

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement supérieur
Et De la recherche scientifique
Université Mouloud Mammeri
De Tizi-Ouzou

FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE
OPTION SCIENCE DES MATERIAUX

Memoire de fin d'études

Memoire de fin d'études

Master II académique

Thème

Etude comparative d'une mousse polyuréthane rigide expansée par l'agent gonflant « le CFC » et par « le cyclopentane » et l'amélioration de la résistance thermique de cette dernière

Dirigé par :
M^{me} MOHELLEBI F.
M^r ALIK A.
M^r ACHER H.

2011

Présenté par :
M^{elle} LALAOUI
BAHYA

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

Partie théorique

Chapitre I

Les matières plastiques

I.1. Introduction	3
I.2. Historique	3
I.3. Définition	3
I.4. Les thermoplastiques	4
I.4.1. Définition	4
I.4.2. La mise en forme des thermoplastiques	6
I.5. Les thermodurcissables	6
I.5.1. Définition	6
I.5.2. La mise en forme des thermodurcissables	7
I.6. Les élastomères	8
I.7. Les propriétés des polymères.....	9
I.7.1. Propriétés thermiques.....	9
I.7.2. Propriétés mécaniques	10
I.7.3. Propriétés chimiques	10
I.8. La formulation des polymères	10
I.8.1. Les résines	10
I.8.2. Les charges.....	11
I.8.2.1. Charges granulaires.....	11
I.8.2.1.1. Les charges minérales.....	11
I.8.2.1.2. Les charges métalliques	11
I.8.2.2. Les charges organiques	11
I.8.2.3. Charges fibreuses	11
I.8.2.4. Agents porogènes	12
I.8.3. Additifs.....	12
I.8.4. Plastifiants.....	12
I.9. Conclusion	12

Chapitre II

Comportements et essais mécaniques des plastiques

II.1. Introduction	13
II.2. Le comportement mécanique des plastiques	13
II.2.1. Plasticité des polymères	13
II.2.2. Elasticité	14
II.2.2.1. Elasticité caoutchoutique	14
II.2.2.2. Viscoélasticité	14
II.2.2.3. Thermo-élasticité	14
II.2.2.3.1. Etat vitreux	16
II.2.2.3.2. Etat visco-élastique	16
II.2.2.3.3. Zone caoutchoutique	16
II.2.2.3.4. Zone fluide	16
II.2.3. Ruptures des polymères	16
II.2.4. Les paramètres influençant le comportement mécanique des polymères	17
II.2.4.1. L'architecture des polymères	17
II.2.4.2. La formulation des polymères	18
II.2.4.3. La mise en œuvre	18
II.2.4.4. Les conditions d'utilisation	18
II.3. Essais mécaniques	19
II.3.1. Essai de traction	19
II.3.2. Essai de flexion	21
II.3.3. Essai de fatigue	22
II.3.4. Essai de fluage	23
II.3.5. Essais de mesure de la résistance au choc	23
II.3.6. Résistance au déchirement et dureté	24
II.4. Conclusion	25

Chapitre III

La mousse polyuréthane rigide

III.1. Introduction	26
III.2. Historique	26
III.3. Définition	26
III.4. La matière première	27
III.4.1. Les polyisocyanates.....	27
III.4.1.1.Définition.....	27
III.4.1.2. Manipulation et stockage des isocyanates	27
III.4.2. Polyols.....	28
III.4.2.1. Définition.....	28
III.4.2.2. Manipulation et stockage des polyols	28
III.4.3. Agents gonflants.....	29
III.4.4. Activateurs.....	29
III.4.5. Catalyseurs	29
III.4.6. Stabilisants pour mousses.....	29
III.4.7. Agents ignifugeants	30
III.5. Le mécanisme de formation de la mousse polyuréthane rigide	30
III.5.1. La réactivité de la mousse polyuréthane rigide.....	30
III.5.2. Préparation de la mousse polyuréthane rigide	30
III.5.3. Formation de la mousse polyuréthane rigide	31
III.6. Caractéristiques générales des mousses polyuréthanes rigides	31
III.7. Les propriétés de la mousses polyuréthane rigide (PUR)	32
III.8. Domaines d'utilisation	32
III.9. Conclusion.....	33

Partie pratique

Chapitre I

Agent gonflant- le chlorofluorocarbure (CFC)

I.1. Introduction	34
I.2. Historique	34
I.3. Définition	34
I.4. Les noms commerciaux des CFC	37
I.5. Système de numérotation	37
I.6. Les classes des composés du CFC ou la nomenclature	38
I.7. Liste des CFC les plus utilisés	38
I.8. La structure chimique de chlorofluorocarbure (CFC11)	40
I.9. Les propriétés physiques des CFC11	40
I.10. Les propriétés chimiques des CFC11	41
I.11. Caractéristiques des chlorofluorocarbures (CFC11)	41
I.12. Manipulation des CFC	41
I.13. Domaines d'utilisation des CFC	42
I.13.1. Industrie des mousses	42
I.13.2. Industrie du froid.....	42
I.13.3. Industrie des nettoyeurs industriels.....	42
I.13.4. Industrie des propulseurs	42
I.14. L'élimination des CFC.....	43
I.15. L'appauvrissement de la couche d'ozone par le CFC	43
I.16. Conséquences d'appauvrissement de la couche d'ozone	44
I.17. Le règlement	44
I.17.1. Le protocole de Montréal	44
I.17.2. Le protocole de Kyoto	44
I.18. Programme de l'Algérie pour l'élimination des CFC	44
I.19. Le remplacement des CFC par d'autres matières	45
I.19.1. Les hydrocarbures - le cyclopentane	45
I.19.2. Renforcement des mousses rigides a base de cyclopentane	45
I.19.3. Nano-mousses	45
I.19.4. L'huile de ricin.....	45
I.19.5. L'algue marine	45
I.19.6. L'air sec.....	46
I.19.7. Récupération des solvants à base du CFC par un film à fil mince	46
I.19.8. Production d'énergies renouvelables et de logistique	46
I.19.9. Réfrigérateur solaire à adsorption.....	46
I.20. Conclusion	47

Chapitre II

Agent gonflant : le cyclopentane

II.1. Introduction	48
II.2. Définition	48
II.3. Caractéristiques du cyclopentane	49
II.4. Propriétés physiques et chimiques des cyclopentanes	50
II.5. Manipulation et stockage des cyclopentanes.....	51
II.6. Comparaison des agents gonflants - CFC et cyclopentane	51
II.7. Conclusion	53

Chapitre III

Influence des paramètres de moussage sur la densité

Caractérisation Physique

III.1. Introduction	54
III.2. Isolation thermique	54
III.3. Le transfert thermique	54
III.3.1. Conduction thermique	54
III.3.2. Convection thermique	54
III.3.3. Rayonnement	55
III.4. Propriétés physiques et chimiques des isolants	55
III.5. Caractérisation de la mousse polyuréthane à base du cyclopentane.....	55
III.6. La densité	55
III.6.1. La densité libre	56
III.6.2. La densité en panneau	56
III.6.3. Procédé de production de la mousse libre et en panneau.....	56
III.6.4. Calcul de la densité en panneau	59
III.6.4.1. Calcul de la densité en panneau pour l'armoire.....	59
III.6.4.1.1. Prélèvement d'échantillons	59
III.6.4.1.2. Calcul du volume de l'éprouvette cylindrique	60
III.6.4.1.3. Calcul de la masse des trois composants de la mousse.....	60
III.6.4.1.4. Méthode de Calcul de la densité en panneau pour l'armoire.....	61
III.6.4.2. Calcul de densité en panneaux pour la porte d'un réfrigérateur	66
III.6.4.2.1. Méthode de calcul de la densité en panneau pour la porte	66
III.6.5. Calcul de densité libre pour l'armoire et la porte du réfrigérateur	67

III.6.5.1. Calcul de la densité libre pour l'armoire d'un réfrigérateur	67
III.6.5.2. Calcul de la densité libre pour la porte d'un réfrigérateur	68
III.7. Influence des paramètres de moussage sur la densité en panneau	69
III.7.1. Influence du temps de démoulage sur la densité en panneau	69
III.7.1.2.3. Essais de rétrécissement	72
III.7.2. Influence de la masse injectée sur la densité en panneau	73
III.7.3. Influence de pression et de temps d'injections sur la densité	79
III.7.4. L'influence de la température des moules sur la densité	81
III.7.5. Conclusion	83

Chapitre IV

Influence des paramètres opératoires sur la conductivité thermique

Caractérisation physique

IV.1. Introduction	84
IV.2. Définition	84
IV.3. Masure de la conductivité thermique	84
IV.4. Calcul de la conductivité thermique	85
IV.5. L'effet du temps sur la conductivité thermique	86
IV.6. L'effet de la densité sur la conductivité thermique	93
IV.7. L'effet de la température sur la conductivité thermique	132
IV.8. Conclusion	133

Chapitre V

L'influence de l'épaisseur sur la résistance thermique

Caractérisation physique

V.1. Introduction	134
V.2. La résistance thermique	134
V.3. La méthode de calcul de la résistance thermique	134
V.4. Le coefficient de transfert thermique global	134
V.5. Calcul de la résistance thermique	135
V.5.1. Cas d'une mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane	135
V.5.2. Cas d'une mousse polyuréthane rigide à base du CFC	137

V.6. La compensation de la résistance thermique par une surépaisseur 139
V.6.1. Calcul de la surépaisseur de la mousse PUR à base du cyclopentane.. 139
V.7. Conclusion..... 142

Chapitre VI

Aspects microstructuraux

VI.1.Introduction 143
VI.2. La microstructure du matériau vue au microscope optique..... 143
VI.3. Microstructure d'une mousse PUR à base du cyclopentane..... 143
VI.4. observation microscopique 143
VI.5. Interprétation des microstructures..... 145
VI.6. Micrographie vues au microscope électronique à balayage (MEB) 145
VI.7. Interprétation des microstructures..... 146
VI.8.Conclusion..... 147

Conclusion générale 148

Présentation de l'entreprise ENIEM

L'entreprise Nationale des Industries de l'Électroménager (ENIEM), est issue de la restructuration de l'ex-société nationale de fabrication et du montage du matériel électrique et électronique (SONELEC). L'ENIEM a été créée en janvier 1983 à partir de fonctions déjà existantes au sein de l'entreprise-mère, SONELEC, depuis 1974. Érigée en société par actions en octobre 1989, elle a pour principale mission d'assurer la production, le montage, le développement et la recherche dans le domaine de l'électroménager. L'ENIEM a une gamme de produits très large. Elle produit tous types de réfrigérateurs, de congélateurs, de cuisinières et de climatiseurs, des appareils de cuisson, de lavage, ainsi que les lampes à incandescence. Elle a aussi une autre activité qui consiste en montage du petit appareil électroménager domestique (robots de cuisine, moulins à café, hachoirs, mixeurs, sèche-cheveux, etc.)

L'ENIEM est organisée en trois principales unités de production, qui sont l'Unité Froid, Cuisson et Climatisation, connues sous le nom de Complexe d'Appareils Ménagers (CAM), situé à la zone industrielle AissatIdir de Oued-Aissi, distante de 7 km du chef-lieu de wilaya de Tizi-Ouzou, l'Unité Sanitaire de Miliana, et l'Unité Lampes de Mohammadia. Chacune de ces unités est elle-même organisée en différentes directions. Leader de l'électroménager en Algérie, l'ENIEM possède de grandes capacités de production et une expérience de plus de 30 ans dans la fabrication et le développement dans les différentes branches de l'électroménager.

En juin 1998, l'ENIEM fut la première entreprise à l'échelle nationale à obtenir la certification pour la norme Internationale ISO 9002/ 94 auprès de l'AFAQ, certificat qu'elle vient de renouveler avec QMI (Canada). Comme SAIDAL, l'ENIEM est confrontée à la concurrence directe des plus grands producteurs mondiaux d'électroménager.

Introduction générale

Les plastiques sont récents, ils sont pratiquement nés avec le XX^{em} siècle. La crise actuelle, dans laquelle on voit le début d'une mutation technique et sociale profonde, amène les industriels à chercher dans les matériaux qu'ils emploient, la solution à leurs problèmes d'économie, d'énergie et de diminution des prix de revient.

En effet, les progrès technologiques commencent seulement, quand un produit ou une méthode de mise en œuvre sont confrontés aux exigences d'une industrie, et cela est la raison de notre étude dans cette recherche, afin d'améliorer la performance de la mousse polyuréthane rigide expansée par l'agent gonflant « le cyclopentane » utilisée pour l'isolation thermique des réfrigérateurs à l'entreprise ENIEM, car dans les années précédentes l'entreprise utilisait un agent gonflant appelé « le CFC11 » ou « le R11 », mais comme ce dernier représente une véritable menace pour la couche d'ozone et pour l'environnement d'une manière générale, alors il a été remplacé par un autre agent gonflant, qui est « le cyclopentane », mais celui-ci est moins performant du côté résistance thermique (conductivité thermique un peu plus élevée par rapport à celle du CFC11), donc il possède une faible isolation thermique comparant au CFC11.

Alors dans le but d'avoir un meilleur rendement des appareils réfrigérants et préserver notre environnement, on va analyser les propriétés des cyclopentanes et des CFC, tout en faisant la comparaison du comportement des deux types de mousses et de leurs impacts sur le climat et on va proposer certains produits isolants écologiques qui peuvent remplacer le CFC11, mais comme la mousse expansée par le cyclopentane est le meilleur isolant donc on va procéder de manière à garder ce produit qui est économique et écologique en même temps, tout en améliorant sa performance, pour cela, on va étudier avec précision, l'influence des paramètres opératoires sur la densité et la conductivité thermique de la mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane utilisée en ce moment à l'entreprise ENIEM afin d'assurer une meilleure isolation thermique.

Chapitre I

Les matières plastiques

I.1. Introduction :

Les plastiques sont utilisés dans tous les domaines comme l'électronique, l'électrotechnique, l'anticorrosion, l'automobile, la médecine, le bâtiment, les transports, l'agriculture, etc. Ils font un usage de plus en plus courant.

Les premiers plastiques artificiels résultaient de la transformation chimique des polymères naturels tels que le caoutchouc, la cellulose et la caséine. Généralement, les polymères artificiels ne sont pas utilisés à l'état pur, mais mélangés à des substances miscibles ou non dans la matrice polymère.

La structure de la formule d'un plastique est la suivante:

Matière plastique = polymères bruts + charges + plastifiants + additifs

I.2. Historique : [1]

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 la science des matériaux. Bien que présagée par certains chercheurs au début du XIX^{em} siècle, ce n'est que vers les années 1920-1930 que l'idée de macromolécule est acceptée par les chercheurs.

Le développement industriel consécutif de la science macromoléculaire a été accéléré ensuite par la Seconde Guerre mondiale, quand les États-Unis ont été privés de leur approvisionnement en caoutchouc naturel en provenance d'Asie du Sud-Est, lors de leur entrée en guerre, alors ils ont lancé un immense programme de recherche visant à trouver des substituts de synthèse des plastiques.

I.3. Définition : [2]

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.

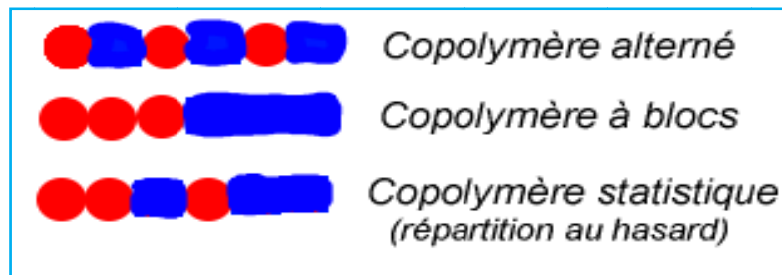


Figure I.1. Différents types de copolymères

La grande famille des plastiques est d'habitude divisée en trois: les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères.

I.4. Les thermoplastiques :

I.4.1.Définition : [2]

Les matières thermoplastiques se ramollissent et deviennent malléables quand ils sont chauffés, ce qui permet leur mise en forme ; elles peuvent même être fondues bien que cet état de fusion soit toujours très visqueux, très pâteux, le changement d'état solide/liquide ou pâteux peut se faire plusieurs fois mais avec une perte de caractéristiques à chaque cycle.

Les thermoplastiques, sont composés de macromolécules de structure linéaire, éventuellement avec des ramifications, ces macromolécules se déforment, elles peuvent même se déplacer sous l'action combinée d'une force extérieure et de l'agitation thermique.

Les thermoplastiques ont un point de fusion et ils comportent deux classes : les amorphes et les cristallins.

- Les 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.
- Les 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.

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

NOM SCIENTIFIQUE	ABREVIATION	NOM COMMERCIAL	MATIÈRES PREMIÈRES	APPLICATIONS
VINYLIQUES 1. Acétate de polyvinyle	PVAC	Movolith Pevelit Vinylbel	acétylène ou éthylène + acide acétique	finition pour mur et sol, adjuvant pour béton
2. Chlorure de vinyle	PVC	Benvic 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 Scorene Finathène	éthylène	tubes flexibles, tuyaux, mousse pour étanchéité de joints, mousse pour isolation de conduites, mousse pour isolation acoustique.
2. Polypropylène	PP	Hostalen PP Eltex PP Carlona	propylène	tuyaux (eaux chaudes, liquides agressifs)
STYRENIQUES Polystyrène	PS	Styropor Vestypor styron	benzène + éthylène	isolation thermique, béton léger...

Tableau 1 : Les matières thermoplastiques les plus courantes et leurs domaines d'utilisation.

I.4.2. La mise en forme des thermoplastiques : [3], [4]

Les techniques de transformation des thermoplastiques imposent le réchauffement de la matière avant sa mise en forme, les techniques les plus utilisées sont:

a) L'extrusion : L'extrusion est une technique de fabrication continue. La matière plastique est introduite, sous forme de poudre ou de granulés, dans un cylindre chauffé, à l'intérieur de celui-ci tourne une vis assurant le transport et l'homogénéisation de la masse fondue. Cette masse plastique est ensuite pressée à travers une matrice d'extrusion ou "filière", qui donne la forme finale à la section de la pièce.

b) L'injection : L'injection est une technique de production de pièces détachées en plastique. Comme pour l'extrusion, la matière plastique est fondue et homogénéisée dans un cylindre chauffé. La vis est de plus utilisée comme piston pour injecter la masse fondue dans un moule fermé. Après refroidissement, ce moule est ouvert et la pièce plastique en est ôtée.

c) Le revêtement : Les objets métalliques peuvent recevoir une couche protectrice en projetant une poudre thermoplastique sur l'objet préchauffé. La poudre fond et forme une couche homogène, résistante à la corrosion.

d) Le calandrage : le calandrage est une technique pour la fabrication de feuilles, la matière préchauffée passe entre plusieurs calandres, c'est-à-dire de grands rouleaux métalliques qui forcent la masse plastique à prendre la forme d'une feuille de l'épaisseur voulue.

I.5. Les thermodurcissables: [3], [4]

I.5.1. Définition:

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 :

NOM SCIENTIFIQUE	ABREVIATION	NOM COMMERCIAL	MATIERES PREMIERES	APPLICATIONS
POLYURETHANE	PUR	Duromer Baydur	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 Résopol Ultrapas	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	Araldit Epikote Lekutherm	épichlorhydrine (chlore et éthylène) + diphénylol- propane (phénol et acétone)	colles, isolateurs, finition de murs et de sols, réparation de béton...

Tableau 2 : Les matières thermodurcissables les plus courantes et leur domaines d'utilisation.

I.5.2. La mise en forme des thermodurcissables:[4]

Les techniques les plus utilisés pour la mise en forme des thermodurcissables sont:

a) Moulage par coulée : une résine liquide est coulée dans un moule, les réactifs et la chaleur provoquent le durcissement de la résine.

b) Moulage par compression ou moulage par compression-transfert: une pression élevée est appliquée à chaud ; ces deux procédés sont utilisés pour former la plupart des pièces thermodurcissables (récipients cylindriques de faible épaisseur).

c) Le moussage : L'allégement des polymères par le moussage permet de créer des structures légères, résistantes, ayant des propriétés mécanique et thermique intéressante, plusieurs techniques peuvent être utilisées pour réaliser des mousses de polymères, elles dépendent du polymère qui sera moussé et du procédé de mise en forme utilisée.

- **Moussage par gonflage :** La fabrication de mousses implique souvent la formation au sein de la matière d'un gaz générateur de cellules lorsque la température est suffisamment élevée pour ramollir le polymère.
- **Moussage direct en extrusion :** L'extrusion de la masse fondue se faisant sous pression élevée, en pratique, par l'évent de dégazage d'une machine à double vis très mélangeuse, on introduit dans le polymère fondu un gaz (cyclopentane aujourd'hui, CFC auparavant) qui s'y dissout, le gaz est mélangé à la formule de polymère durant son séjour dans la machine. A la sortie de la filière, il se vaporise et forme des bulles sur des sites de germination incorporés dans le polymère. En outre, la détente du gaz provoque un refroidissement intense de la masse fondue qui se superpose à celui provenant du refroidissement externe de celui-ci.
- **Moussage par injection:** Dans ce cas, il s'agit de provoquer le moussage d'une masse fondue lors de son injection dans une cavité fermée, en suite on incorpore à la masse à injecter un agent gonflant, substance qui se décompose thermiquement à la température d'injection en provoquant la formation d'une quantité abondante de gaz. C'est le procédé utilisé pour la mousse polyuréthane rigide.
- **Moussage de billes expansibles :** Cette technique est principalement utilisée pour le PS. Les billes formées de cette manière sont alors mises en œuvre par moulage simple. Un moule est rempli des billes expansibles, fermé et chauffé, en générale à la vapeur, provoquant le gonflement et la soudure des billes conduisant ainsi à la formation de l'objet fini.

I.6. Les élastomères : [3], [4]

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.

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.

On citera quelque élastomère ainsi leurs domaines d'utilisation dans le tableau suivants :

NOM SCIENTIFIQUE	ABREVIATION	NOM COMMERCIAL	MATIERES PREMIERES	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	tétrarsulfure de soude + anhydride sulfureux	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...

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

I.7. Les propriétés des polymères: [4], [6], [7]

Le succès des plastiques dans les secteurs de l'industrie s'explique par leurs propriétés spécifiques, dont les plus importantes sont:

I.7.1. Propriétés thermiques :

- La conductibilité thermique est faible (inférieur à 0,1 W/K.m) ; cette conductivité thermique peut être encore améliorée (plus faible) si la matière plastique est moussée.

- Vieillessement accéléré sous l'effet des rayonnements ultra-violetes du à la rupture des liaisons intermoléculaire du polymère ;
- Les polymères thermoplastiques se mettent à l'état fondu à une température suffisante appelée la température de fusion (plus de 200°C);
- Les thermodurcissables durcissent même à température ambiante ;
- Au froid, ils se rigidifient puis ses propriétés mécaniques diminuent rapidement et ils deviennent fragile au choc ;
- Toutes les matières plastiques peuvent brûler vu leur structure organique, mais le comportement au feu peut être très varié.

I.7.2. Propriétés mécaniques :

- Les polymères thermodurcissables sont souvent rigides et fragiles, tandis que les polymères thermoplastiques et les élastomères montrent une résistance mécanique médiocre.
- Une bonne ténacité et une excellente résistance au choc pour certains types de polymères comme le PE et le PVC;
- Une rigidité et une résistance mécanique moins élevées que celle des métaux ;
- Leur résistance à la traction, entre 20 MPa et 800 MPa ;
- Le fluage, quand un thermoplastique, comme le PE, est chargé, il subit une déformation immédiate, suivie d'une déformation lente au cours de la durée de cette charge. Ce phénomène est plus prononcé quand la température est plus élevée.
- Des fissurations sous contraintes ou en présence de solvants peuvent apparaître ;

I.7.3. Propriétés chimiques :

- Une faible masse volumique, permettant une manipulation aisée et une construction légère;
- Une résistance chimique, exceptionnelle, même dans des milieux extrêmement corrosifs pour la plupart des polymères;
- Certains acides mettent en jeu une liaison hydrogène avec les fonctions amides, à température plus élevée, ils peuvent provoquer la rupture de liaison et donc dégrader le polymère chimiquement ;
- Le vieillissement ou la dégradation sous l'influence de la radiation solaire UV par rupture des liaisons moléculaires en atmosphère avec O₂ ou O₃ ;
- Certains plastiques (PS) sont très sensibles, d'autres ne vieillissent pas (PMMA), selon la structure du polymère, car les structures linéaires se réticulent alors que les structures ramifiées se dégradent ;
- Certains polymères vieillissent sous l'action d'une attaque lente ou par l'interaction avec des solvants organiques chlorés ou oxygénés;

I.8. La formulation des polymères: [7], [8]

Une matière plastique est composée d'une matrice qui est un polymère dont la quelle on incorpore des additifs, des charges et des plastifiants afin d'améliorer ses propriétés mécaniques, chimiques et thermiques, on distingue :

I.8.1. Les résines :

Les plastiques industriels sont aussi des matériaux constitués d'une ou plusieurs résines qui jouent le rôle d'un liant dans la matière plastique.

I.8.2. Les charges:

On désigne sous le nom général de charge toute substance inerte, minérale ou végétale qui est ajoutée à un polymère de base jusqu'à 60 % en masse dont le but prioritaire est de modifier de manière sensible ces propriétés mécaniques, électriques ou thermiques et d'améliorer l'aspect de surface ou de réduire le prix de revient du matériau transformé.

I.8.2.1. Charges granulaires :

Les charges granulaires diminuent l'allongement à la rupture en traction et ils augmentent le module d'élasticité et les conductivités électrique et thermique.

I.8.2.1.1. Les charges minérales :

- ▶ **Les talcs** : Les talcs sont utilisés pour améliorer l'isolation thermique et la résistance à l'eau, et faciliter l'opération de moulage. Il confère une meilleure résistance au fluage ainsi qu'une plus grande rigidité. Notons également que l'introduction de talc facilite l'usinage des produits finis.
- ▶ **Le carbonate de calcium-magnésium** ($MgCO_3.CaCO_3$) est préparé à partir des minerais de dolomite. On l'utilise comme charge et aussi comme retardateur de flamme.
- ▶ **La wollastonite** : Elle améliore en particulier la résistance au rayonnement ultraviolet et à l'hydrolyse, l'isolation thermique et électrique, et permet un contrôle du retrait au moulage.
- ▶ **Le kaolin** : contribue à une meilleure résistance chimique et électrique, et diminue l'absorption d'eau, et dans les isolants.
- ▶ **Le kaolin calciné** : est utilisé pour assurer la résistance aux acides.

I.8.2.1.2. Les charges métalliques :

- ▶ **Poudres et microsphères** : L'alumine, les oxydes de zinc, de magnésium et de titane permettent de diminuer le prix de revient et d'augmenter la densité de la matière plastique.
- ▶ **Alumine** : assure une meilleure résistivité électrique ainsi qu'une bonne conductivité thermique, augmente la rigidité ainsi que la résistance à l'abrasion et au feu.
- ▶ **L'hydrate d'aluminium $Al(OH)_3$** : est une charge ignifugeante qui, du point de vue du prix, est concurrentielle ; elle réduit l'inflammabilité ainsi que l'émission des fumées de combustion car elle se décompose de façon endothermique (effet de refroidissement) en alumine et en eau, aux températures supérieures à 220°C.
- ▶ **Le noir de carbone** : Le noir de carbone est utilisé à la fois comme colorant, pigment, barrière anti-UV, antioxydant.

I.8.2.2. Les charges organiques :

Charges cellulosiques, utilisées en tant que charges, les avantages de ces matières cellulosiques sont leur coût peu élevé et leur faible densité.

I.8.2.3. Charges fibreuses :

Les charges fibreuses sont employées couramment sous forme de fibres courtes, moyennes ou longues dans les résines thermodurcissables et en particulier dans celles qui se trouvent initialement à l'état liquide.

I.8.2.4. Agents porogènes :

Les agents porogènes ajoutés aux matières thermoplastiques provoquent une expansion limitée du polymère fondu, qui est conservée pendant le refroidissement. Le plastique ainsi transformé est dit « allégé ».

Des méthodes de fabrication spécifiques conduisent à des produits expansés « mousses » de densité beaucoup plus faible, le produit résultant est devenu alvéolaire et ses propriétés mécaniques chutent avec sa masse volumique.

I.8.3. Additifs :

En général, ils accroissent notablement une propriété spécifique et ils sont incorporés à faible proportion.

- ◆ **Système de réticulation** : Sert à synthétiser des polymères tridimensionnels, il permet la formation d'un réseau tridimensionnel (réticulation) à partir de polymères linéaires, et ils contiennent des durcisseurs, catalyseurs, accélérateurs, etc.
- ◆ **Stabilisants** : Retarder la dégradation du polymère ; stabilisant à l'oxydation.
- ◆ **Ignifugeants** : Réduire ou empêcher les phénomènes de combustion.
- ◆ **Agent gonflants** : obtenir un produit mousse (composé cellulaire), exemple du cyclopentane et du CFC qu'on va étudier avec détaille dans notre travail.
- ◆ **Lubrifiants** : Faciliter la mise en œuvre en augmentant le glissement.
- ◆ **Colorants** : donner une couleur.
- ◆ **Agents antistatiques** : S'opposer aux dépôts de poussières en rendant le plastique conducteur en surface, en effet, la plupart des polymères sont des faibles conducteurs électriques.
- ◆ **Agents anti-ultraviolets** : Ils ont pour fonction de protéger les résines des rayons ultraviolets contenus dans le rayonnement solaire.
- ◆ **Agents anti-retrait** : Ils diminuent ou annulent le phénomène de retrait.
- ◆ **Agents de démoulage** : Ils ont pour objectif de faciliter le façonnage et de réduire la tendance de la résine à adhérer au moules et aux mandrins.
- ◆ **Fongicides et bactéricides** : Résister à l'attaque des micro-organismes surtout en milieu humide.
- ◆ **Solvants** : Pour peinture, adhésifs, etc.

I.8.4. Plastifiants :

Les plastifiants sont des molécules (petites ou moyennes) qui s'insèrent par différents moyens mécaniques entre les macromolécules de grandes chaînes des polymères, elles ont pour effet d'accroître la distance entre ces dernières et d'affaiblir les liaisons de Van der Waals qui les associent. Les polymères plastifiés deviennent souples et cela d'autant plus que le taux de plastifiant est plus élevé. On ajoute fréquemment des plastifiants aux polymères fragiles à la température ambiante.

I.9. Conclusion :

Les matières plastiques, sont présentes pratiquement, dans tous les domaines de la vie quotidienne et elles occupent une place primordiale, dans l'industrie et le marché mondiale actuellement, vue ces propriétés mécaniques et chimiques qui leurs assurent une longue vie (il faut plus de 400 ans pour la disparition d'une matière plastique) grâce à leurs résistance au vieillissement et à la corrosion dans des conditions agressives contrairement aux aciers.

L'incorporation d'une charge ou d'additif dans un polymère peut améliorer un nombre important de propriétés de ce dernier, selon le type de charge utilisé ou l'additif incorporé.

Chapitre II

Comportements et essais mécaniques des plastiques

II.1. Introduction :

Le comportement des matériaux polymères est complexe. Cependant, dans des conditions de charge essentiellement monotoniques, les modèles constitutifs qui sont simples fournissent des informations utiles de conception, essentiellement des modèles dépendant de la pression, de plasticité et d'élasticité. Ainsi, dans la famille des polymères, on peut retrouver un grand nombre de types de comportements qui sont : viscoélastique, viscoplastique, thermo-élastique, hyper-élastique, caoutchoutique. Cette diversité se retrouve, pour un même polymère, si l'on fait varier certaines de ses caractéristiques, ou simplement ses conditions d'utilisation. Il peut être rigide fragile, ductile ou élastique, etc.

L'objectif de cette partie est de citer les grandes classes de comportement des matériaux plastiques qui sont : la plasticité, l'élasticité, la viscoélasticité, la thermo-élasticité.

II.2. Le comportement mécanique des plastiques : [2], [3], [4]

Le comportement mécanique des polymères est caractérisé par une très grande diversité apparente. En effet, pour les mêmes conditions d'utilisation, Les comportements mécaniques des matériaux peuvent être classés dans deux catégories principales, le comportement fragile et le comportement ductile. Un matériau est considéré fragile lorsqu'il se casse dans son domaine élastique, c'est à dire sans subir de déformations plastiques avant la rupture. Un matériau est considéré ductile lorsqu'il peut subir de grandes déformations plastiques avant la rupture. Il y a principalement deux types de déformation : la déformation élastique et la déformation visqueuse (ou plastique). Dans le cas des polymères, ces deux types de déformation se superposent, c'est pourquoi on parle de matériaux viscoélastiques.

II.2.1. Plasticité des polymères :

La déformation plastique, ou plus précisément la ductilité apparente se caractérise par une déformation résiduelle permanente après le relâchement des contraintes ayant provoqué ces déformations ; il s'agit donc d'une déformation irréversible.

La plasticité des polymères possède des caractéristiques que nous résumerons comme suit:

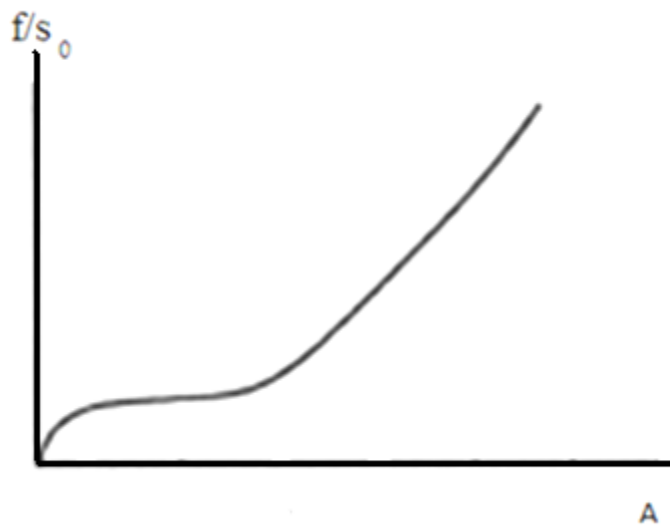
- Forte sensibilité à la température et à la vitesse de sollicitation;
- L'existence de transition « ductile / fragile », car tous les processus de plasticité locaux ne conduisent pas à une même ductilité apparente. Ces transitions seront visibles soit en température, soit en vitesse, soit avec les modes de chargement;
- Le polymère peut apparaître fragile en traction et ductile en compression ou cisaillement ;
- La dépendance des surfaces de charges avec le terme de pression hydrostatique ou en d'autres termes, la dépendance du seuil de plasticité envers le mode de sollicitation ;
- L'existence de variations de volume en cours de déformation plastique, ce qui a une répercussion forte sur la modélisation du comportement des polymères.
- Durant sa phase de déformation plastique le polymère peut, de plus, être le siège d'un durcissement structural, associé à l'orientation moléculaire et à la texturation du cristal voire à la cristallisation induite par la déformation.

II.2.2.Elasticité :

La déformation élastique se caractérise par la linéarité entre la force nécessaire à l'élongation et le taux d'élongation. Un matériau a un comportement élastique si et seulement si il y a réversibilité de la courbe contrainte déformation. Les principales caractéristiques d'un comportement élastique sont:

II.2.2.1. Elasticité caoutchoutique (ou entropique) :

Dans ce type de matériau on constate expérimentalement que le comportement élastique macroscopique permet des élongations de l'ordre de 100% avec une non linéarité forte et une concavité vers le bas (en début de courbe) (figure II.2).



f : la force.
 s_0 : la section initiale.
 f/s_0 : la contrainte
A: Allongement

Figure II.2. Courbe de comportement d'un caoutchouc

II.2.2.2. Viscoélasticité :

Il s'agit de la dépendance des modules d'élasticités avec la vitesse de sollicitation qui conduit à des courbes de comportement contrainte de déformation dépendante du temps. On caractérise ce phénomène par différents types d'essais :

- ▶ spectrométrie de fréquence ;
- ▶ fluage ;
- ▶ relaxation.

II.2.2.3. Thermo-élasticité :

Une variation de température a pour conséquence une dilatation thermique (l'agitation thermique). Le modèle moléculaire permet de prévoir la dilatation thermique du matériau. En effet, lorsqu'un matériau est chauffé, les électrons sont excités et acquièrent une énergie cinétique. On peut assimiler le modèle moléculaire à un modèle dynamique de masse-ressort (voir la figure II.3).

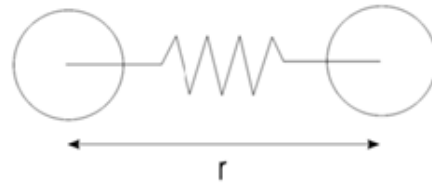


Figure II.3. Modèle moléculaire masse-ressort

Aussi la distance moyenne « r » entre atome se décale vers les grandes valeurs de r lorsque la température augmente.

A l'échelle macroscopique, ce phénomène est ce qu'on appelle la dilatation thermique. Ainsi plus la liaison est forte, plus la dilatation thermique est faible.

Les polymères (liaisons de Van der Waals entre molécules) ont des dilatations thermiques très élevées.

La figure ci-dessous nous montre la variation du module d'élasticité d'un polymère en fonction de la température.

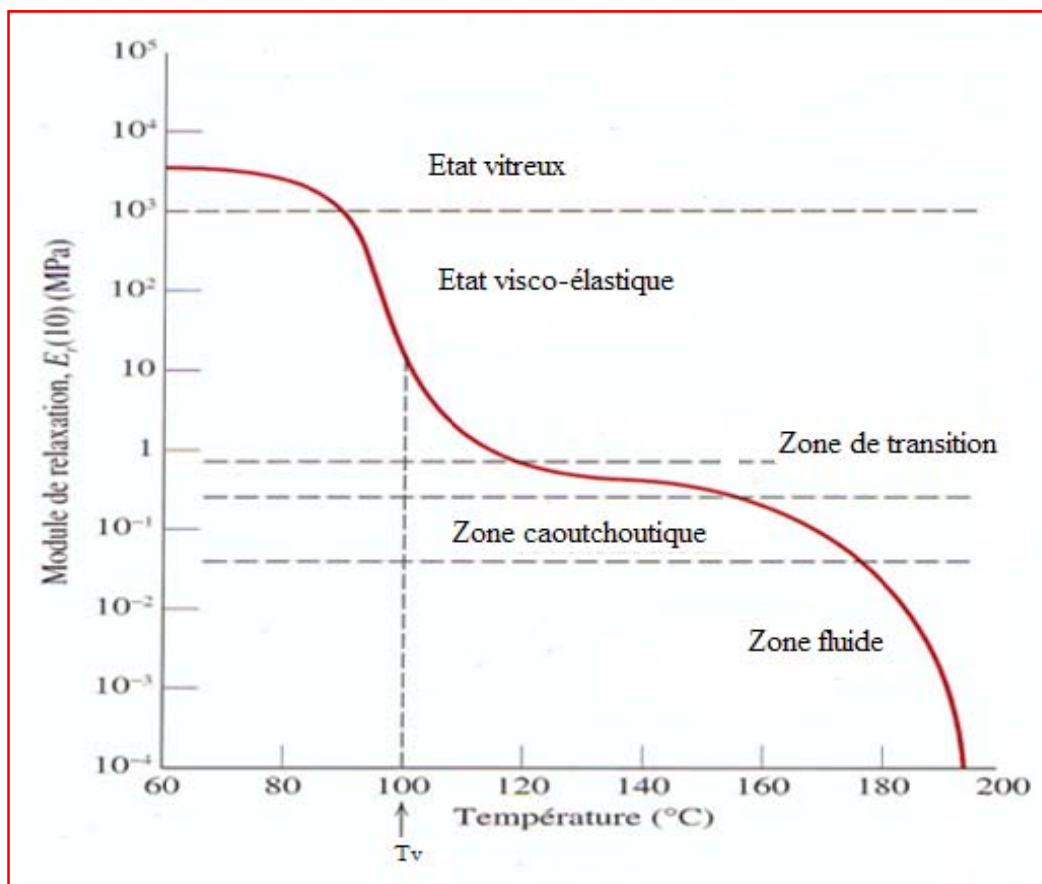


Figure II.4. Courbe de variation du module d'élasticité d'un polymère en fonction de la température

On remarque dans le graphe qu'on peut distinguer quatre zones différentes qui sont :

II.2.2.3.1. Etat vitreux :

A l'état vitreux (T_V : basses températures ou hautes vitesses) les mouvements moléculaires accessibles au polymère ne peuvent pas amorcer de mouvements coopératifs le long du squelette de la chaîne. Pour vitreux qu'il soit, le polymère n'est pas figé. Il existe toujours des fluctuations temporelles et spatiales de conformation, contrôlées par la température, d'autant plus rapides et nombreuses que la température augmente. Il devient donc plus facile de déformer le matériau lorsque sa température augmente. Le module d'élasticité reste donc thermo- dépendant et décroissant, de même, le matériau reste viscoélastique.

II.2.2.3.2. Etat viscoélastique (zone de transition) :

La zone viscoélastique, associée à la relaxation vitreuse, ou zone de transition, marque le moment où des changements de conformation globale, c'est-à-dire des mouvements coopératifs le long du squelette de la chaîne, deviennent possibles. Le module décroît donc rapidement et le comportement est très évolutif.

II.2.2.3.3. Zone caoutchoutique :

Sur la zone caoutchoutique la température est suffisante pour que la chaîne balaie spontanément toutes ses conformations possibles en un temps très court devant le temps représentatif de la sollicitation. Par contre, la température est trop faible pour autoriser le désenchevêtrement des chaînes à grande échelle.

Macroscopiquement, les chaînes apparaissent donc souples, mais l'écoulement est interdit.

Le matériau devient progressivement hyper élastique, s'il n'est pas réticulé. Les processus plastiques cèdent le pas à l'élasticité entropique aux grandes déformations.

