la structure ;
- La solubilité dans le milieu.

L'amine la plus utilisée est la tri éthylène diamine,

Dans le domaine des mousses souples, on trouve aussi le bis-2-di méthyle amino éthyle éther, Octoate stanneux [14].

Dans le cas des mousses rigides, l'amine la plus utilisée est la DMCHA (diméthylcyclohexyl amine).

#### c- Les catalyseurs métalliques

Dans le cas des mousses dites classiques, il est nécessaire d'activer fortement la réaction uréthane. En effet, les polyols utilisés sont à faible teneur en OH primaires. On utilise pour cela des sels métalliques d'étain ( $\text{Sn}^{++}$ ) Ce produit est utilisé à très faible concentration ; sa valeur conditionne la qualité de la mousse. L'inconvénient de ce produit est un manque de stabilité et une forte tendance à l'hydrolyse.

Dans le cas des mousses rigides, le sel d'étain utilisé est le di butyle dilaurate d'étain (DBTDL) d'autres sels métalliques sont parfois employés (acétate de potassium, sels de calcium, etc.). [14]

**d- Tensioactifs ou silicones**

Lors de la production de la mousse, un gaz est dispersé dans un liquide. Le produit doit être stabilisé pour éviter la réunion de bulles, ce qui ferait retomber la mousse (*collapsa*). Si la catalyse accélère la réaction et contribue à une stabilité chimique, les tensioactifs ou silicones jouent, eux, un rôle de stabilisation physico-chimique (interactions physiques avec la matrice). Durant la phase de réalisation de la mousse (expansion), on peut schématiser leur action:

- Nucléation et émulsification des produits, ce qui favorise le mélange des constituants
- Stabilisation du liquide en expansion (bulle) ;
- Dispersion des particules solides dans la matrice polymères ;
- Contrôle de l'ouverture des cellules.

Ce rôle est plus crucial dans le domaine des mousses souples, qui sont à cellules ouvertes [10].

**e- Réticulants**

Le passage aux polyols très réactifs à la fois dans les mousses souples et dans les élastomères ne permet pas l'emploi de catalyseurs métalliques, qui sont trop puissants. Il est cependant nécessaire d'utiliser des réticulants. Ce sont des monomères mono ou di fonctionnels, possédant des fonctions alcool ou amine. Leur rôle est double : ils réagissent avec l'iso cyanate pour donner des liaisons qui relient les segments entre eux et apportent une plus grande stabilité du réseau. Dans le cas des amines (diamines), l'azote joue également un rôle catalytique. Ces produits à forte teneur en fonctions réactives consomment beaucoup d'iso cyanates et sont souvent très hygroscopiques. Leur emploi doit donc être maîtrisé.

**f- Agents Ignifugeants ou retardants**

Les polyuréthanes sont des produits alvéolaires ayant souvent une masse volumique très faible. Comme tous les produits de ce type, ils sont inflammables.

Dans les formulations, on cherchera à améliorer le comportement au feu, en retardant ou en inhibant la propagation de la combustion. [22]

Ainsi on rajoute des additifs retardant pour améliorer le pouvoir ignifugeant de la mousse de polyuréthane.

### III.7.3. Cyclo pentane:(C<sub>5</sub>H<sub>10</sub>)

Les pentanes (n-pentane, cyclopentane et iso pentane) sont des liquides facilement combustibles dont les vapeurs forment des mélanges explosifs avec l'air. Leur utilisation comme agents gonflants exige donc de prendre certaines précautions de sécurité entraînant des investissements supplémentaires



Figure III.5. Cyclopentane

Le cyclopentane demeure liquide entre -94°C et 49°C.

**Remarque :** mais il ya d'autres agents gonflants qu'on peut citer qui sont:

#### ➤ Les CFC

Les CFC sont très stables, dans la nature ils ne se décomposent quasiment pas et restent inchangés dans l'atmosphère pendant de nombreuses décennies. Cette inertie est favorable dans les machines à froid car ces liquides restent sans dégradation. Mais lorsqu'ils se déplacent dans la stratosphère, ils seront décomposés par les UV, où ils libèrent les atomes de chlore qui attaquent alors la couche d'ozone. Un seul atome de chlore peut détruire au moins 100.000 molécules d'ozone avant de rencontrer une autre molécule avec laquelle il se lie pour former une substance à longue durée de vie. Ils contribuent donc fortement au réchauffement climatique. La fabrication de ces composés est progressivement éliminé par le Protocole de Montréal, on va citer les CFC les plus courants en industries ainsi que leurs durées de vie dans l'atmosphère, leurs PACO et leurs PRG dans le tableau suivant :

Tableau III.5 : valeurs de PACO et PRG des CFC

Nom chimique	Vie (année)	formules	PACO	PRG (100ans)
CFC-11 Trichlorofluorométhane	<b>45</b>	$\text{CCl}_3\text{F}$	<b>1.0</b>	<b>4600</b>
CFC-12 Dichlorodifluorométhane	<b>100</b>	$\text{CCl}_2\text{F}_2$	<b>1.0</b>	<b>10600</b>
CFC-113 Trichlorotrifluoroéthane	<b>85</b>	$\text{C}_2\text{Cl}_3\text{F}_3$	<b>0.8</b>	<b>6000</b>
CFC-114 Dichlorotétrafluoroéthane	<b>300</b>	$\text{C}_2\text{Cl}_3\text{F}_3$	<b>1.0</b>	<b>9800</b>
CFC-115 Chloropentafluoroéthane	<b>1700</b>	$\text{C}_2\text{Cl}_3\text{F}_3$	<b>0.6</b>	<b>7200</b>

### ➤ Les HCFC

Les hydro chlorofluorocarbures (HCFC) sont des molécules chimiques composées de carbone, de chlore, de fluor et d'hydrogène. Elles sont moins stables que les CFC, À cause de leur durée de vie limitée, les HCFC appauvrissent la couche d'ozone dans une moindre mesure (2% à 5 % de celui des CFC), et leur effet de serre est également amoindri (10% à 25%). Les HCFC sont surtout utilisés comme agents gonflants pour les mousses d'isolation, comme frigorigène en réfrigération et en climatisation, comme solvants de dégraissage, ainsi que pour la lutte contre les incendies. Leur production est en diminution à cause des accords de Montréal. On remplace ces substances par des HFC. Voici une liste

Tableau III.6. Les valeurs de PACO et PRG des HCFC

Nom chimique	Vie (année)	formules	PACO	PRG (100ans)
HCFC-22 Chlorodifluorométhane	<b>11.9</b>	CHClF <sub>2</sub>	<b>0.055</b>	<b>1700</b>
HCFC-123 2,2-dichloro-1,1,1-trifluoroéthane	<b>1.4</b>	CF <sub>3</sub> -CHCl <sub>2</sub>	<b>0.02</b>	<b>120</b>
HCFC-124 2-chloro-1,1,1,2-tétrafluoroéthane	<b>6.1</b>	CF <sub>3</sub> -CHClF	<b>0.022</b>	<b>620</b>
HCFC-141b 1,1-dichloro-1-fluoroéthane	<b>9.3</b>	CCl <sub>2</sub> F-CH <sub>3</sub>	<b>0.11</b>	<b>700</b>
HCFC-142b 1-chloro-1,1-difluoroéthane	<b>19</b>	CClF <sub>2</sub> -CH <sub>3</sub>	<b>0.065</b>	<b>2400</b>
HCFC-225ca 1,1-dichloro-2,2,3,3,3-pentafluoropropane	<b>2.1</b>	CHCl <sub>2</sub> -CF <sub>2</sub> -CF <sub>3</sub>	<b>0.025</b>	<b>180</b>
HCFC-225cb 1,3-dichloro-1,2,2,3,3-pentafluoropropane	<b>6.2</b>	CClF <sub>2</sub> -CF <sub>2</sub> -CHClF	<b>0.033</b>	<b>320</b>

### ➤ Les HFC

Les hydrofluorocarbures (HFC) sont des molécules chimiques, composées de carbone, de fluor et d'hydrogène. Les HFC sont des alternatives de rechange aux CFC et aux HCFC en raison du fait qu'ils ne contiennent aucun atome de chlore responsable de la dégradation de l'ozone. Les HFC sont peu toxiques, économiques et sans danger pour l'utilisateur.

Les pouvoirs publics et l'industrie soutiennent leur utilisation au niveau mondial, dans des applications qui répondent à des besoins environnementaux et industrielles importants, dont l'isolation thermique (la réfrigération, la climatisation). Il a été démontré que les HFC présentent un autre problème environnemental qui est l'augmentation de l'effet de serre. Il serait souhaitable de limiter également la production de HFC pour les remplacer par des gaz sans effet de serre et non nuisibles pour l'environnement, ou par d'autres technologies ou méthodes qui assurent plus de performance, d'efficacité énergétique, et de durée de vie plus longue.

Dans le tableau suivant on citera les valeurs des PRG (dans 100 ans) et PACO ainsi que les durées de vie dans l'atmosphère des HFC les plus utilisés.

