

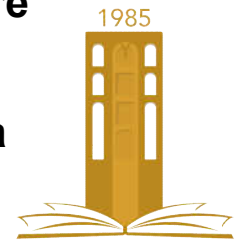


جامعة محمد بوضياف - المسيلة  
Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Ministère de l'enseignement supérieure  
et de la recherche scientifique

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de technologie



جامعة محمد بوضياف - المسيلة  
Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Département de GENIE CIVIL

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de  
MASTER

FILIERE : Génie Civil

SPECIALITE : Matériaux

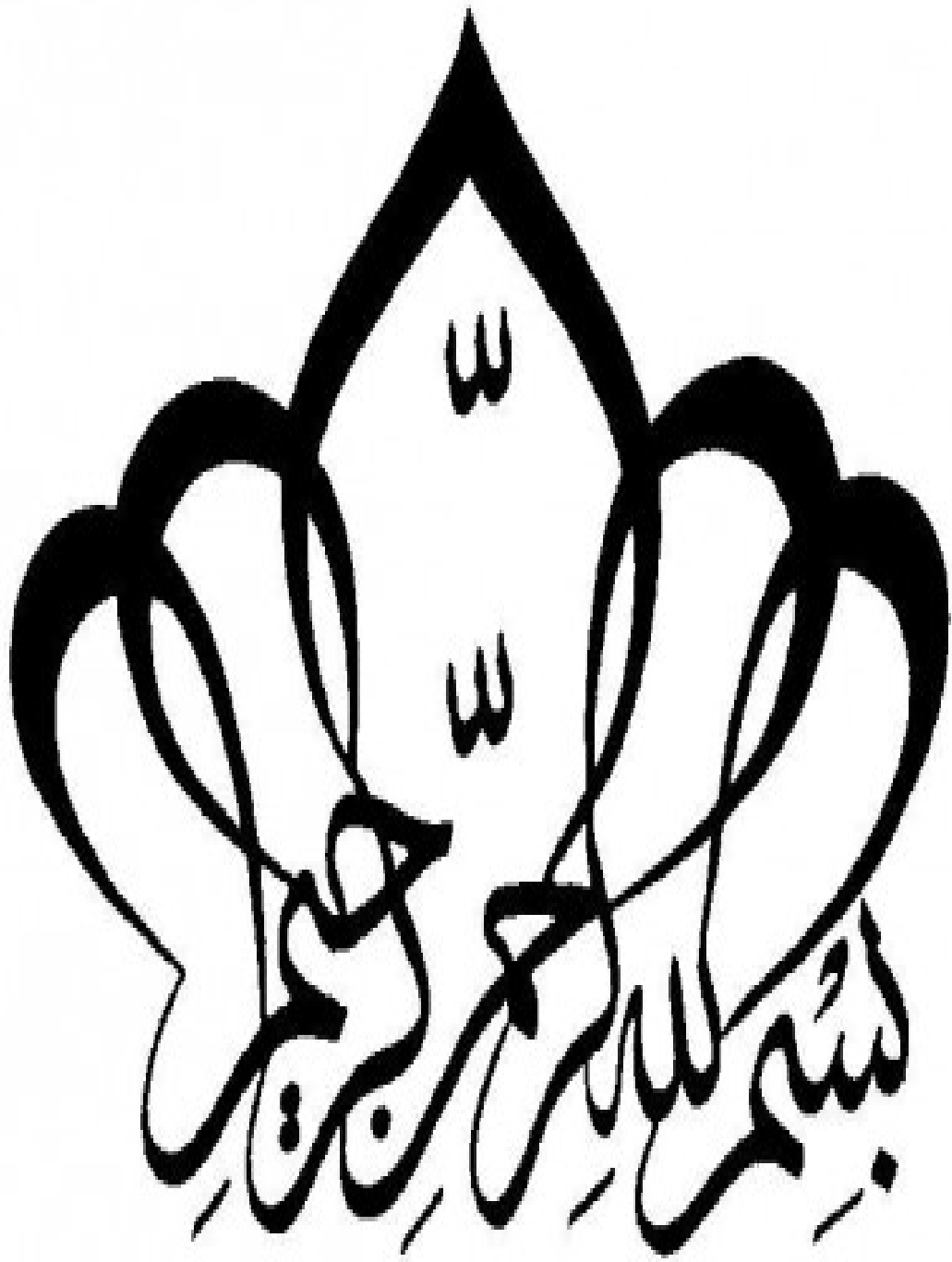
THEME

*Étude comparative du comportement d'un  
béton polymère à matrice organique  
thermodurcissable et thermoplastique*

Dirigé par :  
Dr. Rahmouni Zine El Abidine

Présenté par :  
Cherchari Saadia

Promotion : 2015/2016.





# REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier « **ALLAH** » le Tout Puissant de m'avoir donné le courage, la volonté, la force et la patience pour mener ce travail.

Je remercie Professeur « **RAHMOUNI. Zine-el-Abiddine** » mon encadreur, pour leur disponibilité, de l'aide qu'il m'a fournie et de leur immense disponibilité, sans oublier leur gentillesse.

Ce travail de recherche a été effectué au sein de l'usine « **Maghreb-Pipe** », je remercie son directeur « **Mr. BAALI Brahim** » mon collègue qui a été comme mon père au cours de la réalisation de ce travail et de son aide de ses conseils et de tous ce que j'ai besoin ; tous les mots sont insuffisants pour exprimer ce qu'il mérite.

Je remercie tous les personnels du « **Maghreb-pipe** » pour leur accueil de sa bonne humeur spécialement l'équipe de laboratoire chimique et mécanique (**Sofiane, Hamza, Riyad**).

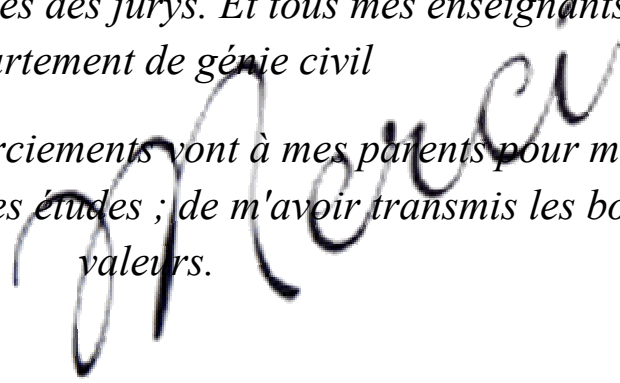

Merci, mon oncle « **CHARCHARI Lakhdar** » de tous ses aides.

Je remercie aussi mon amie « **OMRI Imen Yamina** » et « **Gazal Ratiba** » de tous ses conseils ; mon collègue « **HAMOUMA Djamel** » qui n'a cessé de m'encourager.

Et toutes mes amies de spécialités « **Matériaux de construction** » et « **Structure** »

Je remercie les membres des jurys. Et tous mes enseignants du département de génie civil

Mes derniers remerciements vont à mes parents pour m'avoir toujours poussé dans mes études ; de m'avoir transmis les bonnes valeurs.



# DEDICACES

*Je dédie ce modeste travail à :*

*À mes très chers parents qui sont la source de ma réussite  
« TAYEB » et « RAHMA »*

*A mon frère aîné qui je le considère mon deuxième père.  
« BRAHIM »*

*A tous mes frères filles et garçons (Naceur, Mouhamed,  
Akram, Khadîdja, Hayat, Moufida, Aicha)*

*Aux épouses de mes frères (Sediki Amel, Ben chyoukh  
Narimane et Hadji Larem)*

*Aux paires de mes sœurs (Marakchi Mebarek, Machta Khaled,  
Aissa moustafa).*

*Mes neveux sans exception surtout (Salsabil, Anfal, Nermine,  
Marouane, Bassel, Moncef et Souhaib).*

*À mon ami « Hamouma Djawher ».*

*A mes deux grandes familles « CHARCHARI et HADJI ».*



## *Résumé*

Motivé par la propriété de recyclage des thermoplastiques, l'objectif de ce travail est de formuler des micros bétons polymères à base de silice en utilisant deux types de matrices, l'une thermodurcissable et l'autre thermoplastique. Nous étudions les caractéristiques mécaniques et physiques des bétons polymères dans les deux cas et à des différentes fractions matrice/silice. Les résultats obtenus seront analysés afin d'aboutir à la formulation optimum.

Ainsi, le présent travail s'intéresse, donc, à l'étude de comportement des bétons polymères dans les deux cas (à base de résine, à base de polypropylène), par l'étude des caractéristiques mécaniques et physiques, afin d'aboutir à la formulation optimum, les résultats de ce travail ; montrent que le BPR donne un comportement meilleur par rapport au BPP. Le matériau BPR 16% a enregistré une résistance maximale à la flexion, et le matériau BPR 20% donne la valeur maximale à la compression.

**Mots clés:** Béton polymère, matrice thermodurcissable, matrice thermoplastique, résine polyester, polypropylène, Extrusion.

## *Abstract*

Motivated by the property of recycling of thermoplastics, the objective of this work is to formulate micro polymeric concretes containing silica by using two types of matrix, one thermosetting and other thermoplastic resin. We studied the mechanical and physical characteristics of polymer concretes in both cases and with various fractions matrix/silica. The results obtained were analyzed in order to define the optimum formulation.

This work is interested, therefore, to study the behavior of the polymeric concretes in both cases (containing resin, polypropylene), by the study of the mechanical and physical characteristics, in order to lead to the optimum formulation, the results of this work; show that the BPR (polyester, silica concrete) gives a better behavior compared to the BPP (polypropylene, silica concrete). Material BPR 16% with recorded a maximum resistance to the bending, and material BPR 20% gives the maximum value on compression.

**Keywords:** concrete polymer, thermosetting matrix, thermoplastic matrix, resin polyester, polypropylene, Extrusion.

## ملخص

انطلاقاً من خاصية إعادة تدوير اللدائن الحرارية، الهدف من هذا العمل هو تشكيل خرسانة بوليميرية برمل السليكا باستخدام نوعين من الأساسات واحدة لدائن حرارية وأخرى بوليميرات حرارية التصلد. نقوم بدراسة الخصائص الميكانيكية والفيزيائية للخرسانة في كلتا الحالتين و مختلف الفصائل أساس/سليكا. يتم تحليل النتائج المحصل عليها من أجل تحقيق الصيغة المثلى.

وبالتالي، العمل الحالي يهتم بدراسة سلوك الخرسانة البوليميرية في كلتا الحالتين (مصنوعة من أساس الراتنج، أساس البولي بروبيلين)، نقوم بدراسة الخواص الميكانيكية والفيزيائية، بغية تحقيق الصيغة المثلى، نتائج هذا العمل تبين أن الخرسانة البوليميرية للراتنج تعطي سلوك أحسن مقارنة بالخرسانة البوليميرية للبولي بروبيلين.

مادة البوليمير لأساس الراتنج 16 % تستعرض قيمة قصوى للانحناء، و مادة البوليمير لأساس الراتنج 20% تعطي قيمة قصوى للضغط.

الكلمات الرئيسية: الخرسانة حرارية، بوليميرات حرارية التصلد، لدائن حرارية، راتنج البوليستر، بولي بروبيلين، قذف.

# Sommaire

Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites</b>	
Introduction.....	4
I.1.On distingue deux types de composites.....	4
a). Matériaux composites à grande diffusion .....	4
b). Matériaux composite à hautes performances .....	5
I.2.Les caractéristiques générales d'un composite.....	5
I.3.Les constituants des matériaux composites.....	5
I.3.1.La matrice.....	5
a. La matrice organique .....	6
La résine thermodurcissable .....	7
Les résines thermoplastiques.....	10
Résine thermostable.....	11
b. Les matrices naturelles .....	11
Matrices métalliques .....	11
Matrices céramiques.....	12
I.4.La matrice a pour rôle de.....	12
I.5.Le renfort.....	12
I.5.1.Les types des renforts.....	13
I.5.2.Les différents types de fibre.....	14
I.5.3.Architecture des fibres.....	16
I.6.Relation matrice – renfort .....	17
I.7.Les Charges et les additifs.....	18
I.7.1.Les charges.....	18
I.7.2. Les additifs.....	19
I.8.Structure du composite .....	19
I.8.1. Les monocouches .....	19
I.8.2.structures sandwiches.....	20
I.8.3.Les stratifiées .....	20
I.9. Procédé de fabrication des composites .....	21
I.9.1.Moulage au contact : consiste à disposition successivement sur un moule.....	21
I.9.2.Moulage par projection simultanée.....	21
I.9.3.Injection thermodurcissable BMC .....	21
I.9.4.Compression thermodurcissable.....	22
I.9.5. Pultrusion.....	22
I.9.6. Enroulement filamentaire (ou bobinage).....	22
I.10.Avantages et inconvénients des composites.....	23
a) Avantages .....	23
b) Inconvénients .....	23

Conclusion.....	23
-----------------	----

## **Chapitre II : Généralités sur les bétons polymères**

Introduction.....	25
II.1.Définition du béton polymère.....	25
II.2.La composition principale d'un béton polymère.....	26
a). Le liant (la résine).....	26
b). Les agrégats.....	26
II.3 les caractéristiques principales des bétons polymères.....	27
II.3.1. Caractéristiques mécaniques d'un béton polymère.....	27
II.3.2. Caractéristiques chimiques d'un béton polymère.....	27
II.3.3. Caractéristiques physiques d'un béton polymère.....	27
II.3.4. Caractéristiques hydrauliques d'un béton polymère.....	28
II.4. Propriétés de béton polymère.....	28
II.5. Les principaux avantages et les inconvénients du béton polymère.....	28
II.5.1. Les avantages d'un béton polymère.....	28
II.5.2. les inconvénients d'un béton polymère.....	29
II.6. Les différentes applications d'un béton polymère.....	29
II.6.1. L'utilisation des bétons polymère dans les bâtiments domaine de génie civil.....	29
II.6.2. L'utilisation des bétons polymère dans l'horticulture.....	30
II.6.3. L'utilisation des bétons polymère pour les revêtements des chaussés et planchers.....	30
II.6.4. L'utilisation des bétons polymère dans les travaux de drainage et hydrauliques.....	31
II.6.5. L'utilisation des bétons polymère dans l'industrie.....	31
II.6.6. L'utilisation des bétons polymère comme isolation phonique.....	32
Conclusion.....	32

## **Chapitre III : Théorie d'endommagement et comportement mécanique**

Historique.....	34
Introduction.....	34
III.1.Observations au MEB des faciès de rupture.....	35
III.2.L'endommagement et la rupture des matériaux.....	35
III.2.1.L'endommagement des matériaux.....	35
III.2.2.Rupture des matériaux.....	35
III.3.Fissure et mode des de rupture.....	36
III.4.Les phases de chargement.....	37
III.5. Théorie de la mécanique de rupture.....	37
III.5.1.Approche énergétique ou Approche de Griffith.....	37
III.5.2. Approche en termes d'intensité de contrainte.....	39
III.5.3. Taux de restitution d'énergie G.....	40
a. Mesure de G dans le cas d'un effort imposé.....	40
b. Mesure de G dans le cas d'un déplacement imposé.....	41
III.5.5. L'équivalent entre les deux paramètres K et G.....	42
III.6. Cas d'une éprouvette fissurée en flexion trois points.....	43
Conclusion.....	43

## Chapitre IV : Matériaux et techniques expérimentales

Introduction .....	45
IV.1.Caractéristiques principales des matériaux utilisés.....	45
IV.1.1.La Silice.....	45
a. Tests sable de silice.....	46
Test d'analyse granulométrique.....	46
Test d'humidité .....	47
Mesure de la masse volumique du sable de silice.....	48
IV.1.2.La Résine polyester.....	48
a. Test de propriété rhéologique de la résine.....	59
b. Test de réactivité (temps de gélification).....	50
c. Propriétés de résine isophthalique .....	51
Avantages et inconvénients de l'utilisation de la résine polyester.....	51
IV.1.3.La résine Polypropylène (pp).....	52
a. Caractéristiques principales.....	52
b. Description de polypropylène BH975MO .....	53
c. Caractéristiques spéciales (BH975MO) .....	53
Avantages et inconvénients de l'utilisation de polypropylène.....	53
IV.2.Technique de moulage .....	54
IV.2.1.Préparation des moules utilisées.....	54
IV.2.2.Elaboration des éprouvettes en béton polymères de résine.....	54
a. Technique.....	54
b. Le traitement thermique du béton polymère élaboré.....	56
IV.2.3.Elaboration des éprouvettes en béton polymères de polypropylène.....	56
a. Extrusion .....	56
b. Description générale et principe de fonctionnement.....	56
c. Technique.....	57
IV.3.Essais mécaniques appliqués sur le béton polymère.....	59
IV.3.1.Essai de flexion trois points (FTP).....	60
Les paramètres d'étude.....	62
IV.3.2.Essai de compression.....	62
Paramètre d'étude.....	62
IV.4.Essais physiques.....	63
IV.4.1.Essai d'absorption .....	63
Les paramètres d'étude.....	64
IV.4.2.Test de perte au feu.....	65
Les paramètres d'étude.....	66
Conclusion .....	67

## Chapitre V: Résultats et Discussion

Introduction .....	69
V.1.Propriétés mécanique des Bétons Polymères en flexion trois points.....	69
V.1.1.Analyse des courbes contrainte-déformation des bétons polymères.....	69
V.2.Analyse des modules en flexion .....	74
V.3.Analyse de la résistance à la compression.....	76

V.4.Influence de taux de la matrice sur les propriétés physiques.....	78
V.4.1.Analyse des courbes de tests d'absorption .....	78
V.4.2.Analyse des histogrammes de test perte au feu .....	79
V.5.Faciès de rupture des bétons polymères .....	80
Conclusion .....	81
<b>Conclusion générale Perspectives</b> .....	<b>82</b>
<b>Références bibliographiques</b>	
<b>Annexes</b>	

## *Liste des tableaux*

<b>Tableau. I.1 : Principales différences entre les thermodurcissables et les thermoplastiques.</b>	<b>7</b>
<b>Tableau. I.2 : Caractéristiques principales des matrices thermodurcissables (TD)</b>	<b>8</b>
<b>Tableau. I.3 : Caractéristiques principales des matrices thermoplastiques (TP)</b>	<b>11</b>
<b>Tableau II.1 : Propriétés mécaniques des différents types de bétons de résine et du béton de ciment</b>	<b>28</b>
<b>Tableau. IV.1: Résultat de test d'humidité de sable</b>	<b>48</b>
<b>Tableau. IV.2 : caractéristique de la résine polyester</b>	<b>51</b>
<b>Tableau. IV.3: Différents avantages et les inconvénients de résine polyester insaturée</b>	<b>53</b>
<b>Tableau. IV.4 : Caractéristique de la résine polypropylène</b>	<b>52</b>
<b>Tableau. IV.5 : les avantages et inconvénients de polypropylène</b>	<b>53</b>
<b>Tableau. IV.6 : Taux de chaque composante</b>	<b>56</b>
<b>Tableau. IV.7: Taux de chaque composante</b>	<b>59</b>
<b>Tableau. IV.8 : Résultats test d'absorption de béton de résine</b>	<b>65</b>
<b>Tableau. IV.9: Résultats test d'absorption de béton de polypropylène</b>	<b>65</b>

## *Liste des figures*

<b>Fig. I.1 : Représentation schématique d'un matériau composite.....</b>	<b>4</b>
<b>Fig. I.2 : Classification de différentes familles de matrice.....</b>	<b>6</b>
<b>Fig. I.3 : Polymères à structure : (a) réticulée – (b) ramifiée.....</b>	<b>8</b>
<b>Fig. I.4: Structure de polymère (thermoplastique).....</b>	<b>10</b>
<b>Fig. I.5: Différents types de renfort de base.....</b>	<b>12</b>
<b>Fig. I.6 : Le rôle de micromécanique dans le composites a fiber continues. ....</b>	<b>13</b>
<b>Fig. I.7 : Différents types de composites a fibers courte ..... </b>	<b>13</b>
<b>Fig. I.8 : Fibres vues au microscope électronique.....</b>	<b>13</b>
<b>Fig. I.9 : Fibre de verre.....</b>	<b>14</b>
<b>Fig. I.10 : Fibres de carbone.....</b>	<b>14</b>
<b>Fig. I.11 : Fibres d'aramide.....</b>	<b>15</b>
<b>Fig. I.12 : Fibres de polyéthylènes.....</b>	<b>15</b>
<b>Fig. I.13 : Fibres de naturelles.....</b>	<b>16</b>
<b>Fig. I.14 : Fibres unidirectionnels.....</b>	<b>16</b>
<b>Fig.I.15 : Toile.....</b>	<b>17</b>
<b>Fig. I.16 : Serge.....</b>	<b>17</b>
<b>Fig. I.17 : Satin.....</b>	<b>17</b>
<b>Fig. I.18 : Composite monocouche ..... </b>	<b>19</b>
<b>Fig. I.19 : Composite sandwichs ..... </b>	<b>20</b>
<b>Fig. I.20 : Composite sandwichs ..... </b>	<b>20</b>
<b>Fig. I.21: Composite stratifié ..... </b>	<b>20</b>
<b>Fig. I.22 : Technique de moulage ..... </b>	<b>21</b>
<b>Fig. I.23 : Cycle de vie d'un matériau composite.....</b>	<b>22</b>
<b>Fig. II.1 : Béton polymère.....</b>	<b>25</b>
<b>Fig. II.2 : Mise en œuvre d'une plaque de béton polymère ..... </b>	<b>27</b>
<b>Fig. II.3 : Façades et marches d'escalier en béton polymère pour bâtiment.....</b>	<b>29</b>
<b>Fig. II.4 : Quelques applications du béton polymères (Bacs de fleurs –chaise).....</b>	<b>30</b>
<b>Fig. II.5 : Le pont mythique (New York Mania).....</b>	<b>30</b>
<b>Fig. II.6 : Plancher en béton polymère.....</b>	<b>30</b>
<b>Fig. II.7 : Quelques applications du béton polymères (drainage et hydrauliques).....</b>	<b>31</b>
<b>Fig. II.8 : Quelque application de béton polymère (industrie).....</b>	<b>31</b>
<b>Fig. II.9 : Quelque application de béton polymère pour l'isolation.....</b>	<b>32</b>
<b>Fig. III.1 : Contact résine /granulat.....</b>	<b>35</b>
<b>Fig. III.2 : Modes de rupture.....</b>	<b>36</b>
<b>Fig. III.3 : Exemple des Modes de rupture.....</b>	<b>37</b>
<b>Fig.III.4:Ouvertureet propagation d'une fissure ..... </b>	<b>37</b>
<b>Fig. III.5 : Schéma d'un solide contenant une fissure elliptique « 2a ».....</b>	<b>38</b>
<b>Fig. III.6 : Cas d'une éprouvette de flexion trios points (FTP).....</b>	<b>39</b>
<b>Fig. III.7 : Rupture d'un corps sous (a) déplacement imposé (b) charge imposée.....</b>	<b>42</b>

<b>Fig. IV.1 : Sable de silice.....</b>	<b>46</b>
<b>Fig. IV.2 : Tamiseuse électrique.....</b>	<b>46</b>
<b>Fig. IV.3 : Courbe d'analyse granulométrique de la silice utilisée.....</b>	<b>47</b>
<b>Fig. IV.4 : L'étuve pour séchage.....</b>	<b>47</b>
<b>Fig. IV.5 : Essai de mesure la masse volumique.....</b>	<b>48</b>
<b>Fig. IV.6 : Appareil pour la mesure de la viscosité.....</b>	<b>49</b>
<b>Fig. IV.7 : Test temps de gélification (manuellement).....</b>	<b>50</b>
<b>Fig. IV.8 : Cycle de polymérisation de résine polyester (isophtalique).....</b>	<b>51</b>
<b>Fig. IV.9 : Polypropylène (pp).....</b>	<b>52</b>
<b>Fig. IV.10 : (a) Moule utilisé pour éprouvettes lisses (FTP).....</b>	<b>53</b>
<b>Fig. IV.11 : Etapes de moulage de béton polymère par contact.....</b>	<b>54</b>
<b>Fig. IV.12 : Epreuves lissés en BPR : a)-16%RI, b)-20%RI, c)-24%RI.....</b>	<b>56</b>
<b>Fig. IV.13 : Etapes de moulage de béton polymère par extrusion.....</b>	<b>58</b>
<b>Fig. IV.14 : Epreuves lissés en BPP : a)-24%PP, b)-32%PP, c)-40%PP. ....</b>	<b>59</b>
<b>Fig. IV.15 : Essai de FTP (YL Testing Machines/20Kn).....</b>	<b>60</b>
<b>Fig. IV.16 : Essai de FTP sur des éprouvettes lissés en BPR.....</b>	<b>61</b>
<b>Fig. IV.17 : Essai de FTP sur des éprouvettes lissés en BPP.....</b>	<b>61</b>
<b>Fig. IV.18 : Essais compression sur des éprouvettes lisse en béton BPR et BPP.....</b>	<b>63</b>
<b>Fig. IV.19 : Etapes de l'essai d'absorbtion sur des éprouvette en béton polymère BPR et BPP.....</b>	<b>64</b>
<b>Fig. IV.20 : Test perte au feu sur des éprouvette en béton polymère BPR et BPP.....</b>	<b>66</b>
<b>Fig.V.1 : Principe de sollicitation de l'éprouvette en flexion trois points (FTP).....</b>	<b>69</b>
<b>Fig. V.2 : Courbes d'évolution des contraintes en fonction de déformation des différents bétons polymères.....</b>	<b>70</b>
<b>Fig. V.3 : Superposition des évolutions de la contrainte en fonction de déformation des types du Béton polymère.....</b>	<b>71</b>
<b>Fig. V.4 : Superposition des évolutions de la contrainte en fonction de déformation des types du Béton polymère de résine et de polypropylène.....</b>	<b>72</b>
<b>Fig. V.5 : Superposition des évolutions de la contrainte en fonction de déformation des types du Béton polymère de résine et de polypropylène (24%RSI, 24%PP).....</b>	<b>73</b>
<b>Fig. V.6 : Effet de la nature de la matrice sur la contrainte du BPR, BPP.....</b>	<b>74</b>
<b>Fig. V.7 : Effet de taux de la matrice thermodurcissable sur la variation de module de Young.....</b>	<b>75</b>
<b>Fig. V.8 : Effet de taux de la matrice thermoplastique sur la variation de module de Young.....</b>	<b>75</b>
<b>Fig. V.9 : Effet de la nature de la matrice sur la variation du module de Young.....</b>	<b>76</b>
<b>Fig. V.10: Variation de la résistance à la compression des différents BP. BPR et BPP....</b>	<b>77</b>
<b>Fig. V.11 : Influence du taux de la matrice sur la résistance en compression.....</b>	<b>77</b>
<b>Fig. V.12 : Influence du taux de la matrice sur les propriétés physiques des BPR /BPP.....</b>	<b>78</b>
<b>Fig. V.13 : Taux de matière premier de béton polymère résine.....</b>	<b>79</b>
<b>Fig. V.14 : Taux de matière premier de béton polymère résine.....</b>	<b>79</b>
<b>Fig. V.15 : Faciès de rupture :a) BPR (16%RSI), b) BPR (20%RSI), c) BPR (24%RSI).....</b>	<b>80</b>
<b>Fig. V.16 : Faciès de rupture :a) BPP (24%PP), b) BPP (32%PP), c) BPP (40%PP). ....</b>	<b>81</b>

## Liste des symboles

<b>Mv</b>	Masse volumique.
<b>E</b>	Module d'élasticité.
<b>G</b>	Module de cisaillement.
<b>A</b>	Allongement à la rupture.
<b><math>\alpha</math></b>	Coefficient de dilatation thermique.
<b>Wp</b>	L'énergie potentielle du solide.
<b><math>\nu</math></b>	Coefficient de poisson.
<b><math>\gamma_s</math></b>	L'énergie surfacique de rupture.
<b>Ws</b>	L'énergie de création d'une surface.
<b><math>\sigma</math></b>	Contrainte axial.
<b>KI</b>	L'intensité de contrainte.
<b>Y</b>	Facteur de correction de la géométrie.
<b>a</b>	Longueur de fissure.
<b><math>\gamma_p</math></b>	L'énergie plastique.
<b><math>\Phi</math></b>	L'énergie de déformation.
<b>G</b>	Taux de restitution d'énergie.
<b>WF</b>	Travail externe effectué par la force.
<b>Gc</b>	Travail critique de rupture.
<b><math>\sigma_R</math></b>	Contrainte à la rupture.
<b>h</b>	Largeur de l'éprouvette.
<b>L</b>	Distance entre les appuis de flexion.
<b>P</b>	La charge maximale à la flexion.
<b><math>\sigma_f</math></b>	Contrainte à la flexion de trois points.
<b>Ef</b>	Module de flexion.
<b>Rc</b>	Résistance à la compression.
<b>KR</b>	Facteur d'intensité de contrainte à la rupture.
<b>I</b>	Moment d'inertie.
<b>f</b>	La flèche du flexion.
<b>S</b>	Section de l'éprouvette.
<b>F</b>	Charge maximal à la compression.
<b>V</b>	Volume.
<b>M</b>	La masse.
<b><math>\rho</math></b>	La masse volumique.
<b>W</b>	Poids du spécimen.
<b>D</b>	Poids du spécimen après conditionnement.
<b>A</b>	% absorption.

## *Liste des abréviations*

- CMO Composite à matrice organique.
- CMC Composite à matrice céramique.
- CMM Composite à matrice minérale.
- TD Matrice thermodurcissable.
- TP Matrice thermoplastique.
- PA Polyamide.
- PET Polytéréphalate éthylénique.
- POM Polyoxyméthylène.
- PC Polycarbonate.
- PPS Polysulfure de phénylène.
- PP Polypropylène.
- HM Fibre haute module.
- HR Fibre haute résistance.
- HP Composite haute performance.
- BP Le béton polymère.
- CO6 Cobalt.
- M-50 Catalyseur.
- RI Résine isophtalique.
- BPR Béton polymère de résine.
- BPP Béton polymère de polypropylène.
- FTP Essai de flexion trois points.

## *Introduction générale*

De nos jours, L'utilisation des matériaux innovants est un gage de compétitivité dans tous les domaines de l'industrie. Les matériaux composites connaissent un essor considérable dans des nombreux secteurs d'activités. Cet essor s'explique par la nécessité de répondre à la fois à l'allègement des pièces, à la résistance, à la corrosion à la tenue mécanique et à la résistance thermique. Bien que des travaux antérieurs aient pu mettre en évidence leurs avantages et leurs limites intrinsèques, des études sont toujours en continuelle augmentation.

Le béton polymère qui est un matériau composite dont le liant est constitué entièrement d'un polymère organique commence à prendre place dans le marché des matériaux de construction de grande diffusion. Désigné sous l'appellation de béton de résine synthétique, de béton de résine plastique ou de béton de polymère, il est ainsi constitué d'une charge minérale et d'un liant de polymère, parfois thermoplastique mais généralement thermodurcissable. Lorsque la charge est constituée de sable, le composite obtenu est appelé mortier de résine.

De façon générale, le béton polymère est obtenu en mélangeant à la charge, un polymère, un durcisseur (agent de réticulation) et un catalyseur. Différents produits peuvent aussi être ajoutés à la résine pour améliorer ses caractéristiques mécaniques et physiques, faciliter sa mise en œuvre ou simplement pour en diminuer le coût. Des agents de pontage à base de silane sont parfois utilisés pour augmenter la cohésion entre la matrice de polymère et la charge.

Comparativement au béton de ciment Portland, les bétons de résine possèdent une plus grande résistance mécanique, adhèrent bien aux autres matériaux, résistent mieux aux produits chimiques et aux agents corrosifs, absorbent moins d'eau et présentent une plus grande stabilité aux cycles gel - dégel. La littérature indique que, comme ils ont une plus grande résistance mécanique que le béton de ciment Portland, ils peuvent faire économiser jusqu'à 50% de matériaux concurrençant ainsi le béton conventionnel pour certaines applications spéciales. Ce type de béton est employé, coulé sur place ou en éléments préfabriqués, dans les travaux de construction, notamment d'édifices publics ou commerciaux, ainsi que pour la fabrication de carreaux de plancher, de tuyaux d'égout, d'escaliers et de panneaux de cloisonnement.

### **Objectif :**

Motivé par la propriété de recyclage des thermoplastiques, l'objectif de ce travail est de formuler des micros bétons polymères à base de silice en utilisant deux types de matrices, l'une thermodurcissable et l'autre thermoplastique. Nous étudions les caractéristiques mécaniques et physiques des bétons polymères dans les deux cas et à des

différentes factions matrice/silice. Les résultats obtenus seront analysés afin d'aboutir à la formulation optimum.

