

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Chimique

Mémoire

En vue de l'obtention du grade de master en Génie Chimique

Thème :

***Synthèse théorique sur les matériaux
composites à base de polymère recyclé***

Etudié par :

TEMAM Abdelhalim

Encadré par :

Dr MEFTI Afia

Soutenu le 21 juin 2014 devant le jury suivant :

Présidente :	Dr F.KIES	Maitre de conférences B, ENP
Examinatrices :	Mme S.HADDOUM	Maitre assistante A, ENP
	Dr F.MOHELLEBI	Maitre de conférences A, ENP
Rapporteur :	Dr A.MEFTI	Maitre de conférences A, ENP

Promotion 2014

«Synthèse théorique sur les matériaux composites à base de polymère recyclé»

Résumé :

Le présent mémoire a pour but de faire une synthèse sur les matériaux composites qui font l'objet d'un intérêt grandissant de par l'évolution des techniques de leur mise au point et de leur caractérisation, d'une part, de leurs propriétés et de leurs applications d'autre part.

C'est pourquoi nous nous sommes intéressés aux composites en général et à ceux obtenus à partir de polymère recyclé du fait de leur intérêt économique et écologique.

Les composites polymère recyclé- bois et polymère recyclé - béton ont été détaillés dans la dernière partie de cette étude.

Mots clé : recyclage, déchets plastiques, mortier, bois, composites

«Theoretical synthesis of composite materials made from recycled polymer»

Abstract:

This brief aims to synthesize the composite materials that are the subject of a growing interest in the development of techniques for their development and characterization, on the one hand, their properties and their other applications share.

That is why we are interested in composites in general and those obtained from recycled because of their economic and ecological interest polymer.

The recycled wood and recycled polymer-polymer composites - concrete were detailed in the latter part of this study.

Keywords: recycling, waste plastic, mortar, wood, composite

«التوليف النظري حول المواد المركبة المصنوعة من البوليمر المعاد تدويره»

ملخص:

تهدف هذه المذكرة الى دراسة نظرية حول المواد المركبة، التي هي موضوع اهتمام متزايد وذلك لتطور تقنيات صنعها وتوصيفها من جهة، ولخصائصها وتطبيقاتها من جهة أخرى.

ولهذا السبب اهتمنا بالمواد المركبة بشكل عام، وبالمواد المركبة على اساس البوليمر المعاد تدويره بشكل خاص بسبب امتيازاتها الاقتصادية والبيئية.

في الجزء الأخير من هذه الدراسة، تم تفصيل المركبات بوليمر المعاد تدويره — خشب وبوليمر المعاد تدويره — خرسانة.

الكلمات المفتاحية: إعادة التدوير، النفايات البلاستيكية، خرسانة، خشب، مركب

Remerciements

Je remercie Dieu en premier lieu, qu'il soit loué pour m'avoir donné la force et la patience nécessaires pour accomplir ce travail.

Je tiens à remercier infiniment ma directrice de mémoire A. MEFTI, pour son encadrement, sa disponibilité, sa patience, sa grande gentillesse, ses conseils précieux et pour sa confiance qu'elle a toujours manifesté envers moi. Sans son aide, ce travail n'aurait pas pu être réalisé.

Je tiens également à remercier les différents membres du jury qui ont accepté de juger ce travail et en particulier, F.KIES pour avoir accepté de présider le jury puis, F.MOHELLEBI et S.HADDOUM pour être examinatrices de cette thèse.

Je voudrais ici aussi remercier l'ensemble du corps professoral de mon département, mes amis, ainsi que toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Je vais enfin remercier mes très chers parents, mes frères, ma sœur pour leur soutien et les encouragements dont ils m'ont fait bénéficier pendant toute cette période.

Table des matières

Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des abréviations	
INTRODUCTION GENERALE.....	1

Chapitre I : Généralités sur Les matériaux composites

I.1-Introduction	3
I.2-Définition des composites	3
I.3-Composition d'un matériau composite	4
I.3.1-Le renfort	4
I.3.2-La matrice	4
I.4-Classement d'un matériau composite	4
I.4.1-Composites à particules	4
I.4.2-Composites à fibres	5
I.5- Les grandes familles de matériaux composites	5
I.5.1-Composites à matrice organique (CMO)	5
I.5.1-Composites à matrice céramique (CMC)	9
I.5.1-Composites à matrice métallique (CMM)	9
I.6-Le rôle des interfaces	10
I.7- Les Nanocomposites	11
I.7.1-Classification des renforts	11
I.7.1.1-Nanoparticules à trois dimensions nanométriques	12
I.7.1.2-Nanoparticules à deux dimensions nanométriques	12
I.7.1.3-Nanoparticules à une dimension nanométrique	12

Chapitre II : Les polymères

II.1-Historique	14
II.2-Définition	14
II.3-Classification des polymères selon différents critères	15
II.3.1-L'origine	15
II.3.2-Le domaine d'application	15
II.3.3-La dimensionnalité	16
II.3.4-La structure chimique	17
II.3.5-Le comportement thermique	17
II.4-Réactions de polymérisation	18
II.4.1-Réaction de polycondensation	19
II.4.2- La polymérisation en chaîne	19

Chapitre III : Composites à base de polymère recyclé

III.1-Introduction	22
III.2-Composites polymère recyclé-mortier, polymère recyclé-béton	22
III.2.1-Pourquoi des matériaux cimentaires avec polymères recyclés ?	23
III.2.2-Granulats de polymère recyclé utilisés	23
III.2.2.1-Polystyrène expansé (EPS)	23
III.2.2.2-Polyéthylène téréphtalate (PET)	24
III.2.2.3-Polyéthylvinylacétate d'éthyle (copolymères EVA)	24
III.2.2.4-Polyuréthane (PU)	25
III.2.3-Exemple de fabrication des mortiers avec du polymère recyclé	25
III.2.3.1-Matières premières	25
III.2.3.2-Formulation	26
III.2.3.3- Propriétés finales des matériaux	27
III.2.4 : Conclusion	27
III.3-Composites polymère recyclé-bois	28
III.3.1-Définition	28
III.3.2-La matière première	29
III.2.2.1-Matière ligneuse	29
III.2.2.2-Polymères recyclés	29
III.2.2.3-Additifs	30
III.3.3-Procèdes de fabrication	30
III.3.4-Applications	30
III.3.4.1-Matériaux de construction	30
III.3.4.2-Produits industriels et de consommation	30
III.3.4.3-Véhicules automobiles	31
III.3.4.4-Équipements et infrastructures municipales, de parcs et applications marines	31
CONCLUSION GENERALE	32
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	33

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Structure chimique de quelques polymères usuels.....	20
Tableau III.1 : Composition chimique du ciment.....	25

Liste des figures

Figure I.1 : Matériau composite	3
Figure I.2 : Structures moléculaires d'un polymère thermoplastique et d'un polymère thermodurcissable	6
Figure I.3 : Exemples de tissus de renforts utilisés pour les CMO haute performance.....	8
Figure I.4 : Les structures géométriques des composites	8
Figure I.5 : Le rôle de l'interface sur la ténacité des composites.....	11
Figure I.6 : Représentation schématique des différents renforts.....	11
Figure II.1 : Représentation schématique de la chaîne d'un polymère linéaire.....	16
Figure II.2 : Représentation schématique d'un polymère bidimensionnel	16
Figure II.3 : Représentation schématique d'un polymère tridimensionnel	17
Figure III.1 : Sable utilisé	26
Figure III.2 : Résidus de mousse de polyuréthane après broyage	26

Liste des abréviations

CMO :	Composites à matrice organique
CMC :	Les composites à matrice céramique
CMM :	Les composites à matrice métallique
EPS :	Expanded PolyStyrene
PS :	Polystyrène
PET :	Polyéthylène téréphtalate
PU :	Polyuréthane
PUR :	Polyuréthane rigide
UV :	Ultraviolet
PEhd :	Polyéthylène haute densité
PVC :	Polychlorure de vinyle
EVA :	Ethylene-vinyl acetate

Introduction générale

Le but de ce travail de master est de présenter une synthèse bibliographique sur les matériaux composites qui présentent un intérêt dans de très nombreux domaines, en particulier dans le domaine du recyclage des matériaux.

Il s'agit tout d'abord de définir les matériaux composites, leur composition, leurs propriétés, les différentes familles de composites et leurs domaines d'applications en fonction des caractéristiques attendues.

Dans la deuxième partie de cette étude nous nous sommes attardés sur la présentation des polymères, lesquels constituent la matrice des composites faisant l'objet du troisième chapitre de cette synthèse. En effet, les matériaux composites à base de polymère recyclé ont retenu notre attention car ils constituent le sujet de l'étude expérimentale réalisée dans le cadre de notre projet de Fin d'études.

A travers cette étude nous souhaitons donner un aperçu de l'étendue du domaine des matériaux composites et de leurs applications.