II.2.2.3.4. Zone fluide :

La zone fluide apparaît quand les désenchevêtrements deviennent probables. Les chaînes apparaissent statistiquement indépendantes les unes des autres. La sollicitation pourra donc très facilement les déplacer les unes par rapport aux autres. Le comportement devient majoritairement visqueux, mais reste viscoélastique.

II.2.3. Ruptures des polymères : [3]

La résistance à la rupture des polymères est plus faible, que celle des métaux et celle des céramiques. Les polymères thermodurcissables se caractérisent généralement par un mode de rupture fragile, le processus de rupture est lié à la formation de fissures dans la région où se trouve une concentration de contraintes (entaille), la rupture entraîne le bris des liaisons covalentes dans le réseau ou la structure réticulée.

Dans le cas des matériaux thermoplastiques les modes de ruptures possibles sont ductile et fragile, un abaissement de la température ou la présence d'une entaille, une augmentation de l'épaisseur de l'éprouvette et une modification de la structure du polymère sont les facteurs qui favorisent une rupture fragile.

La rupture de certains polymères thermoplastiques est souvent précédée d'une craquelure, à laquelle sont associées des régions d'allongement fortement localisées qui donnent lieu à la formation de microcavités inter-reliées, des fibres se forment entre ces microcavités, lorsque la charge de traction appliquée atteint une certaine ampleur, ces fibrilles s'allongent et se rampent, ce qui entraîne la formation de fissures (voir les figures II.5 et II.6).

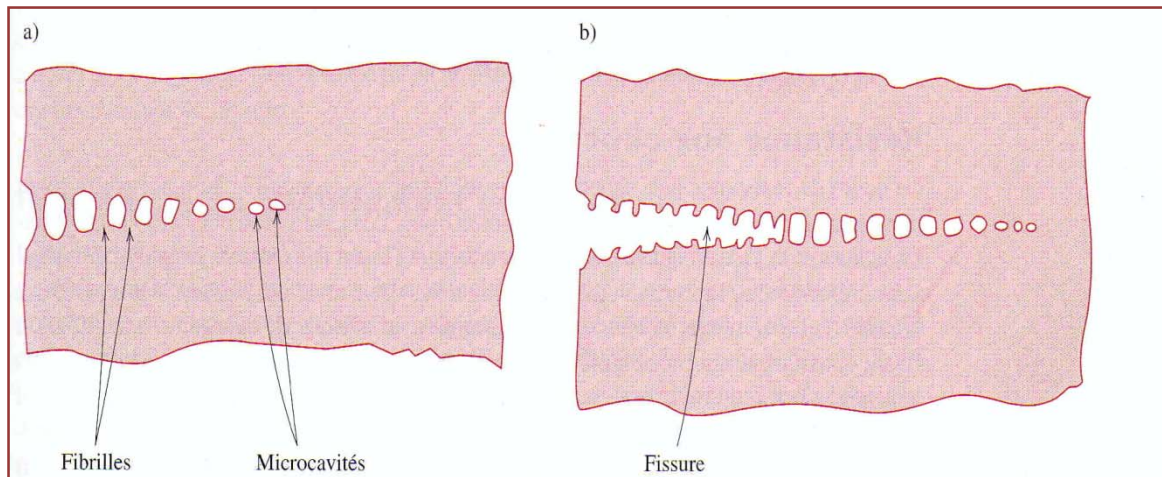


Figure II.5. Représentation schématique a) une craquelure accompagnée de microcavités et des fibrilles, b) craquelure suivie d'une fissure.

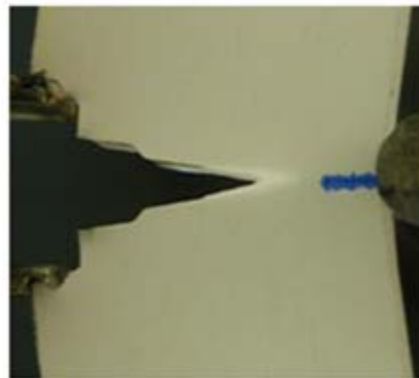


Figure II.6. Zone de fissure d'un polymère

II.2.4. Les paramètres influençant le comportement mécanique des polymères : [4], [5], [6]

La description ci-dessus permet de justifier que les paramètres importants qui influent sur le comportement mécanique des polymères qui peuvent être liés au polymère, mais aussi aux conditions de mise en œuvre et aux conditions de sollicitation (sens, vitesse) ou d'environnement (température, pression, milieu environnant).

L'ingénieur doit donc, pour gérer les polymères et leur comportements, prendre l'habitude de s'informer au mieux sur les résines qu'il emploie, à savoir sur :

- ◆ L'architecture du polymère ;
- ◆ La formulation du polymère ;
- ◆ La mise en œuvre du matériau ;
- ◆ Les conditions d'utilisation.

II.2.4.1. L'architecture des polymères :

La nature et le nombre de co-monomères sont les premiers points à prendre en compte. En effet, c'est le choix des monomères qui conditionne la souplesse des enchaînements covalents

du squelette des chaînes et en partie leur cohésion, par les interactions physico-chimiques (inter chaînes) que les substituants autorisent.

Mais il faut aussi prendre en compte la nature des chaînes, leur linéarité, le taux et les longueurs de branchements, la nature des enchaînements des monomères (statistique, bloc, alterné) dans le cas des copolymères, la réticulation.

Enfin la longueur des chaînes conditionne leur capacité à développer des interactions «physiques», par exemple les enchevêtrements, qui interviennent dans la tenue mécanique du matériau final. Les liaisons tridimensionnelles vont conduire à former un polymère ramifié, ce qui a des conséquences très importantes sur son comportement mécanique.

II.2.4.2. La formulation des polymères:

Un polymère industriel est toujours formulé, soit pour le stabiliser en cours de mise en œuvre, soit pour faciliter sa transformation, soit pour ajuster ses propriétés finales. Il convient donc d'essayer de connaître au mieux la nature et les taux de :

- 1) L'additif, de plastifiants, de charges, de fibres, ... ;
- 2) L'existence d'un agent de couplage entre phases, il s'agit parfois d'un troisième polymère greffé qui stabilise plus ou moins la dispersion des phases et participe au transfert des contraintes d'une phase à l'autre.

II.2.4.3. La mise en œuvre:

La mise en œuvre peut modifier :

- 1) La formulation en consommant des additifs ;
- 2) L'organisation des chaînes en induisant la microstructure comme l'extension et l'orientation moléculaire ; la cristallisation et texturation cristalline ;
- 3) L'organisation spatiale des constituants : répartition et orientations des charges ;
- 4) L'architecture du matériau, c'est-à-dire la nature des chaînes en provoquant des ramifications ou des réticulations et la longueur des chaînes par dégradation ainsi que l'évolution des propriétés des polymères avec la masse molaire car en dessous d'une certaine masse, la propriété n'est pas assurée, au-dessus elle évolue lentement, la mise en œuvre peut donc, en réduisant les masses, détériorer gravement les propriétés du polymère ;

II.2.4.4. Les conditions d'utilisation:

En toute généralité la réponse d'un polymère peut dépendre :

- 1) Du type de sollicitation : traction, compression ou cisaillement ;
- 2) De la température qui est un paramètre primordial;
- 3) De la vitesse de sollicitation qui est d'importance équivalente à celle de la température,
- 4) De la pression;
- 5) Du taux de déformation, car la déformation se traduit par une évolution structurale et donc une évolution des propriétés ;
- 6) Du passé thermomécanique, c'est à dire d'une éventuelle dégradation pendant la mise en œuvre ;
- 7) De l'environnement, dans certains cas le taux d'humidité peut changer le comportement des polymères hydrophiles, des hydrocarbures peuvent gonfler le matériau.

II.3. Essais mécaniques :

Ces essais spécifient l'ensemble des moyens expérimentaux destinés à mesurer certaines propriétés.

II.3.1. Essai de traction : [4], [5]

L'essai de traction permet de déterminer qualitativement si un matériau est fragile ou ductile, rigide ou souple. Il permet aussi de quantifier certaines propriétés mécaniques telles que le module d'élasticité, la résistance maximale ou la contrainte et l'allongement à la rupture en traction. Les mesures en étirage qui sont les plus souvent données que les mesures en compression car elles mettent en lumière les comportements particulier des polymères. L'essai de traction s'effectue à l'aide d'une machine de traction tel qu'elle représenté dans la figure II.7.

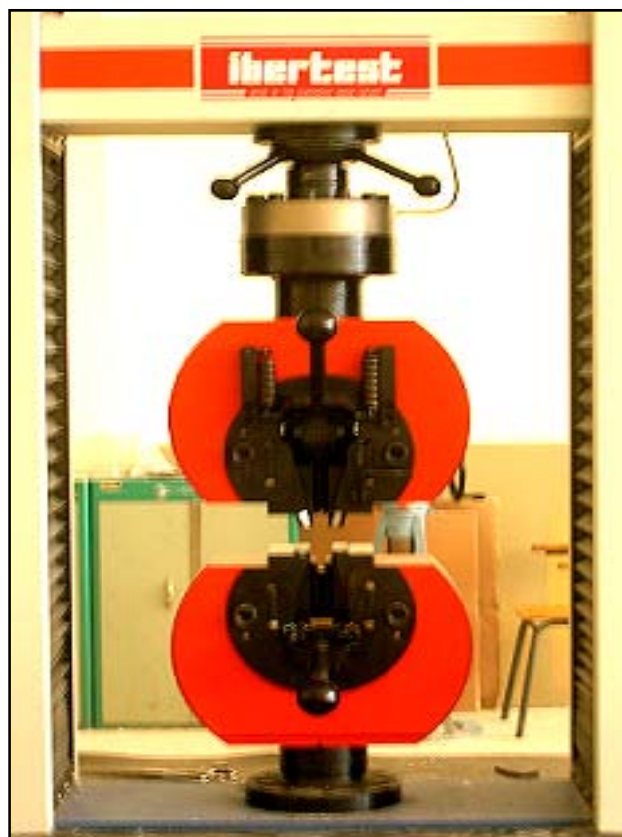
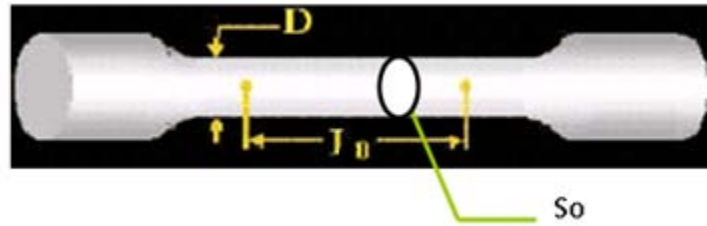


Figure II.7. Machine de traction

L'éprouvette utilisée lors de l'essai de traction à une section uniforme telle qu'elle est représentée à la figure II.8.



D : Diamètre de l'éprouvette à l'état initial

S_0 : Section initiale de l'éprouvette (avant l'allongement)

Figure II.8. Eprouvette utilisée pour l'essai de traction d'une section uniforme

Après l'application d'un effort de traction, l'éprouvette va subir une déformation tel qu'elle est représentée à la figure II.9.

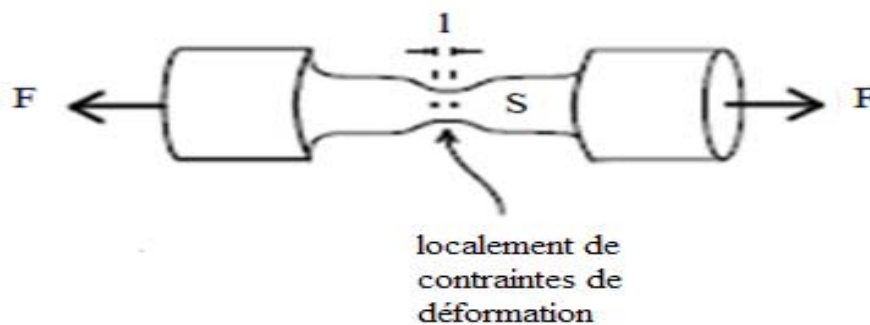


Figure II.9. Eprouvette en cours de striction

$$\sigma = F/S \quad : \text{Contrainte vraie}$$

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad : \text{Déformation vraie}$$

Tel que :

F : Force appliquée lors de l'essai de traction

S : Section déformée

l : L'allongement

l_0 : Longueur initiale de l'éprouvette

La courbe de traction obtenue lors de l'essai de traction qui décrit l'évolution de la contrainte vraie σ en fonction de la déformation vraie ε est représentée dans la figure II.10.

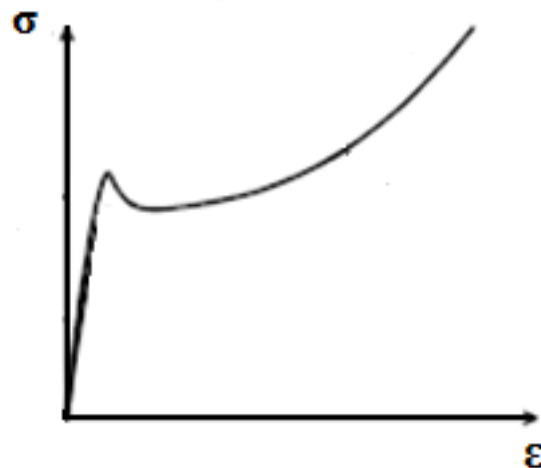


Figure II.10. Courbe de traction d'un polymère

Pour un allongement de quelques pourcentages, à une vitesse de traction fixe donnée, la courbe représentative est d'abord une droite, le retour à zéro de la contrainte se fait selon la même droite. Au-delà de la pente la courbe diminue, le module d'élasticité pour cette déformation est plus faible; il se peut que la rupture intervienne à ce niveau. Si la rupture ne s'est pas produite, la courbe présente un maximum considéré comme l'écoulement plastique. Au-delà on peut assister, avant la rupture à une remontée de la courbe due à un durcissement.

II.3.2. Essai de flexion : [5], [6]

Les essais de flexion se pratiquent soit en essai de trois points (voir la figure. II.11), soit en essais de quatre points. Les modules de flexion dépendent bien entendu de la présence et de la nature des charges, ils sont souvent plus facile à exécuter que les essais en traction quand la rigidité est élevée et l'allongement à la rupture très faible.

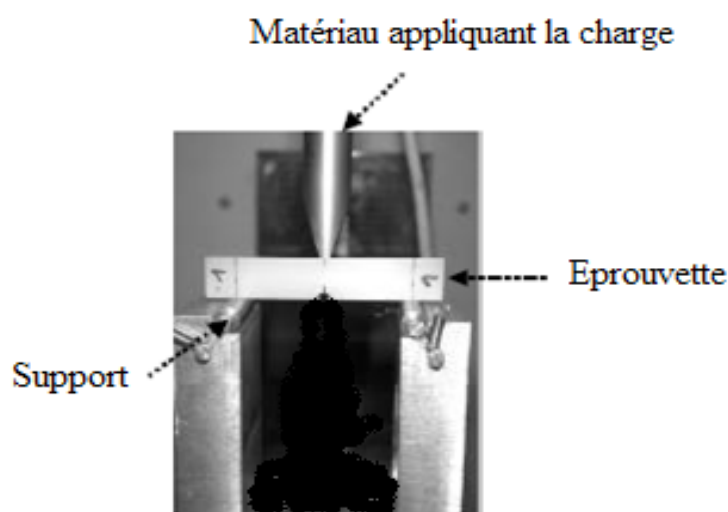


Figure II.11. Montage de flexion trois points



Figure II.12. Machine de flexion

II.3.3. Essai de fatigue : [3]

Les polymères peuvent donner lieu à une rupture par fatigue en situation de chargement cyclique, d'une façon plus générale, un essai de fatigue consiste à faire subir à cette pièce ou à ce matériau des sollicitations variables dans le temps de façon périodique ou aléatoire.

Les courbes de fatigue des polymères est la même que celle des métaux, la durée de vie de l'éprouvette, exprimée en nombre de cycles, décroît pour des contraintes croissantes comme le montre la figure II.13.

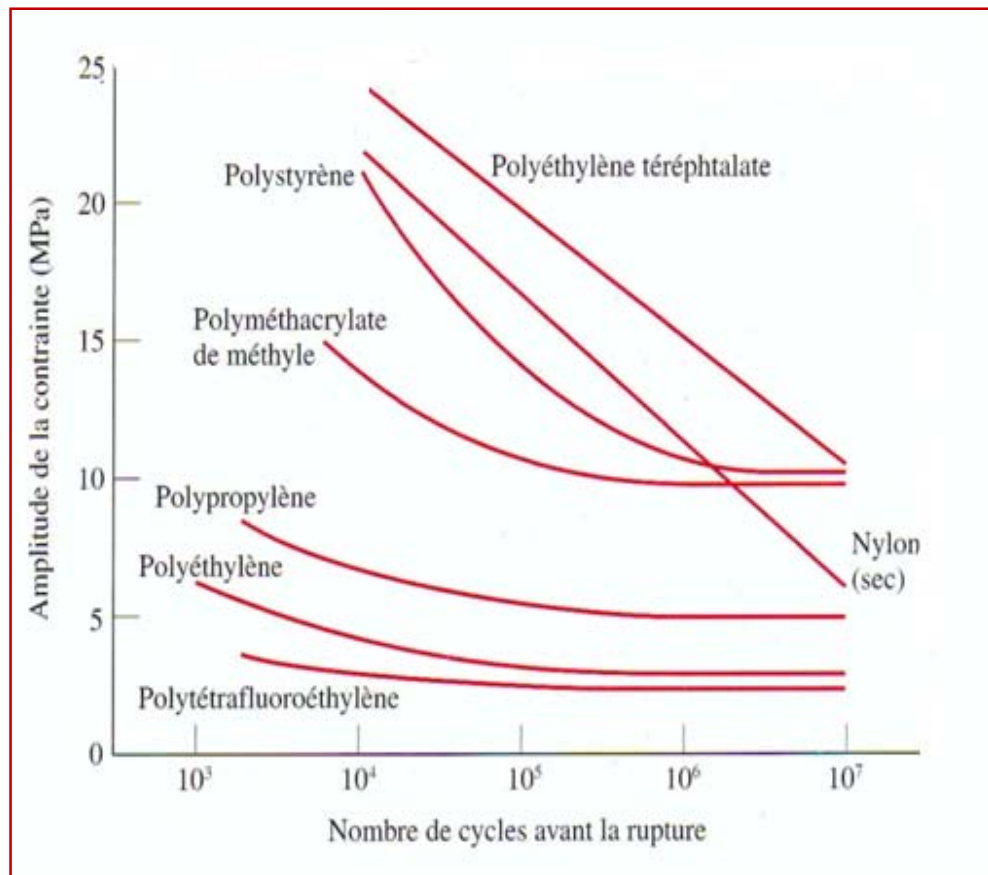


Figure II.13. Courbe de fatigue de quelques polymères

Il est important de tenir compte de la température de l'échantillon, qui peut ne pas être celle de l'atmosphère de l'expérience, car le travail mécanique de l'objet, qui n'est pas parfaitement élastique, l'échauffe.

II.3.4. Essai de fluage : [5]

Le fluage se mesure à charge constant. Quand un thermoplastique est chargé, il subit une déformation immédiate, suivie d'une déformation lente au cours de la durée de cette charge. Ce phénomène est plus prononcé quand la température est plus élevée.

II.3.5. Essais de mesure de la résistance au choc: [3]

Le principe est de solliciter très rapidement une éprouvette pour qu'elle casse et de mesurer l'énergie dissipée dans la rupture par un appareil qui s'appelle « le mouton de CHARPY » comme il est schématisé dans la figure II.14.

Les essais standards les plus courants sont l'essai de CHARPY et l'essai IZOD. Ils servent habituellement à évaluer la résistance au choc. L'essai Charpy est effectué sur le barreau, entaillé (figure II.15) et posé horizontalement entre deux enclumes. La température de l'essai est en général de 23°C. L'essai IZOD est effectué sur un barreau bloqué en position verticale.



Figure II.14. Mouton CHARPY

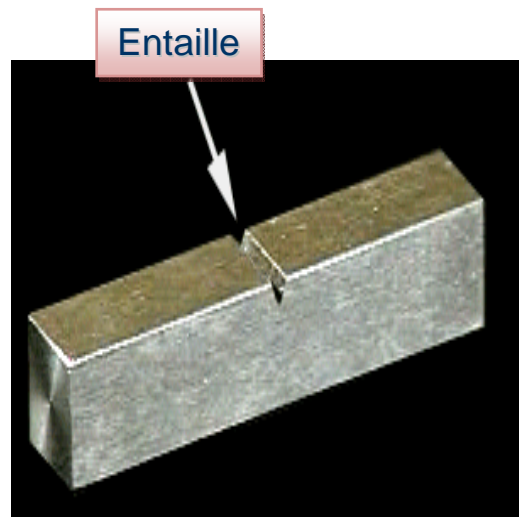


Figure II.15. Epreuve de CHARPY

Les polymères peuvent présenter une rupture ductile ou fragile à la suite d'un choc, suivant la température, la taille de l'éprouvette, la vitesse de déformation et le mode de chargement, les polymères amorphes et semi-cristallins sont fragiles à basse température et ont une résistance au choc relativement faible.

II.3.6. Essai de la résistance au déchirement et à la dureté : [3]

L'essai de la résistance au déchirement et à la dureté, permet de déterminer si un polymère possède ou non les qualités requises pour une application particulière.



Figure II.16. Machine de dureté

La capacité de résister au déchirement correspond à l'énergie requise pour le déchirement d'une éprouvette, l'ampleur de la résistance au déchirement et l'ampleur de la résistance à la traction sont liées.

Les polymères sont plus mous que les métaux et les céramiques.

II.4. Conclusion :

Le comportement et les propriétés mécaniques des plastiques changent en fonction de plusieurs paramètres. Les plastiques sont très sensibles à la température du milieu environnementale et au processus de leurs mises en œuvre, qui ont une influence sur sa structure chimique ainsi que ces caractéristiques mécaniques.

Chapitre III

La mousse polyuréthane rigide

III.1. Introduction :

La valeur du coefficient de conductivité thermique des matières plastiques est proche de celle du bois, cette valeur est dix fois inférieure, quand la matière plastique est transformée en mousse d'isolation, les mousses de polyuréthane rigide (PUR) sont d'ailleurs les meilleurs isolants disponibles actuellement sur le marché, avec une valeur inférieure à 0,025 W/m.K.

La mousse Polyuréthane rigide est un isolant alvéolaire (composé de fines cellules), elle est très utilisée en industrie et elle est présente dans toutes les applications relevant de l'amortissement, de l'isolation et de l'innovation.

L'isolation thermique en polyuréthane est due au gaz (cyclopentane ou CFC) piégé dans les cellules fermées dans le réseau polymère. La mousse polyuréthane rigide expansée par l'agent gonflant, le cyclopentane, est l'isolant thermique utilisé actuellement à l'ENIEM pour les réfrigérateurs, après avoir éliminé le CFC11 qui a un effet destructif sur la couche d'ozone et nous allons étudier l'effet de ces agents gonflants sur les propriétés de la mousse d'isolation dans notre sujet de fin d'études.

III.2. Historique: [9]

En 1849 la réaction de moussage fut découverte par Charles Adolphe 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 États-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 et 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 mousses polyuréthanes rigides qui assurent l'isolation thermique des réfrigérateurs à l'ENIEM.

III.3. Définition : [10]

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 polyisocyanate 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 une couleur foncée, appelé « isocyanate », la partie (B) est aussi un liquide visqueux avec une couleur ambre, d'une apparence miel collant et peut avoir une forte odeur d'ammoniaque, communément appelé « polyol », lorsque les liquides (A) et (B) sont mélangés, il en résulte une couleur ambre, mélange épais qui réagit 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 » (ou le CFC11 utilisé auparavant) qui provoque l'augmentation de volume des vides au sein du polymère, cette réaction dégage aussi 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.4. La matière première: [9], [10]

La mousse polyuréthane rigide est une composition des trois produits principaux suivants :

III.4.1. Les polyisocyanates :

III.4.1.1. Définition :

On appelle isocyanates des composés chimiques dont les groupes fonctionnels sont des groupes isocyanates composés d'azote, de carbone et d'oxygène (NCO).

Les polyisocyanates les plus utilisés sont obtenus à partir des principaux di-isocyanates mentionnés ci-après.

- 1) Le Toluène di-isocyanate (TDI) qui vient en tête de la production mondiale. Le problème de cet isocyanate est qu'il a une forte tendance au jaunissement due à la présence de cycle benzénique (carbones insaturés) par contre son prix est bas et il réagit rapidement (séchage rapide).
- 2) Le hexane di-isocyanate (HDI) est un di-isocyanate industriel. Il conduit à des polyuréthanes très stables à la lumière solaire (car la chaîne carbonée est saturée), élastiques et résistants à la chaleur. Par contre il réagit moins vite que le TDI et son prix est plus élevé.
- 3) On utilise pour la production de mousses PUR rigides presque exclusivement des isocyanates à base de MDI (méthylène-diphénylène-diisocyanate).
Les polyisocyanates à base MDI destinés à la production de mousse PUR rigide sont des liquides visqueux de couleur marron foncé. Ils se caractérisent par leur teneur en (NCO), leur viscosité et leur acidité.

III.4.1.2. Manipulation et stockage des isocyanates :

Les polyisocyanates sont des molécules très réactives dont l'emploi nécessite quelques précautions et pour cela le respect des mesures de protection figurant dans les fiches de données de sécurité des produits est obligatoire :

- a) Le MDI (isocyanate) est un polymère étant classé comme matière dangereuse et assujetti à l'étiquetage obligatoire.



Toxique



Incendie



Nocif



Irritant

- b) Il est nécessaire de respecter certaines précautions lors de sa manipulation, la mise en œuvre du MDI à une température de 20°C à 23°C ne pose aucun problème, à condition de travailler dans des locaux bien ventilés et de prévoir un dispositif d'aspiration de l'air (les vapeurs s'éloignent du personnel) ;

- c) Les vapeurs du MDI irritent les yeux et les muqueuses du nez, et des poumons et risquent de provoquer des phénomènes d'hypersensibilisation, alors il convient de porter des lunettes de protection, des gants imperméables et des vêtements de travail hermétiques. Avant de commencer à travailler, il faut appliquer sur les mains une pommade de protection et en cas de contact avec la peau nettoyer à l'alcool avec un peu d'ammoniaque mais pas à l'eau ;
 - d) La protection contre l'humidité est particulièrement importante pour le stockage des polyisocyanates. Lors de la réaction avec l'humidité ambiante, il se forme de la polyurée qui apparaît sous une forme solide.
 - e) Les emballages doivent être refermés après chaque utilisation pour éviter les dépôts de poussières ou la pénétration d'air ;
 - f) Les réactifs doivent être consommés dans les 10 à 15 jours après ouverture ;
- Des indications supplémentaires concernant la technique et la sécurité du travail figurent dans les fiches de données de sécurité.

III.4.2. Polyols :

III.4.2.1. Définition :

Les polyols sont des liquides visqueux qui ont pour caractéristique chimique principale des groupes hydroxyles composés d'oxygène et d'hydrogène (OH). La fonctionnalité d'un polyol représente le nombre de groupes hydroxyles par molécule, ces groupes réagissent avec des groupes isocyanates pour former des groupes uréthanes. Certains polyols ont des éléments retardateurs de flamme qui les rend ignifuge.

On distingue les polyéthers-polyols et les polyesters-polyols.

1) Polyols polyesters:

On obtient les polyols polyesters par réaction d'acides carboxyliques multifonctionnels avec des glycols (de la glycérine) et d'autres polyalcools similaires. Des polyols à structures esters se forment par élimination de l'eau, pour les polyols polyesters, l'indice d'acide peut également être important.

2) Polyols polyéthers:

Ils sont produits par conversion d'alcools multifonctionnels. Les polyols pour les mousses rigides sont essentiellement produits avec de l'oxyde de propylène.

III.4.2.2. Manipulation et stockage des polyols :

Les mesures et les règles ci-dessus doivent être toujours respectées lors de la production de mousse PUR rigide.

- a) Il faut stocker les polyols à l'abri de l'humidité car ils absorbent l'humidité ambiante, sachant que la teneur en eau peut augmenter rapidement en entraînant avec elle un décalage des indices et une augmentation du dégagement de CO₂, qui aura comme conséquence une baisse de masse volumique et une réduction de la résistance thermique de la mousse ;
- b) Eviter la poussière car les incrustations et les dépôts de particules qui se forment dans les réservoirs peuvent obstruer les conduites et les buses lors du prélèvement du produit ;
- c) Respecté la durée du stockage car les matières premières de la mousse PUR ne peuvent être stockées que pendant une durée limitée si non les mélanges commencent

à présenter des modifications chimiques au bout de quelques semaines, ces modifications se manifestent par des décolorations, une augmentation de la viscosité, une baisse de la réactivité et de la stabilité de la mousse ;

- d) La mise à température des matières premières dont le polyol est également conseillé, moins de 50 °C au maximum ;
- e) L'étiquetage des futs de polyol est obligatoire (comme tous produits dangereux) ;
- f) Protection indispensable de la peau et des yeux ainsi que des voies respiratoires ;
- g) Eviter toute étincelle ou présence d'électricité statique, risque d'incendie.

III.4.3. Agents gonflants :

Les agents gonflants les plus utilisés dans le moussage est le cyclopentane et le CFC11. L'agent gonflant joue le rôle d'expansion, c'est-à-dire, il permet à la mousse de s'épandre quand il atteint le point d'ébullition. Les agents gonflants utilisés doivent bien se subtilisé dans le mélange réactionnel et rester à l'état gazeux dans les cellules fermés de la mousse, pour avoir une faible conductivité thermique, ils ne doivent présenter aucun risque toxicologique et écologique, ce qui n'est pas le cas de l'agent gonflant utilisé au par avant qui est le CFC11 (il détruit la couche d'ozone), ce qui a conduit à le changer par le cyclopentane, qu'on va étudier dans ce projet de fin d'études.

III.4.4. Activateurs :

À température ambiante, la réaction de la plupart des polyols et des polyisocyanates entre eux est moyennement rapide, c'est la raison pour laquelle on ajoute au mélange réactionnel des accélérateurs (activateurs), qui sont le plus souvent des amines tertiaires, des organométalliques (zinc) ou des sels alcalins d'acides carboxyliques aliphatiques, qui ont une action particulièrement stimulante sur la formation d'isocyanurates. Les différents composés constituant la vaste gamme d'activateurs ont parfois des effets très différents sur les réactions. On peut donc utiliser ces effets pour moduler le déroulement de la réaction et de l'expansion en fonction des exigences.

III.4.5. Catalyseurs :

La catalyse est l'action d'une substance appelée, catalyseur, sur une transformation chimique dans le but de modifier sa vitesse de réaction. Le catalyseur, qui est en général en quantité beaucoup plus faible que les réactifs, n'est pas consommé et il est retrouvé inchangé à la fin de la réaction. S'il est séparable facilement du milieu réactionnel, il pourra être recyclé dans une nouvelle synthèse.

Différents types de catalyse peuvent être distingués selon la nature du catalyseur :

- ▶ Catalyse homogène, si le catalyseur et les réactifs ne forment qu'une seule phase;
- ▶ Catalyse hétérogène, si le catalyseur et les réactifs forment plusieurs phases;

Un catalyseur ne modifie ni le sens d'évolution d'une transformation ni la composition du système à l'état final. Tout catalyseur d'une réaction dans le sens direct catalyse aussi la réaction en sens inverse. Un catalyseur, peut modifier très fortement la vitesse d'une réaction, il permet d'obtenir sélectivement une réaction qui, sans lui, serait trop lente (ou trop rapide), ou encore très minoritaire (ou trop majoritaire).

III.4.6. Stabilisants pour mousses :

La mousse, produite par la formation ou l'évaporation de l'agent gonflant, est généralement instable et en absence de stabilisants, s'effondrerait au fur et à mesure de la progression de la réaction. Les stabilisants pour mousses utilisés sont presque tous des composés organosiliconés. Les stabilisants ont une action régulatrice sur la structure de la mousse, sur le

taux de cellules ouvertes et fermées et sur la taille des cellules, et influent donc fortement sur les propriétés de la mousse.

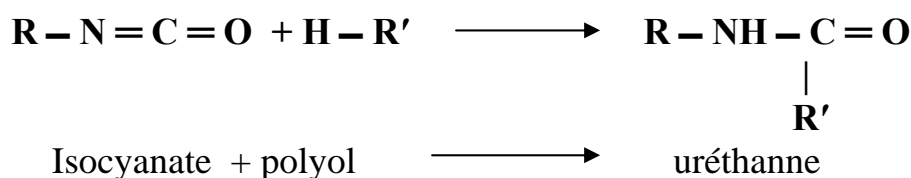
III.4.7. Agents ignifugeants :

Les polyuréthanes sont des composés organiques, donc combustibles. Une structure chimique adéquate et l'ajout de composants ignifugeants sont nécessaires pour retarder leur inflammation et réduire la propagation des flammes. Comme nous l'avons vu plus haut, les polyols polyesters aromatiques et les structures polyisocyanurates ont une action ignifugeante. On utilise aussi couramment des polyols halogénés mais pratiquement pas d'agents ignifugeants solides et insolubles car ils posent des problèmes de mise en œuvre.

III.5. Le mécanisme de formation de la mousse polyuréthane rigide : [10]

D'une façon générale la fonction isocyanate ($-N=C=O$) qui a deux doubles liaisons fortement polarisée, réagissent avec tous les composés à hydrogène mobile.

La mousse PUR est obtenue à partir d'une réaction chimique, comme indiqué ci-dessous.



III.5.1. La réactivité de la mousse polyuréthane rigide :

On caractérise la réaction de moussage à l'aide des indications de temps suivantes :

- 1) **Le temps de mélange ou temps d'agitation** : Indique le temps nécessaire pour mélanger les partenaires réactionnels.
- 2) **Le temps de démarrage ou de crème (5-15s)** : Est le temps qui sépare le début du mélange des partenaires réactionnels, et le début visible du moussage du mélange. Il est souvent signalé par un net changement de couleur.
- 3) **Le temps de ligne ou temps de fil (30-70s)** : Indique le passage du mélange réactionnel, de l'état liquide à l'état solide et correspond à peu près au point de gélification. Il signale que la réaction est environ à mi-parcours.
- 4) **Le temps de fin d'expansion** : c'est le temps qui sépare le début du mélange de la fin de la montée visible.
- 5) **Le temps de détente (10-50s)** : On appelle temps de détente le temps qui sépare le début du mélange du début de la détente. La surface des mousses à structure cellulaire ouverte peut s'ouvrir et laisser s'échapper un excédent de gaz.

III.5.2. Préparation de la mousse polyuréthane rigide: [10]

Dans la préparation des polyuréthanes, on peut distinguer deux phénomènes (ils sont presque simultanés dans le cas de matériaux cellulaires) qui sont :

- ✓ La préparation de la résine.
- ✓ L'expansion éventuelle de celle-ci.

a) Préparation de la résine :

La résine est obtenue par l'addition d'isocyanate et le polyol, il résulte de la réaction chimique d'un isocyanate avec des groupements ayant un hydrogène mobile, des groupements hydroxyle. Cette réaction exothermique peut s'accompagner d'un dégagement gazeux, qui permet une expansion plus ou moins marquée.

b) Expansion :

La réaction de l'agent gonflant sur la résine (isocyanate+polyol), produit du CO₂, mais aussi en produisant des amines, donc des ponts urées se forment ce qui rend le produit plus rigide et prend la forme d'une mousse.

c) Moulage :

Le moussage est réalisé avec une machine à haute pression, elle coule sur le support dans un moule maintenu sous une presse à plateaux, la température des moules idéale doit être entre 45°C et 49°C.

III.5.3. Formation de la mousse polyuréthane rigide: [10], [12]

On peut supposer que la nucléation (formation de bulles de gaz) est due à une sursaturation du mélange réactionnel liquide par le gaz d'expansion formé au cours de la réaction et à la formation de cavités (cavitation) lors du mélange des matières premières.

La formation d'une fine dispersion gazeuse (air, gaz d'expansion déjà formé) lors du mélange pourrait aussi jouer un rôle important

Au début de la phase de moussage, la présence de composés tensioactifs, comme les stabilisants pour mousses, a une importance cruciale.

Le gaz d'expansion dégagé diffuse vers l'intérieur des bulles dispersées de formes sphériques, provoquant ainsi leur croissance. Ce phénomène dure jusqu'à l'obtention d'un certain volume, correspondant à l'empilement le plus dense des sphères dans la matrice liquide (voir la figure III.17). Lorsque ce volume est dépassé, la structure sphérique se transforme en système de cellules de forme hexagonale. La croissance cellulaire est illustrée à la figure ci-dessous. La mousse atteint sa structure et sa répartition de masse définitives à la fin du temps de fil.

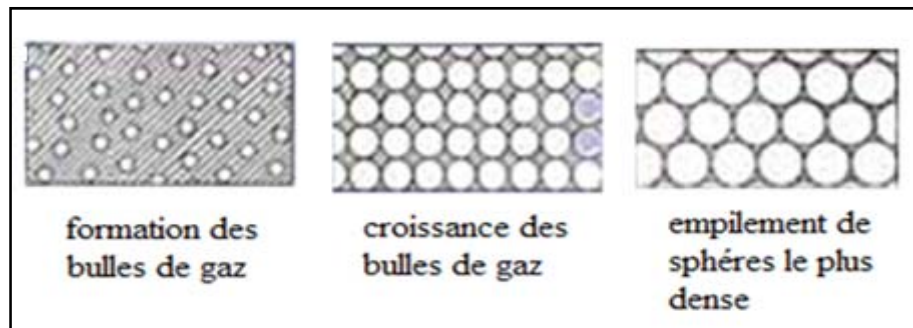


Figure III.17. Croissance cellulaire lors de la formation de mousse PUR rigide

III.6. Caractéristiques générales des mousses polyuréthanes rigides : [12]

Les avantages des mousses rigides en tant que matériau cellulaire sont liés aux caractéristiques suivantes :

- 1) Faible masse volumique ;
- 2) Très faible conductivité thermique ;
- 3) Faibles perméabilités aux gaz, liquides, l'air ;
- 4) Bon rapport propriétés mécanique/masse ;
- 5) Facilité de mise en œuvre ;
- 6) Bonne inertie chimique.

III.7. Les propriétés de la mousses polyuréthane rigide (PUR) :

Les propriétés de la mousse de Polyuréthane dépendent de:

- a) Ces composantes chimiques ;
- b) L'agent gonflant (ce que nous allons étudier avec détaille dans ce travail);
- c) La température de stockage des produits ;
- d) Les paramètres de moussage (à voir dans la partie pratique de ce travail).

Le polyuréthane possède des propriétés remarquables, les plus importantes sont:

1. Isolation thermique élevée à faible épaisseur ;
2. Matériau très léger;
3. Excellente résistance à l'abrasion ;
4. Résistance à l'humidité (elle est constituée à 95% d'alvéoles fermées) ;
5. Compatibilité et résistance chimiques, elle résiste à de nombreux solvants, huiles et produits chimiques;
6. Matériau très amortissant ;
7. Isolation phonique ;
8. Excellente adhérence sur tous les supports ;
9. Hygiène, elle résiste au développement des moisissures et champignons, ne favorise pas la vermine et inodore ;
10. Leur pouvoir de flottation ;
11. Leur capacité à remplir les vides;
12. une meilleure résistance au vieillissement, y compris en milieu humide ;
13. Temps de séchage très court.

III.8. Domaines d'utilisation: [11], [12], [13]

Le polyuréthane est présent dans tous les domaines de la vie. Il est principalement utilisé dans les domaines suivants:

► **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 de véhicules frigorifiques ferroviaires et routiers, y compris les conteneurs, l'isolation de cuves et réservoirs, de canalisations, de conduites de chauffage urbain et de locaux frigorifiques, etc.

► **Électroménager :**

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

► **Automobile :**

Que ce soit dans les sièges, les accoudoirs, les volants, les toits ou les tableaux de bord le polyuréthane est particulièrement très employé.

► **Bâtiment :**

Panneaux sandwich à parements rigides en bardage et toiture, murs, plafonds et sols, matériaux isolants et de construction découpés dans des blocs.

▶ **Ameublement :**

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

▶ **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.

▶ **Emballage :**

En moussant autour de l'objet à protéger dans un emballage rigide comme le remplissage des flocons, feuilles, blocs et le calage amortissant.

▶ **Protection des barrages :**

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

▶ **La protection du littoral :**

Il est un nouveau concept développé pour la protection des littoraux et des berges par l'association du polyuréthane et du gravier dans un composé élastique. L'élasticité du polymère polyuréthane protège les revêtements de protection contre l'assaut des masses d'eau, car les pores connectés, entre les pierres, absorbent l'énergie des vagues. Il est extrêmement robuste, résistant à la chaleur et au gel, plus économique, très facile à transformer et écologique.

▶ **Sport:** Les premiers modèles de combinaisons de natation 100% polyuréthane conçues lors des compétitions, ainsi que les chaussures de sport, les patins à roulettes ont été améliorés et popularisés, rollers.

▶ **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.

▶ **Economique :**

Les bâtiments utilisant un isolant polyuréthane permettent en effet d'économiser l'énergie.

▶ **Le remplissage structural :**

En remplissant un espace libre entre deux plaques de structure, pour éviter par exemple l'entrée de corps indésirables ou pour renforcer ou rigidifier une pièce creuse.

III.9. Conclusion :

La mousse polyuréthane rigide, assure une meilleure isolation thermique pour les réfrigérateurs, et pour cela on doit étudier le produit en détail et fixer les paramètres de sa mise en œuvre, ainsi que les quantités et la nature de ses composantes de bases, pour assurer les propriétés et les caractéristiques souhaitées, qui représentent dans notre cas une bonne isolation thermique, qui est très sensible et délicate à réaliser si on ne se réfère pas aux conditions de l'utilisation des produits (la matière première) et à respecter les conditions de la mise en œuvre.

