



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



**Université Amar Thelidji- Laghouat**

**FACULTE: GÉNIE CIVIL ET ARCHITECTURE**

**DÉPARTEMENT : GÉNIE CIVIL**

**MÉMOIRE DE MASTER**

**Présenté par : Boussiha Marwa & Bellakhdar Fatna**

**DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE**

**FILIERE : GENIE CIVIL**

**OPTION : Matériaux en Génie Civil**

**Thème**

**Effet des additions minérales sur le comportement physico-mécanique et sur la durabilité des mortiers résineux modifiés**

**Jury de soutenance :**

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>qualité</b>
Mme. Bendjillali Khadra	M.CA.	Présidente
M. Merah Ahmed	MCA	Examineur
M. Makhloufi Zoubir	M.C.A	Rapporteur
M. Berkak Hichem	Doctorant	Co-rapporteur

**Promotion : 2017/2018**

# REMERCIEMENTS

**N**OUS tenons à remercier notre créateur (DIEU) pour nous avoir donné de la force à Accomplir ce travail

**N**OUS exprimons toute notre reconnaissance à notre encadreur **Mr MAKHLOUFI ZOUBIR** pour avoir accepté de diriger cette étude et dont l'aide précieuse nous a été indispensable sur le plan scientifique. Nous le remercions pour la confiance et la sympathie qu'il nous a témoigné au cours de ces six mois pour prépare le mémoire.

**N**OUS tenons également à remercier notre Co-encadreur **BERKAK HICHEM** pour son aide et ses conseils.

**N**OUS tenons à présenter nos sincères remerciements à tous les enseignants du Département de Génie Civil.

**N**OUS remercions tous les membres du jury **Mme. Bendjillali Khadra** et **Mr. MERAH AHMED**, pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'examiner ce mémoire et pour leur Bienveillante attention.

Enfin, nous adressons un grand merci à toute nos familles qui ont toujours été présente lorsque nous en avons eu besoin, en particulier à nos mères et à nos pères, à nos frères et sœurs et a tous nos proches et amis qui nous ont toujours soutenu et encouragé au cours de la réalisation de ce mémoire .

**MARWA ET FATNA**

# DEDICACES

*\*Mon père qui m'a soutenu et qui m'a encouragé tout au long de mes études, qui est pour moi l'exemple dans la vie et que j'essaye de marcher sur son chemin, que dieu le préserve.*

*\*Ma très chère mère qui a beaucoup sacrifié tout au long de ma vie, que Dieu la préserve.*

*\*Mes frères: Mohamed ,Aymen ,Lokman.  
et Mes sœurs :Safa ,Neserin.*

*\*Plus proche person dans ma vie Yacine*

*\*Mes très chères amis : Sabrina ,Hadjer ,Cherifa  
,Fatiha,Zahra,Ahlem ,Anfel ,Lina ,Noussiba*

*\*Mes tantes Zoubida,Mounira ,Mbarka,nasira,Souhila  
et oncle Maustapha*

*Mes collègue d'étude Yacine,Nacer,Djamel,Ryma,  
Yassmine,Djahida,Mohamed,Farouk*

*Toute ma grande famille, tous mes amis toute la  
promotion 2018*

*Et Tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans ce  
travail*

***Marwa Boussiha***

# DEDICACES

*\*Mon père qui m'a soutenu et qui m'a encouragé  
tout au long de mes études, qui est pour moi  
l'exemple dans la vie et que j'essaye de marcher  
sur son chemin, que dieu le préserve.*

*\*Ma très chère mère qui a beaucoup sacrifié tout  
au long de ma vie, que Dieu la préserve.*

*et Mes sœurs : Neserin ,Sarah,Sihem,Hanan, Malek*

*\*Plus proche personne dans ma vie Rayan*

*\*Mes très chères amis : Sabrina ,Hadjer , Cherifa ,  
Fatiha, Zahra, Ahlem, Rayane*

*\*Mes tantes,Aicha,Zohera,  
et oncle Abass, Mohamed*

*Mes collèges d'étude Yacine,Nacer,Djamel,Ryma,  
Yassmine, Djahida,Mohamed, Farouk,Taher*

*Toute ma grande famille, tous mes amis, toute  
la promotion 2018 et tous ceux qui m'ont aidé de  
près ou de loin dans ce travail.*

**Bellakhdar Fatna**

عنوان المذكرة : تأثير الزيادات المعدنية على السلوك الفيزيائي والميكانيكي وعلى استدامة ملاط المعدل بالبوليمر.