**Tableau III.7 : valeurs de durée de vie, de PACO et PRG des HFC**

Nom chimique	Vie (année)	formules	PACO	PRG (100ans)
HFC-23 Trifluorométhane	<b>264</b>	$\text{CHF}_3$	<b>0</b>	<b>12 000</b>
HFC-32 Difluorométhane	<b>5</b>	$\text{CH}_2\text{F}_2$	<b>0</b>	<b>550</b>
HFC-125 1,1,1,2,2- Pentafluoroéthane	<b>29</b>	$\text{C}_2\text{HF}_5$	<b>0</b>	<b>3 400</b>
HFC-134a 1,1,1,2- Tétrafluoroéthane	<b>13.8</b>	$\text{CH}_2\text{FCF}_3$	<b>0</b>	<b>1 300</b>
HFC-143a 1,1,2- Trifluoroéthane	<b>52</b>	$\text{CF}_3\text{CH}_3$	<b>0</b>	<b>4 300</b>
HFC-152a 1,1-difluoroéthane	<b>1.4</b>	$\text{CHF}_2\text{-CH}_3$	<b>0</b>	<b>120</b>
HFC-227ea 1,1,1,2,3,3,3- Heptafluoropropane	<b>33</b>	$\text{CHF}_2\text{-CH}_3$	<b>0</b>	<b>3 500</b>
HFC-245fa 1,1,1,3,3- pentafluoropropane	<b>7.2</b>	$\text{C}_3\text{H}_3\text{F}_5$	<b>0</b>	<b>950</b>
HFC-365mfc 1,1,1,3,3- pentafluorobutane	<b>9.9</b>	$\text{C}_4\text{H}_5\text{F}_5$	<b>0</b>	<b>890</b>

### III.7.3.1. L'eau

La particularité des polyuréthanes réside dans la réaction de l'eau sur l'isocyanate, qui libère du gaz carbonique et forme des fonctions urée. Cependant, la teneur en eau est limitée à la fois par l'exo thermicité de la réaction et par la qualité du réseau final obtenu.

## III.8. Domaine d'utilisation de la mousse polyuréthane

Le polyuréthane est présent dans tous les domaines de la vie courante. La première planche de surface en polyuréthane a été fabriquée et utilisée pour la première fois dans les années 1950. Il est principalement utilisé dans les garnitures de meubles, les matelas, les composants isolants et de design dans la construction, etc. Nombre d'entre elles sont :

### ❖ Protection des barrages

De plus en plus de barrages et de digues sont protégés contre les tempêtes par une solution à base de polyuréthane.

### ❖ Ameublement

Le polyuréthane est également employé dans la fabrication de meubles (coussins, assises de sièges) et pour protéger les bordures des meubles à des fins de sécurité comme de longévité.

### ❖ L'industrie automobile

Que ce soit dans les sièges, les appuie-têtes, les accoudoirs, les volants, les toits ou les tableaux de bord le polyuréthane est particulièrement employé dans l'industrie automobile. L'industrie automobile est également très friande de mousse PU ayant pour rôle l'isolation thermique et acoustique.

### ❖ Les colles

Les polyuréthanes sont à la base de la fabrication de colles plus particulièrement pour assembler le bois ou le collage des semelles de chaussures. L'avantage principal de ce type de colle est sa résistance à l'eau. La mousse de polyuréthane est aussi un excellent matériau de collage utilisé astucieusement dans le bâtiment en la détournant de son usage premier pour par exemple coller des panneaux d'isolation sur des cloisons.

### ❖ Sport:

#### ◆ La natation

Les premiers modèles de combinaisons 100% polyuréthane conçues lors des compétitions en 2008. Qui, enfilés par les meilleurs nageurs du monde, ils ont apporté

un gain considérable en termes de performances. Ces produits ont été interdits par La Fédération Internationale de Natation (FINA) à partir du début de l'année 2010.

◆ **Les chaussures de sport**

La coopération entre notre filiale Elastogran et la société ADIDAS illustre bien, par exemple, comment on met en pratique son axiome « Nous aidons à la réussite de nos clients ». Nos experts en matériaux travaillent main dans la main avec les spécialistes des chaussures chez ADIDAS. Que ce soit lors des tests en chambre froide ou des essais de fatigue, nos collaborateurs tiennent compte des besoins et des souhaits des clients et les transposent dans des solutions concrètes d'amélioration et de perfectionnement des produits.

◆ **Rollers**

En 1973, les patins à roulettes ont été améliorés et popularisés par l'introduction de roulettes en polyuréthane thermoplastique (TPU) puis, plus tard, de chaussons en TPU, on les appelle aujourd'hui rollers.

❖ **Décoration**

La mousse de polyuréthane est un matériau exceptionnel pour réaliser des éléments de décorations (fausses poutres, décors, sculptures, ...) qui sont ensuite peints ou recouverts de matière type crépis, etc.

❖ **Nautisme**

Les qualités d'élasticité, de résistance à l'humidité et ses capacités de flottaison font du polyuréthane un matériau fort utilisé dans l'industrie nautique. Ainsi, certaines planches de surf ou planches à voile sont construites autour d'un noyau de polyuréthane. Les boudins des cerfs-volants utilisés pour le kitesurf sont également fabriqués en polyuréthane. De même la coque des bateaux est souvent constituée de mousse de polyuréthane intégrée à une double peau de fibre de verre.

❖ **Gants chirurgicaux**

De nombreux modèles sont fabriqués à partir du polyuréthane. Ils présentent l'intérêt d'être moins générateurs d'allergies que le latex tout en présentant de parfaits critères de qualité.

❖ **Industrie**

Les films de polyuréthane sont utilisés pour protéger de la corrosion, l'abrasion et l'érosion de nombreux types d'équipements (ailes d'avions, trains, automobiles, pales d'éoliennes, ...).

**◆ Isolation thermique industrielle**

Isolation de cuves et réservoirs, de canalisations, de conduites de chauffage urbain et de locaux frigorifiques car grâce à l'introduction des polyuréthanes dans les réfrigérateurs actuels sont 60 % plus efficaces que les réfrigérateurs d'il y a 15 ans ;

**◆ Isolation automobile**

Isolation thermique de véhicules frigorifiques ferroviaires et routiers, y compris les conteneurs.

**❖ Tissus**

Polyuréthane thermoplastique élastomère, De nombreux vêtements sont fabriqués à base de polyuréthane dont les propriétés extensibles en font un produit très adapté aux vêtements de sport.

**❖ Laques, peintures et vernis**

Les Polyuréthanes sont largement utilisés dans les enduits, laques, peintures et vernis que cela soit dans le bâtiment, l'ameublement ou la protection du bois.

**❖ Bâtiment**

- ✓ Panneaux sandwich à parements rigides en bardage et toiture
- ✓ Plaques isolantes à parements souples pour toitures, murs, plafonds et sols
- ✓ Matériaux isolants et de construction découpés dans des blocs
- ✓ Mousse à projeter sur place pour l'isolation et l'étanchéifiassions.

**❖ Ames pour composites**

- ✓ Les applications pour les composites sont :
- ✓ Les bateaux polyesters.
- ✓ Les panneaux autoportants.

**❖ Emballage**

- ✓ En moussant un PUR autour de l'objet à protéger dans un emballage rigide
- ✓ Les applications dans l'emballage sont :
- ✓ Le remplissage : flocons, chips, feuilles, blocs.
- ✓ Le calage amortissant.

### ❖ Électroménager

Isolation thermique de réfrigérateurs, de congélateurs, de meubles réfrigérants à utilisation professionnelle, de ballons d'eau chaude.

Dans notre travail on s'intéresse justement à la mousse polyuréthane rigide utilisée pour l'isolation thermique des réfrigérateur, conservateurs et congélateur à ENIEM ainsi que les paramètres technologique qui nous permet d'avoir une bonne qualité de la mousse ainsi qu'une bonne isolation thermique.

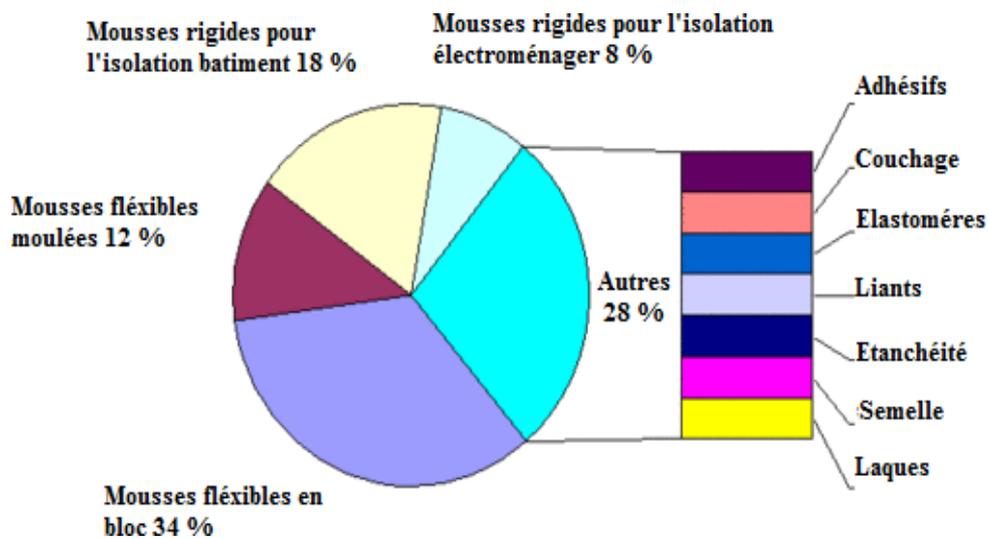


Figure. III.5: Principaux emplois des mousses des polyuréthane

### III. 9.Conclusion

Ce chapitre nous a permis de mieux connaître les mousses de polyuréthane, les matières premières rentrant dans leur recette de préparation ainsi que les diverses applications que peuvent trouver ces matériaux.

La mousse de polyuréthane faisant objet de notre étude est une mousse rigide destinée pour l'isolation thermique des réfrigérateurs petit et grand model fabriqués à l'Entreprise Nationale des Industries de l'Electroménager (ENIEM) de TIZI-OUZOU.