Chapitre I

Agent gonflant- le chlorofluorocarbure (CFC)

Aspects chimiques

I.1. Introduction :

Il existe une grande variété de mousses présentes dans notre quotidien sans que nous y prêtions attention. Les mousses servent à isoler nos réfrigérateurs, nos chauffe-eau, nos habitations et nos bureaux, elles sont également dans les coussins de nos meubles et dans les sièges de voitures. Les mousses utilisant des CFC représentaient plus de 25 pourcent de la consommation mondiale de CFC (267.000 tonnes par an).

En générale, la mousse polyuréthane rigide (PUR) ayant comme agent gonflant le CFC11 appelé encore le R11, est obtenue en incorporant l'agent gonflant au mélange (polyol+isocyanate) de même que les autres composants auxiliaires comme les activateurs, les stabilisants, les agents ignifugeants, mais il faut adapter les polyols et les additifs qui convient à cet agent gonflant pour que la mousse ait les propriétés désirées comme l'isolation thermique.

Pour la mousse pur à base du CFC, le processus de dégazage et la formation de polymère doit se produire à un rythme adapté, c'est pourquoi on utilise un catalyseur, qui agit comme un stabilisateur de mousse durant les premiers stades de la formation, lorsque le polymère est encore en développement. Les catalyseurs, augmentent, la vitesse de la réaction. La modification de la quantité d'agent gonflant peut faire varier la densité de la mousse, afin d'obtenir différentes propriétés ainsi que sa résistance thermique qui est le sujet de notre étude actuelle.

I.2. Historique : [9]

Tétrachlorure de carbone (CCl_4) a été utilisé dans les extincteurs d'incendie du dix-neuvième siècle, jusque vers la fin de la Seconde Guerre mondiale, ou ils ont utilisé des chloroalcanes pour combattre les incendies des avions militaires, donc son utilisation a commencé avant les années 1920.

Le scientifique belge Frédéric Swarts, pionnier de synthèse des CFC dans les années 1890, a développé un agent de changement effectif pour remplacer le chlorure de tétrachlorure de carbone avec du fluorure et cela l'a amené à la synthèse des CFC-11 (CCl_3F) et de CFC-12 (CCl_2F_2).

Dans la fin des années 1920, Thomas Midgley, a amélioré le processus de synthèse des CFC. en 1930, American Chemical Society a démontré que le CFC possède toutes les propriétés recherchées et attendues de ce produit comme : faible point d'ébullition, faible toxicité, et d'être généralement non-réactive, etc.

en 1987, l'élimination des CFC (Protocol de Montréal).

I.3. Définition : [10]

Un chlorofluorocarbones (CFC) est un composé organique qui contient du carbone, du chlore et du fluor. Les CFC sont des gaz stables voire inertes, non toxiques, ininflammables, non corrosifs, peu couteux, liquides incolores, presque inodores, ils ont été très largement utilisés dans l'industrie (gaz propulseur, liquides frigorigènes, solvants industriels, etc.) jusqu'à la découverte de leur rôle dans la destruction de la couche d'ozone, toutefois, ils s'échappent graduellement de la structure alvéolaire des polymères, s'élèvent jusqu'à la couche d'ozone et

la décomposent, détruisant progressivement cette portion de l'atmosphère qui protège la terre du rayonnement ultraviolet du soleil.

Une sous-classe commune est celle de HCFC et HFC, qui contient de l'hydrogène. Les CFC et HCFC et HFC ont des propriétés physiques similaires. Ce sont des gaz qui se prêtent bien à l'application dans les machines à froid.

a) 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 (voir la figure IV.19). 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 éliminée 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 :

Nom chimique	Vie (année)	formules	PACO	PRG (100ans)
CFC-11 Trichlorofluorométhane	45	CCl_3F	1.0	4600
CFC-12 Dichlorodifluorométhane	100	CCl_2F_2	1.0	10600
CFC-113 Trichlorotrifluoroéthane	85	$C_2Cl_3F_3$	0.8	6000
CFC-114 Dichlorotétrafluoroéthane	300	$C_2Cl_2F_4$	1.0	9800
CFC-115 Chloropentafluoroéthane	1700	C_2ClF_5	0.6	7200

Tableau 4 : les valeurs de PACO et PRG des CFC

b) Les HCFC :

Les hydrochlorofluorocarbures (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 des HCFC, leurs durées de vie, ainsi que leurs PACO et PRG dans le tableau suivant :

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

Tableau 5 : les valeurs de PACO et PRG des HCFC

c) 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.

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

Tableau 6 : les valeurs de durée de vie, de PACO et PRG des HFC

I.4. Les noms commerciaux des CFC : [9], [10]

Le CFC est connu sous plusieurs noms qui sont les suivants:

CFC : Fréon ; Kaltron ; Forane ; Frigen ; Arcton ; chlorofluorocarbures ; Algofrene ; Asahiflon ; Daiflon ; Flon ; Flugéne ; Ffridohna ; Frigidohn ; Genetron ; Isceon ; Isotron ; Kaiser ; khladon ; Ldon ; racon ; Ucon ; kaltron ;

CFC11: Trichlorofluorométhane, fluorotrichlorométhane, Arcton11, Fréon11, Fréon HE, Fréon MF, R11, Forane11, Fréon 11B (Fluorochloroform), Kaltron11(CCl₃F),

I.5. Système de numérotation :

Les différences entre les diverses molécules de CFC sont le nombre d'atomes de carbone, de chlore et de fluor, et la disposition des atomes dans l'espace (isomères).

1) Première méthode de numérotation :

Pour nommer les différents CFC, on utilise une règle simple régie par la norme 34-1992 :

Un système de numérotation est utilisé pour les alcanes fluorés, avec le préfixe Fréon, R, CFC-, et le HCFC-.

Les CFC se notent : CFC-ABCDE tel que:

- A : Nombre de doubles liaisons (omis si égal à zéro)
 B : Nombre d'atomes de carbone -1 (omis si égal à zéro)
 C : Nombre d'atomes d'hydrogène +1 = 1 dans le cas des CFC (nombre d'atome d'hydrogène =0)
 D : Nombre d'atomes de fluor
 E : Lettre pour identifier les isomères, on commence par "a", puis "b", etc.
- **Exemple** : Le trichlorofluorométhane CCl_3F ou CFC11 :
- A : 0 (pas de double liaison)
 B : $1-1=0$ (dérivé du méthane)
 C : $0+1=1$ (CFC)
 D : 1
 E : pas d'isomère.

2) Deuxième méthode de numérotation :

Une autre équation facile, qui peut être appliquée pour obtenir la bonne formule moléculaire des composés de classe fréon est : prendre la numérotation et ajouter à lui la valeur « 90 ». La valeur ainsi obtenue donne le nombre d'atomes de carbone qui est le premier chiffre, le deuxième chiffre donne le nombre d'atomes d'hydrogène, et le troisième chiffre indique le nombre d'atomes de fluor, le reste sont les atomes de chlore. La valeur de cette équation est toujours un nombre à trois chiffres.

- **Exemple** : le CFC-12 :

Le fréon-12 indique un dérivé du méthane (seulement deux numéros) contenant deux atomes de fluor et pas d'hydrogène ($1-1=0$). Il est donc CCl_2F_2 .

On appliquant cette méthode on obtient :

$90 + 12 = 102 \rightarrow$ 1 carbone, 0 hydrogènes, 2 atomes de fluor, et donc 2 atomes de chlore résultant dans CCl_2F_2 .

Le principal avantage de cette méthode est de déduire la composition moléculaire, elle donne le nombre d'atomes de carbone de la molécule.

❖ Remarque :

Parfois on peut trouver la lettre R à la place de CFC pour indiquer que la molécule est utilisée comme réfrigérant. Ainsi R-11 et CFC-11 représentent exactement la même molécule.

I.6. Les classes des composés du CFC ou la nomenclature :

- 1) Les chlorofluorocarbures (CFC), quand ils sont obtenus à partir de méthane et d'éthane, ces composés ont les formules :

$(\text{CCl}_m\text{F}_{4-m})$ et $(\text{C}_2\text{Cl}_m\text{F}_{6-m})$ où m est différent de zéro.

- 2) Hydrochlorofluorocarbures (HCFC), quand ils sont obtenus à partir de méthane et d'éthane, ces composés ont les formules :

$(\text{CCl}_m\text{F}_n\text{H}_{4-m-n})$ et $(\text{C}_2\text{Cl}_x\text{F}_y\text{H}_{6-x-y})$ où m, n, x et y sont non nuls.

- 3) Hydrofluorocarbures (HFC) : Quand ils sont obtenus à partir du méthane, d'éthane, propane et butane, ces composés ont les formules (respectivement) :

$(\text{CF}_m\text{H}_{4-m})$, $(\text{C}_2\text{F}_m\text{H}_{6-m})$, $(\text{C}_3\text{F}_m\text{H}_{8-m})$, $(\text{C}_4\text{F}_m\text{H}_{10-m})$ où m est différent de zéro.

I.7. Liste des CFC les plus utilisés:

Dans le tableau suivant nous allons citer les noms des CFC les plus utilisés ainsi que leurs propriétés :

Formule chimique brute de la molécule de CFC	Nom de la molécule	Appellation	Molécule d'alcane de départ	Atome d'halogène	Point d'ébullition (°C)
CFCl_3	Trichlorofluorométhane	CFC-11 ou R-11, freon 11	Méthane	F + 3Cl	23
CF_2Cl_2	Dichlorodifluorométhane	CFC-12 ou R-12, freon 12	Méthane	2F + 2Cl	-29.8
$\text{CClF}_2\text{CCl}_3$	Tétrachloro-1,1-difluoroéthane	112a Fréon, R-112a, CFC-112a	Éthane	2F + 4Cl	91.5
CClF_3	Chlorotrifluoro-méthane	Freon-13, R-13, CFC-13	Méthane	3F + Cl	-81
$\text{CCl}_2\text{F}_2\text{CCl}$	Tétrachloro-1,2 difluoroéthane	Freon 112, R-112, CFC-112	Éthane	3F+3Cl	91.5
$\text{C}_2\text{F}_3\text{Cl}_3$	Trichlorotrifluoroéthane	CFC-113 Freon 113, R-113, le 1,1,2-Trichlorotrifluoroéthane	Éthane	3F + 3Cl	47.7
$\text{Cl}_3\text{C-CF}_3$	1,1,1-trichloro-2,2,2-trifluoroéthane	113 Fréon, R-113a, CFC-113a	Éthane	3F + 3Cl	45.9
$\text{C}_2\text{F}_4\text{Cl}_2$	Dichlorotétrafluoroéthan	Fréon 114, R-114, CFC-114, Dichlorotétrafluoroéthane	Éthane	4F + 2Cl	3.8
$\text{C}_2\text{F}_5\text{Cl}$	Chloropentafluoroéthane	CFC-115	Éthane	5F + Cl	-38
CHClF_2	Chlorodifluorométhane	R-22, HCFC-22	Éthane	2F+Cl	- 40.8
CHCl_2F	Dichlorofluoro-méthane	R-21, HCFC-21	Méthane	F+2Cl	8.9
$\text{Cl}_2\text{FC-CH}_3$	Le1,1-dichloro-1-fluoroéthane	R-141b, HCFC-141b	Éthane	F+2Cl	32
$\text{ClF}_2\text{C-CH}_3$	1-chloro-1,1-difluoroéthane	R-142b, HCFC-142b	Éthane	2F+Cl	-9.2
CHFClCF_3	2-chloro-1,1,1,2-tétrafluoroéthane	R-124, HCFC-124	Éthane	4F+Cl	-12
$\text{CClF}_2\text{CF}_2\text{CHClF}$	1,3-dichloro-1,2,2,3,3-pentafluoropropane	R-225cb, le HCFC-225cb	propane	5F+2Cl	56
$\text{CF}_3\text{CF}_2\text{CHCl}_2$	Le 1,1-dichloro-2,2,3,3,3-pentafluoropropane	R-225ca, le HCFC-225ca	propane	5F+2Cl	51

Tableau 7 : Liste des CFC les plus utilisés ainsi que leurs propriétés

I.8. La structure chimique de chlorofluorocarbure (CFC11) : [11]

La structure chimique du CFC11 (CCl_3F) a la forme tétraédrique. Du fait que le chlore et les atomes de fluor sont différents dans la taille, ils s'écartent de la symétrie tétraédrique parfaite comme le montre la figure ci-dessous.



Figure I.18. Structure chimique du CFC11

I.9. Les propriétés physiques des CFC11:

Les principales propriétés physiques du CFC11 sont citées dans le tableau suivant :

Densité (ρ) à 0 ° C	1,5432 g.cm ⁻³
Densité (ρ) au coût de 18,82 ° C	1,4905 g.cm ⁻³
Température critique (T_c)	198 ° C (471 K)
Pression critique (p_c)	4,410 MPa (44,1 bar)
Densité critique (ρ_c)	4,151 mol.l ⁻¹
Indice de réfraction (n) à 20 ° C, D	1.3821
Facteur acentrique (ω)	0.18875
Moment dipolaire [homonymie nécessaire]	0,450 D
Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (ODP)	1 (par définition)
Potentiel de réchauffement global (GWP)	4600 ($\text{CO}_2 = 1$)

Tableau 8: Les propriétés physiques du CFC11

I.10. Les propriétés chimiques des CFC11 :

Les propriétés chimiques des CFC11 sont résumées dans le tableau suivant :

Formule moléculaire	CCl_3F
Apparence	Incolore liquide ou gaz
Masse molaire	137,37 g / mol
Densité	1,494 g / cm^3
Point de fusion	-110,48 ° C
Point d'ébullition	23,77 ° C
Point d'éclair	Non inflammable
Pression de vapeur	89 kPa à 20 ° C, 131 kPa à 30 °
Solubilité dans l'eau	1,1 g / l à 20 ° C

Tableau 9 : Les propriétés chimiques du CFC 11

I.11. Caractéristiques des chlorofluorocarbures (CFC11):

Les CFC ont des très intéressantes caractéristiques, ce qu'explique leur utilisation massive dans le domaine de l'isolation thermique, jusqu'à la découverte de leur rôle dans la destruction de la couche d'ozone. Le CFC11 possède les caractéristiques suivantes:

- 1) Ininflammables ;
- 2) Très peu coûteux à fabriquer ;
- 3) Extrêmement inertes, presque autant que des gaz nobles (liaisons covalentes fortes) ;
- 4) Les CFC sont très stables dans la nature ;
- 5) Une faible toxicité ;
- 6) Une faible réactivité ;
- 7) Sa résistance thermique est bien meilleure que celle de tous les matériaux isolants pour une épaisseur minimale.

I.12. Manipulation des CFC: [12]

Selon leurs fiches signalétiques, les CFC et les HCFC sont incolores, volatils, relativement non toxiques, liquides et ils sont des gaz avec une odeur éthérée. Une surexposition peut causer des étourdissements, perte de concentration, dépression du système nerveux central ou une arythmie cardiaque.

Il faut déplacer l'air et les vapeurs car ils peuvent causer l'asphyxie dans des espaces confinés. Bien qu'il soit non-inflammable, leurs produits de combustion comprennent l'acide fluorhydrique, et les espèces apparentées.

I.13. Domaines d'utilisation des CFC :

Les CFC doivent leurs intérêts principaux à leurs propriétés : inerte, stable, ininflammable et non toxique, ainsi que dans leurs faible prix de fabrication, c'est pour cela notamment que les gaz nobles, très coûteux, ne sont pas utilisés à leur place. Un autre intérêt des CFC réside dans le fait qu'ils ont tous un point d'ébullition différent et peuvent donc convenir à des applications variées. Dans les années 1980, les CFC étaient utilisés dans plusieurs secteurs industriels comme:

- 1) l'industrie des mousses isolantes ;
- 2) l'industrie du froid ;
- 3) l'industrie des nettoyeurs industriels ;
- 4) l'industrie des propulseurs.

I.13.1. Industrie des mousses :

L'industrie des mousses a besoin d'un gaz pour l'expansion des mousses et il faut qu'il soit:

- 1) Incolore pour ne pas détériorer la couleur recherchée pour la mousse ;
- 2) Ininflammable afin que la mousse ne le soit pas elle-même.

Le CFC11 est le seul agent gonflant qui possède ces propriétés tout en gardant une très faible conductivité thermique ce qui assure aux mousses le caractère d'isolation thermique.

I.13.2. Industrie du froid :

Les CFC servent en majorité dans l'industrie du froid. Pour la fabrication du froid (réfrigérant), le principe est la vaporisation du gaz (le changement d'état liquide/gaz). En effet, pour refroidir un gaz il suffit d'augmenter la pression de ce dernier, d'où le rôle d'un compresseur qui liquéfie le gaz en augmentant sa pression. Ensuite lorsque le liquide ainsi produit va se retrouver en contact avec la chaleur du milieu, il va l'absorber pour redevenir gazeux, c'est un échange thermique entre le milieu et le réfrigérant. Le choix du réfrigérant s'est porté sur le CFC pour sa :

- 1) Stabilité, ainsi l'installation dure « indéfiniment » puisque le réfrigérant ne se dégrade pas et ne dégrade pas l'installation (non corrosif) ;
- 2) facilité de liquéfaction (température d'ébullition modérée) ;
- 3) Chaleur de changement d'état favorable (il absorbe beaucoup de calories par unité de masse) ;
- 4) Ininflammabilité ;
- 5) Non toxicité.

I.13.3. Industrie des nettoyeurs industriels :

Pour cette industrie, le CFC est un puissant solvant, vu ses propriétés, qui sont les suivantes:

- 1) Inodore ;
- 2) Non nocif pour la santé;
- 3) Ininflammable ;
- 4) Les CFC ayant une grande capacité à dissoudre les graisses.

I.13.4. Industrie des propulseurs :

Dans cette industrie, on a besoin d'une substance inodore, incolore, stable, ininflammable et avec une vitesse d'évaporation élevée. De plus, il ne faut pas qu'il réagisse avec la substance propulsée, d'où la nécessité d'un produit inerte.

I.14. L'élimination des CFC : [11], [12]

On a longtemps utilisé le chlorofluorocarbure (CFC11), qui remplissait parfaitement la plupart des critères de rentabilité, mais qui était très problématique sur le plan écologique.

L'effet de serre (GWP : Global Warming Potential), déclenché par les CFC et son potentiel destructeur pour la couche d'ozone de la stratosphère (ODP : Ozone Depletion Potential) ont conduit à interdire son utilisation dans le cadre de protocole de Montréal en 1987.

Dès les années 1987, l'ensemble des industriels du secteur des mousses avaient commencé à éliminer les CFC « mousses sans CFC ». Au début des années 1990, l'industrie des mousses a commencé à développer des alternatives, et l'utilisation de technologies ou procédés de remplacement de nature entièrement différente en privilégiant celles dont le potentiel de réchauffement global (PRG) était faible comme le cyclopentane (utilisé à l'ENIEM).

I.15. L'appauvrissement de la couche d'ozone par le CFC:

Tel que mentionné précédemment, les CFC ont été éliminés par le Protocole de Montréal en raison de leur rôle destructif de la couche d'ozone ce qui permet la pénétration des rayons ultraviolets (UV) à la surface de la terre. En 1994 l'ozone mondial représentait moins de la moitié de la quantité totale des années 1970. La découverte d'un « trou d'ozone » en 1985. La recherche a montré que l'ozone pouvait être détruit par certains radicaux de chlore, qui était le résultat de l'activité humaine. En 1973, deux chimistes, Frank Sherwood Rowland et Mario Molina, découvrent que les molécules de CFC sont suffisamment stables pour rester longtemps dans l'atmosphère jusqu'à ce qu'elles seraient décomposées sous l'action des radiations UV, en libérant un radical de chlore (Cl), qui modifie les molécules d'ozone de l'atmosphère (O_3) en enlevant un atome d'oxygène (voir la figure I.19.). Comme les CFC se dégradent progressivement dans l'atmosphère, leur effet destructeur se poursuit pendant plusieurs siècles après leur émission. La surveillance scientifique a observé que depuis 1998, la couche d'ozone avait cessé de s'appauvrir, il est même apparu qu'elle s'était régénérée, d'après les projections, la couche d'ozone doit retrouver son niveau d'avant les années 1980 entre 2050 et 2075.

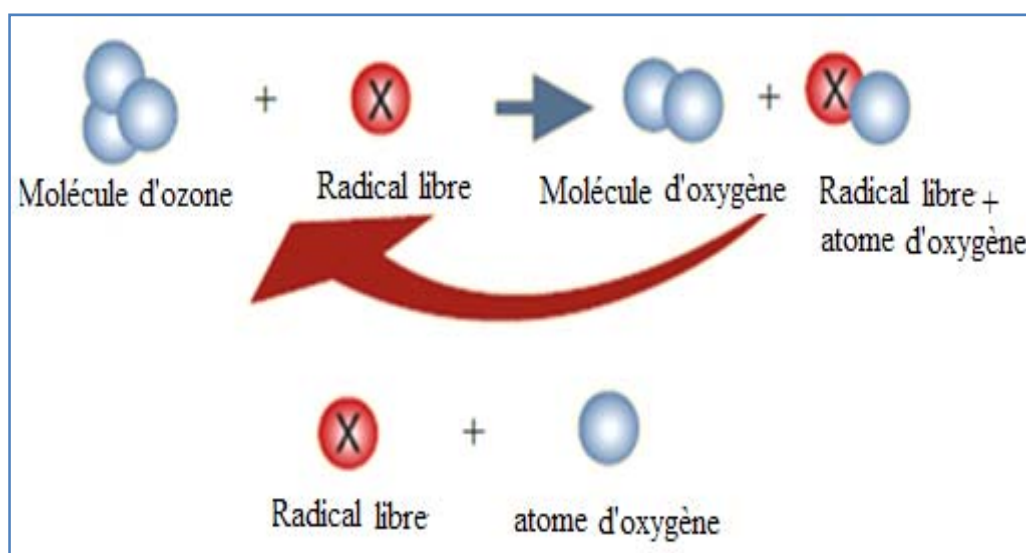


Figure I.19. Réaction de l'appauvrissement de la couche d'ozone par un radical libre

I.16. Conséquences d'appauvrissement de la couche d'ozone :

La couche d'ozone agit comme un bouclier protecteur et absorbe la majorité des radiations nocives des ultraviolets (UV), qui pourraient atteindre la surface terrestre.

L'augmentation des radiations UV a des conséquences sur l'environnement et sur la santé humaine et menace l'équilibre écologique, et parmi ces risques on va citer :

- a) Problèmes de santé comme : les cancers de peau, la cataracte qui affectent les yeux, dégradation du système immunitaire et le vieillissement prématurément de la peau, etc.
- b) Menace pour la productivité des plantes ;
- c) Menace pour la vie aquatique ;
- d) La pollution telle que : la pollution de l'air, la pollution marine, la pollution d'eau, la pollution thermique et la pollution du sol ;
- e) Réchauffement climatique ;
- f) Augmentation de l'effet de serre.

I.17. Le règlement : [11]

Depuis la fin des années 1970, l'utilisation des CFC a été fortement réglementée en raison de leurs effets destructeurs sur la couche d'ozone. En 1987, le Protocole de Montréal, appelle à l'élimination des CFC. Ils proposent comme alternatives aux CFC les HCFC et plus tard les HFC qui seront eux aussi éliminés après le Protocole de Kyoto.

I.17.1. Le protocole de Montréal (Protection de la couche d'ozone) :

En 1987 étaient conclus les accords de Montréal. Leur objectif était de supprimer l'émission des gaz qui appauvrissent la couche d'ozone dans la stratosphère, ces substances étaient pour l'essentiel les CFC ainsi que les HCFC.

Les accords de Montréal ont alors eu comme conséquence la production des HFC (pour remplacer le CFC et le HCFC), ce qui a causé aujourd'hui une aggravation du problème du changement climatique. Il serait alors légitime de demander une modification des accords de Montréal qui vise à éviter ce dernier problème en limitant également la production des HFC.

I.17.2. Le protocole de Kyoto (Protection du climat):

Le protocole de Kyoto a pour objectif de réduire les gaz à effet de serre, afin d'éviter le réchauffement climatique. Le principal gaz à effet de serre est le CO₂. Mais il existe aussi un certain nombre d'autres gaz à effet de serre, il s'agit des trois classes des composés organiques halogénés qui sont : les CFC, les HCFC et les HFC, qui contribuent à 12 % du réchauffement climatique.

I.18. Programme de l'Algérie pour l'élimination des CFC :

Le gouvernement algérien a signalé dans le cadre du Protocole de Montréal une consommation de 120 tonnes métriques de HCFC par année, entre 2002 et 2006.

De 2007 à 2008, la consommation de HCFC a augmenté, passant 180 tonnes métriques, et à 497,8 tonnes métriques en 2009. Environ 19 pourcent de la consommation totale de HCFC était utilisé dans le secteur de la mousse.

Le gouvernement de l'Algérie a consenti, à établir une réduction globale de la consommation du HCFC, le niveau moyen de consommation en 2009 et 2010 est estimé à 31,0 tonnes

Après la conversion, 22,0 tonnes métriques des CFC sont éliminées, 13,8 tonnes de cyclopentane sont progressivement introduites, et l'équivalent de 15 341 tonnes de CO₂ qui auraient été émises dans l'atmosphère sont évitées.

I.19. Le remplacement des CFC par d'autres matières : [11], [12],[13]

Recourir à des composés à faible potentiel de réchauffement global (PRG) et respectant les critères de rentabilité et de sécurité de l'environnement, par le remplacement du chlorofluorocarbures (CFC), qui étaient utilisés principalement comme agents gonflants pour les mousses isolantes, et dans ce but on peut proposer les solutions suivantes :

I.19.1. Les hydrocarbures - le cyclopentane :

Le remplacement des CFC-11, CFC-12 et HCFC-22 par des hydrocarbures, qui sont des substances qui existent naturellement à partir de matières végétales fossilisées, et qui sont présentes partout dans le monde sous forme de pétrole et de gaz naturel. On utilise les gaz (dont le propane, le cyclopentane, le butane et l'isobutane) comme matières premières dans la fabrication de mousses et comme réfrigérants. Les frigos de meilleure qualité utilisent un cyclopentane comme agent gonflant de la mousse isolante.

En 1990, le premier frigo écologique est apparu, dépourvu de gaz fluoré, il fonctionne à base de gaz qui ont un pouvoir de réchauffement global négligeable et aucun effet sur la couche d'ozone, les agents moussants utilisés pour l'isolation thermique sont des hydrocarbures de type « cyclopentane ». La plupart des fabricants ont opté pour cette technologie appelée "Green freeze", c'est le cas de l'ENIEM. Mais il faut noter que contrairement aux CFC et aux HCFC moins réactifs, ininflammables et non explosifs, le cyclopentane est inflammable.

I.19.2. Renforcement des mousses rigides a base de cyclopentane :

Le renforcement des mousses rigides à base du cyclopentane se développe depuis relativement peu de temps pour des applications où les critères de choix sont : légèreté, isolations phonique et thermique plus élevée, rigidité. Un renfort en fibres de verre, qui est actuellement le plus utilisé, améliore les faibles caractéristiques mécaniques des mousses qui limitaient leurs utilisations. Les principales améliorations concernent le module d'Young, la résistance en flexion, la tenue aux chocs, la tenue en température et la stabilité dimensionnelle.

I.19.3. Nano-mousses :

L'une des récentes avancées enregistrées dans ce domaine sont les nano-mousses en polyuréthane, grâce aux quelles les propriétés d'isolation thermique des réfrigérateurs pourront être doublées. Grâce à des mousses de ce type, dont les pores affichent une taille inférieure à 150 nanomètres, la consommation d'énergie de réfrigérateurs serait nettement réduite, ce qui contribuerait de manière significative à la baisse des émissions de dioxyde de carbone. Par ailleurs, les parois des appareils pourraient être moins épaisses, ce qui offrirait un espace de réfrigération plus important.

I.19.4. L'huile de ricin:

Une entreprise brésilienne de produits et équipements chimiques, a proposée l'idée d'utiliser l'huile de ricin comme agent gonflant au lieu du CFC11 pour réaliser une mousse sans CFC. Premier projet qui a contribué à la réduction de l'effet de serre grâce à l'utilisation d'une matière renouvelable avec un potentiel d'absorption de CO₂, la « mamona », le nom local pour le ricin. Le niveau d'absorption de CO₂ de la mamona par hectare est estimé à 34,6 tonnes et la plante à deux cycles de production par an.

I.19.5. L'algue marine:

En Autriche, le Centre d'emballages et l'Institut de technologie des processus, à l'université technique, testent actuellement le « processus alg-isolant » pour l'expansion des mousses. Ce

procédé utilise un matériau pulvérisé produisant de l'air et obtenu à partir d'une algue marine ordinaire, l'alginate de soude, il ne produit pas d'émissions nocives.

I.19.6. L'air sec:

Le meilleur isolant thermique est le vide car l'absence de matière y empêche la propagation de toute agitation moléculaire qui est le moyen par le quel la chaleur se propage. L'air sec et immobile est aussi un bon isolant car il présente 15000 fois plus de résistance au passage de la chaleur qu'un conducteur métallique, cette méthode est aussi utilisée dans la climatisation pour rafraîchir l'air en évitant l'utilisation de machines à froid car l'air sec rend la transpiration corporelle plus efficace et diminue la sensation de chaleur.

I.19.7. Récupération des solvants à base du CFC par un film à fil mince :

Au Japon, on vient de développer une technologie qui permet de séparer et de récupérer la vapeur des solvants chlorés au moyen d'un film composite à fil creux composé d'un mince film de silicone de 0,2 μm d'épaisseur et d'un film de support poreux en nitrile polyacrylique. Ce film ne se dégrade pas, par les solvants chlorés qu'il absorbe sélectivement et permet d'obtenir un taux de récupération des CFC élevé.

I.19.8. Production d'énergies renouvelables et de logistique :

Bayer Material Science travaille à la conception des technologies et des solutions durables, notamment dans le domaine de la production d'énergie provenant de sources renouvelables (telles que l'énergie solaire). La gamme actuelle des innovations s'étend du revêtement en polyuréthane de modèles solaires à système de montage intégré en passant par une structure de panneaux en polycarbonate dotés de cellules solaires.

Un nouveau collecteur solaire pour l'isolation thermique, combine de manière ingénieuse la production d'énergie provenant du rayonnement solaire avec une isolation thermique à haut rendement. Une logistique élaborée permet de réduire nettement la consommation d'énergie ainsi que les émissions de dioxyde de carbone (à effet de serre).

I.19.9. Réfrigérateur solaire à adsorption :

C'est une machine passive fonctionnant uniquement avec l'énergie solaire. Cette machine peut s'apparenter à un réfrigérateur classique ayant comme organes fonctionnels, un évaporateur, un condenseur, et un compartiment isolé, dont le compresseur et le détendeur ont été remplacés par un adsorbant situé dans le capteur solaire. Système totalement autonome la seule énergie utilisée étant l'énergie solaire, le fluide frigorigène utilisé est l'eau. De plus, l'utilisation du couple silicagel-eau rend ces systèmes à adsorption sans aucun danger pour les utilisateurs et pour l'environnement. L'eau présente également l'avantage de servir à la fois de fluide frigorigène et de moyen de stockage de l'énergie. Une autre caractéristique importante de ce système est son cycle, fermé et intermittent qui s'accomplit en 24 heures. L'adsorption est la réaction produite dans l'adsorbant solaire entre l'adsorbant (le silicagel) et le fluide frigorigène (l'eau) appelé adsorbat. Cette réaction de physi-sorption, exothermique, est caractérisée par la fixation des molécules d'adsorbat à la surface de l'adsorbant. L'intermittence du cycle de production de froid du réfrigérateur solaire, est synchronisée avec celle de la source énergétique solaire :

La journée, le chauffage de l'adsorbant par le soleil produit la réaction endothermique de désorption. A ce moment-là, la pression augmente et les vapeurs d'eau chassées du silicagel se condensent.

La nuit le refroidissement de l'adsorbant fait chuter la pression et engendre la réadsorption par le silicagel sec (adsorbant) de l'eau (adsorbat) condensée durant la journée. L'eau est évaporée de l'évaporateur.

I.20. Conclusion :

Le CFC est un gaz très stable voire inerte, il assure une meilleure isolation thermique que tout isolant, mais comme il représente une véritable menace pour l'environnement (substance appauvrissant la couche d'ozone), plusieurs réglementations comme les protocoles de Montréal et de Kyoto ont interdit définitivement son utilisation comme agent gonflant de mousse d'isolation thermique ce qui a conduit à le remplacer par un autre agent gonflant plus respectueux à l'environnement comme le cyclopentane que nous allons étudier dans les prochains chapitres.

Chapitre II

Agent gonflant : le cyclopentane**Aspects chimiques****II.1. Introduction :**

La mousse polyuréthane rigide est la plus utilisée dans le domaine de l'isolation thermique, vue sa faible conductivité thermique, due aux bulles de gaz piégés à l'intérieur des cellules fermées de la mousse, car l'agent gonflant ou l'agent de soufflage (cyclopentane), produit des bulles de gaz qui restent en suspension dans le tensioactif siliconé, ces bulles de gaz piégées dans le polymère le rendent trente fois plus volumineux que son volume initial. Ce processus produit un polymère très solide.

Mais le risque de perdre cette caractéristique ou sa diminution par rapport à l'état initial (quand il n'y a pas d'air dans les alvéoles, seulement l'agent gonflant) est aussi possible, car l'air extérieur finit éventuellement par s'infiltrer par diffusion dans la mousse et l'agent gonflant se diffuse vers l'extérieur, ce qui change le mélange de gaz dans les alvéoles. Cela cause non seulement une perte d'efficacité thermique, mais aussi un gonflement ou un rétrécissement de la mousse en raison des changements de pression de gaz dans les alvéoles de la mousse.

L'agent gonflant utilisé dans la fabrication de mousse isolante est le cyclopentane, que l'on trouve dans de nombreux appareils électroménagers tels que les réfrigérateurs et les congélateurs, utilisé dans presque toutes les entreprises spécialisées dans ce domaine (cas de L'entreprise National d'Industries et de l'Électroménagers, ENIEM), en remplacement écologique du CFC-11 qui est éliminé à cause de son effet destructif sur la couche d'ozone mais la question qui se pose maintenant (après l'élimination du CFC11) est : est ce que le cyclopentane est plus performant que le CFC11 et comment assurée une meilleure isolation thermique pour nos appareils réfrigérants moussés avec une mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane? C'est ce que nous allons voir dans notre projet de fin d'études ci présent.

II.2. Définition : [11]

Le cyclopentane a un autre nom le pentaméthylène, c'est un alicyclique hydrocarbure avec la formule chimique (C_5H_{10}), qui a la forme d'un anneau constitué de cinq atomes de carbones, chacune d'entre elle est lié avec deux atomes d'hydrogènes, comme le montre la figure II.20. Le cyclopentane est un liquide pétrolier. il se présente en un liquide incolore avec une odeur essence, sa masse moléculaire est $70.1g \cdot mol^{-1}$, son point de fusion est ($-94^\circ C$) et son point d'ébullition est de $49^\circ C$, il est dans la classe des cycloalcanes. Le cyclopentane ainsi que le n-pentane et l'isopentane sont des liquides facilement combustibles, dont les vapeurs forment des mélanges explosifs avec l'air et c'est un produit qui a un point d'éclair en dessous de $100^\circ F$.

L'utilisation de l'agent gonflant « cyclopentane », ainsi que la plupart des liquides d'hydrocarbures qui sont inflammables et combustibles demande une connaissance et une sensibilisation accrue des risques encourus, l'équipement adéquat, et des procédures pour minimiser les risques.

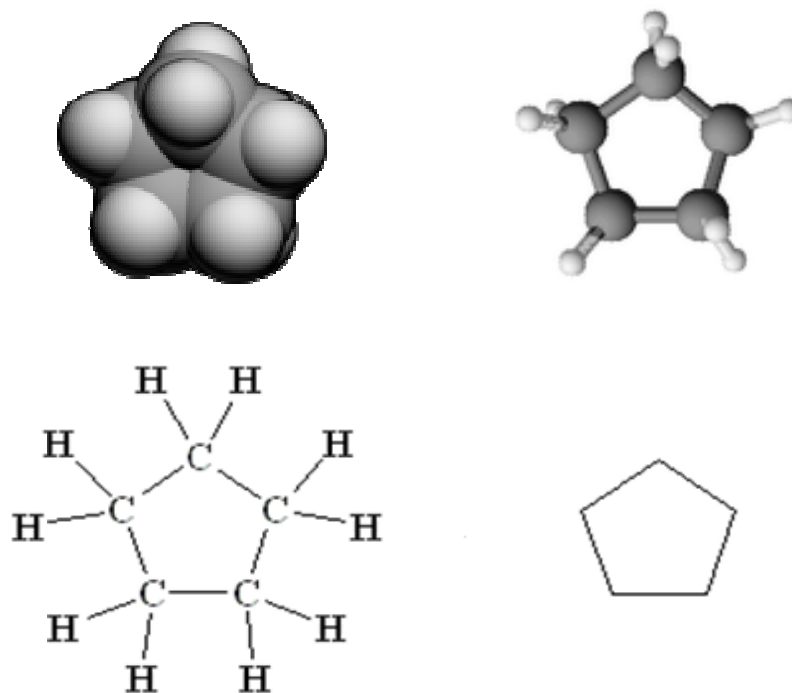


Figure II.20. La formule chimique du cyclopentane

II.3. Caractéristiques du cyclopentane :[11]

Dans la famille des pentanes on trouve le cyclopentane (C_5H_{10}), le n-pentane (C_5H_{12}) et l'iso-pentane (C_5H_{12}) et leurs caractéristiques diffèrent légèrement l'une par rapport à l'autre par exemple comme dans certains cas on préfère le n-pentane que le cyclopentane pour le cas de la mousse PUR rigide destinée au secteur du bâtiment. Toutefois, le n pentane est peu soluble dans les composants de la réaction et sa vapeur à une conductivité thermique plus élevée. Parmi les caractères les plus importants que la famille des pentanes (cyclopentane, iso-pentane et n-pentane) a en commun on va citer :

- 1) Le caractère le plus avantageux à l'environnement est leur PRG presque négligeable (potentiel de réchauffement global dans 100 ans est inférieur à 25) ;
- 2) Performance thermique ;
- 3) Instabilité car lorsque ce produit est chauffé jusqu'à sa décomposition, il émet des gaz toxiques de dioxyde de carbone et de monoxyde de carbone ;
- 4) Incompatibilité avec les agents oxydants forts ; Caoutchoucs (naturel ou butyle) ; Polystyrène ;
- 5) Compatibilité avec Les matériaux plastiques (Polyéthylène ; Polypropylène ; Polyester) et les métaux (Acier inoxydable, acier ordinaire ou au carbone) ;
- 6) Stabilité dimensionnelle ;
- 7) Inflammabilité car il peut s'enflammer s'il est exposé à une source d'ignition ;
- 8) explosibilité sachant que les mélanges air/vapeur sont explosifs ;
- 9) Aspect physique ou l'apparence transparente, c'est un liquide incolore à odeur de gazoline.

II.4. Propriétés physiques et chimiques des cyclopentanes :

Les principales propriétés physique et chimique du cyclopentane sont les suivantes :

Formule moléculaire	C_5H_{10}
Masse molaire	$70,1329 \pm 0,0047 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$
Masse volumique	$0,8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$
Pourcentage du carbone et d'hydrogène	(C) 85,63 %, (H) 14,37 %
Densité à 20°C	0,7457 g/ml
Solubilité dans l'eau	Insoluble
Acidité, pK_a	~ 45
Tension de vapeur à 20°C	34297,08 Pa
Densité relative (eau = 1)	0,8
Densité de vapeur relative (air = 1)	2,4
Densité relative du mélange air/vapeur à 20°C (air = 1)	1,6
Température d'ébullition	49,26 °C
Température de fusion	-93,88 °C
Apparence	liquide incolore
Température d'auto-inflammation	361 °C
Limites d'explosivité en volume % dans l'air	1,1- 8,7 % vol
Ecotoxicologie log P	3,0
Susceptibilité magnétique χ_M	$59,2 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$
Coefficient de partage (eau/huile)	0,001
Concentration à saturation	338 486,8421 ppm
Facteur de conversion (ppm \rightarrow mg/m ³)	2,869

Tableau 10: Propriétés physiques et chimiques du cyclopentane.

II.5. Manipulation et stockage des cyclopentanes : [10], [12], [13]

L'utilisation du cyclopentane comme agent gonflant exige de prendre certaines précautions de sécurité, les plus importantes d'entre elles sont :

- 1) Soumis à l'étiquetage obligatoire (produits dangereux) ;
- 2) Les substances et les vapeurs en concentrations élevées sont irritantes pour les yeux et les voies respiratoires, donc il faut porter un appareil de protection des yeux et éviter tout contact avec la peau et travailler dans un lieu bien ventilé ;
- 3) Les produits doivent être stockés dans un lieu sec, bien aéré, facile d'accès, à l'abri des rayons du soleil, à l'écart de toute source d'ignition et à l'abri des matières oxydantes.
- 4) Tous emballages et canalisations seront mis à la terre pour décharger l'électricité statique.
- 5) savoir avec quel produit il est compatible ou non ;
- 6) Des détecteurs de fuites seront placés aux points bas des lieux d'utilisation et seront reliés à une alarme sonore qui sera déclenchée en cas de fuite.
- 7) Utiliser un outillage ne produisant pas d'étincelles ;
- 8) Ne jamais utiliser le produit sans avoir consulté la fiche de données de sécurité (F.D.S).