Chapitre I :
Généralités sur les matériaux
Composites

I.1-Introduction :

Les matériaux composites suscitent un intérêt croissant de la part de nombreux secteurs industriels, et leur emploi tend à se généraliser : le transport aérien, l'industrie nautique, ferroviaire, spatiale, le bâtiment, les sports et loisirs fourmillent eux aussi de nouvelles applications. [1] Cet engouement s'explique principalement par la faible masse volumique des composites qui, par ailleurs, possèdent des propriétés physico-chimiques intéressantes (mécaniques, mais également thermiques, chimiques...). [1] Ces matériaux ont une production annuelle dépassant 10 milliards de tonnes et un marché ne cessant de grandir aux environs de 5 à 10% par année. [2]

Cependant, pour le concepteur, l'arrivée de ces nouveaux matériaux représente un changement important, qui impacte profondément la conception et la réalisation des produits industriels. Pour bien prendre la mesure de ce changement, il est essentiel de comprendre ce que sont exactement les composites, et comment sont obtenues leurs propriétés. [1]

I.2-Définition des composites :

Tout matériau hétérogène pourrait être qualifié de matériau composite [3]. Néanmoins, on donne généralement une définition plus restrictive. Un composite est un matériau constitué de deux phases (ou plus) non miscibles ayant des propriétés et des rôles différents. L'une, continue, est appelée matrice et l'autre, discontinue, appelée renfort (Figure I.1). Les composants doivent être physiquement identifiés : il doit exister une interface distincte entre eux. Ce mélange possède des propriétés nouvelles et on recherche en les associant un ensemble de performances supérieures aux composants pris séparément. Le renfort assure souvent la tenue mécanique et la matrice, la cohésion et le transfert des efforts vers le renfort. Les matériaux de renfort confèrent aux composites leurs caractéristiques mécaniques : rigidité, résistance à la rupture, dureté... Ils permettent également de modifier certaines propriétés physiques comme le comportement thermique, la résistance à l'abrasion ou les propriétés électriques. [4]

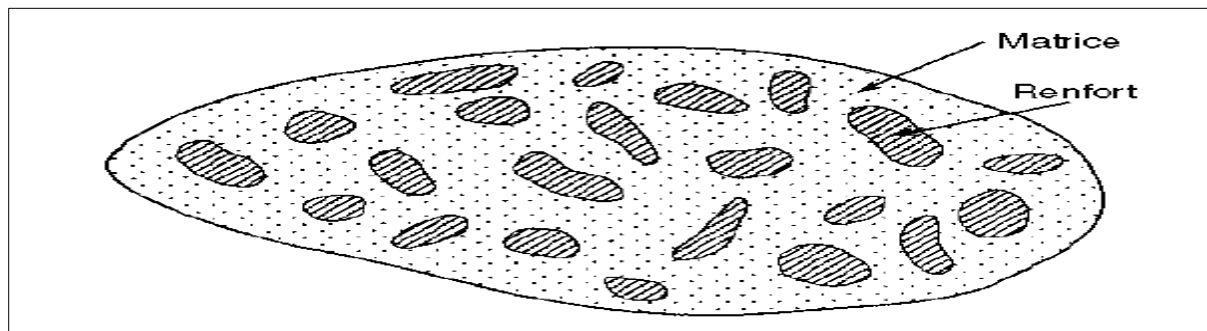


Figure I.1 : Matériau composite [4]

Les propriétés des matériaux composites dépendent de trois facteurs [5] :

- De la nature et des propriétés des matériaux constituants,
- De la géométrie et de la distribution du renfort,
- Des interactions entre constituants et de la nature de l'interface matrice-renfort.

Le renfort sera caractérisé par sa forme, sa taille, sa concentration et son orientation. La concentration en renfort est définie par la fraction volumique ou massique. Il s'agit d'un paramètre déterminant des propriétés du composite. Sa distribution dans le volume l'est aussi car de nombreuses propriétés en dépendent comme le montre par exemple, la théorie de la percolation. Si elle est uniforme, les mesures ne dépendront pas du point de mesure. Selon la géométrie et l'orientation du renfort, il est possible de contrôler l'anisotropie des caractéristiques souhaitées du composite. [5]

I.3-Composition d'un matériau composite :

I.3.1-Le renfort :

Armature, squelette, il assure la tenue mécanique (résistance à la traction et rigidité). Souvent de nature filamenteuse (des fibres organiques ou inorganiques). [1]

I.3.2-La matrice :

Lie les fibres renforts, répartie les efforts (résistance à la compression ou à la flexion), assure la protection chimique. Par définition, c'est un polymère ou une résine organique. [1]

En plus de ces deux constituants de base, il faut rajouter : une interface qui assure la compatibilité renfort-matrice, qui transmet les contraintes de l'un à l'autre sans déplacement relatif. Bonne adhérence en couche fine (m). Des produits chimiques entrent aussi dans la composition du composite, l'interphase etc. ... qui peuvent jouer sur le comportement mécanique. [1]

I.4-Classement d'un matériau composite :

Suivant la forme et la nature des constituants il est possible de classer les matériaux composites. En effet, en fonction de la forme nous trouvons deux grandes classes : les composites à particules et à fibres [5].

I.4.1-Composites à particules :

Un matériau composite est dit à particules quand son renfort se trouve sous forme de particules ne possédant pas de dimension privilégiée. Elles sont généralement utilisées pour améliorer des

caractéristiques telles que la rigidité de la matrice, la résistance à l'abrasion ou la tenue en température. Elles sont aussi souvent employées pour diminuer le coût du matériau. [5].

I.4.2-Composites à fibres :

Un composite est dit à fibres quand son renfort est sous forme de fibres, c'est à dire qu'il possède une direction privilégiée. L'arrangement des fibres, leur orientation définissent les propriétés souhaitées et peuvent rendre le matériau fortement anisotrope ou fortement isotrope dans un plan. C'est le renfort le plus fréquent. Il en existe différents types [5] :

- ❖ Fibres minérales (verre, carbone, carbure de silicium)
- ❖ Fibres métalliques (bore, aluminium)
- ❖ Fibres organiques (Kevlar, polyamides)

Les renforts de fibres se présentent sous différentes formes commerciales :

- Formes linéiques (fils, mèches...)
- Formes surfaciques (tissus simples...)
- Formes multidirectionnelles (tresses, tissus complexes)

I.5-Les grandes familles de matériaux composites :

Il est d'usage de classer les composites par la nature de leur matrice, pour deux raisons : la matrice assure toutes les fonctions autres que la tenue mécanique, et conditionne le choix du procédé de mise en forme. On distingue habituellement trois familles [6] :

- les composites à matrice organique (CMO),
- les composites à matrice céramique (CMC),
- les composites à matrice métallique (CMM).

Chacune de ces familles possède des propriétés différentes et pour chacune d'entre elles, différents types de renforts sont employés. [6]

I.5.1-Composites à matrice organique (CMO) :

Il s'agit, de loin, des composites les plus répandus : ce sont en effet les seuls composites ayant, pour beaucoup d'entre eux, des coûts unitaires suffisamment réduits pour pouvoir être produits en grandes séries. Plus précisément, on distingue généralement deux types de CMO [6] :

- ❖ **les composites à grande diffusion**, peu coûteux et représentant près de 95% des CMO fabriqués, utilisés pour toutes sortes de pièces faiblement sollicitées ;

- ❖ ***les composites à haute performance***, plus onéreux mais présentant des qualités mécaniques supérieures, notamment employés dans l'aéronautique, le nautisme, les sports et loisirs ou encore la construction industrielle.

Matrices :

Les matrices employées pour ces composites sont des *résines polymères*. Il en existe deux types, qui possèdent des propriétés foncièrement différentes et sont employées dans des filières distinctes [6] :

- ***les thermoplastiques***, qui se présentent sous forme solide (granulés, plaques...) et que l'on met en forme en les ramollissant par chauffage, puis en les solidifiant par refroidissement ;
- ***les thermodurcissables***, qui se présentent sous forme liquide visqueuse et que l'on met en forme en déclenchant une réaction chimique de polymérisation par ajout d'un durcisseur, ce qui entraîne une solidification.

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, figure I.2(a)) ; ces liaisons se cassent lorsque l'on chauffe le polymère et se rétablissent lorsqu'on le refroidit, de façon réversible. [6]

A l'inverse, les thermodurcissables sont des molécules en forme de réseaux tridimensionnels, maintenus par des liaisons chimiques de forte énergie (liaisons covalentes, figure I.2(b)) établies de manière irréversible lors de la polymérisation. [6]

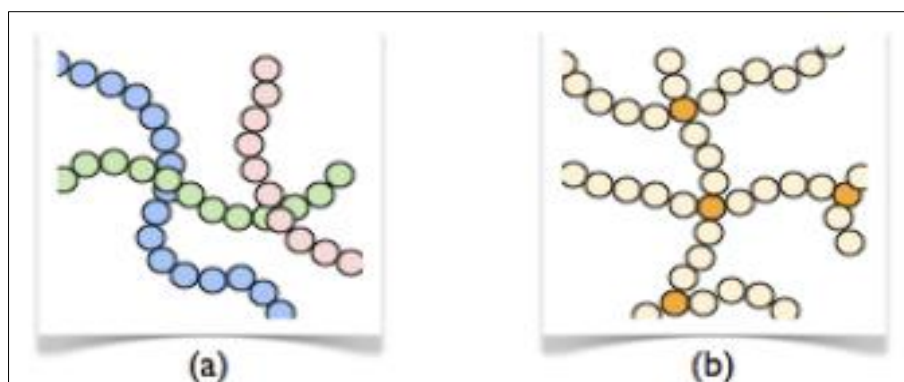


Figure I.2 : Structures moléculaires : (a) d'un polymère thermoplastique, (b) d'un polymère thermodurcissable. [6]

Cette différence fondamentale est à l'origine de propriétés bien distinctes. Par exemple [6] :

- 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). Parmi les plus courantes, on peut citer les résines polyester, peu coûteuses et souvent utilisées dans les applications "grande diffusion", et les résines époxy (ou époxydes), très employées dans les applications "hautes performances". [6]

Renforts :

Différentes fibres peuvent être employées avec ces matrices. Les plus courantes sont (figure I.3) [6] :

- ❖ *les fibres de verre*, peu coûteuses et ultra-répondues ,95% des renforts utilisées dans pratiquement toutes les applications "grande diffusion" et certaines applications "hautes performances".
- ❖ *les fibres de carbone*, plus onéreuses mais très performantes d'un point de vue mécanique, utilisées notamment en aéronautique, en construction industrielle et dans les sports et loisirs.
- ❖ *les fibres d'aramide* (Kevlar) ou de polypropylène, plus résistantes aux chocs et plus tenaces que le carbone, d'où leur utilisation, entre autres, dans les gilets pare-balles et autres protections balistiques.

