

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Université MOULOU D MAMMERI de Tizi-Ouzou**



**Faculté du génie de la construction**

**Département de génie mécanique**



# *Mémoire de fin d'études*

**En vue de l'obtention du diplôme Master  
Académique**

**Spécialité : Génie Mécanique**

**Option: Energétique**

## **THÈME**

*Etude et élaboration de nouveaux matériaux  
composites isolants*

**Proposé et dirigé par :**

**M<sup>r</sup>: S. MAKHLOUF**

**M<sup>r</sup>: H. ACHER**

**présenté par :**

**M<sup>elle</sup> : OUANECHÉ SAMIRA**

**2013/2014**

# REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Mr S. MAKHLOUF Professeur à l'université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, qui a suivi et encadré ce travail avec intérêt, disponibilité et compétence.

Je remercie vivement les membres jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Je voudrais également exprimer toute ma reconnaissance à tous les membres de laboratoire de génie civil et en particulier messieurs R. Bouhraoua et M. Mamou.

Mes remerciements vont également à tous les membres de laboratoire Agronomie à l'UMMTO pour m'avoir accueillie dans leur laboratoire et pour leurs aides.

Je tiens à remercier Mr H. Acher, Ingénieur de laboratoire de chimie à l'ENIEM Tizi-Ouzou.

Je remercie également Mr Anaris, Ingénieur de laboratoire de génie électrique à UMMTO.

# DEDICACES

Je dédie ce travail à mes chers parents pour avoir fait ce que je suis devenue, de m'en avoir donné les moyens, pour leurs encouragements, leur présence et leurs amours.

A toute ma famille d'une manière générale et tous les amis, en particulier à :

- ★ Ma sœur Lamia et mes deux frères Mouhand et Farouk.
- ★ Mes grandes mères Fatima et Yamina.
- ★ Mes oncles, mes tantes et mes cousins.
- ★ Mes chers amis.

A toutes les personnes à qui j'adresse mes sentiments les plus chaleureux.

# Introduction générale

---

Le secteur du bâtiment réputé grand consommateur d'énergie (presque la moitié de la consommation mondiale globale) est en outre, responsable de 25 % des émissions de gaz à effet de serre. La réduction de cette consommation est au cœur des préoccupations des thermiciens du bâtiment qui inscrivent leur réflexion dans le cadre du développement durable ou encore de la haute qualité environnementale.

Pour atteindre ces objectifs il faut intégrer des solutions passives qui ont été développées en augmentant fortement l'isolation des différentes composantes de l'enveloppe pour réduire au maximum les déperditions de chaleur vers l'extérieur.

Il est connu qu'une bonne partie des déperditions de chaleur du bâtiment se faisant par les murs, les matériaux isolants ont pour rôle de ralentir le transfert de chaleur à travers l'enveloppe. La qualité de l'isolant à prévoir dépend du climat, de l'exposition des murs mais également des matériaux utilisés pour la construction. Le choix d'un matériau utilisé comme isolant dépend naturellement de sa disponibilité et de son coût.

Le renforcement des matériaux de construction, en l'occurrence les bétons et les mortiers, par des fibres synthétiques comme les fibres de carbone, les fibres de verre et les fibres de mousse polyuréthane est une technique qui est de plus en plus utilisée dans le but d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques comme par exemple leur résistance à la compression.

Les matériaux renforcés par les fibres synthétiques sont très utilisés dans divers domaines d'application, comme ceux de l'automobile, de la construction, de l'aéronautique et des sports...

Cette technique de renforcement des matériaux par les fibres est très ancienne et apporte de nombreux avantages fonctionnels tels que propriétés mécaniques, isolation phonique...etc.

Notre travail consiste d'une part, à élaborer de nouveaux matériaux composites isolants, à inertie thermique améliorée, à base de fibres de mousse polyuréthane comme renfort et la paraffine comme matrice pour les premiers matériaux et d'étudier l'influence du renfort fibreux synthétique sur les caractéristiques thermiques du composite.

D'autre part, un deuxième matériau a été élaboré ; il s'agit d'un mortier renforcé par les fibres de mousse polyuréthane avec des pourcentages massiques de fibres différents. Il a ensuite été caractérisé d'un point de vue mécanique dont le but recherché est d'avoir un nouveau matériau avec une résistance thermique optimale et une résistance à la compression acceptable.

Ce travail est structuré de la manière suivante :

- Le premier chapitre de ce travail est consacré aux généralités sur les matériaux composites.
- Le deuxième chapitre est consacré aux rappels théoriques sur l'isolation thermique.
- Le troisième chapitre est consacré à l'étude et à la présentation des matériaux utilisés pour l'élaboration des composites.

## Introduction générale

---

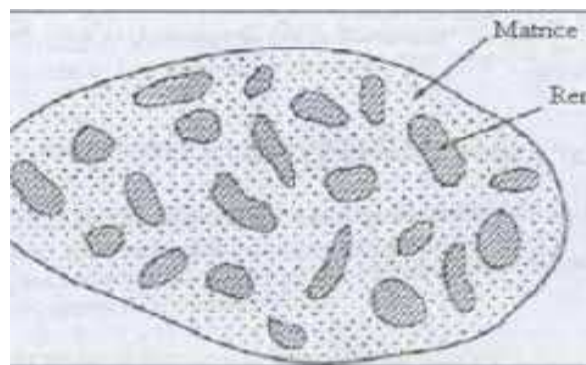
- Le quatrième chapitre fera l'objet de l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus lors des essais thermiques et mécaniques.
- Enfin, notre travail s'achèvera par une conclusion générale reprenant l'essentiel des résultats obtenus.

## LES MATERIAUX COMPOSITES

### I.1 Définition

Un matériau composite est un matériau en phase solide constitué d'au moins deux constituants dont les qualités respectives se complètent pour former un matériau aux performances globales améliorées.

Un matériau composite structural est généralement constitué d'un renfort et d'une matrice. Le renfort, le plus souvent sous forme fibreuse ou filamentaire, assure l'essentiel des propriétés mécaniques. La matrice joue le rôle de liant afin de protéger le renfort de l'environnement, de le maintenir dans sa position initiale et d'assurer la transmission des efforts. Entre le renfort et la matrice, existe une zone de liaison appelée interface.



**Figure I.1:** Matériau composite

Les matériaux ainsi obtenus sont très hétérogènes et souvent anisotropes. La nature de la matrice et du renfort, la forme et la proportion du renfort, la qualité de l'interface et le procédé de production utilisé sont autant de paramètres qui peuvent influencer les propriétés du matériau composite [1]. La matrice et le renfort peuvent être métalliques, céramiques ou plastiques, ce qui permet d'envisager une multitude de combinaisons.

Les matériaux composites sont utilisés dans de nombreux domaines tels que le transport, le bâtiment, l'aérospatiale et dans les sports et les loisirs.

Les premiers matériaux composites créés par l'homme furent sans doute à base de bois.

### I.2 Éléments constitutifs des matériaux composites

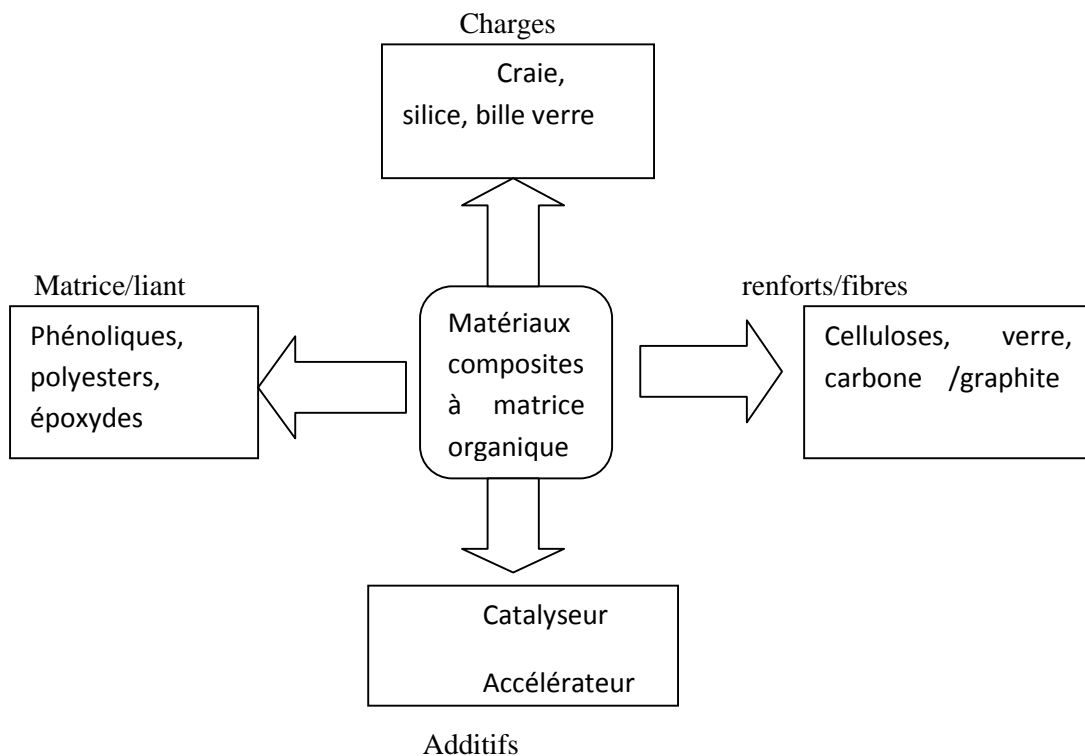
Les constituants principaux d'un matériau composite sont en général :

- la matrice : elle est composée d'une résine thermoplastique ou thermodurcissable, elle donne la forme au produit réalisé, lie les renforts et les protège contre les agressions extérieures.
- le renfort : c'est une sorte de squelette qui assure la tenue mécanique comme la résistance à la traction et la rigidité. Il est de nature filamentaire mais pourrait être de nature particulière.

- Les charges : ce sont des ajouts appropriés qui servent à diminuer les coûts, elles confèrent aux matériaux des propriétés particulières ou complémentaires.
- l'interface : elle assure la compatibilité renfort-matrice, transfère les efforts de la matrice au renfort et doit être adaptée aux propriétés visées à l'aide d'un ensimage.
- les additifs: ils peuvent être soit catalyseurs, soit accélérateurs de polymérisation, soit colorants ou encore agents de décollage.
- l'ensimage : désigne les traitements de surface appliqués aux fibres de renfort en sortie de tissus (ensimage textile) et sur les filières (ensimage plastique).

La maîtrise de l'élaboration de matériaux composites nécessite la connaissance des propriétés individuelles des constituants de base des matériaux.

Les principaux constituants des matériaux composites sont résumés dans l'organigramme ci-dessous :



**Figure I.2 :** Constituants des matériaux composites.

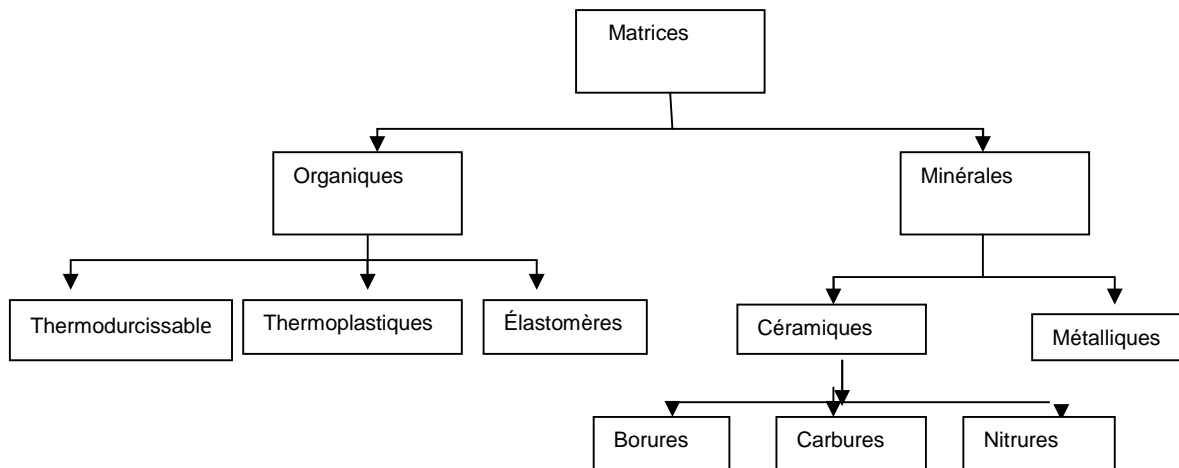
### I.2.1 Matrices

Le rôle de la matrice est de recevoir les renforts, répartir les contraintes, apporter la tenue de la structure et donner la forme désirée au composite. Elles doivent être en outre assez déformables et présenter une certaine compatibilité avec le renfort. Pour pouvoir apporter aux

matériaux composites des propriétés mécaniques élevées, elles doivent posséder des masses volumiques faibles.

Il existe généralement plusieurs types de résines classées en deux grandes familles : les thermodurcissables et thermoplastiques. Une nouvelle classe de résine, ayant les propriétés des deux précédentes familles s'est développée, il s'agit des thermostables.

On peut retrouver dans l'organigramme ci-dessous, les différentes familles de matrice :



**Figure I.3:** Différentes familles de matrices

### I.2.1.1 Les résines thermoplastiques

Les matrices thermoplastiques possèdent de faibles propriétés mécaniques. Leur renforcement (le plus souvent par des fibres courtes) confère une meilleure résistance mécanique, une bonne stabilité dimensionnelle, ainsi qu'un accroissement de la tenue en température [2].

Le thermoplastique se présente sous forme de chaînes linéaires. Il faut les chauffer pour les mettre en forme et les refroidir pour les fixer. Ces résines peuvent donc être récupérées et facilement recyclées [3].

Les thermoplastiques sont constitués de macromolécules linéaires qui peuvent devenir mobiles entre elles lorsque la température est élevée.

Les matrices les plus courantes sont le poly chlorure de vinyle (PVC) qui est utilisé dans la fabrication des tuyauteries, le poly acétate de vinyle (PVA) que l'on trouve dans les colles et adhésifs, le polyéthylène (PE) dont on se sert pour fabriquer les jouets, les bouteilles de shampoing ou les sacs de supermarchés, le polypropylène (PP) pour les boîtes alimentaires ou les revêtements de sols, le polystyrène (PS) qui intervient dans la composition des contenants alimentaires, de la vaisselle jetable, des jouets ou des vitres, le polyamide (PA) et polycarbonate (PC)...etc.

### **I.2.1.2 Les résines thermodurcissables**

Elles se présentent sous forme liquide visqueux et que l'on met en forme en déclenchant une réaction chimique de polymérisation par ajout d'un durcisseur, ce qui entraîne une solidification.

Les thermodurcissables durcissent de façon définitive lors de leur synthèse. La transformation est irréversible. Ce sont les matrices les plus utilisées dans la production de matériaux composites.

Un polymère thermodurcissable est constitué d'un réseau tridimensionnel de macromolécules. Leur mise en œuvre se fait par réaction chimique [4].

On trouve :

- les résines polyester qui, associées à des fibres de verre, ont une bonne tenue à la température (150 à 200 °C) et aux agents chimiques. Par contre, leur stockage s'avère difficile du fait d'une mauvaise tenue à l'humidité et du risque d'inflammabilité [2].
- les résines époxy qui possèdent d'excellentes propriétés mécaniques, thermiques (130 à 180 °C) et un bon comportement chimique, mais elles sont sensibles à l'humidité et aux rayons UV.
- les résines phénoliques qui résistent bien au feu. Ces polymères sont obtenus par polycondensation d'un phénol et d'un aldéhyde en milieu alcalin.

### **I.2.1.3 Les résines thermostables**

Dans ces résines on trouve les deux grandes familles des résines citées précédemment (thermoplastiques et thermodurcissables).

Les résines thermostables sont développées surtout dans les domaines de l'aviation et de l'espace, où les laboratoires cherchent à mettre au point de nouvelles résines.

Par exemple, les résines polyamides, ce sont des résines thermostables qui combinent une grande résistance mécanique au fluage à une excellente tenue en température (- 200 à + 200 °C) et un bon comportement vis-à-vis de l'oxydation.

### **I.2.1.4 Différence entre les résines thermoplastiques et les résines thermodurcissables**

La différence essentielle entre ces deux types de polymères est la nature des phénomènes physiques assurant leur cohésion. Les thermoplastiques sont constitués de longues molécules linéaires, maintenues entre elles par des liaisons physiques de faible énergie (liaisons hydrogène ou de Van der Waals) ; ces liaisons se cassent lorsque on chauffe le polymère et se rétablissent lorsqu'on le refroidit, de façon réversible. A l'inverse, les thermodurcissables sont des molécules en forme de réseaux tridimensionnels, maintenues par des liaisons chimiques de forte énergie (liaisons covalentes).

Cette différence fondamentale est à l'origine de propriétés bien distinctes. Par exemple :

- Les thermoplastiques sont moins rigides et moins résistants que les thermodurcissables (mais cela importe peu sur les composites à fibres longues, car la rigidité et la résistance proviennent essentiellement des fibres).
- Les thermoplastiques sont plus ductiles que les thermodurcissables, donc résistent mieux à la fissuration.
- Les déchets thermoplastiques sont recyclables, les déchets thermodurcissables ne le sont pas.
- Les granulés thermoplastiques peuvent être stockés indéfiniment et à température ambiante, les thermodurcissables doivent être stockés au froid et pendant une durée limitée si la résine et le durcisseur sont déjà mélangés.
- Les thermoplastiques doivent toujours être portés à haute température pour être mis en forme, les thermodurcissables pas forcément.

De manière générale, les matrices thermodurcissables sont plus fréquemment employées que les thermoplastiques, en raison de leur plus grande facilité de mise en forme (il est plus facile d'imprégner des fibres avec un liquide qu'avec des granulés ramollis, et les températures à utiliser sont souvent plus raisonnables).

Critères essentiels	Matrices thermoplastiques	Matrices thermodurcissables
Etat de base	Solide (prêt à l'emploi : polymérisé)	Liquide visqueux à polymériser
Stockage matière de base	Illimité	Temps réduit (précautions à prendre)
Mouillabilité des renforts	Difficile	Aisée
Moulage	Chauffage (fusion + refroidissement de fixation)	Chauffage continu
Cycle	Plus long (refroidissement)	Court
Critères spécifiques		
Tenue au choc	Assez bonne	Limitée
Tenue thermique	Réduite	Meilleure
Chute et déchets	recyclables	perdus

**Tableau. I.1** : Caractéristiques des résines thermodurcissables et des résines thermoplastiques

## I.2.2 Renforts

C'est une sorte de squelette qui assure la tenue mécanique (rigidité, résistance à la rupture, dureté...etc.) et permet d'améliorer des propriétés physiques telles que les comportements au feu et l'abrasion, la conservation des caractéristiques mécaniques à haute température ou les propriétés chimiques.

Le tableau ci-dessous présente les principales caractéristiques mécaniques de quelques renforts.