II.6. Comparaison des agents gonflants - CFC et cyclopentane:

Pour mieux manipuler les CFC et les cyclopentanes, on doit savoir le maximum sur leurs propriétés physiques et chimiques et pour cela on va citer dans le tableau suivant certaines valeurs des propriétés les plus importantes, ce qui pourra nous servir à faire apparaître d'une manière très exacte (en chiffre) la différence entre les propriétés des CFC et celles des cyclopentanes, afin de pouvoir faire une comparaison entre eux et selon le tableau ci-dessous nous remarquons que :

- 1) Les masses molaires des CFC sont plus grande que celles des cyclopentanes;
- 2) Les Points d'ébullition des cyclopentanes sont beaucoup plus élevée que celles des CFC ;
- 3) Les conductivités thermiques des cyclopentanes sont plus élevées que celles des CFC (ce qui est le sujet de notre recherche);
- 4) Les limites d'inflammation dans l'air des cyclopentanes sont très élevée par contrairement à certains CFC qui sont non inflammable dans l'air;
- 5) Les durées de vie dans l'air des CFC est beaucoup plus longue que celle des cyclopentanes;
- 6) Les valeurs des ODP peut atteindre sa valeur maximale (1,0) pour certain CFC tandis qu'elle s'annule pour les cyclopentanes;
- 7) Les valeurs de GWP sont très élevées vue qu'elle tend vers la valeur maximale (1,0) pour les CFC tandis qu'elle tend vers le minimum (presque nulle) pour les cyclopentanes.

produits	CFC 11	HCFC 22	HCFC 123	HCFC 141b	HCFC 142b	HFC 32	HFC 125	HFC 134a	HFC 152a	n- pentae	Iso- pentane	Cyclo- pentane
Formule chimique	CFCl ₃	CHClF ₂	CHCl ₂ CF ₃	CH ₃ Cl ₂ F	CH ₃ CClF ₃	CH ₂ F ₂	CHF ₂ CF ₃	CH ₂ FCF ₃	CH ₃ CHF ₂	C ₅ H ₁₂	C ₅ H ₁₂	C ₅ H ₁₀
Masse molaire	137	86	153	117	100	52	120	102	66	72	72	70
Point d'ébullition (°C)	24	-41	28	32	-10	-52	-49	-27	-25	36	28	50
Conductivité mw/mk*°C	7.4	9.9	8,0	8.8	8.4	11	14	12.4	14	14	13	11
limite inflammation dans l'air (vol. %)	non	non	non	7.3 - 16.0	6.7 - 14.9	13.6 - 32.2	non	non	3.6 - 16.9	1.3 - 7.6	1.4 - 7.8	1.4 - 8.0
Sa durée de vie dans l'air (années)	60	15.3	1.6	11.7	22.2	n/a	43	15.9	1.9	n/a	n/a	n/a
ODP	1,0	0.055	0.02	0.11	0.065	0	0	0	0	0	0	0
GWP	1,0	0.36	0.02	0.12	0.42	0.15	0.84	0.25	0.03	<0.01	< 0.01	< 0.02

Tableau 11 : Propriétés physiques et chimiques des CFC et des cyclopentanes

La comparaison globale des agents gonflant : le cyclopentane et le CFC est résumée dans le tableau suivant :

Cyclopentane	CFC
N'endommage pas la couche d'ozone	L'effet d'appauvrissement de la couche d'ozone très élevé
Faible inertie chimique	Très bonne inertie chimique
Inflammable	Ininflammable
Caractère non-toxique	Un moindre degré de toxicité
Résistance thermique inférieure	Résistance thermique très élevée
Combustible	Non combustible
Conductivité thermique plus élevée	Une faible conductivité thermique
Plus chère	Faible prix
Le temps de moussage plus long	Le temps de moussage plus court
Température d'ébullition plus élevée	une basse température d'ébullition
PRG négligeable	PRG très élevés
ODP nul	ODP maximum
Sa durée de vie dans l'air est courte	Sa durée de vie dans l'air est très longue
Les impératifs de sécurité beaucoup plus sévères (inflammable)	Les impératifs de sécurité peuvent être moins sévères (ininflammable)

Tableau 12 : Comparaison des propriétés des agents gonflant : Cyclopentane et CFC

II.7. Conclusion :

La mousse polyuréthane rigide (PUR), utilisée pour l'isolation thermique des réfrigérateurs à l'ENIEM, avec comme agent gonflant « le cyclopentane », possède des propriétés physique et chimique qui lui permet d'assurer une bonne résistance thermique, mais qui reste encore discutable par rapport à celle d'une mousse polyuréthane rigide, ayant comme agent gonflant le CFC, et c'est ce que nous allons étudier dans ce travail en donnant des solutions et des propositions pratiques à fin d'améliorer la performance de la mousse isolante à base du cyclopentane.

Chapitre III

Influence des paramètres de moussage sur la densité

Caractérisation Physique

III.1. Introduction :

Dans cette partie on étudie la variation de la densité en fonction des paramètres de moussage tel que :

- La pression d'injection.
- La température des moules.
- Le temps de démoulage.
- La masse injectée.
- Le temps d'injection.

Ces paramètres de moussage ont une grande influence sur la densité de la mousse polyuréthane rigide. En effet, plus la densité est importante plus la conductivité thermique est faible est par conséquent le matériau est isolant donc une bonne résistance thermique.

III.2. Isolation thermique :

Les isolants thermiques sont des matériaux caractérisés par une faible conductivité thermique. Ils sont utilisés pour réduire la circulation de chaleur entre des zones de températures différentes. Les panneaux isolants intégrés aux parois d'un réfrigérateur empêchent la chaleur du milieu extérieur de réchauffer l'intérieur de l'appareil, comme les gaz étant les corps matériels les plus faiblement conducteurs de la chaleur, les panneaux isolants sont donc essentiellement constitués d'une phase gazeuse immobilisée dans une matrice solide poreuse, cette immobilisation ayant pour objet de rendre impossible les phénomènes de convection thermique.

III.3. Le transfert thermique : [10], [14], [16]

Les transferts thermiques par un gaz ou un liquide se fait selon trois modes qui sont :

- 1) Conduction ;
- 2) Convection ;
- 3) Rayonnement.

III.3.1. Conduction thermique :

La conduction est la transmission de la chaleur au sein 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 conductivité thermique, notée λ , est une grandeur physique caractérisant la conduction.

D'un point de vue atomique, la conductivité thermique est liée à deux types de comportements :

- 1) Le mouvement des porteurs de charges qui sont les électrons.
- 2) L'oscillation des atomes autour de leur position d'équilibre.

III.3.2. Convection thermique : [17], [18], [19]

La convection est un mode de transfert qui implique un déplacement de matière dans le milieu. Ce phénomène physique se produit dans de nombreux systèmes (casserole,

atmosphère, manteau terrestre, étoile,...) sous des formes diverses, on distingue deux catégories de convection de chaleur qui sont la convection naturelle et la convection forcée.

a) La convection naturelle :

La convection naturelle est un phénomène, qui se produit lorsqu'une zone change de température et qu'elle se déplace verticalement sous l'effet de la poussée d'Archimède, car le changement de température d'un fluide influe sur sa masse volumique, qui se trouve modifiée par rapport à la masse volumique du fluide environnant.

b) Convection forcée :

La convection forcée est provoquée par une circulation artificielle (pompe, turbine) d'un fluide. Le transfert est plus rapide que dans le cas de convection naturelle.

III.3.3. 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.

❖ Remarque :

Dans le vide, la conduction et la convection n'existent pas, car l'absence de matière y empêche la propagation de toute agitation moléculaire.

III.4. Propriétés physiques et chimiques des isolants:

Les propriétés physiques et chimiques d'un isolant jouent un rôle important dans le choix du matériau car les isolants sont classés en fonction de :

- 1) Faible conductivité thermique ;
- 2) Leur résistance au feu ;
- 3) Résistance à l'humidité ;
- 4) Être chimiquement stable ;
- 5) Non corrosifs ;
- 6) La légèreté pour ne pas surcharger la construction.

III.5. Caractérisation de la mousse polyuréthane à base du cyclopentane :

La mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane, comme tous les matériaux isolants, se caractérise par :

- 1) La densité ;
- 2) La conductivité thermique ;
- 3) La résistance thermique.

III.6. La densité :

La densité « d » d'un corps est le rapport de sa masse volumique à la masse volumique d'un corps pris comme référence, le corps de référence est l'eau pure à 4°C pour les liquides et les solides et dans le cas de gaz ou de vapeur, le corps de référence gazeux est l'air à la même température et sous la même pression.

La densité est une grandeur sans dimension et sa valeur s'exprime sans unité de mesure et son expression est la suivante :

$$d = \frac{\rho_{\text{corps}}}{\rho_{\text{ref}}}$$

d : La densité (sans unité)

ρ_{corps} : La masse volumique du corps (Kg/m^3).

ρ_{ref} : La masse volumique du corps de référence (Kg/m^3).

$\rho_{\text{eau}} = 1000 \text{ Kg/m}^3$.

III.6.1. La densité libre :

C'est la densité « d » de la mousse polyuréthane rigide expansée librement et elle indique si on a une bonne composition chimique ou non.

III.6.2. La densité en panneau :

L'essai doit se faire dans des conditions normales de la salle d'essai, température égale à 20°C plus ou moins 2°C et l'humidité relative est égale à 65% plus ou moins 15% et l'expansion est réalisée dans un moule fermé (voir la figure III.21).

III.6.3. Procédé de production de la mousse libre et en panneau:

a) Mise en œuvre manuelle :

Pour la production des mousses polyuréthane rigide à base du cyclopentane pour les essais en laboratoire on va appliquer une mise en œuvre manuelle, cette méthode désignait initialement le mélange des matières premières avec un agitateur manuel. On utilise aussi ce terme quand les composants introduits dans le récipient sont mélangés avec un agitateur électrique.

Pour obtenir la mousse libre pour les essais en laboratoire, dans un récipient, on introduit le polyol et le cyclopentane, ils sont pesés suivant la quantité souhaitée sur une balance de précision, on fait le mélange à l'aide d'un agitateur et on obtient le mélange (polyol+cyclopentane), ce mélange est appelé « produit R », dans un autre récipient on met l'isocyanate appelé « produit P ». Les produits (R) et (P) sont mélangés à l'aide d'un agitateur tournant à grande vitesse (environ 4000 tours par minutes) et on obtient le produit finale qui s'appelle « mousse polyuréthane rigide » après l'expansion, on l'appelle aussi « la libre » dans le cas où l'expansion est réalisée à l'air libre et « en panneau » si elle est réalisée dans un moule fermé (voir la figure ci-dessous).

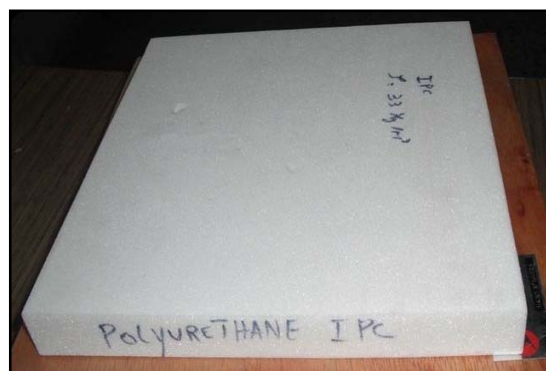


Figure III.21. Panneau en mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane

b) Mise en œuvre automatique :

Sachant que la méthode du mélange manuel ne joue qu'un rôle secondaire dans la production de mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane, c'est généralement à l'aide d'installation plus ou moins complexe qu'on transforme les matières premières en mousse.

Le mélange (polyol+cyclopentane) appelé « R » et l'isocyanate appelé « P » sont injectés dans les moules des réfrigérateurs (voir la figure III.23) par la machine de moussage qui contient principalement deux têtes d'injections par les quelles on injecte les produits R et P dans les moules (voir la figure III .22), qui sont misent à température (49°C) et c'est à partir de ce moment que la mousse commence à s'expansé jusqu'au remplissage de l'espace réservée pour le moussage entre les parois des portes et des armoires des réfrigérateurs et cette opération s'accomplie on respectant des conditions nécessaire pour assurer une bonne mousse (la densité et la conductivité recherchée) qu'on appel les paramètres de moussage (nous allons les déterminés dans ce travail).



Figure III.22. La machine d'injection de la mousse (utilisée à l'ENIEM)

La figure suivante représente les moules utilisés pour le moussage des armoires des réfrigérateurs à la société ENIEM.



Figure III.23. Les moules de réfrigérateurs utilisés à l'ENIEM

► Les étapes de la mise en œuvre automatique:

Avant que les produits R et P arrivent dans des conduites (tuyaux) jusqu'à la tête d'injection et assurent l'opération de moussage des moules des réfrigérateurs (à l'ENIEM), les produits R et P passent par plusieurs étapes qui sont :

a) Dans la salle MPU :

Lorsque les produits sont encore dans la salle MPU (avant le mélange) ils passent par les étapes suivantes :

1. Recevoir de la matière première brute dans des fûts ou des citernes;
2. Mettre les produits isocyanate et le polyol respectivement dans les réservoirs de préparation (voir la figure ci-dessous);
3. Ramener les températures des produits à la température ambiante 20°C plus au moins 2°C ; avec l'agitation permanente du produit dans les réservoirs ;
4. Envoyer directement l'isocyanate vers l'atelier à l'aide d'une pompe (envoi automatique) après l'avoir préparé dans un réservoir ;
5. Recevoir le cyclopentane dans l'écomixer ;
6. Préparer le mélange (polyol + cyclopentane) qu'on appelle le produit R dans l'écomixer ;
7. Stocker le mélange R dans un réservoir ;
8. Envoyer automatiquement le mélange R vers l'atelier.



Figure III.24. Réservoirs des produits R et P dans la salle MPU

b) Dans l'atelier :

Après ces étapes, une fois les produits sont envoyés à l'atelier dans des conduites pour passer à la mise en œuvre et le moussage des réfrigérateurs à l'ENIEM on passe par les étapes suivantes :

1. L'isocyanate qui vient des conduites de la salle MPU sera envoyé directement dans des réservoirs et à l'aide d'une pompe en l'envoie vers la tête d'injection de la mousse ;

2. Le mélange (polyol + cyclopentane) qu'on a appelé le produit R sera envoyé dans un réservoir et à l'aide d'une pompe d'alimentation en l'envoie vers la tête d'injection ;
3. Une fois on a injecté la mousse dans des moules le produit P restant (l'isocyanate) va retourner à l'aide d'une conduite de retour vers le réservoir, la même chose pour le produit R.
4. Tous les réservoirs sont équipés des conduites d'entré d'eau de refroidissement et de leur sortie pour assurer une température de 20°C plus au moins 2°C.

III.6.4. Calcul de la densité en panneau:

On va calculer la densité en panneau pour l'armoire et la porte d'un réfrigérateur.

III.6.4.1. Calcul de la densité en panneau pour l'armoire :

Pour calculer la densité en panneau pour l'armoire d'un réfrigérateur on va procéder tel que suit :

III.6.4.1.1. Prélèvement d'échantillons:

Cet essai consiste à prélever dans chaque partie de l'armoire des morceaux sous forme de parallélépipèdes de dimensions approximatives 15cmx15cmx.

Ainsi, pour évaluer l'homogénéité, on découpe des échantillons à plusieurs endroits tel que : Parois latérales (gauche et droite), face de dessus, face de dessous, panneau arrière (haut, milieu, et dessous).

Puis à l'aide d'un calibre cylindrique, on va découper des éprouvettes homogènes (cylindriques) (voir la figure III.25), puis avec du papier émeri, on va procéder au polissage, afin d'obtenir des surfaces planes.

Puis on va passer à la pesée pour déterminer la masse de chaque éprouvette à l'aide d'une balance électronique au millième de grammes, enfin on va procéder au mesurage du diamètre et de la hauteur de chaque éprouvette à l'aide d'un pied à coulisse pour obtention des volumes.

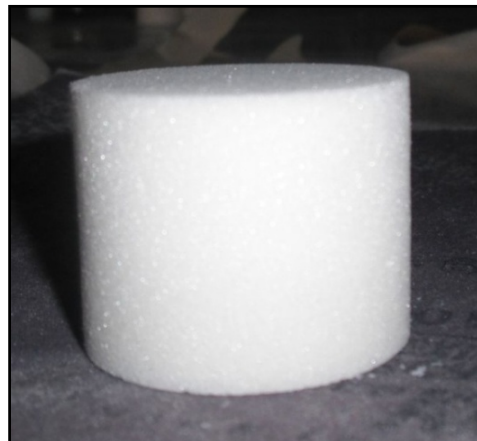


Figure III.25. Éprouvette cylindrique

III.6.4.1.2. Calcul du volume de l'éprouvette cylindrique:

Pour le calcul du volume de l'éprouvette cylindrique on va appliquer la loi suivante :

$$V = \left[\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right] \cdot H$$

Avec :

$$\pi = 3,14$$

D : Diamètre d'un cylindre en cm.

H : Hauteur d'un cylindre en cm.

V : Volume en cm^3 .

III.6.4.1.3. Calcul de la masse des trois composants de la mousse :

On calcule la masse des trois composants de la mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane (polyol, cyclopentane et l'isocyanate) dans 5.900 kg de mousse, la recette utilisée pour l'obtention de cette mousse est donnée dans le tableau suivant :

Produit	Masse en partie poids (pp)
Polyol	100 pp
Cyclopentane	12 pp
Isocyanate	133 pp

Tableau 13: Recette de la mousse polyuréthane rigide (PUR)

La masse totale des produits = $100 + 12 + 133 = 245\text{pp}$

Le rapport : $A/p = (100+12) / 133 = 0.84$

La densité en panneau exigée est : $[33 \cdot 10^{-3} - 35 \cdot 10^{-3}]$

La masse injectée est : 5.9 kg pour l'armoire

- 1) Calcul de la masse du polyol :** on calcule la masse du polyol en (kg) que contient 5,9 kg de mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane d'une densité qui appartient à l'intervalle exigée, qui est $[33 \cdot 10^{-3} - 35 \cdot 10^{-3}]$, en appliquant la règle de trois, on aura :

$$\begin{array}{l} 245 \text{ pp} \longrightarrow 5.9 \text{ kg} \\ 100 \text{ pp} \longrightarrow X \text{ kg} \end{array}$$

$$X \text{ (kg)} = (5,9 \cdot 100) / 245 = 2,4081 \text{ kg}$$

La masse du polyol est : 2,4081 kg.

2) Calcul de la masse du cyclopentane : La masse du cyclopentane contenant dans 5,9 kg de mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane est :

$$\begin{array}{l} 245 \text{ pp} \longrightarrow 5,9 \text{ kg} \\ 12 \text{ pp} \longrightarrow X \text{ kg} \end{array}$$

$$X \text{ (kg)} = (5,9 \cdot 12) / 245 = 0,2889 \text{ kg}$$

La masse du cyclopentane est : 0,2889 kg.

3) Calcul de la masse d'isocyanate : La masse d'isocyanate contenant dans 5,9 kg de mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane est :

$$\begin{array}{l} 245 \text{ pp} \longrightarrow 5,9 \text{ kg} \\ 133 \text{ pp} \longrightarrow X \text{ kg} \end{array}$$

$$X \text{ (kg)} = (5,9 \cdot 133) / 245 = 3,2028 \text{ kg}$$

La masse d'isocyanate est : 3,2028 kg.

Donc la masse des produits en kg contenant dans 5,9 kg de mousse polyuréthane rigide sont :

Produit	Masse en kg
Polyol	2.0481 Kg
Cyclopentane	0.2889 Kg
Isocyanate	3.2028 Kg

Tableau 14 : Masse des trois composants de la mousse PUR

III.6.4.1.4. Méthode de Calcul de la densité en panneau pour l'armoire :

On calcule la densité pour chaque partie de l'armoire du réfrigérateur c'est-à-dire : on calcule les densités des parties suivantes : face de dessus, face de dessous, face latérale droite, face latérale gauche, panneau arrière ; puis on calcule la densité moyenne selon les lois suivantes :

$$\rho_{moyenne} = \frac{\rho_{dessus} + \rho_{dessous} + \rho_{latérale\ d} + \rho_{latérale\ g} + \rho_{arrière}}{5}$$

Sachant que :

$$d_{moyenne} = \rho_{moyenne} \cdot 10^{-3}$$

Tel que :

$d_{moyenne}$: Densité moyenne de l'armoire du réfrigérateur.

$\rho_{moyenne}$: Masse volumique moyenne de l'armoire du réfrigérateur.

ρ_{dessus} : Masse volumique de la face de dessus de l'armoire du réfrigérateur.

$\rho_{dessous}$: Masse volumique de la face de dessous de l'armoire du réfrigérateur.

$\rho_{latérale\ d}$: Masse volumique de la face latérale droite de l'armoire du réfrigérateur.

$\rho_{latérale\ g}$: Masse volumique de la face latérale gauche de l'armoire du réfrigérateur.

La densité est sans unité.

L'unité de la masse volumique est en kg/m^3 .

Sachant que la masse volumique (ρ) est le rapport de la masse (M) de l'éprouvette cylindrique sur son volume (V), la loi est la suivante :

$$\rho = M / V$$

III.6.4.1.4.1. Expérience 1:

Pour le calcul de la densité en panneau pour l'armoire d'un réfrigérateur grand modèle avec une porte, on va procéder, en appliquant toute les étapes et les lois de calcul des volumes des éprouvettes, des masses volumiques, citées précédemment afin de pouvoir calculer la densité en panneau pour l'armoire d'un réfrigérateur.

III.6.4.1.4.2. Résultats de l'expérience 1:

Les résultats trouvés sont présentés dans les tableaux suivants :

1) Face de dessus :

Essais	Masse en kg	Hauteur en m	Masse volumique en kg/m^3
1	$1,39 \cdot 10^{-3}$	$2,14 \cdot 10^{-2}$	33,91
2	$1,77 \cdot 10^{-3}$	$2,62 \cdot 10^{-2}$	35,27
3	$0,95 \cdot 10^{-3}$	$1,43 \cdot 10^{-2}$	34,83

Tableau 15: Valeurs des masses et des masses volumiques des éprouvettes cylindriques

$$\rho_{moyenne} = 34,67 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$d_{moyenne} = 34,67 \cdot 10^{-3}$$

2) Paroi latérale droite :**a) Paroi latérale supérieure droite :**

Essais	Masse en kg	Hauteur en m	Masse volumique en kg/m^3
1	$1,67 \cdot 10^{-3}$	$2,62 \cdot 10^{-2}$	33,42
2	$1,07 \cdot 10^{-3}$	$1,65 \cdot 10^{-2}$	33,86
3	$1,29 \cdot 10^{-3}$	$1,97 \cdot 10^{-2}$	33,66

Tableau 16: Valeurs des masses et des masses volumiques des éprouvettes cylindriques

$$\rho_{moyenne} = 33,64 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$d_{moyenne} = 33,64 \cdot 10^{-3}$$

b) Paroi latérale milieu droite :

Essais	Masse en kg	Hauteur en m	Masse volumique en kg/m^3
1	$1,18 \cdot 10^{-3}$	$1,78 \cdot 10^{-2}$	34,61
2	$1,37 \cdot 10^{-3}$	$2,11 \cdot 10^{-2}$	33,90
3	$1,20 \cdot 10^{-3}$	$1,85 \cdot 10^{-2}$	34,01

Tableau 17: Valeurs des masses et des masses volumiques des éprouvettes cylindriques

$$\rho_{moyenne} = 34,17 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$d_{moyenne} = 34,17 \cdot 10^{-3}$$

c) Paroi latérale inférieure droite :

Essais	Masse en kg	Hauteur en m	Masse volumique en kg/m^3
1	$1,26 \cdot 10^{-3}$	$1,85 \cdot 10^{-2}$	35,56
2	$1,25 \cdot 10^{-3}$	$1,89 \cdot 10^{-2}$	34,13
3	$0,96 \cdot 10^{-3}$	$1,42 \cdot 10^{-2}$	35,30

Tableau 18: Valeurs des masses et des masses volumiques des éprouvettes cylindriques

$$\rho_{moyenne} = 34,99 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$d_{moyenne} = 34,99 \cdot 10^{-3}$$

3) Paroi latérale gauche :

a) Paroi latérale supérieure gauche :

Essais	Masse en kg	Hauteur en m	Masse volumique en kg/m^3
1	$1,91 \cdot 10^{-3}$	$2,84 \cdot 10^{-2}$	35,11
2	$2,62 \cdot 10^{-3}$	$3,86 \cdot 10^{-2}$	35,44
3	$1,97 \cdot 10^{-3}$	$2,85 \cdot 10^{-2}$	36,09

Tableau 19: Valeurs des masses et des masses volumiques des éprouvettes cylindriques

$$\rho_{moyenne} = 35,46 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$d_{moyenne} = 35,46 \cdot 10^{-3}$$

b) Paroi latérale milieu gauche :

Essais	Masse en kg	Hauteur en m	Masse volumique en kg/m^3
1	$2,84 \cdot 10^{-3}$	$4,33 \cdot 10^{-2}$	34,25
2	$2,62 \cdot 10^{-3}$	$3,86 \cdot 10^{-2}$	35,44
3	$2,77 \cdot 10^{-3}$	$4,21 \cdot 10^{-2}$	34,35

Tableau 20: Valeurs des masses et des masses volumiques des éprouvettes cylindriques

$$\rho_{moyenne} = 34,68 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$d_{moyenne} = 34,68 \cdot 10^{-3}$$

c) Paroi latérale inférieure gauche :

Essais	Masse en kg	Hauteur en m	Masse volumique en kg/m^3
1	$1,39 \cdot 10^{-3}$	$2,15 \cdot 10^{-2}$	33,76
2	$1,45 \cdot 10^{-3}$	$2,26 \cdot 10^{-2}$	33,50
3	$1,70 \cdot 10^{-3}$	$2,59 \cdot 10^{-2}$	34,27

Tableau 21: Valeurs des masses et des masses volumiques des éprouvettes cylindriques

$$\rho_{moyenne} = 33,84 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$d_{moyenne} = 33,84 \cdot 10^{-3}$$

4) Face de dessous :

Essais	Masse en kg	Hauteur en m	Masse volumique en kg/m^3
1	$2,35 \cdot 10^{-3}$	$3,62 \cdot 10^{-2}$	34,04
2	$1,21 \cdot 10^{-3}$	$1,82 \cdot 10^{-2}$	34,71
3	$1,42 \cdot 10^{-3}$	$2,16 \cdot 10^{-2}$	34,32

Tableau 22: Valeurs des masses et des masses volumiques des éprouvettes cylindriques

$$\rho_{moyenne} = 34,35 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$d_{moyenne} = 34,35 \cdot 10^{-3}$$

5) Panneau arrière :**a) Panneau arrière supérieure :**

Essais	Masse en kg	Hauteur en m	Masse volumique en kg/m^3
1	$2,96 \cdot 10^{-3}$	$4,05 \cdot 10^{-2}$	34,68
2	$2,20 \cdot 10^{-3}$	$3,35 \cdot 10^{-2}$	34,29
3	$2,78 \cdot 10^{-3}$	$4,23 \cdot 10^{-2}$	34,31

Tableau 23: Valeurs des masses et des masses volumiques des éprouvettes cylindriques

$$\rho_{moyenne} = 34,42 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$d_{moyenne} = 34,42 \cdot 10^{-3}$$

b) Panneau arrière milieu :

Essais	Masse en kg	Hauteur en m	Masse volumique en kg/m^3
1	$2,31 \cdot 10^{-3}$	$3,65 \cdot 10^{-2}$	33,04
2	$2,04 \cdot 10^{-3}$	$3,14 \cdot 10^{-2}$	33,92
3	$2,44 \cdot 10^{-3}$	$3,74 \cdot 10^{-2}$	34,06

Tableau 24: Valeurs des masses et des masses volumiques des éprouvettes cylindriques

$$\rho_{moyenne} = 33,67 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$d_{moyenne} = 33,67 \cdot 10^{-3}$$

c) Panneau arrière inférieure :

Essais	Masse en kg	Hauteur en m	Masse volumique en kg/m^3
1	$2,47 \cdot 10^{-3}$	$3,82 \cdot 10^{-2}$	33,76
2	$2,21 \cdot 10^{-3}$	$3,37 \cdot 10^{-2}$	34,24
3	$2,77 \cdot 10^{-3}$	$4,21 \cdot 10^{-2}$	34,35

Tableau 25: Valeurs des masses et des masses volumiques des éprouvettes cylindriques

$$\rho_{moyenne} = 34,11 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$d_{moyenne} = 34,11 \cdot 10^{-3}$$

III.6.4.1.4.3. Conclusion 1:

Sachant que la valeur de la densité en panneau exigée pour l'armoire du réfrigérateur doit être incluse dans l'intervalle $[33 \cdot 10^{-3} - 35 \cdot 10^{-3}]$ et comme les valeurs trouvées appartiennent à cette intervalle donc la composition chimique de la mousse polyuréthane rigide utilisée pour le moutage des armoires des réfrigérateurs est bonne.

III.6.4.2. Calcul de densité en panneaux pour la porte d'un réfrigérateur:

Pour le calcul de la densité en panneau de la porte d'un réfrigérateur, on doit passer par toutes les étapes citées dans le cas de l'armoire, mais en appliquant la loi de calcul de la densité en panneau pour la porte du réfrigérateur.

III.6.4.2.1. Méthode de calcul de la densité en panneau pour la porte :

On calcule la densité pour chaque partie de la porte du réfrigérateur c'est-à-dire : on calcule les densités des trois parties de la porte qui sont : partie supérieure, partie du milieu et la partie inférieure ; puis on calcule la densité moyenne selon les lois suivantes :

$$\rho_{moyenne} = \frac{\rho_{sup} + \rho_{milieu} + \rho_{inf}}{3}$$

Sachant que :

$$d_{moyenne} = \rho_{moyenne} \cdot 10^{-3}$$

Tel que :

ρ_{sup} : La masse volumique de la partie supérieure de la porte du réfrigérateur.

ρ_{milieu} : La masse volumique de la partie milieu.

ρ_{inf} : La masse volumique de la partie inférieure.

III.6.4.2.1.1. Expérience 2:

Pour le calcul de la densité en panneaux pour la porte d'un réfrigérateur grand modèle avec une porte, on va procéder tel que suit :

Après avoir prélevé trois échantillons (éprouvettes cylindriques) et mesurer leurs masses et leurs hauteurs afin de calculer leurs volumes ainsi que leurs masses volumiques, on va appliquer la loi de calcul de la densité en panneau pour la porte du réfrigérateur.

III.6.4.2.1.2. Résultat de l'expérience 2:

Les résultats obtenus sont les suivants :

Essais	Masse en kg	Hauteur en m	Masse volumique en kg/m^3
1	$3,02 \cdot 10^{-3}$	$4,56 \cdot 10^{-2}$	34,58
2	$2,60 \cdot 10^{-3}$	$4,05 \cdot 10^{-2}$	33,35
3	$2,84 \cdot 10^{-3}$	$4,33 \cdot 10^{-2}$	34,25

Tableau 26: Valeurs des masses et des masses volumiques des éprouvettes cylindriques

$$\rho_{moyenne} = 34,06 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$d_{moyenne} = 34,06 \cdot 10^{-3}$$

Avec :

Diamètre de l'éprouvette cylindrique est : $D = 4.93\text{cm}$

Le volume de l'éprouvette est : $V = (\pi d^2/4) h$

La densité en panneau exigée est : $[33 \cdot 10^{-3} - 35 \cdot 10^{-3}]$

III.6.4.2.1.3. Conclusion 2:

Comme la valeur de la densité en panneau, pour la porte du réfrigérateur (réfrigérateur grand modèle avec une porte), trouvée appartient à l'intervalle exigée qui est $[33 \cdot 10^{-3} - 35 \cdot 10^{-3}]$ donc la composition chimique de la mousse polyuréthane rigide utilisée pour le moussage des portes des réfrigérateurs est bonne.

III.6.5. Calcul de densité libre pour l'armoire et la porte du réfrigérateur :

On calcule la densité libre pour l'armoire et la porte d'un réfrigérateur en appliquant les lois de calculs de densité et de la masse volumique.

III.6.5.1. Calcul de la densité libre pour l'armoire d'un réfrigérateur :

Pour calculer la densité en panneau pour l'armoire d'un réfrigérateur (grand modèle avec une porte) on va procéder tel que suit :

III.6.5.1.1. Expérience 3:

On injecte dans un sachet spécial, la mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane, et on laisse cette dernière s'expansée librement, après 1 heures, on calcul la densité libre On prend trois échantillons (éprouvettes cylindriques) de la libre à l'aide d'un calibre cylindrique, l'opération s'appelle « le carottage ».

III.6.5.1.2. Résultats de l'expérience 3:

En effectuant des mesures de la masse et de la hauteur pour chaque échantillon (éprouvette cylindrique) afin de pouvoir appliquer la loi de calcul de la densité, on aura les résultats cités dans le tableau suivant :

Essais	Masse en kg	Hauteur en m	Masse volumique en kg/m^3
1	$1,81 \cdot 10^{-3}$	$3,79 \cdot 10^{-2}$	24,93
2	$1,78 \cdot 10^{-3}$	$3,68 \cdot 10^{-2}$	25,25
3	$1,48 \cdot 10^{-3}$	$3,15 \cdot 10^{-2}$	24,63

Tableau 27: Valeurs des masses et des masses volumiques des éprouvettes cylindriques

$$\rho_{\text{moyenne}} = 24,93 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$d_{\text{moyenne}} = 24,93 \cdot 10^{-3}$$

III.6.5.1.3. Conclusion 3:

Sachant que la valeur de la densité libre exigée pour l'armoire du réfrigérateur doit être incluse dans l'intervalle $[23 \cdot 10^{-3} - 25 \cdot 10^{-3}]$ et comme les valeurs trouvées appartiennent à cet intervalle donc la composition chimique de la mousse polyuréthane rigide utilisée pour le moulage des armoires des réfrigérateurs est bonne.

III.6.5.2. Calcul de la densité libre pour la porte d'un réfrigérateur :

Pour calculer la densité en panneau pour la porte d'un réfrigérateur on va procéder tel que suit :

III.6.5.2.1. Expérience 4:

On prend trois échantillons d'une mousse libre après l'opération de carottage, et en appliquant les mêmes méthodes que celles utilisées pour le calcul de la densité libre de l'armoire du réfrigérateur, on va calculer la densité libre de la porte.

III.6.5.2.2. Résultats de l'expérience 4:

Après avoir effectué les mesures de hauteurs avec le pied à coulisse et les mesures de masses à l'aide de la balance de précision des échantillons, les résultats sont représentés dans le tableau suivant :

Essais	Masse en kg	Hauteur en m	Masse volumique en kg/m ³
1	2,00.10 ⁻³	4,19.10 ⁻²	24, 92
2	2,02.10 ⁻³	4,20.10 ⁻²	25, 11
3	1, 76.10 ⁻³	3,62.10 ⁻²	25, 38

Tableau 28: Valeurs des masses et des masses volumiques des éprouvettes cylindriques

$$\rho_{moyenne} = 25,13 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$d_{moyenne} = 25,13 \cdot 10^{-3}$$

III.6.5.2.3. Conclusion 4:

La valeur de la densité libre trouvée, pour la porte du réfrigérateur, est incluse dans l'intervalle exigée qui est [23.10⁻³- 25.10⁻³], donc la composition chimique de la mousse polyuréthane rigide utilisée pour le moussage des portes des réfrigérateurs est bonne.

III.7. Influence des paramètres de moussage sur la densité en panneau :

Afin de comprendre la cause de la défaillance de la mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane par rapport à la mousse utilisée auparavant à l'ENIEM qui est la mousse polyuréthane rigide à base du CFC (étudier en détaille dans le chapitre I), et pouvoir l'améliorer, nous allons étudier la variation de la densité ainsi que la conductivité thermique en fonction des paramètres influant afin de pouvoir extraire les valeurs exactes de ces paramètres de moussage qui assurent la meilleure isolation thermique et parmi ces paramètres nous avons :

III.7.1. Influence du temps de démoulage sur la densité en panneau:

On va étudier l'influence de l'un des paramètres les plus indispensables pour avoir la densité exigée et réussir l'opération du moussage en assurant une bonne isolation thermique pour les réfrigérateurs.

III.7.1.1. Expérience 1:

On a calculé les densités en panneaux pour l'armoire d'un réfrigérateur grand modèle avec une porte en changeant le temps de démoulage sachant que le temps de séjours de la mousse dans le moule exigé est 8 minutes pour l'armoire et la valeur de référence de la densité est l'intervalle [33.10⁻³- 35.10⁻³].

III.7.1.1.1. Résultats de l'expérience 1:

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau suivant :

Essais	Le temps de démoulage (mn)	Densité en panneau
1	6mn 00s	0,03109
2	6mn 30s	0,03132
3	7mn 00s	0,03251
4	7 mn 30s	0,03340
5	8mn 30s	0,03400
6	8mn 00s	0,03400
7	9mn 00s	0,03400
8	9mn 30s	0,03400

Tableau 29: Variation de la densité en panneau en fonction du temps de démoulage pour l'armoire du réfrigérateur

La courbe de variation de la densité en fonction du temps de démoulage est la suivante :

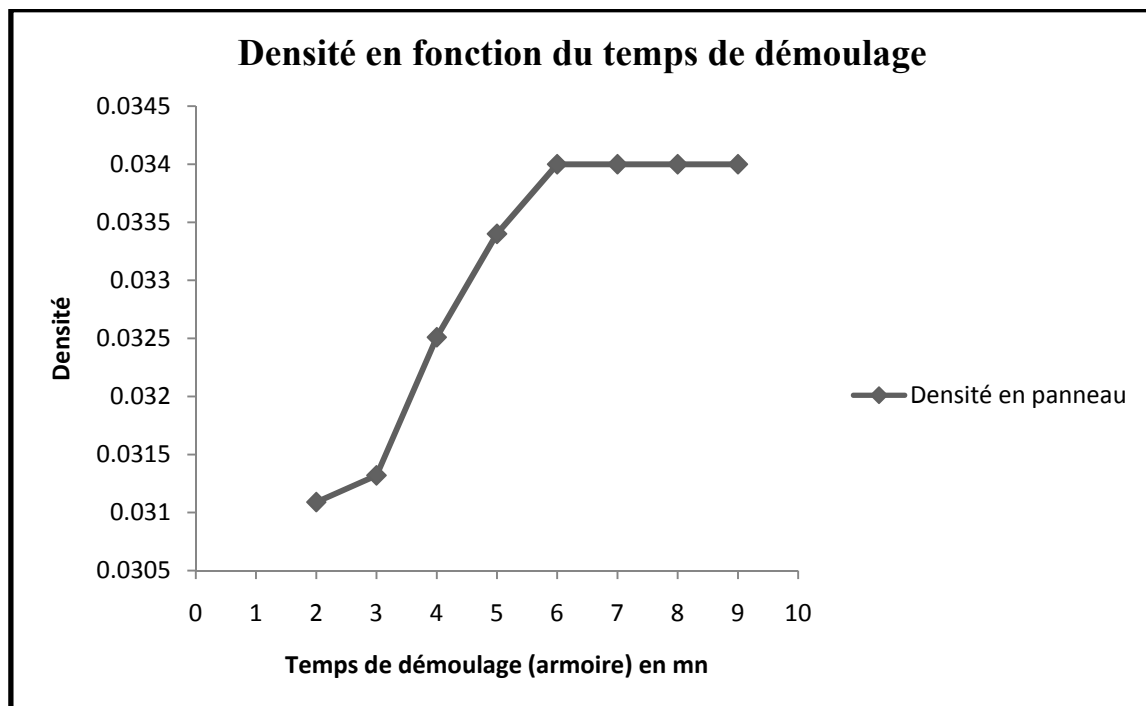


Diagramme III.1. Influence du temps de démoulage sur la densité en panneau pour l'armoire d'un réfrigérateur

III.7.1.1.2. Analyse des résultats de l'expérience 1:

On remarque qu'au bout de 8 minutes, la réaction sera achevée, donc on aura une bonne isolation thermique. Moins de 8min, la réaction n'est pas encore terminer, donc on aura une faible densité, ce qui implique une mauvaise isolation thermique donc un rétrécissement plus probable.

III.7.1.1.3. Conclusion1 :

Pour le temps de démoulage inférieur à 8 mn pour l'armoire du réfrigérateur on aura une densité moins de 33.10^{-3} et d'après la référence (33.10^{-3} - 35.10^{-3}) on aura un risque de rétrécissement et plus de 8 mn la densité reste stable (bonne) mais sa représente une surconsommation du produit pour l'entreprise par contre l'isolation thermique sera très bonne car une faible conductivité donne une bonne isolation thermique.

III.7.1.2. Expérience 2:

On a calculé les densités en panneaux pour la porte du réfrigérateur (grand modèle avec une porte) en changeant le temps de démoulage sachant que le temps de séjours de la mousse dans le moule exigé est 5 minutes pour la porte et la valeur de référence de la densité est l'intervalle [33.10^{-3} - 35.10^{-3}].