اللقب بوسيحة : الإسم : مروة  
بلخضر : فاطنة  
المؤطر: مخلوفي زبير : بركاك هشام

**ملخص:** يستخدم ملاط الأسمنت المعدل بالبوليمر على نطاق واسع في البنية التحتية المدنية ، الجسور ، ملاط العزل الخارجي بسبب خواصه الفيزيائية و الميكانيكية الممتازة وديمومته الجيدة. تتوفر الإضافات المعدنية مثل البوزولان أو حتى الحشوات الجيرية بكثرة في الجزائر ولكن للأسف لا يتم استغلالها بشكل كاف كإضافات لمخاليط الأسمنت. وقد تم تنفيذ العديد من الأعمال على أداء الملاط الأسمنتي العادي على أساس هذه الإضافات المعدنية. ومع ذلك ، تم إنجاز القليل من العمل على الملاط الاسمنتي المعدل بالبوليمر. الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير الإضافات المعدنية (حشوة الجيرية ، البوزولان الطبيعي وأبخرة السليكا) على تجربة الكربنة المتسارعة للملاط الاسمنتي المعدل بالبوليمر من خلال الاستبدال الجزئي للأسمنت بواسطة البوزولان الطبيعي المستخرج من بني صاف. و / أو حشو كلسي و / أو دخان السيليكا. أظهرت الدراسة التي أجريت أن نسبة البوليمر على الاسمنت والتيتساوي 2.5٪ يمكن أن تكون الأمثل فيما يتعلق بتحسين محتوى البوليمر الإضافي. وقد أظهرت الدراسة الفيزيائية والميكانيكية لقذائف للملاط الاسمنتي المعدل بالبوليمر بما في ذلك إضافات المعادن أن قابلية استخدام للملاط الاسمنتي المعدل بالبوليمر التي تحتوي على إضافات معدنية تتأثر بشدة بالبوليمر ، وكذلك طبيعة ونسبة الإضافات المعدنية. بالإضافة إلى ذلك ، تزداد القوة الميكانيكية مع إضافة السيليكا وحده ، البوزولان بمفرده أو في توليفة من الاثنين «النظام الثلاثي». من وجهة نظر تجربة الكربنة المتسارعة ، فإن الحشوة الجيرية تزيد من عمق الكربنة. من ناحية أخرى ، يقلل الدخان السيليكا من عمق الكربنة. بالإضافة إلى ذلك ، فإن إضافة البوزولان الطبيعي أقل قدرة على تقليل الكربنة من السيليكا. وأخيراً ، تتمتع ملاط الأسمنت العادي وملاط المعدل بالبوليمر بمقاومة أفضل للكربنة

**الكلمات المفتاحية:** ملاط المعدل بالبوليمر ، تجربة الكربنة المتسارعة ، بخار سيليكا ، بوزولانا طبيعي ، حشوة جيرية ، خواص فيزيائية ميكانيكية.