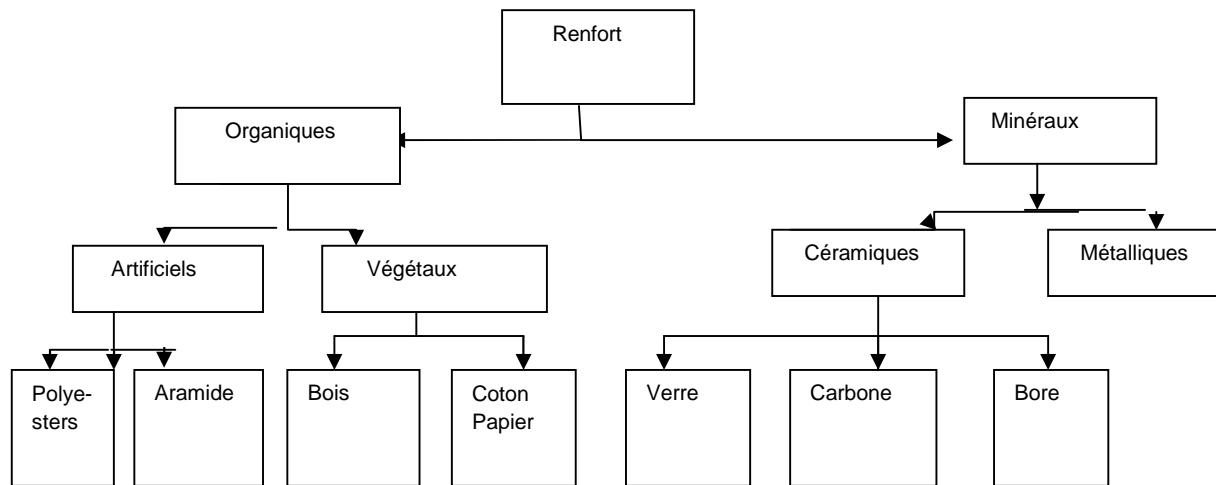
Fibre	Densité (kg /dm <sup>3</sup> )	Charge de rupture en traction (MPa)	Charge de rupture en compression (MPa)	Allongement à la rupture (%)	Module d'élasticité (MPa)	Diamètre du filament élémentaire (µm)
Verre E	2.54	3400	1200	4.8	73000	3-30
Verre R	2.48	4400	1300	5.4	86000	3-30
Aramide haut module	1.45	3100	500	1	130000	12
Carbone haut module	1.8	2200	1300	1.8	400000	7
Bore	2.63	3500	3500	0.8	400000	100-200

**Tableau I. 2 :** Caractéristiques de quelques renforts.

### I.2.2.1 Différents types de renforts

Les renforts peuvent provenir d'origines diverses (animale, végétale, synthétique...). Parmi ces renforts qui contiennent un matériau composite, on distingue les fibres, les particules comme SiC, TiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>..., les billes pleines ou creuses, les fibrilles, les écailles, les Whiskers.

Les différents types de renforts sont cités dans l'organigramme ci-dessous.



**Figure I.4:** Les différents types de renfort de base.

### I.2.2.1.a. Les fibres

La fibre de renforcement est un matériau sous forme d'un filament fin possédant une bonne résistance à la rupture et un module d'élasticité élevé, c'est-à-dire que la longueur d'une fibre peut être étirée jusqu'à 10000 fois sa longueur initiale [5].

On peut subdiviser les fibres naturelles en trois grands groupes selon leur origine [6] :

- Des fibres d'origine végétale comme : le coton, le lin, la noix de coco, le sisal, l'abaca, le chanvre...
- Des fibres d'origine animale comme : la laine de mouton, les poils (chameau, mohair, l'alpaga, le cachemire), la soie...
- Des fibres d'origine minérale comme : l'amiante, la laine de roche, la laine de verre...

### I.2.3. Charges et additifs

Des charges et additifs sont ajoutés au composite afin de lui conférer de nouvelles propriétés et lui permettre ainsi de remplir davantage de fonctions techniques. De manière générale, les charges et additifs jouent un rôle essentiel dans l'obtention des propriétés des polymères, qu'ils soient utilisés seuls ou comme matrices de composites, il en existe de très nombreux types.

Les charges sont des particules solides que l'on disperse au sein de la matrice. Elles peuvent être minérales, organiques (végétales ou synthétiques) ou métalliques, et s'utilisent grosso modo de la même façon que dans les plastiques "traditionnels".

Les additifs possibles sont encore plus nombreux. Une classe d'additifs que l'on rencontre systématiquement est celle des agents d'interface, que l'on dépose sur les fibres pour les faire adhérer à la matrice. On rencontre également :

- Des stabilisants, qui retardent les dégradations dues à l'oxygène, aux UV ou encore à l'ozone ;
- Des ignifugeants ou retardateurs de flamme (la plupart des polymères sont inflammables !) ;
- Des agents de démoulage ;
- Des colorants...

#### **I.2.4. Interface renfort/matrice**

Il est naturel de penser que les performances des matériaux composites sont fonction des propriétés des constituants de base rentrant dans leur composition. Cependant, ceux-ci n'existeraient pas si les fibres et la matrice ne peuvent pas s'associer. L'interface est le siège de cette association et constitue une véritable région stratégique capable d'assurer notamment le transfert des charges de la matrice au renfort. Les caractéristiques de l'interface dépendent quant à elles de la qualité de la liaison fibre/matrice, ce qui fait appel à la notion d'adhésion.

L'interface est un terme utilisé dans le domaine des matériaux composites, pour décrire la surface ou la zone qui sépare la fibre et la matrice (discontinuité macroscopique).

Par définition, l'adhésion est le phénomène qui crée l'adhérence. L'adhérence est l'état d'une matière qui colle, qui tient à une autre. Pratiquement, l'adhésion peut s'expliquer par la physico-chimie tandis que l'adhérence se mesure par des tests [7]. La difficulté réside souvent à trouver des corrélations entre adhésion et adhérence.

En simplifiant, l'adhésion entre deux matériaux, ou l'affinité entre deux surfaces, peut résulter de différents facteurs [5] :

- L'ancrage mécanique ; une rugosité ou une porosité importante sont des éléments favorables à l'adhésion car ils permettent d'accroître la surface de contact entre deux matériaux.
- L'inter diffusion dans le cas de deux polymères.
- La création de liaisons physico-chimiques à l'interface ; il existe des liaisons interatomiques de faible et de forte énergie.

L'interface joue un rôle primordial dans la résistance à la propagation des fissures [8].

#### **I.2.5 Ensimage**

Ce terme désigne les traitements de surface appliqués aux fibres de renfort en sortie de filière (ensimage textile) et sur les tissus (ensimage plastique). Il désigne aussi une opération de lubrification réalisée en sortie de filière sur les fils de base. Le filament est revêtu d'une pellicule d'ensimage constituée, en général, d'une dispersion aqueuse de divers composés chimiques présentant chacun une fonction bien définie.

L'ensimage "textile" appliqué sur les filaments, en sortie de filière consiste à déposer un agent de liaison assurant la cohésion des filaments entre eux, diminuant l'abrasion et facilitant les manipulations ultérieures (tissage) et évitant la formation de charges électrostatiques.

L'ensimage "plastique" ou "finish" appliqué sur les tissus consiste à déposer un agent de pontage dont les rôles sont d'assurer une liaison physico-chimique entre les fibres et la résine et de protéger la fibre de son environnement. .

L'ensimage "textilo-plastique" assure un compromis entre les propriétés textiles et plastiques (compatibilité résine). Il est de plus en plus utilisé avec les fibres de carbone.

### **I.3. Différents types de composites**

La nature du matériau constituant la matrice permet de répertorier trois grandes classes de composites. Elles sont considérées ici par ordre croissant de tenue en température : les composites à matrice polymère (CMP), les composites à matrice métalliques (CMM) et les composites à matrice céramique (CMC).

#### **I.3.1. Les Composites à Matrice Polymère (CMP)**

La fabrication des CMP emploie deux types de matrices : les résines thermodurcissables qui représentent 3/4 des CMP actuels (époxyde, polyester, vinyles ter, polyuréthane...) et les résines thermoplastiques (polypropylène, polyamide...) qui sont moins utilisées mais en pleine progression du fait notamment d'une plus grande recyclabilité (réutilisation après broyage). Les matrices polymères renforcées par des fibres de verre, employées notamment dans les produits de grande diffusion, sont d'une grande importance industrielle. Les fibres de carbone et de Kevlar sont utilisées dans une moindre mesure pour des applications hautes performances dans l'aéronautique et l'aérospatiale. D'autres types de renforts sont employés tels que des billes (verre, élastomère...) et des charges (fibres broyées, poudres...). Les pièces en composite à matrice polymère prennent des formes variées (coques, plaques, pièces de révolution...) grâce aux nombreux procédés de formage mis au point (moulage, pultrusion, estampage, enroulement filamentaire). Ces composites permettent un allègement des pièces de structure habituellement fabriquées en alliages métalliques. L'utilisation des CMP reste limitée au domaine de températures inférieures à 200°C.

#### **I.3.2. Les Composites à Matrice Métallique (CMM)**

Pour des applications à haute température (jusqu'à 600°C), on fait appel aux composites à matrice métallique (CMM). Les métaux ou alliages métalliques utilisés dans la fabrication des CMM sont généralement choisis en fonction de leurs propriétés spécifiques dans l'état non renforcé. Ainsi, l'aluminium, le titane et le magnésium sont les métaux les plus couramment utilisés. Les procédés de fabrication des CMM diffèrent selon que la matrice se trouve, lors de l'introduction des renforts, à l'état liquide (forgeage liquide, fonderie moyenne pression), dans un état semi-solide ou dans l'état solide (métallurgie des poudres). Les CMM

présentent de bonnes caractéristiques mécaniques spécifiques, une bonne résistance en température et aux chocs thermiques ainsi qu'une bonne résistance à l'usure et à l'abrasion.

### **I.3.3. Les Composites à Matrice Céramique (CMC)**

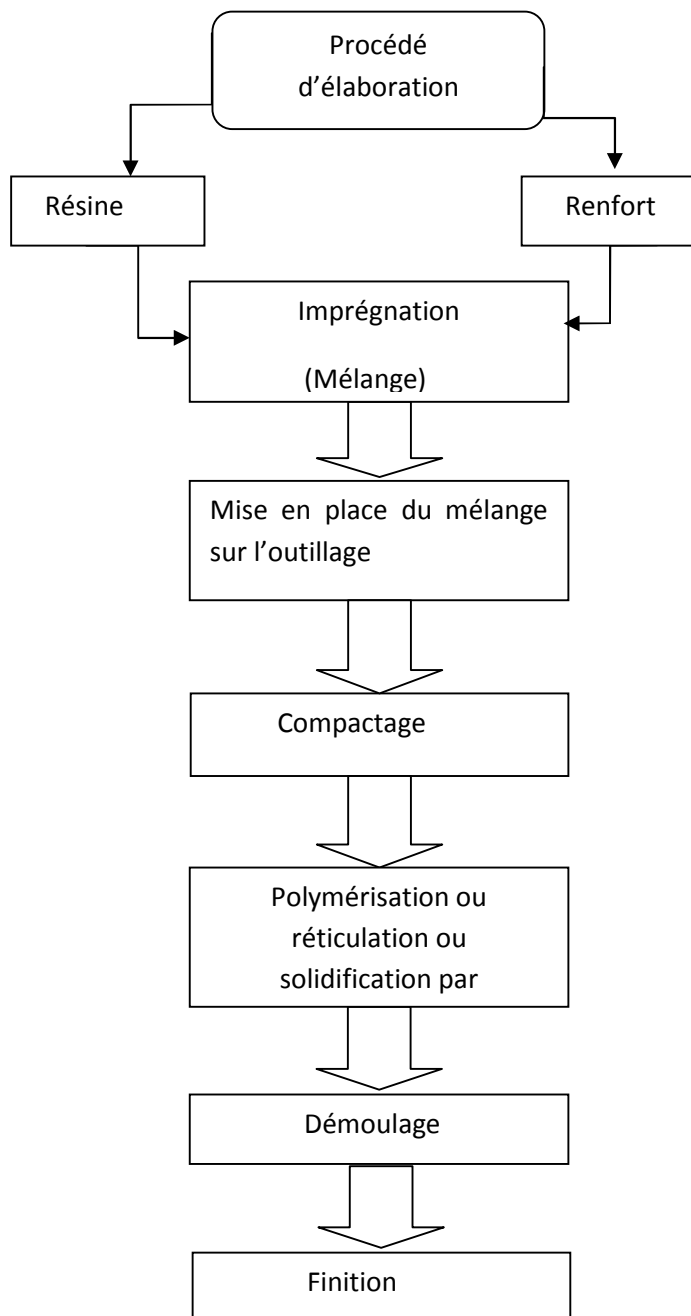
Enfin, lorsque les températures d'utilisation sont supérieures à 1000 °C, on a recours aux composites à matrice céramique (céramiques industrielles). Leur renfort est généralement constitué de fibres longues en carbone, en silice ou en carbure de silicium, assemblées par tissage multidimensionnel. Ces matériaux sont développés dans le domaine aérospatial. D'autres par contre sont utilisés pour l'ingénierie du bâtiment. Aujourd'hui les recherches sont actives sur les possibilités de combinaison des fibres naturelles comme renfort dans les matériaux composites à matrice céramique.

## **I.4. Procédés de fabrication [9]**

Les procédés de mise en œuvre de matériaux composites nécessitent trois étapes indispensables :

- 1) une étape d'association : l'imprégnation du renfort par la résine,
- 2) une étape rhéologique de mise en forme de la pièce,
- 3) une étape thermique de solidification du matériau : soit par refroidissement pour les matrices thermoplastiques, soit par polycondensation ou réticulation pour les matrices thermodurcissables (à température croissante).

Il existe différents procédés mais le plus utilisé est le procédé par moulage. Les principales opérations d'une mise en forme par moulage sont rappelées dans l'organigramme qui suit :



**Figure I.5:** Principales étapes d'un procédé par moulage.

Le moulage peut s'effectuer dans un moule à surface non fermée tel le cas d'un moule ouvert (technique par contact, projection, ou pultrusion) ou moule fermé (par exemple, injection de résine thermodurcissable associée à des fibres longues suivi d'une compression).

Les techniques de fabrication jouent un rôle considérable dans les composites car chacune des opérations influe de manière irréversible sur le produit finale.

## I.5. Propriétés mécaniques des matériaux composites

Les performances mécaniques des matériaux composites dépendent non seulement des caractéristiques des charges et matrice utilisées, la distribution géométrique et la géométrie du renfort (la forme, la taille, la concentration et l'orientation) mais aussi de la qualité de l'interface entre constituants. Ainsi, une mauvaise adhésion inter-faciale entraîne généralement une dégradation du comportement du composite, qui peut être assimilée à un endommagement global pour le matériau.

## I.6. Propriétés thermique des matériaux

### – La conductivité thermique [ $\lambda$ ]

Pour un matériau, c'est le flux de chaleur qui traverse sa paroi sur mètre d'épaisseur pour 1 mètre carré de surface avec une différence de température de 1 degré entre les deux faces de cette paroi.

Cette propriété traduit la capacité d'un matériau à transmettre la chaleur par conduction. La chaleur se propage à l'intérieur du matériau de particule à particule.

C'est une donnée intrinsèque à chaque matériau qui caractérise donc uniquement ses performances isolantes. Plus le  $\lambda$  est faible, plus le matériau est résistant au transfert par conduction.

Il est exprimé en watts par mètre et par degré Celsius [ $W/m \cdot ^\circ C$ ] ou par Kelvin [ $W/m \cdot ^\circ K$ ].

### – La résistance thermique [R]

La résistance thermique fait intervenir l'épaisseur de la paroi (ou du matériau) pour caractériser le passage du flux de chaleur. Le R de chaque matériau composant une paroi s'additionne afin de déterminer le R total.

Elle exprime le rapport entre l'épaisseur et la conductivité thermique en mètre carré degré Celsius par watt [ $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ].

### – Le coefficient de transmission calorifique [U]

En référence à la réglementation thermique, le coefficient de transmission surfacique U, caractérise les déperditions thermiques d'un matériau ou d'une paroi.

C'est l'inverse de la résistance thermique (R). Plus U est faible plus la paroi est isolante.

Il est exprimé en watt par mètre carré degré Celsius [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ] ou par Kelvin [ $W/m^2 \cdot K$ ].

### – L'inertie thermique

L'inertie thermique est la capacité d'un corps à stocker de la chaleur et elle est caractérisée par la capacité thermique.

L'objectif de l'inertie thermique d'une paroi opaque est de restituer la chaleur ou la fraîcheur stockée en décalage avec les variations thermiques en dehors et dans le bâtiment.

La vitesse de stockage ou déstockage de la chaleur est déterminée par deux autres grandeurs que sont la diffusivité et l'effusivité.

– **Déphasage**

Il définit la capacité du matériau à réguler la température intérieure, c'est à dire à absorber la chaleur au moment où il fait le plus chaud (12h-14h) pour la restituer au moment le plus froid (la nuit). Il dépend de la capacité thermique de l'isolant. Il faut un déphasage de 10 à 12 h pour obtenir un bon confort d'été.

– **La chaleur spécifique du matériau (c) en J/ (kg. K)**

Elle définit la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1°C la température de 1 kg du matériau.

Plus sa valeur est élevée, plus le matériau peut absorber une grande quantité de chaleur.

– **Le coefficient ( $S_d$ )**

Les pare-vapeur sont caractérisés par leur aptitude à résister à la diffusion de vapeur d'eau. Le coefficient ( $S_d$ ), exprimé en mètres, représente la résistance d'un pare-vapeur par rapport à celle qui correspondrait à une épaisseur équivalente d'une couche d'air.

Plus la valeur  $S_d$  est élevée, moins le produit laisse passer de vapeur d'eau. Il est plus ou moins résistant à la diffusion de vapeur d'eau.

Plus la valeur  $S_d$  est faible, plus le produit laisse passer de vapeur d'eau. Il est perméable à sa diffusion.

## **I.7. Classification des matériaux composites**

Les matériaux composites peuvent être classés suivant la forme ou suivant la nature des composants :

### **a) Classification des matériaux composites suivant la forme des constituants**

- Composites à particules lorsque le renfort se trouve sous forme de particules.
- Composites à fibres lorsque le renfort se trouve sous forme de fibres (continues ou discontinues) dont leur orientation dépend de la sollicitation mécanique qu'elles doivent supporter un matériau composite.
- Composites alvéolaires ou squelettes.
- Composites en lamifiée.

### **b) Classification des matériaux composites suivant la nature des constituants**

Les matériaux composites sont classés, selon la nature de la matrice, comme suit :

- Composites à matrice organique.

- Composites à matrice minérale.
- Composites à matrice métallique.

Plusieurs renforts sont associés à ces matrices [3,10].

Les principaux domaines d'application de ces composites selon les différentes matrices et leur constituants sont regroupés dans ce tableau :

Composites	Constituants	Domaines d'application
1. Composites à matrices organiques :		
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Papier, carton</li> <li>- Panneaux de particules</li> <li>- Panneaux de fibres</li> <li>- Toiles enduites</li> <li>- Matériaux d'étanchéité</li> <li>- Pneumatiques</li> <li>- Stratifiés</li> <li>- Plastiques renforcés</li> </ul>	Résine /charges/fibres cellulosiques, Résine/copeaux de bois, Résine/fibres de bois, Résine souple/tissus, Elastomères/bitume/textiles, Caoutchouc/toile/acier, Résine/charges/fibres de verre, de carbone,.... Résine/micro sphères.	Imprimerie, Emballage,... Menuiserie Bâtiment Sports, bâtiment Toiture, terrasse,... Automobile Domaines multiples
2. Composites à matrice minérale :		
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Béton</li> <li>- Composite carbone-carbone</li> <li>- Composite céramique</li> </ul>	Ciment/sable/granulats Carbone/fibres de carbone Céramique/fibres de céramique	Génie civil Aviation, espace, sports, biomédecine,... Pièces thermomécaniques
3. Composites à matrice métallique	Aluminium/fibres de bore Aluminium/fibres de carbone	Espace
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sandwiches</li> <li>- Peaux</li> <li>- Ames</li> </ul>	Métaux, stratifiés, .... Mousses, nids d'abeilles, balsa, plastiques renforcés,....	Domaines multiples

**Tableau.1.3** Exemples de matériaux composites, pris au sens large [3].

## I.8. Mesure des propriétés mécaniques de la liaison fibre /matrice (matériaux composites)

La première solution pour mesurer les propriétés mécaniques des matériaux composites est d'utiliser des essais macroscopiques sur composites.