III.7.1.2.1. Résultats de l'expérience 2:

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau suivant :

Essais	Le temps de démoulage en minute (mn)	Densité en panneau
1	3mn 30s	0,03124
2	4mn 00s	0,03104
3	4mn 30s	0,03247
4	5mn 30s	0,03483
5	6mn 00s	0,03483
6	7mn 00s	0,03483

Tableau 30: Variation de la densité en panneau en fonction du temps de démoulage pour la porte du réfrigérateur

Le diagramme de la variation de la densité en panneau en fonction du temps de démoulage est le suivant :

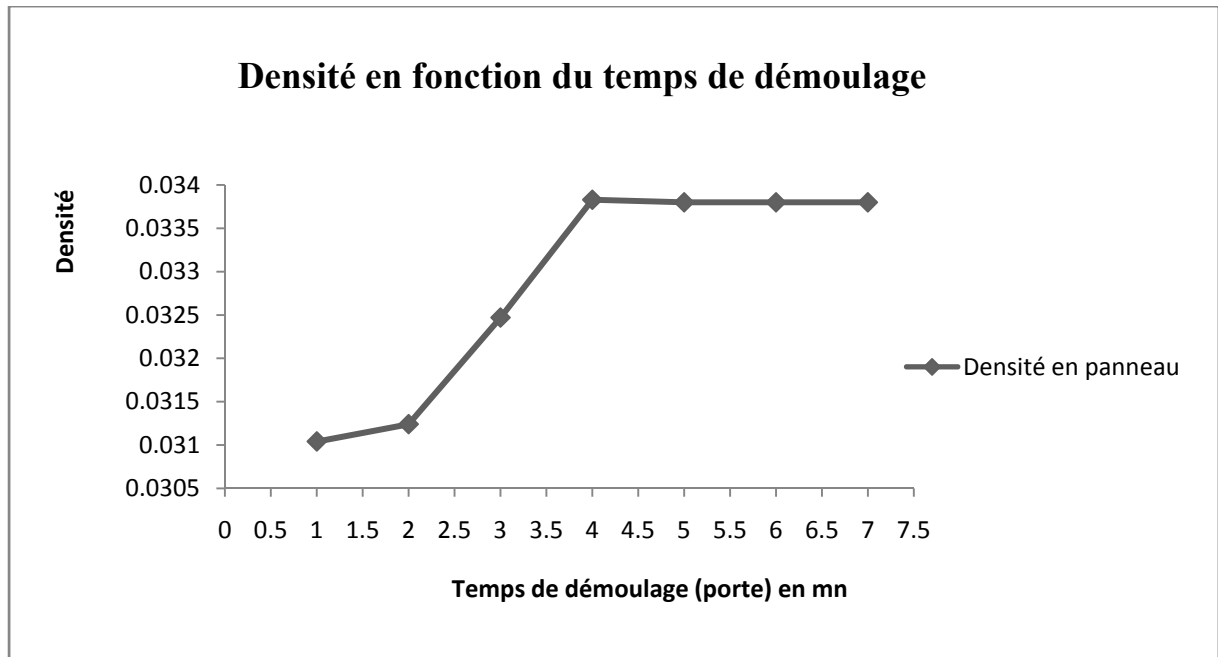


Diagramme III.2. Influence du temps de démoulage sur la densité en panneau pour la porte d'un réfrigérateur

III.7.1.2.2. Analyse des résultats de l'expérience 2:

On remarque qu'au bout de 5mn, la réaction sera achevée, donc on aura une bonne isolation thermique.

Plus de 5mn, on aura une réduction de la cadence inutilement au moins de 5 min, la réaction n'est pas encore terminée, donc on aura une faible densité, donc une grande conductivité ce qui implique une mauvaise isolation thermique donc un rétrécissement plus probable.

III.7.1.2.3. Essais de rétrécissement :

Après 72 heures, en mettant les échantillons (éprouvettes cylindriques) dans un congélateur à une très basse température (-20°C), on a un rétrécissement des parties non conformes, celles qui ont des densités moins de $33 \cdot 10^{-3}$ et leurs conductivités thermiques sont grandes ce qui donne une mauvaise isolation thermique et pour des densités supérieures à $33 \cdot 10^{-3}$, les conductivités thermiques sont petites donc ils assurent une bonne isolation thermique.



Figure.III.26. Essai de rétrécissement



Figure.III.27. Eprouvette cylindrique rétrécie

III.7.1.2.4. Conclusion 2:

Pour un temps de démoulage inférieur à 5 mn pour la porte du réfrigérateur, nous avons des densités inférieurs à 33.10^{-3} et dans ce cas on aura un risque de rétrécissement et plus de 5 mn la densité reste stable (bonne) et sa valeur est incluse dans l'intervalle de référence qui est $[33.10^{-3}-35.10^{-3}]$ donc l'isolation thermique sera très bonne mais sa représente d'un autre coté une surconsommation du produit pour l'entreprise.

III.7.2. Influence de la masse injectée sur la densité en panneau:

Pour avoir la densité exigée, on doit savoir quel est la masse idéale de la mousse polyuréthane à injectée dans les moules des réfrigérateurs pour qu'après son expansion, elle remplit l'espace préservée pour le moussage de l'armoire ou de la porte du réfrigérateur, avec une densité qui assurent une meilleur isolation thermique.

III.7.2.1. Expérience 3:

Pour le réfrigérateur avec deux portes, porte inférieure et porte supérieure, on a calculé les différentes densités en panneaux en fonction des masses injectés pour la porte supérieure sachant que :

La masse injectée pendant une seconde est 1,10 g pour la porte supérieure.

La masse injectée exigée pour la porte supérieure est 0,664 kg, la valeur de référence de la densité en panneau est l'intervalle $[33.10^{-3} - 35.10^{-3}]$.

III.7.2.1.1. Résultats de l'expérience 3:

Les résultats de l'expérience sont donnés dans le tableau suivant :

Essais	Masse injectée en kg	Densité en panneau
1	0,739	0,03690
2	0,680	0,03433
3	0,664	0,03400
4	0,661	0,03384
5	0,611	0,03290
6	0,570	0,03182

Tableau 31: Variation de la densité en panneau en fonction de la masse injectée pour la porte supérieure d'un réfrigérateur

Le diagramme de la variation de la densité en fonction de la masse injectée est le suivant :

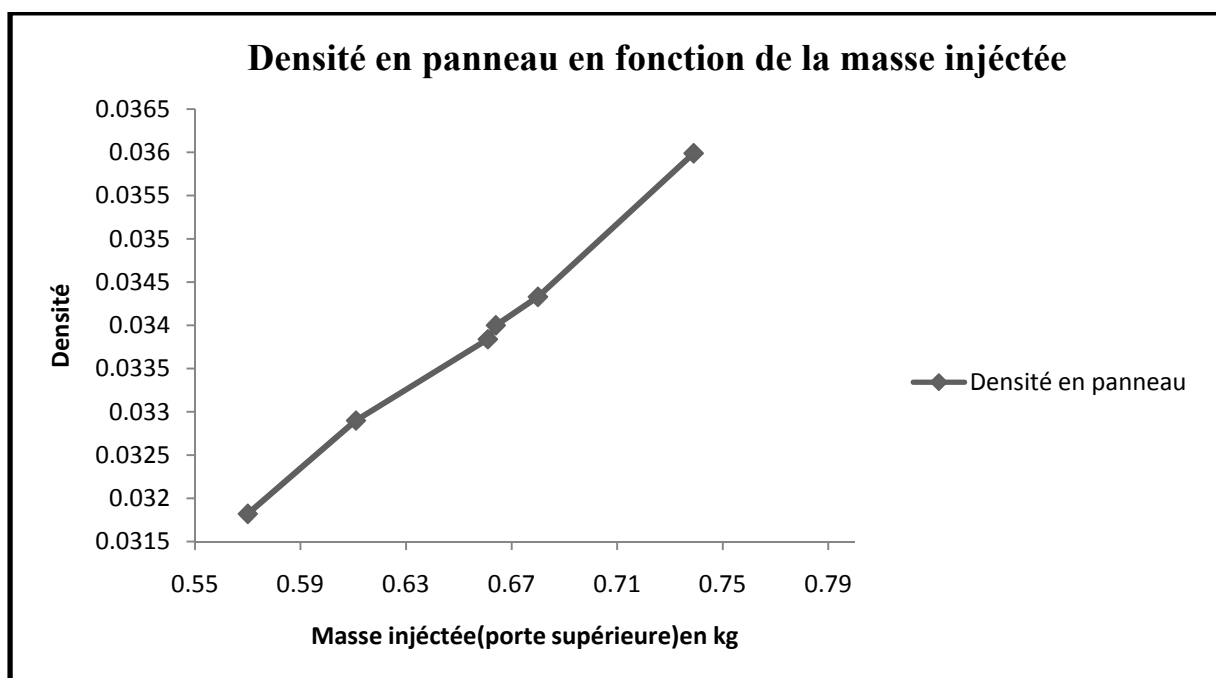


Diagramme III.3. Influence de la masse injectée sur la densité en panneau pour la porte supérieure d'un réfrigérateur

III.7.2.1.2. Analyse des résultats de l'expérience 3:

Pour avoir un produit conforme, il faut avoir une masse égale à 0,664 pour la porte supérieure, si on a moins on aura une faible densité, donc il y a un risque de rétrécissement d'où une grande conductivité thermique ce qui implique une mauvaise isolation et si on a plus, on aura une surconsommation du produit par contre on aura une très bonne isolation thermique car sa conductivité thermique est faible.

III.7.2.1.3. Conclusion 3:

La masse injectée a une influence directe sur la densité de la mousse ce qui nous permis de déduire si la mousse assure une bonne isolation ou pas.

III.7.2.2. Expérience 4:

On a calculé les différentes densités en panneaux en fonction des masses injectés pour la porte inférieure d'un réfrigérateur (modèle1) sachant que :

La masse injectée exigée est entre 1,297Kg et 1,376Kg pour la porte inférieure.

La valeur de référence pour la densité en panneau est : $[33.10^{-3}-35.10^{-3}]$.

III.7.2.2.1. Résultats de l'expérience 4:

Les résultats de l'expérience sont donnés dans le tableau suivant :

Essais	Masse injectée en Kg	Densité en panneau
1	1,439	0,03662
2	1,401	0,03564
3	1,354	0,03445
4	1,347	0,03426
5	1,334	0,03395
6	1,331	0,03386
7	1,311	0,03335
8	1,290	0,03282

Tableau 32: Variation de la densité en panneau en fonction de la masse injectée pour la porte inférieure du réfrigérateur.

Le diagramme de la variation de la densité en panneau en fonction de la masse injectée pour la porte inférieure du réfrigérateur est le suivant :

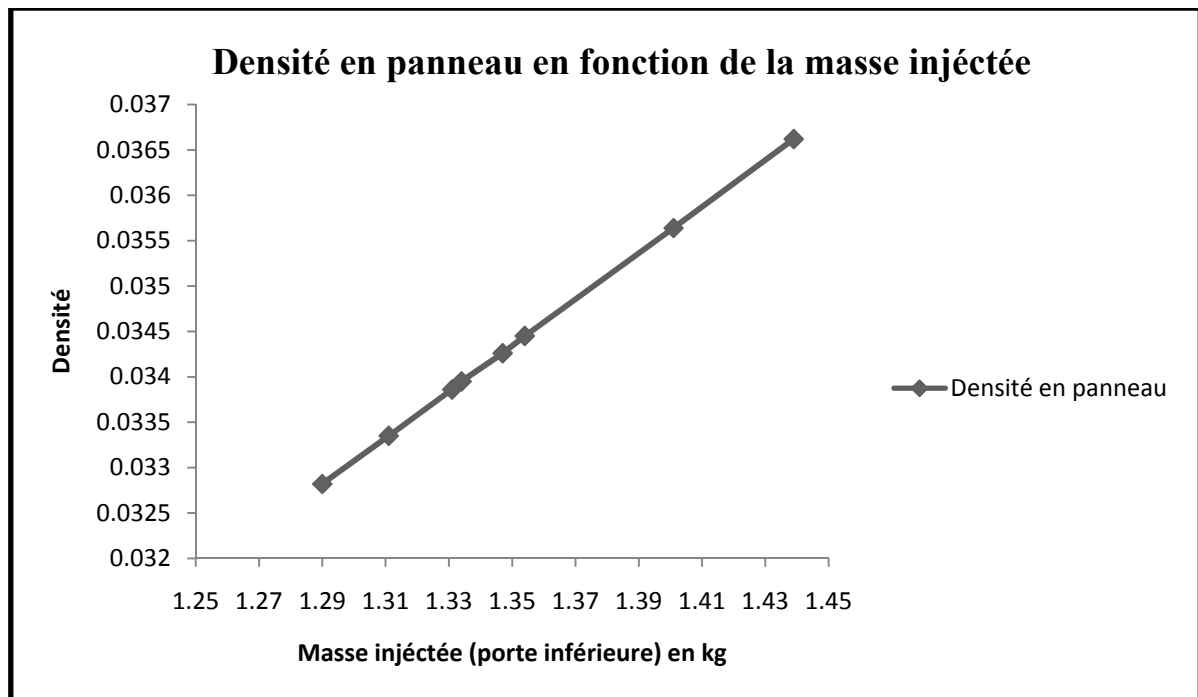


Diagramme III.4. Influence de la masse injectée sur la densité en panneau pour la porte inférieure du réfrigérateur

III.7.2.2.2. Analyse des résultats de l'expérience 4:

Pour avoir un produit conforme, il faut avoir une masse entre 1,297Kg et 1,376Kg, si on a moins on aura une faible densité, donc il y a un risque de rétrécissement.

Si on a plus, on aura une surconsommation du produit car la densité exigée est obtenue et l'isolation thermique est bonne.

III.7.2.2.3. Conclusion 4:

La masse injectée a une influence directe sur la densité en panneau qui est inversement proportionnelle à la conductivité thermique, quand la densité augmente la conductivité thermique diminue ce qui assure une bonne isolation thermique de la mousse ce qui nous permis de déduire si la mousse est performante ou non.

III.7.2.3. Expérience 5:

Pour un autre réfrigérateur (modèle 2) à deux portes (porte supérieure et porte inférieure), on a calculé les différentes densités en panneau en fonction des masses injectés pour la porte supérieure sachant que :

La densité exigée est de $[33 \cdot 10^{-3} - 35 \cdot 10^{-3}]$.

La masse injectée pour la porte supérieure doit être entre 0,436 kg jusqu'à 0,463kg.

III.7.2.3.1. Résultats de l'expérience 5 :

Les résultats des mesures de densités en panneaux en fonction des masses injectées des deux portes inférieure et supérieure du réfrigérateur sont représentés dans le tableau suivant :

Essais	Masse injectée (porte Supérieure) en kg	Densité en panneau
1	0,391	0,0329
2	0,443	0,03381
3	0,450	0,03403
4	0,492	0,03649

Tableau 33: Variation de la densité en panneau en fonction de la masse injectée pour la porte supérieure du réfrigérateur.

Le diagramme de la variation de la densité en panneau en fonction de la masse injectée pour la porte supérieure d'un réfrigérateur (avec deux portes) est le suivant :

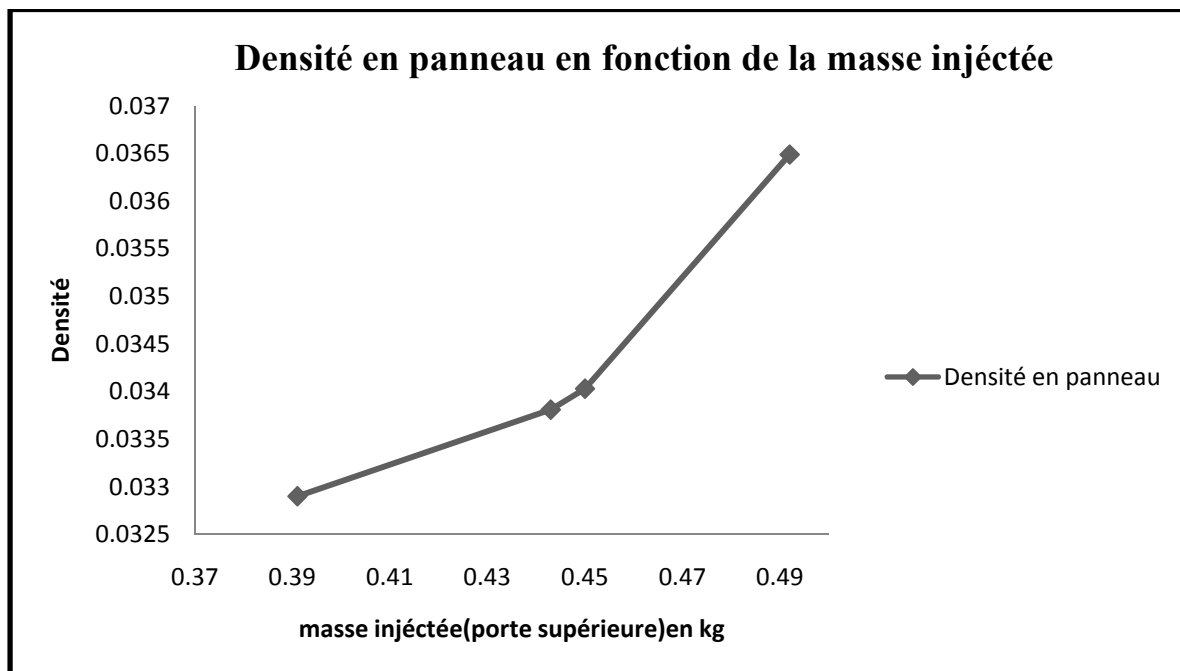


Diagramme III.5. Influence de la masse injectée sur la densité en panneau pour la porte supérieure d'un réfrigérateur

III.7.2.3.2. Analyse des résultats de l'expérience 5:

Pour la porte supérieure, si on injecte une masse inférieure à 0,436Kg on aura une densité faible (moins de $33 \cdot 10^{-3}$) et là on aura un rétrécissement et une mauvaise isolation, et si on injecte une masse supérieure à 0,463Kg on aura un risque de surconsommation mais une bonne isolation thermique.

III.7.2.3.3. Conclusion 5:

La masse injectée a une influence directe sur la densité en panneau et par conséquent sur sa performance, alors pour avoir une bonne isolation thermique il faut respecter la valeur exigée de la masse injectée dans les moules.

III.7.2.4. Expérience 6:

On a calculé les différentes densités en panneau en fonction des masses injectés pour la porte inférieur du réfrigérateur (modèle 2) sachant que :

La densité exigée est de $[33 \cdot 10^{-3} - 35 \cdot 10^{-3}]$.

La masse injectée pour la porte inférieure doit être entre 0,897 kg jusqu'à 0,952kg.

III.7.2.4.1. Résultats de l'expérience 6 :

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau suivant :

Essais	Masse injectée (porte Inférieure) en kg	Densité en panneau
1	0,764	0,03298
2	0,899	0,03363
3	0,967	0,03555
4	0,975	0,03585
5	0,993	0,03650

Tableau 34: Variation de la densité en panneau en fonction de la masse injectée pour la porte inférieure du réfrigérateur.

La courbe obtenue est la suivante :

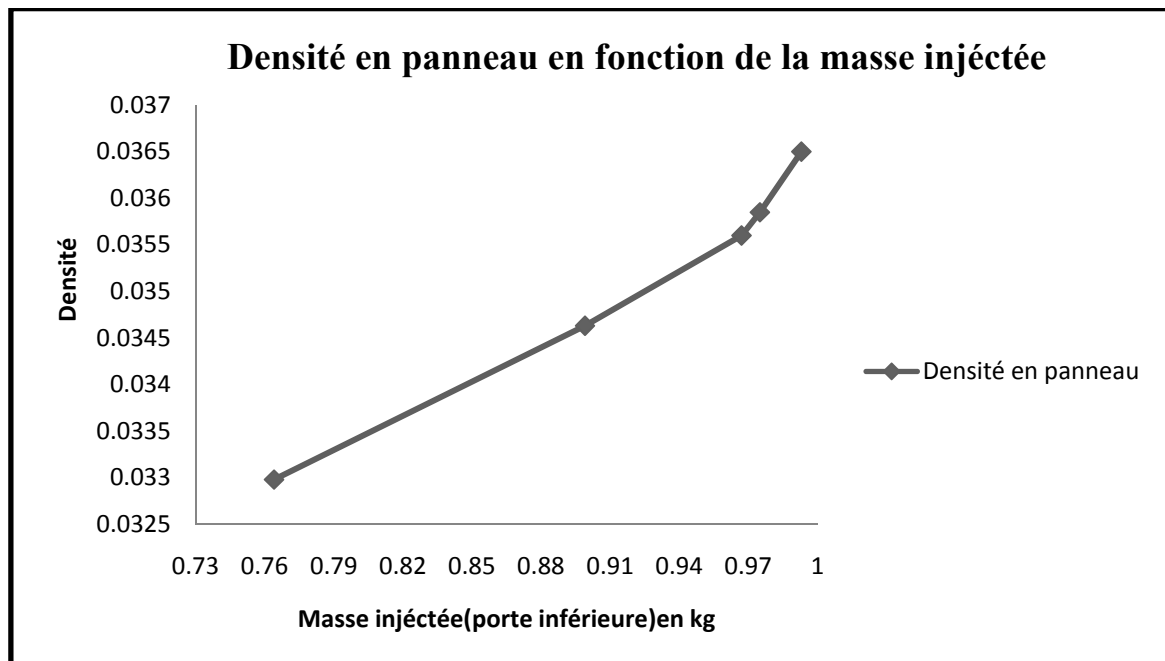


Diagramme III.6. Influence de la masse injectée sur la densité en panneau pour la porte inférieure du réfrigérateur

III.7.2.4.2. Analyse des résultats de l'expérience 6 :

La même chose pour la porte inférieure, si on injecte une masse inférieure à 0,897 on aura une densité faible (moins de $33 \cdot 10^{-3}$) et un risque de rétrécissement, une grande conductivité thermique donc une mauvaise isolation thermique, et si on injecte une masse supérieure à 0,952kg on aura un risque de surconsommation par contre l'isolation thermique sera très bonne car sa conductivité est faible.

III.7.2.4.3. Conclusion 6 :

La densité en panneau est inversement proportionnelle à la conductivité thermique, quand la densité augmente la conductivité thermique diminue ce qui assure une bonne isolation thermique.

III.7.3. Influence de pression et de temps d'injections sur la densité :

La masse injectée de la mousse polyuréthane rigide dépend du temps d'injection de ses composants qui sont le produit « R » et le produit « p » qui après mélange forme la mousse polyuréthane, et elle dépend aussi des pressions par lesquelles ces produits sont injectés.

III.7.3.1. Expérience 7:

On prend comme exemple l'armoire du réfrigérateur.

Si on appelle le mélange (cyclopentane + le polyol) le produit R, et P pour l'isocyanate.

- La masse injectée pendant une seconde est de 1,06Kg pour l'armoire.
- La masse injectée exigée est 5,730kg pour l'armoire du réfrigérateur.
- La pression exigée est entre 150 bars et 160 bars pour le produit R.
- La pression exigée est entre 160 bars et 170 bars pour P (iso cyanate).
- Le temps d'injection exigée pour l'armoire est de 5mn 40s.

III.7.3.1.1. Résultats de l'expérience 7:

Les résultats de l'expérience sont mentionnés dans le tableau suivant :

Essais	Temps d'injection minute (mn)	Pression d'injection produit R (bars)	Pression d'injection du produit P (bars)	Densité en panneau	Masse injectée (Kg)
1	5min 3s	150-160	170	0,03432	5,604
2	5min 4s	150-160	160-170	0,03500	5,730
3	5min 8s	170	180-190	0,03761	6,275
4	5min 9s	160 -170	180 - 190	0,03843	6,477
5	6min 10s	170	190	0,03967	6.741

Tableau 35: Variation de la densité en panneau en fonction de la masse injectée pour l'armoire d'un réfrigérateur

Le digramme de la variation de la densité en fonction de la masse injectée est le suivant :

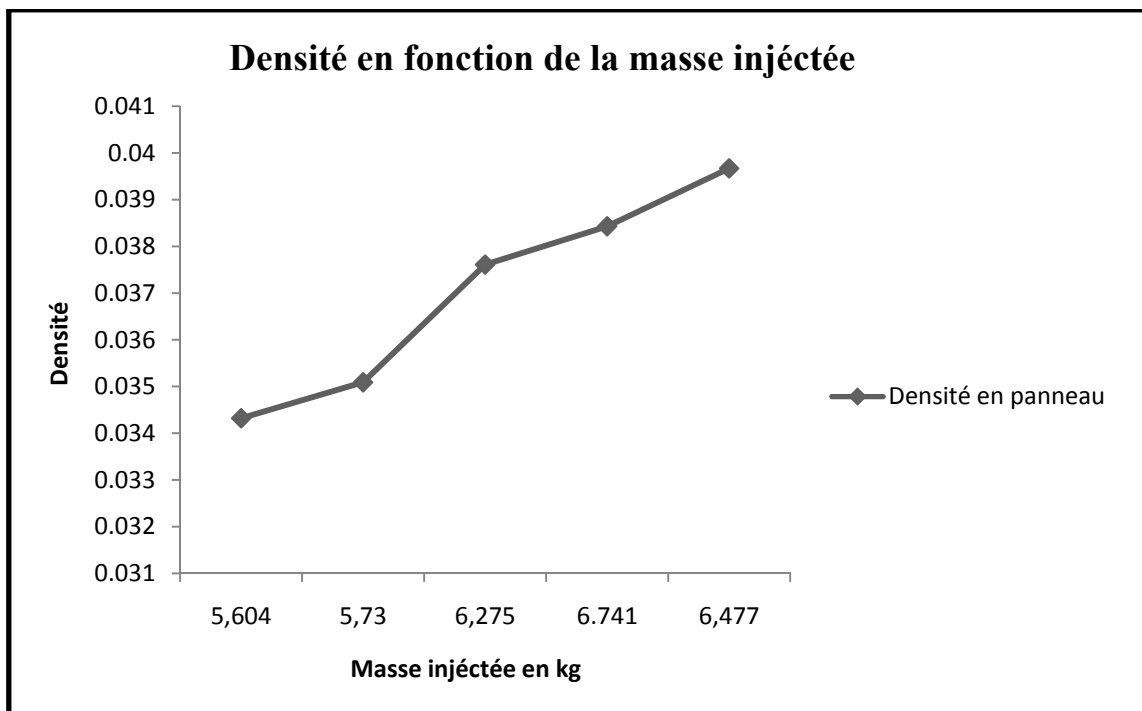


Diagramme III.7. Influence de la masse injectée sur la densité en panneau pour l'armoire d'un réfrigérateur

Le diagramme de l'influence de la pression d'injection sur la densité est le suivant :

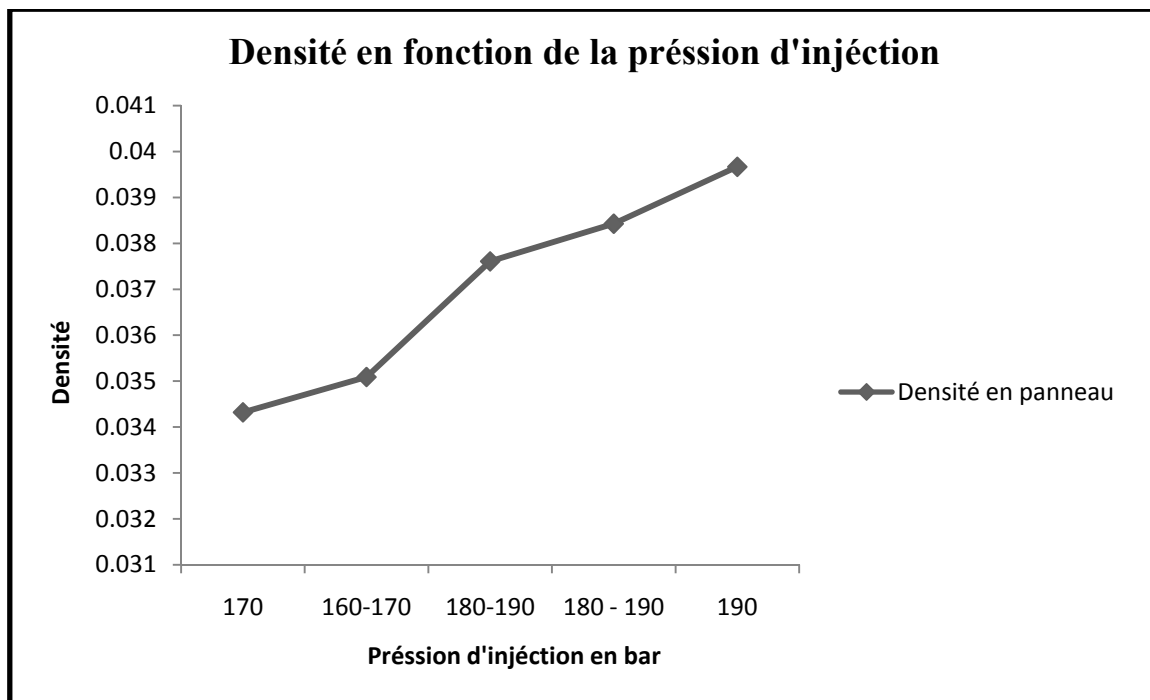


Diagramme III.8. Influence de la pression d'injection sur la densité en panneau pour l'armoire d'un réfrigérateur

Le diagramme qui représente la variation de la densité en fonction du temps d'injection est le suivant :

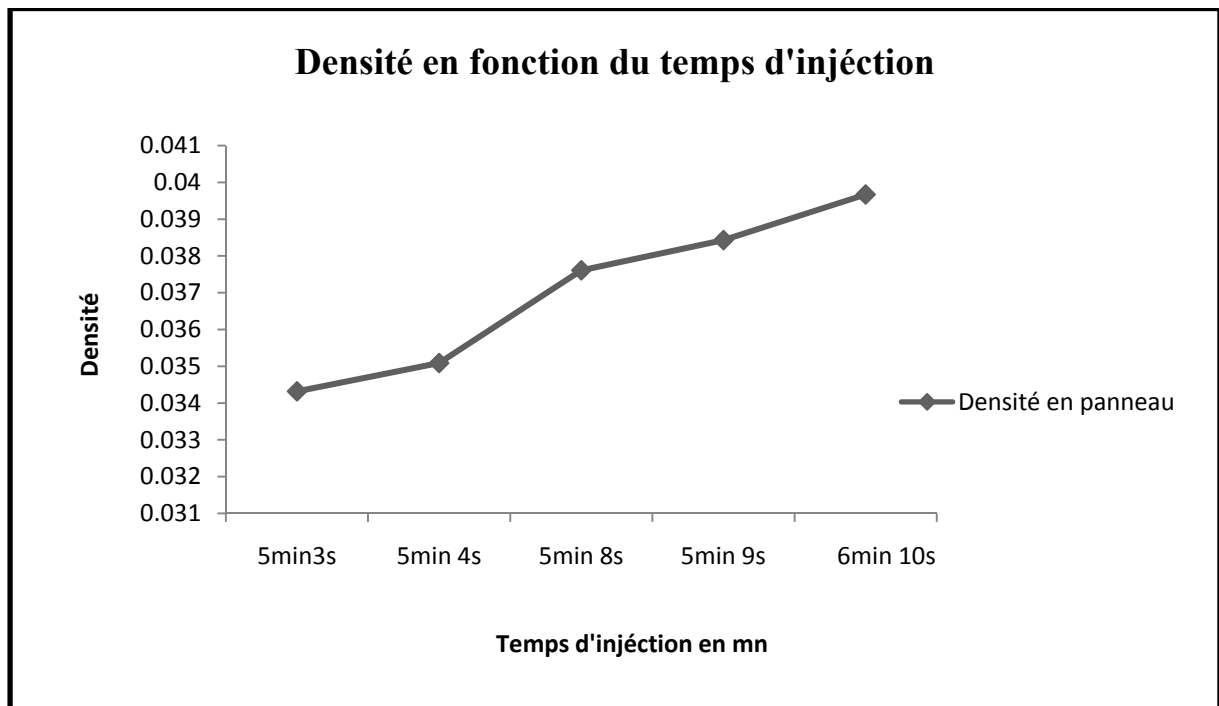


Diagramme III.9. Influence du temps d'injection sur la densité en panneau pour l'armoire d'un réfrigérateur

III.7.3.1.2 Analyse des résultats de l'expérience 7:

Tant qu'on a une pression élevée tant que la masse injectée est grande et tant que la pression diminue, tant que la masse injectée diminue, pour un même temps d'injection.

On remarque que la masse injectée est en fonction de temps d'injection, tant que le temps d'injection augmente la masse injectée augmente aussi et si le temps d'injection diminue la masse injectée diminue.

Si on augmente la pression d'injection pour un temps bien déterminé, la masse injectée augmente aussi en fonction de la pression d'injection des deux produits R et P.

La densité en panneau augmente en augmentant la masse injectée et diminue en la diminuant

III.7.3.1.3. Conclusion 7:

Quand on a la masse injectée moins de 5,730 kg on aura une faible densité donc le risque de rétrécissement augmente et lorsque on a la masse injectée plus de 5,730 kg on aura une grande densité donc il y a un risque de surconsommation, alors la valeur idéale pour la masse injectée est 5,730 pour l'armoire du réfrigérateur et le temps d'injection est 5mn 40s à une pression de 150 bars à 160 bars pour le produit R et de 160 bars à 170 bars pour le produit P pour un temps de démoulage égale à 8 minutes, afin d'assurer une bonne conformité de la mousse injectée.

III.7.4. L'influence de la température des moules sur la densité:

Lors de la procédure du moussage, les moules doivent être chauds pour accélérer la réaction d'expansion de la mousse mais à condition qu'elle assure la densité exigée c'est-à-dire, pour que l'agent gonflant « le cyclopentane » ne reste pas liquide ce qui ne donne pas une bonne

densité de la mousse, ou il ne s'évapore pas rapidement, avant l'achèvement de la réaction de moussage ce qui influe négativement sur la densité de la mousse (mauvaise densité dans les deux cas).

III.7.4.1. Expérience 8:

La température idéale des moules doit être comprise dans l'intervalle de température en (°C) suivant : [45- 49]

Avec un appareil qu'on appelle la sonde, on prélève les températures de différentes parties du moule armoire puis on calcule les densités en panneau:

- Paroi latérale gauche dans les trois partis, supérieur, milieu et inférieur de la paroi.
- Paroi latérale droite dans les trois partis, supérieur, milieu et inférieure de la paroi.
- Face de dessus.
- Face de dessous.
- Panneau arrière dans les trois partis, supérieur, au milieu et inférieure de panneau.
- La valeur de référence de la densité en panneau est [33.10^{-3} - 35.10^{-3}]

III.7.4.1.1. Résultats de l'expérience 8:

Les résultats de l'expérience sont représenté dans le tableau suivant :

Essais	Température des moules (°C)	Densité en panneau
1	41	0,039
2	45	0,03500
3	47	0,03418
4	48	0,03392
5	49	0,03307
6	57	0,03005
7	58	0,02968
8	61	0,02702

Tableau 36: Variation de la densité en panneau en fonction de la température des moules pour l'armoire d'un réfrigérateur

Le diagramme qui représente la variation de la densité en fonction de la température des moules est le suivant :

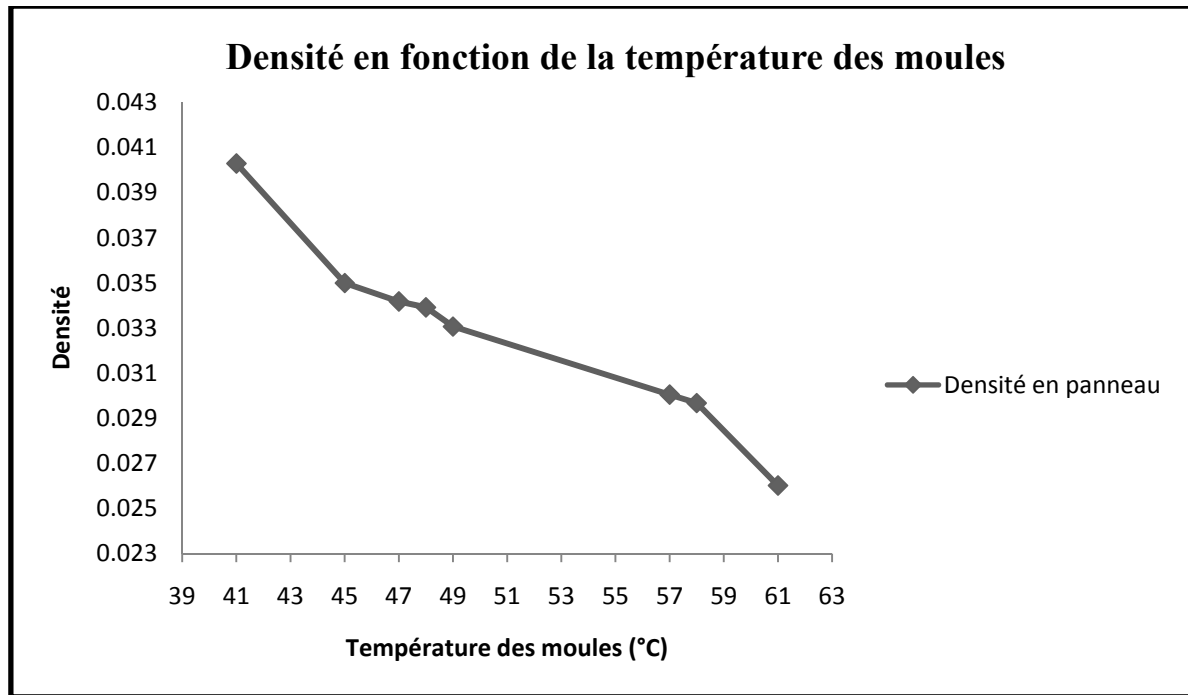


Diagramme III.10. Influence de la température des moules sur la densité en panneau pour l'armoire d'un réfrigérateur

III.7.4.1.2. Analyse des résultats de l'expérience 8:

On remarque plus la température est plus grande que 49°C qu'est la température d'ébullition du cyclopentane, la densité diminue et le rétrécissement augmente la conductibilité thermique augmente et en conséquence la diminution de la résistance thermique pour une épaisseur donnée et pour la température moins de 45°C l'expansion est entravée par un manque d'évaporation de l'agent gonflant ce qui provoque une répartition non homogène au niveau du produit (manque de mousse dans le produit).

III.7.4.1.3. Conclusion 8:

Pour avoir une bonne conductibilité thermique, il faut respecter les températures de moules qui est entre 45°C et 49°C pour l'armoire ainsi que pour la porte inférieure et la porte supérieure du réfrigérateur.

III.7.5. Conclusion :

Les mousses de polyuréthane rigide à base du cyclopentane, représentent de bonnes propriétés d'isolation thermique (une grande densité ainsi qu'une faible conductibilité thermique) mais pour cela on doit respecter des paramètres qu'on appelle les paramètres de moussage qui sont :

- Les pressions d'injection pour les mélanges polyol (A) (polyol + cyclopentane) et l'isocyanate (p);
- Le temps d'injection ;
- Le temps de démoulage ;
- La formulation du produit (en partie en poids « pp »);
- La masse injectée ;
- Les températures des moules.

Chapitre IV

Influence des paramètres opératoires sur la conductivité thermique

Caractérisation physique

IV.1. Introduction :

Un isolant thermique est un matériau ayant une faible conductivité thermique. Une isolation thermique très performante se traduit par l'absence de ponts thermiques entre deux zones de températures différentes. Le développement des isolants en polyuréthane rigide a commencé dans les années trente, après la reconnaissance de leur très faible conductivité thermique, et dans le but d'améliorer cette propriété importante dans le domaine de l'isolation thermique des réfrigérateurs nous allons étudier dans ce chapitre la variation de la conductivité thermique en fonction du temps, l'épaisseur, la densité et de la température.

IV.2. Définition :

Le coefficient de conductivité thermique « λ » d'un matériau est la quantité de chaleur écoulee (transmise) par conduction à travers un corps, sa valeur dépend principalement de:

- 1) Unité de temps ;
- 2) Unité d'épaisseur ;
- 3) Degré de différence de température ;
- 4) La densité.
- 5) Agent gonflant

IV.3. Mesure de la conductivité thermique :

La conductivité se mesure en Watt par mètre et par degrés Kelvin (W/m.K) :

- ◆ Le mètre est l'unité de longueur (épaisseur) ;
- ◆ Le kelvin est l'unité de température ;
- ◆ Le watt est l'unité de puissance.

La mesure de la conductivité s'effectue avec un appareil qu'on appelle le débit mètre tel qu'il est représenté sur la figure suivante :



Figure VI.28. Le débit mètre utilisé à l'ENIEM

• **Principe de son fonctionnement :**

L'appareil de mesure de la conductivité thermique utilisé à l'ENIEM est constitué de trois unités qui sont :

- 1) L'unité d'affichage de valeurs de températures et de HFM qu'on utilise pour le calcul de la valeur de la conductivité en appliquant des lois de calculs donnés ci-dessous.
- 2) L'unité centrale reliée à l'unité d'affichage qui permet d'avoir le graphique de la conductivité thermique sur un micro ordinateur.
- 3) L'unité qui contient deux plaques de différentes températures, c'est entre ces deux plaques qu'on met l'échantillon d'une épaisseur et d'une densité données, afin de calculer sa conductivité thermique, (voir la figure.VI.29), en posant l'échantillon entre la plaque supérieure qui a une température fixée appelée « T_1 », et la plaque inférieure froide qui sera réchauffée par la chaleur qui va traverser l'échantillon appelée « T_2 », qui est transmise par la plaque supérieure chaude, ce transfert de chaleur est assuré par le phénomène de la conductivité thermique, et la température de la plaque inférieure sera affichée par l'unité d'affichage ainsi que la valeur du HFM.



Figure VI.29. Les deux plaques du débit mètre utilisé à l'ENIEM

IV.4. Calcul de la conductivité thermique:

La formule de la conductivité λ (W/m.K) est la suivante:

$$\lambda = \frac{I_s \left[\left(k_1 + (k_2 \cdot \bar{T}) \right) + \left((k_3 + (k_4 \cdot \bar{T})) \cdot HFM \right) + \left(((k_5 + (k_6 \cdot \bar{T})) \cdot (HFM)^2) \right) \right]}{dt}$$

Tel que :

I_s : Epaisseur de l'échantillon (mètre).

k_n : Constante d'étalonnage (n prend les valeurs suivantes : 1, 2, 3, 4, 5, 6).

k_n : Prend les valeurs suivantes :

$$\begin{array}{ll} k_1 = -12,7377 & k_4 = 0,0459 \\ k_2 = 0,2364 & k_5 = 0,0567 \\ k_3 = 3.3452 & k_6 = -0,0007 \end{array}$$

\bar{T} : La température moyenne (°C), on la calcule selon la formule suivante :

$$\bar{T} = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

Pour une mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane, les valeurs de T_1 et T_2 sont :

$T_1 = 35^\circ\text{C}$

T_2 : varient entre 9°C et 10°C .

dt : La différence de température (°C) entre T_1 et T_2 , tel que :

$$dt = T_1 - T_2$$

HTM : Exprimé en MV.