- ❖ *les fibres végétales* comme le chanvre ou le lin, assez peu coûteuses et renouvelables, qui commencent à faire leur apparition sur certaines pièces peu sollicitées mécaniquement.

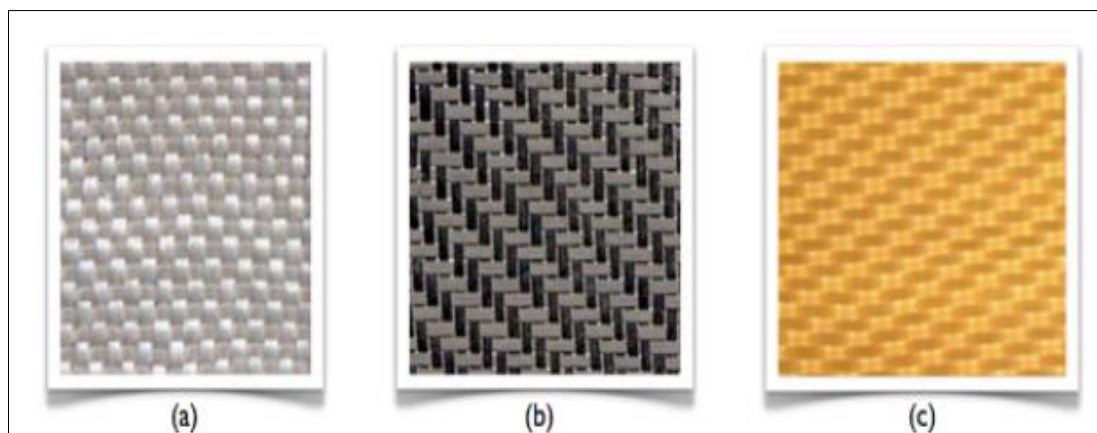


Figure I.3 : Exemples de tissus de renforts utilisés pour les CMO haute performance : (a) verre, (b) carbone, (c) aramide (Kevlar). [6]

D'un point de vue géométrique, on peut distinguer trois grands types de renforts [1] :

- ❖ *Les fibres longues* (c'est-à-dire de longueur comparable aux dimensions de la pièce, voir Figure I.4(a)) ;
- ❖ *les fibres courtes* (c'est-à-dire de longueur faible devant les dimensions de la pièce, voir Figure I.4(b)) ;
- ❖ *les particules*, ou charges renforçantes (Figure I.4(c)).

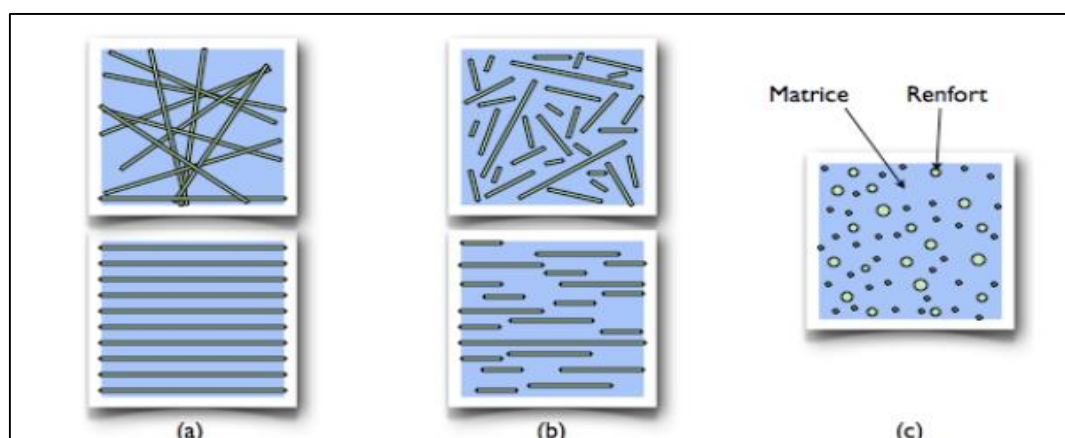


Figure I.4 : Les structures géométriques des composites : (a) fibres longues, (b) fibres courtes, (c) particules. [1]

I.5.2-Composites à matrice céramique (CMC) :

Beaucoup moins répandus que leurs homologues à matrice organique en raison d'un coût élevé, les CMC s'adressent aux applications à *très haute température*. Ils sont principalement utilisés dans l'industrie spatiale et l'aéronautique militaire, ainsi que pour la conception d'organes haut de gamme comme des disques ou plaquettes de freins. [6]

Les céramiques possèdent de nombreux atouts pour de telles applications : elles peuvent résister à des températures très élevées, sont plus légères que de nombreux métaux, et présentent une bonne stabilité chimique. Malheureusement, leur grande fragilité limite fortement leur domaine d'utilisation. Le principe des CMC est donc de rendre les céramiques moins cassantes en leur donnant une structure composite, c'est-à-dire en les façonnant sous forme de renforts et d'une matrice. [6] Cela conduit à une meilleure résistance à la rupture, pour deux raisons [6] :

- les fibres ayant un diamètre microscopique, il est possible de les fabriquer avec très peu de défauts, ce qui conduit à des contraintes de rupture plus élevées ;
- lorsque le composite se dégrade, les fissures ont tendance à suivre les interfaces situées entre les fibres et la matrice au lieu de se propager dans les fibres ; au lieu de rompre brutalement, le matériau se "désassemble" donc progressivement.

Les CMC comptent ainsi parmi les matériaux les plus performants pour les applications thermomécaniques exigeantes. Malheureusement, leur coût de revient est très élevé à cause des procédés de fabrication employés : il s'agit de mettre en place un tissu de fibres, puis d'y infiltrer des précurseurs gazeux ou liquides qui vont réagir chimiquement pour former la matrice, couche après couche. Cette réaction s'effectue à des températures assez élevées, est parfois très lente, et demande des équipements lourds. Sa mise en œuvre a donc un coût très élevé, qui explique la faible diffusion de ces matériaux. [6]

I.5.3-Composites à matrice métallique (CMM) :

Les composites à matrice métallique ont été élaborés pour tenter de concilier les qualités des métaux (ductilité, bonne tenue face au vieillissement et au feu...) avec la légèreté et les bonnes caractéristiques mécaniques propres aux structures composites. Ce sont des matériaux performants, mais pénalisés par un coût de revient encore élevé et réservés à des applications relativement exigeantes, dans divers domaines. [6]

Les CMM comportent une matrice en métal léger (aluminium et ses alliages, magnésium, titane...) et un renfort pouvant être, comme pour les CMO ou CMC, de deux types [6] :

- ❖ soit des particules ou des fibres courtes céramiques ; les propriétés mécaniques sont alors légèrement supérieures à celle du métal formant la matrice, et les procédés traditionnels de mise en forme des métaux peuvent généralement être employés ;
- ❖ soit des fibres longues céramiques ou métalliques ; les propriétés sont alors bien supérieures à celles de la matrice, et les procédés de mise en forme sont plus coûteux (il s'agit typiquement d'infiltrer du métal fondu autour d'un tissu de fibres).