### **Structure du mémoire :**

Le présent mémoire sera organisé sous forme de cinq chapitres. Ils décrivent les matériaux et les méthodes utilisées dans cette étude, le choix des matériaux, une description détaillée de la préparation, les méthodes d'essai et les résultats obtenus. Ces derniers seront présentés et discutés dans le dernier chapitre. Enfin une conclusion générale qui peut être tirée de cette recherche.

L'organisation de notre mémoire est la suivant :

- ❖ Dans le premier chapitre de ce mémoire, nous apportons une connaissance des matériaux composites, puis nous présentons les différents constituants des composites ainsi que le procédés de fabrication de ces matériaux.
- ❖ Dans le deuxième chapitre, une étude bibliographique sur le béton polymère des points de vue caractéristiques, utilisation ainsi qu'une comparaison avec les bétons ordinaires.
- ❖ Dans le troisième chapitre, nous présentons quelques notions sur la théorie de la mécanique de rupture.
- ❖ Le quatrième chapitre, est une étude expérimentale présentant les différents tests sur les matériaux utilisés la formulation de béton polymère, et les essais mécaniques, physiques réalisée sur le béton.
- ❖ Le sixième chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus avec des discussions.

Enfin une conclusion générale et quelques perspectives pour des travaux futur.

### **Remarque :**

Les photos des machines d'essais ont été prises avec l'accord des responsables de l'usine de Maghreb Pipe M'sila.

Les schémas explicatifs et illustrations sont réalisés par l'étudiante.

Chapitre I :

# Généralités sur les matériaux composites

## Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

### Introduction :

Le terme « matériau composite » désigne un matériau solide et hétérogène, formé de plusieurs composants distincts, dont l'association confère à l'ensemble des propriétés qu'aucun des composants considéré ne possède séparément.

La réalisation d'un matériau composite nécessite donc l'association d'au moins deux composants : le renfort et la matrice, qui doivent être compatibles entre eux et se solidariser. Pour cela, un agent de liaison, appelé interface, est nécessaire (Fig. I.1). Des charges et des additifs peuvent être ajoutés au composite sous forme d'éléments fragmentaires, de poudres ou liquide, afin de modifier une propriété de la matière à laquelle on l'ajoute (par exemple la tenue aux chocs, la résistance aux UV, la résistance au feu...). [1]

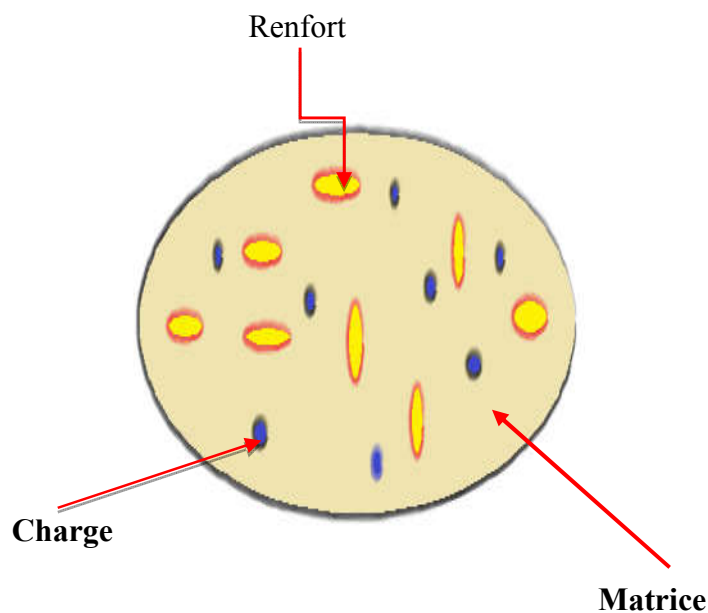


Fig. I.1: Représentation schématique d'un matériau composite.

### I.1. On distingue deux types de composites:

Les composites grandes diffusions et les composites hautes performances.

#### a). Matériaux composites à grande diffusion :

Les matériaux composites à grande diffusion offrent des avantages essentiels, qui sont : optimisation des coûts par diminution des prix de revient, sa composition de polyester avec des fibres de verre longues ou courtes (sous forme de mat ou tissu) et la simplicité du principe d'élaboration du matériau (moulage par contact, SMC et injection).

**b). Matériaux composite à hautes performances :**

Les matériaux composites à hautes performances sont utilisés dans le domaine d'aéronautique où le besoin d'une grande performance déduite des hautes valeurs ajoutées. Les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50%. Ces composites sont élaborés par les procédures suivantes : - drapage autoclave, enroulement filamentaire, RTM. - beaucoup de procédés encore manuels. - CMM, CMC. [4]

**I.2. Les caractéristiques générales d'un composite :**

Un matériau composite consiste dans le cas général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase discontinue est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue. La phase continue est appelée " la matrice ", la phase discontinue est appelée "le renfort " (Fig. I.1). [5]

Les propriétés des matériaux composites résultent en:

- les propriétés des matériaux constituants.
- leurs distributions géométriques.
- leurs interactions.

Ainsi, pour accéder à la description d'un matériau composite, il sera nécessaire de spécifier:

- la nature des constituants et leurs propriétés.
- la géométrie du renfort, et sa distribution.
- la nature de l'interface: matrice-renfort.

La géométrie du renfort sera caractérisée par : sa forme, sa taille, sa concentration et sa disposition (son orientation).

**I.3. Les constituants des matériaux composites :**

Les matériaux composites sont constitués principalement : d'une matrice à laquelle sont ajoutés, dans certains composites des charges, d'un renfort.

**I.3.1. La matrice:**

Dans un matériau composite, le terme matrice désigne la matière solide qui entoure les renforts pour former une masse compacte. Le premier rôle de la matrice est de maintenir les renforts dans une forme compacte et de donner la forme voulue au produit final. Elle sert également à protéger les fibres contre l'abrasion et un environnement agressif, contrôler le fini de surface et assurer le transfert de charges entre les fibres. Le solide formant la matrice peut être d'origine métallique, céramique ou polymère. [1]

A partir de la nature de la matrice les matériaux composites sont classés en trois catégories : [1]

- ✓ Les composites à matrice polymère ou organique (CMO) ;
- ✓ Les composites à matrice métallique ;
- ✓ Les composites à matrice céramique.

La classification des types de matrices couramment rencontrées est donnée sur la (Fig. I.3).

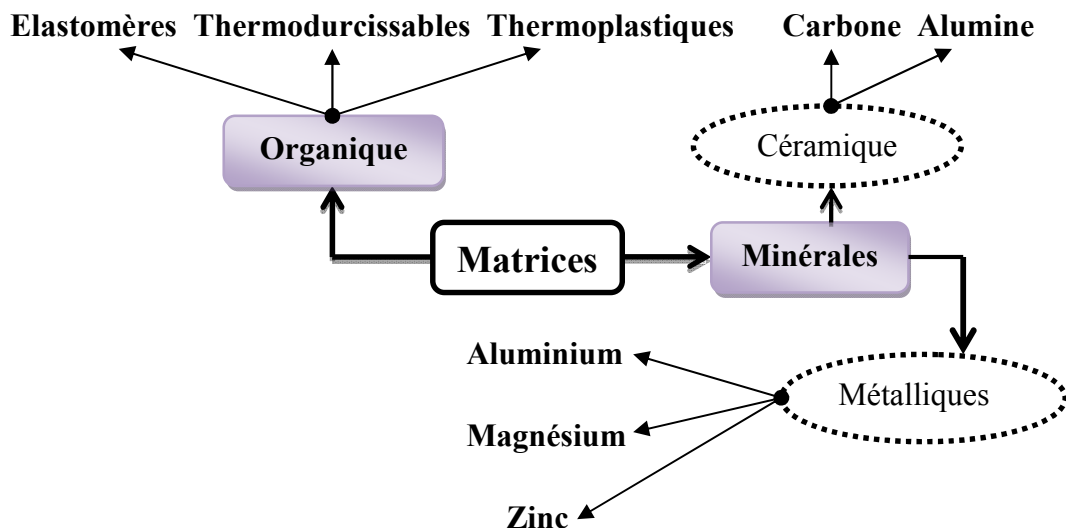


Fig. I.2: Classification de différentes familles de matrice.

### a. La matrice organique

Un matériau composite à matrice organique est l'association d'au moins deux matériaux non miscibles :

- Les renforts, en phase discontinue souvent filamenteuse, en absorbant la majorité des contraintes mécaniques, assurent la résistance et la rigidité ;
- Les matrices, polymères en phase continue qui servent de liant, jouent un rôle physico-chimique et thermique (protection des renforts par l'intermédiaire de l'interface) et commandent les conditions de mise en œuvre.

Généralement deux grandes catégories de polymères : les thermoplastiques (TP) et les thermodurcissables (TD). La plupart des composites à matrice organique sont fabriqués à partir de résines thermodurcissables sous toutes leurs formes, mais la forme liquide a été souvent choisie car elle favorise l'imprégnation des fibres à la température ambiante. On peut probablement expliquer de cette façon le choix initial de matières thermodurcissables plutôt que celui des matières thermoplastiques. Celles-ci possèdent pourtant les caractéristiques mécaniques nécessaires pour constituer des matrices intéressantes pour les composites, comme le montrent les études et les développements industriels actuels.

Aussi, il est important de bien situer les différences fondamentales de ces deux types de matrices afin de bien appréhender le comportement mécanique spécifique de chaque type de composite (Tableau. I.1). La distinction principale entre TP et TD réside dans la façon dont le polymère se construit à partir du monomère. L'assemblage ou l'enchaînement des monomères détermine pratiquement toutes les propriétés mécaniques et physiques du plastique résultant ainsi que les procédés de mise en forme (combinaison chauffage/pression) en produit industriel. [1]

Les deux types de résines qui sont, actuellement, utilisées présentent des propriétés différents. [3]

Matrices	Thermoplastiques TP	Thermodurcissables
Etat de base	Solide prêt à l'emploi	Liquide visqueux à polymériser
Stockage	Illimité	Réduit
Mouillabilité renforts	Difficile	Aisée
Moulage	Chauffage + refroidissement	Chauffage continu
Cycle	Court	Long
Tenue au choc	Assez bonne	Limitée
Tenue thermique	Réduite	Bonne
Chutes et déchets	Recyclables	Perdus ou recyclés en charges
Conditions de travail	Propreté	Emanation pour

**Tableau. I.1: Principales différences entre les thermodurcissables et les thermoplastiques. [4]**

La structure des TP se présente sous forme de chaînes linéaires, il faut les chauffer pour les mettre en forme (les chaînes se plient alors), et les refroidir pour les fixer (les chaînes se bloquent). Cette opération est réversible. [2]

La structure des TD a la forme d'un réseau tridimensionnel qui se pontage (double liaison de polymérisation) pour durcir en forme de façon définitive, lors d'un échauffement. La transformation est donc irréversible. [2]

#### ➤ La résine thermodurcissable (TD)

Présentent une structure tridimensionnelle. La polymérisation induit un pontage des macromolécules et cette structure se solidifie de façon définitive lors du chauffage selon la forme souhaitée. Pour le matériau obtenu après mise en œuvre, les liaisons entre macromolécules sont des liaisons chimiques fortes : cette transformation est irréversible.

Ces caractéristiques sont présentées dans le (Tableau. I.2).

Matrices Thermodurcissables	Masse Volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	Module D'élasticité (MPa)	Module De Cisaillement (MPa)	Coefficient De Poisson	Contrainte De rupture (MPa)	Allongement à rupture %	Coefficient de Dilatation Thermique°C <sup>-1</sup>
	Mv	E	G	K	C <sub>r</sub>	A	α
Epoxyde	1200	4500	1600	0.4	130	2	11*10 <sup>-5</sup>
Phénolique	1300	3000	1100	0.4	70	2.5	1*10 <sup>-5</sup>
Polyester	1200	4000	1400	0.4	80	2.5	8*10 <sup>-5</sup>
Polycarbonate	1200	2400		0.35	60		6*10 <sup>-5</sup>
Vinylester	1150	3300			75	4	5*10 <sup>-5</sup>
Silicone	1100	2200		0.5	35		
Uréthane	1100	700 à 7000			30	100	
Polyamide	1400	4000 à 19000	1100	0.35	70	1	8*10 <sup>-5</sup>

Tableau. I.2 : Caractéristiques principales des matrices thermodurcissables (TD). [2]

Cette structure est caractéristique des polymères thermodurcissables :

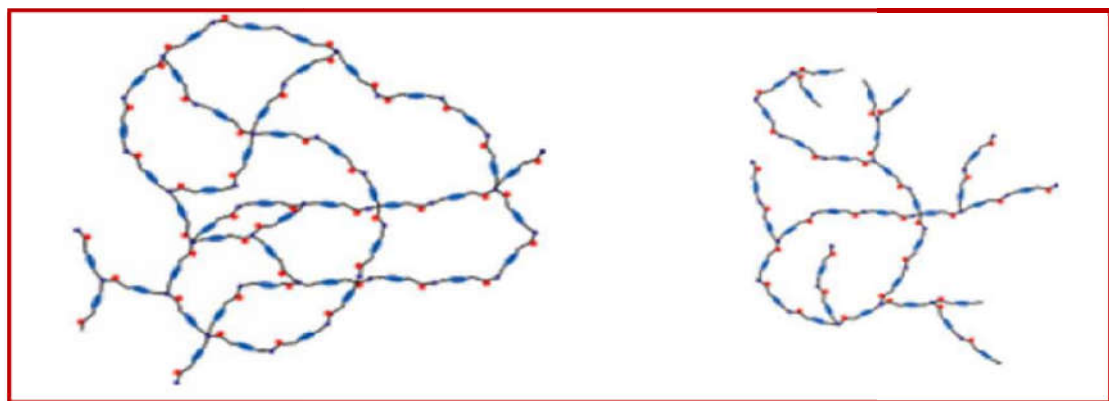


Fig. I.3: Polymères à structure : (a) réticulée – (b) ramifiée. [1]

Les résines thermodurcissables principalement utilisées actuellement sont : [2]

- **Polyesters insaturés**

C'est la résine la plus utilisée dans l'application des composites de grande distribution. Cette résine contenant un monomère est réticulée à température ambiante par addition d'un catalyseur de type peroxyde organique et d'un accélérateur. Elle passe successivement de l'état liquide visqueux initial à l'état de gel, puis à l'état de solide infusible.

- **Vinylester**

On peut la considérer comme une variante des polyesters produite à partir d'acides acryliques. Elles possèdent une bonne résistance à la fatigue et un excellent comportement à la corrosion, mais demeure combustible.

- **Phénoliques**

Elles sont issues de la polycondensation du phénol et du formol et se caractérisent par une bonne tenue au feu, sans fumée. Elles restent fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à colorer et à mettre en œuvre.

- **Epoxydes**

Elles résultent de la polyaddition de l'épichlorhydrine sur un polyalcool et constitue la résine type des composites hautes performances HP. On distingue deux classes de résines en fonction :

- du durcissement à chaud ou à froid.
- de la tenue en température (120-130 °C, ou 180-200 °C).

- **Polyuréthanes et polyurées**

Dans la fabrication de pièces composites, on utilise ce type surtout des formules élastomériques dont la faible viscosité permet un bon remplissage du moule.

- **Polyimides**

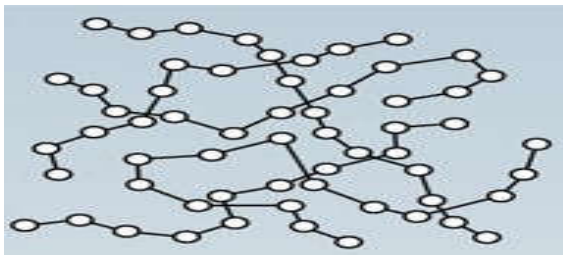
Ces résines sont utilisées dans les composites HP, lorsque l'on cherche une bonne stabilité sous hautes températures (> 250 °C). Elles restent toutefois très onéreuses et difficiles à mettre en œuvre.

- **Bismaléimides**

Matrices très peu utilisées en Europe. Elles offrent une bonne tenue à la fois au choc et en température, mais restent difficiles à mettre en œuvre.

➤ **Les résines thermoplastiques (TP)**

Présentent une structure linéaire (ou légèrement ramifiée) enchevêtrée qui ne résulte pas d'une polymérisation. Lors de la mise en forme par chauffage, les macromolécules se replient puis se bloquent au cours d'un refroidissement d'où une solidification. Pour le matériau obtenu après mise en œuvre, les liaisons entre macromolécules sont des liaisons physiques faibles de type Van Der Waals : cette transformation est réversible. [1]



**Fig. I.4: Structure de polymère (thermoplastique).**

Les polymères utilisés sont essentiellement des thermoplastiques techniques qui présentent à l'état vierge de bonnes caractéristiques mécaniques (Tableau. I.3). Un renforcement à l'aide de fibres courtes leur confère une tenue thermique et mécanique améliorée et une bonne stabilité dimensionnelle, sont des matrices réversibles. [2]

Les principales matrices TP utilisées (possédant tous une tenue en température supérieure à 100 °C) sont les suivantes : [2]

- **Polyamide (PA)** : tenue au choc, bonne résistance à la fatigue et aux hydrocarbures.
- **Polytéréphtalate éthylénique et butylénique (PET, PBT)** : bonne rigidité, bonne ténacité.
- **Polycarbonate (PC)** : tenue au choc.
- **Polysulfure de phénylène (PPS)** : résistance à l'hydrolyse.
- **Polyoxyméthylène (POM)** : bonne tenue à la fatigue.
- **Polysulfures (PSU et PPS)** : bonne stabilité chimique et à l'hydrolyse, peu de fluage, tenue au chaud.
- **Polypropylène (PP)** : peu onéreux et assez stable en température, mais combustible, utilisé pour les polymères grands diffusion, la tenue thermomécanique se situe entre 60 et 90 °C sans renfort.

De plus en plus, on utilise des thermoplastiques thermostables (tenue en température > 200 °C et bonnes propriétés mécaniques), en particulier les suivants : [2]

- Polyamide-imide (PAI).
- Polyéther-imide (PEI).

- Polyéther-sulfone (PES).
- Polyéther-éther-cétone (PEEK).

matrices thermoplastiques.	Masse volumique (kg /m <sup>3</sup> )	Module D'élasticité (MPA)	Coefficient De poisson	Contrainte à la Rupture (MPA)	Allongement A rupture%	Coefficient de Dilatation Thermique°C <sup>-1</sup>
	Mv	E	K	C <sub>r</sub>	A	α
PP	900	1200	0.4	30	20 à 400	9×10 <sup>-5</sup>
PPS	1300	4000		65	100	5*10 <sup>-5</sup>
PA	1100	2000	0.35	70	200	8*10 <sup>-5</sup>
PES	1350	3000		85	60	6*10 <sup>-5</sup>
PEI	1150	3300		105	60	6*10 <sup>-5</sup>
PEEK	1300	4000		90	50	5*10 <sup>-5</sup>

Tableau. I.3 : Caractéristiques principales des matrices thermoplastiques (TP). [2]

➤ **Résine thermostable :**

Polymère présentant des caractéristiques mécaniques stables sous des pressions et des températures élevées appliquées de façon continue. Cette propriété est mesurée en déterminant la température que peut supporter la résine durant 2000 Heures sans perdre la moitié de ses caractéristiques mécaniques. [7]

**b. Les matrices naturelles :**

Ce sont des matériaux synthétisés par les êtres vivants, animaux et micro-organismes. La famille la plus importante est celle des polysaccharides comme l'amidon, la cellulose la lignine.

➤ **Matrices métalliques**

L'utilisation des matrices métalliques est encore actuellement en grande partie à un stade préindustriel. Plusieurs matériaux composites tels que ; l'Aluminium et ses alliages, Nickel,

Titane, présentent une bonne conductibilité électrique et thermique, une bonne tenue à des températures élevées et de plus ils possèdent de bonnes caractéristiques mécaniques transverses. Leur fabrication conduit à des coûts très élevés. [7]

#### ➤ Matrices céramiques

Les matériaux utilisés sont les carbures de silicium et de carbone. Ils sont utilisés pour la fabrication des pièces qui subissent des contraintes d'origine thermique et leur coût est très élevé [7].

- Les résines TD sont les plus employées pour la mise en œuvre des matériaux composites. Cependant, l'amélioration des caractéristiques des résines TP à haute température (résines TP hautes performances) tend à généraliser leur utilisation dans les structures composites. [1]

#### I.4. La matrice a pour rôle de :

- ✓ Lier les fibres renforts,
- ✓ Répartir les contraintes encaissées,
- ✓ Apporter la tenue chimique de la structure
- ✓ Donner la forme désirée au produit.

Dans les matériaux composites, le rôle de la matrice est primordial, quantitativement.

#### I.5. Le renfort :

Les composites sont souvent désignés selon le type de renfort. Ainsi, il existe des composites à particules, des composites sandwichs, des composites à phases dispersées ou encore des composites fibreux (Fig. 1.5). [1]

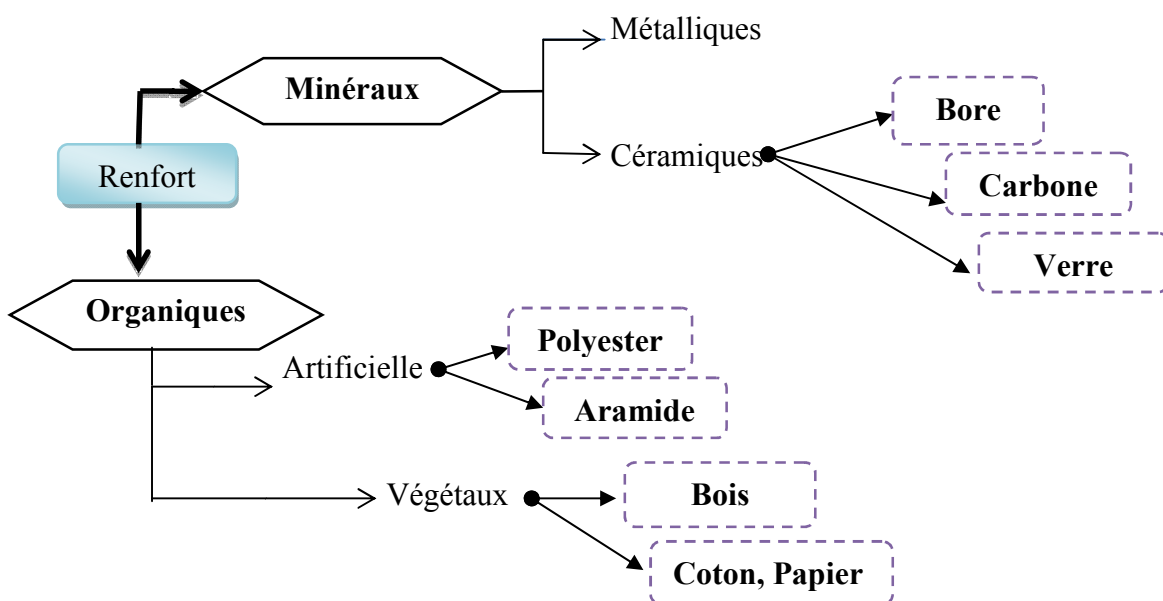


Fig. I.5: Différents types de renfort de bas.

### I.5.1. Les types des renforts :

**Les fibres :** Les fibres utilisées se présentent soit sous forme continues (fibres longues), soit sous forme discontinues (fibres courtes). [9]

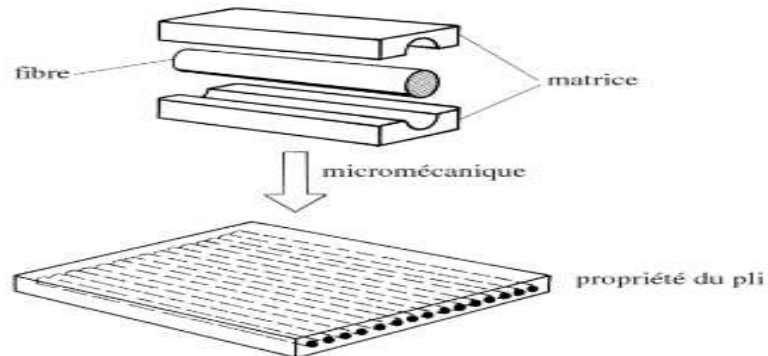


Fig. I.6 : Le rôle de micromécanique dans le composites a fibre continues. [9]

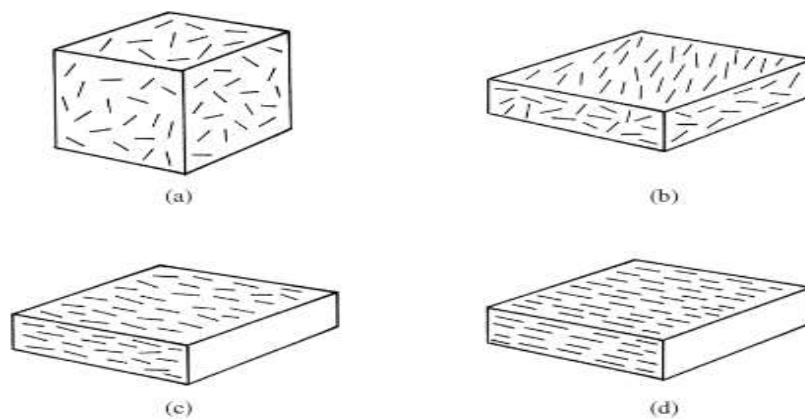


Fig. I.7. Différents types de composites a fibres courtes : (a) orientation 3D ; (b) orientation 2D (aléatoire dans le plant) ; (c) orientation 2D (faible alignement) ; (d) orientation 1D. [9]

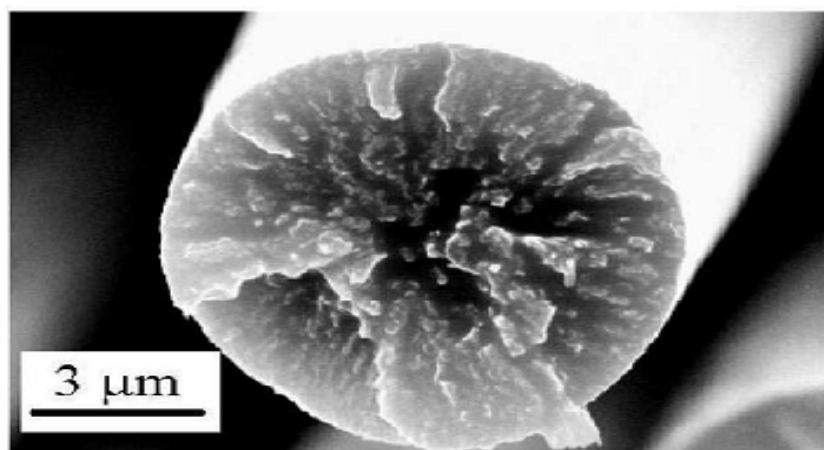


Fig. I.8: Fibres vues au microscope électronique. [4]

### I.5.2. Les différents types de fibre :

#### a). Fibre de verre

Elles constituent le renfort essentiel des composites de grande diffusion. Elle est obtenue à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore). On distingue trois types de fibres : [2]

- **E** : pour les composites de grande diffusion et les applications courantes ;
- **R** : pour les composites hautes performances ;
- **D** : pour la fabrication de circuits imprimés (propriétés diélectriques).

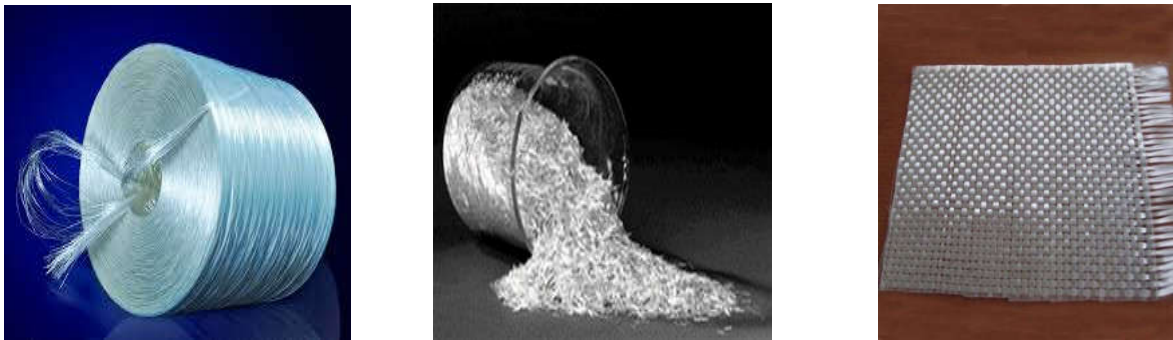


Fig. I.9: Fibre de verre.

#### b). Fibre de carbone

C'est la fibre la plus utilisée dans les applications hautes performances. Elle est obtenue par carbonisation de la fibre de PAN (Polyacrylonitrile). Selon la température de combustion, on distingue deux types de fibres : [2]

- fibres haute résistance (HR) : pour une combustion de 1000 à 1500 °C ;
- fibres haut module (HM) : pour une température de combustion de 1800 à 2000 °C.



Fig. I.10 : Fibres de carbone.

#### c). Fibre d'aramide

Souvent appelée KEVLAR®, la fibre d'aramide est issue de la chimie des polyamides aromatiques. Il est possible de trouver deux types de fibres d'aramide de rigidités différentes : [4]

- les fibres bas module : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles ;
- les fibres haut module : employées dans le renforcement pour les composites haute performances.



Fig. I.11: Fibres d'aramide.

#### d).Fibre de bore

Fibres de haut module et insensibles à l'oxydation à hautes températures, elles sont obtenues par dépôt en phase gazeuse sur un substrat en tungstène. [4]

#### e).Fibre de silice (ou de quartz)

Elles sont produites comme le verre, par fusion, et sont essentiellement utilisées pour leur haute tenue chimique et thermique dans les tuyères pour moteur de fusée. [4]

#### f).Fibres de polyéthylène de haut module

Elles présentent une très bonne résistance à la traction mais une mauvaise mouillabilité. Pour des structures peu sollicités, on peut encore utiliser des fibres synthétiques courantes de polyamide ou polyester. [4]



Fig. I.12: Fibres de polyéthylènes.

### g).Fibres de naturelles

Elles pourront constituer une alternative intéressante aux fibres de verre en raison de leur plus grande facilité de recyclage lorsque leurs propriétés physiques seront mieux appréhendées. Actuellement, elles présentent plusieurs verrous techniques majeurs pour une utilisation massive dans les matériaux composites.



Fig. I.13: Fibres de naturelles.

### I.5.3.Architecture des fibres :

Les structures composites sont anisotropes. La plupart des renforts travaillent bien en traction, mais offrent des performances médiocres en compression et en cisaillement. Il est donc impératif de jouer sur la texture et la géométrie des renforts pour créer une architecture adaptée. Il existe différentes géométries et textures de renforts. [4]

**a).Les unidirectionnels (1D)** : Dans une nappe 1D, les fibres sont assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère.

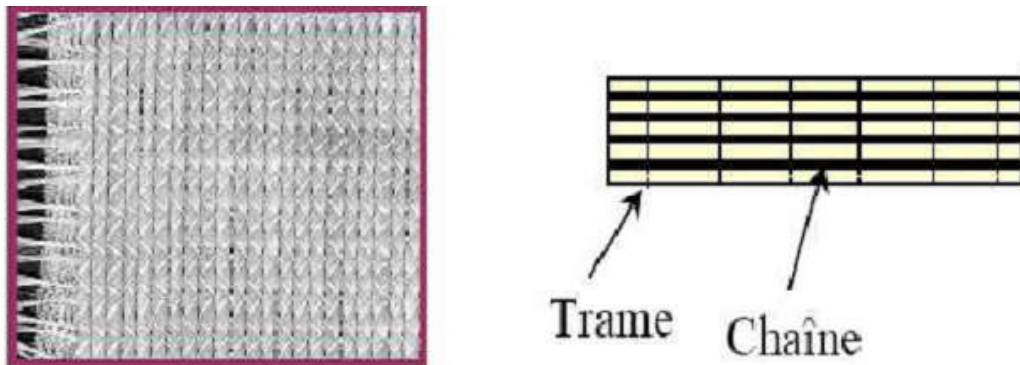


Fig. I.14: Fibres unidirectionnels.