**Memory title:** The effect of the mineral additions on physical-mechanical comportement and on durability of resinous mortar

**Name:** Boussiha Bellakhdar **First name:** Marwa Fatna **Directed by:** Makhloufi Zoubir et Berkak Hichem

**Abstract :** The Polymer-modified cement mortars are widely used in civil infrastructure, bridges, exterior wall insulation mortars because of their excellent physical-mechanical properties and their improved durability. Mineral additions such as pozzolan or even limestone are available in abundance in Algeria but unfortunately not sufficiently exploited as additions to cement mixtures. Several works have been carried out on the performance of ordinary cementitious mortars based on these mineral additions. However, little work has been done on modified softwood mortars. The objective of this work is to study the influence of mineral additions (limestone, natural pozzolan and silica fume) on the accelerated carbonation of modified resinous mortars through the partial substitution of cement by the natural pozzolan of Beni-Saf and / or filler and / or silica fume. The study carried out showed that the P / C ratio (Polymer on Cement) equal to 2.5% could be optimal concerning the optimization of the added resin content. The physico-mechanical study of modified resinous mortars including mineral additions has shown that the workability of modified resinous mortars containing mineral additions is strongly influenced by the resin, as well as the nature and proportion of the mineral additions. In addition, their mechanical strength increases with the addition of silica fume alone, pozzolan alone or in combination of both (ternary system).

From the point of view of accelerated carbonation, the limestone there increases the depth of carbonation. On the other hand, silica fume decreases the depth of carbonation. In addition, the addition of natural pozzolan is less able to minimize carbonation than silica fume. Finally, the ordinary cement mortar and modified resin mortar have better resistance to carbonation

**Key words:** modified resinous mortar, carbonation, silica fume, natural pozzolana, limestone, and physical-mechanical properties.

**Titre du mémoire :** Effet des additions minérales sur le comportement physico-mécanique et sur la durabilité des mortiers résineux

**Noms:** Boussiha Bellakhdar

**Prénoms:** Marwa Fatna

**Encadreur:** Makhloufi Zoubir et Berkak Hichem

### **Résumé :**

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence des additions minérales (fillers calcaires, pouzzolane naturelle et fumée de silice) sur la carbonatation accélérée des mortiers résineux modifiés à travers la substitution partielle du ciment par la pouzzolane naturelle de Beni-Saf et/ou le filler calcaire et/ou la fumée de silice.

L'étude menée a montré que le rapport P/C (Polymère sur Ciment) égal à 2.5% pouvait être optimal concernant l'optimisation de la teneur en résine ajoutée. L'étude physico-mécanique des mortiers résineux modifiés comprenant des ajouts minéraux a montré que leur maniabilité est fortement influencée par la résine, ainsi que la nature et la proportion des ajouts minéraux. En outre, leurs résistances mécaniques augmentent avec l'addition de la fumée de silice seule, de la pouzzolane seule ou en combinaison des deux (système ternaire). Du point de vue carbonatation accélérée, le filler calcaire fait augmenter la profondeur de carbonatation. Par contre, la fumée de silice diminue la profondeur de carbonatation. Par ailleurs, l'ajout de la pouzzolane naturelle est moins capable de minimiser la carbonatation que la fumée de silice. Enfin, le mortier de ciment ordinaire et mortier résineux modifié présentent une meilleure résistance à la carbonatation

**Mots clés:** mortier résineux modifiés, carbonatation, fumée de silice, pouzzolane naturelle, filler calcaire, propriétés physico-mécaniques.