Un avantage de ces composites est que la matrice étant métallique, ses caractéristiques mécaniques intrinsèques sont généralement bonnes. Il est donc possible de s'appuyer sur le comportement matriciel et de ne renforcer que certaines zones, ou encore de se contenter de renforts unidirectionnels ; cela est généralement impossible avec les matrices polymères (en raison de leur faible résistance) ou céramiques (en raison de leur fragilité). Un inconvénient est la grande réactivité chimique des métaux : lors de la mise au point du composite, il faut s'assurer que la matrice et le renfort ne peuvent pas réagir entre eux, faute de quoi les conséquences sur les propriétés mécaniques peuvent être catastrophiques. [6]

I.6-Le rôle des interfaces :

Les composites étant des matériaux hétérogènes, ils possèdent des *interfaces*, c'est-à-dire des surfaces de contact entre la matrice et le renfort. Tant que le composite est intact, les deux constituants adhèrent parfaitement l'un à l'autre, et l'interface ne joue donc aucun rôle particulier. Cependant, l'interface joue un rôle important lorsque le composite subit des dégradations mécaniques et commence à se fissurer suite à une surcharge, à la fatigue... [1]

En effet, les interfaces ont la propriété de dévier *les fissures* : lorsqu'une fissure se propage dans la matrice et atteint l'interface (Figure I.5(a)), elle ne traverse généralement pas cette dernière et les renforts ne sont donc pas endommagés. Au lieu de cela, la fissure change de direction et suit l'interface (Figure I.5(b)). En d'autres termes, au lieu d'une rupture brutale, on observe plutôt une décohésion, c'est-à-dire un décollement progressif entre les renforts et la matrice. L'interface joue donc le rôle de fusible et rend les composites plus ductiles et plus tenaces, c'est-à-dire plus résistants à la rupture, que leurs constituants élémentaires. [1]

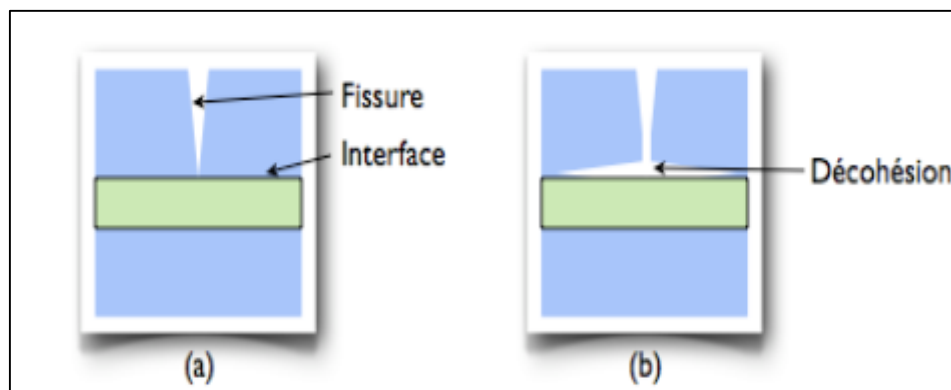


Figure I.5 : Le rôle de l'interface sur la ténacité des composites : lorsqu'une fissure atteint l'interface (a), elle est déviée (b). [1]

I.7- Les Nanocomposites :

I.7.1- Classification des renforts

Un nanocomposite est un matériau composite dont le renfort possède au moins une des trois dimensions de l'ordre du nanomètre [7]. On peut les classer de la même manière que les composites, selon la morphologie du renfort qui y est dispersé et plus particulièrement selon le nombre de leur dimension nanométrique. On retrouvera en plus des composites à fibres et à particules, un nouveau type de composite dit à renforts lamellaires.

Il est nécessaire de définir, maintenant, les différentes formes de renfort. Il apparaît alors trois classes de renfort, les nanoparticules à trois dimensions nanométriques, les nanofibres et les feuillets (Figure I.6) [4].

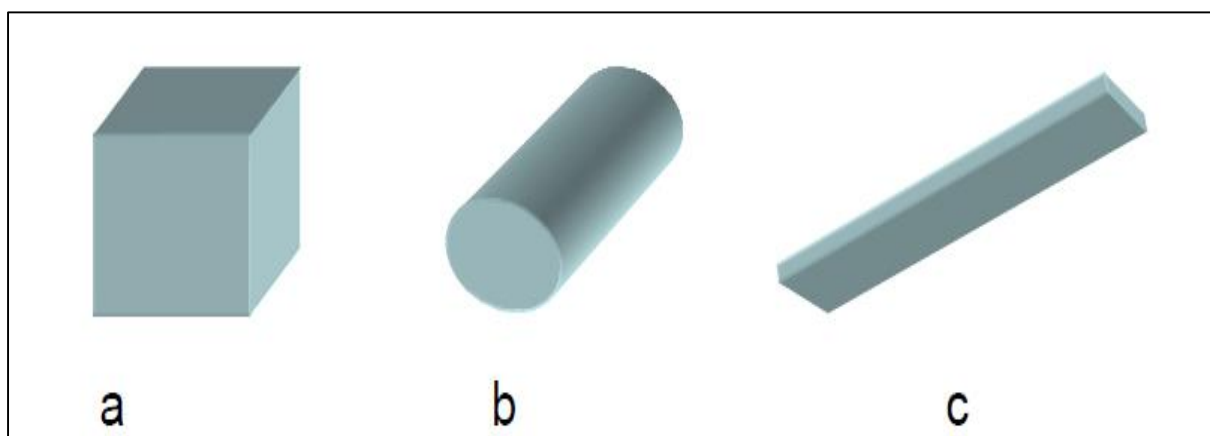


Figure I.6 : Représentation schématique des différents renforts. (a) nanoparticule ; (b) nanofibre ; (c) feuillet [4].

I.7.1.1-Nanoparticules à trois dimensions nanométriques :

Les trois dimensions de la particule sont de l'ordre du nanomètre.

Dans cette catégorie on compte, par exemple [4] :

- Les agrégats d'atomes
- Les nanoparticules métalliques (or, fer, cobalt, argent, platine...)
- Les fullerènes

Le gain de propriétés physiques particulières (optiques, électriques, magnétiques...) est recherché lors de l'ajout de ce type de particule ; le renfort mécanique n'est ici que secondaire.

I.7.1.2-Nanoparticules à deux dimensions nanométriques : nanofibres :

Les nanofibres sont des particules dont deux dimensions sont de l'ordre du nanomètre. La troisième est beaucoup plus grande. La grandeur caractéristique est le facteur de forme. Il est défini comme le rapport de la longueur sur le diamètre de la fibre et est souvent supérieur à 100. Il existe des fibres creuses, les plus connues étant les nanotubes de carbone, et des fibres pleines (nanofils). [4]

I.7.1.3-Nanoparticules à une dimension nanométrique : feuillets :

Les feuillets possèdent deux directions privilégiées. La particule possède une dimension de l'ordre du nanomètre et les deux autres de l'ordre du micromètre. Le facteur de forme est alors défini comme le rapport de la longueur du feuillet sur l'épaisseur. L'arrangement des feuillets et leur orientation vont engendrer les propriétés souhaitées. Cette famille de particules est issue de matériaux naturellement feuilletés. Les principaux précurseurs utilisés pour la fabrication de nanocomposites à matrice polymère sont d'une part les hydroxydes doubles à feuillets et d'autre part, les argiles gonflantes aussi appelées smectites. Ces nanofeuillets sont caractérisés respectivement par des charges positives et négatives en surface. [4]

Chapitre II :
Les polymères

II.1-Historique : [8]

Le terme de polymère est très ancien puisque, dès 1866, Berthelot mentionnait que « le styrolène (le styrène actuel), chauffé à 200 °C pendant quelques heures, se transforme en un polymère résineux ». N'était-ce pas le premier polymère synthétique reconnu ? C'est probable. Il n'en demeure pas moins que la notion de polymère, dans le sens que nous lui donnons aujourd'hui, a dû attendre les années 1920, avec les travaux de Staudinger (prix Nobel 1953), pour être acceptée et ce n'est qu'au cours de la décennie suivante que la théorie « macromoléculaire » a définitivement triomphé de la théorie « micellaire » à laquelle elle était opposée. Entretemps, les polymères artificiels et synthétiques avaient conquis leur droit de cité et étaient utilisés comme succédanés de substances rares ou comme matériaux présentant des propriétés nouvelles engendrant ainsi de nouvelles applications.

La variété des polymères synthétiques découverts par Staudinger est impressionnante et nombre de matériaux polymères utilisés couramment de nos jours ont été préparés pour la première fois par ce chercheur génial.

A la fin de la Seconde Guerre mondiale, les polymères avaient montré leur capacité à se substituer à de nombreux matériaux traditionnels mais n'avaient cependant pas réussi à se départir d'une réputation de qualité médiocre des objets qu'ils servaient à fabriquer.

Les polymères sont partout : ils sont utilisés dans tous les aspects de la vie quotidienne et il n'est plus question de les ignorer. Avec l'amélioration de leurs propriétés ils ont perdu leur mauvaise réputation et, plus que jamais, on peut dire : « Il n'y a pas de mauvais polymères, on n'en connaît que de mauvaises applications ».

II.2-Définition :

Qu'appelle-t-on polymère ? Plusieurs réponses peuvent être données mais, pour l'instant, seule l'une d'elle est proposée. La définition la plus généralement acceptée est celle d'un système formé par un ensemble de macromolécules, c'est-à-dire d'entités moléculaires de grande dimension, issues de l'assemblage covalent d'un grand nombre d'unités répétitives plus communément appelées unités(ou motifs) monomères. [8]

Le nombre d'unités monomères constitutives d'une chaîne polymère est appelé le degré de polymérisation (DP) ; il est directement proportionnel à la masse molaire du polymère. Si ce DP est élevé, on parle de hauts polymères ; lorsqu'il est faible le composé est un oligomère.

II.3-Classification des polymères selon différents critères :

II.3.1.-L'origine : [8] on peut les classer en trois catégories :

➤ Polymères naturels :

Ils sont issus des règnes végétaux à l'animal, leur importance est considérable. On peut cependant mentionner, dans cette catégorie, la famille des polysaccharides (cellulose, amidon...), le caoutchouc naturel, etc.

➤ Polymères artificiels :

Ils sont obtenus par modification chimique de polymères naturels, de façon à transformer certaines de leurs propriétés ; l'ester cellulosique (nitrocellulose, acétate de cellulose...) ont toujours connu une certaine importance économique.

➤ Polymères synthétiques :

Ils sont totalement issus du génie de l'homme, sont obtenus par polymérisation de molécules monomères.