**b).Toile ou taffetas** : Chaque fil de chaîne passe dessus puis dessous chaque fil de trame, et réciproquement. Le tissu présente une bonne planéité et une relative rigidité, mais est peu déformable pour la mise en œuvre. Les nombreux entrecroisements successifs génèrent un embuvage important et réduisent les propriétés mécaniques.

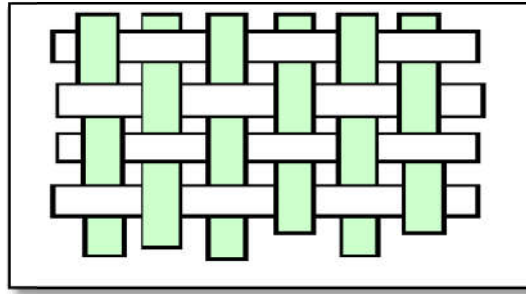


Fig.I.15 : Toile.

*c).Serge* : Chaque fil de chaîne flotte au-dessus de plusieurs (n) fils de trame et chaque fil de trame flotte au-dessus de (m) fils de chaîne. Armure de plus grande souplesse que le taffetas ayant une bonne densité de fils. Ci-dessous, un sergé 2/2.

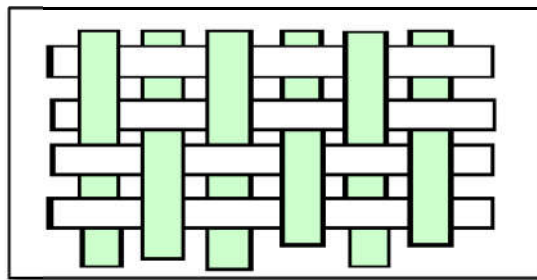


Fig. I.16: Serge.

*d).Satin* : Chaque fil de chaîne flotte au-dessus de plusieurs (n-1) fils de trame et réciproquement. Ces tissus ont des aspects différents de chaque côté. Ces tissus sont assez souples et adaptés à la mise en forme de pièces à surfaces complexes. Ce type de tissus présente une forte masse spécifique.

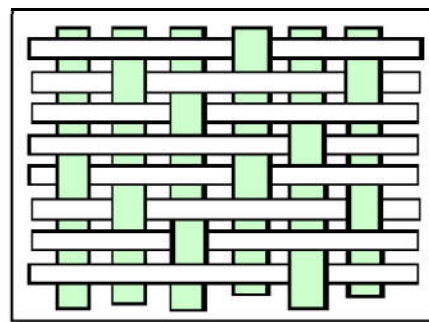


Fig. I.17 : Satin.

### I.6.Relation matrice – renfort :

Les performances d'un composite sont conditionnées par les propriétés intrinsèques des matériaux constitutifs et dépendent également très étroitement de l'adhésion, donc des interactions échangées entre le renfort et la matrice. [8]

Les paramètres responsables de l'adhésion sont nombreux et ont des origines très différentes, ils se répartissent en trois classes : [8]

- ceux concernant le renfort (nature et composition du renfort, influence du taux et de la taille du renfort),
- ceux concernant la matrice,
- et enfin ceux relatifs à l'interface (épaisseur, forces inter faciales renfort – matrice, mouillabilité du renfort par la matrice, influence des impuretés).

La diversité des paramètres pousse à ne pas définir un seul modèle d'adhésion mais plusieurs, correspondant chacun à un cas particulier. Schultz et Simon (1983) ont recensé les différents modèles d'adhésion existants. Ils ont distingué deux types de modèles : - l'adhésion mécanique, qui consiste en un phénomène d'ancrage, d'accrochage mécanique de la matrice dans les pores et aspérités du renfort. Bikerman (1968) a développé des relations quantitatives montrant que l'adhésion d'un composite était directement proportionnelle à la rugosité du renfort. - l'adhésion spécifique qui permet de décrire différents types d'adhésion ; on peut distinguer différents modèles : [8]

- le modèle électrostatique ;
- le modèle de la diffusion inter faciale ;
- le modèle d'adsorption ;
- le modèle de liaison chimique ;
- le modèle de Bikerman.

## I.7.Les Charges et les additifs :

### I.7.1.Les charges :

On désigne sous le nom général de charge toute substance inerte, minérale ou végétale qui, ajoutée à un polymère de base, permet de modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques.

Il s'agit de matières organiques, minérales, métalliques ou synthétiques permettant de modifier de manière sensible les propriétés du matériau composite. [2]

- **Les charges organiques** : fibres et poudres de cellulose, farine de bois, poudre de noyaux de fruits ;
- **Les charges minérales** : carbonates de calcium et/ou de magnésium, silices, sulfates ;
- **Les charges métalliques** : poudres ou paillettes de nickel, cuivre ...
- **Les charges synthétiques** : microbilles de verre, silices, fibres de nylon, ryselane .

Les charges jouent des rôles très divers :

- abaissement du coût ;
- maîtrise de la rhéologie ;
- tenue au feu.

### I.7.2. Les additifs :

Il s'agit de la substance ajoutée à la résine pour modifier ou améliorer le comportement rhéologique ou les propriétés du produit fini : [5]

- accélérateurs et catalyseurs de polymérisation ;
- diluants ;
- plastifiants ou flexibilisateurs ;
- tensioactifs ;
- pigments et colorants ;
- agents nucléants ;
- agents anti-retraits ;
- stabilisants ;

antioxydants, anti UV, anti-ozones, antistatiques.

### I.8. Structure du composite

Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types : [4]

- ✓ Les monocouches
- ✓ Les stratifiées
- ✓ Les sandwichs

#### I.8.1. Les monocouches

Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres longues (unidirectionnelles, réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibres courtes. [4]

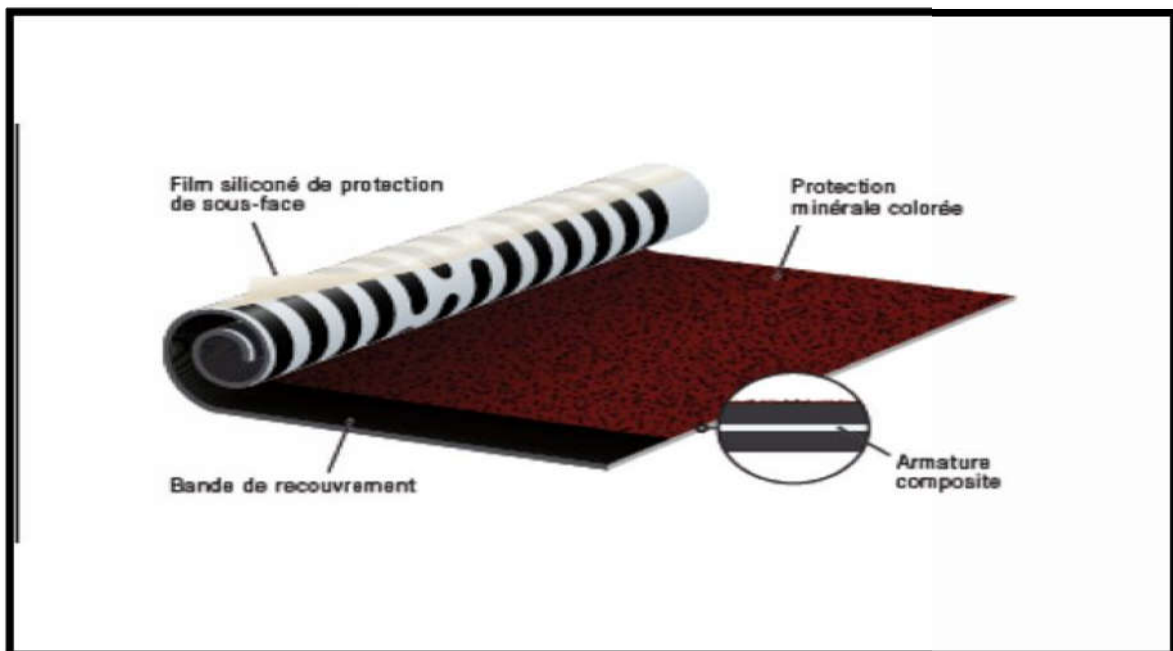


Fig. I.18: Composite monocouche. [4]

### I.8.2.structures sandwichs

Rigidité, résistance mécanique élevée et légèreté

Ex. : toit, plancher, mur, queue d'avion. [6]

- **Le noyau** : matériaux solide à faible densité, Matériaux à haute densité augmentés en forme cellulaire, Matériaux à haute densité augmentés sous la forme ondulée. [17]
- **La peau** : Une large variété de matériaux est utilisée comme peau, par exemple : les feuilles de métaux comme l'aluminium, le titane,...etc. [17]



Fig. I.19: Composite sandwichs. [6]

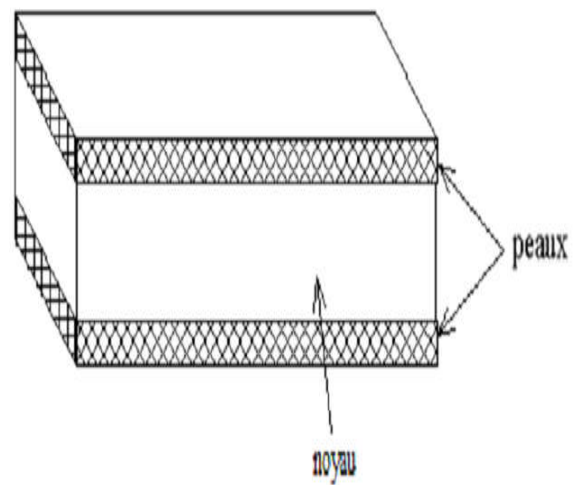


Fig. I.20: Composite sandwichs. [4]

### I.8.3.Les stratifiées

Un stratifié est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacun une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié (Fig. I.21). Le choix de l'empilement et plus particulièrement des orientations permettra d'avoir des propriétés mécaniques spécifiques. [4]

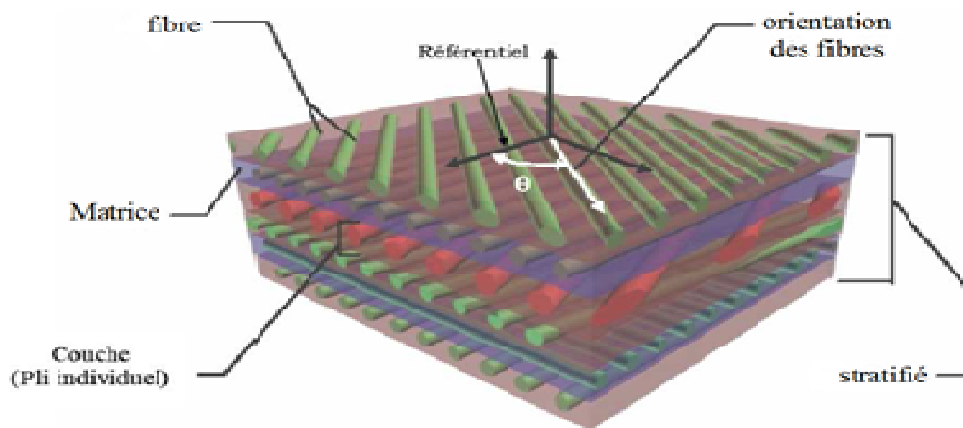


Fig. I.21: Composite stratifié. [4]

### I.9. Procédé de fabrication des composites [4]

Trois opérations sont indispensables :

1. Imprégnation du renfort par le système résineux.
2. Mise en forme à la géométrie de la pièce.
3. Durcissement du système :

- soit par polycondensation et réticulation pour les matrices thermodurcissables,
- soit par simple refroidissement pour les matières thermoplastiques.

Il existe différentes techniques mais la plus utilisée est par moulage.

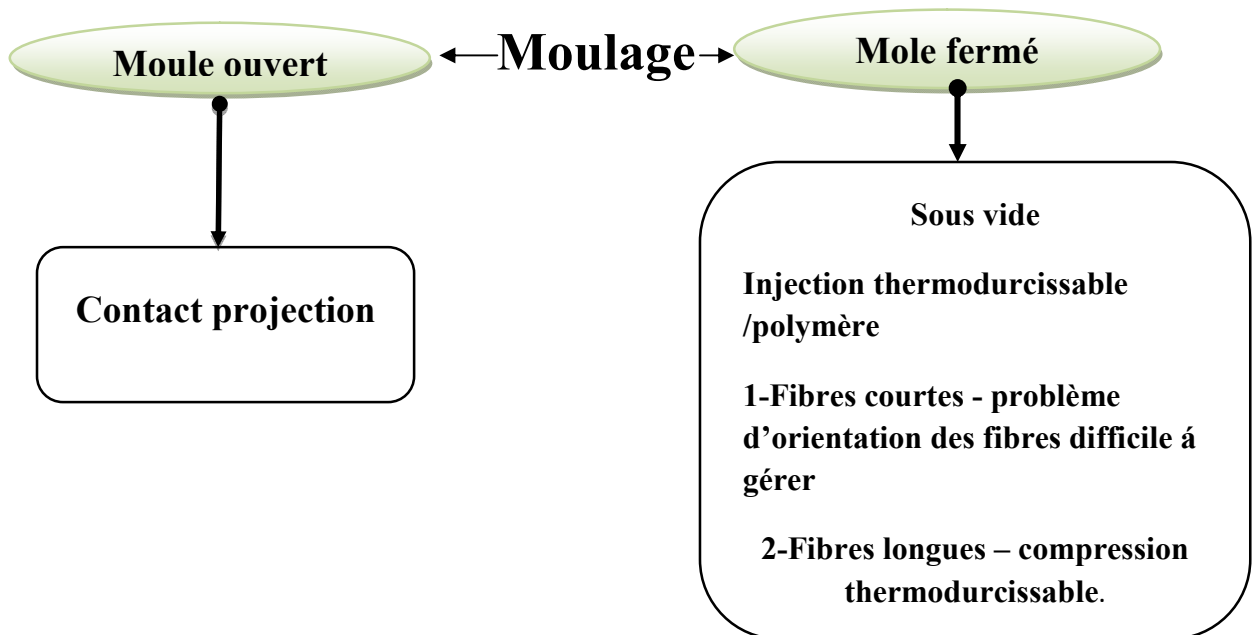


Fig. I.22: Technique de moulage.

Les procédés les plus importants sont : [4]

**I.9.1. Moulage au contact** : consiste à disposition successivement sur un moule :

- Un agent de démoulage ;
- Un gel coat ;
- Une couche de résines thermodurcissable liquide.

et à réaliser l'imprégnation du renfort par une opération manuelle à l'aide d'un rouleau

**I.9.2. Moulage par projection simultanée** :

Est une évolution de procédé de moulage au contact et est particulièrement adaptée aux pièces de moyennes et grandes dimensions.

**I.9.3. Injection thermodurcissable BMC** :

(Bulk Molding Compound ou pré-imprégné en vrac). Les renforts sont mis en place entre le moule et le contre moule. La résine est injectée. La pression de moulage est faible.

#### I.9.4. Compression thermodurcissable :

Il s'agit de moulage par compression et les moules sont très proches, par leur conception, de ceux utilisés lors de la mise en œuvre d'autres matières thermodurcissables.

#### I.9.5. Pultrusion:

Dans ce cas, les renforts passent dans un bain de résine catalysé où sont imprégnés. Ils traversent ensuite une filière chauffée dans laquelle ont lieu simultanément mise en forme du profilé et polymérisation de la résine. Ce procédé est applicable aux résines thermoplastiques et thermodurcissables.

#### I.9.6. Enroulement filamentaire (ou bobinage):

Le renfort imprégné de résine catalysée est enroulé avec une légère tension, sur un mandrin cylindrique ou de révolution en rotation. Ce type de moulage est bien adapté aux surfaces cylindriques et sphériques, et permet une conception avancée des pièces.

Le cycle de vie d'un matériau composite est présenté sur la (Fig. I.23):

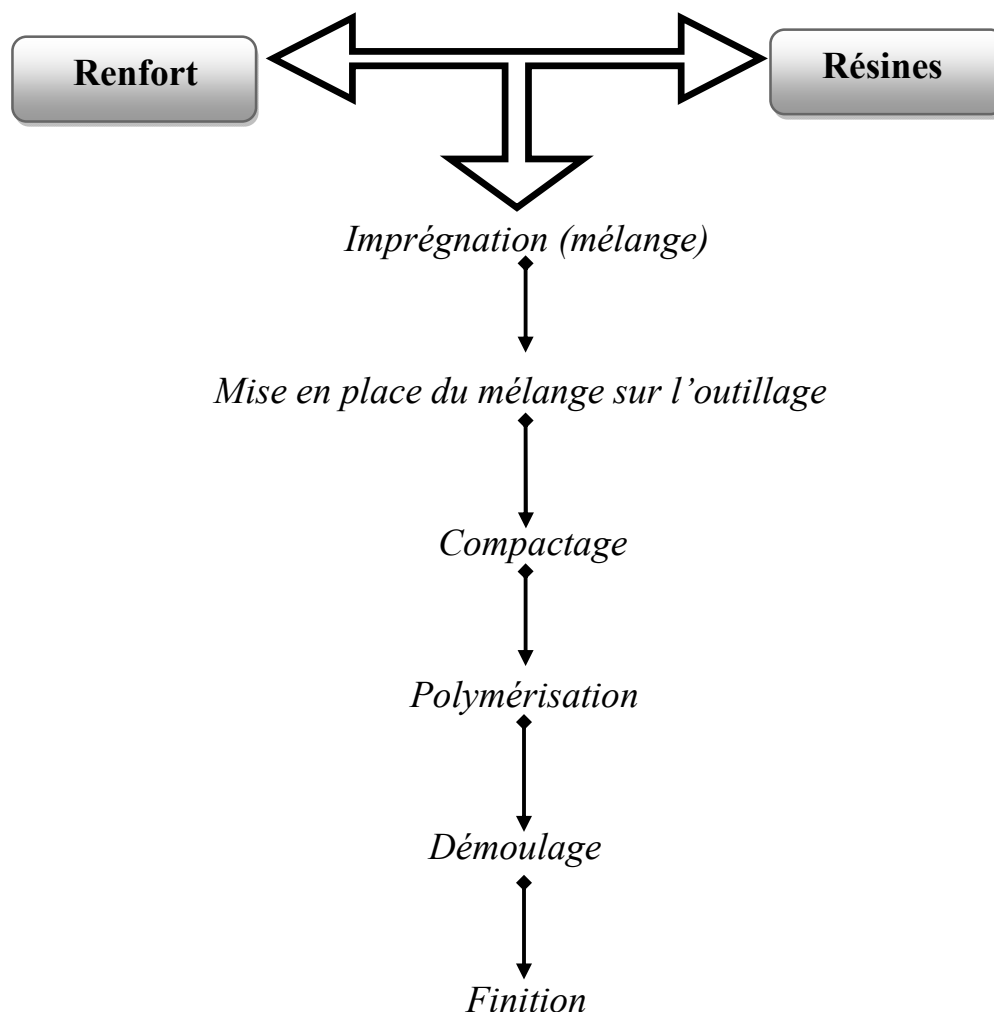


Fig. I.23: Cycle de vie d'un matériau composite.

**I.10. Avantages et inconvénients des composites :****a) Avantages : [4]**

- Les composites sont préférés à d'autres matériaux parce qu'ils offrent des atouts liés à Leur légèreté ;
- Leur résistance à la corrosion et aussi à la fatigue ;
- Leur insensibilité aux produits comme les graisses, les liquides hydrauliques, les peintures et les solvants ;
- Leur possibilité de prendre plusieurs formes, d'intégrer des accessoires et permettre la réduction de bruit.

**b) Inconvénients : [5]**

- Vieillesse sous l'action de l'eau et de la température ;
- Attention aux décapants de peinture qui attaquent les résines époxydes ;
- Tenue à l'impact moyenne par rapport aux métalliques ;
- Meilleure tenue au feu (classement M) que les alliages légers mais émission de fumées (classement F) parfois toxiques pour certaines matrices ;
- Coût parfois prohibitifs (temps et coût études et mise en œuvre), le gain en coût est surtout valable pour des grandes séries.

**Conclusion :**

L'objectif des producteurs des matériaux composites est de concurrencer et de surpasser les métaux qui, de leur côté, ne cessent d'optimiser leurs propres caractéristiques. La diversité des matériaux composites et leur souplesse, qui permet de fabriquer ou de composer des caractéristiques à la carte, rendent cet objectif légitime. Pour atteindre ces objectifs, ce secteur doit se développer par l'innovation.

**Chapitre II :**  
**Généralités sur les bétons polymères**

## Chapitre II : Généralités sur les bétons polymères

### Introduction:

Le béton polymère (BP) est un matériau fabriqué en remplaçant totalement ou partiellement le ciment par un polymère. La recherche et le développement des bétons et mortiers polymères ont connu un grand essor dans différents pays occidentaux depuis les années 1980, Comme le remplacement du ciment Portland par un polymère entraîne une augmentation sensible du coût du béton, il ne faudrait le faire que si l'on recherche des caractéristiques supérieures, si le coût de la main d'œuvre est moins élevé ou si les besoins en énergie lors de la fabrication et de la mise en œuvre sont moindres. Actuellement, le BP est utilisé très efficacement de par sa résistance élevée et sa légèreté, en éléments préfabriqués dans le bâtiment, pour les tabliers de pont, pour les conteneurs de déchets dangereux, pour bases de machines industrielles, pour la fabrication des carreaux de planchers en marbre synthétique et les panneaux d'escaliers, des plaques et panneaux de parements de diverses structures, d'appuis de fenêtre. [11]

Pour améliorer les propriétés physiques et mécaniques et permettre une bonne durabilité des bétons de résine renforcés ou non tout en satisfaisant les exigences économiques qui se rapportent au coût du produit fini, plusieurs chercheurs se sont intéressés à l'optimisation de la formulation du BP par la diminution de la fraction massique de la résine et/ou par le remplacement ou l'ajout d'une partie du squelette granulaire par d'autres composantes, conférant aux bétons des qualités meilleures en abaissant le prix du matériau du produit fini. [10]

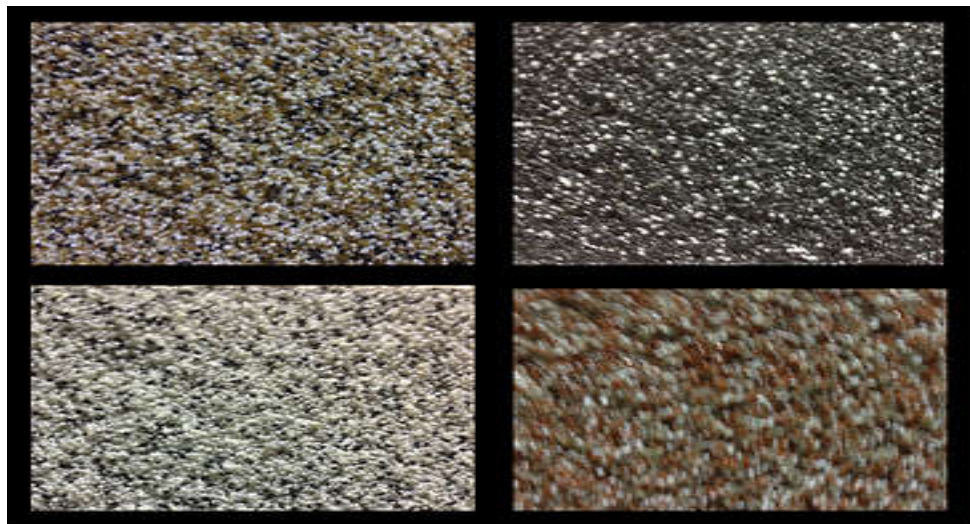


Fig. II.1: Béton polymère.

### II.1.Définition du béton polymère :

Le béton polymère est la dernière innovation dans le domaine des bétons décoratifs, en l'appliquant à une épaisseur de 20 mm sur tout type de surface, en particulier sur les clôtures, les socles, les escaliers, etc. est un matériau résolument moderne à base de sables de quartz liés à une résine polyester de haute qualité. [12]

Le béton polymère est constitué de charges minérales (granulat, sable,...) et d'un liant en polymère. On l'appelle aussi béton de résine synthétique ou béton de résine plastique. La légèreté de ce matériau facilite énormément sa mise en chantier et la présence de résine réduit l'absorption d'eau et garantit ainsi sa complète étanchéité. Ces matériaux résistent bien à l'abrasion et possèdent une grande stabilité aux cycles gel-dégel. En outre, comme ils ont une plus grande résistance mécanique que le béton de ciment portland, ils permettent d'économiser jusqu'à 50% de matériau. Ainsi, pour certaines applications spécifiques, ils concurrencent le béton conventionnel. La résistance aux agents chimiques et les caractéristiques mécaniques dépendent essentiellement de la nature du polymère utilisé et de la quantité de charge. [13]

## II.2. La composition principale d'un béton polymère :

Le béton de résine (polymère) est formé par un squelette granulaire (les agrégats) et un liant polymère (résine) parfois thermoplastique mais dans la plupart des cas thermodurcissable. [10]

### a. Le liant (la résine)

Les polymères sont des structures ayant une architecture le plus souvent linéaire ou tridimensionnelle constituée par l'enchaînement covalent de plusieurs unités chimiques de répétitions ou motifs unitaires appelées monomères possédant une ou plusieurs fonctions chimiques potentiellement réactives. Le nombre et la nature de ces fonctions permet de déterminer ce que l'on appelle la fonctionnalité du monomère, c'est-à-dire le nombre de liaisons qu'un monomère peut établir avec d'autres monomères lors de la réaction chimique appelée polymérisation.

La différence entre un polymère et une grosse molécule quelconque provient de cette répétition de molécules identiques ou similaires constituant une chaîne ou une portion de chaîne. Les polymères peuvent être fabriqués à partir d'un seul type de monomère (on parle alors d'homo polymère, comme par exemple le polystyrène), ou bien à partir de plusieurs types. [10]

### b. Les agrégats

Ils forment le squelette du béton et ils jouent donc un rôle très important dans la composition et la fabrication des bétons en général et le béton de résine en particulier. Ils influent les propriétés mécaniques et physiques du produit fini.

Les agrégats utilisés dans la plupart des cas sont des sables de quartz de granulométrie différente. Le gravier utilisé (0,2 à 16 mm) et en partie le sable (0,1 à 0,7 mm) sont considérés comme des agrégats à granulométrie supérieure tandis que la farine (0,1 à 0,3 mm) et les particules encore plus petites (< 0,1 mm) sont considérées comme des agrégats fins. Le bon choix des agrégats entraîne une augmentation du module d'élasticité, de la résistance en flexion et en compression ainsi que de la dureté. [7]

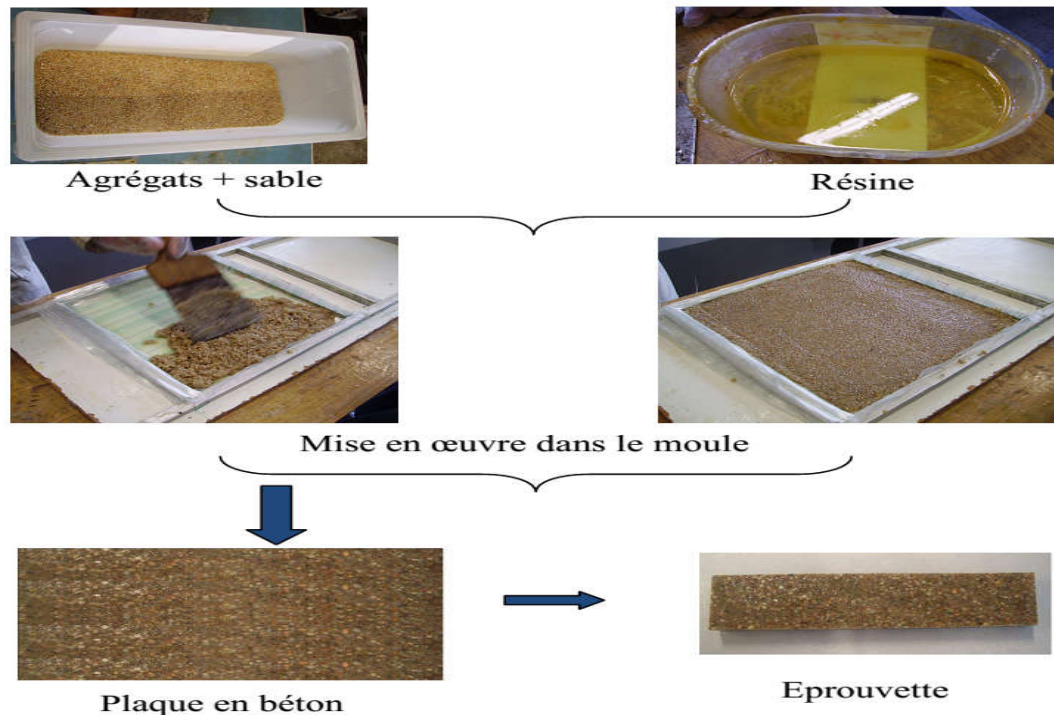


Fig. II.2: Mise en œuvre d'une plaque de béton polymère. [13]

### II.3 les caractéristiques principales des bétons polymères :

#### II.3.1. Caractéristiques mécaniques d'un béton polymère

Le béton polymère représenté les caractéristiques suivantes : [14]

- Valeur de compression d'un béton polymère: 80 – 90 MPA.
- Valeur de flexion par traction d'un béton polymère : 20 – 24 MPA.
- Module d'Young d'un béton polymère: 21 300 MPA.
- Abrasion : 1,15.

#### II.3.2. Caractéristiques chimiques d'un béton polymère [14]

- Résistance aux agressions des effluents sans aucun traitement (PH 1 à 14) .
- Résistance aux produits chimiques .
- Résistance aux hydrocarbure.

#### II.3.3. Caractéristiques physiques d'un béton polymère [14]

- Absorption d'eau : 0,2 %.
- Coefficient d'écoulement : 108 moyens.
- Résistance au gel : Inaltéré.
- Densité : 2,1-2,3.
- Microporosité d'un béton polymère : 25  $\mu\text{m}$ .
- Module d'élasticité 20 – 34 KN/mm<sup>2</sup>.
- Dureté Vickers, superficielle 320 N/mm.

### II.3.4. Caractéristiques hydrauliques d'un béton polymère [14]

- Excellent coefficient d'écoulement (offrant un matériau auto curant et augmentant le débit de l'ouvrage).
- Totale étanchéité dans la masse grâce à la très faible porosité de surface du béton polymère.
- Excellente tenue à l'abrasion (coefficient d'abrasion permettant de conserver les qualités hydrauliques des ouvrages durant des décennies).

### II.4. Propriétés de béton polymère :

Les propriétés viscoélastiques du liant polymère sont responsables du taux élevé de fluage du béton de résine, ce qui restreint quelque fois son utilisation dans la construction de charpentes. Le taux de déformation du béton de résine varie selon le type de polymère. Il existe une grande variété de bétons à base polymère parmi lesquelles on trouve : le béton de polyester, le béton d'époxy, le béton de résine furanique. Le (Tableau. II.1) donne les caractéristiques mécaniques des différents bétons polymère. [13]

Type de liant	Polyméthacrylate de méthyle	Polyester	Époxyde	Résine furanique	Béton de ciment
Absorption d'eau (%)	0,05-0,60	0,30-1,0	0,02-1,0	0,20	5-8
Résistance en compression (MPa)	70-210	50-150	50-150	48-64	13-35
Résistance en traction (MPa)	9-11	8-25	14-25	7-8	1,3-3,5
Résistance en flexion (MPa)	30-35	15-45	15-50	-	2-8
E (GPa)	35-40	20-40	20-40	-	20-30
$\nu$	0,22-0,33	0,16-0,30	0,30	-	0,15-0,20
Coefficient de dilatation thermique ( $10^{-6}C^{-1}$ )	10-19	10-30	10-35	38-61	10-12

Tableau. II.1 : Propriétés mécaniques des différents types de bétons de résine et du béton de Ciment [13].

### II.5. Les principaux avantages et les inconvénients du béton polymère :

#### II.5.1. Les avantages d'un béton polymère ([16], [17])

- Une bonne résistance aux agents chimiques et aux agents corrosifs ;

- Une plus faible perméabilité à l'eau et une bonne résistance aux cycles de gel-dégel;
- Un faible coefficient de dilatation thermique ;
- Un durcissement rapide ;
- Une bonne adhésion aux granulats et aux bétons anciens ;
- Des résistances mécaniques meilleures que celles des bétons hydrauliques.
- Une bonne résistance à l'abrasion ;
- Une excellente durabilité avec un coût raisonnable ;

### II.5.2. les inconvénients d'un béton polymère [17]

- Le cout de la matière première (principalement le liant) est plus élevé (jusqu'à 8 fois) comparé à celui des bétons hydrauliques.
- Ces bétons se caractérisent par une mauvaise odeur et une toxicité provenant de la partie liante du matériau c'est-à-dire la résine et le durcisseur pendant le malaxage et la mise en œuvre.