On peut citer :

1. les essais de traction, de compression ou les essais de flexion, qui déterminent l'aptitude à la déformation d'un matériau soumis à un effort progressif.
2. l'essai de dureté : fournit des renseignements sur la résistance à la pénétration d'une pièce dure soumise à un effort constant.
3. L'essai de résilience : caractérise la résistance au choc

Dans ces essais la déformation provoquée est peu liée à la durée d'application de la force. Ce sont des essais peu liés à la variable temps. Ils sont simples à réaliser mais plus difficiles à analyser en raison de la répartition complexe des contraintes au sein de l'éprouvette.

On distingue aussi :

Les essais fortement liés au temps : dans ces essais la déformation provoquée dépend complètement de la durée d'application de la force, on peut citer :

1. L'essai de fluage : mesure la déformation, en fonction du temps, du matériau sous charge constante.
2. L'essai de fatigue : étudie le comportement du matériau vis-à-vis de sollicitations alternée bien inférieures à la contrainte nécessaire pour le rompre.

Ces essais mécaniques doivent mettre en jeu des états de contrainte simples et connus, d'interprétation facile et non équivoque. De plus, ils doivent être reproductibles. C'est pourquoi des organismes nationaux et internationaux normalisent ces essais (AFNOR, ISO, CEN) [11].

La normalisation des essais porte sur :

- La géométrie de l'éprouvette par définition une éprouvette est une pièce de dimension normalisées utilisée lors d'essais mécaniques visant à déterminer le comportement du matériau soumis à différents efforts mécaniques comme la traction, la torsion, la flexion...,
- La préparation de cette éprouvette,
- Les machines d'essais et leur étalonnage,
- Les techniques expérimentales mises en œuvre,
- Le dépouillement et la présentation des données.

## **Introduction**

L'isolation thermique est un des investissements d'économie d'énergie des plus rentables, notamment dans la construction neuve et peut être considérée comme l'équipement d'énergie renouvelable avec la plus longue durée de vie.

L'isolation thermique est obtenue par l'utilisation des matériaux spéciaux qui ont des propriétés thermiques et mécaniques comme la résistance mécanique, la tenue en température, la légèreté et le non hygroscopicité.

### **II.1 L'isolation thermique**

L'isolation thermique désigne l'ensemble des techniques mises en œuvre pour limiter les transferts de chaleur entre un milieu chaud et un milieu froid. On retrouve de l'isolation thermique dans : le bâtiment (maintien d'une température de confort à l'intérieur des habitations), l'industrie, l'automobile, le textile ...etc.

Le but de l'isolation thermique est de diminuer les échanges de chaleur entre un milieu froid et un milieu chaud. Elle peut avoir pour but de garder la chaleur présente dans un volume comme pour une maison, elle peut aussi avoir pour but de garder le froid dans un volume comme dans le cas d'un réfrigérateur. Cela passe par l'interposition d'un système isolant entre le milieu chaud et le milieu froid. Il s'agit le plus souvent de matériaux choisis à cet effet, que l'on appelle généralement des isolants thermiques. Il peut aussi s'agir de flux d'air entre ces deux milieux.

L'isolation est également bénéfique pour l'environnement car, en réduisant les consommations d'énergie, elle permet de préserver les ressources énergétiques et de limiter les émissions de gaz à effet de serre.

### **II.2 Isolants thermiques**

Un isolant est un corps ou un matériau qui ne conduit pas la chaleur, il a une masse volumique très faible du fait de sa structure poreuse. Tous les matériaux constitués de cellules emprisonnant de l'air immobile seront d'excellents isolants, c'est le cas du polyuréthane, le polystyrène expansé, les plumes [12]...etc.

Thermiquement, un isolant est un matériau qui a une faible conductivité thermique, c'est-à-dire un matériau capable d'opposer au flux thermique qui le traverse, une grande résistance thermique de conduction.

### **II.3 Types des isolants**

On peut différencier les isolants thermiques les uns des autres par de nombreux paramètres, on distinguera alors, les isolants naturels et les isolants synthétiques.

Il existe trois groupes d'isolants thermiques :

### II.3.1 Les isolants synthétiques

Ce sont des isolants modernes issus de la pétrochimie (à base de produits pétroliers) :

- **Le polyuréthane** : faible conductivité thermique initiale, cher, il est moins stable que ses concurrents et très inflammable. Il se présente sous forme de mousse de remplissage pour les interstices autour des fenêtres [12]. Il se présente aussi sous forme des panneaux nus ou panneaux composites.
- **Le polystyrène** : est un isolant qui se présente en vrac, sous forme de billes qui sont insufflées et sous forme des panneaux nus ou composites.

### II.3.2 Les isolants en fibres minérales

- **Laine de roche** : est un isolant à base de silice, a une composition non uniforme, elle se présente sous forme des panneaux nus ou composites et sous forme des rouleaux.
- **Laine de verre** : se présente sous forme des rouleaux et des panneaux nus ou composites.
- **Perlite expansée** : se présente sous forme des panneaux, en vrac (billes ou paillettes brutes) et en blocs de construction.
- **Verre cellulaire** : est une mousse de verre obtenue par expansion de verre lorsqu'il est en fusion. Elle se présente également sous forme de panneaux rigides.

### II.3.3 Les isolants en fibres végétales

- **Fibre de bois** : elle se présente sous forme de panneaux.
- **Liège expansé** : il se présente sous forme de panneaux et en vrac.
- **Chanvre** : il se présente en rouleaux souples et en panneaux semi-rigide.

### II.3.4. Les isolants d'origine animale

- **Laine de mouton** : se présente en rouleaux, en panneaux semi-rigide, en écheveaux et en feutres.
- **Plumes** : elles se présentent en rouleaux et en panneaux semi-rigides

## II.4. Propriétés d'un isolant

### II.4.1 L'inertie thermique d'un isolant

L'inertie thermique peut être définie comme la capacité d'un matériau à accumuler de la chaleur, puis à la restituer. L'inertie permet donc d'écarter les pics de température de jour, comme de nuit.

L'inertie thermique d'un matériau est évaluée sur base de différentes caractéristiques:

- La capacité thermique d'un matériau, qui représente sa capacité à stocker de la chaleur. Elle peut s'exprimer aussi en Wh/m<sup>3</sup>. K (capacité thermique volumique). Plus la valeur est élevée, meilleur est le matériau d'un point de vue du confort thermique. La plupart des isolants d'origine végétale ou animale sont très efficaces.
- La masse mise en œuvre.

#### **II.4.2 La conductivité thermique**

La conductivité thermique est la grandeur physique qui caractérise l'aptitude d'un corps à conduire la chaleur. Elle est symbolisée par la lettre grecque  $\lambda$  (lambda). La conduction thermique est le mode de transfert de chaleur associée à cette grandeur. Plus la conductivité thermique d'un matériau est élevée, plus celui-ci conduit la chaleur.

Dans le système international d'unités, la conductivité thermique est exprimée en watts par mètre par kelvin ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ ).

La conductivité thermique dépend principalement de

- la nature du matériau
- la température du matériau

Quand la température augmente, un isolant perd de sa capacité d'isolation et, à l'inverse, un conducteur perd de sa capacité de conduction.

Mais d'autres paramètres peuvent être influents également sur ce paramètre ; on peut citer :

- l'humidité du matériau (l'humidité fait croître la valeur de la conductivité)
- la pression intervient également.

La conductivité thermique de quelques isolants présentés dans le tableau suivant :

Matériaux	Densité kg/m <sup>3</sup>	Conductivité thermique W/m <sup>2</sup> .°C	Capacité thermique Wh/m <sup>3</sup> .°C	Epaisseur hiver en cm	Epaisseur été en cm <sup>1</sup>
Laine de bois	160	0,050	90	23	20
Laine de bois	55	0,040	31	18	31
Laine de bois	40	0,040	23	18	36
Ouate de cellulose (insufflée)	60	0,038	31	17	30
Ouate de cellulose (panneaux)	85	0,040	44	18	26
Paille de lavande broyée	110	0,055	50	25	29
Chènevotte	90	0,055	48	25	29
Liège expansé (vrac)	60	0,045	31	20	33
Perlite	80	0,050	22	23	41
Vermiculite	100	0,075	96	34	24
Polyuréthane rigide	30	0,030	12	14	43
Coton	20	0,040	6	18	71
Laine de mouton	10	0,040	5	18	78
Laines de verre	15	0,040	5	18	78
Laines de roche	40	0,045	34	20	32
Polystyrène	7	0,035	3	16	94
Fibres polyester	15	0,045	2	20	130
<b>Structure</b>					
Brique alvéolaire	750	0,125	210	56	21
Bois lourd (chêne, mélèze)	600	0,210	315	95	22
Bois léger (résineux, feuillus)	300	0,120	158	54	24
Béton cellulaire	400	0,147	96	66	34
Paille	80	0,070	31	32	41

**Tableau II.1** : Conductivité thermique de quelques isolants

#### II.4.3 La résistance thermique

Sur le plan thermique, une paroi est caractérisée par sa résistance thermique  $R$  qui quantifie la capacité de la paroi à s'opposer aux échanges thermiques. En effet, la résistance thermique est d'autant plus élevée que l'isolation est plus efficace. A la différence du coefficient de conductivité ( $\lambda$ ), qui caractérise intrinsèquement un matériau, la résistance thermique est significative pour les parois, car elle tient compte de leurs géométries. Elle est définie par la relation suivante :

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$e$  : épaisseur de la paroi (m)

$\lambda$  : la conductivité thermique (W/m.K)

R : la résistance thermique ( $m^2.K/W$ )

Selon le type de transfert thermique, on a :

- la résistance thermique de conduction en conduction thermique.
- la résistance thermique de convection en convection thermique.
- la résistance thermique de rayonnement en rayonnement thermique.

Nous rappelons succinctement les modes de transfert de chaleur (conduction, convection et rayonnement), dans ce qui suit séparément. Il faut noter que ces modes sont en général interdépendants et qu'ils se présentent simultanément dans les problèmes pratiques.

### II.4.3.1 Transfert de chaleur par conduction

Le phénomène de la conduction de la chaleur existe dans tous les corps, solides ou fluides, c'est un transfert par contact sans mouvement de matière. Il correspond à un accroissement de l'énergie de vibration du réseau cristallin pour les solides, et à une transmission d'énergie cinétique opérée par les chocs entre les molécules pour les fluides. Le transfert de chaleur par conduction s'appuie sur la loi de Fourier énonçant que « le flux surfacique est proportionnel au gradient de température », ce qui se traduit pour un matériau isotrope homogène par la relation :

$$\vec{\Phi} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T \quad (\text{II.2})$$

Avec

$\vec{\Phi}$  : densité de flux de chaleur ( $W/m^2$ )

$\lambda$  : conductivité thermique du matériau considéré ( $W/m K$ )

### II.4.3.2 Transfert de chaleur par convection

La convection est un transfert de chaleur se produisant dans un milieu matériel avec mouvement de matière. Ce mode de transfert a lieu au sein des fluides ou entre un solide et un fluide. Dans le domaine du bâtiment en particulier, on distingue deux types de convection : la convection naturelle et la convection forcée.

- La convection naturelle recouvre les écoulements des fluides interstitiels, induit par les variations de masse volumique dues aux différences de température.
- La convection forcée se produit quand le mouvement du fluide est imposé par une intervention extérieure d'origine mécanique (pompe, mise en pression, ventilateur, etc.).
- La convection mixte mêle de manière équivalente les deux modes de convection précédemment cités. La convection est un phénomène très complexe où la thermique et la mécanique des fluides sont couplées.

Dans le cas d'un transfert entre un solide et un fluide, le flux thermique échangé entre la surface et le fluide en mouvement est donné par la loi de Newton :

$$\Phi = h S (T_C - T_F) \quad (\text{II.3})$$

Où

$\Phi$ : Flux thermique traversant la paroi. (W)

$T_C$  : Température de la paroi chaude. (°C ou K)

$T_F$  : Température du fluide loin de la paroi. (°C ou K)

$S$  : Surface d'échange. (m<sup>2</sup>)

$h$  : Coefficient d'échange par convection. (W/ m<sup>2</sup> K)

#### II.4.3.3. Transfert par rayonnement

Le rayonnement est un transfert de chaleur entre deux corps, séparés par du vide ou par un milieu transparent par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques. Ce mode de transfert ne nécessite pas de support matériel solide ou fluide. Dans la pratique, le rayonnement s'effectue en présence d'un gaz, c'est la raison pour laquelle le rayonnement est rarement le seul type d'échange thermique mis en jeu, la convection et la conduction sont également présentes, il reste négligeable tant que la température du solide se trouve en dessous de 200°C.

Les parois qui composent l'enveloppe des bâtiments sont le siège de transferts thermiques complexes dues au couplage conduction- convection- rayonnement.

Dans la structure du bâtiment, les pores des matériaux utilisés étant de faibles dimensions, la part de transfert convectif peut être négligée. De même, au voisinage de la température ambiante, les parts de rayonnement et de transfert de masse ne seront pas également prises en compte.

L'intensité du rayonnement thermique provenant d'une surface dépend non seulement de la température de cette surface, mais aussi de son émissivité, cette intensité est donnée par l'équation suivante :

$$M = \varepsilon \sigma T^4 \quad (\text{II.4})$$

Où  $\varepsilon$  : est l'émissivité de la surface.

$\sigma$  : est la constante de Stephan Boltzmann est vaut de  $5,67.10^{-8}$  W. m<sup>-2</sup>.K<sup>-4</sup>.

## II.5 Techniques d'isolation thermique

Il existe trois techniques de mise en œuvre : l'isolation intérieure, l'isolation extérieure et l'isolation répartie.

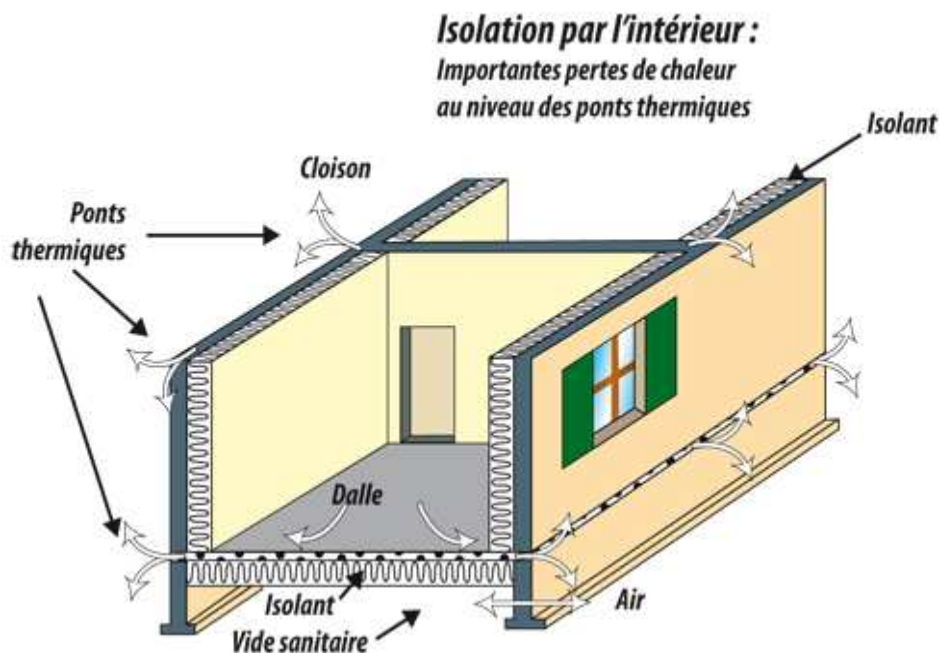
### II.5.1 L'isolation intérieure

L'isolation intérieure est la solution la plus répandue, surtout en rénovation. Elle est d'un coût raisonnable et relativement simple à mettre en œuvre (à la portée de tout bon bricoleur).

La pose des éléments isolants est réalisée par l'intérieur de l'habitation au niveau des murs extérieurs, des combles et des sols. Cette solution présente de nombreux inconvénients :

- L'épaisseur des isolants peut diminuer sensiblement le volume habitable.
- L'inertie thermique du mur n'est pas mise à profit.
- Les ponts thermiques sont nombreux et difficiles, voir impossible à éliminer.
- Risques de condensation au cœur des parois.

En revanche, ce type d'isolation permet d'obtenir un habillage impeccable de la paroi intérieure, quelque soit l'état du mur d'origine.



**Figure II.1 :** Isolation par l'intérieur

### II.5.2 L'isolation extérieure

L'isolation extérieure est réalisée par un isolant posé sur tous les murs extérieurs, recouvert d'un enduit ou d'un bardage. La toiture peut également être isolée par le même

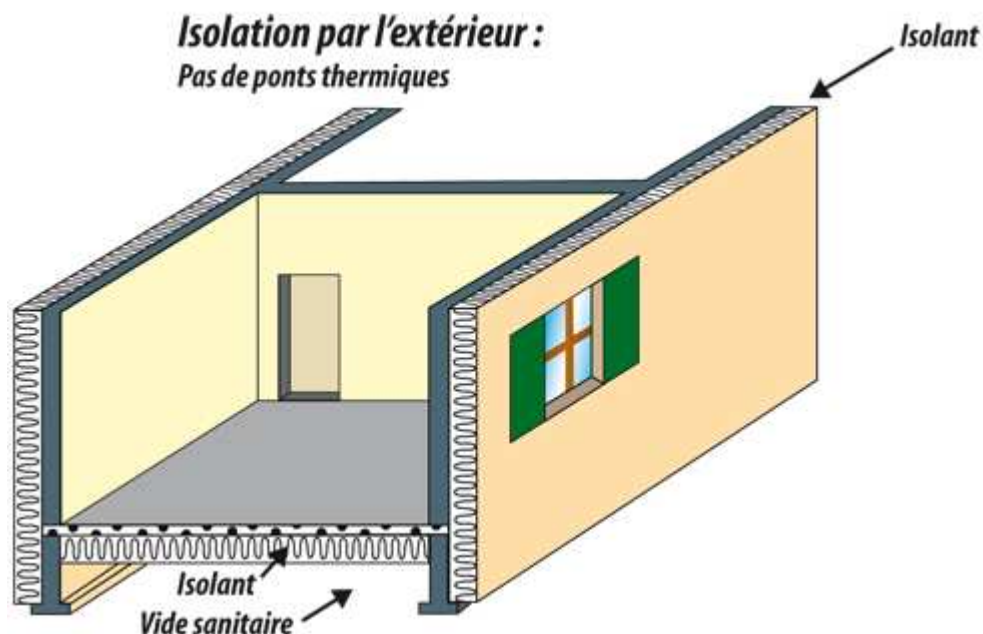
procédé. La mise en œuvre d'une telle solution est délicate parce qu'il faut assurer l'étanchéité et installer un échafaudage : elle sera confiée de préférence à un professionnel.

Une telle solution est envisageable si le ravalement de l'habitation nécessite une réfection. Il en est de même pour la toiture, ce type d'isolation ne pouvant être réalisé sur une toiture existante mais il est possible de la combiner avec une isolation des combles par l'intérieur, dès lors que l'on assure la continuité de l'isolation.

Ce procédé est de loin le plus performant puisqu'il supprime de fait pratiquement tous les ponts thermiques. Le confort intérieur est amélioré grâce à l'inertie thermique. La maçonnerie est protégée des intempéries et des variations de température, ce qui augmente sa pérennité.

Ses inconvénients sont :

- La fragilité accrue de la façade peut être considérée comme un inconvénient avec ce type d'isolation.
- L'entretien peut également être plus important, par exemple avec des bardeaux en bois.