## Chapitre IV

### PROCEDES D'ELABORATION DES MATERIAUX

#### IV.1. Introduction

Pour obtenir une bonne mousse de qualité répondant à exigence de l'entreprise ; il est judicieux de trouver la recette idéale dans le but de minimiser le tût de rebuts et afin d'éviter la surconsommation. Celle- ci ne peut être obtenue ou réalisée que si toutes les conditions sont réunies telle que :

- ❖ Respect de la formulation donnée par le fournisseur ainsi que les densités.  
Densité du produit (polyol).  
Densité libre de la mousse.  
Densité en panneau de la mousse.
- ❖ Température des moules.
- ❖ Temps de démoulage.
- ❖ Temps d'injection (quantité de mousse à injecter).
- ❖ Réglage des pompes doseuses.
- ❖ Pression de mélange (au niveau de la tête d'injection).
- ❖ Condition des stockages : Température, humidité.
- ❖ Bon dégraissage des tôles (impuretés).
- ❖ Température des composants (polyol, iso cyanate).

Dans notre travail on s'intéresse à la qualité de la mousse, une fois que les paramètres technologiques ci-dessus sont respectés. Le non respect de ces paramètres devient une problématique. Ces problématiques sont des facteurs qui influent négativement sur la qualité de la mousse (l'expansion, réactivité de la mousse). Pour confirmer, des essais pratiques ont été effectués en agissant sur la variation de certaines paramètres influents sur la bonne qualité de la mousse, talque :

- Température des composants.
- Température des moules.
- Introduction de l'huile dans la formulation.
- Introduction de l'eau.
- Influence de pourcentage du cyclopentane sur la qualité de la mousse.
- Influence de la densité libre sur la densité en panneau et de la qualité.
- Influence de la densité en panneau sur la conductivité thermique.

## IV.2. Principes

L'objectif de travail est d'avoir une bonne mousse ainsi qu'une bonne isolation thermique.

## IV.3. Etude pratique

### IV.3.1. Procédés de fabrication des mousses de polyuréthane au niveau de l'ENIEM

- **Formulation de la mousse selon le fournisseur :**

Polyol	100pp
Cyclopentane	14pp
Iso cyanate	142pp

#### IV.3.1.1. Elaboration de la mousse au niveau de l'atelier



Figure. IV.1 : Salle MPU atelier uréthane RII

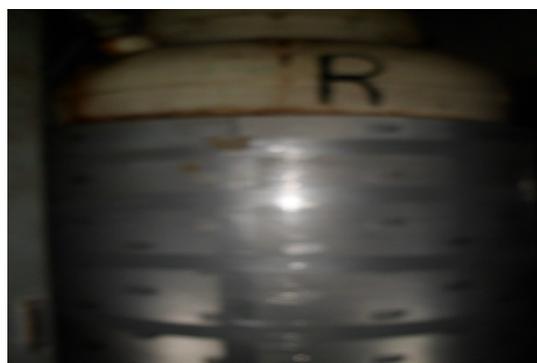
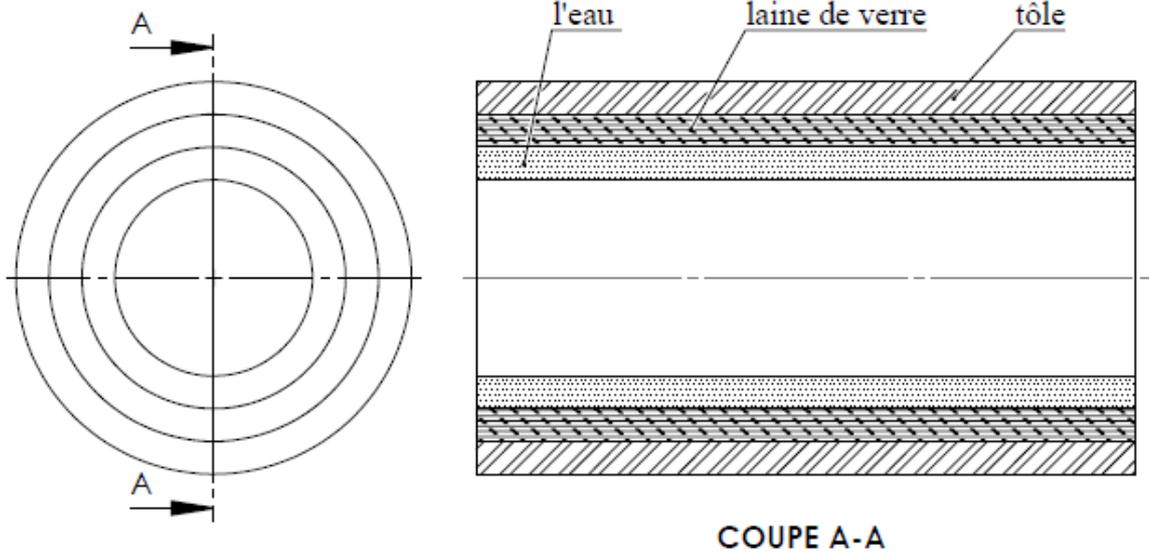


Figure. IV.2 : Mélange de polyol



Coupe de réservoir

Salle MPU (Mousse polyuréthane rigide)

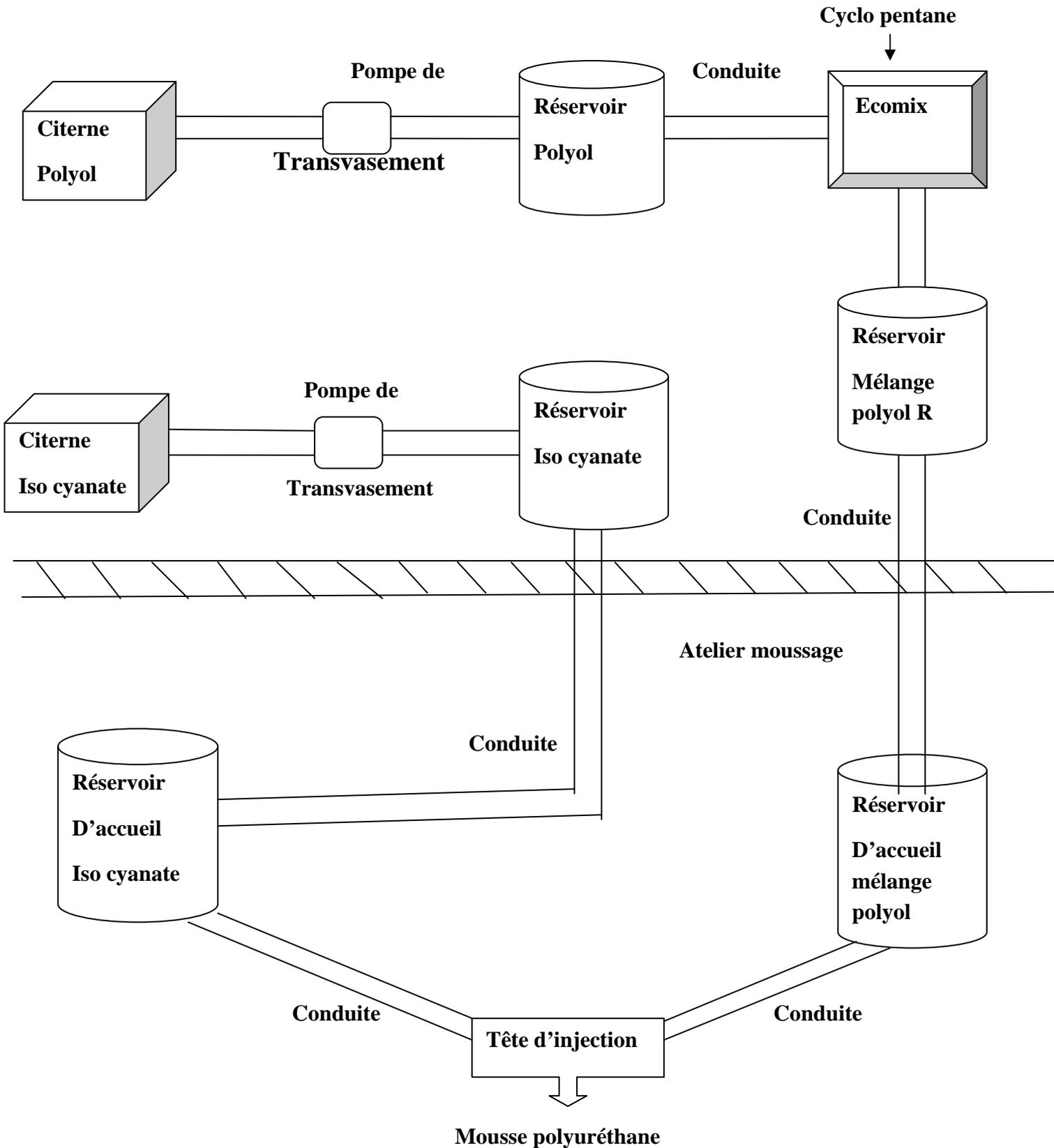
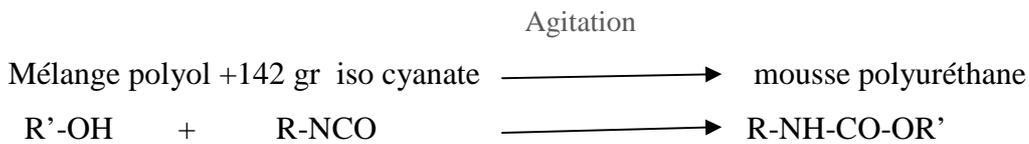
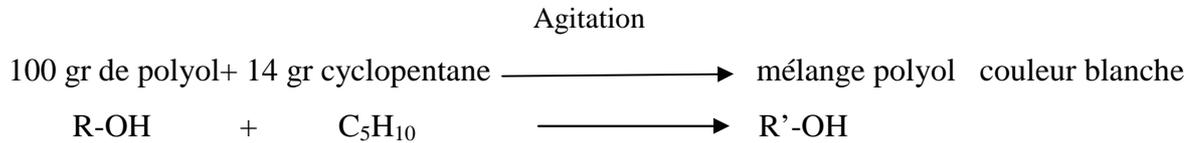
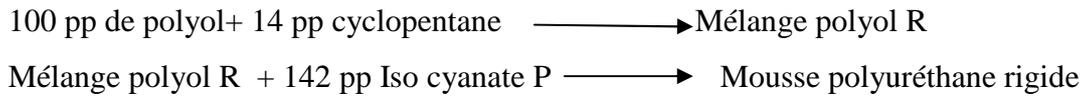