### II.6. Les différentes applications d'un béton polymère :

Béton polymère est utilisé pour de nombreux types de projets de construction spécialisés. Comme d'autres types de béton, il peut être utilisé pour assembler deux composants différents ou de fournir une structure ou une base. Le matériau est utilisé dans la construction électrique ou industrielle où le béton doit durer longtemps et être résistant à de nombreux types de corrosion. [18]

#### II.6.1.L'utilisation des bétons polymère dans les bâtiments domaine de génie civil

Utilisé essentiellement dans la production du marbre artificiel, l'industrie de façades , s'est enrichie avec l'utilisation du béton polymère comme matériau de revêtement avec des différentes formes de ces dernières de plus en plus complexes de point de vue architecturale et les exigences économiques et techniques plus stricts (Fig. II.3). [10]



Fig. II.3: Façades et marches d'escalier en béton polymère pour bâtiment.

### II.6.2. L'utilisation des bétons polymère dans l'horticulture

Le béton polymère est utilisé pour fabriquer des petites formes et des bacs pour les plants. Ces conteneurs sont à déplacer selon les conditions météorologiques et c'est ici que réside l'avantage de profiter de béton polymère plus léger et robuste (Fig. II.4). [10]



Fig. II.4: Quelques applications du béton polymères (Bacs de fleurs –chaise).

### II.6.3. L'utilisation des bétons polymère pour les revêtements des chaussées et planchers

Les planchers qui sont réalisés par le béton polymère dans les établissements industriels sont constamment exposés à des actions mécaniques permanentes exercées par les engins de transport, les vibrations, les impacts, l'abrasion, l'action des agents chimiques. De même pour les chaussées, le mouvement intensifs des véhicules lourds essentiellement réduit énormément le freinage à temps et cause l'usure de la surface du béton. Les investigations basées sur des essais en laboratoires et in-situ pour une période de 10 ans ont démontré l'efficacité de cette technique si la résine est bien choisie (Fig. III.5 et Fig. II.6). [10]



Fig. II.5: Le pont mythique (New York Mania). Fig. II.6: Plancher en béton polymère.

#### II.6.4. L'utilisation des bétons polymère dans les travaux de drainage et hydrauliques

L'utilisation du béton polymère pour la fabrication des différents systèmes de drainage et le réseau de canalisation, est très répandue comme résultat de la faible absorption d'eau et une résistance exceptionnelle au gel-dégel. Par conséquent, les éléments fabriqués en béton polymère peuvent avoir jusqu'à 15 mm d'épaisseur (réduction de 1/3 du poids par rapport au béton cimentaire) (Fig. II.7). [10]



Fig. II.7: Quelques applications du béton polymères (drainage et hydrauliques).

#### II.6.5. L'utilisation des bétons polymère dans l'industrie

Le béton polymère est fortement recommandé dans la construction des usines chimiques et dans la fabrication des équipements miniers (électrolytiques, réservoirs, puits, etc) (Fig. II.8). [10]



Fig. II.8: Quelques applications de béton polymère (industrie).

### II.6.6. L'utilisation des bétons polymère comme isolation phonique

Par la fabrication des écrans phoniques (Fig. II.9), le produit doit avoir une bonne résistance mécanique surtout sous l'action des vents intenses et une résistance à l'humidité, aux gaz, aux huiles et antigels. Par des renforts comme le verre, le caoutchouc et des autres minéraux usuels. [10]



Fig. II.9: Quelques applications de béton polymère pour l'isolation.

#### Conclusion :

On peut dire que le béton polymère n'est pas comme le béton traditionnel, même si elle utilise certains des mêmes types de matériaux. Il est également utilisé pour des projets de construction de la même manière.

Mais les composés polymères donnent les concrètes plusieurs caractéristiques qui tendent à la rendre plus sûre et plus durable que le béton ordinaire. Le béton polymère tend à être plus cher que la version traditionnelle et est mesurée plus précisément en termes de densité et de retrait.

## Chapitre III :

# Théorie d'endommagement et comportement mécanique

## Chapitre III : Théorie d'endommagement et comportement mécanique

### Historique :

Grâce aux progrès réalisés dans le domaine de la mise en forme des métaux durant les trois derniers siècles, le fer et l'acier ont progressivement remplacé le bois et le ciment comme matériaux structuraux de base. Malgré leurs hautes caractéristiques, les structures réalisées à partir de ces matériaux ont connu des accidents importants dès le milieu du 19<sup>ème</sup> siècle. L'origine de ces accidents était la rupture inattendue de composants critiques de ces structures. L'un des premiers incidents enregistré sur une structure importante fut la rupture d'une chaîne du pont suspendu Montrose (USA) en Mars 1830 en Grande Bretagne. Depuis, il y a eu un nombre important d'effondrements de ponts, dont le King's Bridge à Melbourne (Australie) (1962) ou encore le Point Pleasant Bridge en Virginie (USA) (1967). Les accidents ferroviaires dus à une rupture brutale des essieux, des roues ou encore des rails ont également été très nombreux. Entre 1960 et 1980, la mécanique de la rupture connaît un grand succès scientifique, avec notamment l'apparition de la mécanique non linéaire de la rupture qui a permis de mieux prendre en compte le comportement plastique des matériaux. De nombreux travaux sont publiés à cette période ; on peut citer par exemple Rice [1968] et Bui [1973] qui introduisent la notion d'intégrales indépendantes du contour telles que l'intégrale J, dont les propriétés ont permis de caractériser la ténacité d'un matériau lorsque la plasticité n'est plus confinée à la pointe de fissure. C'est également à cette période que les premiers travaux concernant la mécanique de la rupture dans les matériaux multicouches sont réalisés (Sih(1964), Erdogan (1965) et Continuo (1977).

L'apparition de la méthode des éléments finis a permis d'étudier la mécanique de la rupture d'un point de vue numérique, proposant ainsi des solutions plus précises à des problèmes plus complexes.

Parmi ces nombreuses méthodes, les plus facilement donnent bien souvent des résultats approchés, ou dépendants du maillage, alors que les autres nécessitent des techniques éléments finis avancées.

La mécanique de la rupture couvrant un domaine extrêmement vaste, nous commencerons par spécifier de façon précise le cadre de l'étude. Puis nous introduirons les notions fondamentales liées aux approches locales et globales en mécanique linéaire de la rupture. Cela nous amènera à faire un tour d'horizon des différentes méthodes numériques utilisées pour le calcul de grandeurs caractéristiques telles que les facteurs d'intensité de contraintes, ou le taux de restitution d'énergie. [5]

### Introduction :

La rupture est la séparation d'un matériau en deux ou plusieurs parties, sous l'action d'une contrainte. La rupture est fortement influencée par la présence de microfissures, de pores, d'inclusions de particules fragiles (défauts interne) et par la présence d'entailles (microfissures) résultant de défauts de fabrication. [21]

La mécanique de la rupture a pour objet l'étude des fissures macroscopiques, la détermination des champs des contraintes et de déformations correspondants et l'établissement des données expérimentales permettant de déterminer la cinétique de propagation des défauts et leur taille critique au-delà de laquelle, pour une sollicitation donnée, la rupture instable se produit. Le développement théorique de la mécanique de la rupture, important depuis les années 1960, doit beaucoup aux Progress réalisés conjointement dans la mise au point des méthodes de contrôle non destructif. [20]

### III.1.Observations au MEB des faciès de rupture :

Les faciès de rupture des demi-échantillons obtenues lors des essais de flexion sur le béton de résine sans fibres sont observés au MEB. (Fig. III.1) représente le contact résine granulat. Il est clair que l'adhérence est très correcte (pas de microfissures). Ceci était prévisible sur la rupture des échantillons : à l'œil nu les ruptures étaient traversantes. [20]

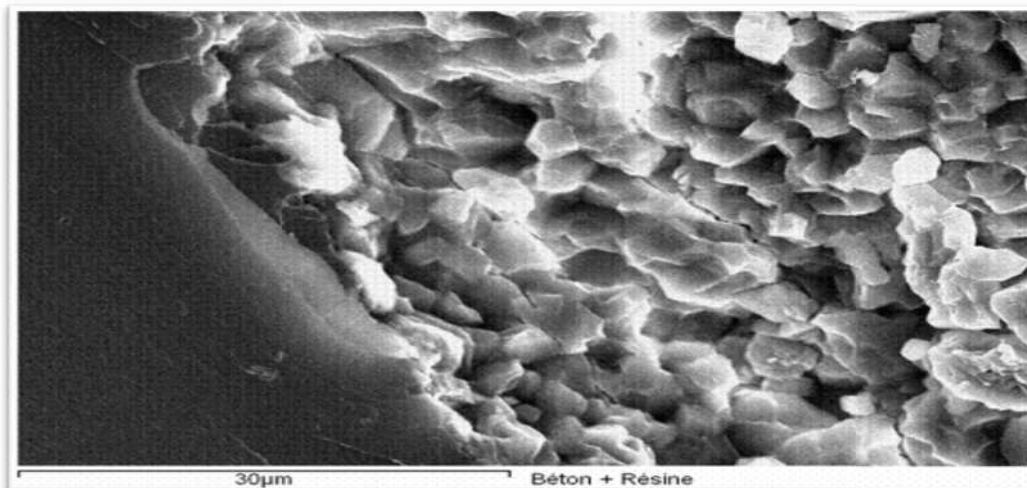


Fig. III.1: Contact résine /granulat.

### III.2.L'endommagement et la rupture des matériaux :

#### III.2.1.L'endommagement des matériaux

L'endommagement se traduit dans le matériau par la formation (phase d'amorçage) et le développement (phase de croissance et propagation) de discontinuités surfaciques (microfissures) ou volumiques (cavités). Or, dans le cadre de la Mécanique des milieux continus. [19]

#### III.2.2.Rupture des matériaux

Lorsqu'une pièce est soumise à des efforts d'origines variées, il existe des limites, en contraintes ou en déformations, qu'elle ne doit pas dépasser, sous peine d'endommager le matériau et de provoquer sa rupture. Suivant que l'on s'intéresse à la dégradation du matériau

d'un point de vue micromécanique ou macro-mécanique [5], Deux approches sont généralement utilisées en mécanique de la rupture : [22]

- L'analyse du champ des contraintes en tête de fissure. C'est l'approche par les facteurs d'intensité de contraintes, dite théorie locale. Elle relie les facteurs d'intensité de contraintes au champ de contraintes en tête de fissure.
- L'approche globale énergétique due à [GRIFFITH] qui procède par le calcul de l'énergie disponible pour la propagation de fissures dans la structure considérée. Cette énergie dépend du potentiel total du système.

### III.3.Fissure et mode des de rupture :

La rupture est caractérisée (au moins localement) par la s'réparation irréversible (généralement les liaisons chimiques rompues ne se rétablissent pas par suite de la présence inévitable de polluant) d'un milieu continu de part et d'autre d'une surface génératrices. La coupure ainsi créée est appelée fissure. [20]

Les mouvements possibles des lèvres de chaque fissure sont des combinaisons de trois modes indépendants (Fig. III.2) : [5]

- Mode I : dit mode par ouverture (ou clivage), correspond à un écartement relatif des deux surfaces de la fissure par l'ouverture angulaire de celles-ci;
- Mode II : dit cisaillement plan ;
- Mode III : dit cisaillement anti-plan, et correspond à un glissement transversal des deux surfaces de la fissure, en sens opposés, mais cette fois dans une direction parallèle au front de la fissure.

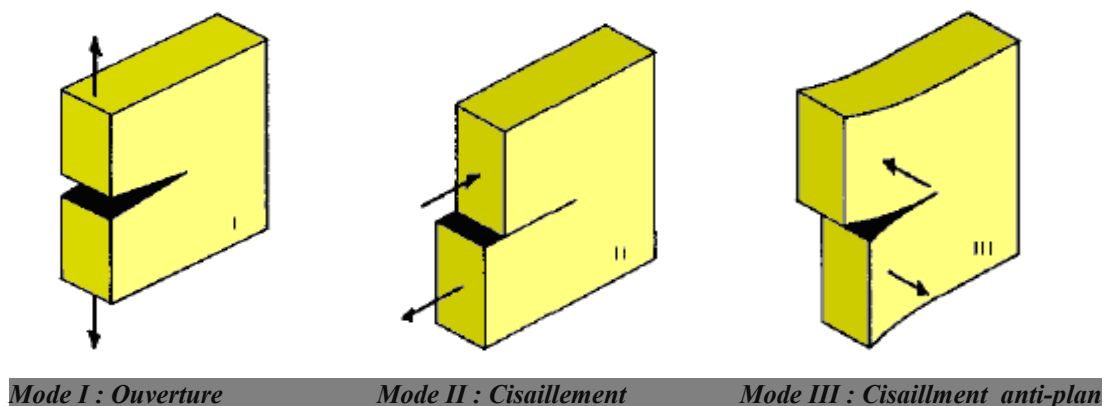


Fig. III.2 : Modes de rupture.

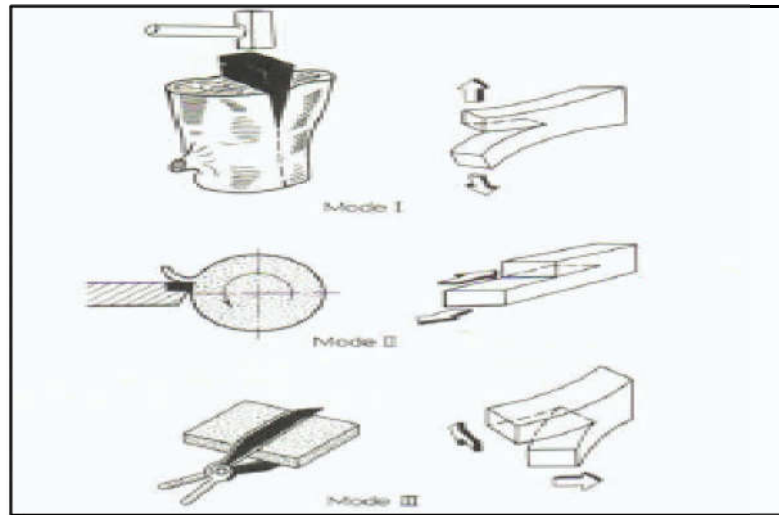


Fig. III.3: Exemple des Modes de rupture. [5]

#### III.4. Les phases de chargement : [20]

Lors du chargement d'une pièce fissurée, on distingue deux phases :

**a.** La phase d'ouverture : pendant laquelle, la fissure immobile s'ouvre, les lèvres s'écartant sans changement géométrique de la surface  $S$ . Cette phase se poursuit jusqu'à un chargement critique autorisant la fissure à se propager en s'agrandissant. A ce chargement critique correspond la condition d'amorçage.



Fig. III.4: Ouverture et propagation d'une fissure. [20]

**b.** La phase de propagation : Au-delà du chargement critique d'amorçage, la fissure s'agrandit (avance) soit dans le plan tangent à  $S$  soit dans d'autres directions (branchement), c'est la phase de propagation qui pourra être contrôlée (propagation dite stable) ou non (propagation dite instable conduisant à la rupture brutale ou catastrophique).

#### III.5. Théorie de la mécanique de rupture :

##### III.5.1. Approche énergétique ou Approche de Griffith

Le premier à avoir étudié la rupture d'un point de vue énergétique est [Griffith] en 1920, et quatre-vingt ans plus tard sa théorie reste la plus utilisée en mécanique de la rupture [23]. Par des considérations énergétiques, en supposant que la rupture est un processus absorbant d'énergie.

Griffith suppose que pour propager une fissure, il faut fournir au matériau une énergie nécessaire correspondant à l'augmentation de l'aire de fissure. Il s'ensuit que l'instabilité de fissure se produisant lorsque l'énergie emmagasinée au moment de la propagation dépassera l'énergie nécessaire pour la création de nouvelles surfaces. [21]

Si on considère un solide purement élastique d'épaisseur uniforme  $B$ , contenant une fissure elliptique de longueur « $2a$ » soumis à un champ de contrainte axiale « $\sigma$ », Selon Griffith, le changement net de l'énergie potentielle du solide (Fig.III.4) :

$$W_p = \frac{\Pi a^2 \sigma^2 B}{E'} \quad (1)$$

Avec :  $E' = E/(1 - \nu^2)$  ou  $E' = E$  respectivement pour le cas de déformation plane et contrainte plane.

Ici,  $E$  est le module de Young et  $\nu$  le coefficient de poisson.

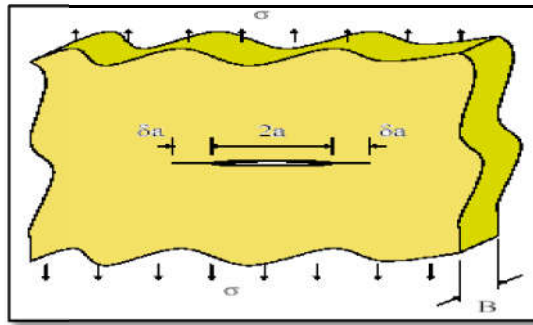


Fig. III.5: Schéma d'un solide contenant une fissure elliptique « $2a$ ».

L'énergie de création d'une nouvelle surface s'écrit (Fig.III.5):

$$W_s = 4 a B \gamma_s \quad (2)$$

Où  $\gamma_s$  est l'énergie surfacique de rupture par unité d'aire. L'énergie totale du système est alors donnée par :

$$U = W_p + W_s = \frac{\Pi a^2 \sigma^2 B}{E'} + 4 a B \gamma_s \quad (3)$$

Griffith a noté que l'état critique pour le début de la progression de la fissure est :

$$\frac{dU}{dA} = \frac{dW_p}{dA} + \frac{dW_s}{dA} = - \frac{\Pi a \sigma^2}{E'} + 2 \gamma_s \quad (4)$$

Où  $A=2aB$  est la surface rompue et  $dA$  dénote l'incrément d'accroissement de la fissure. Notez que la superficie de deux surfaces rompues est  $2A$ . La contrainte critique pour le déclenchement de rupture est :

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2E' \gamma_s}{\Pi a}} \quad (5)$$

### III.5.2. Approche en termes d'intensité de contrainte

La deuxième approche étudie l'état des contraintes dans une zone proche de l'extrémité de la fissure, pour un matériau soumis à un champ de contrainte axiale, est établie par [G. R. Irwin]. Il introduit un facteur qui permet de décrire les champs singuliers de contraintes où domine le terme en  $r^{-1/2}$  ( $r$  étant le rayon au fond de la fissure) [21]. Les contraintes sont de la forme suivante: [24]

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{r}} \cdot f_{ij}(\theta) \quad (6)$$

Avec :

- $f_{ij}(\theta)$ : fonction de l'angle polaire par rapport à l'extrémité de la fissure;
- $K_I$ : caractérise l'intensité de contrainte suivant le Mode I de rupture.

Pour le cas d'une fissure de longueur « $2a$ » continue dans un milieu infini, soumis à une contrainte de traction nominale,  $K_I$  à la forme suivante :

$$K_I = Y \sigma \sqrt{a} \quad (7)$$

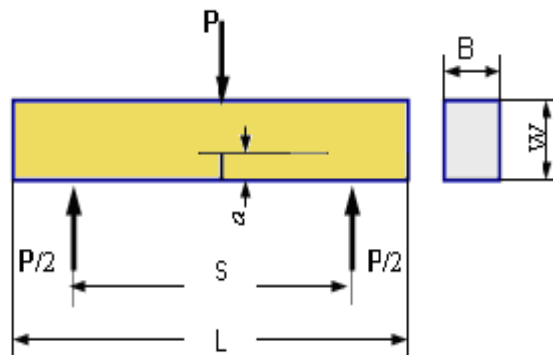


Fig. III.6: Cas d'une éprouvette de flexion trois points (FTP).

La relation principale du facteur  $K_{IC}$ , pour une éprouvette fissurée de dimensions finies et sollicitée par une contrainte uni axiale en mode I, Le paramètre  $Y$  est un facteur de correction de la géométrie, représenté souvent en fonction du rapport  $\frac{a}{w}$  (Longueur de la fissure sur la largeur de l'éprouvette). Dans le cas des matériaux fragiles, lorsqu'on fait accroître la contrainte appliquée, la rupture brutale survient à l'instant.

Où  $K_I$  atteint une valeur critique  $K_{IC}$ . Donc au moment de la rupture, on a : [5]

$$K_I = \sigma_F \cdot Y \cdot \sqrt{a_c} \quad (8)$$

- $a_c$  : Est la taille de défaut critique.
- $\sigma_F$  : Est la valeur de la résistance à la rupture de l'éprouvette.

### III.5.3. Taux de restitution d'énergie G :

Définie par G, solution du problème élastique linéaire, se détermine à partir de la géométrie et du chargement de la pièce et son expression analytique se calcule aisément pour fissure bidimensionnelle, le raisonnement portant sur une épaisseur bien définie. [20]

Il est nécessaire de considérer le changement d'énergie du système dû à l'incrément de rupture de fissure surgissant des changements du travail externe et de l'énergie interne. Ceci est défini comme G, le taux de restitution d'énergie. Considérons un corps élastique de l'épaisseur uniforme B contenant une fissure de longueur soumise une force externe P liée à un déplacement u. L'énergie mécanique totale du corps rompu  $W_p$  est : [5]

$$W_p = \Phi - W_F \quad (9)$$

- Ici  $\Phi$  : est l'énergie de déformation élastique stockée.
- $W_F$  : est le travail externe effectué par les forces externes.

Ici  $\gamma_p$  est l'énergie plastique par unité d'aire de la surface créée. Notez que  $\gamma_p$  est beaucoup plus grand que  $\gamma_s$ . Le critère d'accroissement de la fissure peut être exprimé comme suit : le taux de restitution d'énergie G doit être plus grand que le travail critique  $G_c$  qui est exigée pour créer une nouvelle surface de rupture.

#### a. Mesure de G dans le cas d'un effort imposé

Pour le cas d'une charge P constante, le taux de restitution d'énergie est représenté par l'aire du triangle OAB (Fig. III.7). Sous charge constante, l'éprouvette s'allonge d'un incrément  $\delta u$ , ainsi le travail accompli par les forces extérieures durant l'accroissement infinitésimal de la fissure) : [21]

$$\Phi = \int_0^u P du = \frac{Pu}{2} \quad (10)$$

$$W_F = Pu \quad (12)$$

A partir des équations (9, 10 et 11) on conclut :

$$W_p = -\Phi = -\frac{Pu}{2} \quad (11)$$

Considérez un incrément de fissure de  $a$  à  $a + \delta a$ , ceci cause un déplacement par accroissement de  $\delta u$  sous la charge P.

Le taux de restitution d'énergie pour le corps s'écrit :

$$G = -\frac{1}{B} \left( \frac{dW_p}{da} \right)_p = \frac{p}{2B} \left( \frac{du}{da} \right)_p \quad (12)$$

Définissant la complaisance  $C$  comme l'inverse de la rigidité ( $C=u/P$ ), le taux de restitution d'énergie est donné par :

$$G = \frac{P}{2B} \cdot \left( \frac{du}{dC} \right)_p \cdot \left( \frac{dC}{da} \right)_p \quad (13)$$

• Or  $u = C P$ , Finalement :

$$G = \frac{P^2}{2B} \cdot \left( \frac{dC}{da} \right)_p \quad (14)$$

L'avance de la fissure d'un incrément  $\delta a$  d'incrément pour une charge fixe  $P$  mène à une augmentation de du taux d'énergie d'une quantité :

$$\delta\Phi \Big|_P = - \frac{P \delta u}{2} + P \delta u = \frac{P \delta u}{2} \quad (15)$$

### b. Mesure de $G$ dans le cas d'un déplacement imposé

Pour un déplacement imposé le taux de restitution d'énergie,  $G$ , est représenté par l'aire située dans le triangle OAC (Fig. III.7) Pour un déplacement constant,  $u$ , seule l'énergie élastique peut être enregistré ( $W_F$  est égale à zéro). [5]

A partir des équations (12 et 13) on conclut :

$$W_p = \Phi = \frac{Pu}{2} \quad (16)$$

Le taux de restitution d'énergie est donné, dans ce cas, par :

$$G = - \frac{1}{B} \left( \frac{dW_p}{da} \right)_u = - \frac{u}{2B} \left( \frac{dP}{da} \right)_u \quad (17)$$

Définissant la complaisance  $C$  comme l'inverse de la rigidité ( $C=u/P$ ), le taux de restitution d'énergie est donné par :

$$G = - \frac{u}{2B} \left( \frac{dP}{dC} \right)_u \left( \frac{dC}{da} \right)_u \quad (18)$$

Or  $P = u/C$ , Finalement :

$$G = \frac{P^2}{2B} \cdot \left( \frac{dC}{da} \right)_p \quad (19)$$

L'avance de la longueur de la fissure mène à une diminution nette du taux d'énergie de d'une quantité :

$$\delta\Phi \Big|_u = - \frac{u \delta P}{2} \quad (20)$$

D'après ce qui précède, le taux de restitution d'énergie est indépendant du type de chargement. Ainsi dans un chargement à déplacement imposé ou à effort imposé, le taux de restitution d'énergie s'écrit :

$$G = \frac{P^2}{2B} \cdot \left( \frac{dC}{da} \right) \tag{21}$$

Ce qui permet d'écrire :

$$\delta\Phi \Big|_P = -\delta\Phi \Big|_u \tag{22}$$

En outre, la définition de G reste valide pour la déformation élastique linéaire et non-linéaire du matériau. G est en fonction de la charge (ou de déplacement) et de la longueur de la fissure critique du matériau. [5]

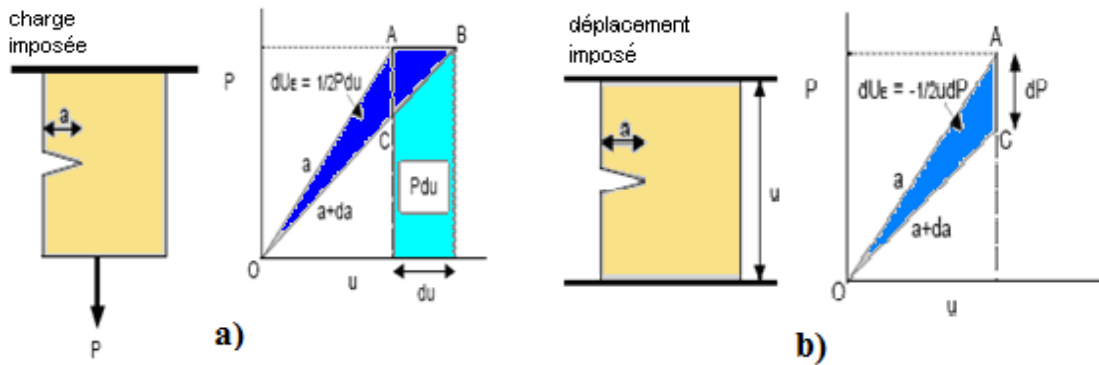


Fig. III.7: Rupture d'un corps sous (a) déplacement imposé (b) charge imposée.

Donc la relation c'est :

$$G = \frac{\Pi \sigma a}{E'} = 2\gamma_s \tag{23}$$

### III.5.4. L'équivalent entre les deux paramètres K et G

A partir de l'expression du facteur d'intensité de contrainte et dans le cas d'une fissure se propageant dans un milieu homogène [G. R. Irwin] a montré que K est relié à G [21]. Cette relation est donnée par : [5]

$$G_I = \frac{K_I^2}{E'} \tag{24}$$

Quand les paramètres  $K_I$  et  $G_I$  atteignent des valeurs critiques on a :

$$G_I = \frac{K_{IC}^2}{E'} \tag{25}$$

- En état de contrainte plane  $E' = E$ .
- En état de déformation plane  $E' = \frac{E}{1 - \nu^2}$ .

### III.6. Cas d'une éprouvette fissurée en flexion trois points

L'expression de la contrainte à rupture du matériau ( $\sigma_R$ ) :

$$\sigma_R = \frac{3}{2} \times P \times \frac{(L-L')}{B(w-a)^2} \quad (26)$$

- B, W sont respectivement l'épaisseur et la profondeur de l'éprouvette.
- L, L' sont respectivement les distances entre appuis inférieurs et supérieur.
- En flexion trois points ( $L'=0$ ).

D'où le facteur d'intensité de contrainte se calcule par :

$$k_R = \frac{3}{2} \times \frac{P \times L \sqrt{a}}{B \times (W-a_0)^2} \times Y \quad (27)$$

Le facteur Y est induit pour pallier au problème de la taille finie des éprouvettes. Il est dépendant du rapport ( $a_0/W$ ), de l'élancement ( $l/W$ ) de l'éprouvette. [5]

### Conclusion :

Le développement des méthodes de calculs scientifiques apporte les moyens de prévoir le délaminage des structures par approche locale, ce qui ne veut pas dire pour autant que le critère énergétique est à abandonner.

Chapitre IV :

# Matériaux et techniques expérimentales

## Chapitre IV : Matériaux et techniques expérimentales

### Introduction :

Ce chapitre porte sur la présentation détaillée des différentes méthodes et techniques expérimentales de caractérisation pour une continuité de la partie théorique.

Nous présentons dans ce chapitre les caractéristiques des matériaux utilisés, fournis par les essais suivants (analyse granulométrique, temps de gélification, humidité de sable, la viscosité, la masse volumique de sable) pour l'élaboration du béton polymère à matrice thermodurcissable et à matrice thermoplastique. Les essais mécaniques (compression, flexion trois points) ont été menés sur des éprouvettes prismatiques selon les normes appliquées, ainsi que les essais physiques (absorption d'eau, perte au feu). Ces tests ont été effectués au niveau de laboratoire chimie de Maghreb pipe industries. Les principaux essais mécaniques (flexion trois points, compression) ont été exécutés au niveau du laboratoire d'essais mécanique de Maghreb-pipe et le laboratoire de Génie civil de l'université de M'sila.

Les matériaux utilisés pour ce travail sont :

- La silice (sable de quartz).
- Matrice thermodurcissable : résine polyester (Isophtalique).
- Matrice thermoplastique : polypropylène (pp).

### IV.1. Caractéristiques principales des matériaux utilisés :

#### IV.1.1. La Silice

Le sable de silice ou sable de quartz peut être criblé, traité par lavage, classé en fonction de sa granulométrie puis séché. Caractérisé essentiellement entre 200 $\mu$ m et 500 $\mu$ m (Fig. IV.1), un équivalent de sable supérieure à 90% (sable très propre), il est disponible dans la région de l'ouest d'Algérie [7]. Le sable siliceux extrait de la carrière ; après l'homogénéisation, subira un important traitement qui comprendra l'un ou plusieurs des procédés suivants :

- Prétraitement (débouillage et lavage primaire).
- Criblage.
- Attrition : (attrition = action de deux corps durs qui s'usent par frottement).
- Lavage secondaire suivi de classification granulométrique.
- Flottation.
- Essorage et séchage.
- Traitements supplémentaires : se fait par voie sèche et permet d'éliminer certains minéraux lourds contenant du fer.

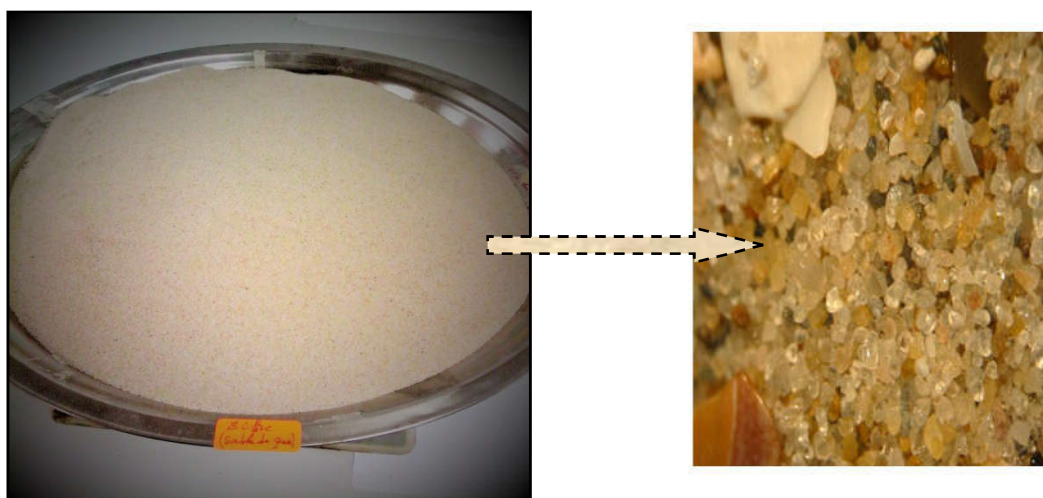


Fig. IV.1: Sable de silice.

a. Tests sable de silice :

➤ Test d'analyse granulométrique



Fig. IV.2: Tamiseuse électrique.