II.3.2-Le domaine d'application : [8]

Il est difficile de proposer une classification exhaustive tant la variété des propriétés a multiplié les applications des polymères, comme matériaux en particulier. Il est cependant possible de regrouper les polymères en trois grandes catégories :

➤ Polymères de grande diffusion :

Les polymères de grande diffusion (encore appelés polymères de commodité), dont la production annuelle s'évalue par millions de tonnes, sont devenus d'un emploi quotidien pour tous. Le polyéthylène le polystyrène, le polychlorure de vinyle et quelques autres sont à classer dans cette catégorie d'une importance économique considérable

➤ Polymères techniques :

Ils ont des caractéristiques qui leur permettent de se substituer, de plus en plus aux matériaux traditionnels (métaux, céramiques...) pour de nombreuses applications ; les polyamides, les polyacétals... font partie de cette famille.

➤ Polymères spéciaux :

Les polymères spéciaux(ou polymères de fonction) présentent généralement une propriété qui induit leur utilisation pour une application particulière. C'est dans cette catégorie que se trouvent les polymères conducteurs, photoactifs, thermostables, adhésifs, etc.

II.3.3-La dimensionnalité : [8]

Les polymères peuvent encore être classés en trois catégories :

➤ Polymères linéaires (ou monodimensionnels) :

Ce sont des polymères pour lesquels chaque chaîne macromoléculaire est constituée d'un nombre (éventuellement) élevé mais fini d'unités monomères ; de tels systèmes correspondent à la polymérisation de monomères bivalents et une macromolécule linéaire peut être très schématiquement représentée par un trait continu divisé en intervalles figurant chacun une unité monomère (figure II.1).

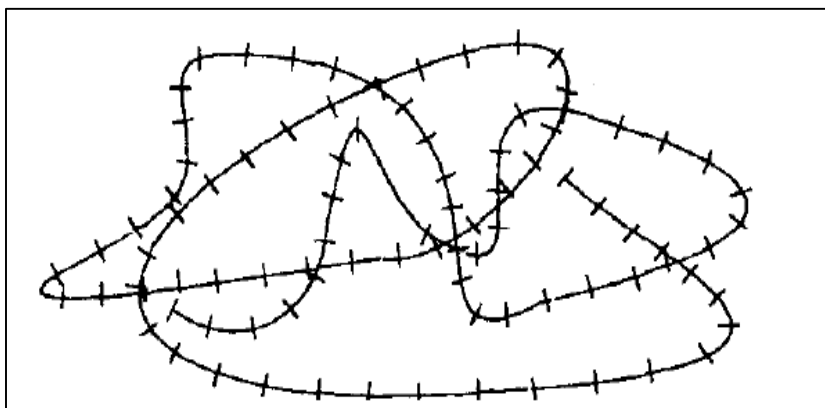


Figure II.1 : Représentation schématique de la chaîne d'un polymère linéaire. [8]

➤ Polymères bidimensionnels :

Ils peuvent être produits par la nature (carbone graphite, kératine...) ; dans le domaine des polymères synthétiques ce sont encore des curiosités de laboratoire. Ils se présentent sous la forme de feuillets bidimensionnels, d'épaisseur comparable à celle des molécules simples (figure II.2).

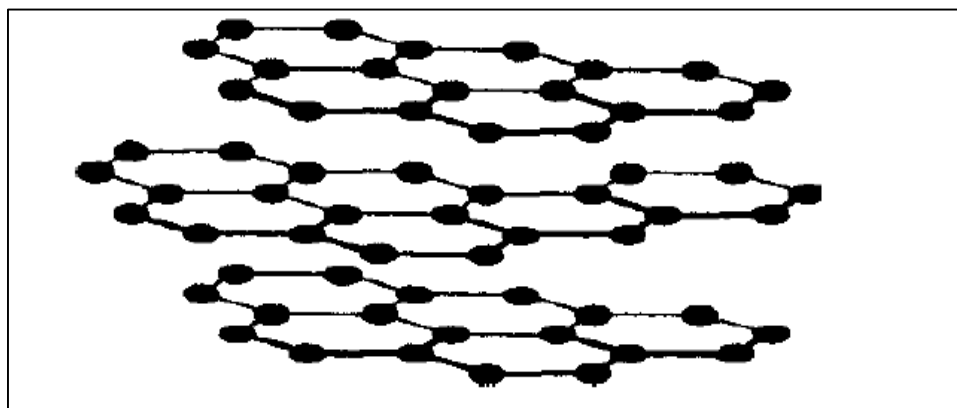


Figure II.2 : Représentation schématique d'un polymère bidimensionnel : [8]

➤ Polymères tridimensionnels :

Ils résultent de la polymérisation de monomères dont la valence moyenne est supérieure à deux ou encore de la réticulation (formation d'un réseau tridimensionnel), par voie physique ou chimique, de polymères linéaires. Leur dimension moléculaire peut être considérée comme infinie puisque toutes les unités monomères constitutives d'un objet sont liées de façon covalente pour former une seule macromolécule. Les liaisons se développent dans les trois dimensions et un élément de volume d'un tel système peut être représenté sur la (figure II.3).

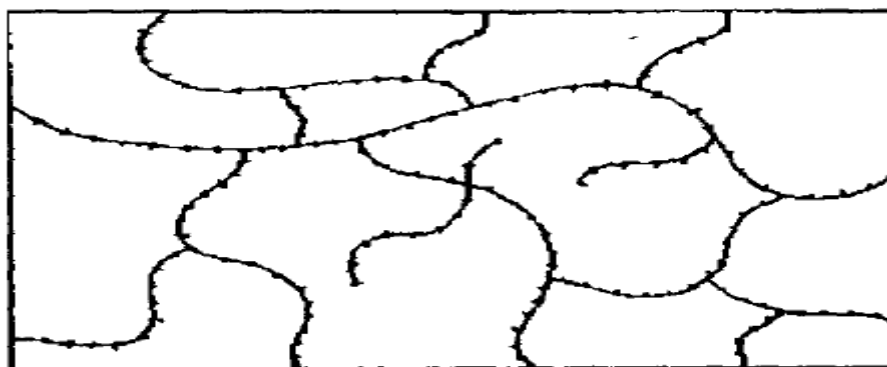


Figure II.3 : Représentation schématique d'un polymère tridimensionnel. [8]

II.3.4-La structure chimique : [9]

La structure chimique des motifs permet une classification des composés macromoléculaires en homopolymères et copolymères.

➤ Homopolymères :

Sont des polymères qui ne possèdent qu'une seule unité, ces homopolymères sont des longues chaînes formées par la répétition d'un monomère, leurs propriétés mécaniques, écoulement à l'état fondu, optique, sont dues à la structure chimique des monomères et à la longueur des chaînes.

➤ Copolymères :

Sont des polymères qui possèdent plusieurs unités, comme pour les homopolymères, les copolymères peuvent se classer dans différentes familles, citons : le mode statistique, alterné, séquencé et greffé.

II.3.5-Selon le comportement thermique :

Les polymères sont souvent classés d'après leurs propriétés thermodynamiques en trois types :

➤ Polymères thermoplastiques : [10]

Une matière thermoplastique désigne en termes général une matière qui a la capacité de se ramollir répétitivement lorsqu'elle est chauffée au-dessus d'une certaine température et se durcir

lorsqu'elle est refroidie en dessous de cette température, sans perdre sa thermoélasticité initiale. Nous observons le même phénomène avec des matériaux composés d'atomes seuls ou de petites molécules. La force de Van der Waals entre atomes est très faible et les molécules agissent alors en tant qu'entités indépendantes.

En ce qui concerne les polymères fondus la plus grande viscosité par rapport aux métaux s'explique par la plus grande difficulté de déplacer une chaîne entière de ce polymère. La structure des polymères thermoplastiques est soit amorphe (non organisée), soit cristalline qui est une organisation unidirectionnelle des chaînes. Cette deuxième organisation offre de meilleures propriétés mécaniques ainsi que thermiques.

➤ Polymères thermodurcissables : [10]

Pour une matière thermodurcissable la modification chimique est induite par l'application de chaleur, et parfois de la pression, afin de prendre un polymère initialement liquide de le durcir en une matière solide. Ainsi les constituants individuels (monomères) se lient sous l'effet de l'énergie pour être plus rigide, ceci est souvent atteint en induisant des liaisons croisées.

Un des meilleurs exemples est la vulcanisation du caoutchouc par l'addition de soufre et l'application de chaleur.

En ce qui concerne les propriétés de ces matériaux thermodurcissables, retenons que contrairement aux thermoplastiques les thermodurcissables ne peuvent être mis en œuvre qu'une fois seulement. Ainsi après cette polymérisation, la matière devient infusible, insoluble et une fois durcie, son arrangement moléculaire ne peut plus être modifiée. C'est pour cette même raison que les thermodurcissables sont généralement très résistants à la chaleur, mais ils présentent aussi une bonne résistance mécanique, diélectrique et aux produits chimiques.

➤ Polymères élastomères :

Ces polymères présentent les mêmes qualités élastiques que le caoutchouc, un élastomère au repos est constitué de longues chaînes moléculaires repliées sur elles même, sous l'action d'une contrainte, les molécules peuvent glisser les unes par rapport aux autres et se déformer. [11]

II.4-Réactions de polymérisation :

Selon le comportement cinétique et le mécanisme de la réaction qui conduit à la formation des composés macromoléculaires, on distingue deux types principaux de réaction de polymérisation ; la polycondensation et la polymérisation en chaîne. La polymérisation est par définition la réaction chimique ou le procédé permettant la synthèse d'un polymère à partir de monomères, et le produit obtenu est un polymère synthétique.