**Figure II.2 :** Isolation par l'extérieur

### II.5.3 L'isolation répartie

L'isolation répartie concerne les matériaux de l'habitation. Elle comprend la construction des murs extérieurs en matériaux isolants (mono murs terre cuite, béton cellulaire, plâtre ou autre). L'isolation des combles est assurée de l'intérieur ou de l'extérieur, par contre celle des sols est en isolation intérieure.

L'isolation répartie peut être adoptée en rénovation en cas de création d'un niveau ou surélévation de la maison.

Il existe différents types de produits correspondant à des techniques de pose différentes :

**a. Les panneaux isolants simples :**

Ils sont protégés par une cloison de doublage (plaque de plâtre ou de gypse). Dans ce cas, l'isolant est le plus souvent collé au support, et lorsque ce support est trop irrégulier, il est préférable d'envisager des fixations mécaniques.

**b. Les panneaux composites (ou complexes) :**

Ils sont constitués d'un parement en plâtre cartonné (qui évite la contre-cloison) et d'un isolant (généralement le polystyrène, le polyuréthane ou la laine minérale). Posés sur des cales en bois, les panneaux sont fixés contre le mur, par collage (paroi sèche et plane) ou par vissage tasseaux.

**c. Les panneaux sandwich :**

Ils sont constitués d'un isolant collé en usine entre deux plaques de plâtre. Plus rigides que les précédents du fait de leur double parement. Ils sont utilisés pour isoler des murs humides ou présentant des irrégularités importantes. Leur pose s'effectue par vissage sur des tasseaux, en ménageant une lame d'air de 3 cm environ.

**d. Les enduits isolants et l'isolation projetée des solutions originales :**

Solution intéressante en rénovation, un enduit isolant épais composé par exemple de chanvre /chaux, permet de respecter la perméance (capacité à laisser passer la vapeur d'eau) d'un mur en pierres, évite la sensation de paroi froide et permet de préserver l'harmonie architecturale de l'ancien (mur bicornue, pierre de taille etc...).

L'isolation projetée consiste à projeter un isolant (mousse polyuréthane, ouate de cellulose) directement sur les éléments à isoler ou dans des caissons. L'avantage réside dans une isolation parfaite sans possibilité de fuite thermique entre les différents panneaux.

## **II.6 Comportement des parois du bâtiment**

La recherche des conditions de confort de l'habitat passe par une meilleure connaissance des comportements hydrique et thermique des parois.

### **II.6.1 Comportement hydrique**

Les parois qui composent l'enveloppe des bâtiments sont des matériaux poreux, ils sont composés d'au moins deux phases ; la phase solide qui constitue le squelette du matériau, et les pores de dimensions variables. Ces deniers peuvent être ouverts (connectés à l'extérieur) ou fermés (entièrement entourés de la phase solide). Cette particularité les rend le siège de plusieurs phénomènes tels que la fixation et la migration de l'humidité, l'humidification, le changement de phase...etc.

**II.6.2 Comportement thermique**

Les échanges thermiques au sein des matériaux poreux sont des phénomènes de transfert d'énergie sous forme de chaleur. Ils sont régis par plusieurs phénomènes :

- Conduction dans la matrice solide, dans la phase liquide (généralement l'eau), dans la phase gazeuse contenue dans les pores,
- Convection dans les pores,
- Rayonnement entre les parois des pores,
- Evaporation- condensation qui implique un transfert de chaleur par la chaleur latente sous l'effet d'un gradient de concentration de température,
- Diffusion de la vapeur d'eau sous l'effet d'un gradient de pression partielle.

Notre travail est scindé en deux parties : la première partie est consacrée à la réalisation des pastilles de composites MCP de dimension 40 X 40 X 6 mm. Le composite est constitué d'un matériau isolant et d'un autre matériau à changement de phase (MCP). La seconde partie de ce travail est consacrée pour la préparation des éprouvettes en béton renforcées avec un autre matériau isolant dont le but d'avoir un nouveau matériau composite isolant.

### A. Première partie : Elaboration du composite MCP

#### III.A.1 Présentation des matériaux

Pour l'élaboration des composites, on a utilisé les composants suivants : la mousse de polyuréthane, la paraffine (MCP) et le graphite.

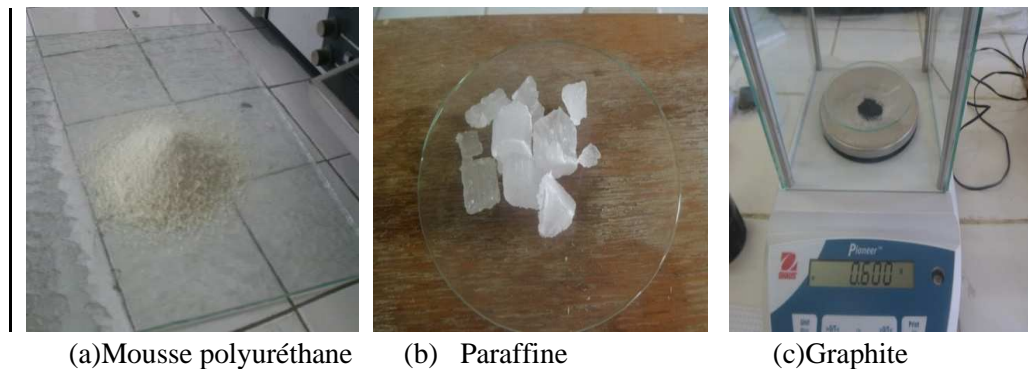


Figure III.A.1 : Matériaux utilisés.

##### III.A.1.1 La mousse polyuréthane

C'est un isolant thermique et phonique (sonore) utilisée dans différents domaines tels que le bâtiment et les appareils électroménagers.

C'est un isolant alvéolaire, composé de fines cellules emmagasinant un gaz de faible conductivité thermique.

Il existe trois sortes de mousse qui sont :

- La mousse souple
- La mousse semi-rigide
- La mousse rigide.

Dans notre cas, on s'intéresse à la mousse polyuréthane rigide qui joue un rôle d'un isolant thermique constituée de trois produits chimiques qui sont : Polyol, cyclopentane et l'isocyanate.

##### III.A.1.1.1 Préparation de la mousse polyuréthane

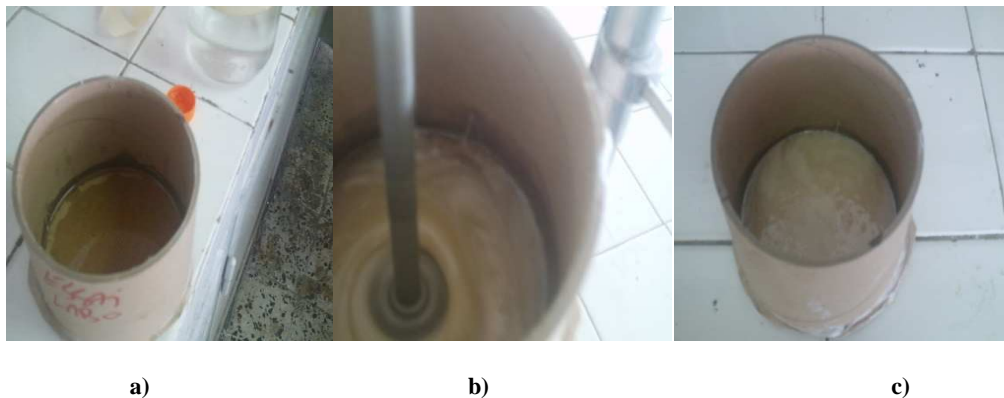
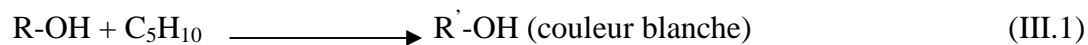
Prenant exemple un produit moussant de formulation suivante :

Polyol	100 PP
Cyclopentane	15 PP
Iso cyanate	162 PP

Avec : PP = partie en poids

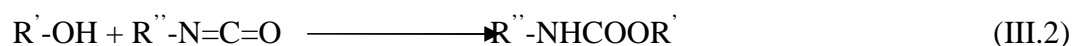
- **Principe**

On mélange 100 g de polyol avec 15 g de cyclopentane à l'aide d'un agitateur électrique jusqu'à l'obtention d'une couleur blanche qui s'appelle mélange polyol de la formule chimique suivante :



**Figure III.A.2 :** Images représentent les étapes préparatoires de la mousse polyuréthane : a) polyol+cyclopentane. b) agitation avec l'agitateur. c) mélange polyol blanc.

On mélange ce dernier (mélange polyol déjà obtenu) avec 162 g d'iso cyanate, toujours à l'aide d'un agitateur électrique jusqu'à l'obtention d'un liquide crème qui commence à s'expanser rapidement pour former un bloc solide qu'on appelle la mousse polyuréthane dont sa réaction chimique est donnée par la formule suivante :





**Figure III.A.3 :** Obtention de la mousse polyuréthane.

#### **III.A.1.1.2 Obtention de la poudre de polyuréthane**

Pour obtenir la poudre de la mousse polyuréthane en premier lieu, on prend le bloc de mousse obtenu et on le gratte sur un papier verre pour avoir des fibres fines.

Après le polissage, on passe au tamisage de ces fibres fines par des tamis de grand diamètre au tamis de diamètre plus petit.

A la fin, on aura une poudre fine de diamètre infiniment petit (de 1,6 à 0,6 mm).



**Figure.III.A.4:** Grattage de la mousse polyuréthane.



**Figure III.A.5 :** Tamisage de la mousse polyuréthane.

### III.A.1.2 La paraffine

La paraffine c'est le matériau à changement de phase utilisé dans notre travail. Le MCP utilisé est une cire de paraffine facilement disponible sur le marché et d'un prix abordable. C'est la paraffine utilisée pour la fabrication des bougies. Elle fond entre 40 et 71 °C.

Les bougies ne sont pas uniquement composées de la paraffine mais avec un additif chimique très important est employé systématiquement (la stéarine),

Les paraffines sont obtenues en raffinerie à partir du pétrole de formule brute  $C_nH_{2n+2}$ . On distingue principalement :

- Paraffine liquide dont  $n$  (le nombre  $n$  d'atomes de carbone) est entre 8 à 19
- Paraffine solide dont  $n$  est entre 20 et 40.

### III.A.1.3 Le graphite

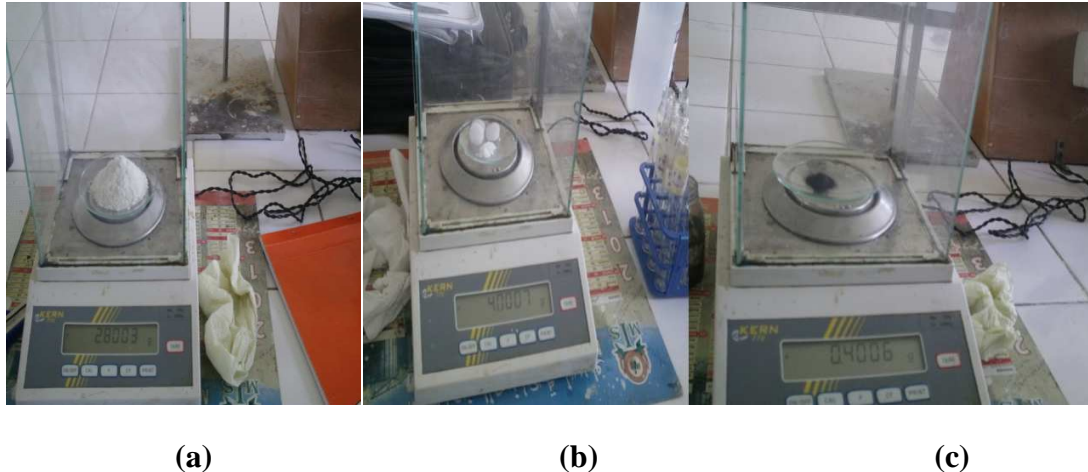
Le graphite naturel est un minéral de carbone élémentaire. Il possède une couleur varie de noir à gris-noir.

Le graphite est une substance inerte qui résiste à l'attaque de la plupart des produits chimiques. C'est un excellent conducteur d'électricité et de la chaleur, il se caractérise par son point de fusion égal à 3500 °C, à cause de ces propriétés physiques et chimiques. On le trouve dans plusieurs matériaux comme : les mines de crayons, joints de pompes, balais de moteurs électriques, moules, garnitures de freins et d'embrayages.

Le graphite utilisé pour la réalisation des composites est le graphite synthétique qui a les mêmes caractéristiques que le graphite naturel.

### III.A.2 Réalisation des composites MCP/MPUR et MCP/MPUR/GR

Pour la préparation du composites, en premier lieu on prépare les pesés nécessaires des différents composants avec des proportions différentes en masse des composants, comme le montra la figure ci-dessous :



**Figure III.A.6 :** Pesés des composants : a) Mousse polyuréthane MPUR  
b) Paraffine MCP, c) Graphite GR.

#### III.A.2.1 : Différents pourcentages en masse des constituants

Numérotation des échantillons	Matrice mousse polyuréthane MPUR (en %)	Paraffine Par (en %)	Graphite GR (en %)	Notation
CompA	50	50	0	MP50% Par50%
CompB	40	50	10	MP40% Par50% GR10%
CompC	35	60	5	MP35% Par60% GR5%
CompD	30	65	5	MP30% Par65% GR5%
CompE	25	70	5	MP25% Par70% GR5%
CompF	20	75	5	MP20% Par75% GR5%
CompG	15	80	5	MP15% Par80% GR5%
CompH	10	85	5	MP10% Par85% GR5%
CompI	5	90	5	MP5% Par90% GR5%

**Tableau III.A.1 :** Proportions en masse des composants.

Après la pesée de chaque composant, on les verse dans des récipients qu'on couvre après avec du papier aluminium pour éviter la prise d'eau.

On place par la suite les récipients dans un bain-marie réglé à 75 °C pour que la paraffine fonde tout en mélangeant à l'aide d'une spatule pour obtenir un mélange bien homogène.



1)

2)

3)

**Figure III.A.7 :** Versement des composants dans les récipients puis dans le bain-marie : 1) les composites; 2) mise des composites dans les récipients ; 3) bain-marie.

### III.A.3 Fabrication des composites de dimension (40 X40 X 6 mm<sup>3</sup>)

Après obtention du mélange, on verse le contenu du récipient dans l’empreinte d’un moule en acier de forme parallélépipédique, fabriqué à cet effet. Par la suite, les plaques obtenues (de dimension 40x40x6 mm<sup>3</sup>) subissent une compression uni-axiale à froid.



**Figure III.A.8 :** Moule utilisé pour la fabrication des composites de 40x40x6 mm<sup>3</sup>.

Après le démoulage, on obtient des plaques ayant les dimensions du moule.



(a) Pastille sans graphite

(b) Pastille avec graphite

**Figure III.A.9 :** Images des composites de 40 X40X6 mm<sup>3</sup>.

### III.A.4 Essai de compression

Pour réduire et minimiser l'existence des bulles d'air qui peuvent se former lors de l'élaboration et de la cristallisation des pastilles, on leur fait subir une compression unidirectionnelle qui peut aller atteindre 80 kN.

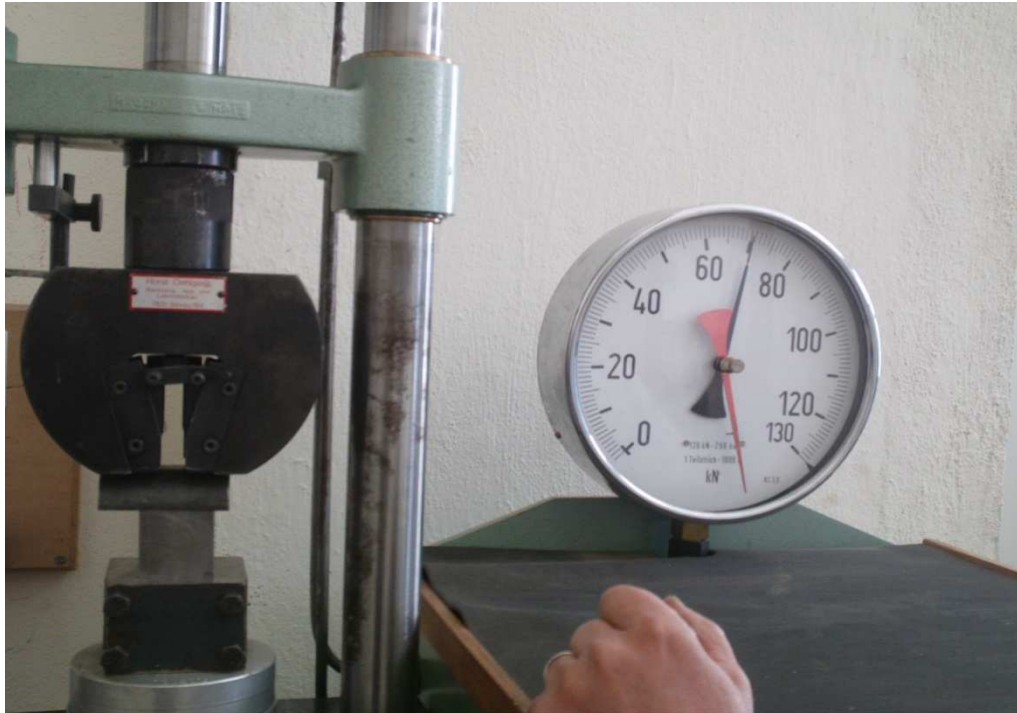


Figure III.A.10 : Compression des composites.

### III.A.5 Masse volumique des composites

La masse volumique  $\rho$  d'un corps homogène est définie par le quotient de sa masse sur son volume :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [\text{Kg}/\text{m}^3] \text{ ou } [\text{g}/\text{cm}^3] \quad (\text{III. 3})$$

Autrement dit, la masse volumique  $\rho$  est le rapport entre le volume et la masse d'un même corps. Elle dépend de la substance du corps. Pour les solides et les liquides, elle dépend légèrement de la température et presque pas de la pression. Pour les gazeux elle dépend fortement de la température et de la pression.

Pour la mesure de la masse volumique du composite, on utilise un pycnomètre et une balance de précision ( $10^{-4}$  g).

Le pycnomètre est constitué d'un petit ballon (d'environ  $50 \text{ cm}^3$ ) sur lequel vient s'adapter un bouchon rodé creux surmonté d'un tube capillaire et d'une ampoule de garde.



Figure III.A.11 : Pycnomètre.

### III.A.5.2 Principe de mesure de la masse volumique d'un solide

Il faudra peut-être veiller à utiliser un pycnomètre à col large. On réalise les trois pesées suivantes :

- Pycnomètre rempli d'eau jusqu'au trait de jauge et le solide à côté :  $m_1$ .
- Pycnomètre contenant le solide rempli d'eau jusqu'au trait de jauge :  $m_2$ .
- Pycnomètre rempli d'eau jusqu'au trait de jauge :  $m_e$ .
- La masse du solide s'obtient par différence :  $m_s = m_1 - m_e$
- La masse d'eau occupant le même volume s'exprime par :  $m_e = m_1 - m_2$
- L'expression de la masse volumique du solide est donc donnée par :

$$\rho_s = \frac{m_s}{V} = \frac{m_s}{m_e} \rho_e = \frac{m_1 - m_e}{m_1 - m_2} \rho_e$$

(III.4)

$\rho_s$  : Masse volumique du solide.

$\rho_e$  : Masse volumique du liquide utilisé.

### III.A.6 Caractérisation au Microscope Electronique à Balayage (MEB) et par la spectroscopie Infrarouge FT-IR

#### III.A.6.1 Préparation des échantillons

La préparation de composite qui a servi à la réalisation des plaques de dimension 40 X40 X6 mm<sup>3</sup>, reste la même qui a permis de confectionner des petites pastilles en forme de disque, spécialement pour la caractérisation par le MEB et la FT-IR.