La (Fig. IV.3) représenté la courbe d'analyse granulométrique de sable de silice (sable sèche 0,2-0,5mm).

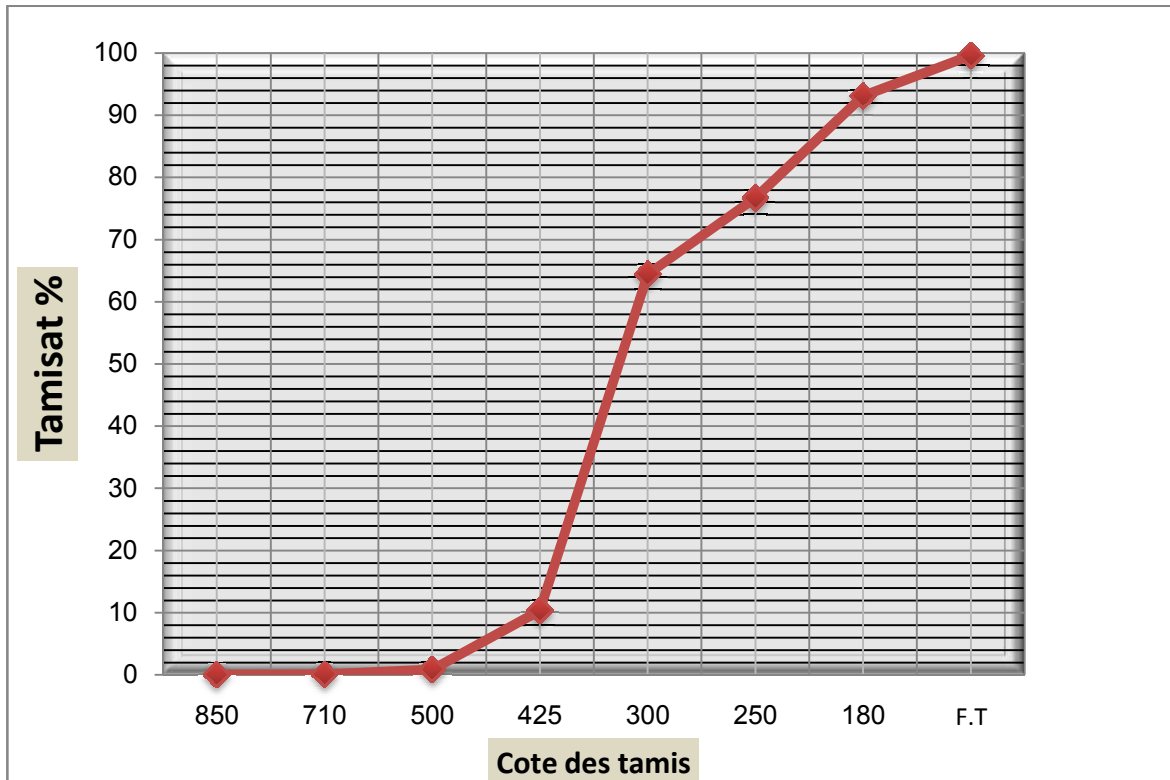


Fig. IV.3 : Courbe d'analyse granulométrique de la silice utilisée.

#### ➤ Test d'humidité

Prenons trois échantillons de sable de silice de différents poids, on les pèse avant d'y mettre dans l'étuve à 105°C pendant 24 h.



Fig. IV.4: L'étuve pour séchage.

Le tableau (Tableau. IV.1) représente l'humidité du sable de silice.

N° Ech	Poids initial (g)	Poids après étuvage(g)	Valeur (%)	Moyenne(%)
Ech 1	100	99.895	0.105	0.11
Ech 2	150	149.665	0.223	
Ech 3	200	199.978	0.011	

Tableau. IV.1: Résultat de test d'humidité de sable.

➤ **Mesure de la masse volumique du sable de silice**

• **Mode opératoire :**

En mesurant 50ml d'éthanol (96%) dans une éprouvette, nous ajoutons 50g de sable de silice. Le mélange est ensuite mis à un mode de vibration pour éliminer les bulles d'air.

- $V(\text{éthanol}) = 50\text{ml} \longrightarrow M(\text{éthanol}) = 40.44\text{g}$  ;
- $M(\text{sable}) = 50\text{g}$  ;
- $M(\text{mélange}) = 90.302$  ;
- $V(\text{mélange}) = 69\text{ml}$  ;
- Donc :  $V(\text{sable}) = 1 \rho = m/v \longrightarrow \rho(\text{sable}) = 2.63\text{g/ml}$ .



Fig. IV.5 : Essai de mesure la masse volumique.

**IV.1.2. La Résine polyester :**

Les résines polyesters sont des matières plastiques thermodurcissables, c'est-à-dire qu'elles durcissent (à température ambiante) grâce à l'association d'un accélérateur et d'un catalyseur qui provoquent une exothermie (élévation de la température de la résine). Cette transformation est

irréversible [25]. Les résines polyesters sont des produits inflammables car elles contiennent du styrène (point éclair = 31°C). Elles peuvent exister sous diverses formes: Pré- accélérées, thixotropées, promotorisées, chargées, colorées. [25]

Résine polyester liquide accélérée +catalyseur  $\longleftrightarrow$  Résine durcie

Les **polyesters insaturés** sont les résines les plus utilisées pour la réalisation des matériaux composites, pour des raisons de prix, de niveaux de performance et pour leur souplesse dans la mise en œuvre (procédés et cadences). [24]

- ✓ Propriétés des résines en générale, la classification se fait suivant le module d'élasticité  $\longleftrightarrow$  (Résine souple ; Résine rigide). [26]

Les propriétés des résines polymérisées sont régies par divers facteurs dont les principaux sont : [24]

- La teneur et le type des diacides.
- La teneur et le type des diols.
- La teneur et le type du monomère de pontage.
- Le poids moléculaire de résine polyester.
- Le système inhibiteur.
- Le système accélérateur/promoteur.

La résine polyester insaturée c'est la résine la plus utilisée dans l'élaboration des matériaux composites. On trouve deux types de résine polyester :

- Résine isophtalique.
- Résine orthophtalique.

Dans notre cas, nous avons utilisé la résine polyester isophtalique. Offrent une meilleure tenue en milieu humide, un meilleur vieillissement et meilleures propriétés mécaniques, mais son coût est plus élevé. [24]

#### a. Test de propriété rhéologique de la résine :

Ce test consiste à mesurer la viscosité de la résine isophtalique utilisant un dispositif de mesure de la viscosité. L'essai est effectué sur un échantillon de résine prise dans les conditions de température ambiante de mise en œuvre. Ce paramètre est indispensable pour contrôler les propriétés de mouillabilité de la résine. Il est très sensible à la température.

- ✓ Viscosité mesurée : 335CPa.s.



Fig. IV.6:Appareil pour la mesure de la viscosité.

**b. Test de réactivité (temps de gélification) :**

Le test de réactivité consiste à déterminer le temps de gel de la résine. Le taux de l'accélérateur et du catalyseur est choisi de manière à avoir un temps de gel suffisant pour la préparation et le moulage des éprouvettes.

Le test s'effectue en mélangeant (100g) de résine avec (0,3g) d'accélérateur (promoteurs), puis on ajoute au mélange (1.3g) de catalyseur. Les variables température et temps sont simultanément mesurés.

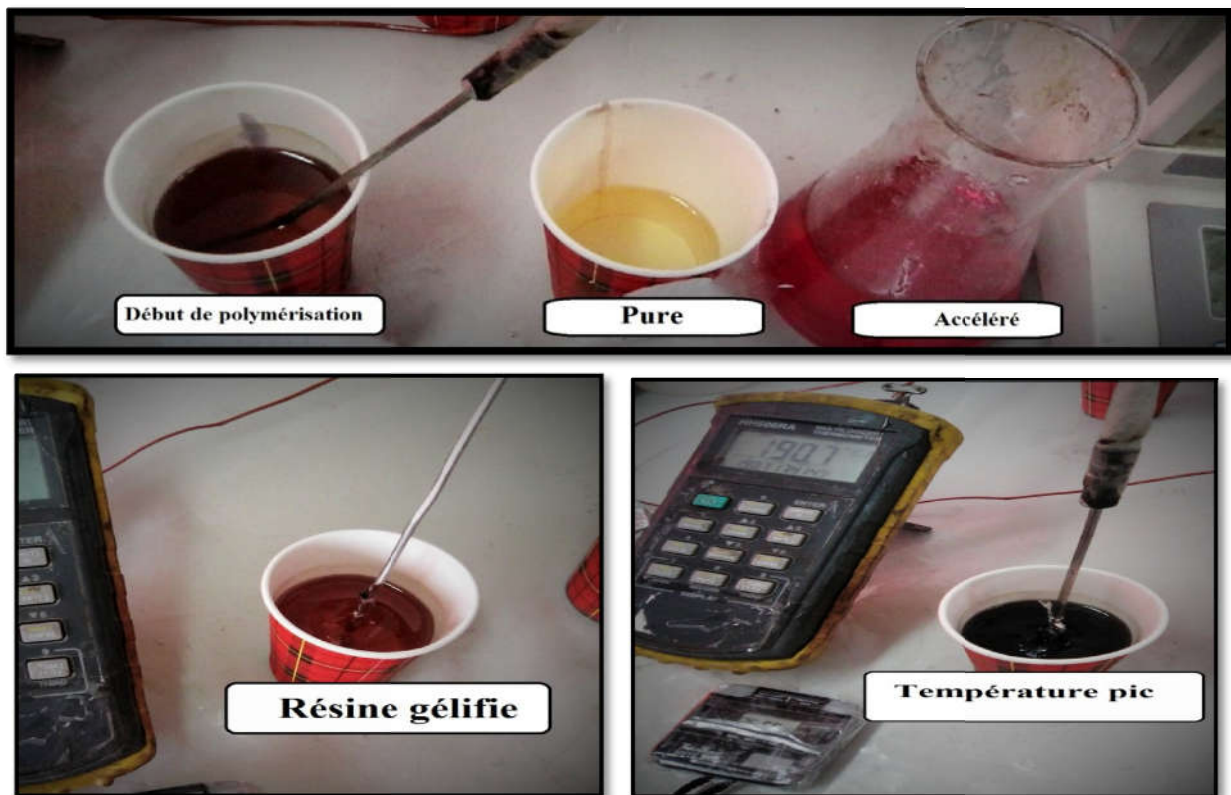


Fig. IV.7: Test de réactivité de la résine.

La (Fig. IV.8) représenté la courbe de polymérisation de résine (isophtalique).

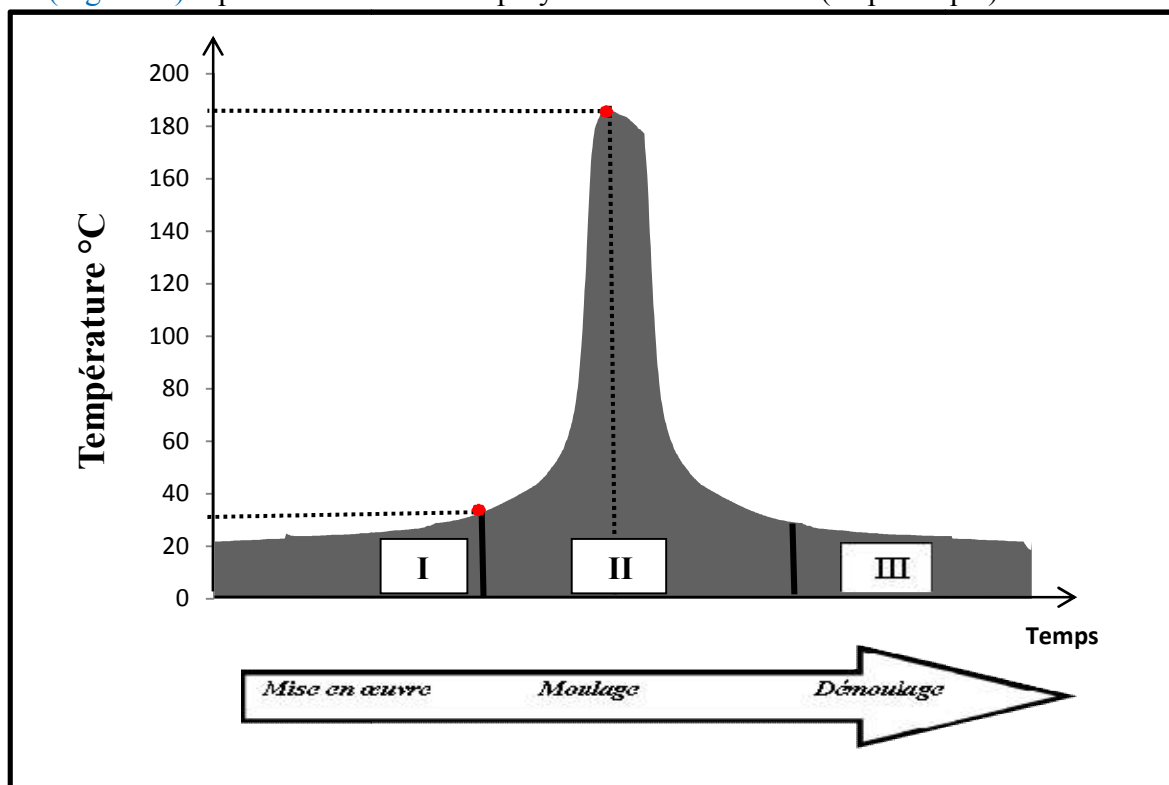


Fig. IV.8: Cycle de polymérisation de résine polyester (isophtalique).

### c. Propriétés de résine isophtalique :

- ✓ Excellentes propriétés mécaniques.
- ✓ HDT haut.
- ✓ Longévité exceptionnelle.

Les caractéristiques de la résine polyester sont indiquées dans le Tableau (Tableau. IV.2) suivant

Densité à 25 °C	1050 – 1150 Kg/m <sup>3</sup>
Viscosité	330 – 410 CPa.s
Résistance à la traction	50 – 70 Mpa
Résistance à la flexion	70 – 90 Mpa
Absorption d'eau	< 1,5 %

Tableau. IV.2 : caractéristique de la résine polyester.

#### ➤ Avantages et inconvénients de l'utilisation de la résine polyester :

La résine polyester peut présenter des avantages et des inconvénients au cours de l'utilisation. Ces dernières sont représentées dans le Tableau (Tableau. IV.3).

Avantage	Inconvénients
Bonne rigidité	fragile aux chocs
Bonne tenue chimique	Tenue médiocre en température
Bonne mouillabilité des fibres	Retrait important de 8 à 10%
Stabilités dimensionnels	Odeur nauséabonde
Etuvage non indispensable	Difficulté des mélanges en faible quantité

Tableau. IV.3: Différents avantages et les inconvénients de résine polyester insaturée. [26]

#### IV.1.3.La résine Polypropylène (pp) :

Le polypropylène (ou polypropène) isostatiques, de sigle PP (ou PPI), est un polymère thermoplastique semi-cristallin de grande consommation. Le polypropylène isostatique est une polyoléfine résultant de la polymérisation coordinative des monomères propylènes, Le Polypropylène est très utilisé peu du fait de sa sensibilité thermique à la mise en œuvre, mais ses propriétés de rigidité et de tenue en température débouchent sur quelques applications spécifiques très facilement recyclable, semi-rigide et très résistant à l'abrasion [27]. Sa résistance à l'abrasion et à la chaleur est remarquable, mais il convient de signaler également ses excellentes caractéristiques diélectriques et d'isolation ainsi que sa résistance extraordinaire aux pliages répétés. [28]



Fig. IV.9: Polypropylene (pp).

##### a. Caractéristiques principales : [25]

- Faible densité.
- Très grande dureté.
- Grande résistance à la fissuration.
- Faible absorption d'eau.

- Grande résistance aux agents chimiques.

#### b. Description de polypropylene BH975MO :

**BH975MO** un copolymère hétérophasique se caractérise par une combinaison optimale de très haute rigidité, bonne fluidité et bonne résistance aux chocs.

#### c. Caractéristiques spéciales (BH975MO) :

- Excellent comportement.
- Performances très bon impact pour des applications de basse température.
- Bonnes propriétés antistatiques.
- Temps de cycle réduit et augmentation de la production.

Les caractéristiques de la résine polypropylene sont indiquées dans le Tableau (Tableau. IV.4) suivant :

<b>Densité</b>	900-910 Kg/m <sup>3</sup>
<b>Température de fonte</b>	200-250 °C
<b>Contrainte de traction</b>	25 Mpa
<b>Module de flexion</b>	1550 Mpa (5mm/min)

Tableau. IV.4 : Caractéristique de la résine polypropylene.

#### ➤ Avantages et inconvénients de l'utilisation de polypropylene :

Le polypropylène présente de nombreux avantages et des inconvénients au cours de l'utilisation. Ces dernières sont représentées dans le Tableau (Tableau. IV.5). [24]

<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
bon marché, et recyclable.	fragile (cassant) à basse température
alimentaire (inodore et non toxique)	sensible aux UV,
Rigidité.	moins résistant à l'oxydation que le polyéthylène et difficile à coller.
très peu dense	Mise en œuvre délicate.
Résistance chimique.	Collage difficile.

Tableau. IV.5 : les avantages et inconvénients de polypropylene.

## IV.2. Technique de moulage

### IV.2.1. Préparation des moules utilisées

La première étape pour la technique de moulage des bétons polymère, c'est la préparation des moules appropriés pour chaque essai.

Nous avons choisi des moules métallique prismatique disponible au niveau de laboratoire de **Maghreb pipe**, pour l'essai flexion trois points.

Tout d'abord, nous avons utilisé un moule de dimensions 40mm\*40mm\*160 mm, pour préparation des éprouvette en béton polymère à matrice thermdurcissable. Concernant le polymère à matrice thermoplastique, un moule de dimensions 40mm\*100mm\*180mm, nous a permis de fabriquer deux éprouvette en même temps. Pour l'essai de compression nous avons utilisé les mêmes éprouvettes de flexion après test.

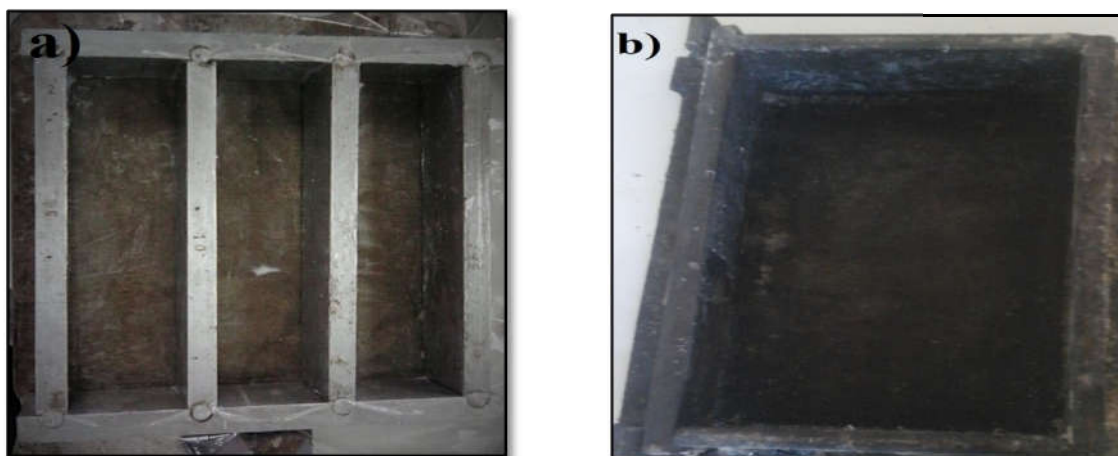


Fig. IV.10:(a) Moule utilisé pour éprouvettes lisses (FTP) de BPR, (b) Moule utilisé pour Eprouvette lisse (FTP) de BPP.

### IV.2.2. Elaboration des éprouvettes en béton polymères de résine :

Nous avons utilisé la technique de moulage par contact, Cela dépendra de réaliser le béton polymère manuellement à température ambiante.

#### a. Technique :

D'abord, nous mettons une quantité de sable de silice dans un récipient après la pesée, puis on ajoute progressivement la résine accéléré avec 0,3% (Co6) et 1.3% de durcisseur (catalyseur M-50). Intégrons le mélange jusqu'à ce qu'il soit homogène, et chaque grain de sable de silice soit saturé avec de la résine, pour une période de temps avant la gélification (10min).

On obtient à la fin une mixture du béton résineux, prête à être moulée dans des moules prismatiques métallique, alors nous faisons la pression en utilisant la machine compacteur, afin d'éliminer les vides, et obtenir des éprouvettes uniformes.



**Fig. IV.11: Etapes de moulage de béton polymère par contact.**

Le Tableau (Tableau. IV.6) résume la formulation adoptée pour les éprouvettes en béton polymère de résine :

Les matériaux utilisés	Pourcentages des matériaux (%)		
	(a)	(b)	(c)
Silice	84%	80%	76%
Résine	16%	20%	24%
Durcisseur	1.3 %		

Tableau. IV.6 : Taux de chaque composante.

**b. Le traitement thermique du béton polymère élaboré :**

Le temps de durcissement du béton polymère est entre 3 à 4 heures en fonction de pourcentage de durcisseur ajoutée à la résine. Les éprouvettes sont ensuite démoulées. Avant de procéder aux tests, on laisse le béton pendant 7 jours, ou on le met dans un four à une température de 70 ° C durant 24 heures. Ceci, afin d'assurer une polymérisation totale du mélange.

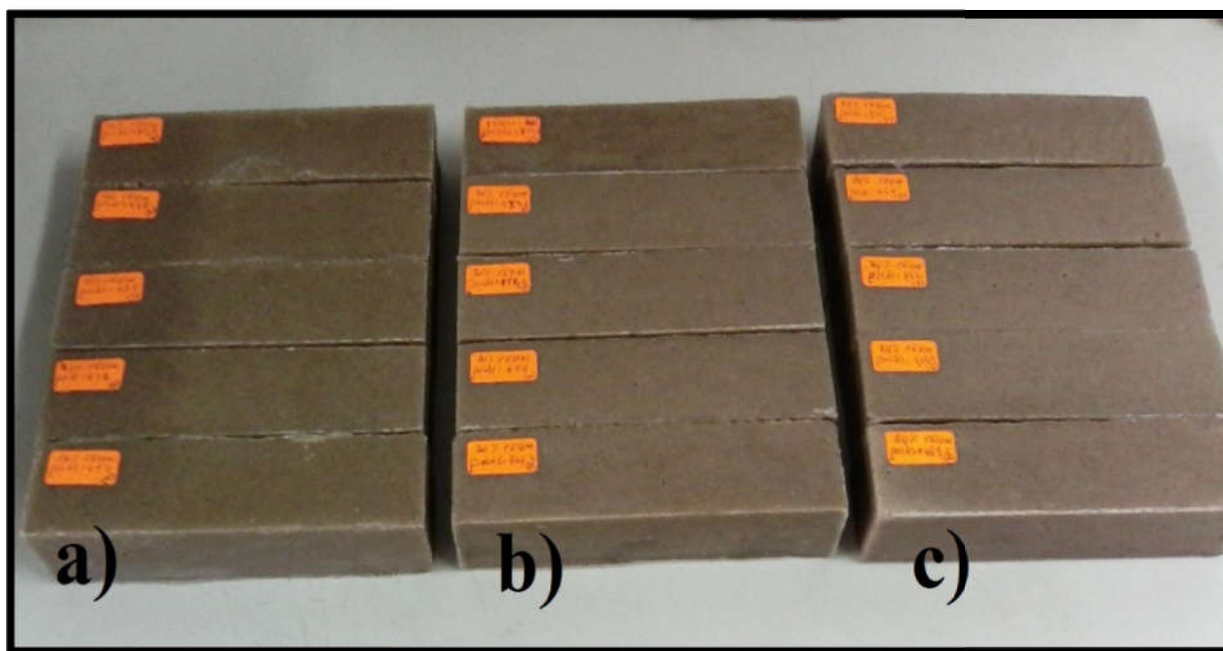


Fig. IV.12: Eprouvettes lissés en BPR : a)-16%RI, b)-20%RI, c)-24%RI.

**IV.2.3.Elaboration des éprouvettes en béton polymères de polypropylene:**

L'opération de moulage des thermoplastiques est toujours difficile, et désagréable. Pour ce faire, une nouvelle extrudeuse a été conçue et fabriquée dans les ateliers de MAGHREBPIPE INDUSTRIES à M'sila.

Nous avons utilisé une technique de moulage qui passe par deux étapes principales : l'extrusion qui permet le mélange des deux composantes à l'état fondu, à température 210 °C,

suivi de l'injection sous forme d'échantillon pour différents tests. Ensuite, les éprouvettes sont dégazées et pressées.

#### a. Extrusion :

L'extrusion est une opération principale dans la préparation du matériau composite sous forme des granules, se pratiquant sur une machine appelée extrudeuse. Se présente comme une presse à injecter. C'est une étape qui permet un mélange de matrice et de renfort à l'état fondu.

#### b. Description générale et principe de fonctionnement :

Celle-ci comporte une vis sans fin V qui tourne à l'intérieur d'un fourreau cylindrique F, régulé en température par des systèmes de chauffe et de refroidissement. Le polymère sous forme solide (granules, poudre) est introduit dans la trémie T située à une extrémité de la machine.

La principale fonction de l'extrudeuse est de convoyer le polymère, de le fondre et de le mettre en pression, pour qu'il puisse franchir la filière placée à son extrémité. D'un point de vue industriel, on cherche à obtenir à la sortie de la machine un débit régulier, avec un matériau homogène, à la température contrôlée. On peut distinguer trois zones phénoménologiques :

- ✓ la zone de convoyage solide, dans laquelle le polymère est entièrement solide.
- ✓ la zone de fusion, dans laquelle coexistent du polymère encore solide et du polymère déjà fondu.
- ✓ la zone de pompage, dans laquelle le polymère est totalement fondu.

L'énergie nécessaire à la fusion et à la mise en pression du polymère est issue de deux sources principales :

- l'énergie mécanique, fournie par la rotation de la vis, qui engendre des déformations au sein d'un milieu très visqueux.
- l'énergie thermique, fournie par la régulation du fourreau.

#### c. Technique

On verse d'abord une quantité de polypropylène dans l'alimentateur (1). La silice est distribuée à partir de l'alimentateur (2). La température de la machine est réglée à 210°C, puis on commence l'opération.

Le polypropylène passe par la zone de chauffage, afin de lui donner le temps de se fondre. La silice est ensuite ajoutée, pour avoir un mélange homogène fondu. Enfin le béton est injecté dans les moules. On utilise la machine compacteur, pour compacter le mélange. Le refroidissement se fait à l'air libre.

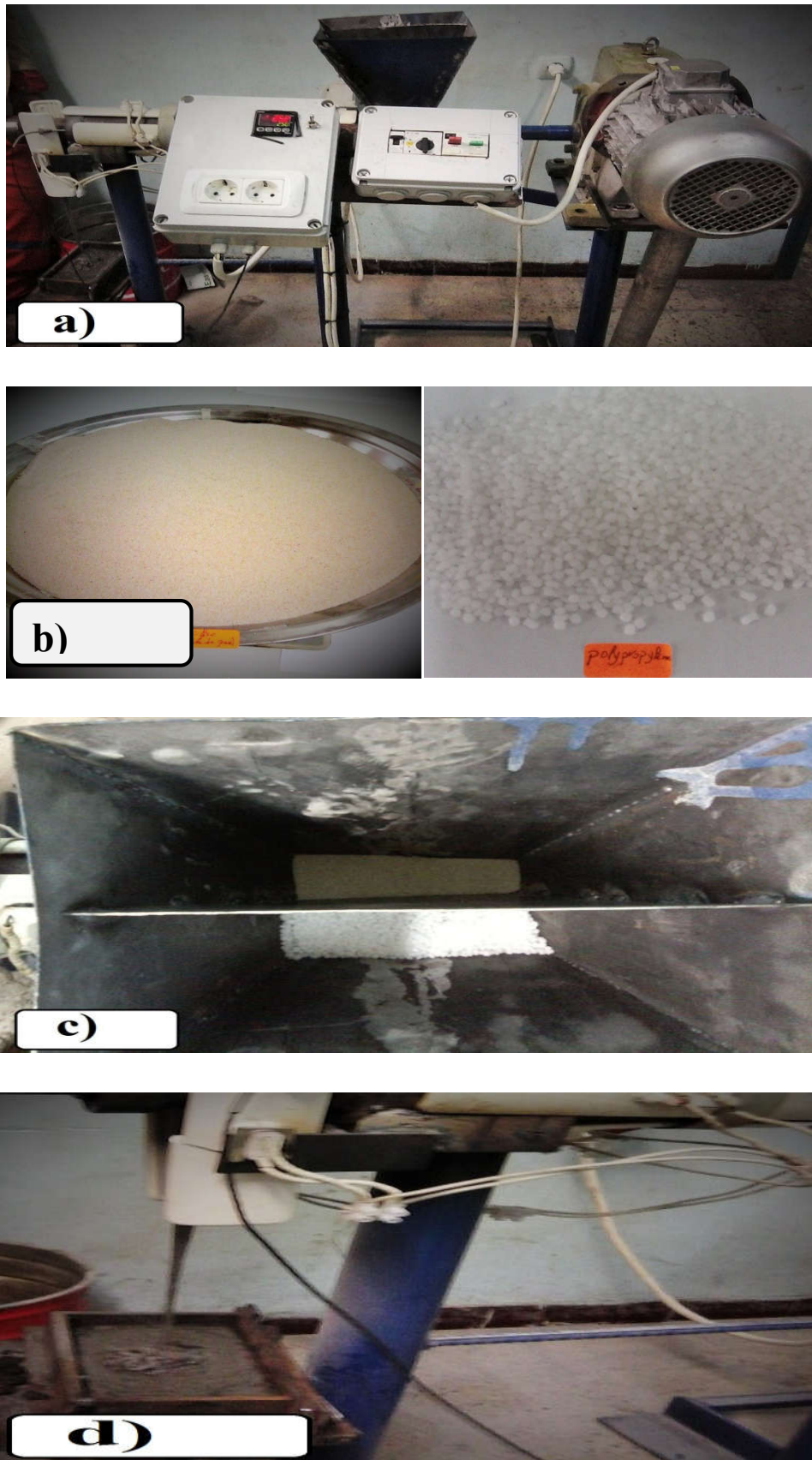


Fig. IV.13: Etapes de moulage de béton polymère par extrusion.

Le Tableau (Tableau. IV.7) présente la formulation des éprouvettes en béton polymère de polypropylène:

Les matériaux utilisés	Pourcentages des matériaux (%)		
	(a)	(b)	(c)
%Silice	76%	68%	60%
%Polypropylène	24%	32%	40%

Tableau. IV.7: Taux de chaque composante.