## Liste des figures

<b>Figure I.1:</b> modèle d'interactions entre la matrice cimentaire et un latex lors de l'hydratation du ciment d'un mortier modifié latex [Gemert 04]	<b>16</b>
<b>Figure I.2:</b> (a) résistances en flexion et en compression de mortiers modifiés latex en fonction du taux des substitutions et du taux de latex, (b) résistances en fonction de la cure subie par le mortier et différents latex [Omaha 98]	<b>17</b>
<b>Figure I.3 :</b> Classification des composites béton-résine [OMAHA, 1997]	<b>19</b>
<b>Figure I.4 :</b> lustration des réactions chimiques de la carbonatation	<b>24</b>
<b>Figure I.5:</b> Evolution de la profondeur carbonatée en fonction de la racine carrée du temps	<b>26</b>
<b>Figure I.6 :</b> Relation entre épaisseur carbonatée et dosage en ciment	<b>27</b>
<b>Figure I.7 :</b> Formation de la calcite lors d'une carbonatation accélérée de la portlandite ( $\text{CO}_2=50\%$ ), en fonction de la température	<b>28</b>
<b>Figure I.8:</b> Influence de l'humidité relative sur la profondeur de carbonatation pour des bétons confectionnés avec des rapports E/C de 0.6 (courbe 1) et 0.8 (courbe 2) et conservés 16 ans à 20°C [Wierig Hannover, 1984 ]	<b>29</b>
<b>Figure I.9 :</b> Relation entre résistance à la compression à 28 jours et profondeur carbonatée	<b>31</b>
<b>Figure I.10 :</b> Pouzzolane naturelle	<b>34</b>
<b>Figure I.11 :</b> Diffractogramme aux R.X de la pouzzolane naturelle de Beni-Saf	<b>35</b>
<b>Figure I.12:</b> Diffractogramme aux R-X du filler calcaire	<b>36</b>
<b>Figure II.1 :</b> Courbe granulométrique du sable calcaire	<b>42</b>
<b>Figure II.2:</b> Maniabilimètre type B	<b>46</b>
<b>Figure II.3 :</b> Essai de maniabilité	<b>46</b>
<b>FigureII.4 :</b> Confection des éprouvettes	<b>47</b>
<b>Figure II.5:</b> Conservation des échantillons	<b>47</b>
<b>Figure II.6 :</b> Montage expérimental utilisé dans l'essai d'absorption par immersion	<b>48</b>
<b>FigureII.7:</b> Dispositif expérimental de mesure des résistances à la traction par flexion	<b>49</b>
<b>FigureII.8 :</b> Schéma du dispositif de charge en flexion pour les éprouvettes de mortiers Si F est la charge de rupture en Newton, la résistance à la traction par flexion est donnée par l'expression	<b>49</b>
<b>Figure II.9:</b> Dispositif de l'essai de compression	<b>51</b>
<b>Figure II.10 :</b> Schéma et photographie de l'enceinte de carbonatation accélérée	<b>52</b>
<b>Figure II.11 :</b> Enceinte de carbonatation	<b>53</b>

<b>Figure II.12</b> : Préparation des échantillons pour l'essai de carbonatation	<b>54</b>
<b>Figure II.13</b> : Mise en évidence de l'épaisseur carbonatée par la solution de phénolphtaléine	<b>54</b>
<b>Figure II.14</b> : Principe de mesure l'épaisseur carbonatée sur l'échantillon	<b>55</b>
<b>Figure II.15</b> :Enceinte de la carbonatation accélérée	<b>56</b>
<b>Figure III.1</b> : Effet de l'ajout de résine sur la maniabilité des mortiers résineux modifiés	<b>58</b>
<b>Figure III.2</b> : Coefficient d'absorption par immersion des mortiers (28 jours)	<b>59</b>
<b>Figure III.3</b> : Influence de résine sur la résistance à la traction des mortiers à 3jours	<b>60</b>
<b>Figure III.4</b> : Influence de résine sur la résistance à la traction des mortiers à 7jours	<b>61</b>
<b>Figure III.5</b> : Influence de résine sur la résistance à la traction des mortiers à 28 jours	<b>61</b>
<b>Figure III.6</b> : Evolution de la résistance a la traction par flexion en fonction de l'âge pour les différents mortiers	<b>62</b>
<b>Figure III.7</b> : Influence de résine sur la résistance à la compression des mortiers à 3jours	<b>63</b>
<b>Figure III.8</b> : Influence de résine sur la résistance à la compression des mortiers à 7 jours	<b>64</b>
<b>Figure III.9</b> : Influence de résine sur la résistance à la compression des mortiers à 28 jours	<b>64</b>
<b>Figure III.10</b> : Evolution de la résistance a compression des mortiers en fonction de l'âge	<b>65</b>
<b>Figure III.11</b> : variation du temps d'écoulement en fonction de la composition des mortiersélaborés	<b>66</b>
<b>Figure III.12</b> : Résistance à la traction des mortiers à 3jours	<b>67</b>
<b>Figure III.13</b> :Résistance à la traction des mortiers à 7jours	<b>68</b>
<b>Figure III.14</b> : Résistance à traction des mortiers à 28jours	<b>68</b>
<b>Figure III.15</b> : Evolution de la résistance à la traction en fonction de l'âge pour les différents mortiers	<b>69</b>
<b>Figure III.16</b> : Résistance à la compression des mortiers à 3jours	<b>70</b>
<b>Figure III.17</b> : Résistance à la compression des mortiers à 7jours	<b>70</b>
<b>Figure III.18</b> : Résistance à compression des mortiers à 28jours	<b>71</b>
<b>Figure III.19</b> : Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge pour les différents mortiers	<b>71</b>
<b>Figure III.20</b> : Gain de masse des échantillons pour les différents mortiers en fonction de la durée d'exposition auCO <sub>2</sub>	<b>72</b>
<b>Figure III.21</b> :Evolution de la profondeur de la carbonatation en fonction de la racine carréetemps pour M3	<b>78</b>
<b>Figure III.22</b> : Evolution de la profondeur de la carbonatation en fonction de la racine carrée temps pour M4	<b>79</b>
<b>Figure III.23</b> :Evolution de la profondeur de la carbonatation en fonction de la racine carréetemps pour M5	<b>79</b>
<b>Figure III.24</b> : Evolution de la profondeur de la carbonatation en fonction de la racine carrée temps pour M6	<b>80</b>