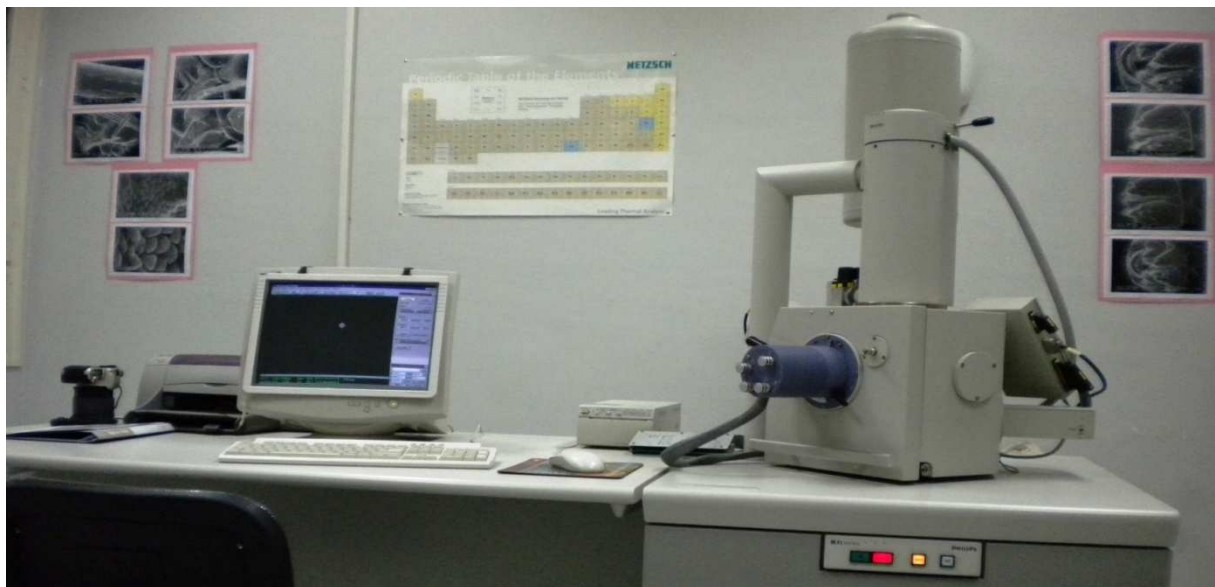
**Figure III.A.12:** Echantillons pour le MEB et FT-IR

### III.A.6.1 Principe de fonctionnement du MEB

Le microscope électronique à balayage du laboratoire est de type PHILLIPS ESEM 30.

Le MEB permet d'obtenir des images de surface pratiquement de tous les matériaux solides, à des échelles allant de celle de la loupe ( $\times 10$ ) à celle du microscope électronique en transmission (500.000 ou plus). Ces images mettent en valeur en premier le faisceau d'électrons remis par le relief et la grande profondeur du champ.

Le MEB à pression contrôlée (dit environnemental) permet l'observation dans un vide allant jusqu'à 30 mbar, rendant ainsi possible l'examen d'échantillons qui peuvent supporter le vide sans le polluer [13].



**Figure III.A.13 :** Microscope électronique à balayage.

Le MEB est constitué :

- D'un système optique décomposé en : Une source des électrons composée d'un filament en tungstène, un faisceau électronique, un système de lentilles de focalisation et condensation, un contrôle électronique pour déplacer le faisceau afin de faciliter l'alignement ou afin d'élaborer l'image, un système de balayage pour contrôler le grossissement.
- D'un système de visualisation et d'enregistrement des images produites comportant : Un détecteur des électrons rétrodiffusés et des électrons secondaires qui repère le signal généré par l'interaction du faisceau et l'échantillon puis l'amplifie en le convertissant en signal électrique, un système informatique.
- D'une pompe à vide munie d'un capteur permettant de faire le vide plus ou moins poussé car les électrons ne se déplacent librement que dans le vide.
- D'un support des échantillons.

### **Fonctionnement simplifié**

Une sonde électronique fine (faisceau d'électrons) est projetée sur l'échantillon à analyser. L'interaction entre la sonde électronique et l'échantillon génère des électrons secondaires, de basse énergie qui sont accélérés vers un détecteur d'électrons secondaires qui amplifie le signal. À chaque point d'impact correspond un signal électrique. L'intensité de ce signal électrique dépend à la fois de la nature de l'échantillon au point d'impact qui détermine le rendement en électrons secondaires et de la topographie de l'échantillon au point considéré. Il est ainsi possible, en balayant le faisceau sur l'échantillon, d'obtenir une cartographie de la zone balayée.

L'agrandissement est déterminé par le rapport entre la surface balayée sur l'échantillon (un rectangle de dimension variant entre quelques mm et une fraction de micromètre de coté), et la dimension du document final sur l'écran d'observation [13].

### **Systèmes de fixation :**

Une fois préparé correctement, l'échantillon doit être introduit dans la chambre objet du microscope et fixé sur un support adéquat [13].

La nature du support et la manière à fixer sur ce support dépend à la fois de la nature de l'échantillon et du type d'observation et/ou d'analyse.

Dans le cas d'une observation topographique d'un échantillon massif, la méthode la plus courante est de le coller sur un porte échantillon à l'aide d'une laque conductrice (laque à l'argent ou le carbone) ou éventuellement d'un ruban adhésif double face [13].

### III.A.6.2 : Analyse par Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier

La Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (ou FT-IR : Fourier Transformed InfraRed spectroscopie) est basée sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par le matériau analysé. Elle permet via la détection des vibrations caractéristiques des liaisons chimiques, d'effectuer l'analyse des fonctions chimiques présentes dans le matériau.



**Figure III.A.14** : Image du Spectrophotomètre IR

#### **Principe de fonctionnement :**

Le rayonnement infrarouge excite les atomes, lesquels subissent des vibrations selon divers modes qui sont : déformation, élongation symétrique ou non symétrique. Le domaine infrarouge entre  $3500\text{ cm}^{-1}$  et  $500\text{ cm}^{-1}$  correspond au domaine d'énergie de vibration des molécules. La comparaison entre le rayonnement incident et celui transmis à travers l'échantillon suffit pour déterminer les principales fonctions chimiques présentes dans l'échantillon.

#### **Réalisation du spectre :**

Tout dépend de la nature du produit. Voici l'inventaire des méthodes :

- Liquide pur : il est appliqué directement sur les fenêtres. Une ou deux gouttes suffisent.
- Solide en cristaux : il est mélangé à un sel, passé dans une presse pour former un film et placé dans un spectroscope. Le sel utilisé couramment est du bromure de potassium.



**Figure III.A.15:** La forme des films.

Autres sels utilisés :

Sel	NaCl	KBr	CsI
Limite de transmission en $\text{cm}^{-1}$	650	400	200

Différents échantillons sous forme de poudre sont mélangés avec le bromure de potassium (KBr) à raison d'un milligramme de poudre pour deux cents milligrammes (200 mg) de KBr, puis compressés sous forme de pastille. L'analyse est réalisée par utilisation d'un spectrophotomètre IR à transformée de fourrier de modèle FTIR 8400.

### III.A.7 : Réalisation de la plaque de dimension (30X 30 X 3 $\text{cm}^3$ ) pour la mesure de la conductivité thermique

#### a. Fabrication du moule en verre

Avant de réaliser notre plaque, nous avons élaboré un moule en verre. Le moule est constitué de deux plaques de dimensions (320x320x3  $\text{mm}^3$ ) et de quatre barrettes de dimensions de (320x10x3  $\text{mm}^3$ ) délimitant la plaque composite de dimension (300x300x3  $\text{mm}^3$ ).

Le choix de la dimension du moule est dicté par les besoins des essais de conductivité thermique réalisés sur un CT mètre dont la dimension des plaques est fixée à 30x30x e  $\text{cm}^3$ .



**Figure III.A.16:** Image représente le moule en verre

**b. Elaboration des matériaux**

On prépare un mélange de 5%MPUR + 95%Par, d'une masse de 700 g, et on met le tout dans un récipient couvert par un papier aluminium. On met le tout ensuite dans un bain-marie à 75°C pour faire fondre la paraffine.

Après fusion totale de la paraffine avec la mousse, on mélange bien le composite pour avoir un mélange homogène visqueux. Le mélange est ensuite versé dans le moule préalablement chauffé à l'aide d'un séchoir pour éviter une cristallisation rapide de la paraffine sur les parois.

La plaque supérieure du moule y est déposée soigneusement et pressée à l'aide d'une masse déposée sur cette dernière pour éliminer les bulles d'air et améliorer l'état de surface de la plaque et obtenir une surface lisse.



**Figure .III.A.17:** Image représentant le mélange versé dans le moule.

On laisse le mélange dans une place froide pour la cristallisation lente du composite. La plaque formée est démoulée par la suite.



**Figure III.A.18:** plaque de (30x30x3 cm<sup>3</sup>).

### III.A.8: CT mètre

Le CT mètre est un appareil de contrôle thermique non destructif, il a été élaboré dans le but d'évaluer avec précision, les paramètres thermiques d'un certain nombre de matériaux, et de contrôler la production des matériaux isotropes et homogènes par prélèvements.



**Figure III.A.19:** Image de l'unité de conductivité thermique (CT mètre).

#### III.A.8.1: Description de l'appareil :

Une armoire à charnières en fibres de verre abrite les composants principaux de l'ensemble. La section de base de l'armoire contient le débitmètre thermique et la plaque froide, installée sur quatre ressorts. Cet ensemble est refroidi à l'aide d'un fluide à température constante de façon à ce que la plaque soit sensiblement iso thermique.

Le débitmètre thermique donne une sortie en millivolt (mV), proportionnellement à la différence de température sur les deux surfaces. Le couvercle de l'armoire abrite la plaque chaude chauffée électriquement. Elle est contrôlée d'une manière électronique à une température de consigne et l'entrée de la température par voyant rouge clignotant. La plaque est levée et abaissée par le mécanisme à poignée à vice située en haut de l'armoire.

Un indicateur à cardant dans la roue permet de déterminer le spécimen testé. Le mouvement de la plaque chaude permet d'utiliser des spécimens d'épaisseur allant jusqu'à 75 mm. La plaque chaude est protégée par un interrupteur de haute température (70°C). Une isolation en mousse entoure l'ensemble de débitmètre thermique. Une isolation similaire se trouve sur le couvercle, ainsi qu'un espace d'air stagnant (immobile) autour de l'ensemble de la plaque chaude, pour empêcher la perte de chaleur.

**III.A.8.2 : Méthode d'essais :**

La taille des échantillons qui peuvent être utilisés avec la méthode de mesure de la conductivité pour un débitmètre thermique de 300×300 mm, le spécimen testé doit avoir pour dimensions 300×300 mm et 75 mm d'épaisseur maximum

La résistance thermique est entre 0,1 et 1,4 m<sup>2</sup>°C/W. En général, plus le matériau utilisé est isolant, plus le spécimen devrait être mince, sinon la durée du test sera longue.

Des tapis de caoutchouc en silicone sont utilisées pour des résistances inconnues ou d'une faible résistance thermique et aussi pour éliminer l'espace d'air entre le spécimen, la plaque chaude et la plaque froide.

Pour les spécimens granuleux, comme le sable et gravier une plinthe de bois est fournie pour y mettre le matériau. Il doit être placé dans la plinthe de 15 mm d'épaisseur pour lui donner une densité maximale, sinon le résultat ne sera pas précis à cause des espaces d'air entre les grains de sable.

**III.A.8.3 : Méthode de calcul :**

On dit que les conditions de régime permanent sont obtenues lorsque 5 lectures consécutives à cet intervalle donnent des valeurs de résistance thermique d'une stabilité de 1% sans changer à chaque fois dans le même sens.

A chaque intervalle d'échantillonnage, noter les valeurs de T<sub>1</sub> et T<sub>2</sub> et de la sortie du débitmètre thermique. La température moyenne et la différence de température entre T<sub>1</sub> et T<sub>2</sub> sont calculées.

Selon que des tapis de caoutchouc à la silicone sont utilisés ou non, la conductivité thermique peut être déterminée par l'équation lambda suivante :

$$\lambda = \frac{I_s[(K1+(K2*T))+(K3+(K4*T)*HFM)+(K5+(K6*T)*HFM^2)]}{\Delta T}$$

(III.5)

Avec :

$\lambda$  : Conductivité thermique en W/m<sup>2</sup>°C

I<sub>s</sub> : Epaisseur du spécimen en m

$\Delta T$  : Différence de température (T<sub>1</sub>-T<sub>2</sub>) en °C

$\check{T}$  : Température moyenne (T<sub>1</sub>+T<sub>2</sub>)/2 en °C

HFM : Sortie du débitmètre (Heat Flowmeter Reading) en mV.

T<sub>1</sub> : Température de la plaque chaude.

$T_2$  : Température de la plaque froide.

**Les constantes d'étalonnage avec ou sans silicone :**

$$K_1 = 88.1389$$

$$K_2 = -2.7829$$

$$K_3 = -21.3064$$

$$K_4 = 0.8037$$

$$K_5 = 0.7954$$

$$K_6 = -0.0189$$

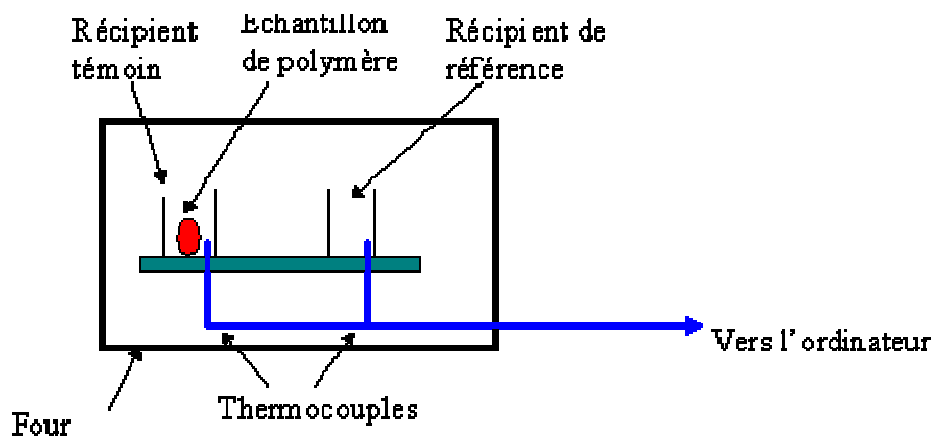
### III.9. Calorimétrie Différentielle à Balayage (DSC : Differential Scanning Calorimetry)

#### Principe de l'appareil

La calorimétrie différentielle à balayage est une technique utilisée pour étudier ce qui arrive aux polymères lorsqu'ils sont chauffés.

Cette technique sert à étudier les transitions thermiques d'un polymère. Les transitions thermiques sont les changements qui interviennent dans un polymère quand on le chauffe.

Le polymère est chauffé dans un dispositif qui ressemble à cela:



**Figure III.A.20 :** Image perspective d'une DSC

Il y a deux récipients. Dans l'un des deux, le récipient témoin, nous mettons notre échantillon de polymère. L'autre, que nous laissons vide, est le récipient de référence. Les deux récipients se trouvent dans un four qui chauffe habituellement à quelque chose comme  $10^{\circ}\text{C}/\text{minute}$ . Chaque récipient contient un thermocouple relié à un ordinateur. L'ordinateur fait la différence entre la température de l'échantillon et celle de référence, et les convertit en flux de chaleur.

L'échantillon de polymère représente de la matière supplémentaire dans le récipient témoin par rapport au récipient de référence. La présence de cette matière supplémentaire et son "inertie thermique" (plus y'a de matière, plus il faut de temps pour que tout soit chaud!) font que le récipient témoin ne sera pas à la même température que le récipient de référence.

Les flux de chaleur en DSC sont la conséquence de transition ou de réaction endothermique ( $\Delta Q < 0$ ) ou exothermique ( $\Delta Q > 0$ ) comme celles déterminés par les changements de phase, la fusion, la cristallisation. Ces changements sont détectés par une méthode différentielle.

Les courbes DSC en fonction de la température de chauffage contiennent des séries de pics orientés négativement (vers le bas) ou positivement (vers le haut) de l'axe de flux de chaleur. Sur l'axe des abscisses nous traçons la température (du four). Sur l'axe des ordonnées nous traçons la différence de chaleur entre les deux récipients, témoin et référence.

Les positions des pics sur l'axe de température et leurs nombre permettent l'identification qualitative du matériau analysé. Quant aux aires des pics, elles permettent les calculs des chaleurs de réaction, de transition, de fusion ou de cristallisation.

Pour notre travail, on a deux échantillons (paraffine, composite 50%Par, 50%MPUR), ont subit le test de DSC, dans le but de connaître la température et l'enthalpie de changement de phase des deux échantillons.

## **B. Deuxième partie : Béton renforcé**

### **III.B.1 Constituants du béton renforcé de fibres**

#### **III.B.1.1. Renfort**

La matière utilisée pour le renforcement du béton est la poudre de mousse polyuréthane qui a été récupérée des déchets à l'ENIEM (Entreprise Nationale des Industries de l'Electroménager) à la zone industrielle Aissat Idir Oued-Aissi Tizi Ouzou.

Pour réaliser les éprouvettes en mortier renforcées de mousse nous avons procédé à des pesées de poudre de mousse pour avoir des pourcentages massiques à utiliser en fonction de la composition de la matrice en mortier.

Dans notre étude, on a utilisé de la poudre de mousse polyuréthane avec un pourcentage massique dans une plage variant de 0.02 % à 5 %.

#### **III.B.1.2 Matrice**

La matrice utilisée est le micro béton ordinaire (mortier) qui est composé seulement du ciment du sable et de l'eau (il ne contient pas de gravier).

### III.B.2. Formulation du béton renforcé

L'objectif de la formulation d'un mortier est de déterminer, en fonction du type d'ouvrage à réaliser, les paramètres nécessaires à la mise en œuvre du béton (c'est-à-dire la nature et les quantités des différents granulats, ainsi le dosage en eau E et en ciment C).

La méthode pratique qui nous permet de déterminer la composition des mortiers est la méthode de DREUX-GORISSE.

La méthode de DREUX-GORISSE permet de déterminer les quantités optimales de matériaux (eau E, ciment C, sable S, gravillon g et gravier G) nécessaire à la confection d'un mètre cube de béton conformément au cahier des charges. Dans notre cas, on utilise seulement le sable (sans gravier).

#### III.B.2.1 Formulation de DREUX-GORISSE

Plusieurs étapes de calcul successives sont nécessaires à l'obtention de la formulation théorique de béton :

- Détermination du rapport C/E
- Détermination de C et E
- Le dosage du sable

##### i. Résistance souhaitée :

Le béton doit être formulé pour qu'à 28 jours, sa résistance moyenne en compression atteigne la valeur caractéristique  $\sigma'_{28}$ . Pour une résistance souhaitée à 28 jours notée  $F_{C28}$ , la valeur de la résistance moyenne doit être supérieure de 15 % (majorée de 15% à 20%) à la résistance  $F_{C28}$  :

$$F_C = \sigma'_{28} = 1.15 * F_{C28} \quad (III.6)$$

##### ii. Détermination du rapport C/E

Le rapport C/E est calculé grâce à la formule de BOLOMEY suivante :

$$\sigma'_{28} = G * \sigma'_c (C/E - 0.5) \quad (III.7)$$

Avec :

$\sigma'_{28}$  : résistance moyenne en compression du béton à 28 jours en MPa

$\sigma'_c$  : classe vraie du ciment à 28 jours en MPa

C : dosage en ciment en kg par m<sup>3</sup> (kg/m<sup>3</sup>) de béton

E : dosage en eau totale sur matériau sec en litre par m<sup>3</sup> (L/m<sup>3</sup>) de béton

G : coefficient granulaire

Dans les tableaux III.1 et III.2 suivants, on donne les valeurs de la classe vraie du ciment (32.5 MPa, 42.5 MPa , 52.5 MPa ) et les valeurs approximatives du coefficient granulaire G, on suppose que le serrage du béton sera effectué dans des bonnes conditions (par vibration en principe).