Les réactions de polymérisation permettent notamment de transformer un mélange liquide, plus ou moins visqueux en un matériau solide dont le taux de réticulation dépend notamment de la fonctionnalité des monomères employés. [12, 13,14]

II.4.1-Réaction de polycondensation :

La polycondensation est une réaction chimique entre molécules de base possédant des groupements fonctionnels différents, cette réaction mène à l'élaboration des macromolécules nommés polycondensats. Au cours de la polycondensation, les monomères s'associent avec élimination simultanée d'atomes ou de groupes d'atomes. Les polyamides, les polyesters et certains polyuréthanes sont des exemples typiques de polymères obtenus par polycondensation. Dans ce cas les réactions qui démarrent la polymérisation, appelées réactions d'initiation, sont de type ionique. [15]

II.1.4.2-La polymérisation en chaîne : [15]

Dans la polymérisation en chaîne, les monomères s'associent sans réaction d'élimination simultanée. C'est le procédé le plus utilisé dans l'industrie : le polyéthylène, le polypropylène, le polystyrène, l'alcool polyvinylique et le polytétrafluoroéthylène (Téflon) sont des exemples de polymères obtenus par polymérisation en chaîne. Cette polymérisation comporte les étapes suivantes :

- L'amorçage : c'est la formation des centres actifs à partir du monomère,
- La propagation : croissance des chaînes de polymère par additions successives,
- La terminaison : destruction du centre actif et interruption de la croissance des chaînes.

Le tableau I.1 suivant donne quelques exemples de polymères usuels.

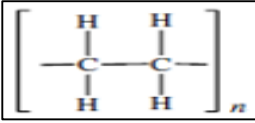
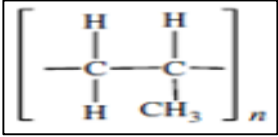
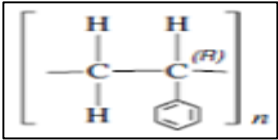
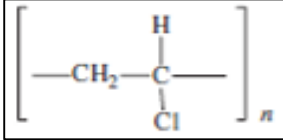
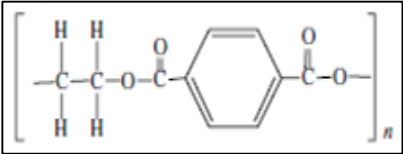
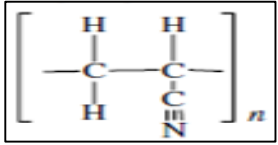
<i>Monomère</i>	<i>Polymère</i>
$\text{CH}_2=\text{CH}_2$ Ethylène	 Polyéthylène (PE)
$\text{CH}_2=\text{CH}(\text{CH}_3)$ Propylène	 Polypropylène (PP)
$\text{CH}_2=\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5)$ Styrène	 Polystyrène (PS)
$\text{CH}_2=\text{CHCl}$ Chlorure de vinyle	 Polychlorure de vinyle
$\text{HOCH}_2=\text{CH}_2\text{OH}$ Ethylène glycol + Acide téréphtalique	 Polyéthylène téréphtalate
$\text{CH}_2=\text{CHCN}$ Acrylonitrile	 Polyacrylonitrile

Tableau II.1 : Structure chimique de quelques polymères usuels. [16]

Chapitre III :
Composites à base de polymère
recyclé

III.1-Introduction :

Le développement et les changements rapides des produits, des pratiques technologiques et industrielles sont accompagnés par de nouvelles générations de matériaux. Parmi ces matériaux, les composites ne cessent d'évoluer vers des produits qui sont, soit le moins coûteux possible, soit le plus performant, ou bien les deux à la fois. De plus, dans un souci de protection de l'environnement et de santé publique, les composites tendent à intégrer un caractère écologique par l'usage de matières recyclées ou biodégradables.

Plusieurs travaux ont été effectués afin d'étudier l'applicabilité des polymères recyclés dans de nouveaux produits, en les incorporant dans des composites. Parmi ces travaux on peut citer composites polymère recyclé-mortier, polymère recyclé -bois, polymère recyclé-fibre et polymère recyclé-argile. Ce dernier type de composite (polymère recyclé-argile) est détaillé dans la partie PFE [17]

III.2-Composites polymère recyclé-mortier, polymère recyclé-béton :

Les méthodes les plus importantes qui ont été développées à ce jour pour alléger les matériaux de construction à base de ciment (bétons, mortiers), y compris les dernières avancées en matière de recyclage des déchets de polymères incorporés dans les liants cimentaires des matériaux de construction. Traditionnellement, un mortier ou un béton peuvent être allégés en y incluant de l'air, ou en additionnant des matériaux légers comme les argiles, la perlite et la vermiculite expansée. D'autres méthodes visent aussi à recycler divers produits comme le verre, le liège et le papier, et à les ajouter de diverses manières dans les matériaux de construction comme le béton ou les mortiers. [18]

Ces matériaux ainsi recyclés se substituent alors aux granulats ou aux additions de fillers/fines pour améliorer les propriétés des mortiers que cela soit à l'état frais (rétention d'eau, mise en œuvre, rhéologie, ouvrabilité) ou à l'état durci (stabilité thermique, résistance mécanique, absorption d'eau, perméabilité à la vapeur d'eau, propriétés acoustiques).

En outre, des mortiers et des bétons légers peuvent être produits en remplaçant les granulats légers traditionnels par des granulats de polymères légers, partiellement ou complètement en fonction de leur densité et de leur résistance mécanique, et cela, afin de réduire le problème de l'élimination des déchets solides, la consommation d'énergie et la pollution de l'environnement. Dans ce domaine, de nombreux matériaux de remplacement sont étudiés comme le polystyrène expansé, le polyéthylène téréphtalate, le polyéthylvinylacétate d'éthyle et le polyuréthane. [18]

Le développement de la construction durable est l'une des raisons pour laquelle est recherchée une synergie entre des matériaux de construction classiques et à base de polymère.

III.2.1-Pourquoi des matériaux cimentaires avec polymères recyclés ?

Le concept de modifier la formulation de matériaux de construction par des polymères afin d'obtenir des matériaux aux propriétés améliorées ou mieux adaptées à leur usage n'est pas nouveau puisque le développement de ces composés a commencé au cours des 70 dernières années. En conséquence, divers composés ont été développés qui sont maintenant devenus des matériaux de construction légers très populaires en raison de leur rapport coût performance intéressant. Les polymères ont connu une forte croissance ces dernières années lors de la construction de bâtiments, de ponts, d'installations industrielles et lors de la réparation d'infrastructures vieillissantes de génie civil. [19]

Les applications vont ainsi des structures composites et hybrides dans des environnements corrosifs à des applications sous forme de fibres pour la réparation et le renforcement des structures existantes.

Les mortiers à base de ciment et contenant des polymères sont couramment désignés par l'acronyme anglais PCM (polymer cement mortar). Ils sont basés [20] :

- d'une part, sur l'incorporation d'ajouts à base polymère, y compris les émulsions (latex), les poudres de polymères dispersées, les polymères solubles dans l'eau, les monomères et les résines liquides ;
- d'autre part, sur le remplacement partiel du liant cimentaire conventionnel par des polymères de nature variée.

III.2.2-Granulats de polymère recyclé utilisés :

III.2.2.1-Polystyrène expansé (EPS) :

Le polystyrène expansé est un polymère thermoplastique ayant une structure cellulaire, rigide, fermée et remplie d'air donnant normalement un matériau de masse volumique apparente faible (de l'ordre de 20 kg/m³). Bien qu'il existe de nombreux polymères expansés sur le marché, le plus commun reste le polystyrène expansé, aussi appelé liège artificiel, et connu internationalement par l'acronyme EPS (Expanded PolyStyrene). Les premières études scientifiques publiées sur l'introduction d'EPS dans les mortiers et bétons datent de 1980. Une solution d'imprégnation à base de styrène était alors incorporée dans la formulation de béton. Le polystyrène (PS) se polymérisait alors lors du malaxage, donnant lieu à un effet hydrofuge particulier, ce qui transformait le béton en un matériau plus résistant [21].

Les travaux sur les matériaux de construction composites fabriqués en utilisant des résidus de polystyrène expansé comme granulats légers datent des 10 dernières années. Le comportement du béton frais, en ajoutant des fumées de silice comme charge supplémentaire, ainsi que les propriétés d'isolation thermique et acoustique ont été analysées. Une contribution plus récente a concerné la fabrication d'un matériau résistant vis-à-vis des attaques par des produits chimiques courants, tels que des solutions salines, acides dilués et biologiques [22].

III.2.2.2-Polyéthylène téréphtalate (PET) :

Le PET est un polyester qui est obtenu par une réaction de polycondensation entre l'acide téréphtalique et l'éthylène glycol. C'est un polymère linéaire thermoplastique avec un haut degré de cristallinité qui peut être mis en forme par extrusion, injection et moulage par soufflage et thermoformage. Ce polymère a été produit pour la première fois en 1941, et a commencé à être commercialisé sous la forme de film d'emballage pour la conservation des aliments aux environs de 1950. Mais, à partir de 1976, l'application qui a abouti grâce à son imperméabilité vis-à-vis de l'eau et de l'oxygène, pour produire des bouteilles contenant des boissons, telles que l'eau minérale et les boissons gazeuses. [18].