IV.5. L'effet du temps sur la conductivité thermique :

Pour calculer la conductivité thermique d'un matériau, il faut effectuer plusieurs essais après différentes périodes et grâce à l'appareil de mesure qu'on appelle le débit mètre (voir la figure VI.26), pour une épaisseur et une densité données on obtient la valeur optimale de la conductivité thermique de ce matériau. La conductivité thermique de la mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane change en fonction de l'épaisseur et aussi de la densité en panneau, car pour les petites épaisseurs on peut avoir le régime permanent (une valeur stable de la conductivité thermique) plus rapidement, contrairement aux grandes épaisseurs où la machine prend plus de temps pour avoir la valeur optimale de la conductivité thermique.

IV.5.1. Expérience :

On calcule la conductivité thermique d'un échantillon en mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane, d'épaisseur « $I_s = 33\text{mm}$ », en faisant varier le temps et on applique les formules citées ci-dessus, puis on représente les valeurs obtenues par un diagramme pour pouvoir extraire la valeur optimale de la conductivité thermique de cet échantillon.

En faisant la lecture sur l'appareil de mesure de la conductivité thermique, nous prélevons les valeurs de températures et de HFM suivantes:

1) Après 30minutes :

$$I_s = 33\text{mm} = 0.033\text{m.}$$

$$\text{HFM} = 7,47\text{MV}$$

$$\text{Pour : } T_1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 9,60^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,60}{2} = 22,30^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,60 = 25,40^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_1 = \frac{0,033 \left[(-12,7377) + (0,2364223) + ((3,3452 + (0,0459223)) \cdot 7,47) + ((0,0567 + (-0,0007223)) \cdot (7,47)^2) \right]}{25,4}$$

$$\lambda_1 = 0,03567 \text{ W/m.K}$$

2) Après 40 minutes :

$$I_s = 33\text{mm} = 0.033\text{m.}$$

$$\text{HFM} = 6,74\text{MV}$$

$$\text{Pour : } T_1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 9,10 + 9,90/2 = 9,50^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,50}{2} = 22,25^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,50 = 25,50^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_2 = \frac{0,033 \left[(-12,7377) + (0,23642225) + ((3,3452 + (0,04592225)) \cdot 6,74) + ((0,0567 + (-0,00072225)) \cdot (6,74)^2) \right]}{25,50}$$

$$\lambda_2 = \mathbf{0,03080 \text{ W/m.K}}$$

3) Après 50 minutes :

$$I_s = 33\text{mm} = 0.033\text{m.}$$

$$\text{HFM} = 6,54\text{MV}$$

$$\text{Pour : } T1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T2 = 9,20 + 9,5/20 = 9,35^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,35}{2} = 22,17^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,35 = 25,65^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_3 = \frac{0,033 \left[(-12,7377) + (0,23642217) + ((3,3452 + (0,04592217)) \cdot 6,54) + ((0,0567 + (-0,00072217)) \cdot (6,54)^2) \right]}{25,65}$$

$$\lambda_3 = \mathbf{0,02933 \text{ W/m.K}}$$

4) Après 60 minutes :

$$I_s = 33\text{mm} = 0.033\text{m.}$$

$$\text{HFM} = 6,41\text{MV}$$

$$\text{Pour : } T1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T2 = 9,30 + 9,50/2 = 9,40^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35+9,40}{2} = 22,20^{\circ}\text{C}$$

$$dt = 35-9,40 = 25,60^{\circ}\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_4 = \frac{0,033 \left[(-12,7377) + (0,236422,20) + (3,3452 + (0,045922,20) \cdot 6,41) + ((0,0567 + (-0,000722,20)) \cdot (6,41)^2) \right]}{25,6}$$

$$\lambda_4 = \mathbf{0,02858 \text{ W/m.K}}$$

5) Après 70 minutes :

$$I_5 = 33\text{mm} = 0.033\text{m.}$$

$$\text{HFM} = 6,34\text{MV}$$

$$\text{Pour : } T1 = 35^{\circ}\text{C}$$

$$T2 = 9,10 + 9,50/2 = 9,30^{\circ}\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35+9,30}{2} = 22,15^{\circ}\text{C}$$

$$dt = 35-9,30 = 25,70^{\circ}\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_5 = \frac{0,033 \left[(-12,7377) + (0,236422,15) + (3,3452 + (0,045922,15) \cdot 6,34) + ((0,0567 + (-0,000722,15)) \cdot (6,34)^2) \right]}{25,7}$$

$$\lambda_5 = \mathbf{0,02800 \text{ W/m.K}}$$

6) Après 80 minutes :

$$I_5 = 33\text{mm} = 0.033\text{m.}$$

$$\text{HFM} = 6,38\text{MV}$$

Pour : $T1=35^{\circ}\text{C}$

$T2 = 9,30^{\circ}\text{C}$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,30}{2} = 22,15^{\circ}\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,30 = 25,70^{\circ}\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_6 = \frac{0,033 \left[(-12,7377) + (0,23642215) + (3,3452 + (0,04592215) \cdot 6,38) + ((0,0567 + (-0,00072215) \cdot (6,38)^2) \right]}{25,7}$$

$$\lambda_6 = \mathbf{0,02825 \text{ W/m.K}}$$

7) Après 90 minutes :

$I_s = 33\text{mm} = 0.033\text{m}$.

HFM=6,02MV

Pour : $T1=35^{\circ}\text{C}$

$T2 = 9,10 + 9,50/2 = 9,30^{\circ}\text{C}$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,30}{2} = 22,15^{\circ}\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,30 = 25,70^{\circ}\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_7 = \frac{0,033 \left[(-12,7377) + (0,23642215) + (3,3452 + (0,04592215) \cdot 6,02) + ((0,0567 + (-0,00072215) \cdot (6,02)^2) \right]}{25,7}$$

$$\lambda_7 = \mathbf{0,02600 \text{ W/m.K}}$$

8) Après 100 minutes :

$I_s = 33\text{mm} = 0.033\text{m}$.

HFM=6,00MV

Pour : $T1=35^{\circ}\text{C}$

$$T2 = 9,10+9,50/2=9,30^{\circ}\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35+9,30}{2} = 22,15^{\circ}\text{C}$$

$$dt = 35-9,30 = 25,70^{\circ}\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_8 = \frac{0,033 \left[(-12,7377) + (0,23642215) + (3,3452 + (0,04592215) \cdot 6,00) + ((0,0567 + (-0,00072215) \cdot (6,00)^2) \right]}{25,7}$$

$$\lambda_8 = \mathbf{0,02600 \text{ W/m.K}}$$

9) Après 110 minutes

$I_s = 33\text{mm} = 0.033\text{m}$.

HFM=6,40 MV

Pour : $T1=35^{\circ}\text{C}$

$$T2 = 9,10+9,50/2=9,30^{\circ}\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35+9,30}{2} = 22,15^{\circ}\text{C}$$

$$dt = 35-9,30 = 25,70^{\circ}\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_9 = \frac{0,033 \left[(-12,7377) + (0,23642215) + (3,3452 + (0,04592215) \cdot 6,40) + ((0,0567 + (-0,00072215) \cdot (6,40)^2) \right]}{25,7}$$

$$\lambda_9 = \mathbf{0,02858 \text{ W/m.K}}$$

IV.5.2. Résultats de l'expérience :

Les valeurs de la conductivité thermique et de temps sont représentées dans le tableau suivant :

Essais	Temps (mn)	Conductivité thermique λ (W/m.K)
1	30	0.03567
2	40	0,0308
3	50	0,02933
4	60	0,02858
5	70	0,02800
6	80	0,02825
7	90	0,02600
8	100	0,02600
9	110	0,02858

Tableau 37: Variation de la conductivité thermique en fonction du temps

La courbe de la variation de la conductivité thermique en fonction du temps est la suivante :

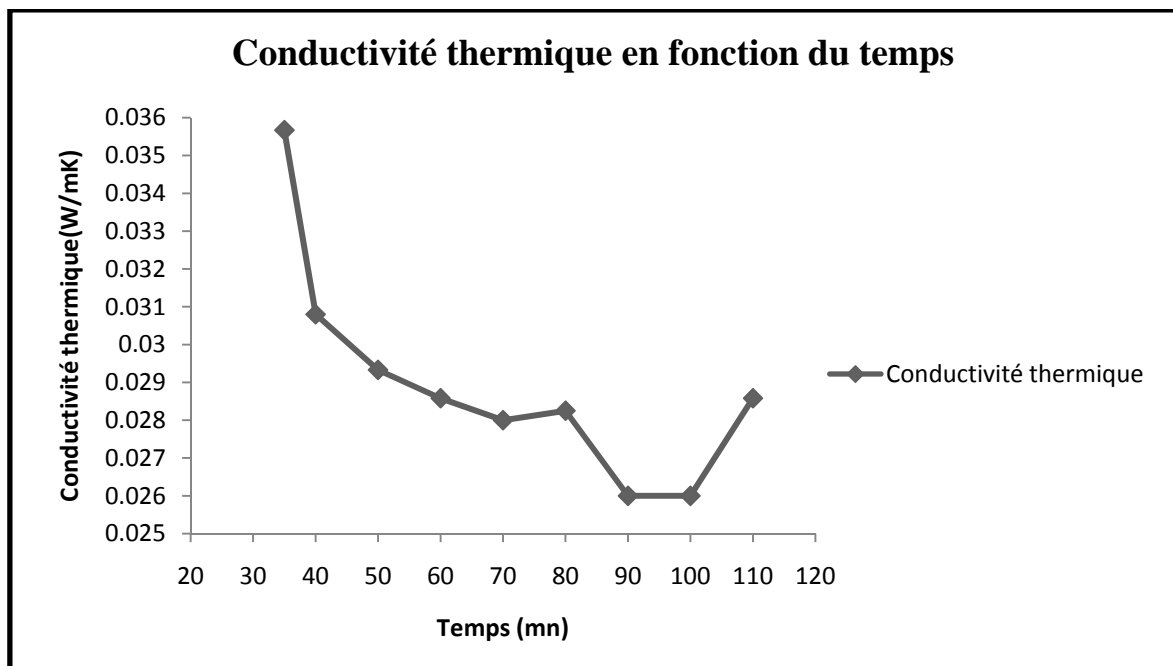


Diagramme IV.11. Variation de la conductivité thermique en fonction du temps

IV.5.3. L'analyse des résultats de l'expérience:

L'intervalle [30mn-90mn] : On remarque que dans cet intervalle, la conductivité thermique diminue ce qui est dû à l'augmentation de la résistance thermique de l'échantillon et nous remarquons aussi selon les résultats de l'expérience que les valeurs de HFM et de températures moyennes, diminuent dans cet intervalle contrairement au temps et aux valeurs de la différence entre les deux températures « dt » qui augmentent.

L'intervalle [90mn-100mn] : Dans cet intervalle de temps la conductivité thermique est optimale, elle est en régime permanent, et toutes les valeurs de températures et de HFM sont stables (fixes).

Après 110mn on remarque que la courbe remonte, ce qui signifie que la conductivité thermique de la mousse augmente, cette augmentation est due à la perte de la résistance thermique du matériau et on remarque que les valeurs des températures sont restées stables tandis que la valeur du HFM a augmenté.

IV.5.4. Conclusion : La conductivité thermique optimale d'un échantillon en mousse polyuréthane rigide d'une épaisseur de 33mm est celle qui correspond à l'intervalle de temps [90mn-100mn] et elle est égale à 0,02600 W/m.k donc on peut conclure que le temps a un grand effet sur la conductivité thermique du matériau.

IV.6. L'effet de la densité sur la conductivité thermique :

La conductivité thermique change en fonction de la densité en panneau de la mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane et pour étudier ce phénomène on effectue plusieurs expériences en utilisant des échantillons avec différentes densités en changeant d'épaisseurs dans certains cas et on garde la même épaisseur dans d'autres cas.

IV.6.1. Expérience 1:

On prend un autre échantillon en mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane qui a une épaisseur égale à 70mm (très grande épaisseur) et une densité en panneau égale à $26,41 \cdot 10^{-3}$ (très petite densité) en utilisant l'appareil de mesure de la conductivité thermique on prélève les résultats suivants :

1) Après 30 mn :

$$I_s = 70 \text{ mm} = 0.07 \text{ m}$$

$$\text{HFM} = 7,3 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T_1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 9,80^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,80}{2} = 22,4^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,80 = 25,20^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_1 = \frac{0,07 \left[(-12,7377) + (0,236422,4) + ((3,3452 + (0,045922,4)) \cdot 7,3) + ((0,0567 + (-0,000722,4)) \cdot (7,3)^2) \right]}{25,2}$$

$$\lambda_1 = 0,07400 \text{ W/m.K}$$

2) Après 40 mn :

$$I_S = 70 \text{ mm} = 0,07 \text{ m}$$

$$\text{HFM} = 5,64 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T_1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 9,50^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,50}{2} = 22,25^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,50 = 25,50^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_2 = \frac{0,07 \left[(-12,7377) + (0,236422,25) + ((3,3452 + (0,045922,25)) \cdot 5,64) + ((0,0567 + (-0,000722,25)) \cdot (5,64)^2) \right]}{25,5}$$

$$\lambda_2 = 0,05100 \text{ W/m.K}$$

3) Après 60 mn :

$$I_S = 70 \text{ mm} = 0,07 \text{ m}$$

$$\text{HFM} = 5,08 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T_1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 9,50^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,50}{2} = 22,25^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,50 = 25,50^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_3 = \frac{0,07 \left[(-12,7377) + (0,236422,25) + (3,3452 + (0,045922,25) \cdot 5,08) + ((0,0567 + (-0,000722,25)) \cdot (5,08)^2) \right]}{25,5}$$

$$\lambda_3 = \mathbf{0,04300 \text{ W/m.K}}$$

4) Après 80 mn :

$$I_S = 70 \text{ mm} = 0,07 \text{ m.}$$

$$\text{HFM} = 5 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T2 = 9,50^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,50}{2} = 22,25^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,50 = 25,50^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_4 = \frac{0,07 \left[(-12,7377) + (0,236422,25) + (3,3452 + (0,045922,25) \cdot 5) + ((0,0567 + (-0,000722,25)) \cdot (5)^2) \right]}{25,5}$$

$$\lambda_4 = \mathbf{0,04200 \text{ W/m.K}}$$

5) Après 100 mn :

$$I_S = 70 \text{ mm} = 0,07 \text{ m.}$$

$$\text{HFM} = 4,81 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T2 = 9,50^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,50}{2} = 22,25^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,50 = 25,50^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_5 = \frac{0,07 \left[(-12,7377) + (0,236422,25) + ((3,3452 + (0,045922,25)) \cdot 4,81) + ((0,0567 + (-0,000722,25)) \cdot (4,81)^2) \right]}{25,5}$$

$$\lambda_5 = 0,03900 \text{ W/m.K}$$

6) Après 110 mn :

$$I_5 = 70 \text{ mm} = 0,07 \text{ m.}$$

$$\text{HFM} = 4,81 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T2 = 9,50^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,50}{2} = 22,25^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,50 = 25,50^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_6 = \frac{0,07 \left[(-12,7377) + (0,236422,25) + ((3,3452 + (0,045922,25)) \cdot 4,81) + ((0,0567 + (-0,000722,25)) \cdot (4,81)^2) \right]}{25,5}$$

$$\lambda_6 = 0,03900 \text{ W/m.K}$$

7) Après 130 mn :

$$I_5 = 70 \text{ mm} = 0,07 \text{ m.}$$

$$\text{HFM} = 4,91 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T2 = 9,50^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,50}{2} = 22,25^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,50 = 25,5^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_7 = \frac{0,07 \left[(-12,7377) + (0,236422,25) + ((3,3452 + (0,045922,25)) \cdot 4,91) + ((0,0567 + (-0,000722,4)) \cdot (4,91)^2) \right]}{25,5}$$

$$\lambda_7 = \mathbf{0,04100 \text{ W/m.K}}$$

1) Après 140 mn :

$$I_S = 70 \text{ mm} = 0.07 \text{ m}$$

$$\text{HFM} = 5,08 \text{ MV}$$

Pour : $T1 = 35^\circ\text{C}$

$$T2 = 9,50^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,50}{2} = 22,25^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,50 = 25,50^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_8 = \frac{0,07 \left[(-12,7377) + (0,236422,25) + ((3,3452 + (0,045922,25)) \cdot 5,08) + ((0,0567 + (-0,000722,25)) \cdot (5,08)^2) \right]}{25,5}$$

$$\lambda_8 = \mathbf{0,04300 \text{ W/m.K}}$$

2) Après 150 mn :

$$I_S = 70 \text{ mm} = 0.07 \text{ m}$$

$$\text{HFM} = 5,08 \text{ MV}$$

Pour : $T1 = 35^\circ\text{C}$

$$T2 = 9,50^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,50}{2} = 22,25^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,50 = 25,50^{\circ}\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_g = \frac{0,07 \left[(-12,7377) + (0,236422,25) + (3,3452 + (0,045922,25) \cdot 5,08) + ((0,0567 + (-0,000722,25)) \cdot (5,08)^2) \right]}{25,5}$$

$$\lambda_g = 0,04300 \text{ W/m.K}$$

IV.6.1.1. Résultats de l'expérience 1:

Les valeurs de la conductivité thermique pour une densité en panneau égale à $26,41 \cdot 10^{-3}$ et après différentes périodes sont représentées dans le tableau suivant :

Essais	Temps (mn)	Conductivité thermique λ (W/m.K)
1	30	0,07400
2	40	0,05100
3	60	0,04300
4	80	0,04200
5	100	0,03900
6	110	0,03900
7	130	0,04100
8	140	0,04300
9	150	0,04300

Tableau 38: Variation de la conductivité thermique en fonction du temps pour une densité en panneau de 0,02641

La courbe de la variation de la conductivité thermique pour une densité de 0,02641 est la suivante :

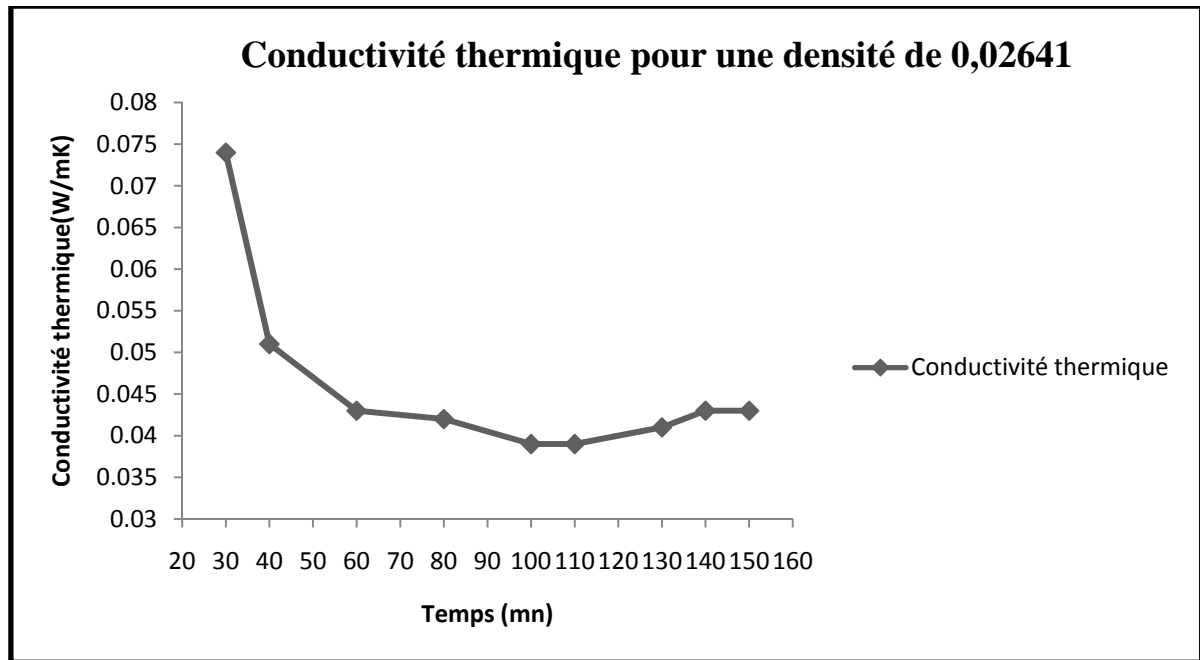


Diagramme IV.12. Variation de la conductivité thermique en fonction du temps pour une densité de 0,02641

IV.6.1.2. Analyse des résultats de l'expérience 1:

L'intervalle [30mn-100mn] : On remarque que dans cet intervalle, la conductivité thermique diminue ce qui est dû à l'augmentation de la résistance thermique du matériau et nous remarquons aussi selon les résultats de l'expérience que la valeur de HFM diminue dans cet intervalle et les températures restent presque constantes.

L'intervalle [100mn-110mn] : Dans cet intervalle de temps la conductivité thermique est optimale, elle est en régime permanent, et toutes les valeurs de températures et de HFM sont stables (fixes).

L'intervalle [110mn-150mn] : On remarque que la courbe remonte légèrement puis elle se stabilise, ce qui signifie que la conductivité thermique de la mousse augmente, cette augmentation est due au gaz « le cyclopentane » piégé dans les alvéoles de la mousse polyuréthane rigide.

IV.6.1.3. Conclusion 1:

Pour un échantillon en mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane qui a une épaisseur égale à 70 mm (très grande épaisseur), et une densité en panneau égale à 0,02641 (très petite densité), cette valeur est très éloignée de l'intervalle exigée pour la densité en panneau qui est [0,033-0,035], la valeur optimale de la conductivité thermique est obtenue après 100mn et elle est égale à 0,039 W/m.k, et on peut remarquer que cette valeur est très élevée, malgré qu'on a une très grande épaisseur et une très petite densité, ce qui est dû au gaz piégé dans les alvéoles fermées de la mousse qui est « le cyclopentane ».

IV.6.2. Expérience 2:

On prend un autre échantillon en mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane qui a une épaisseur égale à 28,2 mm et une densité en panneau égale à $33,03 \cdot 10^{-3}$ en utilisant l'appareil de mesure de la conductivité thermique on prélève les résultats suivants :

1) Après 70 mn :

$$I_S = 28,2 \text{ mm} = 0.0282 \text{ m}$$

$$\text{HFM} = 6,07 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T2 = 9,50^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,50}{2} = 22,25^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,50 = 25,50^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_1 = \frac{0,0282 \left[(-12,7377) + (0,236422,25) + ((3,3452 + (0,045922,25)) \cdot 6,07) + ((0,0567 + (-0,000722,25)) \cdot (6,07)^2) \right]}{25,5}$$

$$\lambda_1 = 0,02271 \text{ W/m.K}$$

2) Après 80 mn :

$$I_S = 28,2 \text{ mm} = 0.0282 \text{ m}$$

$$\text{HFM} = 5,95 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T2 = 9,50^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,50}{2} = 22,25^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,50 = 25,50^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_2 = \frac{0,0282 \left[(-12,7377) + (0,236422,25) + ((3,3452 + (0,045922,25)) \cdot 5,95) + ((0,0567 + (-0,000722,25)) \cdot (5,95)^2) \right]}{25,5}$$

$$\lambda_2 = 0,02207 \text{ W/m.K}$$

3) Après 90 mn :

$$I_S = 28,2 \text{ mm} = 0.0282 \text{ m}$$

$$\text{HFM} = 5,95 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T_1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 9,50^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,50}{2} = 22,25^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,50 = 25,50^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_3 = \frac{0,0282 \left[(-12,7377) + (0,236422,25) + ((3,3452 + (0,045922,25)) \cdot 5,95) + ((0,0567 + (-0,000722,25)) \cdot (5,95)^2) \right]}{25,5}$$

$$\lambda_3 = 0,02207 \text{ W/m.K}$$

4) Après 100 mn :

$$I_S = 28,2 \text{ mm} = 0.0282 \text{ m.}$$

$$\text{HFM} = 5,95 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T_1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 9,50^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,50}{2} = 22,25^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,50 = 25,50^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_4 = \frac{0,0282 \left[(-12,7377) + (0,236422,25) + ((3,3452 + (0,045922,25)) \cdot 5,95) + ((0,0567 + (-0,000722,25)) \cdot (5,95)^2) \right]}{25,5}$$

$$\lambda_4 = 0,02207 \text{ W/m.K}$$

5) Après 110 mn :

$$I_s = 28,2 \text{ mm} = 0.0282 \text{ m.}$$

$$\text{HFM} = 5,93 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T2 = 9,50^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,50}{2} = 22,25^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,50 = 25,50^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_5 = \frac{0,0282 \left[(-12,7377) + (0,236422,25) + ((3,3452 + (0,045922,25)) 5,93) + ((0,0567 + (-0,000722,25)) \cdot (5,93)^2) \right]}{25,5}$$

$$\lambda_5 = 0,02196 \text{ W/m.K}$$

6) Après 120 mn :

$$I_s = 28,2 \text{ mm} = 0.0282 \text{ m.}$$

$$\text{HFM} = 5,9 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T2 = 9,50^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,50}{2} = 22,25^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,50 = 25,50^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_6 = \frac{0,0282 \left[(-12,7377) + (0,236422,25) + ((3,3452 + (0,045922,25)) 5,85) + ((0,0567 + (-0,000722,25)) \cdot (5,85)^2) \right]}{25,5}$$

$$\lambda_6 = 0,02147 \text{ W/m.K}$$

7) Après 130 mn :

$$I_s = 28,2 \text{ mm} = 0.0282 \text{ m.}$$

$$\text{HFM} = 5,90 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T2 = 9,20^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,20}{2} = 22,10^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,20 = 25,80^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_7 = \frac{0,0282 \left[(-12,7377) + (0,236422,25) + ((3,3452 + (0,045922,10)) \cdot 5,90) + ((0,0567 + (-0,000722,10)) \cdot (5,90)^2) \right]}{25,8}$$

$$\lambda_7 = \mathbf{0,02147 \text{ W/m.K}}$$

8) Après 150 mn :

$$I_s = 28,2 \text{ mm} = 0.0282 \text{ m.}$$

$$\text{HFM} = 5,95 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T2 = 9,50^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,50}{2} = 22,25^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,50 = 25,50^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_8 = \frac{0,0282 \left[(-12,7377) + (0,236422,25) + ((3,3452 + (0,045922,25)) \cdot 5,95) + ((0,0567 + (-0,000722,25)) \cdot (5,95)^2) \right]}{25,5}$$

$$\lambda_8 = \mathbf{0,02207 \text{ W/m.K}}$$

9) Après 160 mn :

$$I_s = 28,2 \text{ mm} = 0.0282 \text{ m.}$$

$$\text{HFM} = 6,00 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T2 = 9,50^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,50}{2} = 22,25^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,50 = 25,50^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_g = \frac{0,0282 \left[(-12,7377) + (0,23642225) + ((3,3452 + (0,04592225)) \cdot 6,00) + ((0,0567 + (-0,00072225)) \cdot (6,00)^2) \right]}{25,5}$$

$$\lambda_g = 0,02233 \text{ W/m.K}$$

IV.6.2.1. Résultats de l'expérience 2:

Les valeurs de la conductivité thermique d'un échantillon d'épaisseur égale à 28,20 mm et d'une densité en panneau égale à $33,03 \cdot 10^{-3}$ après différentes périodes sont représentées dans le tableau suivant :

Essais	Temps (mn)	Conductivité thermique λ (W/m.K)
1	70	0,02271
2	80	0,02207
3	90	0,02207
4	100	0,02207
5	110	0,02196
6	120	0,02147
7	130	0,02147
8	140	0,02207
9	160	0,02233

Tableau 39: Variation de la conductivité thermique en fonction du temps pour une densité en panneau de 0,03303

La courbe de la variation de la conductivité thermique pour une densité de 0,03303 est la suivante :

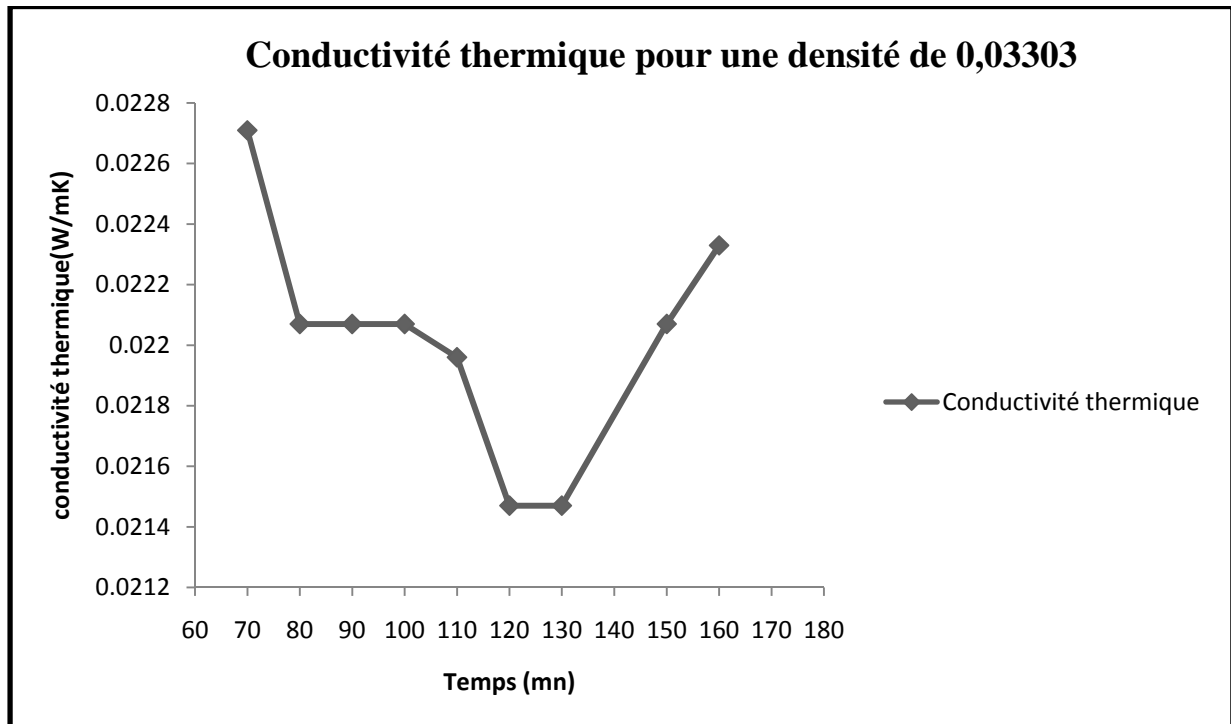


Diagramme IV.13. Variation de la conductivité thermique en fonction du temps pour une densité de 0,03303

IV.6.2.2. Analyse des résultats de l'expérience 2:

L'intervalle [70mn-80mn] : On remarque que dans cet intervalle, la conductivité thermique diminue ce qui est dû à l'augmentation de la résistance thermique de l'échantillon et nous remarquons aussi selon les résultats de l'expérience que la valeur de HFM diminue dans cet intervalle et les températures restent constantes.

L'intervalle [80mn-100mn] : La conductivité thermique se stabilise, mais elle n'a pas encore atteint sa valeur optimale, car elle continue à diminuer, donc il lui faut plus de temps pour atteindre son régime permanent.

L'intervalle [100mn-120mn] : La conductivité thermique continue à diminuer jusqu'à ce qu'elle atteigne son régime permanent, car même si l'épaisseur est petite, le matériau possède une grande résistance thermique vu sa densité élevée, alors il met plus de temps pour atteindre son régime permanent.

L'intervalle [120mn-130mn] : Dans cet intervalle de temps la conductivité thermique est optimale, elle est en régime permanent, et toutes les valeurs de températures et de HFM sont stables (fixes).

L'intervalle [130mn-160mn] : On remarque que la courbe remonte d'une manière considérable (elle atteint une grande valeur de la conductivité thermique), ce qui signifie que la conductivité thermique de la mousse augmente, cette augmentation est due à la perte de la résistance thermique du matériau vue l'excitation des électrons (grâce à la chaleur) qui transportent la chaleur d'une molécule à une autre dans le matériau, et on remarque aussi que les valeurs des températures sont restées stables tandis que la valeur du HFM a augmenté.

IV.6.2.3. Conclusion 2:

Pour un échantillon en mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane qui a une épaisseur égale à 28,2 mm (épaisseur moyenne), et une densité en panneau égale à 0,03303, cette valeur est incluse dans l'intervalle exigée pour la densité en panneau qui est [0,033-0,035], la valeur optimale de la conductivité thermique est obtenue après 120mn et elle est égale à 0,02147 W/m.k, et on peut remarquer que cette valeur est plus petite que celle obtenue avec une densité de 0,02641 (à l'expérience 2).

IV.6.3. Expérience 3:

On prend un échantillon en mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane (porte congélateur du modèle 290C) qui a une épaisseur égale à 22,2 mm (petite épaisseur) et une densité en panneau égale à $33,75 \cdot 10^{-3}$, sachant que l'intervalle de valeurs exigées pour la densité en panneau est [$33 \cdot 10^{-3}$ - $35 \cdot 10^{-3}$], en utilisant l'appareil de mesure de la conductivité thermique on prélève les résultats suivants :

1) Après 75mn :

$$I_s = 22,2 \text{ mm} = 0.0222 \text{ m.}$$

$$\text{HFM} = 6,92 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T2 = 9,50^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,50}{2} = 22,25^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,50 = 25,50^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_1 = \frac{0,0222 \left[(-12,7377) + (0,236422,25) + ((3,3452 + (0,045922,25)) \cdot 6,92) + ((0,0567 + (-0,000722,25)) \cdot (6,92)^2) \right]}{25,5}$$

$$\lambda_1 = \mathbf{0,02550 \text{ W/m.K}}$$

2) Après 90mn :

$$I_s = 22,2 \text{ mm} = 0.0222 \text{ m.}$$

$$\text{HFM} = 6,87 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T2 = 9,50^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35+9,50}{2} = 22,25^{\circ}\text{C}$$

$$dt = 35-9,50 = 25,50^{\circ}\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_2 = \frac{0,0222 \left[(-12,7377) + (0,236422,25) + ((3,3452 + (0,045922,25)) \cdot 6,87) + ((0,0567 + (-0,000722,25)) \cdot (6,87)^2) \right]}{25,5}$$

$$\lambda_2 = \mathbf{0,02129 \text{ W/m.K}}$$

3) Après 110mn :

$$I_S = 22,2 \text{ mm} = 0.0222 \text{ m.}$$

$$\text{HFM} = 6,80 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T1 = 35^{\circ}\text{C}$$

$$T2 = 9,50^{\circ}\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35+9,50}{2} = 22,25^{\circ}\text{C}$$

$$dt = 35-9,50 = 25,50^{\circ}\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_3 = \frac{0,0222 \left[(-12,7377) + (0,236422,25) + ((3,3452 + (0,045922,25)) \cdot 6,80) + ((0,0567 + (-0,000722,25)) \cdot (6,80)^2) \right]}{25,5}$$

$$\lambda_3 = \mathbf{0,02099 \text{ W/m.K}}$$

4) Après 120mn :

$$I_S = 22,2 \text{ mm} = 0.0222 \text{ m.}$$

$$\text{HFM} = 6,83 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T1 = 35^{\circ}\text{C}$$

$$T_2 = 9,50^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,50}{2} = 22,25^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,50 = 25,50^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_4 = \frac{0,0222 \left[(-12,7377) + (0,23642225) + ((3,3452 + (0,04592225)) \cdot 6,83) + ((0,0567 + (-0,00072225)) \cdot (6,83)^2) \right]}{25,5}$$

$$\lambda_4 = \mathbf{0,02093 \text{ W/m.K}}$$

5) Après 135mm :

$$I_5 = 22,2 \text{ mm} = 0.0222 \text{ m.}$$

$$\text{HFM} = 6,84 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T_1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 9,50^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,50}{2} = 22,25^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,50 = 25,50^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_5 = \frac{0,0222 \left[(-12,7377) + (0,23642225) + ((3,3452 + (0,04592225)) \cdot 6,84) + ((0,0567 + (-0,00072225)) \cdot (6,84)^2) \right]}{25,5}$$

$$\lambda_5 = \mathbf{0,02094 \text{ W/m.K}}$$

6) Après 150mm :

$$I_5 = 22,2 \text{ mm} = 0.0222 \text{ m.}$$

$$\text{HFM} = 6,92 \text{ MV}$$

Pour : $T1=35^{\circ}\text{C}$

$T2 =9,50^{\circ}\text{C}$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35+9,50}{2} = 22,25^{\circ}\text{C}$$

$$dt =35-9,50 =25,50^{\circ}\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_6 = \frac{0,0222 \left[(-12,7377) + (0,236422,25) + ((3,3452 + (0,045922,25)) \cdot 6,92) + ((0,0567 + (-0,000722,25)) \cdot (6,92)^2) \right]}{25,5}$$

$$\lambda_6 = 0,02150 \text{ W/m.K}$$

IV.6.3.1. Résultats de l'expérience 3:

Les valeurs de la conductivité thermique pour un échantillon d'épaisseur égale à 22,2 mm et d'une densité égale à 0,03375 après différentes périodes sont représentées dans le tableau suivant :

Essais	Temps (mn)	Conductivité thermique λ (W/m.K)
1	75	0,02550
2	90	0,02129
3	110	0,02099
4	120	0,02093
5	135	0,02094
6	150	0,0215

Tableau 40: Variation de la conductivité thermique en fonction du temps pour une densité en panneau de 0,03375

La courbe de la variation de la conductivité pour une densité en panneau de 0,03375 est le suivant :

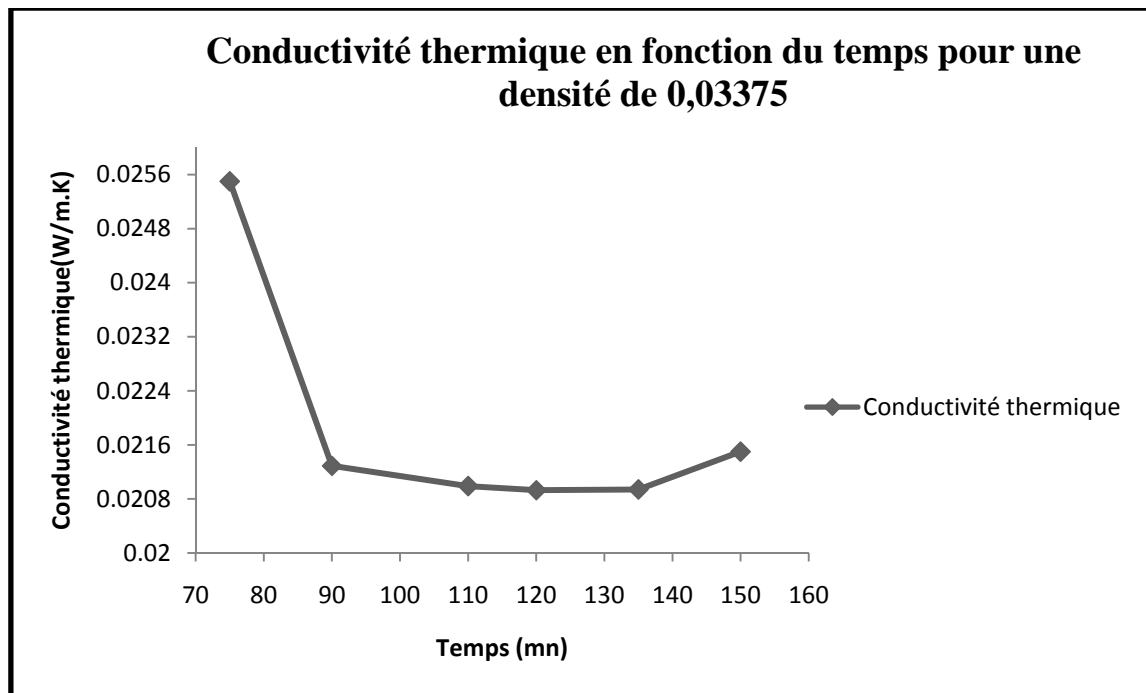


Diagramme IV.14. Variation de la conductivité thermique en fonction du temps pour une densité en panneau de 0,03375

IV.6.3.2. Analyse des résultats de l'expérience 3:

L'intervalle [75mn-90mn] : On remarque que dans cet intervalle, la conductivité thermique augmente ce qui est dû à l'augmentation de la quantité de chaleur qui traverse le matériau au fur et à mesure que le temps augmente, puis elle se stabilise pendant un petit moment entre 90mn et 100mn, mais elle va diminuer à partir de ce moment jusqu'à 110mn ce qui signifie qu'elle n'a pas encore atteint sa valeur stable ou optimale et il lui faut encore plus de temps.

L'intervalle [110mn-120mn] : Dans cet intervalle de temps la conductivité thermique est optimale, elle est en régime permanent, et toutes les valeurs de températures et de HFM sont presque stables.

L'intervalle [120mn-135mn] : On remarque que la courbe remonte légèrement, ce qui signifie que la conductivité thermique de la mousse augmente petit à petit, cette augmentation est due à la perte de la résistance thermique du matériau vu son exposition à la chaleur pour une longue durée de temps, ce qui excite d'une manière considérable les électrons qui jouent le rôle de transporteurs de chaleur d'une molécule à l'autre, ce phénomène on l'appelle « la conduction thermique ».

A partir de 135mn le matériau a perdu sa résistance thermique ainsi que toutes ces propriétés d'isolation thermique (sous l'effet de la chaleur) et il devient conducteur thermique.