**Tableau III.B.1** : correspondance entre classe vraie et dénomination normalisée des ciments.

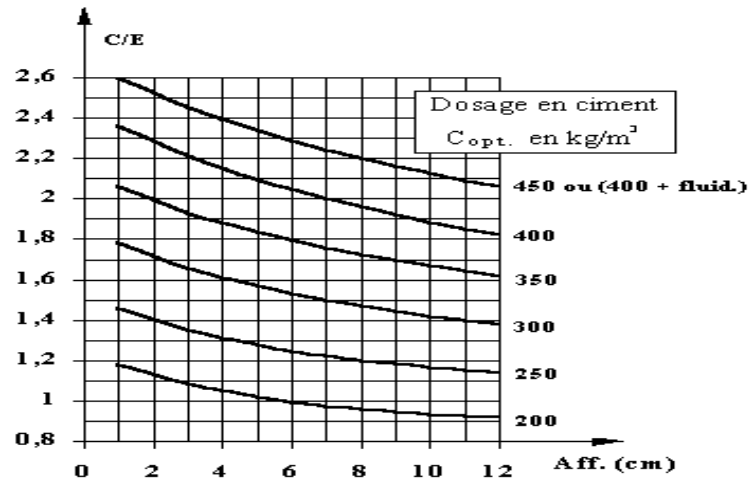
Dénomination Normalisée	32.5 MPa	42.5 MPa	52.5 MPa
Classe vraie $\sigma'_c$	45 MPa	55 MPa	> 60 MPa

**Tableau III.B.2** : Coefficient granulaire G en fonction de la qualité et la taille maximale des granulats  $D_{max}$  :

Qualité des granulats	Dimension $D_{max}$ des granulats		
	Fin < 12.5 mm	Moyen 20 < $D_{max}$ < 31.5 mm	Gros $D_{max}$ > 50 mm
Excellente	0.55	0.60	0.65
Bonne, courante	0.45	0.50	0.55
Passable	0.35	0.40	0.45

#### a) Détermination de C (le dosage en ciment)

Pour déterminer le dosage en ciment C, on utilise l'abaque de la figure III.B.1 permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée [15].



**Figure III.B.1:** Dosage en ciment en fonction de C/E et de l'affaissement

Pour déterminer la valeur optimale de  $C_{opt}$ , il suffit de positionner sur l'abaque de la figure III.B.1. Les valeurs de C/E et de l'affaissement, le point obtenu doit être ramené parallèlement aux courbes de l'abaque.

Les valeurs de l'affaissement sont données en fonction du type de l'ouvrage à réaliser, du mode de réalisation et des moyens de vibration disponibles. Ces valeurs sont caractérisées dans le tableau qui suit :

Affaissement en cm	Plasticité	Désignation	Vibration conseillée	Usages fréquents
0 à 4	Ferme	F	Puissante	Béton extrudés Béton de VRD Génie civil
5 à 9	Plastique	P	Normale	Ouvrages d'art Bétons de masse
10 à 15	Très plastique	TP	Faible	Ouvrages courants
≥ 16	Fluide	Fl	Léger piquage	Fondations profondes Dalles et voiles minces

**Tableau III.B.3:** Affaissement en fonction du type d'ouvrage à réaliser.

### b) Détermination de dosage en eau E

Après avoir déterminé la valeur de C et le rapport C/E, on peut connaître approximativement le dosage en eau totale  $E_T$ . En fonction de la dimension maximale D des granulats, il sera nécessaire d'appliquer une correction sur le dosage en eau totale, donnée dans le tableau suivant :

Dimension maximale des granulats ( $D_{max}$ en mm)	5	8	12,5	20	31,5	50	80
Correction sur le dosage de pâte (en %)	+ 15	+ 9	+ 4	0	- 4	- 8	- 12

**Tableau III.B.4:** Correction sur le dosage de pâte en fonction de  $D_{max}$  [15].

**c) Détermination du dosage des granulats**

Il s’agit de tracer la droite de référence de DREUX qui représente la courbe idéale d’un matériau à minimum de vides. C’est une droite brisée dont le point de brisure est défini par son abscisse X et son ordonnée Y :

En abscisse x :

$$\text{Si } D_{max} < 20 \text{ mm, } x = D_{max}/2$$

Si  $D_{max} > 20$  mm, x sera située au milieu du segment gravier limité par la dimension de tamis 5 mm.

En ordonnée :

$$Y = 50 - \sqrt{D} + K' \tag{III.8}$$

Où :  $K' = K + K_S + K_P$

Avec :

$K_S$  : correction supplémentaire fonction de la granularité du sable.

$K_P$  : correction supplémentaire si le béton est pompable.

$K_S = 6 M_{FS} - 15$  avec  $M_{FS}$  est le module de finesse du sable.

$K_P = +5$  à  $+10$  selon le degré de plasticité désiré.

$K$  : terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l’efficacité du serrage, de la forme des granulats roulés ou concassés et également du module de finesse du sable [15].

Les valeurs du coefficient K sont données dans le tableau suivant:

Vibration	faible		normale		Puissante	
	roulé	concassé	Roulé	concassé	roulé	concassé
Forme des granulats (du sable en particulier)						
400+fluides	-2	0	- 4	- 2	- 6	- 4

Dosage en ciment	400	0	+ 2	- 2	0	- 4	- 2
	350	+ 2	+ 4	0	+ 2	- 2	0
	300	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4	0	+ 2
	250	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4
	200	+ 8	+ 10	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6

**Tableau. III.B.5** : terme correcteur K.

### iii .Détermination des pourcentages en volumes absolus des granulats

Pour avoir les pourcentages en volumes absolus de granulats il est nécessaire de tracer des droites reliant deux à deux les courbes granulométriques des granulats du mélange (sur le même graphe).

Ces droites sont tracées, en joignant le point à 90% de la courbe granulaire du premier au point de 5% de la courbe du granulat suivant. L'intersection des droites ainsi tracées avec la courbe de référence permet, par prolongement sur l'axe des ordonnées, déterminer le pourcentage en volume absolu de chacun des granulats.

### iv .Détermination de la compacité du béton

Pour déterminer les masses de granulats du béton, il faut connaître la compacité  $C_0$  du béton qui correspond au volume absolu en  $m^3$  des matières solides (sable, ciment, gravier et gravette) contenues dans un mètre cube de béton frais en œuvre.

Par exemple, le volume absolu des grains de ciment  $V_c$  est calculé comme suit :

$$V_c = C/\rho_c \quad \text{avec : } \rho_c = 3,1 \text{ t/m}^3, \text{ la masse volumique absolue du ciment utilisé.}$$

Et le volume total absolu  $V$  de granulats est :

$$V = 1000C_0 - V_c$$

Les valeurs de la compacité du béton sont données dans le tableau suivant :

consistance	serrage	Compacité ( $C_0$ )						
		$D_{\max}=5$	$D_{\max}=8$	$D_{\max}=12,5$	$D_{\max}=20$	$D_{\max}=31,5$	$D_{\max}=50$	$D_{\max}=80$
Molle	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration							

	normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
plastique	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855
Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes :								
Sable roulé et gravier concassé $c_1 = -0.01$								
Sable et gravier concassé $c_1 = -0.03$								

**Tableau III.B.6 :** Compacité du béton en fonction de  $D_{max}$  des granulats

### III.B.2.2. Propriétés des constituants choisis

#### a. Le sable :

Le sable utilisé est un sable de rivière, roulé, a une forme arrondie due à l'érosion.

On a choisi :

- un sable fin de 0 à 0.05 mm.
- un sable moyen de 0.05 à 1.5 mm.
- un sable gros de 1.5 à 5 mm.

#### b. le ciment

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une pâte faisant prise qui durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide, il représente 25 à 40 % du volume total du béton. Il est principalement composé de clinker, de sulfate de calcium, et d'ajouts éventuels.

Les ciments courants sont subdivisés en cinq types selon la nature et la proportion de leurs constituants. [16] :

- Le ciment portland (CEM I),
- Le ciment portland composé (CEM II /A ou B),
- Le ciment de haut fourneau (CEM III),
- Le ciment pouzzolanique (CEM IV),
- Le ciment au laitier et aux cendres (CEM V/A ou B).

Dans notre travail, on a utilisé le ciment portland composé (Ciment du Lion), CEM II/A.L 42,5R.



**Figure III.B.2 :** Ciment utilisé dans notre travail

### **c. L'eau**

Dans la réalisation de nos éprouvettes, on a utilisé l'eau de robinet de laboratoire génie civil au département génie de la construction.

### **d. Poudre de la mousse polyuréthane**

## **III.B.3. Fabrication des corps des éprouvettes**

Le remplissage des moules en acier se fait en deux ou trois couches successives suivant les dimensions des moules, jusqu'à un remplissage uniforme.

Une table vibrante a servi à mettre les mélanges en place dans des moules. La finition de la surface est effectuée à l'aide d'une règle métallique.

Après le remplissage des moules par le mélange, ils sont laissés pendant 24 heures dans le laboratoire pour les démouler en suite.

Les éprouvettes réalisées sont des éprouvettes cylindriques de dimensions (10x20 cm<sup>2</sup>) et elles sont utilisées pour l'essai d'écrasement en compression simple.



**Figure III.B.3** : Moule pour la réalisation des éprouvettes cylindriques (10x20 cm<sup>2</sup>).





Figure III.B.4 : Images représentent les préparations des éprouvettes de béton renforcées

### III.B.4 Essais de compression sur les éprouvettes

Plusieurs essais mécaniques sont définis par des normes pour déterminer les caractéristiques des matériaux renforcés ou non.

Dans notre travail, on s'intéresse à l'essai de compression simple.



Figure III.B.5: Eprouvette en compression simple

La contrainte est homogène à une pression et devrait donc s'exprimer en pascals (1 Pa = 1 N/m<sup>2</sup>). Les valeurs étant très élevées, on utilise les méga pascals :

$$1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa} = 1 \text{ N/mm}^2.$$

On définit la contrainte  $\sigma$  (sigma) comme étant la force divisée par l'aire de la section.

$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

Dans ce chapitre, on traite les résultats expérimentaux obtenus cités dans les chapitres précédents.

### A. Résultats obtenus dans la première partie :

#### IV.1 Détermination de la masse volumique des composites :

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau ci-dessous :

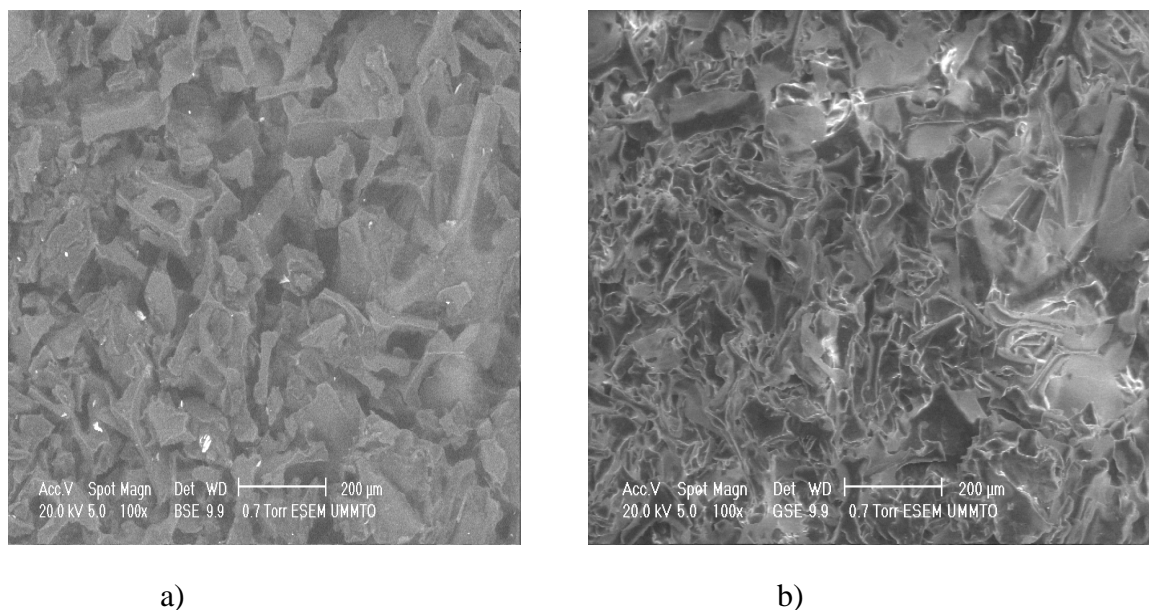
N°	Pourcentages massiques	$m_e$ (g)	$m_1$ (g)	$m_2$ (g)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
CompA	50%Par+50%MPUR	72.0206	72.1719	71.8902	0.5371
CompB	50%Par+40%MPUR+10%GR	72.0741	72.1050	72.0310	0.4176
CompC	60%Par+35%MPUR+5%GR	72.0870	72.1180	72.0626	0.5596
CompD	65%Par+30%MPUR+5%GR	72.0912	72.2915	72.0328	0.7743
CompE	70%Par+25%MPUR+5%GR	72.0635	72.1841	71.9880	0.6150
CompF	75%Par+20%MPUR+5%GR	72.0815	72.1836	72.0399	0.7105
CompG	80%Par+15%MPUR+5%GR	72.0820	72.1763	72.0680	0.8715
CompH	85%Par+10%MPUR+5%GR	72.0843	72.2318	72.0163	0.6845
CompI	90%Par+5%MPUR+5%GR	72.0815	72.1850	72.0474	0.7523

**Tableau IV.1 :** Valeurs des masses mesurées ( $m_e$ ,  $m_1$ ,  $m_2$ ) des composites la masse volumique des pastilles

Nous remarquons que la masse volumique du composite CompG est plus élevée que celle des autres et la masse volumique du composite CompB est faible que celle des autres pastilles.

#### IV.2 Observation au Microscope Electronique à Balayage MEB :

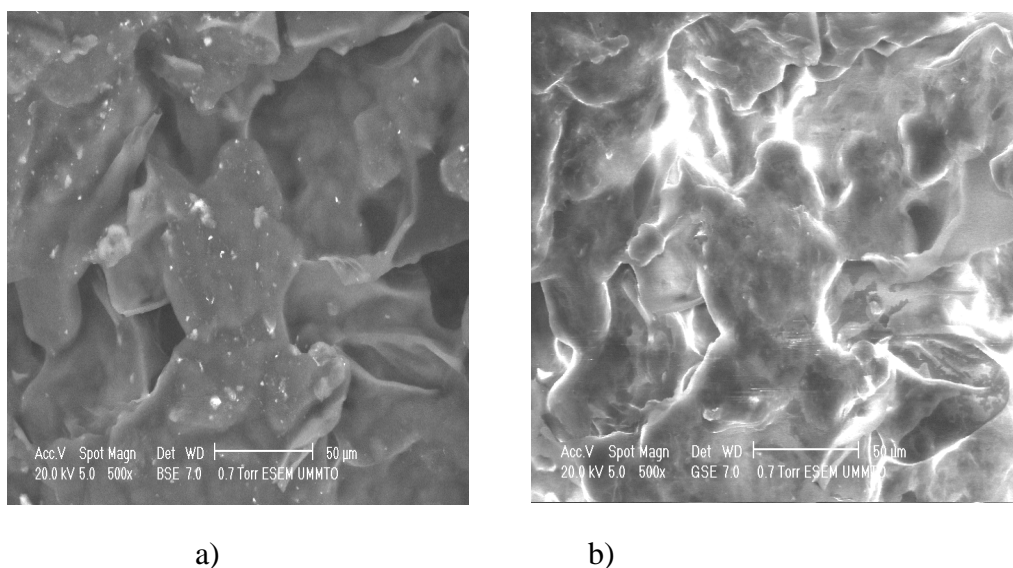
- Pour le composite CompA (50% MPUR+50%Par):



**Figure IV.1 : Images MEB pour l'échantillon CompA.**

L'observation au MEB montre des grains lumineux sur les deux images (a) et (b) qui représentent la poudre de la mousse polyuréthane. On remarque également que ces grains lumineux sont répartis dans tout le composite.

➤ Composite CompG (80%Par+15%MPUR+5%GR):



**Figure IV.2 : Images MEB pour le composite CompG.**

Pour les deux images de la figure IV.2a et IV.2b, on remarque également :

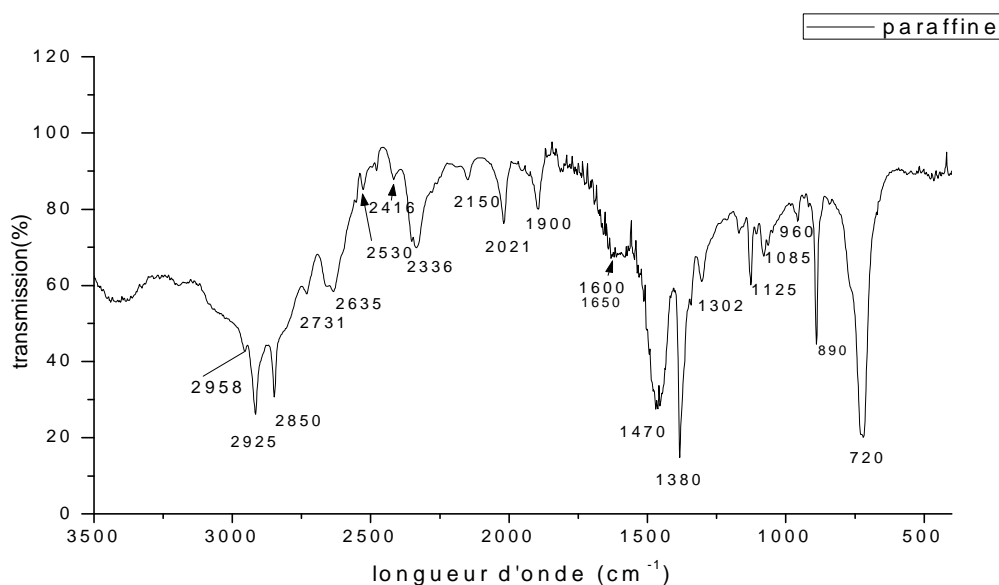
- L'apparition des grains lumineux qui représentent la poudre polyuréthane et la distribution de ces grains lumineux montre que la poudre de polyuréthane est répartie d'une façon homogène dans la structure du composite.
- L'absence des fissures qui indique la bonne adhérence de la paraffine avec la poudre polyuréthane et du graphite.

De ces quatre images, on peut distinguer :

- la répartition de la poudre de la mousse polyuréthane dans la structure des deux échantillons de façon homogène.
- les poudres de polyuréthane et de graphite ont une bonne compatibilité avec la paraffine.