Figure. IV.3 : Obtention de la mousse polyuréthane au niveau d'atelier uréthane RII

**IV.3.1.2. Préparation des composants de la mousse****IV.4. Essais effectués au niveau de laboratoire****IV.4.1. Densité libre**

Le principe consiste d'injecter dans un sachet polyéthylène une quantité de mousse qu'on laisse s'expanser librement pour former un bloc solide au bout de quelques secondes qu'on appelle mousse polyuréthane rigide.



**Figure. IV. 4 : Expansion libre de la mousse polyuréthane**

Après environ 1 heure de temps ou plus, on découpe un morceau au milieu de bloc dans le sens de l'expansion.



**Figure. IV.5 : Échantillon prélevé au centre de bloc de mousse**

-A l'aide d'un calibre cylindrique on découpe par la suite des éprouvettes cylindriques semi homogènes.



**Figure. IV.6 : calibre cylindrique**

A l'aide du papier émeri (papier verre), on procède au polissage des éprouvettes afin de les rendre cylindriques et homogènes.



**Figure. IV.7 : Papier verre**



**Figure. IV.8 : Éprouvette cylindrique**

A l'aide d'un pied à coulisse, on mesure la hauteur et le diamètre de chaque éprouvette.

Puis à l'aide d'une balance de précision, on pèse chaque éprouvette pour avoir leurs masses



**Figure. IV.9 : Pied à coulisse**

**Nb:** on a besoin des masses, des hauteurs et des diamètres pour pouvoir calculer la masse volumique et ainsi que la densité pour chaque éprouvette.

**IV.4.1.1. Calcule de la densité libre sur la formulation suivante :**

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Polyol} = 100 \text{ pp} \\ \text{Cyclopentane} = 14 \text{ pp} \\ \text{Iso cyanate} = 142 \text{ pp} \end{array} \right.$$



Figure. IV.10 : Formation de la mousse polyuréthane

**Données :**

Forme d'éprouvette : cylindrique

Diamètre d'éprouvette : 49,4mm

Densité demandée : 0,023 à 0,025

Volume d'un cylindre :  $V = \pi d^2 H / 4$

N° d'échantillon	m (gr)	h (cm)	$\rho$ (gr/cm <sup>3</sup> ).10 <sup>-3</sup>	$\rho$ moy. (gr/cm <sup>3</sup> ).10 <sup>-3</sup>
1	2,23	4,72	24,67	24 ,26
2	2,08	4,49	24,19	
3	2,04	4,45	23,93	

$$\rho_{\text{moy}} = d_{\text{moy}} = 24,26 \cdot 10^{-3}$$

**Résultats obtenus**

Sachant que la valeur de la densité libre exigée pour l'armoire du réfrigérateur doit être incluse dans l'intervalle  $[23 \cdot 10^{-3} \text{ } 25 \cdot 10^{-3}]$  et comme les valeurs trouvées appartiennent à cette intervalle donc la densité conforme implique un bon respect de la formulation.

**IV.4.1.2. Influence de  $H_2O$  sur la densité libre**

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Polyol} = 100 \text{ pp} + 5 \text{ pp } H_2O \\ \text{Cyclopentane} = 14 \text{ pp} \\ \text{Iso cyanate} = 142 \text{ pp} \end{array} \right.$$

La valeur de la densité libre expérimentale calculée est de 0,020, de telles conditions, on peut dire que la présence de l'eau, provoque une diminution de densité libre et un rétrécissement de la mousse (Figure IV.11).



**Figure. IV.11 : Mousse mélangée avec l'eau**

**IV.4.1.3. Influence d'huile sur la densité libre :**

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Polyol} = 100 \text{ pp} + 5 \text{ pp huile} \\ \text{Cyclopentane} = 14 \text{ pp} \\ \text{Iso cyanate} = 142 \text{ pp} \end{array} \right.$$

On remarque que la densité ne peut être mesurée, vue la non stabilité de la mousse (mauvaise formation de la mousse).

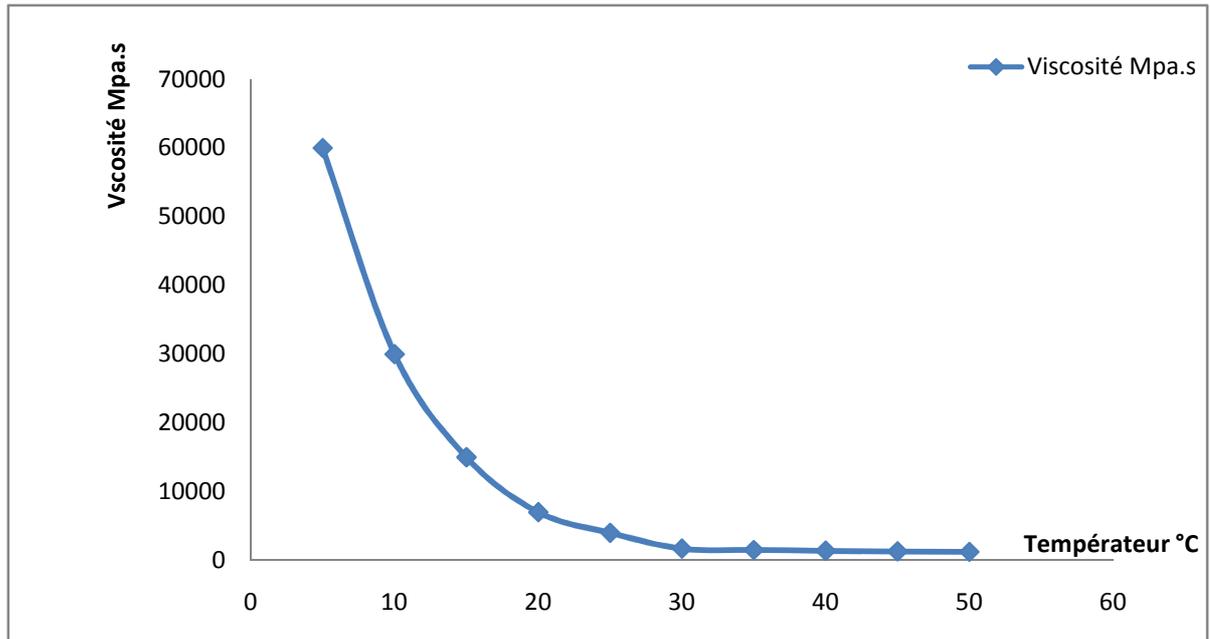


Figure. IV.12 : Mousse mélange avec l'huile

#### *IV.4.1. 4. Influence de la température sur la viscosité du polyol*

- **Viscosité**

Sous l'effet des forces d'interaction entre les molécules de fluide et des forces d'interaction entre les molécules de fluide et celles de la paroi, chaque molécule de fluide ne s'écoule pas à la même vitesse. La viscosité mesure la résistance d'un fluide au changement de forme: la viscosité détermine la vitesse de mouvement du fluide (par exemple, la vitesse de déplacement d'une cuillère dans un bol: plus le liquide est visqueux, plus le mouvement est lent). L'addition d'une faible quantité de substance en suspension ou en solution peut augmenter grandement la viscosité du liquide. La viscosité moléculaire est désignée par  $\mu$ ; elle est exprimée en  $N.s.m^{-2}$ . Les liquides ont une viscosité supérieure à celle des gaz. La viscosité varie en sens inverse de la température.