Les résultats des études où les déchets de bouteilles PET ont été employés dans une matrice de mortier, ont montré que l'augmentation de la proportion de PET dans la formulation diminuait la densité, augmentait les propriétés d'isolation thermique mais réduisait aussi la résistance mécanique à la flexion [23].

III.2.2.3-Polyéthylvinylacétate d'éthyle (copolymères EVA) :

Ce polymère résulte de la copolymérisation d'éthylène et d'acétate de vinyle durant une réaction d'activation où se forment des radicaux libres à des températures et des pressions élevées. [18].

Des études utilisant le copolymère EVA comme granulats dans les matériaux de construction sont très récentes et montrent une amélioration des performances du béton bitumineux [24]. Par la suite, les études sur les bétons isolants légers comprenant des résidus d'EVA ont permis de vérifier que le granulats recyclés permettait d'abaisser les niveaux de bruit, d'améliorer l'imperméabilité et de réduire les phénomènes de fissuration par retrait [25].

III.2.2.4-Polyuréthane (PU) :

En fonction des étapes de synthèse et des monomères utilisés, la mousse de polyuréthane peut être obtenue sous forme flexible, semi-rigide ou rigide avec différentes gammes de densités, ce qui en fait un matériau souple d'utilisation, avec une résistance élevée à l'abrasion, une faible conductivité thermique et une faible densité apparente. [26]

Le polyuréthane peut être ajouté dans le mortier de plusieurs façons. Des expériences ont été effectuées concernant l'incorporation de granulats allégés, en polyuréthane au sein de matériaux de construction en utilisant différentes proportions de ciment Portland et d'eau. [18].

De plus, les résidus de polymère peuvent être aussi incorporés sous la forme de résidus de mousse de polyuréthane rigide (PUR). Les résultats montrent une amélioration significative de l'isolation thermique tout en conservant une déformabilité et des propriétés mécaniques suffisantes pour utiliser ces composés tels quels dans les mortiers de maçonnerie [26].

III.2.3-Exemple de fabrication des mortiers avec du polymère recyclé :**III.2.3.1-Matières premières :** [18]

Dans cet exemple ici, les matières premières utilisées dans la fabrication des différents types de mortiers sont du ciment, du sable, des mousses de polyuréthane et de l'eau.

➤ **Ciment :**

Il s'agit d'un ciment Portland, ses caractéristiques chimiques de ciment sont données par le tableau III .1 .

Elements	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	PAF
Pourcentage	21.82	6.57	4.01	63.43	0.21	1.86	2.09

Tableau III .1 : Composition chimique du ciment.

➤ **Sable :**

Le sable utilisé pour la fabrication des mortiers ne subit aucun traitement après leur arrivée au laboratoire, à l'exception d'un séchage au four.



Figure III.1 : Sable utilisé

➤ **Eau :**

L'eau de gâchage utilisée dans ces expériences provient du réseau d'eau, par nature potable.

➤ **Polymère :**

Le polymère utilisé provient du recyclage de mousse de polyuréthane rigide. Les mousses de polymères à recycler sont broyées, puis mélangées avec les autres composants du mortier



Figure III.2 : Résidus de mousse de type PUR après broyage

III.2.3.2-Formulation :

La fabrication de différents types de mortiers se caractérise par une substitution totale ou partielle du sable par les particules de mousse de polyuréthane (PUR). Celles-ci sont en quantité croissante jusqu'au remplacement total de l'ensemble du sable. Ces substitutions ont été effectuées par rapport au volume équivalent. [18]

Les propriétés mécaniques (résistance à la flexion, résistance à la compression et la déformation), Perméabilité à la vapeur d'eau et les comportements thermique et acoustique des mortiers formulés sont étudiées.

III.2.3.3- Propriétés finales des matériaux : [18]

Plusieurs enseignements peuvent être retenus après la fabrication et la caractérisation de plusieurs mortiers dans lesquels le sable est remplacé plus ou moins fortement par des particules de mousse polyuréthane rigide :

- ❖ Les résidus recyclés de mousse de polymère, préalablement broyés, peuvent partiellement remplacer le sable dans les mortiers de ciment afin d'obtenir des mélanges homogènes et utilisables facilement à l'état frais.
- ❖ La caractérisation microstructurale des mortiers durcis montre une bonne cohésion entre les composants (polymère et matrice cimentaire) et une répartition homogène des résidus recyclés de polymère et des pores.
- ❖ La densité apparente du mélange à l'état durci, est significativement plus faible pour les mortiers contenant des granulats de polymère recyclé que pour les mortiers de référence. Des densités inférieures à 1,30 ont été obtenues dans la plupart des cas de substitution du sable par le polymère, faisant des mortiers formulés ainsi des matériaux légers.
- ❖ Les mortiers contenant des granulats de polymère recyclé présentent une perméabilité à la vapeur supérieure à celle des mortiers de référence de par leur porosité élevée. L'application de tels mortiers sur les façades de bâtiment faciliterait la diffusion de la vapeur d'eau et améliorerait ainsi leurs propriétés anticondensation.
- ❖ Les propriétés mécaniques des mortiers comportant des polymères recyclés sont inférieures à celles du mortier de référence, mais elles sont conformes pour l'utilisation des mortiers de maçonnerie et des enduits de façade. De plus, certaines formulations de mortier incorporant une part importante de polymère recyclé sont mieux adaptées à des éléments soumis aux mouvements et aux déformations de la structure du bâtiment.
- ❖ L'incorporation d'une quantité importante de polymère recyclé dans les mortiers peut améliorer significativement les propriétés acoustiques du matériau final.

III.2.4 : Conclusion :

Diverses méthodes peuvent être mises en oeuvre afin d'alléger un mortier ou un béton : des plus anciennes et usitées (air entraîné dans la matrice cimentaire ou incorporation de granulats naturels légers) aux plus récentes (recyclage de divers matériaux de consommation courante comme le verre, le papier ou les polymères).

Dans ce dernier cas, plusieurs types de déchets à base de polymères peuvent être introduits (relativement facilement) dans la matrice cimentaire afin d'y être recyclés et d'obtenir des mortiers ou bétons légers. L'introduction de résidus de mousses polymères broyées a le double effet d'alléger la masse totale du matériau et d'augmenter significativement les propriétés finales (mécaniques, thermique et acoustique) du mortier. [18]

III.3-Composites polymère recyclé-bois : [27]

III.3.1-Définition :

Le bois-polymère, également appelé bois-plastique, est un matériau fabriqué à partir d'un mélange de fibres de bois et d'un polymère thermoplastique, dans le but d'obtenir un produit présentant certaines caractéristiques de ces deux ressources soit, entre autres, l'apparence du bois et la performance du plastique en milieu humide. Souvent fabriqué à partir de matières recyclées, il offre la possibilité de valoriser les résidus du bois et le plastique de postconsommation. Les procédés d'extrusion sont les plus fréquemment employés. L'industrie du bois-polymère est en émergence à l'échelle internationale. Toutefois, c'est aux États-Unis qu'elle est la plus développée. On y retrouve 70 fabricants, parmi lesquels quelques grandes entreprises, dont les ventes de produits en bois-polymère ont pour la plupart connu une importante croissance au cours des dernières années.

L'émergence rapide de l'industrie des produits composites bois-polymère s'appuie sur plusieurs facteurs de performance. Les avantages qu'ils présentent sont les suivants :

1. Par rapport aux produits composés entièrement de polymère et au polymère armé de fibre de verre ou de minéraux :

- ❖ plus léger (moins dense) ;
- ❖ moins coûteux ;
- ❖ meilleure résistance mécanique ;
- ❖ meilleure résistance à l'impact ;
- ❖ meilleure résistance au fluage ;
- ❖ coefficient d'expansion plus bas que les produits 100 % polymère ;
- ❖ possibilité de procédés d'extrusion en une seule phase au lieu de deux phases pour la fibre de verre.

2. Par rapport au bois traité et non traité :

- ❖ plus résistant à l'humidité ;
- ❖ plus résistant aux champignons (selon le pourcentage de bois) et aux termites⁶ ;

- ❖ plus grande stabilité dimensionnelle (produit uniforme) ;
- ❖ pas de fendillement, pas de gauchissement et pas d'échardes ;
- ❖ produit vert (matériaux recyclés et recyclables) ;
- ❖ durabilité accrue ;
- ❖ ne contient pas de produits chimiques contestés ;
- ❖ peut être produit en différentes formes et couleurs.

Les principaux obstacles à la progression de ce type de produits par rapport aux applications du bois solide sont reliés à son prix de vente élevé, à son apparence « synthétique » et à sa résistance mécanique inférieure à celle du bois.

III.3.2-La matière première :

III.3.2.1-Matière ligneuse :

La fraction bois est souvent le composant principal du composite bois-polymère. Ce dernier contient de 40 à 80 % de bois, selon le type de procédé choisi. La farine de bois finement moulue provient de matières ligneuses récupérées à la suite des opérations de rabotage, de sciage, de sablage ou de recyclage urbain.

En principe, plusieurs types de sous-produits en bois sont pris en compte, depuis le bois solide, jusqu'aux panneaux de fibres.