### IV.3 Résultats des analyses par spectroscopie infrarouge

#### IV.3.1 Spectre infrarouge de la paraffine



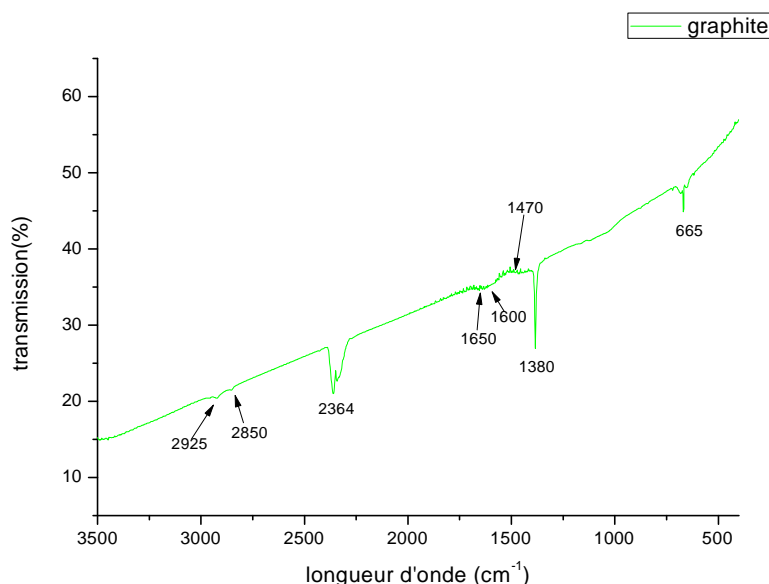
**Figure. IV.3 :** Spectre infrarouge de la paraffine

Le spectre infrarouge de la paraffine met en évidence les bandes d'adsorption caractéristiques suivantes :

- Pic à 2958 cm<sup>-1</sup> : vibration asymétrique de la liaison CH<sub>3</sub>
- Pic à 2925 cm<sup>-1</sup> : vibration asymétrique de la liaison C-H, CH<sub>2</sub>
- Pic à 2850 cm<sup>-1</sup> : vibration de symétrique de la liaison C-H, CH<sub>2</sub>
- Pic à 2731 cm<sup>-1</sup> : vibration de valence correspond à C-H

- Pic à  $2530\text{ cm}^{-1}$  : acide phosphonique (O=) PO-H
- Pic à  $2336\text{ cm}^{-1}$  : triple liaison des nitriles
- Pic à  $2150\text{ cm}^{-1}$  : vibration d'élongation variable correspond à C=C
- Bande  $1600\text{-}1650\text{ cm}^{-1}$  : vibration de la liaison C=C élongation faible
- Pic à  $1470\text{ cm}^{-1}$  : vibration de déformation de la liaison  $\text{CH}_3$  dans le plan
- Pic à  $1380\text{ cm}^{-1}$  : vibration de déformation de la liaison  $\text{CH}_2$  du cycle ou OH
- Pic à  $1302\text{ cm}^{-1}$  : vibration de déformation de la liaison C-H dans le plan
- Pic à  $1125\text{ cm}^{-1}$  : vibration de la liaison C-O élongation (alcool secondaire)
- Pic à  $1085\text{ cm}^{-1}$  : vibration de la liaison C-O élongation (alcool primaire)
- Pic à  $960\text{ cm}^{-1}$  : vibration de déformation de la liaison C-H hors plan
- Pic à  $890\text{ cm}^{-1}$  : vibration de déformation de la liaison C-H,  $\text{CH}_2$
- Pic à  $720\text{ cm}^{-1}$  : vibration de déformation de la liaison  $\text{CH}_2$

### IV.3.2 Spectre infrarouge du graphite

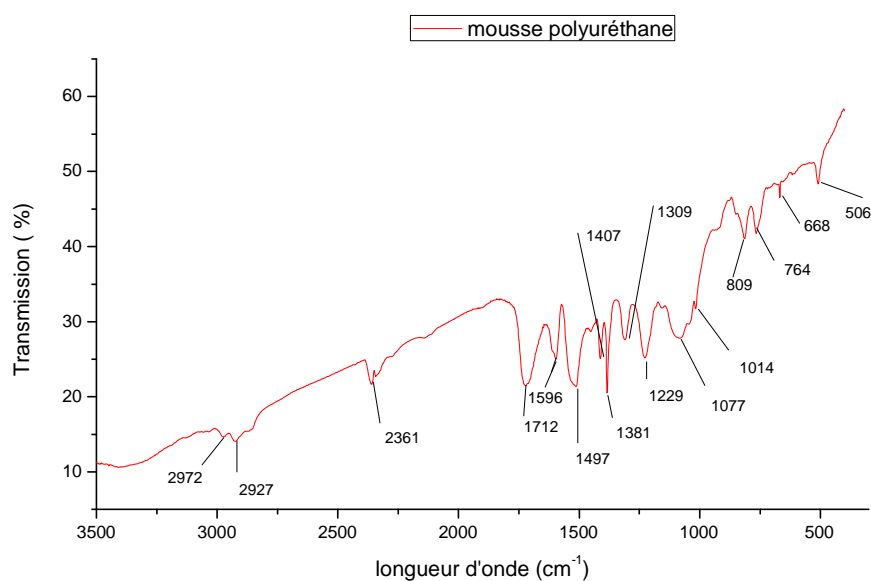


**Figure. IV.4 :** Spectre infrarouge du graphite

Le spectre infrarouge de graphite met en évidence les bandes d'adsorption caractéristiques suivantes :

- Pic à  $2925\text{ cm}^{-1}$  : vibration asymétrique de la liaison C-H,  $\text{CH}_2$
- Pic à  $2850\text{ cm}^{-1}$  : vibration symétrique de la liaison C-H,  $\text{CH}_2$
- Pic à  $2364\text{ cm}^{-1}$  : vibration de valence correspond à C-H,  $\text{CH}_2$
- Bande  $1600\text{-}1650\text{ cm}^{-1}$  : vibration de la liaison correspond à C=C
- Pic à  $1470\text{ cm}^{-1}$  : vibration de déformation de la liaison  $\text{CH}_3$  dans le plan
- Pic à  $1380\text{ cm}^{-1}$  : vibration de déformation de la liaison  $\text{CH}_2$  du cycle ou OH
- Pic à  $665\text{ cm}^{-1}$  : rotation plane des hydrogènes des carbones ( $\text{C}_6$ )

### V.3.3 Spectre infrarouge de la mousse polyuréthane



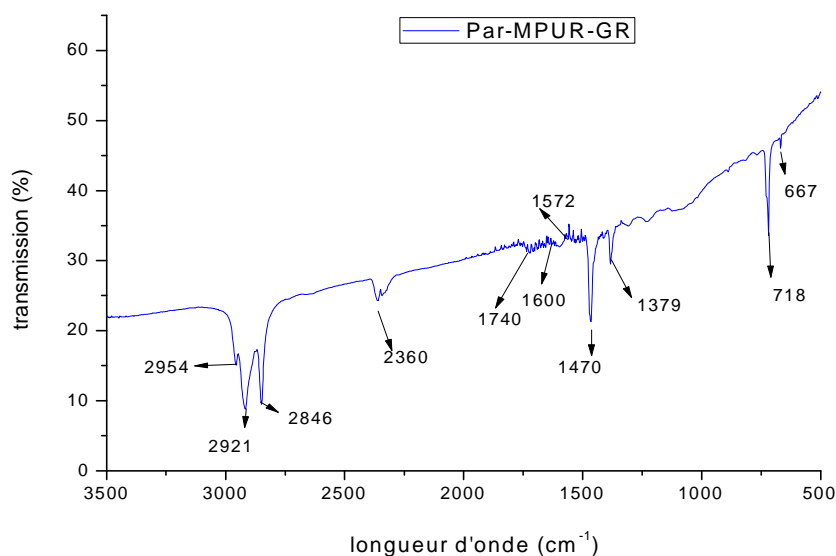
**Figure. IV. 5 :** Spectre infrarouge de la mousse polyuréthane

Le spectre infrarouge de la poudre de la mousse polyuréthane met en évidence les bandes d'adsorption caractéristiques suivantes :

- Pic à  $2972\text{ cm}^{-1}$  : vibration d'élongation de la liaison O-H
- Pic à  $2927\text{ cm}^{-1}$  : vibration asymétrique de la liaison C-H,  $\text{CH}_2$
- Pic à  $2361\text{ cm}^{-1}$  : vibration de valence correspond à C-H,  $\text{CH}_2$
- Pic à  $1712\text{ cm}^{-1}$  : vibration d'élongation de la liaison C=O (avec liaison H)
- Pic à  $1596\text{ cm}^{-1}$  : vibration de déformation de la liaison  $\text{NH}_2$
- Pic à  $1497\text{ cm}^{-1}$  : vibration d'élongation de la liaison C=C
- Pic à  $1407\text{ cm}^{-1}$  : vibration de déformation de la liaison  $\text{CH}_2$
- Pic à  $1381\text{ cm}^{-1}$  : vibration de déformation de la liaison  $\text{CH}_3$
- Pic à  $1309\text{ cm}^{-1}$  : vibration d'élongation de la liaison O-H
- Pic à  $1229\text{ cm}^{-1}$  : vibration d'élongation de la liaison C-N
- Pic à  $1077\text{ cm}^{-1}$  : vibration d'élongation de la liaison O-C
- Pic à  $1014\text{ cm}^{-1}$  : vibration d'élongation de la liaison N-H
- Pic à  $809\text{ cm}^{-1}$  : vibration de déformation de la liaison C-H

- Pic à  $764\text{ cm}^{-1}$  : vibration de déformation de la liaison O-H (déformation dans le plan)
- Pic à  $668\text{ cm}^{-1}$  : rotation plane des hydrogènes des carbones ( $C_6$ )
- Pic à  $506\text{ cm}^{-1}$  : vibration de la liaison C-H

#### IV.3.4 Spectre infrarouge du composite (Par-MPUR-GR)

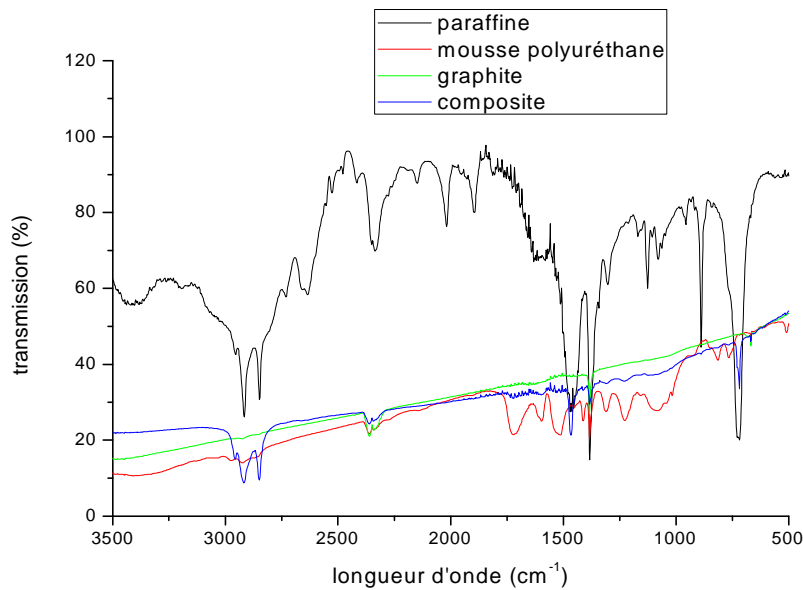


**Figure IV.6 :** Spectre infrarouge du composite (Par-MPUR-GR)

Le spectre infrarouge du composite Par-MPUR-GR donne les bandes d'adsorption suivantes :

- Pic à  $2954\text{ cm}^{-1}$  : vibration asymétriques de la liaison  $\text{CH}_2$
- Pic à  $2921\text{ cm}^{-1}$  : vibration asymétriques de la liaison  $\text{CH}_3$
- Pic à  $2846\text{ cm}^{-1}$  : vibration symétriques de la liaison  $\text{CH}_2$ , C-H
- Pic à  $2360\text{ cm}^{-1}$  : vibration de valence correspond à C-H,  $\text{CH}_2$
- Pic à  $1740\text{ cm}^{-1}$  : vibration de la liaison C=O
- Bande  $1600\text{-}1572\text{ cm}^{-1}$  : vibration de la liaison C=C
- Pic à  $1470\text{ cm}^{-1}$  : vibration de déformation de la liaison  $\text{CH}_3$  dans le plan
- Pic à  $1379\text{ cm}^{-1}$  : vibration de déformation de la liaison  $\text{CH}_2$  du cycle ou OH
- Pic à  $718\text{ cm}^{-1}$  : vibration de déformation de la liaison  $\text{CH}_2$
- Pic à  $667\text{ cm}^{-1}$  : rotation plane des hydrogènes des carbones

### IV.3.5 Superposition des spectres infrarouges (Par-MPUR-GR-composite)



**Figure IV.7 :** Spectre infrarouge (Par-MPUR-GR-composite)

On remarque que les pics des spectres infrarouges du composite se retrouvent soit dans le spectre infrarouge de la paraffine, soit dans celui de la mousse polyuréthane ou dans celui du graphite avec néanmoins une diminution de l'intensité de certains pics.

On remarque également qu'il n'y a eu aucune apparition de nouveaux pics sur le spectre infrarouge du composite. Ce qui explique que les matériaux composants les composites élaborés n'ont subi aucune réaction chimique.

## IV.4. Résultats de la conductivité thermique :

### IV.4.1. Conductivité thermique du composite mousse polyuréthane seule :

Epaisseur de la plaque :  $e = l_s = 1,97 \times 10^{-2} \text{ m}$

Température de la plaque chaude  $T_c$  :  $T_c = 25 \text{ °C}$

Température de la plaque froide  $T_f$  :  $T_f = 10 \text{ °C}$

$T_{\text{moy}} = \bar{T} = \frac{T_1 + T_2}{2} = 17.25 \text{ °C}$

$dT = T_1 - T_2 = 15.5 \text{ °C}$

HFM = 6.09 mV

$$\lambda_1 = l_s \cdot [(K_1 + (K_2 \cdot \bar{T})) + ((K_3 + (K_4 \cdot \bar{T})) \cdot \text{HFM}) + ((K_5 + (K_6 \cdot \bar{T})) \cdot \text{HFM}^2)] / dT$$

A.N

$$\lambda_1 = 0,02311 \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$$

$\lambda_1$  : Conductivité thermique de la plaque 1 (mousse polyuréthane seule).

#### IV.4.2 Conductivité thermique de la plaque composite de la mousse polyuréthane et de la paraffine

- Epaisseur de la plaque :  
 $e = I_S = 27.95 \times 10^{-3} \text{ m}$
- température de la plaque chaude  $T_c$  :  
 $T_c = 32.4 \text{ }^\circ\text{C}$
- Température de la plaque froide  $T_f$  :  
 $T_f = 15.1 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_{\text{moy}} = \check{T} = \frac{T_1 + T_2}{2} = 24 \text{ }^\circ\text{C}$
- $dT = T_1 - T_2 = 17.8 \text{ }^\circ\text{C}$
- $\text{HFM} = 17.3 \text{ mv}$

$$\lambda_2 = I_S \cdot [(K_1 + (K_2 \cdot \check{T})) + ((K_3 + (K_4 \cdot \check{T})) \cdot \text{HFM}) + ((K_5 + (K_6 \cdot \check{T})) \cdot \text{HFM}^2)] / dT$$

**A.N:**  $\lambda_2 = 0.3121 \text{ W / m }^\circ\text{C}$

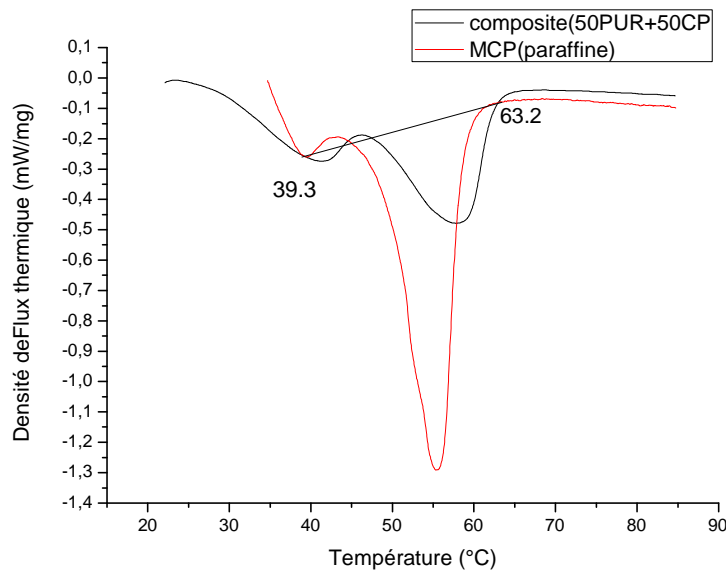
$\lambda_2$ : Conductivité thermique de la plaque mousse- paraffine.

On remarque que  $\lambda_2 > \lambda_1$ , donc le matériau à changement de phase (la paraffine) améliore la conductivité thermique.

Enfin nous pouvons dire que la conductivité thermique du composite (paraffine- mousse polyuréthane) a été sensiblement améliorée. La plaque de mousse-paraffine nous donne une valeur de la conductivité thermique de l'ordre de 0,312 W/ (m. ° C).

#### IV.5 Résultat obtenu de la DSC

Le test de la calorimétrie différentielle à balayage nous donne la courbe des températures en fonction des flux thermiques de la paraffine et le composite utilisé.



**Figure IV.8 : Résultats d'analyse DSC.**

Dans ce graphe, il n'a été pris en compte que la phase de fusion (flux thermique négatif). La phase de cristallisation n'est pas reproduite sur ce graphe pour faute de système de refroidissement de l'appareil.

Pour la courbe de la paraffine :

- La température de début de fusion : 49.8 °C
- La température du pic de fusion : 55.6°C
- La température de fin de fusion : 58.3 °C
- La chaleur latente de changement de phase (solide-liquide) : 135 J /g

Pour le composite (paraffine+mousse polyuréthane) :

- La température de début de fusion : 48.8 °C
- La température du pic de fusion : 58.3°C
- La température de fin de fusion : 62.1 °C
- La chaleur latente de changement de phase (solide-liquide) : 72.66 J /g

D'après ces résultats, on remarque que la température de début de fusion pour le composite est relativement plus faible que celle de la paraffine seule. La chaleur latente de fusion a diminué presque la moitié par rapport à celle de la paraffine.

## B. Résultats obtenus en deuxième partie du travail

### IV.5.1 Composition du béton :

Dosage en ciment pour une résistance souhaitée à 28 jours :

Pour une résistance souhaitée à 28 jours égale à 30MPa avec un affaissement égale à 8cm (béton bien plastique) :

$$FC_{28} = 30 \text{ MPa} \quad (\text{résistance en compression souhaitée à 28 jours})$$

$$FC = FC_{28} + 15\% \quad (\text{résistance moyenne})$$

A.N :

$$F_C = 30 + 15\%$$

$$FC = 34,5 \text{ MPa}$$

#### 1) Dosage en ciment :

D'après la méthode de formulation de DREUX-GORISSE, on détermine les quantités optimales de matériaux (ciment C, eau E, sable S)

- Détermination du rapport C/E :

Le rapport C/E est calculé grâce à la formule de Bolomey :

$$F_C = \sigma'_{28} = G * \sigma'_c (C/E - 0.5)$$

Avec :

$$\sigma'_c = \text{classe vraie du ciment à 28 jours}$$

$$C = \text{dosage en ciment}$$

$$E = \text{dosage en eau}$$

$$G = \text{coefficient granulaire}$$

De la formule Bolomey, on tire C/E :

$$C/E = \frac{F_C}{G * \sigma'_c} + 0.5$$

Et :

$$F_C = 34,5 \text{ MPa} ; G = 0.45 ; \sigma'_c = 55 \text{ MPa} \text{ (car il s'agit du ciment CPJ-CEM II /42.5 R)}$$

$$\text{Donc :} \quad C/E = 1.89$$

A partir de l'abaque du rapport  $C/E$  et l'affaissement, on peut déterminer le dosage en ciment :

$$C/E = 1.89 \text{ et affaissement} = 8 \text{ cm} \Rightarrow C_{opt} = 390 \text{ Kg/m}^3$$

- Dosage en eau :

$$\text{Le dosage en eau totale est : } E_T = \frac{C_{opt}}{C/E}$$

$$E_T = 390/1.89$$

$$E_T = 206.35 \text{ L}$$

Pour  $D_{max} = 5 \text{ mm}$  le dosage normale en eau doit être majoré de 15% (d'après le tableau de correction sur le dosage en ciment et le dosage en eau)

$$E = E_T + 15\%$$

$$E = 237.3 \text{ L}$$

Donc :

$$C/E = 1.89 \Rightarrow C = 1.89 * E$$

$$C = 448.5 \text{ kg/m}^3$$

- 2) Dosage du sable :

On trace la courbe de référence de DREUX :

$$Y = 50 - \sqrt{D_{max}} + K' \text{ ou } K' = K + K_S + K_P$$

Avec :

$K$  : coefficient qui dépend de la forme des granulats, du mode de vibration et du dosage en ciment.

$$K_S = 6M_{FS} - 15 \text{ avec } M_{FS} : \text{module de finesse du sable}$$

$K_P$  : correction supplémentaire si le béton est pompable.