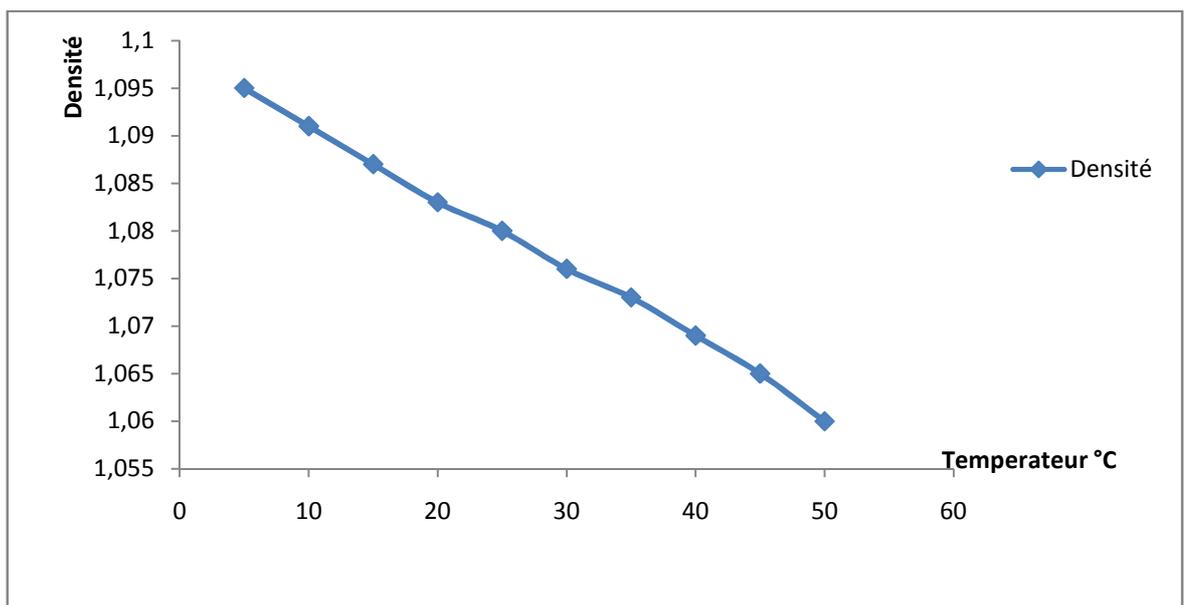


**Diagramme IV.1. Influence de la température sur la viscosité du polyol**

Température augmente  $\longrightarrow$  Viscosité diminue

$22^{\circ}\text{C} \geq T \geq 18^{\circ}\text{C}$  : Mousse bien mélangée (Polyol bien mélangé avec cyclopentane et avec iso cyanate), on obtient une mousse de qualité, donc bonne isolation thermique.

#### ***IV.4.1.5. Influence de la température sur la densité du polyol***



**Diagramme IV.2. Influence de la température sur la densité du polyol**

Température augmente  $\longrightarrow$  Densité diminue

$24 \geq T \geq 18$  : Mousse bien mélangée (Polyol bien mélangé avec cyclopentane et avec iso cyanate), on obtient une mousse de qualité, donc bonne isolation thermique.

#### IV.4.1.6. Influence de cyclopentane sur la viscosité du polyol :

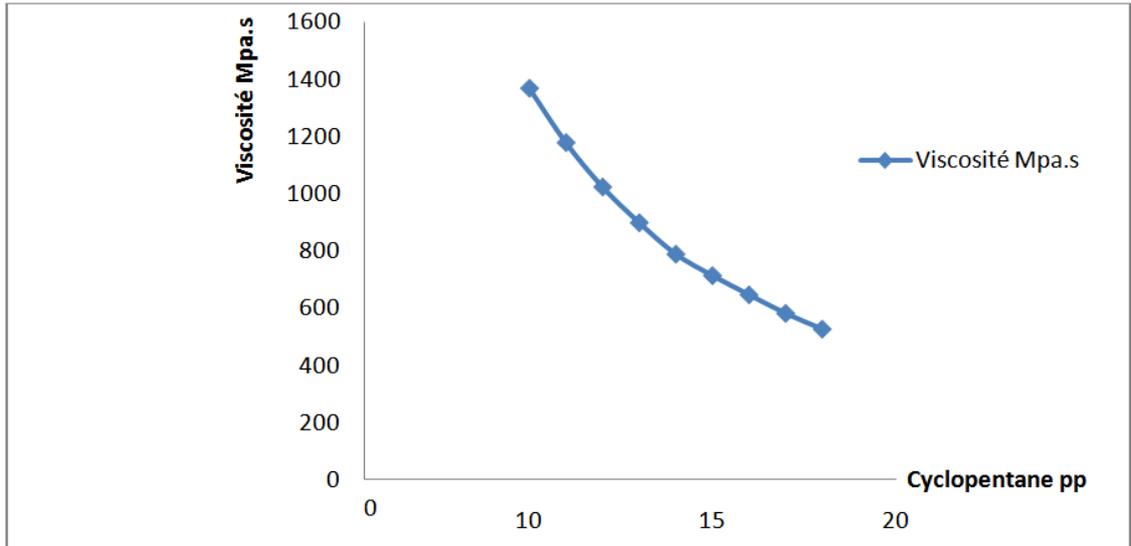


Diagramme IV.3. Influence du cyclopentane sur la viscosité du polyol

#### IV.4.1.7. Influence de cyclopentane sur la densité du polyol

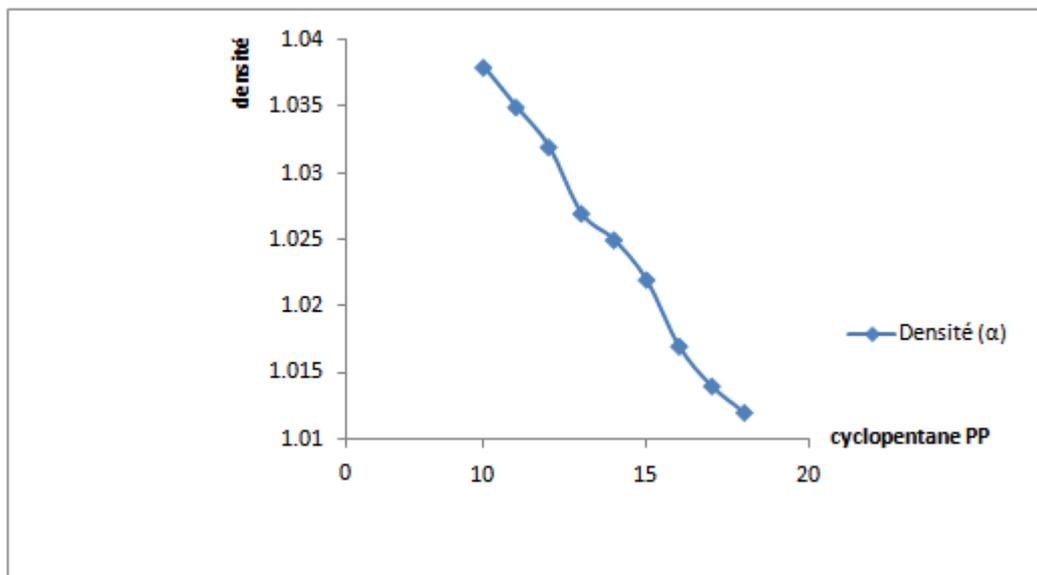


Diagramme IV.4. Influence du cyclopentane sur la densité du polyol

Pour les deux cas (densité et viscosité) on remarque :

**13pp** ≤ **C<sub>5</sub>H<sub>10</sub>** ≤ **15pp**, nous avons un très bon mélange de polyol (R- OH + C<sub>5</sub>H<sub>10</sub>)

La mousse obtenue est homogène

**C<sub>5</sub>H<sub>10</sub>** ≤ **13 pp**

Manque de fluidité de la mousse, expansion lente, manque de mousse (Armoires et portes non remplies).

**C<sub>5</sub>H<sub>10</sub>** ≥ **15 pp**, on obtient une mousse non homogène suivie d'un débordement au niveau des portes et armoires, densité libre diminue (< 0.023) avec un grand risque de rétrécissement.

#### IV.5. Calcul de la densité en panneau

- **1-Porte**

On prélève de chaque partie de la porte (partie supérieure et partie inférieure) des morceaux sous forme rectangulaires ou carrés, puis à l'aide de calibre cylindrique, on découpe des éprouvettes semi-cylindrique non homogène puis on suit la même méthode de calcul que c'elle appliquée précédemment pour la densité libre.



Figure IV.13. Tête d'injection de la mousse (utilisée à l'ENIEM)



Figure IV.14 : Prélèvement d'échantillon du Porte moussée

- **Partie supérieure**

N° d'échantillon	m (gr)	h (cm)	$\rho$ (gr/cm <sup>3</sup> ).10 <sup>-3</sup>	$\rho_{\text{moy.}}$ (gr/cm <sup>3</sup> ).10 <sup>-3</sup>
1	1,89	2,94	33,56	33,63
2	2,10	3,24	33,84	
3	1,61	2,51	33,50	

$$\rho_{\text{moy}} = d_{\text{moy}} = 33,63 \cdot 10^{-3}$$

- **Partie inferieure**

N° d'échantillon	m (gr)	h (cm)	$\rho$ (gr/cm <sup>3</sup> ). 10 <sup>-3</sup>	$\rho_{\text{moy.}}$ (gr/cm <sup>3</sup> ).10 <sup>-3</sup>
1	1,78	2,76	33,68	33,50
2	2,06	3,21	33,51	
3	1,94	2,04	33,32	

$$\rho_{\text{moy}} = d_{\text{moy}} = 33,5 \cdot 10^{-3}$$

**Densité moyenne globale de la porte est :**

$$(33,63 \cdot 10^{-3} + 33,5 \cdot 10^{-3}) / 2 = 33,56 \cdot 10^{-3}$$

Densité demandée :  $[33 \cdot 10^{-3}, 35 \cdot 10^{-3}]$

**Conclusion :**

D'après le résultat obtenu, on remarque que la valeur trouvée appartient à l'intervalle ci-dessus, donc nous avons une mousse de qualité ainsi qu'une bonne isolation thermique

## 2-Armoire:

On prélève de chaque partie de l'armoire [paroi latérale droite (supérieure et inférieure), paroi latérale gauche (supérieure et inférieure), face de dessus, face de dessous et panneau arrière (supérieur et inférieur)] des morceaux sous forme rectangulaire ou carrés, et on refait le même travail que précédemment comme pour la densité libre densité