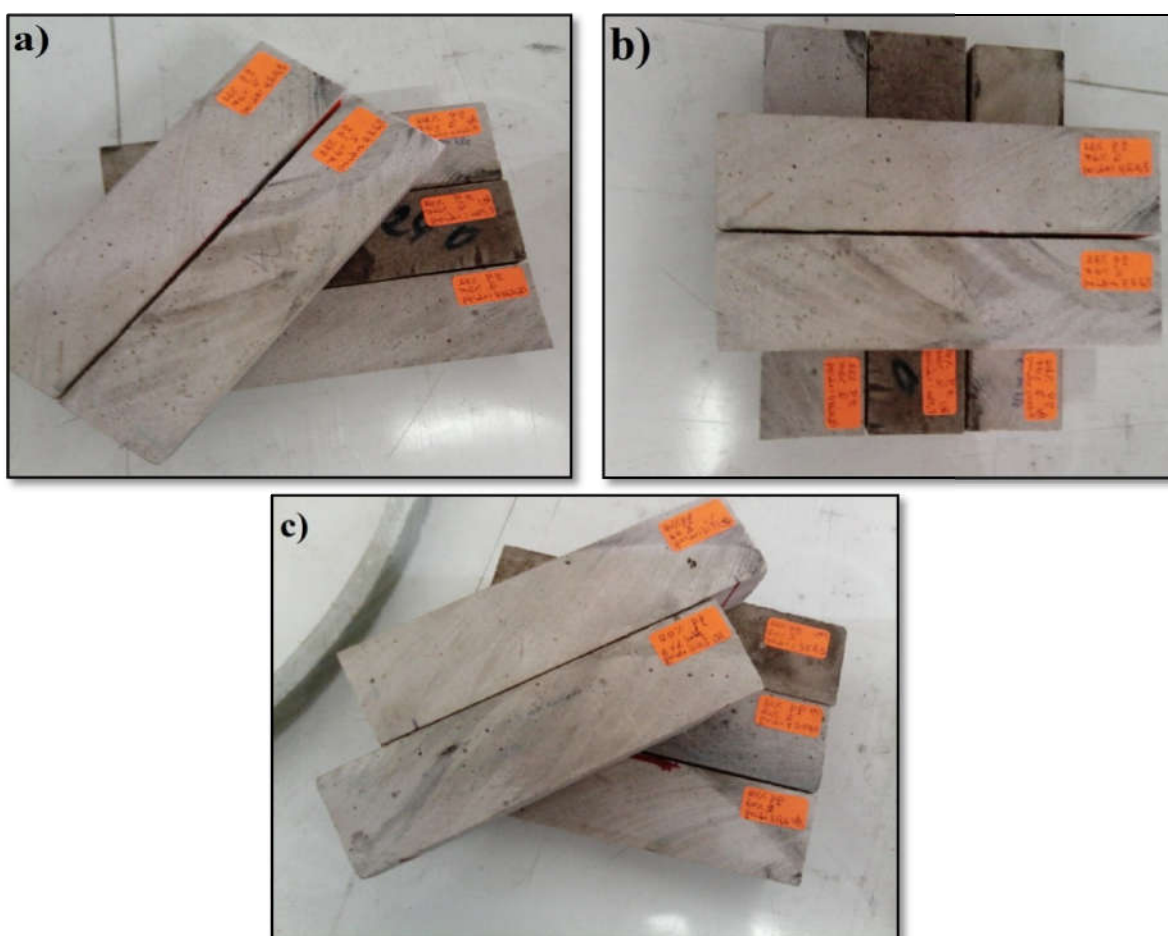


Fig. IV.14: Eprouvettes lissés en BPP : a)-24%PP, b)-32%PP, c)-40%PP.

### IV.3.Essais mécaniques appliqués sur le béton polymère :

La caractérisation mécanique d'un matériau réside dans la détermination de ses coefficients indépendants, notamment, le module de Young, la résistance à la compression etc.

La détermination de ces éléments fait appel à plusieurs techniques complémentaires permettant leur identification complète. Pour ce faire nous avons procédé aux essais mécaniques les plus classiques à savoir : l'essai de flexion et l'essai de compression.

### IV.3.1. Essai de flexion trois points (FTP)

L'essai est réalisé selon la norme (D790-10) en utilisant la machine (YL Testing Machines/20Kn), qui est une machine universelle équipée d'un système de flexion, au niveau de Maghreb Pipe (Fig. IV.15).

Les éprouvettes lisses de ( $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ ) sont testées en appliquant une charge à mi-distance des appuis. La distance entre appuis est de **128mm**. Le matériau est chargé à une vitesse constante de **0,25 mm/min** pour le béton polymère à matrice thermdurcissable, et **0.4mm/min** pour le béton polymère à matrice thermoplastique (Fig. IV.16 et Fig. IV.17). Le test FTP consiste à déterminer la charge maximale et étudier le comportement mécanique jusqu' à la rupture du matériau.



Fig. IV.15: Essai de FTP (YL Testing Machines/20Kn).



Fig. IV.16: Essai de FTP sur des éprouvettes lissés en BPR.

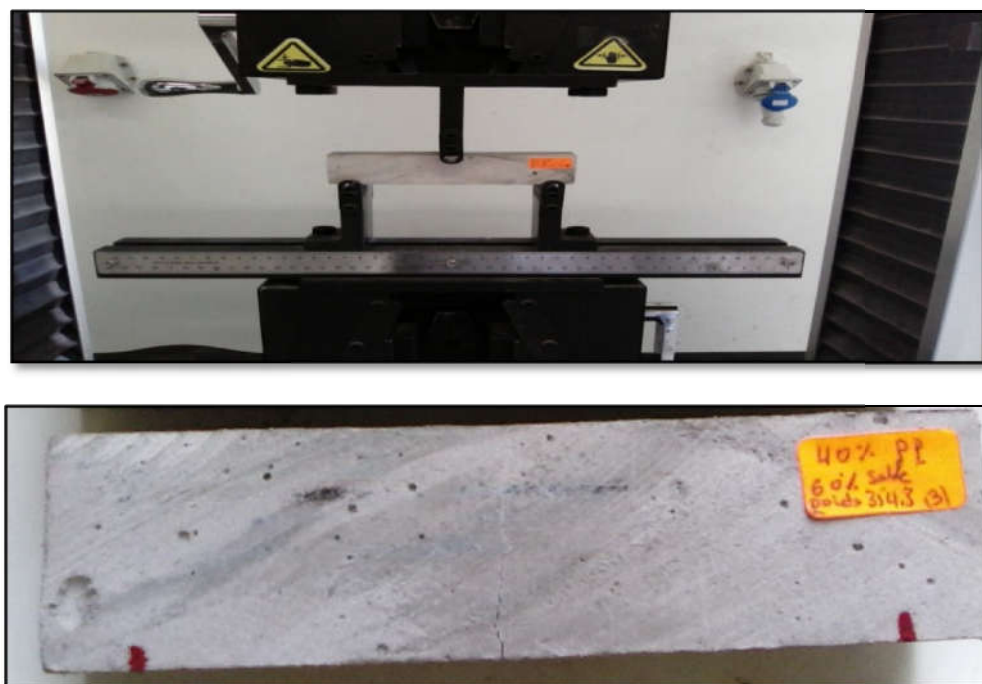


Fig. IV.17: Essai de FTP sur des éprouvettes lissés en BPP.

➤ **Les paramètres d'étude :**

Dans cet essai nous avons étudié la contrainte à la flexion et le module de flexion en utilisant les deux relations suivantes:

✓ La contrainte :

$$\sigma_f = \frac{3.P.L}{2.b.h^2} \quad (1)$$

Avec :

- P : la charge appliquée sur l'éprouvette en (N)
- L : la distance entre les appuis en (mm).
- b : largeur de l'éprouvette en (mm).
- h : l'épaisseur de l'éprouvette en (mm).

✓ Module de Young de flexion :

$$Ef = \frac{P.L^3}{6.f.I} \quad (2)$$

Avec :

- P : la charge maximale à la flexion en (N).
- L : la distance entre appuis en (mm).
- f : la flèche en (mm).
- I : le moment d'inertie  $= \frac{bh^3}{12}$ .

### IV.3.2.Essai de compression

Cet essai consiste à soumettre une éprouvette en BP de (40×40×160 mm<sup>3</sup>), placée entre les plateaux d'une presse avec une vitesse de **0.5 Mpa/s**, a deux forces axiales opposées sur une machine au niveau de laboratoire Génie Civil de l'université de m'sila (Fig. VI.18). Pour déterminer la résistance à la rupture en compression.

➤ **Paramètre d'étude :**

La résistance à la compression définie par la relation suivante :

$$R_c = \frac{F}{S} \quad (3)$$

- F : la force maximale en (N).
- S : la section de l'éprouvette en (mm<sup>2</sup>).

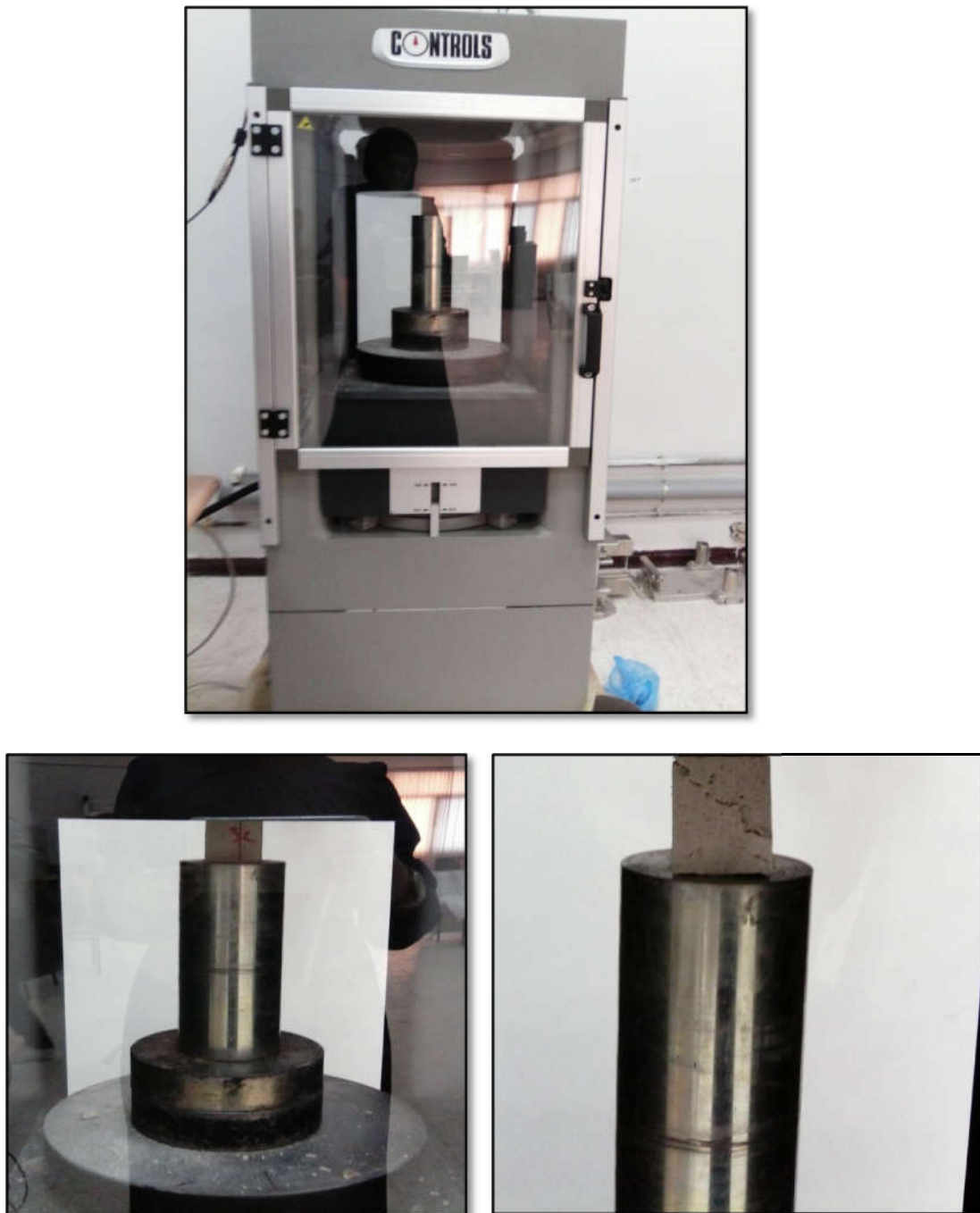


Fig. IV.18: Essais compression sur des éprouvettes lise en béton BPR et BPP.

#### IV.4.Essais physiques :

##### IV.4.1.Essai d'absorption

C'est un essai physique réalisé suivant les prescriptions de la norme (C413.1)

Des carottes de (25 mm) de diamètre de hauteur de (25 mm) ont été préparées à partir des éprouvettes testées.

Après leur pesage, les échantillons sont immergés totalement dans un bain marie chauffée à 100°C pendant deux heures. Après la période de chauffage ils sont refroidis à température ambiante est ensuite mesuré Le poids saturé tableau (Tableau. IV.8 et Tableau. IV.9).

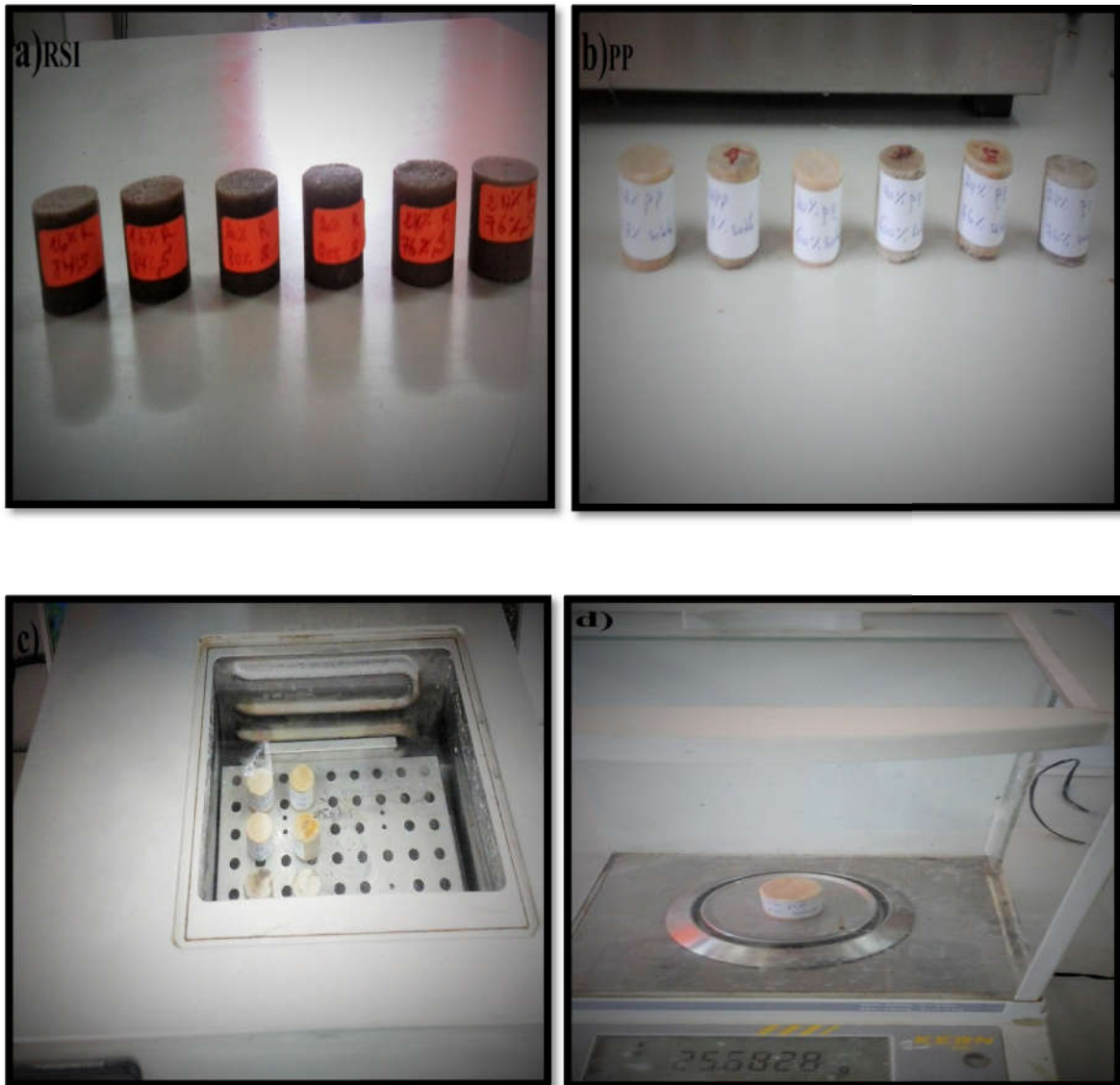


Fig. IV.19: Eprouvette en béton polymère BPR et BPP pour essai d'absorption.

➤ **Les paramètres d'étude :**

L'absorption est calculée : en % de poids comme suit :

$$A = [(W-D)/D] \times 100 \quad (4)$$

A : absorption en %.

W : poids saturé du spécimen.

D : poids du spécimen après conditionnement.

Les résultats de test d'absorption présentés dans le Tableau (Tableau : IV.8 et Tableau : IV.9) Suivant :

% Résine	EP	D(g)	W(g)	A(%)	LA moyenne(%)
16	1	30,01	30,10	0,32	0,46
	2	29,89	30,08	0,60	
20	1	28,07	28,17	0,37	0,38
	2	27,98	28,17	0,39	
24	1	27,19	27,27	0,30	0,31
	2	27,34	27,42	0,31	

Tableau. IV.8 : Résultats test d'absorption de béton de résine.

%pp	EP	D(g)	w(g)	A(%)	La moyenne(%)
24	1	26,18	26,21	0,10	0,08
	2	25,84	25,86	0,05	
32	1	22,84	22,89	0,21	0,14
	2	24,51	24,5	0,07	
40	1	19,96	19,97	0,05	0,38
	2	20,05	20,19	0,70	

Tableau. IV.9: Résultats test d'absorption de béton de polypropylène.

#### IV.4.2. Test de perte au feu

Méthode d'essai normalisée pour la perte au feu de mélange de résines selon la norme (D 2584-94).

Nous avons préparé trois spécimens. Le spécimen doit peser environ 5g avec une taille maximale de 2.5 par 2.5 cm épaisseur.

Les éprouvettes sont conditionné à  $(23 \pm 2^\circ\text{C})$  et  $50 \pm 5\%$  d'humidité relative pour pas moins de 40 h avant son test.

Mettez-le creuset et le contenu dans le four à une température inférieures à  $565^\circ\text{C}$ . Il faut veuillez qu'il y aura une perte mécanique du résidu incombustible. Chauffer le creuset et le

résidu dans le four jusqu'à ce que toutes les matières carbonées a disparus. Laisser refroidir le creuset à température ambiante. Puis pesons le contenu restant.

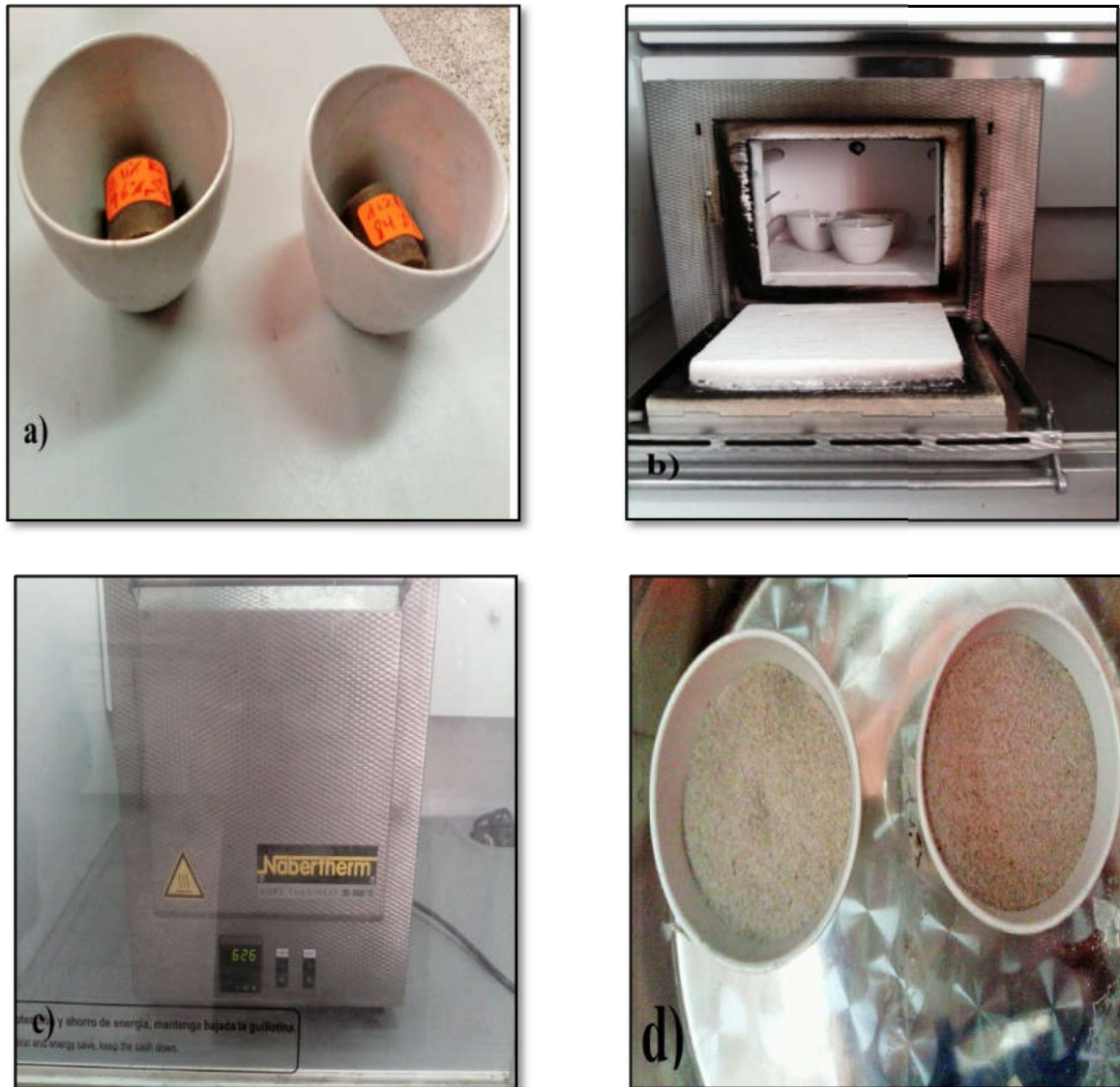


Fig. IV.20 : Test perte au feu sur des éprouvette en béton polymère BPR et BPP.

➤ **Les paramètres d'étude :**

Calculer la perte au feu du spécimen en pourcentage massique comme suit :

$$\text{Perte au feu, poids en \%} = [(W_1 - W_2) / W_1] \times 100 \quad (5)$$

- $W_1$  = poids du spécimen, g.
- $W_2$  = poids du résidu, g.

La moyenne des 3 échantillons valeurs pour obtenir la moyenne de l'échantillon.

**Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons traité la mise en œuvre et la caractérisation d'un matériau composite à matrice thermodurcissable et thermoplastique. Différents tests sur les matières premières. Suivi par les techniques de présentation de coulée (moulage par contact, et moulage par extrusion), utilisées dans notre étude. De plus, les méthodes de caractérisations mécanique (flexion trois points, compression), physique (absorption d'eau, per au feu) sont données en détail.

**Chapitre V:**  
**Résultats et Discussion**

## Chapitre V: Résultats et Discussion

### Introduction:

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats des essais mécaniques et physiques, menée sur le béton polymère à base résine et de polypropylène.

Une analyse des changements des courbes contrainte/ déformation ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) des éprouvettes lissées sollicitées en flexion trois points, ainsi que l'analyse de la résistance à la compression des bétons polymers, ensuite une comparaison des résultats de béton polymère à base de résine avec celui à base de polypropylène. Aussi une analyse des propriétés physiques des deux matériaux est présentée dans ce chapitre. Elle consiste aux test d'absorption et test de pert au feu.

### V.1.Propriétés mécanique des Bétons Polymères en flexion trois points:

Dans cette partie nous allons présenter les essais mécaniques qui ont été réalisés pour la détermination des caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés.

#### V.1.1.Analyse des courbes contrainte-déformation des bétons polymères:

Les résultats des tests en flexion trois points reflètent le comportement mécanique des matériaux. Nous avons testés les éprouvettes en flexion trois points relatifs aux bétons polymères confectionnées auparavant.

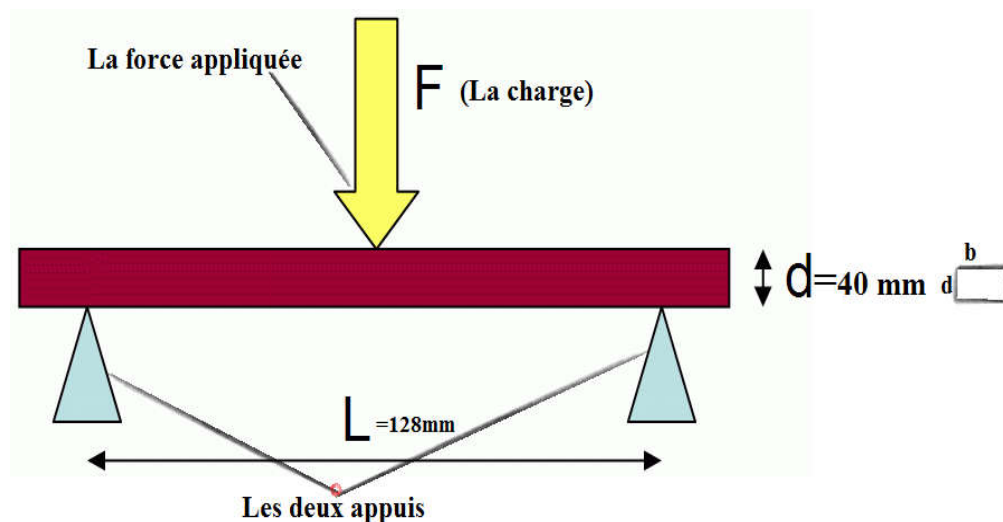


Fig.V.1 : Principe de sollicitation de l'éprouvette en flexion trois points (FTP).

La figure V.2 représente les évolutions des contraintes en fonction de déformation ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) des éprouvettes lissées en Béton Polymère sollicitées en flexion trois points (FTP) à différent taux de résine et de polypropylène.

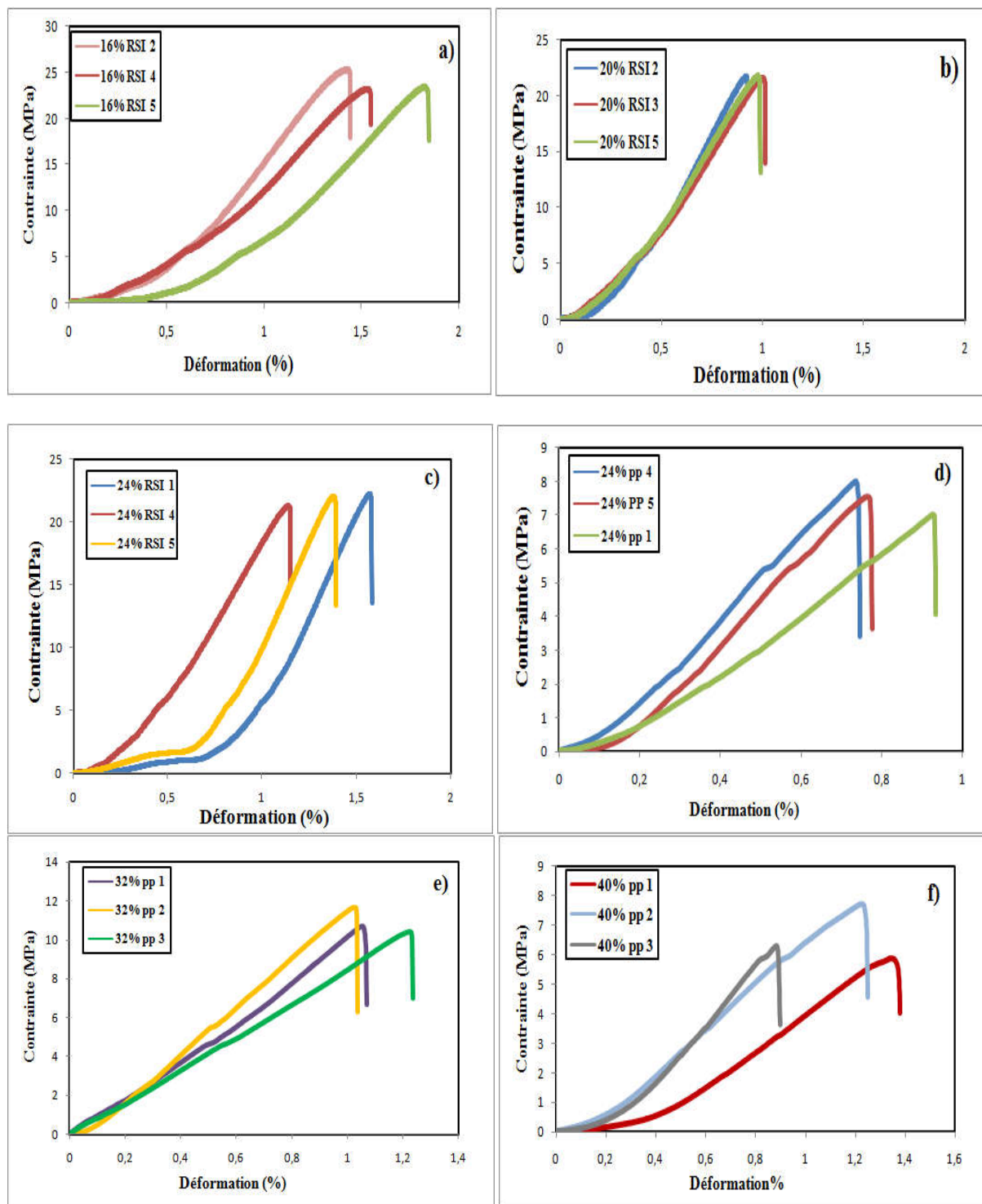


Fig. V.2 : Courbes d'évolution des contraintes en fonction de déformation des différents bétons polymères.

(a) Béton polymère de résine 16%. (b) Béton polymère de résine 20%. (c) Béton polymère de résine 24%. (d) Béton polymère de polypropylène 24%. (e) Béton polymère de polypropylène 32%. (f) Béton polymère de polypropylène 40%.

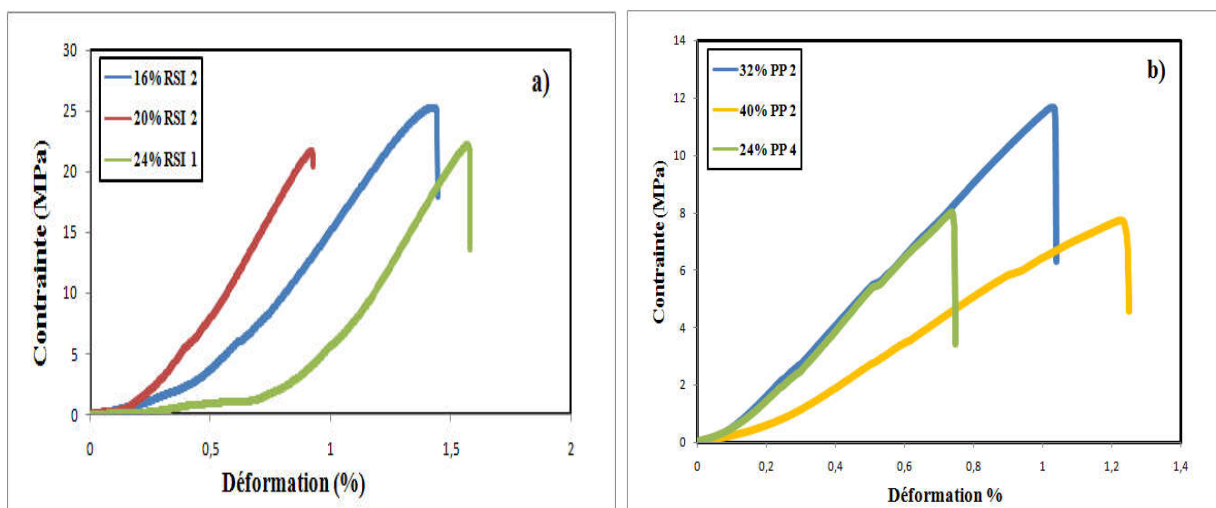
Afin de connaître le comportement du matériau, des essais de flexion trois points jusqu'à la rupture à température ambiante pour différents taux de la matrice ((16%, 20%, 24% RSI); (24%, 32%, 40%PP)) ont été réalisés.

Dans l'ensemble des courbes, l'évolution de la contrainte se déroule en deux phases. Dans la première phase, la contrainte augmente linéairement avec la déformation jusqu'à la charge maximale, dans la deuxième phase une diminution de la contrainte est observée. Elle se termine par la rupture de l'éprouvette. De plus, une reproductibilité des résultats est observée sur l'ensemble des Bétons Polymères testés dans les différents cas.