- ◆ Correction de  $K$  :

Le module de finesse  $M_f$  d'un sable est égal au  $1/100^e$  de la somme des refus, exprimés en pourcentage sur les différents tamis de la série suivante :

$$0,125 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 \text{ et } 5 \text{ mm}$$

Dans le tableau qui suit, les différentes dimensions des tamis pour notre sable :

Tamis en (mm)	Refus en (g)	Refus cumulés en (g)	Refus cumulés en (%)	Tamisât cumulés en (%)
5	38,8	38,8	3.88	96.12
4	38	76.8	7.68	92.32
3,15	48,9	125.7	12.57	87.43
2,5	19,5	145.2	14.52	85.48
2	102,6	247.8	24.78	75.22
1,25	79,9	327.7	32.77	67.23
1	62,7	390.4	39.04	60.96
0,8	157,4	547.8	54.78	45.22
0,6	57,7	605.5	60.55	39.45
0,4	110,2	715.7	71.57	28.43
0,125	277,0	992.7	99.27	0.73
Fond	7,3	1000	100.00	0.00

**Tableau IV.3** : Dimensions nominales des tamis pour le sable 0-5

Le module de finesse est égal à 2.826, donc le sable est un sable un peu trop grossier.

Le terme correcteur  $K_S = 6M_{FS} - 15$  est égal à

$$K_S = 6 \cdot 2.826 - 15 = 1.956$$

$$Y = 50 - \sqrt{D_{max}} + K'$$

$$Y = 50 - \sqrt{5} - 2 + 1.956 = 47.72 \%$$

X est au milieu du segment sable, de 0 à 5 mm, soit à 2.5 mm.

Selon X	Selon Y
0.125	0
2.5	47.72
5	100

**Tableau IV.4** : Courbe de référence

A partir de la courbe de granulométrie, on tire les proportions de sable :

- ☞ 25% du sable fin,
- ☞ 19% du sable moyen,
- ☞ 56% du sable gros.

◆ **Les masses des composants du béton :**

Dans le tableau suivant les différentes masses des composants :

	MT	MF 0.02%	MF 0.05%	MF 0.07%	MF 0.1%	MF 1%	MF 5%
Eau (kg)	237.3	237.3	237.3	242.1	249.2	261.7	274.8
Ciment (kg)	448.5						
Sable fin (kg)	555.96						
Sable moyen (kg)	422.53						
Sable gros (kg)	1245.35						

**Tableau IV.5 :** Composition des mélanges pour 1m<sup>3</sup> de volume

- ◆ Les masses de mousse polyuréthane pour chaque pourcentage sont données respectivement pour 1m<sup>3</sup> de volume dans le tableau suivant :

Quantité de mousse en %	Quantité de mousse en kg
0.02	0.6369
0.05	1.5924
0.07	2.2293
0.1	3.1847
1	31.8471
5	159.2357

**Tableau IV.6 :** Masses de mousse polyuréthane pour chaque pourcentage

#### IV.5.2 Caractérisation mécanique du matériau composite :

##### ❖ Résistance à la compression :

Les résultats de la compression des éprouvettes sont donnés dans les deux tableaux suivants :

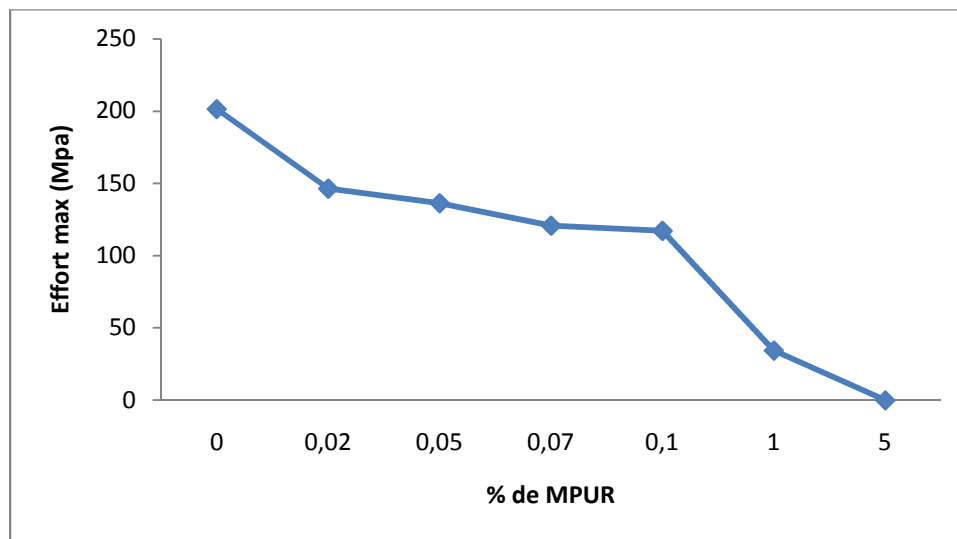
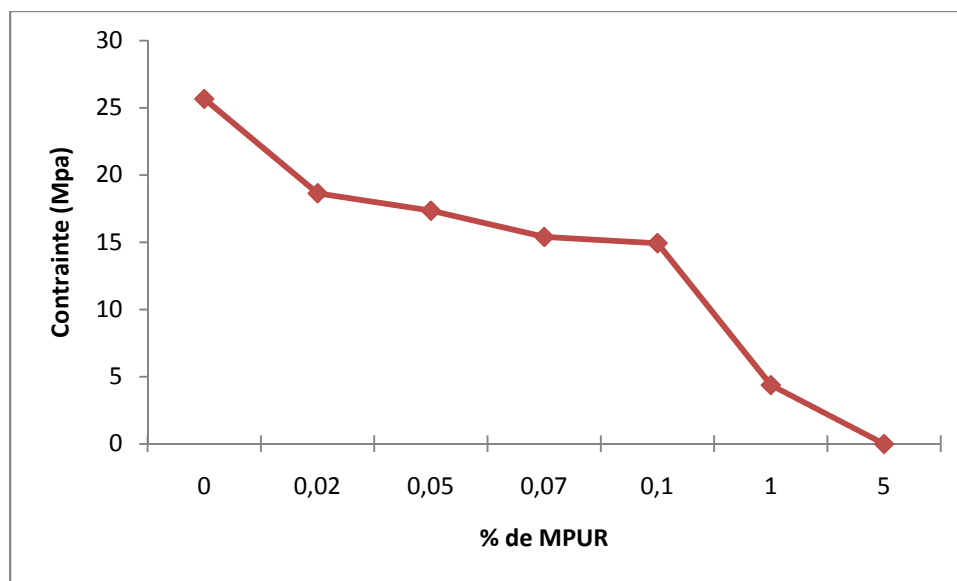
**Résultats pour les éprouvettes sans MCP (paraffine)**

Eprouvettes	Force (kN)	Contrainte max à 28 jours (MPa)
Béton témoin (B.T)	201.4	25.65
Béton Mortier de 0.02% MPUR	146.4	18.64
B.M de 0.05% MPUR	136.3	17.34
B.M de 0.07% MPUR	120.8	15.39
B.M de 0.1% MPUR	117.2	14.93
B.M de 1% MPUR	34.4	4.38
B.M de 5% MPUR	0	0

**Tableau IV.7 :** Les contraintes et les efforts des éprouvettes sans MCP**Résultats pour des éprouvettes chargées avec MCP :**

Eprouvettes	Force (kN)	Contrainte à 28 jours (MPa)
Béton témoin (B.T)	201.4	25.65
Béton Mortier de 0.02% MPUR	143.7	18.31
B.M de 0.05% MPUR	116.9	14.88
B.M de 0.07% MPUR	107.4	13.68
B.M de 0.1% MPUR	104.2	13.27
B.M de 1% MPUR	34.9	4.44
B.M de 5% MPUR	0	0

**Tableau IV.8 :** Les contraintes et les efforts des éprouvettes chargées avec MCP

**IV.5.3 Courbe effort max - % de MPUR sans MCP :****Figure IV.9 :** courbe effort max - % de MPUR sans MCP.**IV.5.4 Courbe contrainte max - % de MPUR sans MCP:****Figure IV.10 :** courbe contrainte - % MPUR sans MCP.

## IV.5.5. Courbe effort max - % de MPUR avec MCP

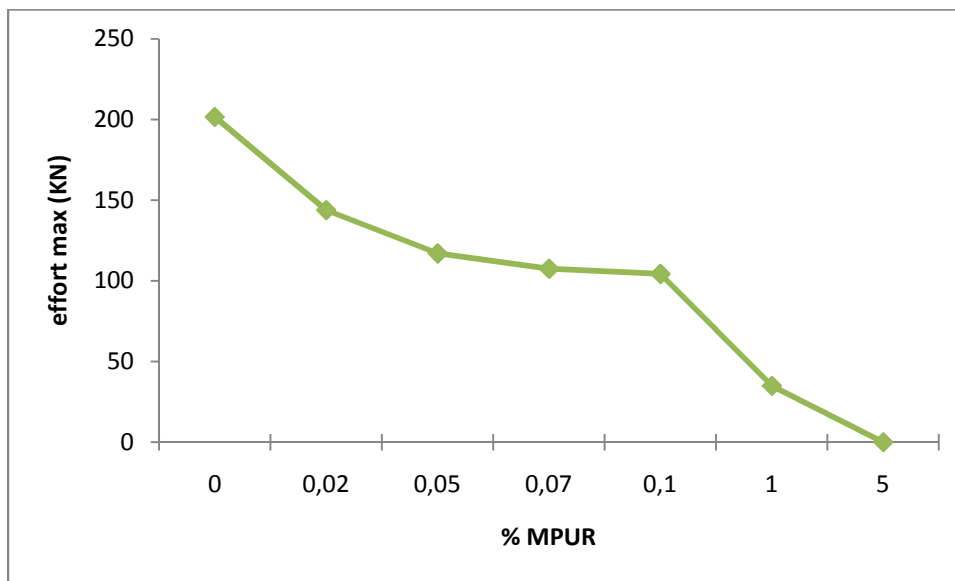


Figure IV.11 : courbe effort max - % MPUR chargées avec MCP.

## IV.5.6 Courbe contrainte max - % de MPUR avec MCP :

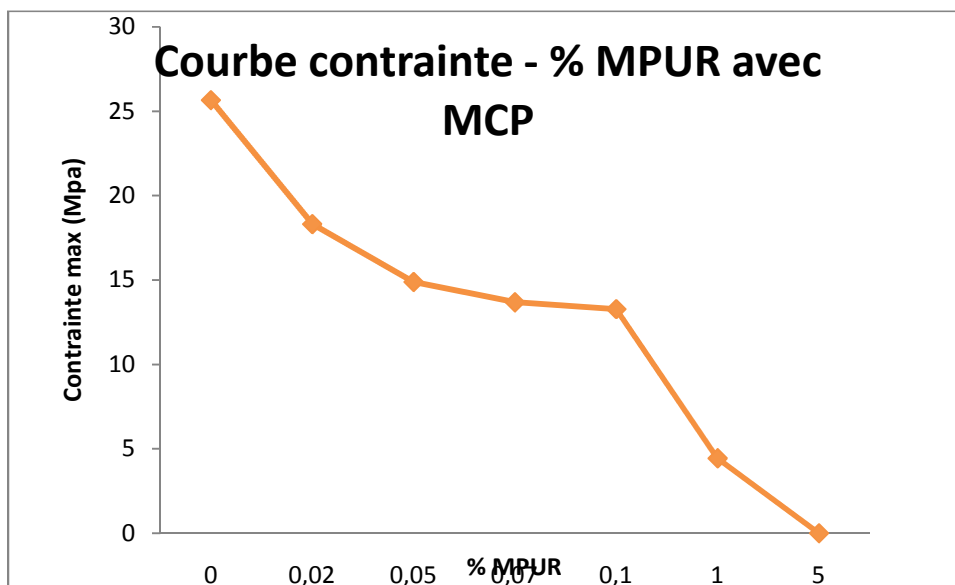


Figure IV.12 : courbe contrainte max - % MPUR chargées avec MCP.

## IV.5.7 Superposition de courbes de contrainte max - % de MPUR avec et sans MCP :

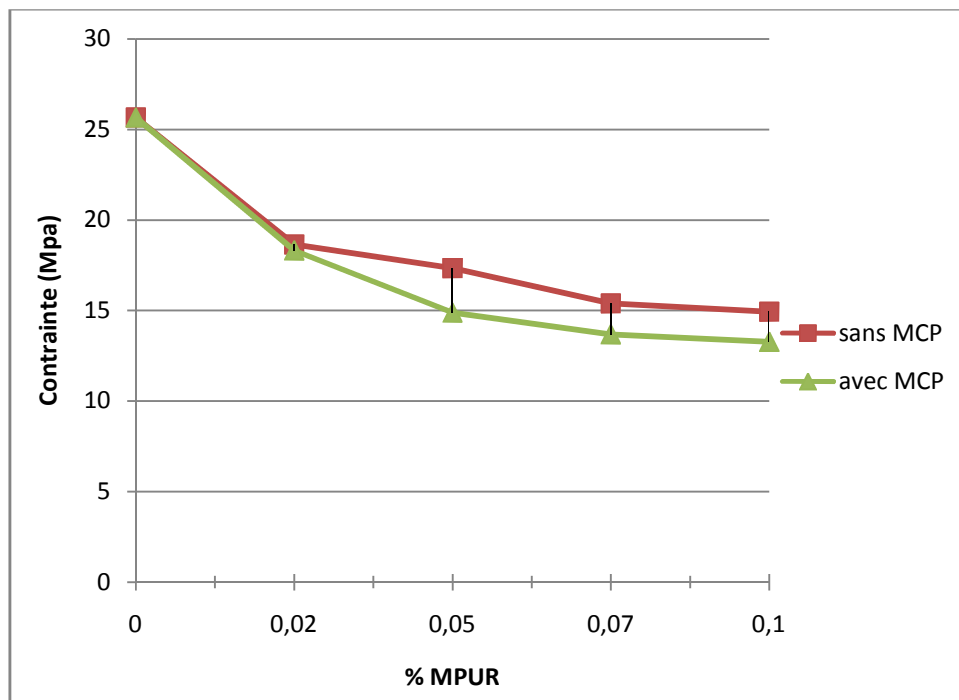


Figure IV.13 : Superposition de courbes contrainte max - % MPUR chargées avec et sans MCP.

On constate que la contrainte max diminue avec le pourcentage (massique) du renfort en mousse de polyuréthane par rapport à la valeur obtenue le béton témoin.

On remarque également que pour les éprouvettes chargées avec le MCP donnent des résistances à la compression plus faibles moins que celle des éprouvettes non chargées en MCP. Donc on peut dire que la résistance diminue avec l'augmentation des quantités de fibres de mousse

## Conclusion générale

---

Un matériau à changement de phase (MCP) à base de paraffine est proposé pour augmenter l'inertie thermique des parois de bâtiments. L'enthalpie de fusion, la température de transition solide – liquide, la réaction chimique et la conductivité thermique du MCP et le composite sont évaluées par les techniques usuelles (DSC, FT-IR, MEB et le CT mètre).

Les résultats du MEB nous ont montré que la répartition de la poudre de la mousse polyuréthane dans la structure des deux composites est homogène et que les poudres de polyuréthane et de graphite ont une bonne compatibilité avec la paraffine.

Les résultats FT-IR ont montré l'existence d'une bonne compatibilité chimique entre le MCP et les composants du matériau composite.

En ce qui concerne les résultats de l'analyse par la DSC, le composite MCP+MPUR donne une valeur de température de début de fusion qui est de 48.8 °C, avec une chaleur latente de 72.66 J/g. Ce composite semble approprié pour des applications de stockage d'énergie.

On notera que l'ajout de la poudre de mousse polyuréthane dans la matrice (MCP) améliore sensiblement la conductivité thermique.

Dans cette étude, nous avons caractérisé de nouveaux matériaux élaborés par nos soins (béton renforcé) incorporant des fibres de mousse polyuréthane en vue d'une amélioration de leurs performances en isolation thermique avec une meilleure inertie.

La mesure de la résistance mécanique faite sur les éprouvettes de mortier de fibres de mousse de différents pourcentages montre une diminution par rapport à celle du béton témoin et pour les éprouvettes chargées avec MCP cette diminution n'est pas aussi significative.

## Références bibliographiques

---

- [1] Seyni Abdoulay. 11 Décembre 2008. Thèse de Doctorat. Propriétés physico-chimiques et d'usage de matériaux composites à charge dégradable produit par Co-broyage. L'institut National Polytechnique de Toulouse.
- [2] Zapata – Massot Céline. 21 Décembre 2004. Thèse de Doctorat. Synthèse de matériaux composites par Co-broyage en voie sèche. Caractérisation des propriétés physico-chimiques et d'usage des matériaux. L'institut National Polytechnique de Toulouse.
- [3] J.M.Berthelot. Matériaux composites. 1996. Comportement mécanique et analyse des structures. Masson 2<sup>ème</sup> édition.
- [4] A. Dessarthe, H. Guyot, M. Carayol. 1994. Techniques de fabrication de pièces mécaniques en plastiques ou composites. Centre Technique des Industries Mécaniques (CTIM). Paris, 226p.
- [5] Claud Bathias. 2005. Matériaux composites. Dunod, 419p.
- [6] C. Baley. Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. Techniques de l'Ingénieur. Ref. AM.5130.
- [7] E. Darque – Ceretti. 2001. Adhésion-Adhérence. Cycle de cours de l'ENSMP, Cemef, in Yves Perrot. Thèse de Doctorat.
- [8] Glossaire des matériaux composites. Centre d'Animation Régional en Matériaux Avancés (CARMA). Actualisation Octobre 2006.
- [9] Borhane Kechaou. 19 Juin 2003. Thèse de Doctorat. Corrélation entre propriétés diélectriques et mécaniques de composites à matrice époxyde renforcée par des fibres de verres. L'Ecole Centrale de Lyon et Faculté des Sciences de Sfax.
- [10] M. Geier, D.Duedal. 1985. Guide pratique des matériaux composites. TEC & DOC (Lavoisier). Paris, 349p.
- [11] P. Millet, P. Weiss. 2009-2010. Propriétés physiques des matériaux dentaires. Université Médicale Virtuelle Francophone.
- [12] J. Poliva. 2001. Les isolants écologiques. Edition Terre Vivante.
- [13] Feaber. 2004. Microanalyse X par sonde électrique. Institut de Physique et Chimie des Matériaux de Strasbourg (IPCMS). France.
- [14] G. Dreux et J. Festa. 2002. Nouveau guide du béton et de ses constituants. Edition Eyrolles. Paris.

## Références bibliographiques

---

**[15]** Nassima sotehi. 2010. Caractéristiques thermiques des parois des bâtiments et amélioration de l'isolation. Thèse pour obtenir le diplôme de Doctorat en science physique. Université Mentouri-Constantine.