Figure IV.15 : Prélèvement d'échantillons du l'armoire moussé

❖ **Paroi latérale droite supérieure**

$$\rho_{\text{moy}} = 34,51 \cdot 10^{-3}$$

$$d_{\text{moy}} = \rho_{\text{moy}} = 34,51 \cdot 10^{-3}$$

❖ **Paroi latérale droite inférieure**

$$\rho_{\text{moy}} = 33,55 \cdot 10^{-3}$$

$$d_{\text{moy}} = \rho_{\text{moy}} = 33,55 \cdot 10^{-3}$$

Densité moyenne pour la paroi latérale droite est :  **$34,03 \cdot 10^{-3}$**

❖ **Paroi latérale gauche supérieure**

$$\rho_{\text{moy}} = 34,63 \cdot 10^{-3}$$

$$d_{\text{moy}} = \rho_{\text{moy}} = 34,63 \cdot 10^{-3}$$

● **Paroi latérale gauche inférieure**

$$d_{\text{moy}} = \rho_{\text{moy}} = 33,71 \cdot 10^{-3}$$

Densité moyenne pour la paroi latérale gauche est :  **$33,71 \cdot 10^{-3}$**

● **Face dessus (congélateur)**

$$d_{\text{moy}} = \rho_{\text{moy}} = 34,43 \cdot 10^{-3}$$

● **Face de dessous**

$$d_{\text{moy}} = \rho_{\text{moy}} = 34,47 \cdot 10^{-3}$$

● **Panneau arrière supérieure**

$$d_{\text{moy}} = \rho_{\text{moy}} = 34,84 \cdot 10^{-3}$$

● **Panneau arrière inférieure**

$$d_{\text{moy}} = \rho_{\text{moy}} = 34,95 \cdot 10^{-3}$$

Densité moyenne pour le panneau arrière est :  **$34,89 \cdot 10^{-3}$**

Densité moyenne globale pour l'armoire est :  **$34,39 \cdot 10^{-3}$**

## Conclusion

Sachant que la valeur de la densité en panneau exigée pour l'armoire du réfrigérateur doit être incluse dans l'intervalle  $[33.10^{-3} \ 35.10^{-3}]$  et comme les valeurs trouvées appartiennent à cette intervalle, donc la densité en panneau est conforme, donc nous avons une mousse de qualité ainsi qu'une bonne isolation thermique.

### VI.5.1. Densité en panneau en fonction la densité libre pour une même masse injectée

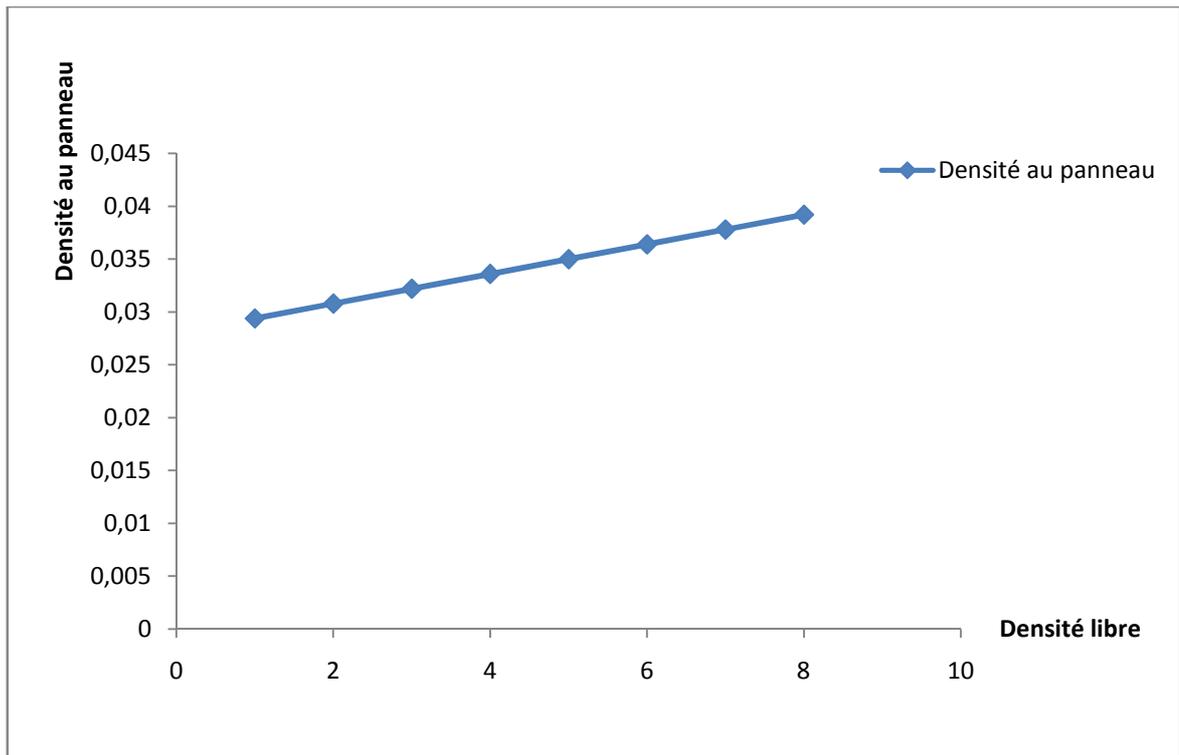


Diagramme IV.5. Densité en panneau en fonction la densité libre

Augmentation de la densité libre au dessus de  $25.10^{-3}$  provoque une surconsommation de la mousse et sa diminution au dessous  $23.10^{-3}$ , provoque un débordement et un rétrécissement de la mousse.

## IV.6. Micro structure de la mousse polyuréthane

Le microscope optique est un instrument d'optique muni d'un objectif et d'un oculaire qui permet de grossir l'image d'un objet de petites dimensions (se qui caractérisé son grossissement) et de séparer les détails de cette image (et son pouvoir de résolution) afin qu'il soit observable par l'œil humain. Il est utilisé en biologie, pour observer les cellules, les tissus, en pétrographie pour reconnaître les roches, en métallurgie et en métallurgie et en métallographie pour examiner la structure d'un métal ou d'un alliage.



Figure IV.16 : Microscope optique

### Résultats obtenus par un microscope optique

Les micrographies suivantes représentent les échantillons d'une mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane vues au microscope optique avec les densités suivantes :

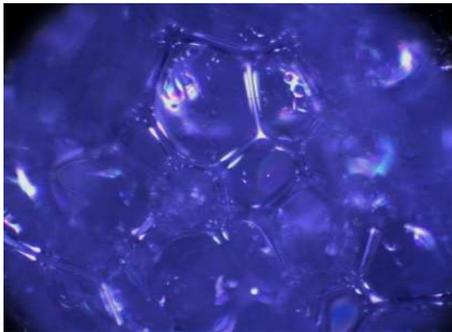
Echantillon I  $\rightarrow d = 0,033$  à  $0,035$

Echantillon II  $\rightarrow d > 0,035$

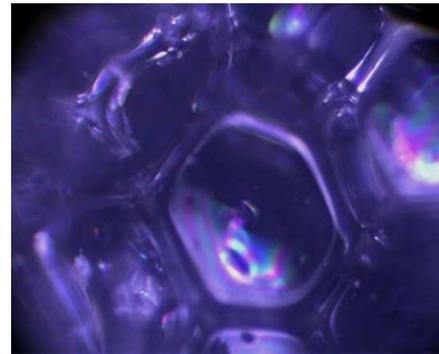
Echantillon III  $\rightarrow d < 0,033$

Ces trois échantillons sont observés au microscope optique avec le même agrandissement (X100) puis (X200) afin de mettre en évidence la structure et la forme de ces cellules qui sont représentés par les figures ci-dessous

a- Pour une densité en panneau variable entre 0,033 à 0.035

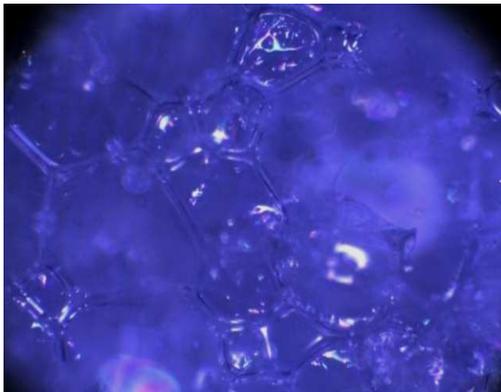


**Agrandissement 100**

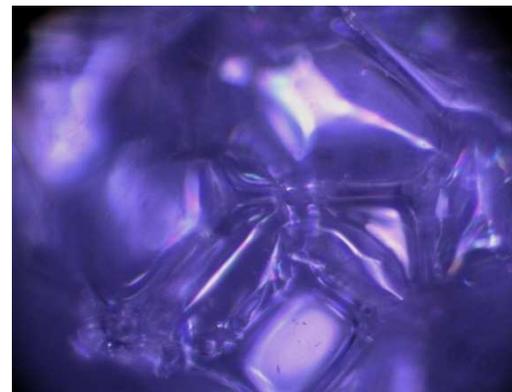


**Agrandissement 200**

b- Pour une densité en panneau supérieure à 0.035

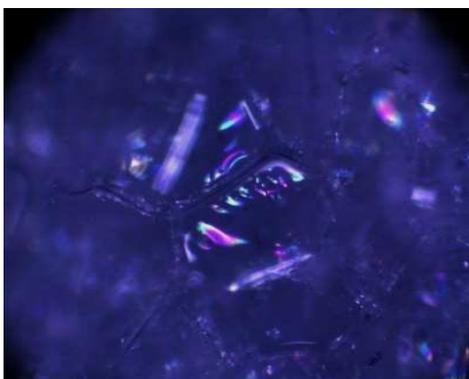


**Agrandissement x 100**

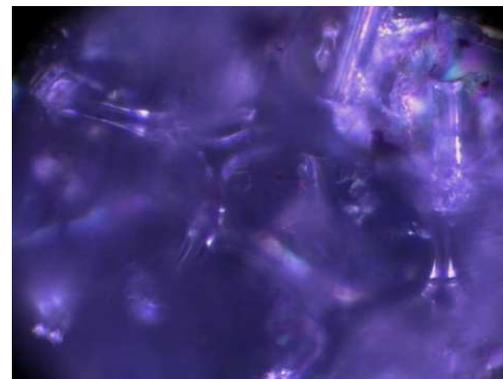


**Agrandissement x 200**

c- Pour une densité en panneau inférieures à 0.033



**Agrandissement x 100**



**Agrandissement x 200**

**Interprétation des résultats :**

Pour des densités allant de 0.033 à 0.035, on remarque que la forme des cellules est uniforme, ce qui rend la mousse plus stable et homogène dans le temps.