IV.6.3.3. Conclusion 3: Pour un échantillon en mousse polyuréthane rigide à base de cyclopentane d'une épaisseur égale à 22,2 mm, et d'une densité en panneau égale à 0,03375, c'est-à-dire qu'il a une densité qui appartient à l'intervalle exigé pour la densité en panneau qui est [0,033-0,035], la valeur optimale de la conductivité thermique est obtenue après 110mn et elle est égale à 0,02093W/m.k.

IV.6.4. Expérience 4:

On prend un autre échantillon en mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane (porte du congélateur) qui a une épaisseur égale à 21,3 mm et une densité en panneau égale à $34,56 \cdot 10^{-3}$, en utilisant l'appareil de mesure de la conductivité thermique on prélève les résultats suivants :

1) Après 60 mn :

$$I_s = 21,3 \text{ mm} = 0.0213 \text{ m.}$$

$$\text{HFM} = 7,45 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T_1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 9,50^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,50}{2} = 22,25^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,50 = 25,50^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_1 = \frac{0,0213 \left[(-12,7377) + (0,236422,25) + ((3,3452 + (0,045922,25)) \cdot 7,45) + ((0,0567 + (-0,000722,25)) \cdot (7,45)^2) \right]}{25,5}$$

$$\lambda_1 = \mathbf{0,02283 \text{ W/m.K}}$$

2) Après 70 mn :

$$I_s = 21,3 \text{ mm} = 0.0213 \text{ m.}$$

$$\text{HFM} = 7,45 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T_1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 9,50^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,50}{2} = 22,25^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,50 = 25,50^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_2 = \frac{0,0213 \left[(-12,7377) + (0,236422,25) + ((3,3452 + (0,045922,25)) \cdot 7,45) + ((0,0567 + (-0,000722,25)) \cdot (7,45)^2) \right]}{25,5}$$

$$\lambda_2 = \mathbf{0,02283 \text{ W/m.K}}$$

3) Après 80 mn :

$$I_S = 21,3 \text{ mm} = 0,0213 \text{ m.}$$

$$\text{HFM} = 7,45 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T_1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 9,50^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,50}{2} = 22,25^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,50 = 25,50^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_3 = \frac{0,0213 \left[(-12,7377) + (0,236422,25) + ((3,3452 + (0,045922,25)) \cdot 7,45) + ((0,0567 + (-0,000722,25)) \cdot (7,45)^2) \right]}{25,5}$$

$$\lambda_3 = \mathbf{0,02283 \text{ W/m.K}}$$

4) Après 90 mn :

$$I_S = 21,3 \text{ mm} = 0,0213 \text{ m.}$$

$$\text{HFM} = 7,37 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T_1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 9,50^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,50}{2} = 22,25^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,50 = 25,50^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_4 = \frac{0,0213 \left[(-12,7377) + (0,236422,25) + ((3,3452 + (0,045922,25)) \cdot 7,37) + ((0,0567 + (-0,000722,25)) \cdot (7,37)^2) \right]}{25,5}$$

$$\lambda_4 = \mathbf{0,02245\text{W/m.K}}$$

5) Après 100 mn :

$$I_s = 21,3 \text{ mm} = 0,0213 \text{ m.}$$

$$\text{HFM} = 7,17 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T2 = 9,50^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,50}{2} = 22,25^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,50 = 25,50^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_5 = \frac{0,0213 \left[(-12,7377) + (0,236422,25) + ((3,3452 + (0,045922,25)) \cdot 7,17) + ((0,0567 + (-0,000722,25)) \cdot (7,17)^2) \right]}{25,5}$$

$$\lambda_5 = \mathbf{0,02167\text{W/m.K}}$$

6) Après 110 mn :

$$I_s = 21,3 \text{ mm} = 0,0213 \text{ m.}$$

$$\text{HFM} = 7,17 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T2 = 9,50^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,50}{2} = 22,25^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,50 = 25,50^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_6 = \frac{0,0213 \left[(-12,7377) + (0,23642225) + ((3,3452 + (0,04592225)) \cdot 7,17) + ((0,0567 + (-0,00072225)) \cdot (7,17)^2) \right]}{25,5}$$

$$\lambda_6 = \mathbf{0,02167 \text{ W/m.K}}$$

7) Après 120 mn :

$$I_S = 21,3 \text{ mm} = 0.0213 \text{ m.}$$

$$\text{HFM} = 7,17 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T2 = 9,50^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,50}{2} = 22,25^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,50 = 25,50^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_7 = \frac{0,0213 \left[(-12,7377) + (0,23642225) + ((3,3452 + (0,04592225)) \cdot 7,17) + ((0,0567 + (-0,00072225)) \cdot (7,17)^2) \right]}{25,5}$$

$$\lambda_7 = \mathbf{0,02167 \text{ W/m.K}}$$

8) Après 130 mn :

$$I_S = 21,3 \text{ mm} = 0.0213 \text{ m.}$$

$$\text{HFM} = 7,10 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T2 = 9,50^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35+9,50}{2} = 22,25^{\circ}\text{C}$$

$$dt = 35-9,50 = 25,50^{\circ}\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_8 = \frac{0,0213 \left[(-12,7377) + (0,236422,25) + ((3,3452 + (0,045922,25)) \cdot 6,98) + ((0,0567 + (-0,000722,25)) \cdot (6,98)^2) \right]}{25,5}$$

$$\lambda_8 = 0,02138 \text{ W/m.K}$$

9) Après 140 mn :

$$I_S = 21,3 \text{ mm} = 0.0213 \text{ m.}$$

$$\text{HFM} = 7,10 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T1 = 35^{\circ}\text{C}$$

$$T2 = 9,50^{\circ}\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35+9,50}{2} = 22,25^{\circ}\text{C}$$

$$dt = 35-9,50 = 25,50^{\circ}\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_9 = \frac{0,0213 \left[(-12,7377) + (0,236422,25) + ((3,3452 + (0,045922,25)) \cdot 7,10) + ((0,0567 + (-0,000722,25)) \cdot (7,10)^2) \right]}{25,5}$$

$$\lambda_9 = 0,02138 \text{ W/m.K}$$

10) Après 150 mn:

$$I_S = 21,30 \text{ mm} = 0.0213 \text{ m.}$$

$$\text{HFM} = 7,10 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T1 = 35^{\circ}\text{C}$$

$$T_2 = 9,50^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,50}{2} = 22,25^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,50 = 25,50^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_{10} = \frac{0,0213 \left[(-12,7377) + (0,236422,25) + ((3,3452 + (0,045922,25)) \cdot 7,10) + ((0,0567 + (-0,000722,25)) \cdot (7,10)^2) \right]}{25,5}$$

$$\lambda_{10} = \mathbf{0,02138 \text{ W/m.K}}$$

11) Après 160 mn :

$$I_s = 21,3 \text{ mm} = 0.0213 \text{ m.}$$

$$\text{HFM} = 7,28 \text{ MV}$$

Pour : $T_1 = 35^\circ\text{C}$

$$T_2 = 9,50^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,50}{2} = 22,25^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,50 = 25,50^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_{11} = \frac{0,0213 \left[(-12,7377) + (0,236422,25) + ((3,3452 + (0,045922,25)) \cdot 7,28) + ((0,0567 + (-0,000722,25)) \cdot (7,28)^2) \right]}{25,5}$$

$$\lambda_{11} = \mathbf{0,02212 \text{ W/m.K}}$$

IV.6.4.1. Résultats de l'expérience 4:

Les valeurs de la conductivité thermique d'épaisseur égale à 21,30mm et d'une densité en panneau égale à $34,56 \cdot 10^{-3}$ après différentes périodes sont représentées dans le tableau suivant :

Essais	Temps (mn)	Conductivité thermique λ (W/m.K)
1	60	0,02283
2	70	0,02283
3	80	0,02283
4	90	0,02245
5	100	0,02167
6	110	0,02167
7	120	0,02167
8	130	0,02138
9	140	0,02138
10	150	0,02138
11	160	0,02212

Tableau 41: Variation de la conductivité thermique en fonction du temps pour une densité en panneau de 0,03456

La courbe de la variation de la conductivité thermique pour une densité égale à 0,03456 est la suivante :

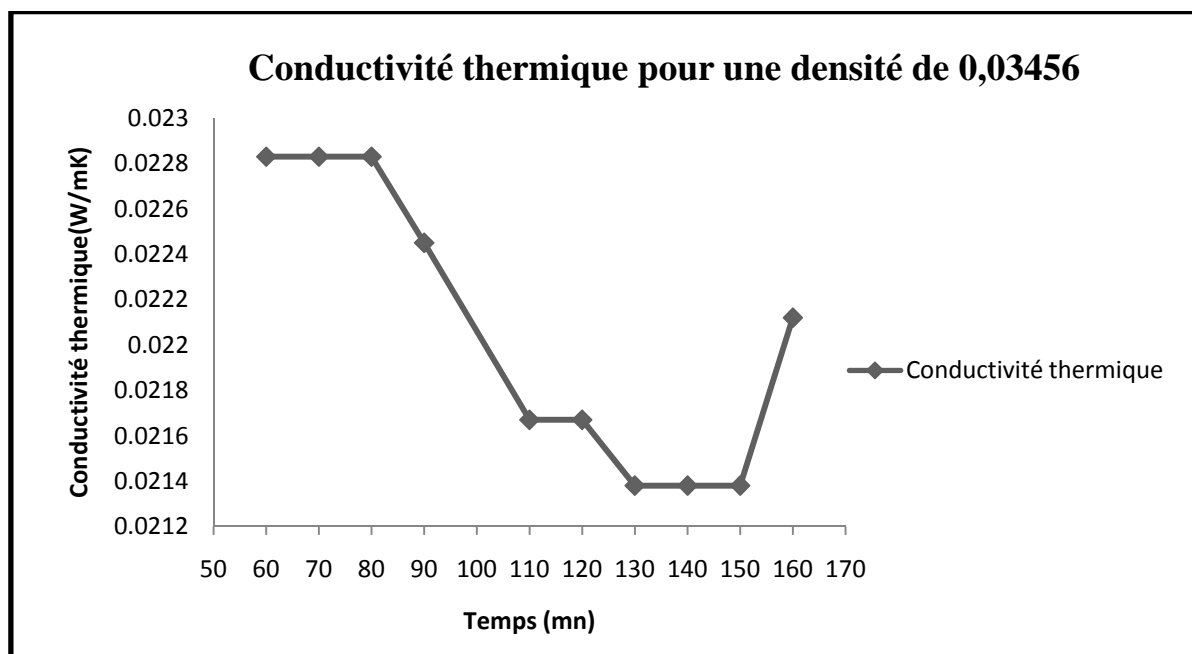


Diagramme IV.15. Variation de la conductivité thermique en fonction du temps pour une densité de 0,03456

IV.6.4.2. Analyse des résultats de l'expérience 4 :

L'intervalle [60mn-80mn] : On remarque dans cet intervalle que la valeur de la conductivité thermique est stable et atteint sa valeur maximale ce qui signifie que la quantité de chaleur qui traverse le matériau est maximale pendant les premiers temps.

L'intervalle [80mn-130mn] : la conductivité thermique diminue, puis elle stabilise pendant un moment, puis elle continue encore à diminuer, ce qui signifie qu'elle n'a pas encore atteint sa valeur stable ou optimale et il lui faut encore plus de temps vue que la densité en panneau est élevée (0,03375) ce qui implique une grande résistance thermique de la part du matériau.

L'intervalle [130mn-150mn] : Dans cet intervalle de temps la conductivité thermique est optimale, elle est en régime permanent, et toutes les valeurs de températures et de HFM sont stables.

L'intervalle [150mn-160mn] : On remarque que la courbe remonte, ce qui signifie que la conductivité thermique de la mousse a augmenté, cette augmentation est due à la perte de la résistance thermique du matériau sous l'effet de la chaleur, donc il devient conducteur thermique et due aussi au transport de la chaleur par les électrons qui constituent la matière.

IV.6.4.3. conclusion 4:

Pour un échantillon en mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane qui a une épaisseur égale à 21,3 mm (très petite épaisseur), et une densité en panneau égale à 0,03456, c'est-à-dire qu'il a une densité qui appartient à l'intervalle exigée pour la densité en panneau qui est [0,033-0,035], la valeur optimale de la conductivité thermique est obtenue après 130mn et elle est égale à 0,02138 W/m.k.

IV.6.5. Expérience 5:

On prend un autre échantillon en mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane qui a une épaisseur égale à 70mm et une densité en panneau égale à $36,08 \cdot 10^{-3}$ en utilisant l'appareil de mesure de la conductivité thermique on prélève les résultats suivants :

1) Après 60 mn :

$$I_s = 70 \text{ mm} = 0.07 \text{ m}$$

$$\text{HFM} = 3,72 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T_1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 9,20^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,20}{2} = 22,1^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,20 = 25,80^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_1 = \frac{0,07 \left[(-12,7377) + (0,2364221) + ((3,3452 + (0,0459221)) \cdot 3,72) + ((0,0567 + (-0,0007221)) \cdot (3,72)^2) \right]}{25,8}$$

$$\lambda_1 = 0,02516 \text{ W/m.K}$$

2) Après 75 mn :

$$I_S = 70 \text{ mm} = 0.07 \text{ m}$$

$$\text{HFM} = 3,63 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T_1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 9,00^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,00}{2} = 22,50^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,00 = 26^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_2 = \frac{0,07 \left[(-12,7377) + (0,2364225) + ((3,3452 + (0,0459225)) \cdot 3,63) + ((0,0567 + (-0,0007225)) \cdot (3,63)^2) \right]}{26}$$

$$\lambda_2 = 0,02321 \text{ W/m.K}$$

3) Après 90 mn :

$$I_S = 70 \text{ mm} = 0.07 \text{ m.}$$

$$\text{HFM} = 3,55 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T_1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 9,20^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,20}{2} = 22,10^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,20 = 25,80^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_3 = \frac{0,07 \left[(-12,7377) + (0,2364221) + ((3,3452 + (0,0459221) \cdot 3,55) + ((0,0567 + (-0,0007221)) \cdot (3,55)^2)) \right]}{25,8}$$

$$\lambda_3 = \mathbf{0,02301 \text{ W/m.K}}$$

4) Après 100 mn :

$$I_S = 70 \text{ mm} = 0.07 \text{ m.}$$

$$\text{HFM} = 3,55 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T2 = 9,20^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,20}{2} = 22,10^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,20 = 25,80^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_4 = \frac{0,07 \left[(-12,7377) + (0,2364221) + ((3,3452 + (0,0459221) \cdot 3,55) + ((0,0567 + (-0,0007221)) \cdot (3,55)^2)) \right]}{25,8}$$

$$\lambda_4 = \mathbf{0,02301 \text{ W/m.K}}$$

5) Après 120 mn :

$$I_S = 70 \text{ mm} = 0.07 \text{ m.}$$

$$\text{HFM} = 3,54 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T2 = 9,20^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,20}{2} = 22,10^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,20 = 25,80^{\circ}\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_5 = \frac{0,07 \left[(-12,7377) + (0,2364221) + ((3,3452 + (0,0459221)) \cdot 3,54) + ((0,0567 + (-0,0007221)) \cdot (3,54)^2) \right]}{25,8}$$

$$\lambda_5 = 0,02321 \text{ W/m.K}$$

IV.6.5.1. Résultats de l'expérience 5:

Les valeurs de la conductivité thermique pour une densité en panneau égale à $36,08 \cdot 10^{-3}$ et après différentes périodes sont représentées dans le tableau suivant :

Essais	Temps (mn)	Conductivité thermique λ (W/m.K)
1	60	0,02516
2	75	0,02321
3	90	0,02301
4	100	0,02301
5	120	0,02321

Tableau 42: Variation de la conductivité thermique en fonction du temps pour une densité en panneau de 0,03608

La courbe de la variation de la conductivité thermique pour une densité de 0,03608 est la suivante :

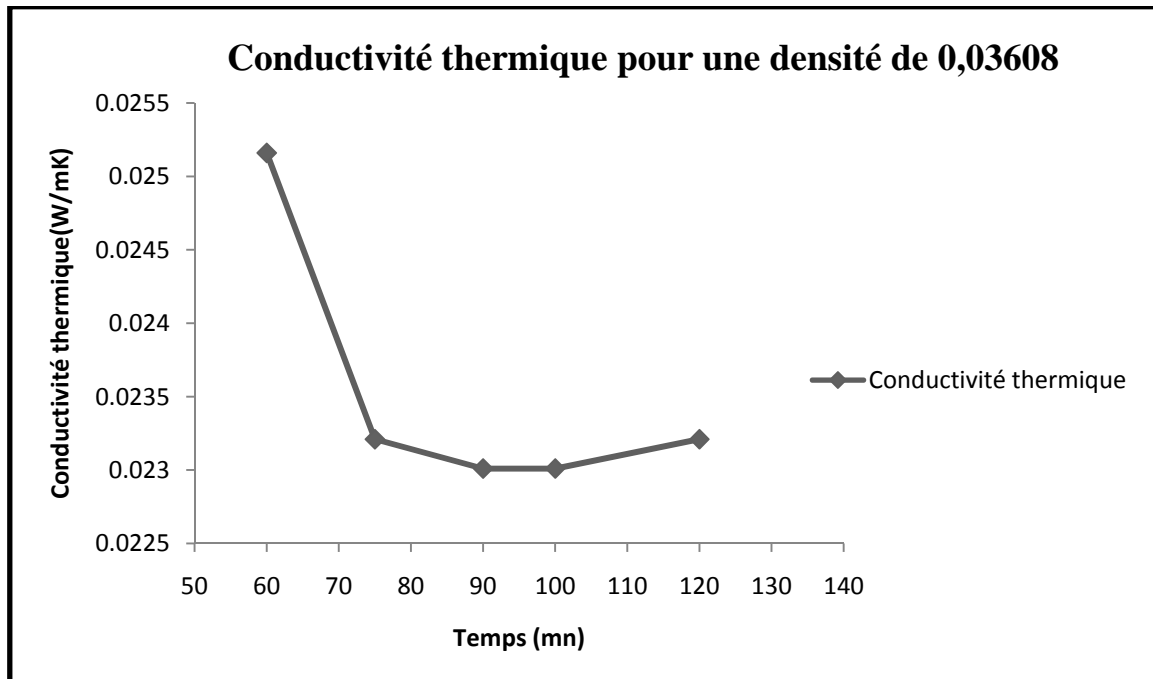


Diagramme IV.16. Variation de la conductivité thermique en fonction du temps pour une densité de 0,03608

IV.6.5.2. Analyse des résultats de l'expérience 5:

L'intervalle [60mn-90mn] : On remarque que dans cet intervalle, la conductivité thermique diminue ce qui est dû à l'augmentation de la résistance thermique du matériau et nous remarquons aussi selon les résultats de l'expérience que la valeur de HFM diminue dans cet intervalle et les températures restent presque constantes.

L'intervalle [90mn-100mn] : Dans cet intervalle de temps la conductivité thermique atteint le régime permanent, et toutes les valeurs de températures et de HFM sont stables (fixes).

L'intervalle [100mn-120mn] : On remarque que la courbe remonte légèrement, ce qui signifie que la conductivité thermique de la mousse augmente, cette augmentation est due à la perte de la résistance thermique du matériau.

IV.6.5.3. Conclusion 5:

Pour un échantillon en mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane qui a une épaisseur égale à 70 mm, et une densité en panneau égale à 0,03608, cette valeur est plus grande que la valeur maximale tolérée pour la densité en panneau qui est 0,035, la valeur optimale de la conductivité thermique est obtenue après 90mn et elle est égale à 0,02301 W/m.k, et on peut remarquer que cette valeur est plus élevée que celle obtenue avec des densités qui appartiennent à l'intervalle [0,033-0,035].

IV.6.6. Expérience 6:

On prend un autre échantillon en mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane qui a une épaisseur égale à 70mm et une densité en panneau égale à $36,69 \cdot 10^{-3}$ en utilisant l'appareil de mesure de la conductivité thermique on prélève les résultats suivants :

1) Après 60 mn :

$$I_S = 70 \text{ mm} = 0.07 \text{ m}$$

$$\text{HFM} = 3,96 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T_1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 9,20^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,20}{2} = 22,1^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,20 = 25,80^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_1 = \frac{0,07 \left[\left((-12,7377) + (0,2364221) \right) + \left((3,3452 + (0,0459221)) \cdot 3,96 \right) + \left((0,0567 + (-0,0007221)) \cdot (3,96)^2 \right) \right]}{25,8}$$

$$\lambda_1 = 0,02800 \text{ W/m.K}$$

2) Après 80mn :

$$I_S = 70 \text{ mm} = 0.07 \text{ m}$$

$$\text{HFM} = 3,69 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T_1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 9,20^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,20}{2} = 22,10^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,20 = 25,8^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_2 = \frac{0,07 \left[(-12,7377) + (0,2364221) + ((3,3452 + (0,0459221)) \cdot 3,69) + ((0,0567 + (-0,0007221)) \cdot (3,69)^2) \right]}{25,8}$$

$$\lambda_2 = \mathbf{0,02400 \text{ W/m.K}}$$

3) Après 90 mn :

$$I_S = 70 \text{ mm} = 0.07 \text{ m}$$

$$\text{HFM} = 3,61 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T_1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 9,20^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,20}{2} = 22,10^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,20 = 25,80^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_3 = \frac{0,07 \left[(-12,7377) + (0,2364221) + ((3,3452 + (0,0459221)) \cdot 3,61) + ((0,0567 + (-0,0007221)) \cdot (3,61)^2) \right]}{25,8}$$

$$\lambda_3 = \mathbf{0,02377 \text{ W/m.K}}$$

4) Après 100 mn :

$$I_5 = 70 \text{ mm} = 0.07 \text{ m}$$

$$\text{HFM} = 3,61 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T2 = 9,20^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,20}{2} = 22,10^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,20 = 25,80^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_4 = \frac{0,07 \left[(-12,7377) + (0,2364221) + ((3,3452 + (0,0459221)) \cdot 3,61) + ((0,0567 + (-0,0007221)) \cdot (3,61)^2) \right]}{25,8}$$

$$\lambda_4 = \mathbf{0,02377 \text{ W/m.K}}$$

5) Après 110 mn :

$$I_5 = 70 \text{ mm} = 0.07 \text{ m.}$$

$$\text{HFM} = 3,81 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T2 = 9,20^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,20}{2} = 22,10^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,20 = 25,80^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_5 = \frac{0,07 \left[(-12,7377) + (0,2364221) + ((3,3452 + (0,0459221)) \cdot 3,81) + ((0,0567 + (-0,0007221)) \cdot (3,81)^2) \right]}{25,8}$$

$$\lambda_5 = \mathbf{0,02630 \text{ W/m.K}}$$

IV.6.6.1. Résultats de l'expérience 6:

Les valeurs de la conductivité thermique pour une densité en panneau égale à $36,69 \cdot 10^{-3}$ et après différentes périodes sont représentées dans le tableau suivant :

Essais	Temps (mn)	Conductivité thermique λ (W/m.K)
1	60	0,02800
2	80	0,024
3	90	0,02377
4	100	0,02377
5	110	0,02630

Tableau 43: Variation de la conductivité thermique en fonction du temps pour une densité en panneau de 0,03669

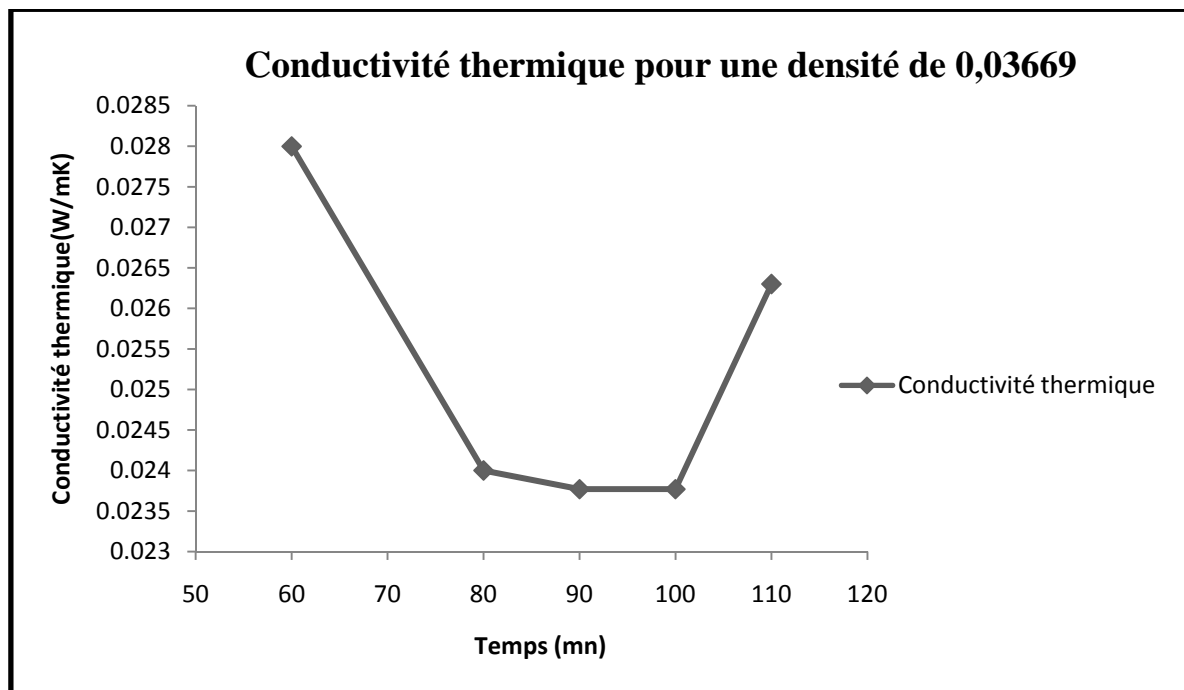


Diagramme IV.17. Variation de la conductivité thermique en fonction du temps pour une densité de 0,03669

IV.6.6.2. Analyse des résultats de l'expérience 6:

L'intervalle [60mn-90mn] : On remarque que dans cet intervalle, la conductivité thermique diminue ce qui est due à l'augmentation de la résistance thermique du matériau et nous remarquons aussi selon les résultats de l'expérience que la valeur de HFM diminue dans cet intervalle et les températures restent presque constantes.

L'intervalle [90mn-100mn] : Dans cet intervalle de temps la conductivité thermique atteint le régime permanent, et toutes les valeurs de températures et de HFM sont stables (fixes).

L'intervalle [100mn-110mn] : On remarque que la courbe remonte d'une manière très remarquable, ce qui signifie que la conductivité thermique de la mousse a beaucoup

augmentée, cette augmentation est due au fait que la densité du matériau est grande ce qui signifie qu'il y a plus de matière polymère dans le matériau plutôt que le vide (les alvéoles) et sachant que la conduction thermique se fait à travers la matière (grâce aux électrons), donc la conductivité thermique augmente avec l'augmentation du temps d'exposition du matériau à la chaleur et l'isolation thermique diminue.

IV.6.6.3. Conclusion 6:

Pour un échantillon en mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane qui a une épaisseur égale à 70 mm, et une densité en panneau égale à 0,03669, la valeur optimale de la conductivité thermique est obtenue après 90mn et elle est égale à 0,02377 W/m.k, et on peut remarquer que cette valeur est plus élevée que celle obtenue avec une densité de 0,03608 pour la même épaisseur.

IV.6.7. Expérience 7:

On prend un autre échantillon en mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane qui a une épaisseur égale à 70mm et une densité en panneau égale à $38,98.10^{-3}$ en utilisant l'appareil de mesure de la conductivité thermique on prélève les résultats suivants :

1) Après 70 mn :

$$I_s = 70 \text{ mm} = 0.07 \text{ m}$$

$$\text{HFM} = 4,3 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T_1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 9,20^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,20}{2} = 22,10^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,20 = 25,80^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_1 = \frac{0,07 \left[(-12,7377) + (0,2364221) + (3,3452 + (0,0459221) \cdot 4,3) + ((0,0567 + (-0,0007221)) \cdot (4,3)^2) \right]}{25,8}$$

$$\lambda_1 = 0,03254 \text{ W/m.K}$$

2) Après 80 mn :

$$I_s = 70 \text{ mm} = 0.07 \text{ m}$$

$$\text{HFM} = 4,20 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T_1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 9,20^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,20}{2} = 22,10^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,20 = 25,8^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_2 = \frac{0,07 \left[(-12,7377) + (0,2364221) + ((3,3452 + (0,0459221)) \cdot 4,20) + ((0,0567 + (-0,0007221)) \cdot (4,20)^2) \right]}{25,8}$$

$$\lambda_2 = \mathbf{0,03128 \text{ W/m.K}}$$

3) Après 110 mn :

$$I_S = 70 \text{ mm} = 0.07 \text{ m}$$

$$\text{HFM} = 4,09 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T_1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 9,20^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35 + 9,20}{2} = 22,10^\circ\text{C}$$

$$dt = 35 - 9,20 = 25,80^\circ\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_3 = \frac{0,07 \left[(-12,7377) + (0,2364221) + ((3,3452 + (0,0459221)) \cdot 4,09) + ((0,0567 + (-0,0007221)) \cdot (4,09)^2) \right]}{25,8}$$

$$\lambda_3 = \mathbf{0,02986 \text{ W/m.K}}$$

4) Après 120 mn :

$$I_S = 70 \text{ mm} = 0.07 \text{ m}$$

$$\text{HFM} = 4,09 \text{ MV}$$

$$\text{Pour : } T_1 = 35^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 9,20^\circ\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35+9,20}{2} = 22,10^{\circ}\text{C}$$

$$dt = 35-9,20 = 25,80^{\circ}\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_4 = \frac{0,07 \left[(-12,7377) + (0,236422,1) + ((3,3452 + (0,045922,1)) \cdot 4,09) + ((0,0567 + (-0,000722,1)) \cdot (4,09)^2) \right]}{25,8}$$

$$\lambda_4 = \mathbf{0,02986 \text{ W/m.K}}$$

5) Après 130 mn :

$$I_5 = 70 \text{ mm} = 0.07 \text{ m.}$$

$$\text{HFM} = 4,11 \text{ MV}$$

Pour : $T1 = 35^{\circ}\text{C}$

$$T2 = 9,20^{\circ}\text{C}$$

On aura :

$$\bar{T} = \frac{35+9,20}{2} = 22,10^{\circ}\text{C}$$

$$dt = 35-9,20 = 25,80^{\circ}\text{C}$$

Selon la formule de la conductivité on aura :

$$\lambda_5 = \frac{0,07 \left[(-12,7377) + (0,236422,1) + ((3,3452 + (0,045922,1)) \cdot 4,11) + ((0,0567 + (-0,000722,1)) \cdot (4,11)^2) \right]}{25,8}$$

$$\lambda_5 = \mathbf{0,03011 \text{ W/m.K}}$$

IV.6.7.1. Résultats de l'expérience 7:

Les valeurs de la conductivité thermique pour une densité en panneau égale à $38,98 \cdot 10^{-3}$ et après différentes périodes sont représentées dans le tableau suivant :

Essais	Temps (mn)	Conductivité thermique λ (W/m.K)
1	70	0,03254
2	80	0,03128
3	110	0,02986
4	120	0,02986
5	130	0,03011

Tableau 44: Variation de la conductivité thermique en fonction du temps pour une densité en panneau de 0,03898

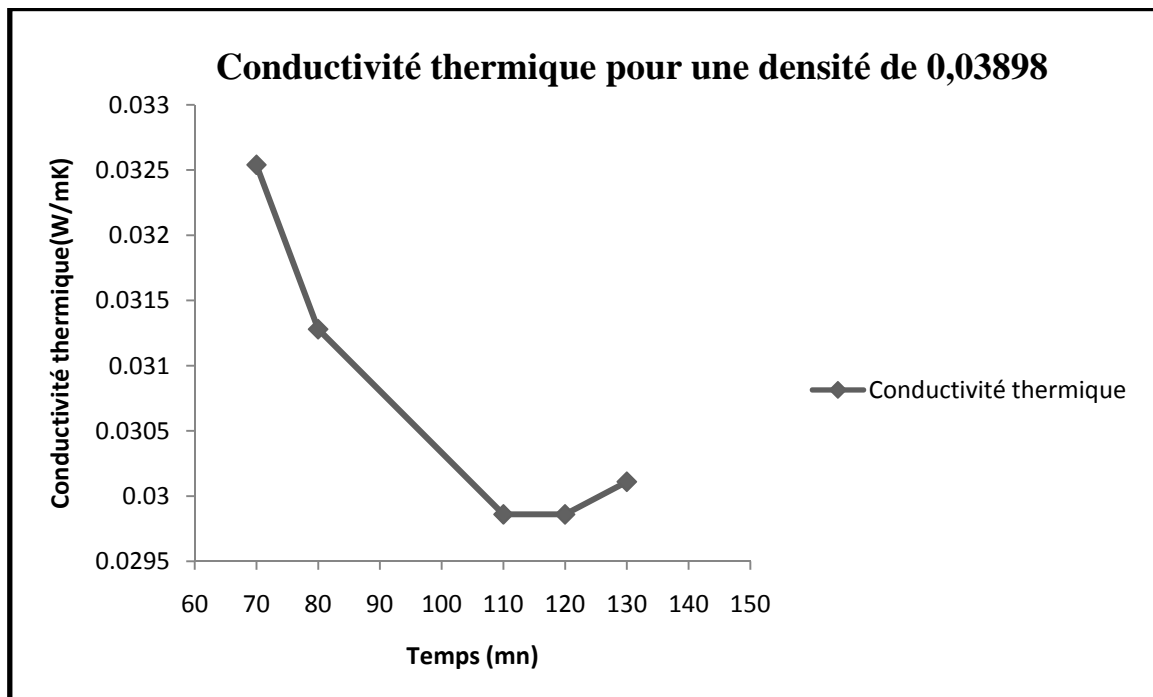


Diagramme IV.18. Variation de la conductivité thermique en fonction du temps pour une densité de 0,03898

IV.6.7.2. Analyse des résultats de l'expérience 7:

L'intervalle [70mn-110mn] : On remarque que dans cet intervalle, la conductivité thermique diminue ce qui est dû à l'augmentation de la résistance thermique du matériau et nous remarquons aussi selon les résultats de l'expérience que la valeur de HFM diminue dans cet intervalle et les températures restent presque constantes.

L'intervalle [110mn-120mn] : Dans cet intervalle de temps la conductivité thermique atteint le régime permanent, et toutes les valeurs de températures et de HFM sont stables (fixes).

L'intervalle [120mn-130mn] : On remarque que la courbe remonte légèrement, ce qui signifie que la conductivité thermique de la mousse augmente, cette augmentation est due à la perte de la résistance thermique du matériau.

IV.6.7.3. Conclusion 7:

Pour un échantillon en mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane qui a une épaisseur égale à 70 mm, et une densité en panneau égale à 0,03898, cette valeur est très grande, la valeur optimale de la conductivité thermique est obtenue après 90mn et elle est égale à 0,02986 W/m.k, et on peut remarquer que cette valeur est très élevée.

IV.6.8. Le digramme de l'effet de la densité sur la conductivité thermique :

En utilisant les résultats obtenus dans les expériences précédentes sur la variation de la conductivité en fonction de la densité en aura le tableau suivant:

Expérience	Densité de référence	Densité	Conductivité thermique (W/mK)
1	[0,033-0,035]	0,02641	0,03900
2	[0,033-0,035]	0,03303	0,02147
3	[0,033-0,035]	0,03375	0,02093
4	[0,033-0,035]	0,03456	0,02138
5	[0,033-0,035]	0,03608	0,02301
6	[0,033-0,035]	0,03669	0,02377
7	[0,033-0,035]	0,03898	0,02986

Tableau 45: variation de la conductivité thermique en fonction de la densité

Le diagramme de la variation de la conductivité thermique en fonction de la densité est le suivant :

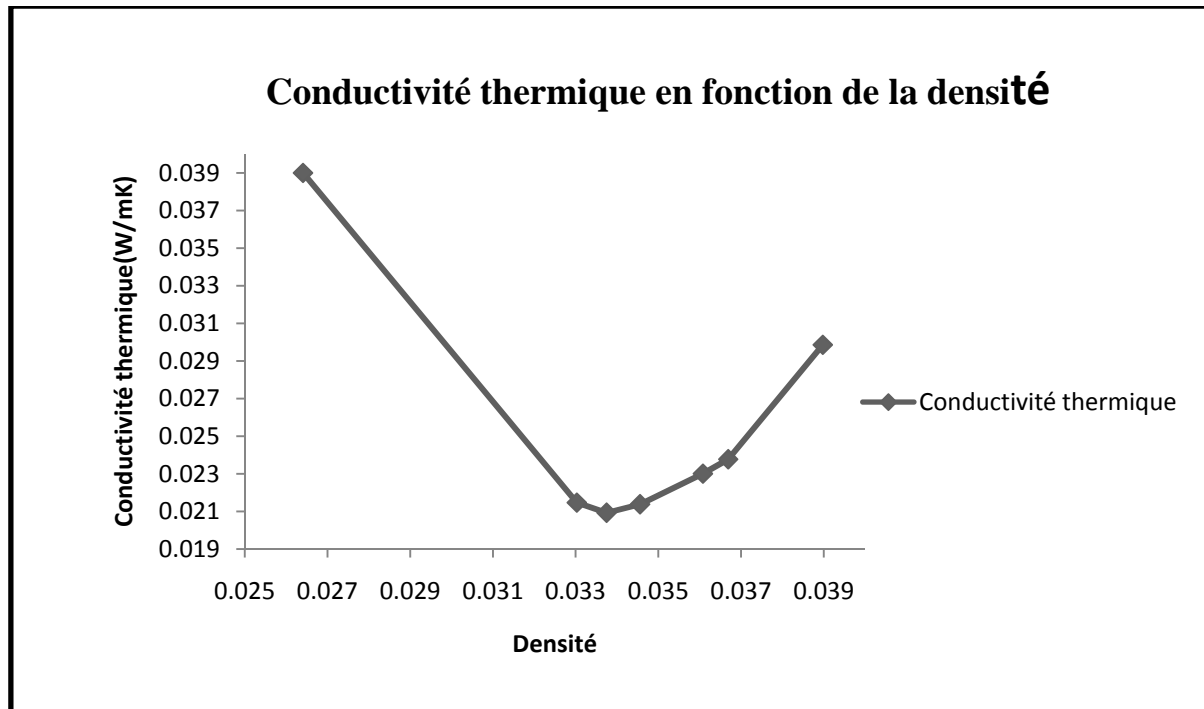


Diagramme IV.19. Variation de la conductivité en fonction de la densité en panneau

IV.6.8.1. Interprétation du diagramme :

L'intervalle [0,02641-0,03305] : la conductivité thermique augmente de plus en plus qu'on s'éloigne de la valeur maximale de cet intervalle qui est 0,033.

L'intervalle [0,3303-0,03456] : la conductivité thermique varie de [0,020-0,022].

L'intervalle [0,035-0,03898] : la conductivité thermique augmente de plus en plus.

IV.6.8.2. Conclusion :

La conductivité thermique varie en fonction de la densité du matériau, car pour des densités qui appartiennent à l'intervalle [0,033-0,035], les valeurs de la conductivité thermique sont incluses dans l'intervalle [0,020-0,022], et au delà de cet intervalle, la conductivité thermique sera plus grande et augmente de plus en plus qu'en s'éloigne de cette plage.

IV.7. L'effet de la température sur la conductivité thermique :

La conductivité thermique change en fonction de la température et pour étudier ce phénomène on effectue plusieurs essais en utilisant le même échantillon c'est-à-dire avec une densité et une épaisseur qui ne change pas, pour annuler leurs effets, en utilisant le débit mètre, on calcule la conductivité thermique, en faisant varier la température de la plaque chaude « T_1 » et en appliquant la même méthode de calcul de la conductivité thermique que les expériences précédentes, on aura les résultats suivants :

Essais	Température en (°C)	Conductivité thermique (W/m.K)
1	15	0,0193
2	20	0,0201
3	25	0,0209
4	30	0,0220
5	35	0,0229
6	40	0,0240
7	45	0,0258
8	50	0,0281

Tableau 46: Variation de la conductivité en fonction de la température

Le diagramme de la variation de la conductivité thermique en fonction d la température est le suivant :

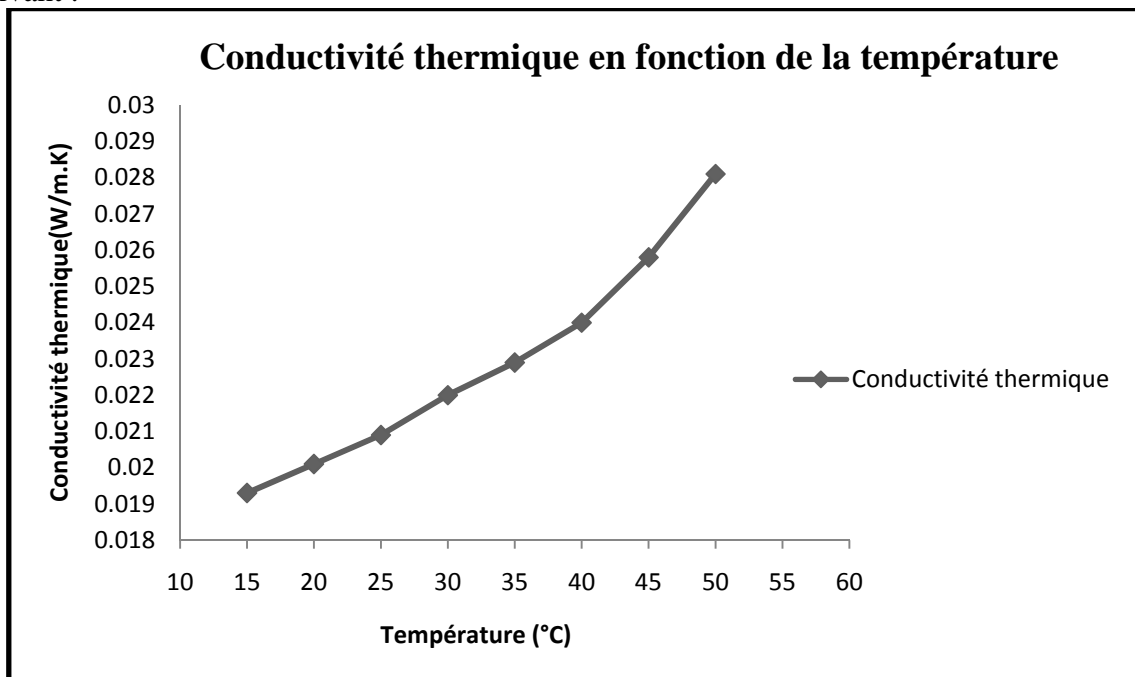


Diagramme IV.20. Variation de la conductivité en fonction de la température

IV.7.1. Interprétation du diagramme :

La conductivité thermique augmente avec l'augmentation de la température « T_I » qui représente la température du milieu extérieur dans la réalité, et on remarque que pour des

températures (en °C) qui appartiennent à l'intervalle [20-30] (c'est des valeurs de températures habituelles), les valeurs de la conductivité thermique (en W/m.K) qui lui correspondent varient de [0,020-0,022], ce qui représente des valeurs acceptables pour la conductivité thermique et l'appareil dans ce cas assure une bonne isolation thermique, mais au de là de cet intervalle, la conductivité thermique augmente de plus en plus, par conséquent, la résistance thermique diminue, ce qui implique une mauvaise isolation thermique.