A partir des courbes de la figure V.2. On observe une variation de la contrainte à la rupture et la déformation dans chaque courbe :

- (a): la contrainte à la rupture variant entre 23.2 :25.3 MPa et la déformation entre 1.43 :1.83 %, (contrainte = $24.25 \pm 1.05$ MPa, déformation= $1.63 \pm 0.2\%$ ).
- (b) : enregistre une contrainte  $21.65 \pm 0.05$ MPa avec une déformation  $0.95 \pm 0.5\%$ .
- (c) : la contrainte est  $21.75 \pm 0.45$ MPa et déformation  $1.3 \pm 0.2\%$ .
- (d) : Une contrainte de  $7.5 \pm 0.5$ MPa et la déformation  $0.84 \pm 0.06\%$ .
- (e) : enregistre une contrainte  $10.75 \pm 0.34$ MPa et la valeur de la déformation  $1.13 \pm 0.1\%$ .
- (f) : la valeur de la contrainte est  $6.8 \pm 0.9$ MPa avec une déformation  $1.1 \pm 0.2\%$ .

La figure V.3 représente la superposition des courbes contraintes et déformations des différents bétons polymères, pour présenter l'influence de taux de la matrice sur l'évolution de la contrainte.



**Fig. V.3: Superposition des évolutions de la contrainte en fonction de déformation des types du Béton polymère :a) Béton polymère de résine, b) Béton polymère de polypropylène.**

Bien que les résultats de contraintes en FTP sont rapprochés, on constate dans la courbe (a) que le matériau BPR 16% à enregistré la maximale par rapport au BPR20%, et BPR024%.

Ce pendant, on remarque que la déformation maximale a été enregistrée par le matériau BPR 24%. Ce la s'explique par la nature de la résine lorsque son taux augmente dans le composite (moins de résistance et plus de déformation).

En revanche, pour les composites à base de polypropylène, la résistance maximale est obtenue par le matériau BPP 32% (11.07 MPa) avec une déformation de l'ordre de 10.23%, le matériau BPP 24% à une résistance similaire à celle du BPP 40%. Elle est inférieure de 36% par rapport au matériau BPP 32%.

La superposition des courbes contraintes / déformations des différents bétons polymères est indiqué dans la (figure V.4).

On remarque clairement que les bétons polymères à base de résine thermodurcissable offrent les meilleurs résultats en flexion trois points ( $23\text{MPa} \pm 2$ ). Tandis que les bétons à base de résine thermoplastique enregistrent des résistances inférieurs de 50% par rapport au BPR. Cela s'explique par la différence en nature et propriétés des deux matrices, (module d'élasticité, mouillabilité, adhérence résine-silice).

Il est à noter qu'en termes de résistance à la flexion, le pourcentage optimum dans le cas de la résine TD est de 16%. Cependant le pourcentage optimum dans le cas de résine TP est de 32%.

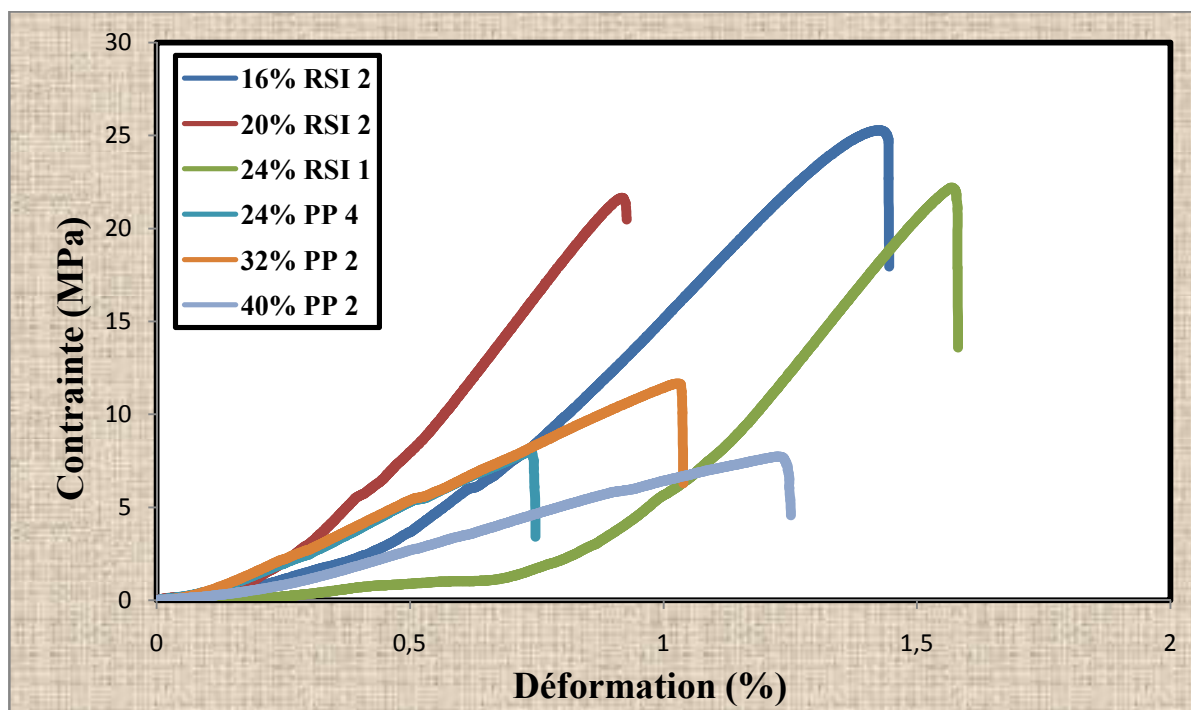
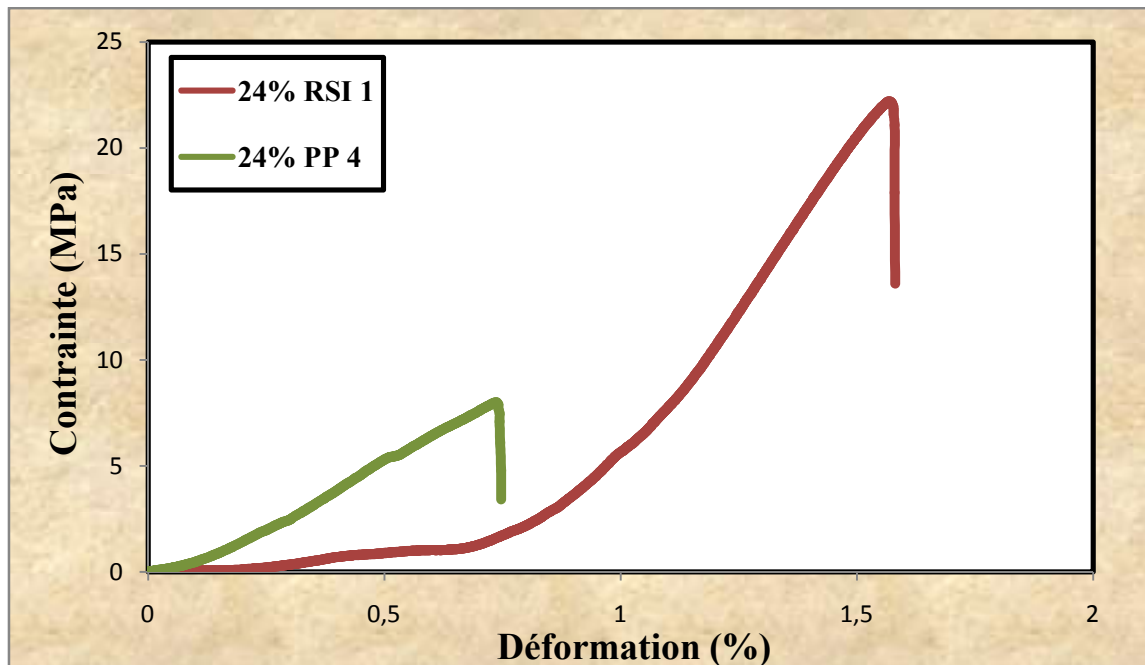


Fig. V.4: Superposition des évolutions de la contrainte en fonction de déformation des types du Béton polymère de résine et de polypropylène.

De même, les deux bétons polymères à matrice TD et à matrice TP, ont été comparés à taux égale (24%). Afin de déterminer l'influence de type de matrice sur les caractéristiques en flexion trois points.

La (figure V.5) montre les deux courbes de contrainte / déformation des bétons polymères.



**Fig. V.5: Superposition des évolutions de la contrainte en fonction de déformation des types du Béton polymère de résine et de polypropylène (24%RSI, 24%PP).**

On observe de façon claire que le matériau BPR 24% enregistre une contrainte à la rupture en flexion, supérieure à celle enregistrée par le matériau BPP 24%. Cette large différence, qui est de l'ordre de 2 fois, est due principalement à la nature des deux matrices TD et TP.

La figure V.6 représente l'histogramme des différentes valeurs des contraintes des différents bétons polymères testés. Cet histogramme montre que le béton polymère de résine enregistre la plus grande valeur qui est 25.3 MPa pour un taux de 16%. Les deux BPR à taux 20% et 24% ont une valeur moyenne de 21.7 et 22.2MPa respectivement.

En revanche les BPP présentent des valeurs nettement inférieures. On peut donc conclure que les BPR offrent des propriétés mécaniques plus élevées que les BPP.

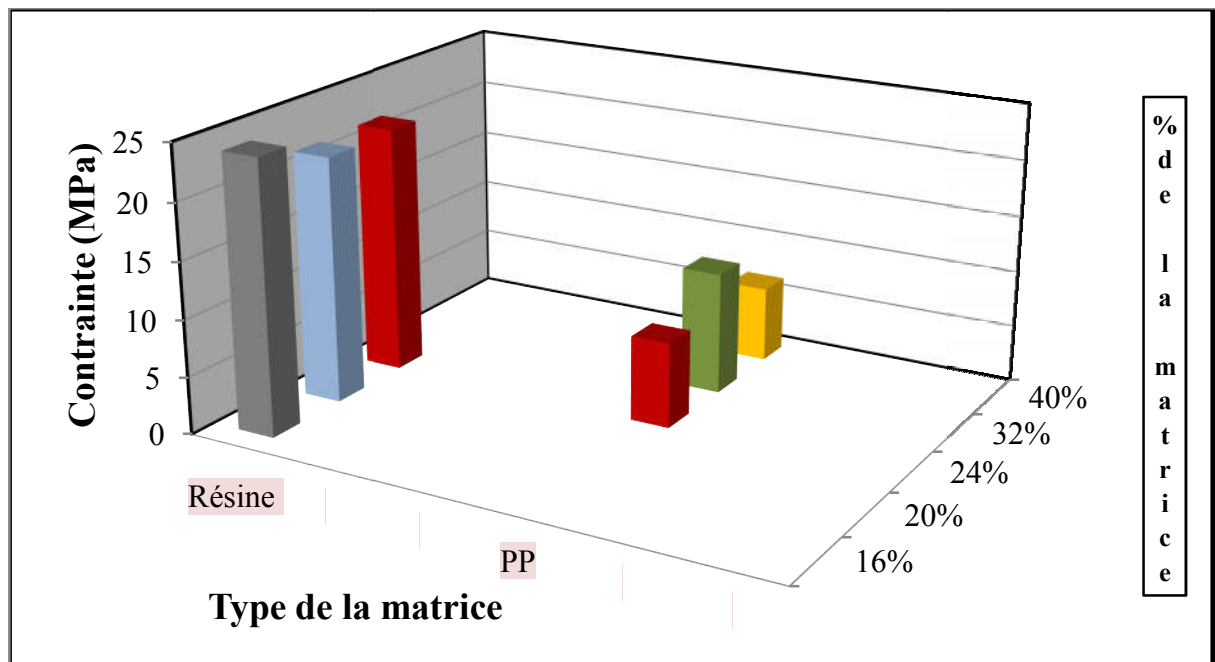


Fig. V.6 : Effet de la nature de la matrice sur la contrainte du BPR, BPP.

## V.2. Analyse des modules en flexion

Les modules de Young sont calculés à partir de la zone linéaire de la courbe contrainte/déformation.

Pour évaluer le comportement de béton polymère à différents pourcentages, La figure V.7 et V.8 représentent la variation du module de Young de béton polymère de résine (a) et béton polymère de polypropylène(b).

A titre de comparaison, le module de Young dans la courbe (a), le BPR à taux 16% présente le module de Young, le plus bas par rapport aux 20% et 24% RSI, puis une augmentation de module jusqu'à 3245.47MPa avec une amélioration de l'ordre 29.78% pour le BPR à taux 20%,une légère augmentation du module de Young entre 20% et 24% de résine de l'ordre 3.38% a été observée.

Cela peut être expliqué par la déformation excessive enregistrée dans les BPR 16% comparé au BPR 20% et BPR 24%, ce qui diminue leurs rigidités.

D'autre part b), le matériau BPP 24% enregistre le meilleur module 1415.6MPa, d'un taux de l'ordre 20.04% par rapport aux BPP 32% et d'un taux de 62.5% par rapport aux BPP 40%, on remarque que module de Young diminue avec l'augmentation de taux de pp, une réduction jusqu'à 870.7MPa pour le pourcentage de 40% pp.

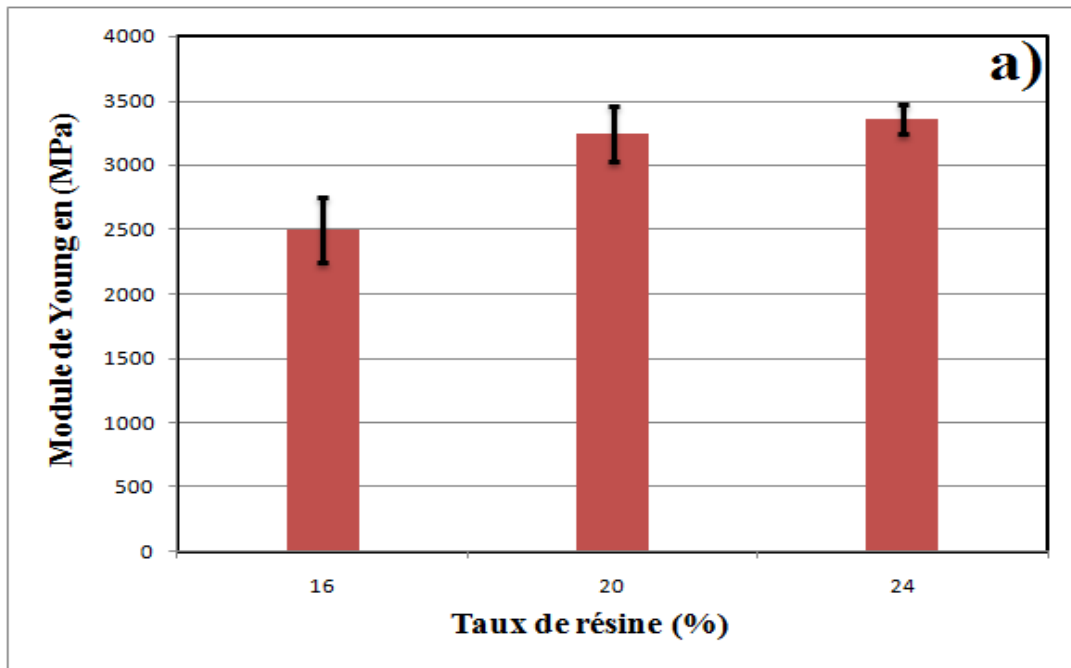


Fig. V.7 : Effet de taux de la matrice thermodurcissable sur la variation de module de Young.

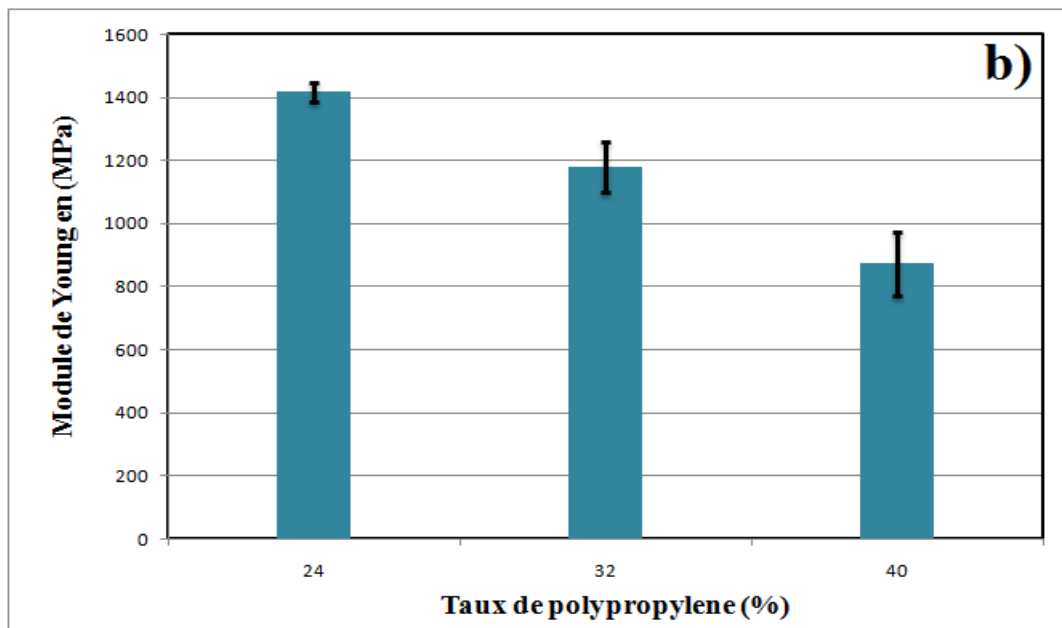


Fig. V.8 : Effet de taux de la matrice thermoplastique sur la variation de module de Young.

Dans cet histogramme (figure V.9) une comparaison des résultats des tests en flexion trois points, on constate une différence des modules illustrée entre le béton de résine et béton de polypropylène.

La rigidité des matériaux BPR 16%, BPR 20% et BPR 24% est nettement supérieure comparée aux BPP 24%, BPP 32% et BPP 40%, (3355.3MPa contre 1415.6MPa).

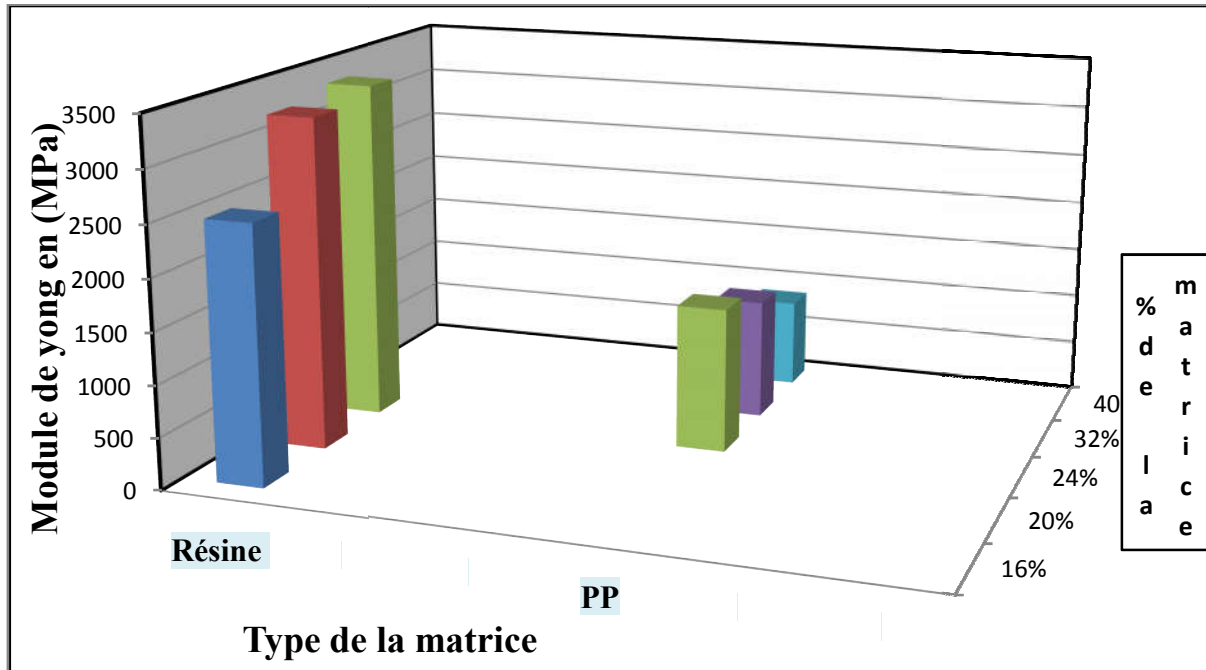


Fig. V.9 : Effet de la nature de la matrice sur la variation du module de Young.

Cette différence de rigidité entre les matériaux BPR et BPP qui est de l'ordre de 57.8%, en addition avec la perte de résistance dans le cas des BPP, nous conduisent à conclure que les bétons polymères à basse de résine TD offrent le meilleur comportement vis-à-vis de la flexion.

### V.3.Analyse de la résistance à la compression

La figure V.10 représente la variation de la résistance à la compression des différents bétons polymères BPR et BPP. On remarque que le béton polymère de résine 16%,20% et 24%RSI marquent des résistances à la compression de (56.9 MPa, 66.4 MPa et 45.65 MPa) respectivement.

Pour le béton polymère de polypropylène (**BPP**) les valeurs de résistance à la compression sont réduites jusqu'à 20.3MPa pour 24%PP, 29.1MPa pour 32%PP, et 24.4MPa pour 40%PP.

Nous avons constaté que la meilleure valeur de la résistance à la compression est obtenue pour un pourcentage optimal de 20% RSI.

D'autre part ; le béton polymère de polypropylène présente un optimum de la résistance à la compression à un taux de polypropylène 32%PP.

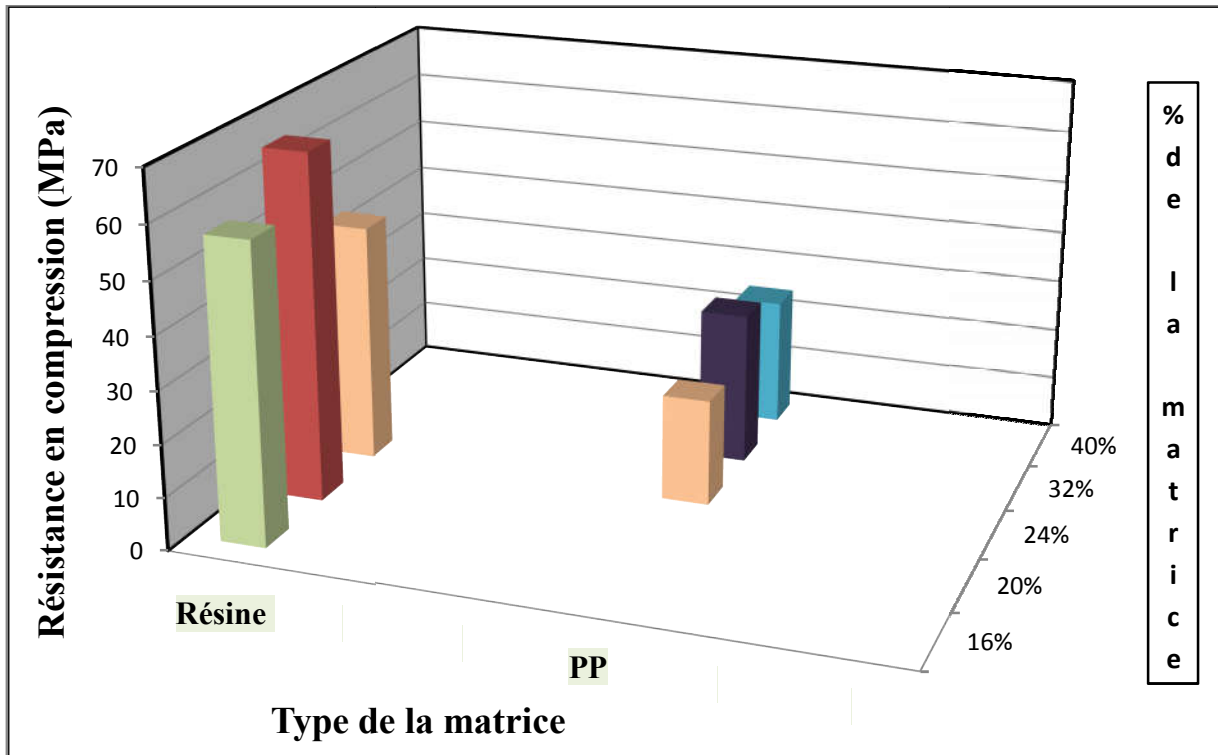


Fig. V.10: Variation de la résistance à la compression des différents BP. BPR et BPP.

Lorsque l'on compare la résistance à la compression à 24% de résine et de pp, nous avons remarqué que la valeur de la résistance de 24%RSI plus élevée que 24%PP, cette différence est remarquable.

Donc le béton polymère à matrice thermodurcissable de résine donne une résistance élevée par rapport au béton polymère à matrice thermoplastique de polypropylène.

Les courbes (a) et (b) de la figure V.11. Illustrent l'influence du taux de la matrice sur la résistance en compression des bétons polymères BPR et BPP.

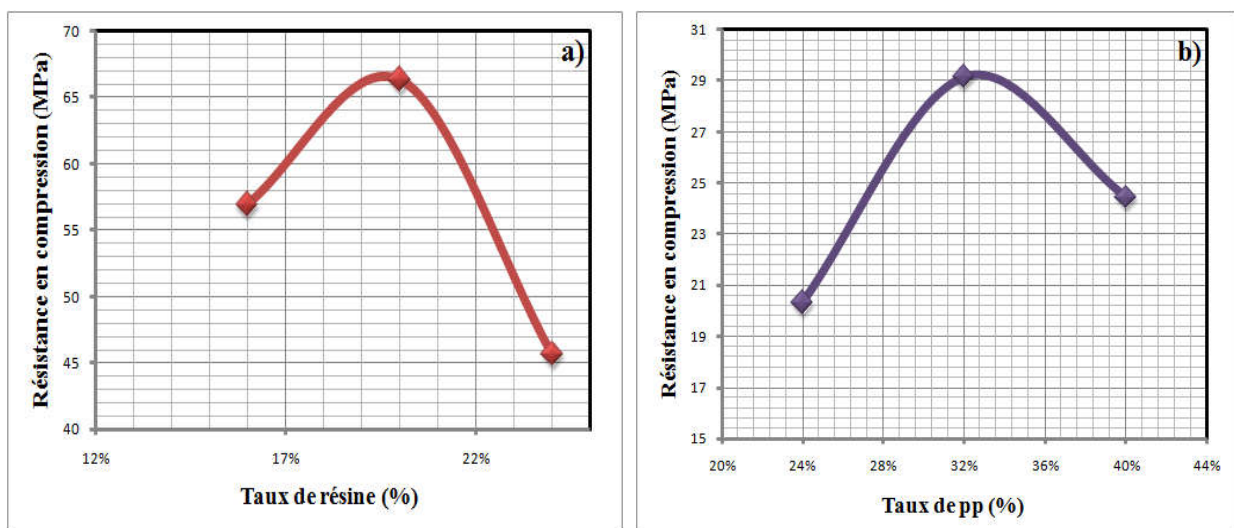


Fig. V.11 : Influence du taux de la matrice sur la résistance en compression.

La courbe a) montre que la résistance augmente avec l'augmentation du taux de la résine de 16% au 20%. Le matériau BPR 20% à enregistrer une amélioration de (10MPa) comparée au BPR 16%.

Cette augmentation peut être expliquée par une meilleure interaction matrice – silice, et une bonne compacité du matériau, due à la bonne saturation du mélange BPR 20%, au de la de ce taux le BPR 24% marque une diminution de résistance (46MPa). Elle peut être due à la saturation du mélange BPR 24% provoquant une chute de résistance. On peut conclure que le taux optimal des BPR en termes de résistance à la compression est de 20%.

De même, l'influence du taux de la matrice dans les bétons BPP, a été observée. On constate que le matériau BPP 32% à marquer une résistance supérieure de 8.9 MPa et 4.8 MPa comparée aux BPP 24% et BPP 40%. On peut retenir que le taux optimal dans le cas des BPP est de 32%.

#### V.4. Influence de taux de la matrice sur les propriétés physiques

##### V.4.1. Analyse des courbes de tests d'absorption :

La figure V.12 représente les courbes de teste d'absorption, en vue d'évaluer les propriétés physique. On remarque que le pourcentage d'absorption obtenu dans les deux courbes est faible. Il est de 0.2% et 0.46%. Ce qui indique que le moulage de béton était bon.

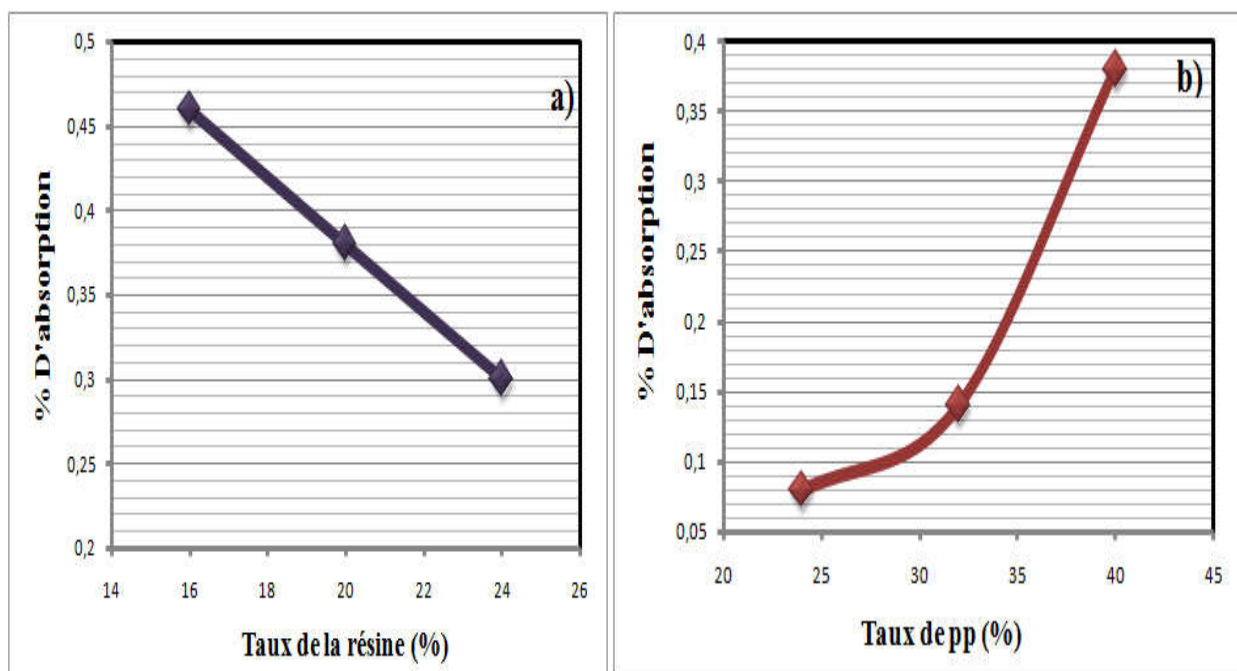


Fig. V.12 : Influence du taux de la matrice sur les propriétés physiques des BPR et BPP.

a) Béton polymère de résine, b) Béton polymère de polypropylène.

La courbe (a) illustre une diminution de pourcentage d'absorption en fonction de l'augmentation de taux de la résine, cette diminution est linéaire.

Dans la courbe (b) on remarque que le pourcentage d'absorption augmente avec l'augmentation de taux de polypropylène.

Ce phénomène peut être expliqué par la présence des pores dû au dégazage du mélange BPP et sa mise en œuvre (moulage) très difficile.

**V.4.2. Analyse des histogrammes de test perte au feu :**

La figure V.13 et V.14 présente les taux des matières premières utilisé comparé avec les taux résultant après le test perte au feu. Ce test a été réalisé afin de confirmer les taux des matières utilisé pour la préparation des échantillons.