Pour des densités inférieures à 0.033, la taille des cellules est plus importante que celles de densités allant de 0.033 à 0.035 et de formes non uniformes ce qui rend la mousse instable (rétrécissement).

Pour des densités supérieures à 0.035, les cellules deviennent plus au moins homogènes mais très denses, ce qui rend la mousse très stable dans le temps mais moins isolante que celle obtenue pour des densités allant de 0.033 à 0.035.

**IV.7. Calcul de la conductivité thermique**

L'appareil de mesure de la conductivité thermique utilisé à l'ENIEM est constitué de trois unités qui sont : L'unité d'affichage, l'unité centrale et l'unité qui contient deux plaques de différentes températures.



Figure IV.17 .L'appareil de mesure de la conductivité thermique utilisé à l'ENIEM

$$\lambda = \frac{Is.((K1+(K2.Tmoy))+((K3+(K4.Tmoy)).HFM) + ((K5+(K6.Tmoy)HFM^2))}{dt}$$

HFM : sortie débitmètre en mv

T<sub>1</sub> : température de la plaque chaude

T<sub>2</sub> : température de la plaque froide

T<sub>3</sub> : température de réfrigérant

T<sub>moy</sub> : (T<sub>1</sub>+T<sub>2</sub>)/2

**Constantes d'étalonnages sans silicone avec :**

K<sub>1</sub>= -12,7377                      K<sub>4</sub> = 0.0459

K<sub>2</sub>= 0.2364                         K<sub>5</sub> = 0,0567

K<sub>3</sub>= 3,3452                         K<sub>6</sub>= -0.0007

**Constantes d'étalonnages avec silicone**

K<sub>1</sub>= -30,7912                      K<sub>4</sub> = -0,0055

K<sub>2</sub>= 0.6087                         K<sub>5</sub> = 0,0132

K<sub>3</sub>= 6,5376                         K<sub>6</sub>= 0.0004

Les inconnus :

T<sub>2</sub> ? et HFM ?

**Application numérique**

Exemple de calcul

**Sans silicone**

Forme de l'éprouvette : c'est une éprouvette carrée de dimensions 300mm x 300m36,7mm,



Figure IV.18 .Eprouvette carrée

Voire les valeurs sur le tableau :

T <sub>2</sub>	17,9	17,6	17,3	17,1	17	17	17	17	17	17	17	17	
HFM	3,91	3,87	3,36	3,22	3,23	3,23	3,23	3,23	3,23	3,24	03,26	3,25	3,29

Is =3,67cm    T1=30°C    T2= 17°C    T3= 18°C

HFM= 3,23 mv    dt =13°C    Tmoy =23,5°C

**Application numérique**

$$(k1+ (k2.Tmoy)) = (-12, 7377+ (0,2364.23,5)) =-7,1823$$

$$((K3+5K4.Tmoy).HFM) = ((3, 3452+ (0,0459.23,5)).3,23) = 14,2890355$$

$$((K5+ (K6.Tmoy)).HFM^2) = (( 0,0567 + (-0,0007.23,5)).10,4329) = 0,419924225$$

$$\lambda = \frac{0.0367.(-7,1823+14,2890355+0,419924225)}{13} =0.02127 \text{ w/mk}$$

**VI.7.1.Influence de conductivité thermique en fonction la densité en panneau**

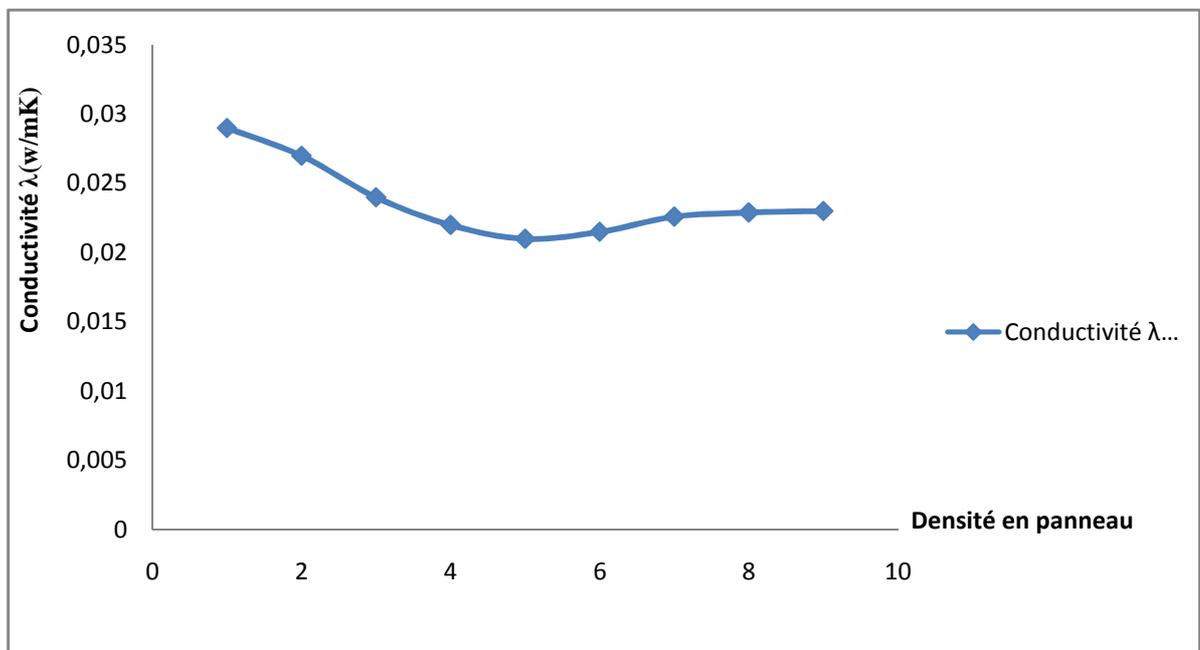


Diagramme IV.6.Influence de conductivité thermique en fonction la densité en panneau

On remarque que la conductivité thermique  $\lambda$  diminue avec l'augmentation de la densité en panneau jusqu' au point 0,034, pour quelle reprenne légèrement par la suite.

Le rétrécissement risque d'augmenter avec la diminution de la densité en panneau  $< 0,034$ .

## IV.8. Essai de compression

### IV.8.1. Résistance à la compression

Après avoir mesuré la dimension de l'éprouvette cylindrique de diamètre  $\approx 50\text{mm}$ , on la comprime à une vitesse de  $10\text{mm/mn}$  dans le sens de la hauteur à l'aide d'une machine de compression et puis, on calcule sa résistance à la compression qui est donnée par la formule suivante.

$$P_C = \frac{F_C}{A}$$

où

$P_C$  : résistance à la compression ( $\text{kg/cm}^2$ ) (valable jusqu'à la troisième décimale )

$A$  : surface de réception de pression ( $\text{cm}^2$ )

$F_C$  : charge au moment de 10% de la déformation due à la compression (kg).

Cependant, dans le cas où la charge à la limite d'élasticité est inférieure à la charge de 10% de distorsion,  $F_C$  représente la charge à la limite d'élasticité.

### IV.8.2. Comportement en compression de mousse PUR

La résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la densité en panneau, elle diminue avec la diminution de cette dernière surtout pour la densité inférieure à 0,033. L'évolution de la mousse en compression est représentée dans le diagramme suivant.