IV.7.2. Conclusion :

La température du milieu extérieure influe sur la conductivité thermique du réfrigérateur, donc pour une meilleure isolation thermique d'un réfrigérateur la température du milieu extérieur doit être minimale et pour des températures supérieures à 30°C, l'appareil devient de plus en plus moins performant.

IV.8. Conclusion :

La conductivité thermique de la mousse polyuréthane rigide utilisée pour l'isolation thermique des réfrigérateurs, varie sous l'influence de plusieurs paramètres tel que :

- 1). Le temps ;
- 2). La densité du matériau ;
- 3). La température du milieu extérieur.

Chapitre V

L'influence de l'épaisseur sur la résistance thermique**Caractérisation physique****V.1. Introduction :**

Sachant que l'une des caractéristiques les plus recherchées dans le domaine de l'isolation thermique est bien la résistance thermique. Dans la pratique, le coefficient de conductivité ne suffit pas à indiquer la qualité isolante d'une paroi, on tient compte aussi de l'épaisseur de la paroi du matériau et on parlera de la résistance thermique. Dans ce chapitre, on va montrer l'influence de l'épaisseur sur la résistance thermique de la mousse polyuréthane rigide, tout en utilisant deux agents gonflant différents, qui sont « le CFC » et « le cyclopentane », et on compare ces résultats, on pourra proposer une épaisseur qui assure la meilleure résistance thermique, ce qui veut dire une meilleure isolation thermique pour la mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane utilisée en ce moment pour l'isolation thermique des réfrigérateurs à l'ENIEM.

V.2. La résistance thermique : [17], [18]

Il faut savoir que les matériaux en général opposent une résistance thermique. Celle d'un matériau isolant est généralement d'autant plus élevée que son épaisseur « e » est grande et que son coefficient de conductivité « λ » est faible, c'est-à-dire que plus la résistance thermique est grande, plus la quantité de chaleur traversant le corps est faible. Un isolant thermique est donc un corps qui possède une résistance thermique de conduction importante et elle est intrinsèque, c'est-à-dire en ne tenant pas compte de la surface exposée.

V.3. La méthode de calcul de la résistance thermique « R » :

La résistance thermique « R » est calculée selon la loi suivante :

$$R = e / \lambda$$

R : S'exprime en m^2 par degré et par watt. $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$.

e : L'épaisseur du matériau exprimée en m.

λ : La conductivité thermique en $\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$

V.4. Le coefficient de transfert thermique global « k » :

C'est la quantité de chaleur transmise à travers une unité de surface, par unité de temps et par degré de différence de température (on ne tient pas en compte la convection et le rayonnement). Le coefficient de transfert thermique « k » a aussi une relation avec la résistance thermique de conduction R tel que :

$$R = \frac{1}{k}$$

L'inverse de k est exprimé en $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$.

Donc, le coefficient de transfert thermique global k est calculé selon la loi suivante :

$$k = \frac{\lambda}{e}$$

Tel que :

k : Coefficient de transfert thermique global exprimé en $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$.

e : l'épaisseur du matériau exprimée en m.

λ : la conductivité thermique en $\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.

✓ **Remarque :**

Plus k est faible plus le matériau est isolant car sa résistance thermique augmente.

V.5. Calcul de la résistance thermique :

On calcul la résistance thermique des parois du réfrigérateur en utilisant les deux types de mousses polyuréthane rigide, l'une expansée par le CFC et l'autre par le cyclopentane. Les résistances thermiques des différentes parois de l'armoire du réfrigérateur sont calculées à partir de l'équation déjà citée, qui est la suivante :

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

R : La résistance thermique ($\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$)

e : L'épaisseur de la mousse des parois du réfrigérateur (m)

λ : La conductivité thermique ($\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)

V.5.1. Cas d'une mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane :

On calcule la résistance thermique de la mousse polyuréthane rigide expansée par le cyclopentane qui est l'agent gonflant utilisé en ce moment à l'ENIEM.

V.5.1.1. Expérience 1 :

A l'aide d'un pied à coulisse on prend les épaisseurs de la mousse des parois d'un réfrigérateur de type 220F.

La conductivité thermique λ ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$) obtenue lors de l'élaboration de la mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane au laboratoire de l'ENIEM (vu au chapitre IV) est comprise entre les valeurs suivantes : $0,020 \leq \lambda \leq 0,022$ et dans ce cas on va prendre :

$$\lambda = 0,021 \text{ W/m.K}$$

V.5.1.2. Résultats de l'expérience 1 :

À partir de cette valeur de la conductivité thermique, on calcul les résistances thermiques des différentes parois du réfrigérateur, on utilisant la loi de calcul de la résistance thermique citée précédemment, les résultats sont représentés dans le tableau suivant :

Partie de l'armoire	Epaisseur (m)	Résistance thermique ($\text{m}^2.\text{K}/\text{W}$)
Paroi latérale droite	$52 \cdot 10^{-3}$	2,476
Paroi latérale gauche	$52 \cdot 10^{-3}$	2,476
Face de dessus	$55 \cdot 10^{-3}$	2,619
Face de dessous	$62 \cdot 10^{-3}$	2,952
Panneau arrière	$68 \cdot 10^{-3}$	3,238

Tableau 47: Valeurs des épaisseurs des différentes parties du réfrigérateur et leurs résistances thermiques

Le diagramme de la variation de la résistance thermique en fonction de l'épaisseur des différentes parties du réfrigérateur est le suivant :

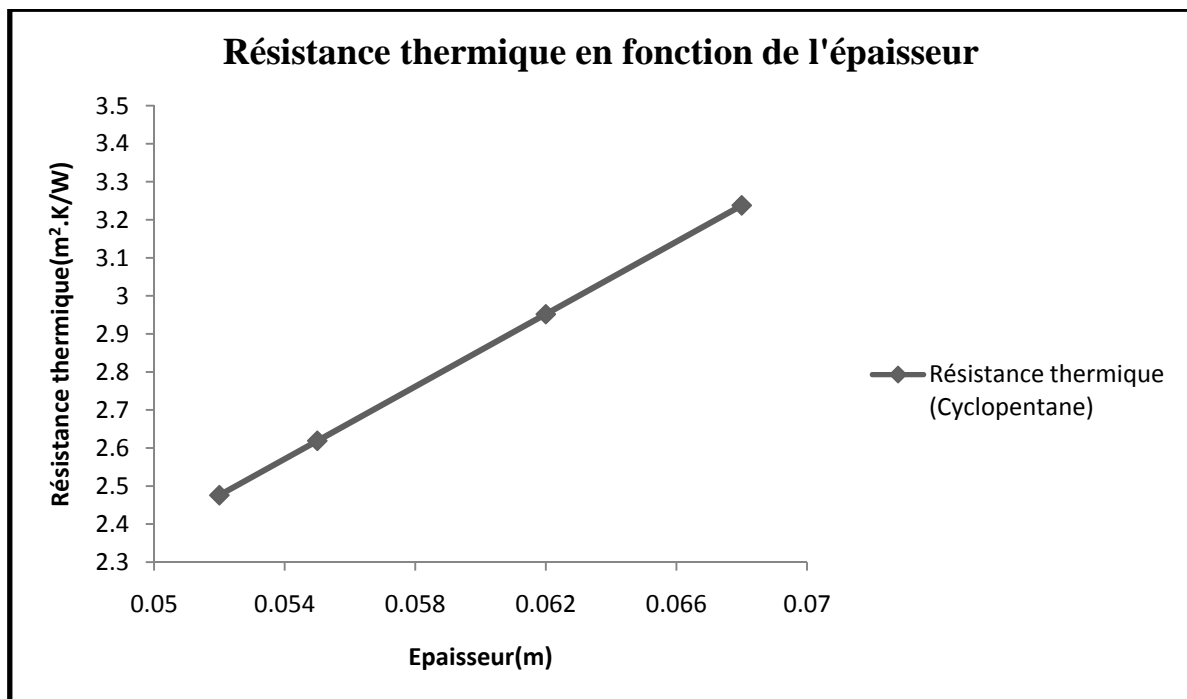


Diagramme V.21. Variation de la résistance thermique en fonction de l'épaisseur

V.5.1.3. L'analyse des résultats de l'expérience 1:

On remarque que la courbe de la variation de la résistance thermique en fonction de l'épaisseur pour une mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane est une droite ce qui signifie que la résistance thermique augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la paroi du réfrigérateur.

V.5.1.4. Conclusion1 :

L'isolation thermique varie en fonction de l'épaisseur de la paroi, plus l'épaisseur est élevée plus l'isolation thermique est meilleure.

V.5.2. Cas d'une mousse polyuréthane rigide à base du CFC :

On calcule la résistance thermique de la mousse expansée par l'agent gonflant « CFC » des différentes parois d'un réfrigérateur.

V.5.2.1. Expérience 2 :

Pour le même type de réfrigérateur on prend les épaisseurs de la mousse de ces différentes parois à l'aide d'un pied à coulisse.

La mousse polyuréthane rigide à base de CFC possède, une conductivité thermique λ (w/m.k) comprise entre ses valeurs : $0.016 \leq \lambda \leq 0.018$, cette valeur est tirée de la pratique dans l'entreprise ENIEM, lors de l'utilisation du CFC comme agent gonflant, qui est éliminé maintenant vu son effet destructif sur la couche d'ozone (voir le chapitre II).

Dans nos calculs, on considère la valeur moyenne de la conductivité thermique suivante :

$$\lambda = 0.017 \text{ W/m.K.}$$

V.5.2.2. Résultats de l'expérience 2 :

Les épaisseurs de la mousse dans les différentes parties de l'armoire et les résultats de calculs des résistances thermiques qui leurs correspondents sont représentés dans le tableau suivant :

Partie de l'armoire	Epaisseur (m)	Résistance thermique (m ² .K/W)
Paroi latérale droite	$52 \cdot 10^{-3}$	3,058
Paroi latérale gauche	$52 \cdot 10^{-3}$	3,058
Face de dessus	$55 \cdot 10^{-3}$	3,235
Face de dessous	$62 \cdot 10^{-3}$	3,647
Panneau arrière	$68 \cdot 10^{-3}$	4,000

Tableau 48: Valeurs des épaisseurs des différentes parties du réfrigérateur et leurs résistances thermiques

Le diagramme de la variation de la résistance thermique en fonction de l'épaisseur des différentes parties du réfrigérateur est le suivant :

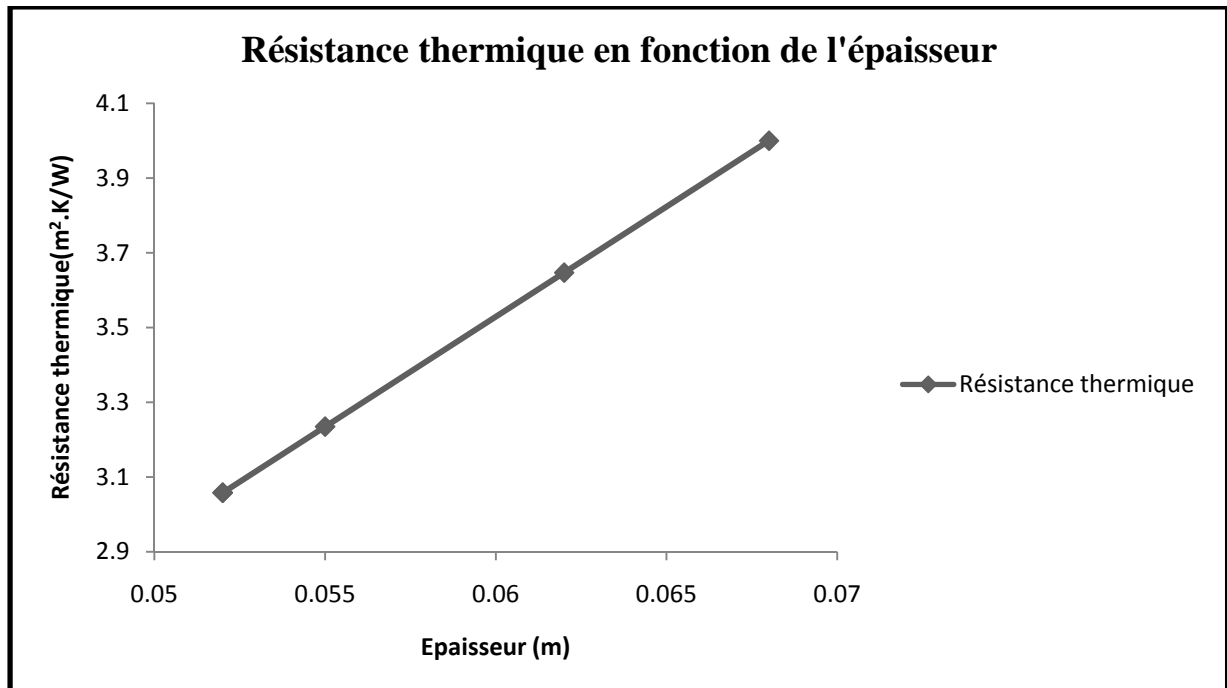


Diagramme V.22. Variation de la résistance thermique en fonction de l'épaisseur

V.5.2.3. L'analyse des résultats de l'expérience 2:

On remarque que la courbe de la variation de la résistance thermique en fonction de l'épaisseur pour une mousse polyuréthane rigide à base du CFC est une droite, ce qui signifie que la résistance thermique augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la paroi du réfrigérateur.

V.5.2.4. Conclusion 2 :

Plus l'épaisseur est élevée, plus l'isolation thermique sera meilleure.

V.5.3. Comparaison des résultats :

La comparaison des deux courbes de la variation de la résistance thermique en fonction de l'épaisseur pour une mousse polyuréthane rigide expansée par l'agent gonflant «le CFC» et celle expansée avec «le cyclopentane» apparaît d'une manière très claire dans le diagramme suivant :

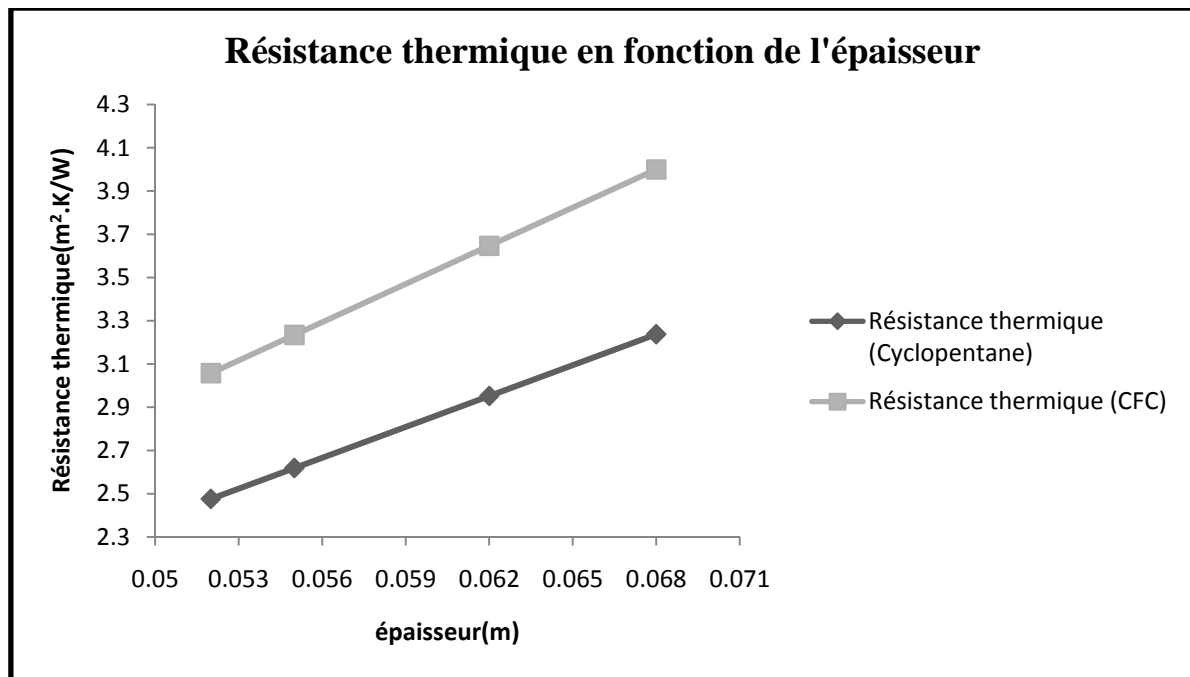


Diagramme V.23. Variation de la résistance thermique en fonction de l'épaisseur pour la mousse à base du CFC et celle à base du cyclopentane

V.5.3.1. Interprétation des résultats obtenus:

On remarque que la résistance thermique de la mousse de polyuréthane rigide expansée par le cyclopentane est plus faible que celle expansée par le CFC.

V.5.3.2. Conclusion :

Pour compenser la perte de chaleur de la mousse polyuréthane à base du cyclopentane, on doit augmenter son épaisseur.

V.6. La compensation de la résistance thermique par une surépaisseur :

Comme nous l'avons constaté, dans notre étude comparative des mousses polyuréthane rigide à base du cyclopentane et celle à base du « CFC », que la résistance thermique de cette dernière est bien meilleure, donc dans le but de compenser cette différence de résistance thermique on a proposé de faire augmenter l'épaisseur de la paroi de la mousse isolante expansée par l'agent gonflant, « le cyclopentane », dans les réfrigérateurs de l'ENIEM.

V.6.1. Calcule de la surépaisseur de la mousse PUR à base du cyclopentane:

Pour trouver les valeurs des surépaisseurs nécessaires pour la compensation des pertes de chaleur par les parois de réfrigérateur contenant une mousse d'isolation en polyuréthane rigide expansée par le cyclopentane on doit calculer d'abord les épaisseurs qui assurent une résistance thermique égale à celle obtenue avec une mousse polyuréthane rigide expansée par le CFC puis on extrait la surépaisseur qui est la différence entre les deux valeurs calculées pour chaque parois du réfrigérateur.

1) Calcul des épaisseurs :

On calcule les nouvelles épaisseurs de la mousse polyuréthane expansée avec du cyclopentane qui assurent les mêmes résistances thermiques obtenues avec une mousse polyuréthane rigide à base du CFC pour chaque parois du réfrigérateur.

On prend la valeur de la conductivité thermique de la mousse polyuréthane expansée par le cyclopentane suivante:

$$\lambda = 0.021 \text{ W/m.K}$$

Et on applique la loi suivante pour le calcul des épaisseurs recherchées :

$$e = R.\lambda$$

Tel que :

e : Epaisseur de la mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane nécessaire pour assurer la même résistance que celle obtenue avec la mousse expansée par le CFC pour les différentes parois du réfrigérateur.

R : Résistance thermique de la mousse polyuréthane rigide à base du CFC

λ : La conductivité thermique de la mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane

Les résultats de calcul sont représentés dans le tableau suivant :

Parois du réfrigérateur	Résistance thermique (m².K/W)	Conductivité thermique (W/m.K)	Epaisseur (m)
Paroi latérale droite	3,058	0,021	64,22.10 ⁻³
Paroi latérale gauche	3,058	0,021	64,22.10 ⁻³
Face de dessus	3,235	0,021	67,94.10 ⁻³
Face de dessous	3,647	0,021	76,59.10 ⁻³
Panneau arrière	4,000	0,021	84,00.10 ⁻³

Tableau 49: valeurs des nouvelles épaisseurs de la mousse polyuréthane rigide à base du « cyclopentane »

2) Calcul des surépaisseurs :

Pour calculer les surépaisseurs nécessaires pour la compensation des pertes de chaleur de la mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane, on fait la différence entre les nouvelles épaisseurs calculées pour assurer une résistance thermique égale à celles trouvées avec une mousse de PUR expansée par le CFC, avec les valeurs des épaisseurs données par la pratique dans l'entreprise ENIEM (cas d'un réfrigérateur 220F) pour la mousse de PUR expansée par le cyclopentane, pour chaque parois.

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Parois du réfrigérateur	L'ancienne épaisseur (m)	La nouvelle épaisseur (m)	La surépaisseur (m)
Paroi latérale droite	$52 \cdot 10^{-3}$	$64,22 \cdot 10^{-3}$	$12,22 \cdot 10^{-3}$
Paroi latérale gauche	$52 \cdot 10^{-3}$	$64,22 \cdot 10^{-3}$	$12,22 \cdot 10^{-3}$
Face de dessus	$55 \cdot 10^{-3}$	$67,94 \cdot 10^{-3}$	$12,94 \cdot 10^{-3}$
Face de dessous	$62 \cdot 10^{-3}$	$76,59 \cdot 10^{-3}$	$14,59 \cdot 10^{-3}$
Panneau arrière	$68 \cdot 10^{-3}$	$84,00 \cdot 10^{-3}$	$16 \cdot 10^{-3}$

Tableau 50 : Valeurs des surépaisseurs pour la mousse polyuréthane rigide à base du « cyclopentane »

3) Cas Général :

Donc, d'une façon générale : pour qu'une mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane ou un autre matériau isolant peut avoir la même résistance thermique avec une mousse à base du CFC, il suffit de calculer la surépaisseur de la mousse à base du cyclopentane ou de ce matériau isolant qu'on veut utiliser avec la méthode suivante :

R_1 : résistance thermique de la mousse PUR à base du CFC.

e_1 : épaisseur de la mousse PUR à base du CFC.

λ_1 : conductivité thermique de la mousse PUR à base du CFC

R_2 : résistance thermique de la mousse PUR à base du cyclopentane ou autres matériaux.

e_2 : épaisseur de la mousse PUR à base du cyclopentane ou du matériau isolant.

λ_2 : conductivité thermique de la mousse PUR à base du cyclopentane ou du matériau isolant.

On faisant une analogie entre ces deux équations :

$$R_1 = e_1 / \lambda_1 \quad \text{et} \quad R_2 = e_2 / \lambda_2$$

Pour avoir :
$$R_1 = R_2$$

Il suffit d'avoir:

$$e_1 / \lambda_1 = e_2 / \lambda_2 \quad \Longrightarrow \quad e_2 = e_1 \cdot \lambda_2 / \lambda_1$$

V.8. Conclusion :

L'épaisseur de la mousse polyuréthane rigide utilisée pour l'isolation thermique des parois des réfrigérateurs, joue un rôle primordiale, car la résistance thermique augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la mousse, et vue cette propriété avantageuse, on peut améliorer la performance du réfrigérateur qui contient une mousse polyuréthane rigide expansée par l'agent gonflant « le cyclopentane » qui possède une isolation thermique plus faible qu'une mousse expansée par « le CFC » , en calculant une surépaisseur qui assure la résistance thermique recherchée, ce qui permet d'avoir un meilleur rendement pour les réfrigérateurs.

Aspects microstructuraux

VI.1.Introduction

Dans cette partie, on s'intéresse à l'examen microstructural des mousses d'isolation utilisées au niveau des réfrigérateurs à l'ENIEM. En effet, il est intéressant de visualiser la nature et les dimensions des alvéoles formées par l'agent gonflant, le cyclopentane pour des mousses de différentes densités.

VI.2. La microstructure du matériau vue au microscope optique :

Tout d'abord, nous avons examiné les échantillons au microscope optique pour visualiser, à différents grossissements, les alvéoles formées par le cyclopentane. Ainsi, nous présentons ci – dessous, les mousses fabriquées par des mousses de différentes densités.

VI.3. Microstructure d'une mousse PUR à base du cyclopentane :

Nous avons pris la microstructure d'une mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane avec le microscope optique et aussi avec le microscope à balayage électronique (MEB). Un microscope électronique à balayage fournit des informations sous forme d'images lumineuses, résultant de l'interaction d'un faisceau d'électrons avec un volume microscopique de l'échantillon étudié.

VI.4. observation microscopique:

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

Echantillon I → $d = 0,03315$

Echantillon II → $d = 0,03428$

Echantillon III → $d = 0,03619$

Ces trois échantillon sont observés au microscope optique avec le même agrandissement (X100) puis (X200) à fin de mettre en évidence sa structure et la forme de ces cellules qui sont représentés dans les figures ci-dessous.

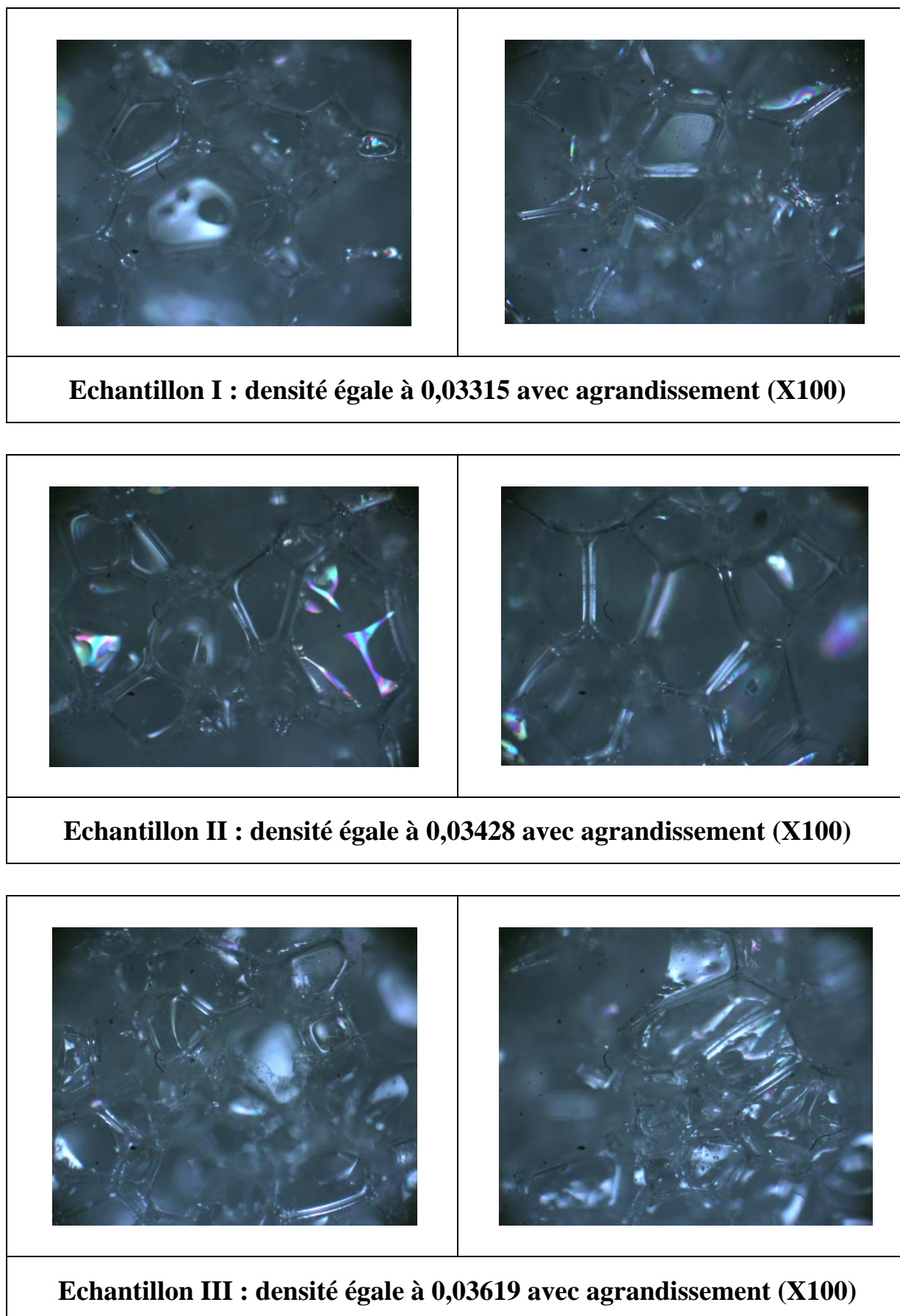


Figure VI.30. Microstructures des trois échantillons avec l'agrandissement (X100)

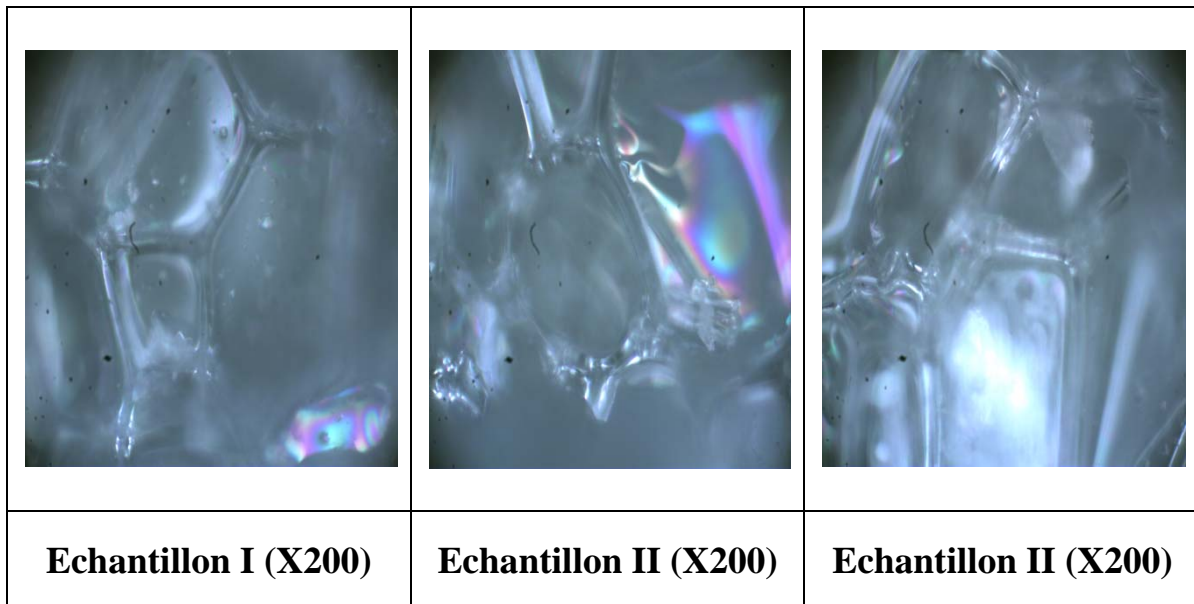


Figure VI.31. Microstructures des trois échantillons d'une mousse PUR à base du cyclopentane avec l'agrandissement (X200) vue au microscope optique

VI.5. Interprétation des microstructures :

On remarque que pour la mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane, la répartition des cellules est uniforme, avec un sens d'orientation bien définie, mais les microstructures prises avec le microscope optique nous révèlent la différence des formes des cellules en fonction de la densité car elles sont moins denses dans le cas de l'échantillon I qui possède une densité de 0,03315 et leurs volumes sont plus grands ce qui implique une conductivité thermique plus grande, donc un rétrécissement plus probable dû à la faible masse volumique donc faible densité ainsi qu'une mauvaise isolation thermique, ce qui rend le matériau moins rigide par rapport à l'échantillon II qui possède une densité égale à 0,03428, qui a une répartition uniforme et des bonnes dimensions cellulaires donc une conductivité thermique moins élevée, ce qui rend le matériau plus rigide avec une bonne isolation thermique, par rapport à l'échantillon III qui a une répartition plus au moins uniforme avec différentes dimensions cellulaires et très dense ce qui augmente la conductivité thermique et la résistance thermique diminue donc une mauvaise isolation thermique.

VI.6. Micrographie vues au microscope électronique à balayage (MEB) :

Nous avons pris les microstructures vues au microscope à balayage électronique, pour les trois échantillons d'une mousse polyuréthane rigide à base du cyclopentane qui ont des densités différentes que nous avons déjà vues au microscope optique, pour mieux voir les formes des cellules et mettre en évidence la différence des formes des cellules selon leur densité, et les microstructures suivantes le montrent très bien.

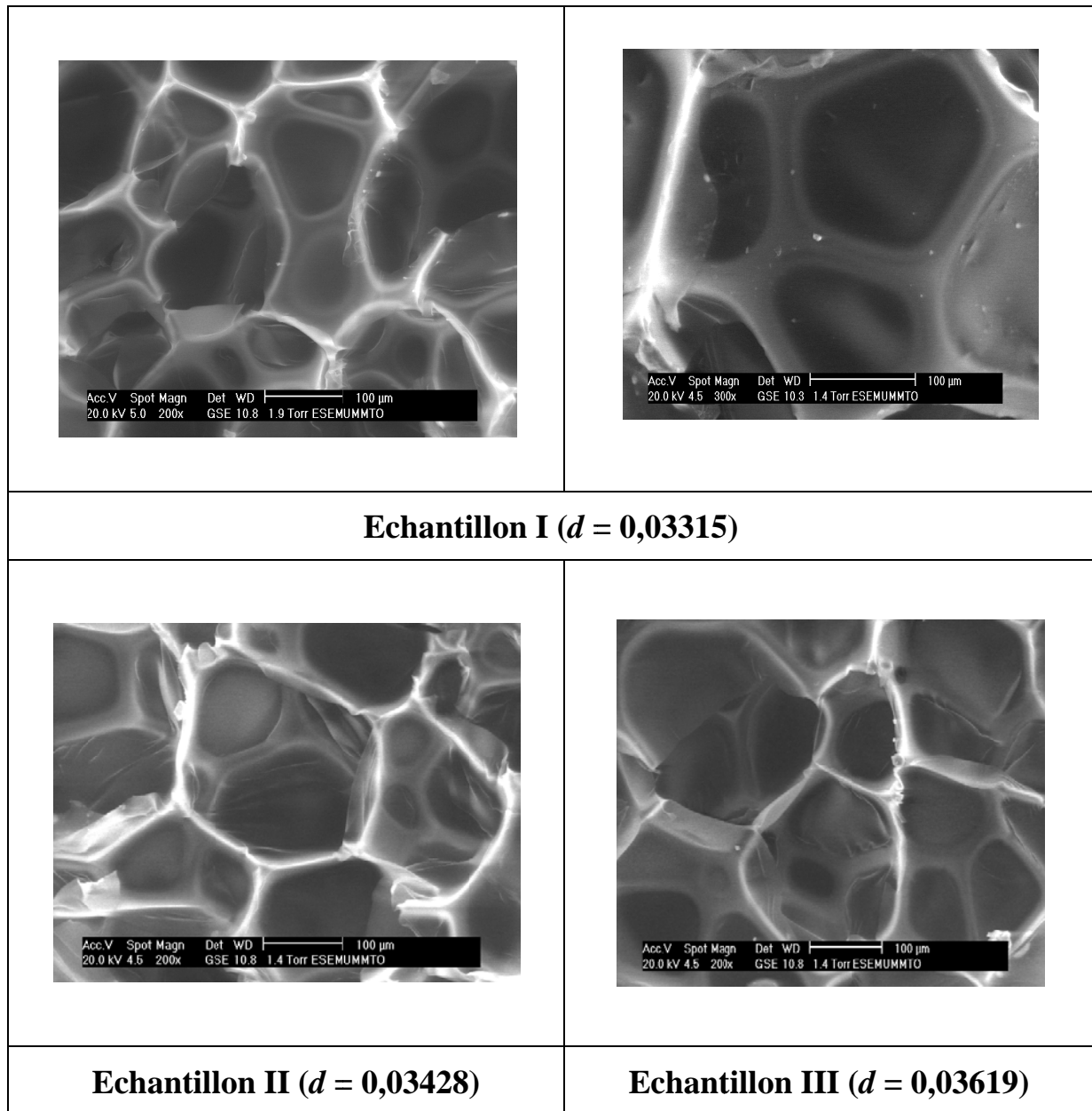


Figure VI.32. La microscopie des échantillons de différentes densités d'une mousse PUR à base du cyclopentane vue au microscope à balayage électronique

VI.7. Interprétation des microstructures:

La microstructure de l'échantillon II, c'est-à-dire celui l'échantillon qui possède une densité $d = 0,03428$, nous révèlent la forme hexagonale des alvéoles de la mousse qui ressemble bien à un nid d'abeilles et l'homogénéité et la distribution de ces alvéoles, tandis que les microstructures de l'échantillon I qui possède une densité égale à $0,03315$ nous montrent que les cellules sont plus grandes et parfois ouvertes et non homogènes, contrairement à l'échantillon III de densité de $0,03619$ qui nous qui nous montre bien les formes des cellules non homogènes qui sont condensées et cirées les unes contre les autres ce qui est due à la grande densité de la mousse.

VI.8. Conclusion

Par comparaison aux micrographies obtenues par la microscopie optique, celles obtenues au MEB sont nettement claires.

En effet, les alvéoles ont des formes hexagonales et semblent qu'il ressemble à un nid d'abeilles. On peut aisément apprécier l'homogénéité et la distribution de ces alvéoles pour les mousses qui possèdent une bonne densité

Conclusion générale

Dans le secteur des mousses, les émissions de gaz à effet de serre provenant des substances qui appauvrissent la couche d'ozone pourraient être réduites, et pour ce là nous avons proposé d'autres isolants thermiques, parmi ces divers types d'isolants, qui aidera à préserver l'environnement et assuré une bonne isolation thermique, on a privilégié les mousses d'hydrocarbures « le cyclopentane », qui est un agent qui n'affecte pas l'environnement, mais la non satisfaction de son rendement sur le plan d'isolation thermique, nous a poussée à effectuer plusieurs essais expérimentaux, afin d'améliorer cette propriété et dans le but principale est de minimiser les pertes de chaleurs pour arriver à atteindre les gammes spécifiques de l'isolation thermique de l'équipement de réfrigération à l'ENIEM, et pour réaliser ce but nous avons étudié avec détail l'influence des paramètres opératoires sur la densité et l'isolation thermique de la mousse polyuréthane rigide, utilisée à l'ENIEM comme étant isolant thermique des réfrigérateurs, et nous avons fixé des valeurs exactes pour ces paramètres qui assurent une bonne isolation thermique du côté performance et qualité, et moins de rebus du côté économique ; mais ce n'est pas suffisant, car la résistance thermique obtenue en utilisant le CFC comme agent gonflant de la mousse polyuréthane rigide est bien meilleure que celle obtenue avec une mousse PUR à base du cyclopentane, alors dans notre travail on a proposé de compenser cette perte de chaleur par un surépaisseur en mousse polyuréthane ayant toujours le même agent gonflant « le cyclopentane » qui est écologique est préserve l'environnement ainsi que pour minimiser les coûts en gardant les mêmes équipements et les mêmes machines tout en respectant les intervalles exigés de la densité et de la conductivité thermique de la mousse, mis en évidence dans les essais expérimentaux que nous avons effectués à l'entreprise ENIEM.

Bibliographie

[1] Yves Marotel

Techniques de l'ingénieur, traité plastique et composites AM3

[2] 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^e édition

[3] William D. Callister, Jr

Science et génie des matériaux : édition MODULO, ISBN 26891136687-X

[4] Hans-Henning Kausch, Nicole Heymans, Christopher John Plumer et Pierre Decroly.

Matériaux polymères : propriétés mécaniques et physiques (principe de mise en œuvre). Presses polytechniques et universitaires romande 2001, ISBN2-88074-415-6

[5] Marc Crrega et Coll

Matériaux polymères. DUNOD 2^e édition, paris 2000,2007, ISBN978-2-10-050790-0

[6] R.Bourgeoi et H.Chauvel et J.Kessler

Mémothec génie des matériaux : édition casteilla, paris 2001, ISBN2-7135-2246-3

[7] G.Froyer et R. Deterre

Introduction aux matériaux polymères, technique et document Lavoisier, paris 1997, ISBN2-7430-0171-2

[8] M.Fontanille et Y.Gnanou

Chimie et physico-chimie des polymères: DUNOD, paris 2002, ISBN2-10-003982-2

[9]Thierry Gallauziaux et David Fedullo

Le grand livre de l'isolation, Eyrolles, 2009, ISBN 978-2-212-12404-0

[10] Jean-François Sacadura

Initiation aux transferts thermiques, Lavoisier, Paris 1993, ISBN 2-85206-618-1

[11] Patric JACQUAR et Serge SANDRE

La pratique du froid, 3^e édition DUNOD, ISBN 978-2-10-051431-1

[12] Perry, R.H., Green, D.W. McGraw-Hill

Perry's Chemical Engineer 1997, ISBN 978-0-07-049841-9

[13] Bejan, A.D.Kraus et John Wiley

Heat Transfer Handbook, & Sons, 2003, ISBN 978-0-471-39015-2