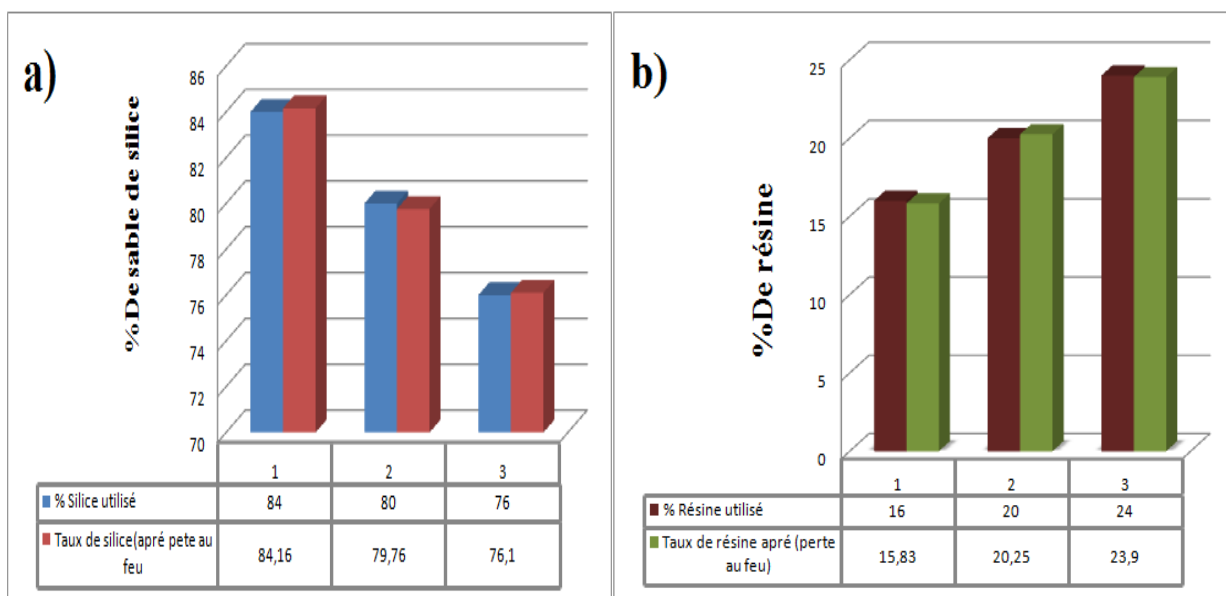


Fig. V.13 : Taux de matière premier de béton polymère résine a)Sable de silice b) Résine.

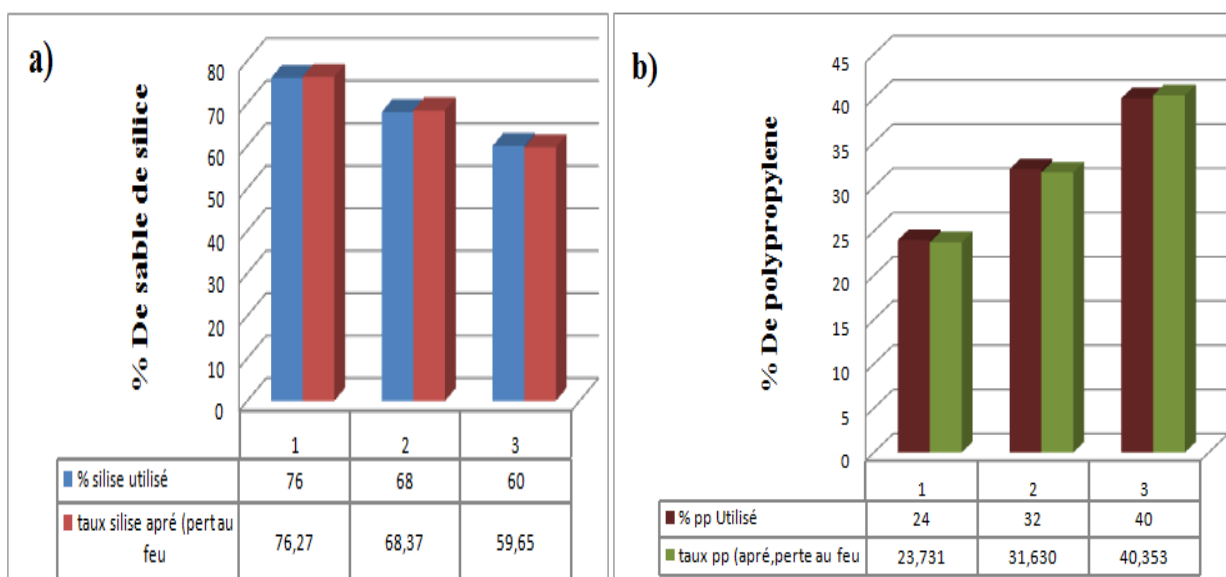


Fig. V.14: Taux de matière premier de béton polymère résine a)Sable de silice b) Polypropylène.

Après l'observation des histogrammes (a) et (b). Nous permet de dire pour les deux figures V.13 et V.14 nous avons remarqué que les pourcentages de sable de silice, de résine et le polypropylène, sont très précis avec une petite masse des d'erreurs, en plus ou en moins.

### V.5. Faciès de rupture des bétons polymères :

Dans cette partie seront présentés les résultats morphologiques, et ce, en termes d'état de dispersion et de distribution de la matrice thermodurcissable et la matrice thermoplastique.

La figure V.15, montre l'état de dispersion et de distribution de la matrice ; Les faciès de rupture des éprouvettes en flexion trois points des différents pourcentages de résine pour le béton polymère à matrice thermodurcissable BPR.

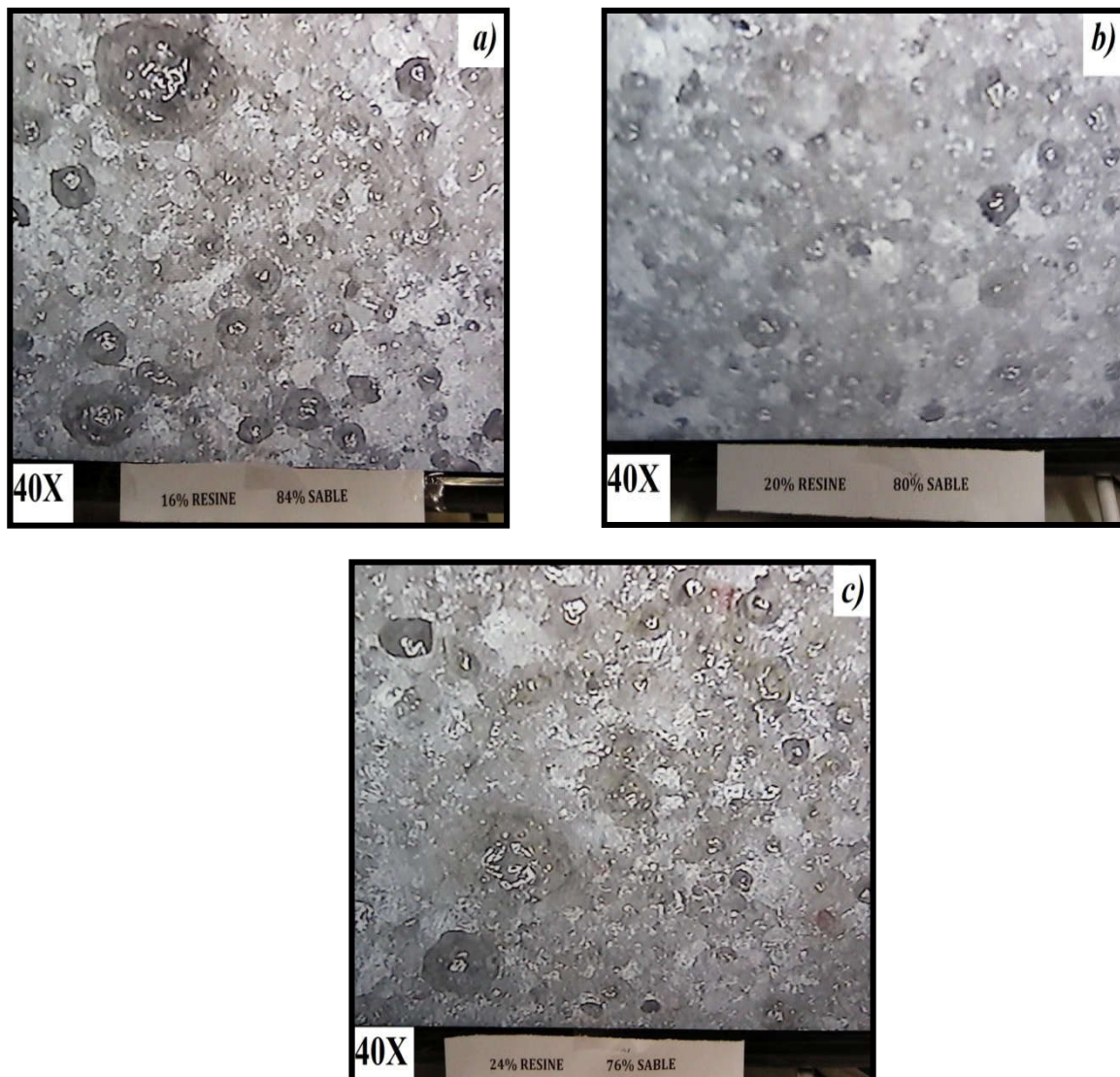


Fig. V.15: Faciès de rupture :a) BPR (16%RSI), b) BPR (20%RSI), c) BPR (24%RSI).

Des observations au microscope numérique ont été effectuées sur les différentes formations de BPR, l'analyse des micrographes figure V.15, confirmé que les vides entre les granulats et la matrice sont réduits clairement en augmentation le taux de la résine polyester de

BPR 20% (b), par rapport aux BPR 16%, où nous avons constaté des espaces entre la matrice et le renfort. Puis dans l'image (c) il y a un taux élevé de résine de BPR 24% par rapport aux BPR 20%.

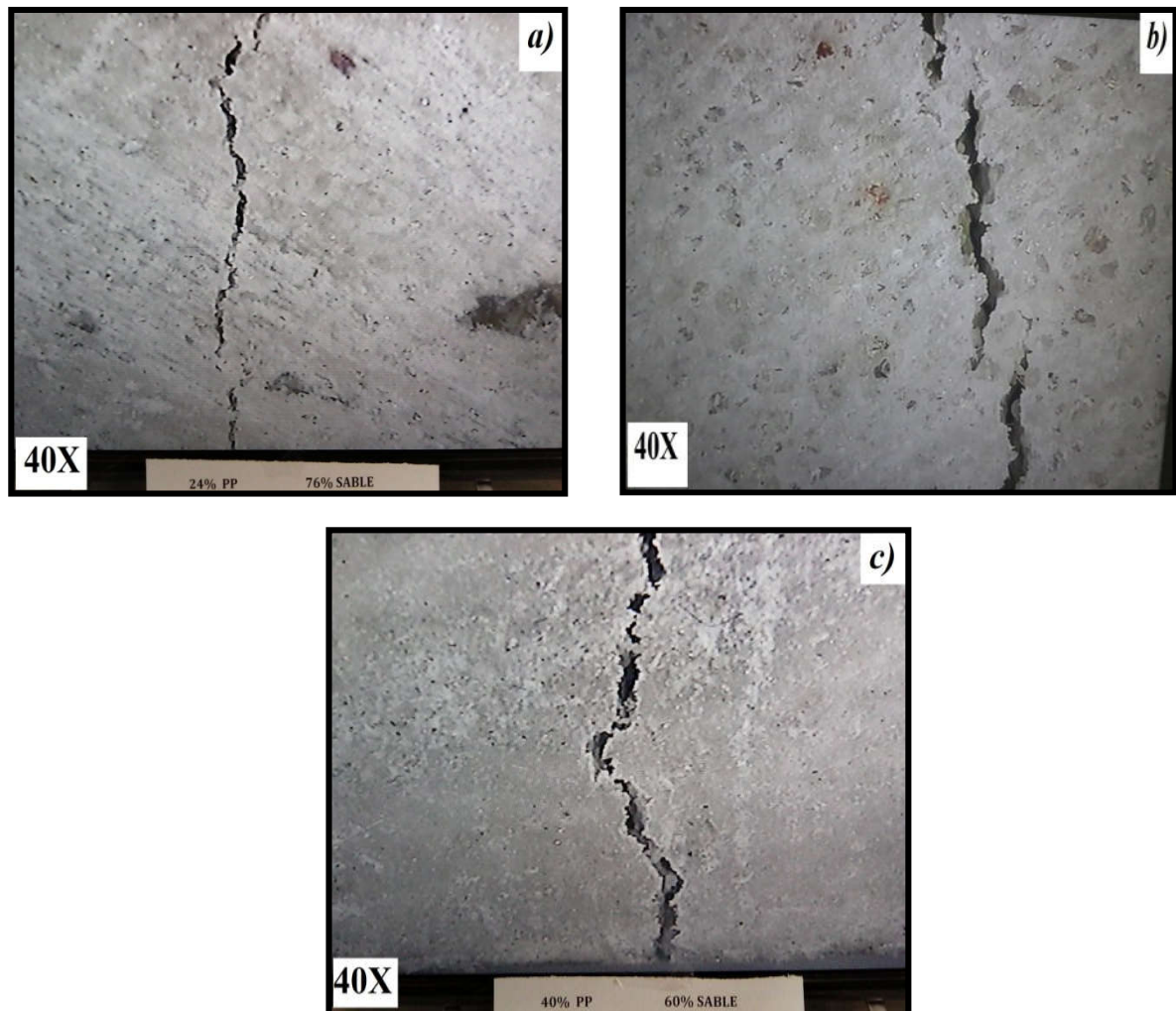


Fig. V.16: Faciès de rupture :a) BPP (24%PP), b) BPP (32%PP), c) BPP (40%PP).

Bien que les bétons polymères à base de résine et de polypropylène, présentent des modes de rupture similaires, les BPP ont un mode de rupture moins violent comparé au BPR.

#### Conclusion :

L'ensemble des tests réalisés nous ont permis d'aboutir à une étude approfondie sur le comportement de deux bétons et de conclure que le matériau BPR offre des propriétés mécaniques plus élevées que les BPP, des points de vue comportement en compression et en flexion ainsi que du point de vue rigidité.

## *Conclusion générale*

Le travail réalisé dans ce mémoire a été consacré dans un premier temps à faire une synthèse bibliographique sur les matériaux composites, les bétons polymères et la théorie de la mécanique de rupture. Ensuite une étude expérimentale et numérique a été réalisée sur le béton polymère de résine et le béton polymère polypropylène.

D'après l'analyse des résultats de test en flexion trois point sur les différentes éprouvettes en bétons polymères à base de résine et de polypropylène, nous avons constaté que le BPR 16% a enregistré la résistance maximale 25.3 MPa par rapport au BPR 20% et BPR 24%, 21.7 MPa, 22.2 MPa respectivement. D'autre part, dans le cas de composite à base de polypropylène la résistance maximale est obtenue par le matériau BPP 20% (11.07MPa). Ce résultat montre que les bétons polymères à base de résine thermodurcissable offrent les meilleurs résultats en flexion trois point (25MPa). Tandis que les bétons à base de résine thermoplastique (BPP) enregistrent des résistances inférieures de 50% par rapport au BPR, justifié par la différence en nature et propriétés des deux matrices.

Le module de Young du matériau BPR augmente avec l'augmentation du taux de la résine. La valeur du module la plus élevée est obtenue par le composite BPR 24% (3355.3MPa). Le béton polymère à base de polypropylène (BPP) enregistre une diminution du module avec l'augmentation du taux de polypropylène. Le matériau BPP 24% a donné la meilleure valeur en rigidité.

La comparaison des résultats, des modules de Young entre le béton de résine et le béton de polypropylène, nous conduit à conclure que les composites BPR offrent le meilleur comportement vis-à-vis à la flexion.

Les résultats des tests en compression montrent que le matériau BPR 20% a enregistré une amélioration de (10MPa) par rapport aux BPR 16%. Donc on peut conclure que le taux optimal des BPR en termes de résistance à la compression est de 20%. De même, dans le béton de polypropylène, nous avons constaté que le taux optimal dans ce cas est de 32%.

Donc le béton polymère à matrice thermodurcissable (polyester) donne une résistance élevée par rapport au béton polymère à matrice thermoplastique de polypropylène.

En évaluant les propriétés physiques des deux bétons polymère, nous avons remarqué que le pourcentage d'absorption obtenu est faible. Il est de 0.2% et 0.46%. On peut donc conclure que le béton polymère absorbant moins d'eau.

Les BPR affichent un comportement meilleur par rapport au BPP. Toute fois les résultats, obtenus pour les BPP, que ce soit en flexion ou en compression, nous encourage à les utiliser en substitution des bétons ordinaires à base de matrice cimentaire. En particulier dans les milieux agressifs, de plus que la matrice thermoplastique peut être recyclée.

## *Perspectives :*

- Surmonter le problème de la présence des pores dû au dégazage lors de la formulation par BPP par une autre méthode.
- Réaliser une étude sur comportement mécanique des composites thermoplastiques avec une autre méthode de moulage, et ajouter des fibres à faible coût et de nature renouvelable, afin de parvenir à un développement durable.
- Expérimenter différents taux de polypropylène pour déterminer l'optimum et étudier le comportement de nouveau matériau BPP.
- Etude la durabilité des bétons polymères dans un environnement agressif.

- [1] Jérémie Aucher, « *étude comparative du comportement composite à matrice thermoplastique ou thermodurcissable* », thèse de doctorat, INSA de Rouen, France, 2009.
- [2] CARMA, « *Glossaire des matériaux composites* », centre d'animation régional en matériaux avancés, Décembre, 2006.
- [3] LaarejMerad, « *ETUDE PAR SPECTROSCOPIE RAMAN ET MODELISATION D'UNE RESINE COMPOSITE RTM* », thèse de doctorat, Université de Tlemcen, Janvier 2010.
- [4] HaddadiManel, « *étude numérique avec comparaison expérimental des propriétés thermoplastique des matériaux composites à matrice polymère* », mémoire master, université Al Hadj Lakhdar, Batna, 2011.
- [5] Daghefel Azzedine, « *Étude du comportement à la rupture du béton polymère renforcé par des fibres végétales* », mémoire master, université de M'sila, juin 2012.
- [6] A. Guidoum, « *cours de matériaux de construction* », université de Constantine.
- [7] Baali Hafida, « *étude de l'effet du traitement chimique des fibres de palmier dattier sur le comportement mécanique du béton polymère* », mémoire master, université de M'sila, juin 2014.
- [8] Zapata Massot Céline, « *synthèse de matériaux composite par Co-broyage en voie sèche et caractérisation des propriétés physico-chimique et d'usage des matériaux* », institut national polytechnique de Toulouse, décembre 2004.
- [9] P.E.Bourban,L.Carlsson,and J.P.Mercier ,«*Matériaux composites à matrice organique:constituants, procédés, propriétés*» , PPUR presses polytechniques, 233 p ,ISBN :(2004) 2880745284, 9782880745288.
- [10] Oussama Elalaoui, « *optimisation de la formulation et de tenue aux hautes températures d'un béton à base d'époxyde* », thèse de doctorat, université de Tunis EL-Manar, février 2012.
- [11] N. ZANACHEa, A. BEZAZib, H. BOUCHELAGHEMb,c, M. BOUMAAZAa, S. AMZIANEd, F. SCARPA «*Etude statistique et Caractérisation Mécanique des Bétons Polymères Sollicités en Flexion*», *Congrès Français de Mécanique*,Lyon, 24 au 28 Août 2015.
- [12] <http://www.beton-imprime-technologie.info/mur-beton.html>.
- [13] Rachid Berbaoui, « *identification et analyse de l'endommagement par fatigue des matériaux granulaire à base polymère* », thèse de doctorat, université du Maine option génie mécanique, janvier 2010.

- [14] LakelAdel, « *Évaluation de la dégradation de propriétés et le comportement du béton polymère à renfort de fibres végétales et additifs minéraux* », mémoire master, université de M'sila, Juin 2012.
- [15] cours connaissance du textile, « *la classification des fibres* », Institut provincial de Nursing du centre manage, janvier 2009.
- [16] L.E. Kukacka, « *Polymerconcretematerials for use in geothermalenergy processes* », Symposium on materials in geothermalenergysystems, Austin, TX, USA ,Brookhaven Nat. Lab.—BNL 24214, pp. 261–284, 1978.
- [17] J.M.L Reis, « *Fracture mechanics of polymerconcrete* ». PhD. Thesis, Université de Porto, 2003.
- [18] <http://www.aac-mo.com/qu-est-ce-que-beton-polymere.html>.
- [19] A.Boulaouad, « *cours de la mécanique de rupture* », université de M'sila, 2015.
- [20] ESPCI, « *élasticité-plasticité-rupture mécanique du solide et des matériaux* », laboratoire d'hydrodynamique et mécanique physique.
- [21] Rokbi Mansour, « *comportement a la rupture et caractérisation mécanique de composites polyester-verre* », mémoire magister, centre universitaire Mohamed Boudiaf de M'sila,
- [22] Kondo Djmédo, « *modalisation du comportement des roches par la mécanique linéaire* », thèse de doctorat l'université des sciences et technique de Lille.
- [23] Hanen Amor, « *Approche variationnellendes lois de Griffith et de Paris via des modeles non-locaux d'endommagement Etude theorique et mise en œuvre numérique* », thèse doctorat Université de Paris XIII, 25 juin 2008.
- [24] Claude Bathias et Coll, « *Matériaux composites* », Edition paris ,2005-2009, pp 31-72.
- [25] Le polyester, CMS, France, [www.cms-France.fr](http://www.cms-France.fr).
- [26] Dr.Boubakar, Zaouachi, « *les résines* », cours matériaux composites, 2011.
- [27] Jozef Bicerano, « *Prediction of polymer properties* », New York, Marcel Dekker, 2002, 3<sup>e</sup> éd., 746 p. (ISBN 0-8247-0821-0), p. 196.
- [28] <http://www.psrc.usm.edu/french/pp.htm>.

# Annexes

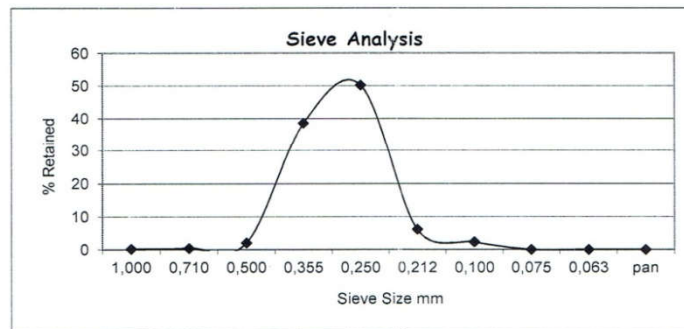
 Spa, Adwan Chemicals. C Algeria	<b>Bulletin d'analyse</b>	Doc. Lab. 04
		Version: 00
		Date: 21/11/2010

Product	Sable sèche (0,2-0,5) mm
Date	24/03/2016

Client	Maghreb pipe
--------	--------------

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	TiO <sub>2</sub>	CuO	H <sub>2</sub> O
98,27%	0,660%	0,154%	0,014%	0,158%	0,272%	0,0018%	0,02%

Analyses granulometrie			
Diametres		% Ret.	Result
mm	Mesh		
1,000	18	0,17	94,98%
0,710	25	0,44	
0,500	35	2,09	
0,355	45	38,57	
0,250	60	50,25	
0,212	70	6,16	
0,100	150	2,31	
0,075	200	0,01	
0,063	230	0,00	
pan		0,00	



Charge de laboratoire

Laboratoire  
 Adwan Chemicals Company SPA  
 ALGERIA

Annexe 1 : Fiche technique de sable de silice.



## TECHNICAL DATA SHEET

# POLYESTER RESIN 716.09

### TYPE

Unsaturated polyester resin for GRP, based on isophthalic acid and NPG (Neopentyl Glycol)

### PROPERTIES AND APPLICATION

- excellent mechanical properties
- high HDT
- outstanding durability
- specially formulated resin as inner liners for tanks and pipes

### PHYSICAL CHARACTERISTICS OF THE LIQUID RESIN

Test	Value	Unit	Method
Appearance	clear		
Density at 25°C	1050 – 1150	Kg/m <sup>3</sup>	ISO 2811
Acid value	10 – 20	mgKOH/g	ISO 2114
Styrene content	41 – 45	%	MP 4221
Viscosity at 25°C	330 – 410	mPa.s	ISO 3219 Brookfield
Flash point	34	°C	DIN 51755
Storage life at 25°C in darkness	6	month	

### CURING CHARACTERISTICS

Gel time at 25°C	8 – 12	min.	MP 471 100 g resin 0.25 % Co Acc. 6 % 1.5 % MEKP-50
Time gel – peak	10 – 20	min.	
Peak Exotherm	170 – 190	°C	

### PHYSICAL CHARACTERISTICS OF CURED NON-REINFORCED RESIN

Density at 20°C	1150 - 1200	Kg/m <sup>3</sup>	ISO 1183
Barcol hardness	35 - 45		EN 59
Tensile strength	50 – 70	Mpa	ISO R 527
Elongation at break	4 - 5	%	ISO R 527
Flexural strength	70 – 90	Mpa	ISO 178
E – modulus in tension	3200 – 3600	MPa	ISO R 527
Water absorption	< 1,5	%	ISO 62
Heat distortion temperature	80 – 100	°C	ISO 75 A
Glass transition temperature	95 – 115	°C	Internal method *

\* Internal method: DSC 20, TC 11 K-Mettler

### HANDLING AND SAFETY PRECAUTIONS

POLYESTER RESIN 716.09 is flammable liquid and should be kept away from naked flames. For further details, please see the relevant Safety Data Sheet.

Our data sheets are based on results achieved through laboratory experiments in our technical departments. The information contained is correct to the best of our knowledge and is supplied for the guidance of our customer involving no responsibility on our part.

## Product Data Sheet

# Polypropylene

## Bormod™ BH975MO

### Block Copolymer for Injection Moulding

#### DESCRIPTION

**BH975MO** is a heterophasic copolymer. This grade is characterized by optimum combination of very high stiffness, good flow properties and good impact strength.

Products moulded with this grade exhibit excellent antistatic performance and very good mould release.

BNT nucleation, in combination with excellent stiffness and good flow properties creates a high potential for wall-thickness reduction.

#### APPLICATIONS

Appliances  
Pails

White goods  
Houseware

#### SPECIAL FEATURES

Excellent flow behaviour  
Very good impact performance for low temperature applications  
Good antistatic properties  
Reduced cycle time and increased output

#### PHYSICAL PROPERTIES

Property	Typical Value	Test Method
Density	900 - 910 kg/m <sup>3</sup>	ISO 1183
Melt Flow Rate (230 °C/2.16 kg)	38 g/10min	ISO 1133
Tensile Modulus (1 mm/min)	1500 MPa	ISO 527-2
Tensile Strain at Yield (50 mm/min)	4 %	ISO 527-2
Tensile Stress at Yield (50 mm/min)	25 MPa	ISO 527-2
Heat Deflection Temperature (0.45 N/mm <sup>2</sup> )*	96 °C	ISO 75-2
Charpy Impact Strength, notched (23 °C)	8 kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179/1Ea
Charpy Impact Strength, notched (-20°C)	4.5 kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179/1Ea
Hardness, Rockwell (R-scale)	86	ISO 2039-2

\* Data should not be used for specification work

\* Measured on injection moulded specimens acc. to ISO 1873-2

#### PROCESSING TECHNIQUES

**BH975MO** is easy to process with standard injection moulding machines.

Following parameters should be used as guidelines:

Melt temperature	200 - 250 °C
Holding pressure	200 - 500 bar Minimum to avoid sink marks.
Mould temperature	15 - 40 °C
Injection speed	High

Shrinkage 1 - 2 %, depending on wall thickness and moulding parameters

Borouge Pte Ltd 1 George Street | #18-01 | Singapore 049145  
Tel +65 6275 4100 | Fax +65 6377 1233 |  
www.borouge.com  
Borouge is part of the ADNOC and Borealis group of companies



## STORAGE

**BH975MO** should be stored in dry conditions at temperatures below 50°C and protected from UV-light. Improper storage can initiate degradation, which results in odour generation and colour changes and can have negative effects on the physical properties of this product.

More information on storage can be found in Safety Information Sheet (SIS) for this product.

## SAFETY

The product is not classified as a hazardous preparation.

Please see our Safety Information Sheet (SIS) for details on various aspects of safety, recovery and disposal of the product, for more information contact your Borouge representative.

## RECYCLING

The product is suitable for recycling using modern methods of shredding and cleaning. In-house production waste should be kept clean to facilitate direct recycling.

## RELATED DOCUMENTS

The following related documents are available on request, and represent various aspects on the usability, safety, recovery and disposal of the product.

Safety Information Sheet  
Statement on chemicals, regulations and standards  
Statement on compliance to food contact regulations

## DISCLAIMER

**The product(s) mentioned herein are not intended to be used for medical, pharmaceutical or healthcare applications and we do not support their use for such applications.**

To the best of our knowledge, the information contained herein is accurate and reliable as of the date of publication, however we do not assume any liability whatsoever for the accuracy and completeness of such information.

**Borouge makes no warranties which extend beyond the description contained herein. Nothing herein shall constitute any warranty of merchantability or fitness for a particular purpose.**

**It is the customer's responsibility to inspect and test our products in order to satisfy itself as to the suitability of the products for the customer's particular purpose. The customer is responsible for the appropriate, safe and legal use, processing and handling of our products.**

No liability can be accepted in respect of the use of Borouge products in conjunction with other materials. The information contained herein relates exclusively to our products when not used in conjunction with any third party materials.

## Résumé

Motivé par la propriété de recyclage des thermoplastiques, l'objectif de ce travail est de formuler des micros bétons polymères à base de silice en utilisant deux types de matrices, l'une thermodurcissable et l'autre thermoplastique. Nous étudions les caractéristiques mécaniques et physiques des bétons polymères dans les deux cas et à des différentes factions matrice/silice. Les résultats obtenus seront analysés afin d'aboutir à la formulation optimum.

Ainsi, le présent travail s'intéresse, donc, à l'étude de comportement des bétons polymères dans les deux cas (à base de résine, à base de polypropylène), par l'étude des caractéristiques mécaniques et physiques, afin d'aboutir à la formulation optimum, les résultats de ce travail ; montrent que le BPR donne un comportement meilleur par rapport au BPP. Le matériau BPR 16% à enregistré une résistance maximale à la flexion, et le matériau BPR 20% donne la valeur maximale à la compression.

**Mots clés:** Béton polymère, matrice thermodurcissable, matrice thermoplastique, résine polyester, polypropylène, Extrusion.

## Abstract

Moved by the property of recycling of thermoplastics, the objective of this work is to formulate micro polymeric concretes containing silica by using two types of matrix, one thermoseting and other thermoplastic resin. We studied the mechanical and physical characteristics of polymer concretes in both cases and with varies factions matrix/silica. The results obtained where analyzed in order to define to the optimum formulation.

this work is interested, therefore, to on the studie of behavir of the polymeric concretes in both cases (containing resin, polypropylène), by the study of the mechanical and physical characteristics, in order to lead to the optimum formulation, the results of this work; show that the BPR (polyester, silica concrete) gives a better behavior compared to the BPP (polypropylène, silica concrete). Material BPR 16% with recorded a maximum resistance to the bending, and material BPR 20% gives the maximum value on compression.

**Keywords:** concrete polymer, thermoseting matrix, thermoplastic matrix, resin polyester, polypropylène, Extrusion.

## ملخص

انطلاقاً من خاصية إعادة تدوير اللدائن الحرارية، الهدف من هذا العمل هو تشكيل خرسانة بوليميرية برمل السليكا باستخدام نوعين من الأساسات واحدة لدائن حرارية وأخرى بوليميرات حرارية التصلد. نقوم بدراسة الخصائص الميكانيكية والفيزيائية للخرسانة في كلتا الحالتين و مختلف الفصائل أساس/سليكا. يتم تحليل النتائج المحصل عليها من أجل تحقيق الصيغة المثلى. وبالتالي، العمل الحالي يهتم بدراسة سلوك الخرسانة البوليميرية في كلتا الحالتين (مصنوعة من أساس الراتنج، أساس البولي بروبلين) ،نقوم بدراسة الخواص الميكانيكية والفيزيائية، بغية تحقيق الصيغة المثلى، نتائج هذا العمل تبين أن الخرسانة البوليميرية للراتنج تعطي سلوك أحسن مقارنة بالخرسانة البوليميرية للبولي بروبلين. مادة البوليمير لأساس الراتنج 16 % تستعرض قيمة قصوى للانحناء، و مادة البوليمير لأساس الراتنج 20% تعطي قيمة قصوى للضغط.

الكلمات الرئيسية: الخرسانة حرارية، بوليميرات حرارية التصلد، لدائن حرارية، راتنج البوليستر، بولي بروبلين، قنف.