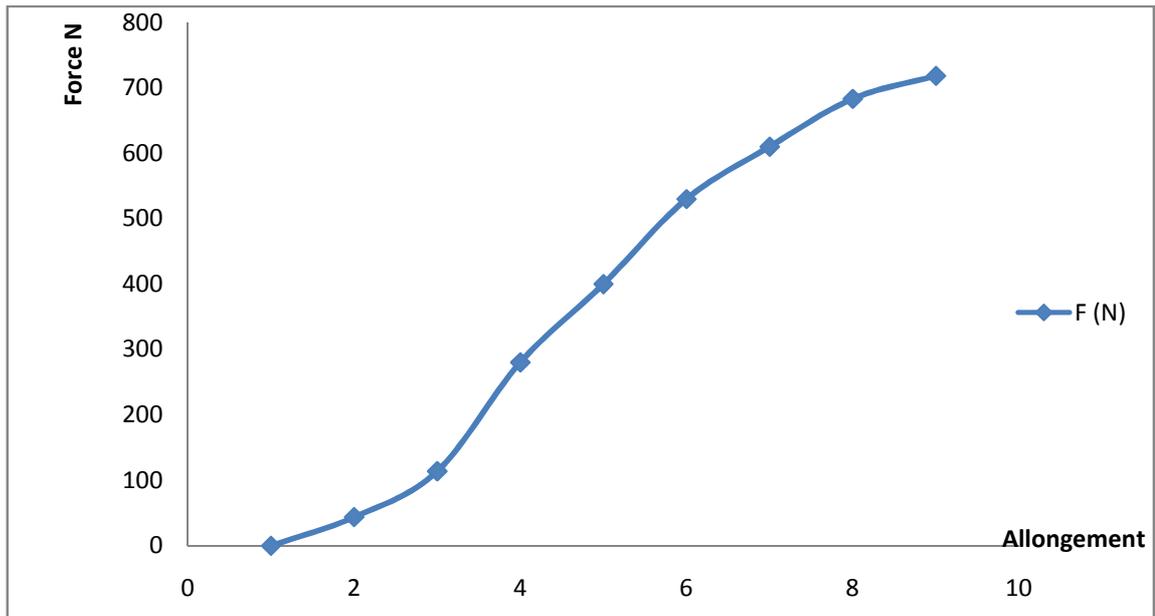


Diagramme IV.7. Comportement en compression de mousse PUR

## IV.9. Influence de la température des moules sur la qualité de la mousse

### Température idéale : 40°C à 49°C

- Pour des températures inférieures à 40°C : mauvaise expansion de la mousse et risque du mauvais remplissage
- Pour des températures supérieures à 49°C: expansion rapide avec évaporation de cyclopentane suivi d'un débordement de mousse.

La figure suivante représente les moules utilisés pour le moussage des armoires des réfrigérateurs de l'entreprise ENIEM.



Figure IV.18. Moules de réfrigérateurs utilisés à l'ENIEM

- **Résumé sur l'influence des températures sur les caractéristiques de la mousse.**

Température	Viscosité	Densité	Mélange de mousse	Expansion De la mousse	Fluidité de la mousse	Densité libre	Conductivité	Isolation thermique
18 à 22°C	Bonne ≈6000mpa.s	Bonne ≈1,081	Bon	Bonne	Bonne	0,023-0.025	0.021w/mk	Bonne
>22°C	Diminue	Diminue	Bien mélangé mais la qualité est mauvaise	Rapide	Très fluide	<0,023	Augmente	Mauvaise
<18	Augmente	Augmente	Mauvais	Lente	Très fluide	<0,025	Augmente	Moins bonne

- **Résumé sur l'influence de cyclopentane sur les caractéristiques de la mousse**

cyclopentane	Viscosité	Densité	Mélange de mousse	Expansion De la mousse	Fluidité de la mousse	Densité libre	conductivité	Isolation thermique
14	Bonne ≈790mpa.s	Bonne ≈1,025	Bon	Bonne	Bonne	0,023-0.025	0.021w/mk	Bonne
>14	Diminue	Diminue	Bien mélangé mais la qualité est mauvaise	Rapide et volumineuse	Très fluide	<0,023	Augmente	Mauvaise avec risque de rétrécissement de la mousse
<14	Augmente	Augmente	Bon	Lente	Moins fluide	<0,025	Augmente	Mauvaise



## **Conclusion générale**

La mousse de polyuréthane rigide est le matériau isolant le plus employé de par le monde pour les réfrigérateurs et congélateurs. Ses propriétés isolantes sont un aspect essentiel de la conservation à basse température des aliments aux stades de la transformation, du stockage et de la distribution au consommateur. Sans la réfrigération isolée au polyuréthane, environ 50 % de l'alimentation mondiale pourrirait, ce qui aurait un impact considérable sur nos vies de tous les jours et sur le secteur alimentaire.

En plus de leurs excellentes propriétés isolantes, les polyuréthanes offrent des qualités exceptionnelles pour la conception de réfrigérateurs. Ceci est dû au fait que la même matière – le polyuréthane – peut être utilisée à la fois pour l'habillage et pour l'isolation du réfrigérateur. La seule différence réside dans la densité de la matière. Les polyuréthanes utilisés pour les portes de réfrigérateur permettent aux fabricants de réaliser les deux pièces avec une seule surface pleine, sans vide. Les polyuréthanes sont particulièrement utiles du point de vue de la conception car une seule application de revêtement suffit pour une finition de surface impeccable. Aucune autre finition n'est nécessaire.

pour avoir cette mousse de qualité, notre travail nous a permis justement de déterminer les paramètres technologiques que l'opérateur ou l'ingénieur doit connaître et maîtriser en temps et lieu, car le non respect d'un seul paramètre pourrait être fatal pour la qualité de l'isolation thermique, ces paramètres sont :

1-la température : soit de stockage au magasin soit au moment d'utilisation à l'atelier, cette température doit être entre 18°C et 22°C

2-la formulation : la formulation doit être respectée à la lettre.

3-le temps d'injection : il faut bien étudier la masse exacte de mousse à injecter à fin d'éviter le manque de mousse, la surconsommation et le débordement et d'avoir une densité en panneau recherchée.

4-le temps de démoulage : il faut étudier bien le temps de fin de réaction pour la mousse pour pouvoir démouler la porte ou l'armoire si non on aura la déformation de ces dernières.

5-les pressions de mélange : doivent être bien étudiées afin de d'avoir un mélange de mousse bien homogène

6-entretien des têtes d'injection : il faut les nettoyer après chaque usage

7-nettoyage des moules après chaque opération au cas de débordement pour éviter l'usure de ces derniers

8-les réservoirs des composants que ça soit polyol ou isocyanate doivent être étanches pour éviter l'introduction de l'eau, d'humidité et des huiles à l'intérieur ou même lors d'intervention sur les réservoirs.

9-bon dégraissage des portes et des armoires.

10-l'entretien de la pompe de dosage.

11-les températures des moules (40° et 49°).

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] Techniques sciences N°8, Faites connaissance avec les produit d'isolation thermique dans le cadre du projet de certification en Algérie
- [2] Yves Marotel:Techniques de l'ingénieur, traité plastique et composites AM3
- [3] Techniques de l'ingénieur, traité plastiques et composites, Polypropylènes AM3220.
- [4] Sites [http://perso.univ-rennes1.fr/jean-luc.audic/Cour\\_polym.pdf](http://perso.univ-rennes1.fr/jean-luc.audic/Cour_polym.pdf).
- [5] Techniques de l'ingénieur, traité plastiques et composites, injection des thermoplastiques A3680, A3690 et thermoformage A3660.
- [6] J.P.Trotignon, J.Verdu, M.Piperaud, A.Dobraczynski, R.Quatremer et J.P.Trotignon Matières plastiques : Structures - propriétés - mise en œuvre et normalisation AFNOR 4<sup>e</sup> édition.
- [7] William D. Callister, Jr Science et génie des matériaux, édition MODULO, ISBN 26891136687-X
- [8] Hans-Henning Kausch, Nicole Heymans, Christopher John Plumer et Pierre Decroly. Matériaux polymères, propriétés mécaniques et physiques (principe de mise en œuvre).Presses polytechnique et universitaires romande 2001, ISBN2-88074-415-6
- [9] Thierry Gallauziaux et David Fedullo, le grand livre de l'isolation, Eyrolle, 2009, ISBN 978 - 2 - 212-12404-0
- [10] Bikard1 J, Bouayad1, 2 R, Agassant11 J.F. 27-31 aout 2007 , Caractérisation de mousses de polyuréthanes au cours du procédé de fabrication - CEMEF - Ecole des Mines de Paris1 – France 18eme Congres Français de Mécanique Grenoble.
- [11] Yves M ; 01/2000, plastiques et composites ; polyuréthannes ; Techniques De L'ingénieur ; Dossier AM 342
- [12] Maurice R ; 1998, Technologie des plastiques ; 3 ème édition revue et augmentée. Edition Hermes, Paris.
- [13] Chrétien G, Hatat D ; 1990, Initiation aux plastiques et Composites ; Edition : Lavoisier .Tec 8 Doc Infoplast, Paris.
- [14] Gilles A, 2003, Fabrication et transformation de mousse de polyuréthane.Angerville, la Campagne, le 31 juillet

- [15] Trotignon J.P, Verdu J, Dobraraczynsk A, i Piperaud M, 1996, Précis matières plastiques / Structure / Propriétés / Mise en œuvre / Normalisation : Edition : Afnor / Nathan, Paris.
- [16] Jean B, 1985, Matières plastiques ; Chimie Application ; 2 ème édition revue et augmentée ; Edition : Lavoisier : Tec 8, Doc, Paris.
- [17] Saunders J. H. et Frisch K. C. (1962), Polyurethanes. . Part I, Chemistry. Interscience-Wiley, New York.
- [18] Saunders J. H. et Frisch K. C. (1964), Polyurethanes, Part II, Technology. Interscience-Wiley, New York.
- [19] L'Isolant polyuréthane rigide, données techniques et commerciales Kingspan Tarec Industrial Insulation.
- [20] Jean-François Sacadura Initiation aux transferts thermiques, Lavoisier, Paris 1993, ISBN 2-85206-618-1
- [21] Barbeau .P 1998, étude de la structure et des propriétés de réseaux polyuréthanes acrylates photopolymérisés , thèse de doctorat, Lyon :INSA de Lyon, ,292 p
- [22] DUQUESN. S, 2001, étude des procédés d'ignifugation de substrats polymères par revêtement intumescent-application aux polyuréthanes-thèse de doctorat, université des sciences et technologies de Lille 1.