III.3.2.2-Polymères :

La fraction polymère est alimentée sous forme de poudre ou de granules. Une bonne dispersion du polymère et un bon mouillage des fibres de bois augmentent la qualité du produit final. Le principal type de polymère utilisé est le polyéthylène haute densité (PEhd), recyclé ou vierge, qui compte pour près de 60 % des 136 millions de kg servant à la fabrication du bois-polymère.

Le PEhd recyclé est utilisé pour la fabrication de patios, de rampes et de clôtures. Le PVC recyclé est présent dans les patios, les cadres de fenêtres, les structures de portes et les revêtements de murs. Le PVC a de meilleures propriétés physiques que le HDPE et un meilleur comportement au feu. Il occupe près de 25 % des polymères. Des composites à base de polypropylène recyclé sont également disponibles.

III.3.2.3-Additifs :

Les additifs améliorent l'apparence ou les propriétés du produit final. Les plus fréquemment utilisés sont les colorants, suivis des lubrifiants. Parmi les autres additifs, on retrouve les stabilisateurs de lumière, les agents de protection contre les rayons U.V., les agents antimicrobiens et les agents ignifuges.

III.3.3-Procèdes de fabrication :

L'extrusion est le procédé de fabrication de bois-polymère le plus répandu. Il est choisi par près de 80 % des entreprises impliquées dans cette industrie. L'extrusion du bois se définit comme le mélange de fibres de bois avec un polymère thermoplastique dans le but de fabriquer un produit ayant l'apparence du bois naturel. Dans ce procédé à basse température, la fraction bois représente de 40 à 80 % du poids du matériau. Pouvant être traités à des températures en dessous de 200 °C, les thermoplastiques sont les mieux appropriés à la stabilité thermique limitée du bois.

III.3.4-Applications :

Les bois-polymères recyclés sont utilisés dans quatre secteurs :

1. les matériaux de construction ;
2. les produits industriels et de consommation ;
3. les véhicules automobiles ;
4. les équipements et les infrastructures municipales, de parcs et les applications marines, etc.

III.3.4.1-Matériaux de construction :

Les principaux matériaux reliés au secteur de la construction ont des exigences structurales limitées. Ce sont les composants de patios, les rampes, les clôtures et les portes et fenêtres. Les parements extérieurs incluant les bardeaux sont en développement. Les recherches se poursuivent afin d'appliquer les composites bois-polymère aux installations portuaires. Parmi dans la fabrication de patios et terrasses qui compte pour près de 65 % de la production de toute l'industrie composite bois-polymère.

III.3.4.2-Produits industriels et de consommation :

Le bois-polymère est utilisé dans la fabrication de meubles, d'armoires, de planchers, de stores vénitiens, de moulures, etc. Les palettes de manutention, les tasseaux, les caisses, les contenants et les enseignes sont des produits propres aux besoins du secteur industriel. Des fabricants offrent également des traverses de chemins de fer.

III.3.4.3-Véhicules automobiles :

Les principales applications reliées au secteur de l'automobile sont les composants d'intérieur, comme les panneaux de portes, les composants de coffres arrière, les vide-poches, les couvre bagages, les couvercles de pneus de rechange et les moulures. D'autres pièces sont à l'étape de la conception et des essais sont réalisés afin de trouver des applications capables d'alléger les véhicules (couvert de cames, tableau de bord, support de batterie, renfort de grille, etc.).

III.3.4.4-Équipements et infrastructures municipales, de parcs et applications marines :

Les équipements municipaux et de parcs incluent les bancs, les tables de pique-niques, les contenants à déchets, les modules de jeux, les bordures de jardin, les enseignes et les marches d'escaliers. Les gains de ces matériaux pourraient être réalisés aux dépens du plastique, qui a connu une importante croissance depuis 1998. Le bois-polymère est moins coûteux et ses propriétés mécaniques sont supérieures. L'introduction du PVC dans la fabrication des composites permettra aux fabricants d'équipements de jeux de se convertir à ce matériau qui présentera une plus grande dureté et une meilleure force que les produits fabriqués uniquement en plastique.

Conclusion générale

Dans cette synthèse théorique nous avons tenté de présenter les matériaux composites dans leur ensemble en mettant l'accent sur les composites à base de polymère recyclé.

Dans ce travail nous avons présenté deux types de composites à base de polymère recyclé, il s'agit des composites polymère recyclé-mortier et polymère recyclé-bois.

La réutilisation des déchets à base de polymère est un avantage environnemental indéniable, puisqu'un grand volume de déchets peut être recyclé lors de la construction d'un bâtiment.

Le recyclage est une valeur ajoutée importante étant donné la récupération d'énergie potentielle (meilleure isolation thermique du bâtiment) et en raison des économies réalisées en l'absence d'enfouissement ou de destruction des déchets.

Un matériau composite fabriqué à partir d'un mélange d'un polymère recyclé et du bois, offre la possibilité de valoriser les résidus du bois et le plastique de post consommation.

Il en est de même pour les mélanges polymère- recyclé argile dont l'étude détaillée a été réalisée et présentée dans le cadre du projet de fin d'études.

Le domaine des matériaux composites est un immense domaine qui offre une multiplicité de possibilités et d'applications quasi- infinies.

Références bibliographiques

- [1] : Site internet, « Sciences de l'Ingénieur - Matériaux composites et structures composites », http://www.si.ens-cachan.fr/accueil_V2.php?page=affiche_ressource&id
- [2] : Site internet : <http://www.planetoscope.com/electronique/1320-production-mondiale-de-materiaux-composites.html>
- [3] : J. Renard, « Elaboration, microstructure et comportement des matériaux composites à matrice polymère », Hermès Sciences Publications, Cachan, (2005)
- [4] : M.Ambid, « Evaluation de nanocomposites polypropylène/silicate pour l'isolation électrique », Thèse de doctorat. Université Toulouse III, (2007)
- [5] : J.M. Berthelot, « Matériaux composites, comportement et analyse des structures », Edition TEC & DOC, Cachan, (1999)
- [6] : Site web « Sciences de l'Ingénieur - Les grandes familles de matériaux composites », http://www.si.ens-cachan.fr/accueil_V2.php?page=affiche_ressource&id
- [7] : M. Wautelet et coll., « Les nanotechnologies », Edition Dunod, Paris, (2003)
- [8] : M.Fontanille, Y. Gnanou, «Chimie et Physico-chimie des Polymères (c4urs)», 2e et 3e cycles. Dunod, Paris, 4-8, (2005).
- [9] : S. Jouenne, Thèse de Doctorat, option chimie et physicochimie des polymères ; Université Pierre et Marie Curie, (2005).
- [10] : M.Eriksson, « Détermination des propriétés et applications des composites (cours) » ,20-22, (2009).
- [11] : M. Fontanille, P. Vairon, Polymérisation, Techniques de l'ingénieur, Traité plastiques et composites, (A3040).
- [12] : D.J. Lougnot, Techniques d'utilisation des photons, chap.5, collection Electra. Dopee, 85, Paris, 245, (1992).
- [13]: C. Decker, Dans, Materials Science and Technology. Vol. 18, Meiser (H.E.H., éd), VCH Verlag Weinheim, (1997).
- [14]: C. Roffey, J.Wileng, Chichester « Photodegradation of reactive species for UV-curing », 77-85, (1997).
- [15] : M. Medkour, Polymères : Synthèse macromoléculaire ; offices des publications universitaires, (2005).
- [16] : S.Etienne, L. David, «Introduction à la physique des polymères (Cours et exercices)», 2^e édition. Dunod, Paris, 7, (2012)

Références bibliographiques

- [17] :A. Temam, «Contribution à l'étude de matériaux composites à base de polymère recyclé», Mémoire de fin d'études en Génie chimique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, (2014).
- [18] :V.Calderon, M.Horgnies ; Utilisation de polymères recyclés dans les mortiers et bétons ; Techniques de l'ingénieur, Traité Environnement et construction (AM 3600).
- [19]: R Hamilton, B.Benmokrane, W.Dolan et M.Sprinkel « Polymer materials to enhance performance of concrete in civil infrastructure». Journal of Macromolecular Science, Part C: Polymer Reviews, 1–24, (2009)
- [20]: Y.Ohama, «Concrete-polymer composites- the past, present and future». Key Engineering Materials, 1-14, (2011)
- [21]: Y.Ohama, T.Nishimura et H.Hachisuka, «Strength properties of steel fiber reinforced polystyrene-impregnated concrete». Proceedings of Computer Networking Symposium, 151-158, (1980)
- [22]: R.Wang et C.Meyer, «Performance of cement mortar made with recycled high impact polystyrene. Cement and Concrete Composites, 975-981, (2012)
- [23] Y.Choi, D.Moon, J.-S.Chung et S.-K.Cho, «Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete». Cement and Concrete Research, 776– 781, (2005)
- [24] S.Saoula, K.Ait Mokhtar, S.Haddadi et E.Ghorbel «Improvement of the performances of modified bituminous concrete with EVA and EVA-waste». Physics Procedia, 1319-1326, (2009)
- [25]: B.Tutikian, M.Nunes, L.Leal et L.Marquette, «Impact sound insulation of lightweight concrete floor with EVA waste», Building Acoustics, 75-88, (2012)
- [26] : S.Gonzalez, J.Gadea, A.Rodriguez, C.Junco et V.Calderon ,«Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes».Construction and Building Materials, 653-658,(2012)
- [27] : Document « Produits composites polymère-Bois », Québec, 2003