<b>Figure III.25:</b> Evolution de la profondeur de la carbonatation en fonction de la racine carrée temps pour M7	<b>80</b>
<b>Figure III.26:</b> Evolution de la profondeur de la carbonatation en fonction de la racine carrée temps pour M8	<b>81</b>
<b>Figure III.27 :</b> Evolution de la masse en fonction de la profondeur de la carbonatation	<b>81</b>
<b>Figure III.28 :</b> Résistance à compression après carbonatation de 28 jours (MPa)	<b>82</b>



# Liste des tableaux

<b>Tableau I.1:</b> Propriétés des types des bétons de résine courants et du béton de ciment Portland	13
<b>Tableau I.2 :</b> Propriété types des bétons	20
<b>Tableau I.3 :</b> Composition chimique des pouzzolane Natural	35
<b>Tableau I.4:</b> Analyse chimique des fillers calcaires (%)	37
<b>Tableau II.1:</b> Composition minéralogique du ciment CEM I 42.5	41
<b>Tableau II.2 :</b> Caractéristiques physiques du ciment CEM I 42.5	42
<b>Tableau II.3 :</b> Propriétés mécaniques du ciment CEM I 42.5	43
<b>Tableau II.4 :</b> Propriétés du sable calcaire	43
<b>Tableau II.5 :</b> Caractéristiques de résine utilisée	43
<b>Tableau II.6 :</b> Composition des liant	45
<b>Tableau III.1 :</b> Composition de la différente construction du mortier résineux	58
<b>Tableau III.2 :</b> Coefficients d'absorption des mortiers préparés	59
<b>Tableau III.3 :</b> Composition de la différente construction du mortier résineux avec des additions minérales	66
<b>Tableau III.4:</b> Résultats de la masse d'échantillons pour les différents bétons, d'après (7,14 et 28 jours)	72
<b>Tableau III.5 :</b> Profondeur de carbonatation pour les échantillons de béton M1	73
<b>Tableau III.6 :</b> Profondeur de carbonatation pour les échantillons de béton M3	74
<b>Tableau III.7 :</b> Profondeur de carbonatation pour les échantillons de béton M4	75
<b>Tableau III.8 :</b> Profondeur de carbonatation pour les échantillons de béton M5	75
<b>Tableau III.9 :</b> Profondeur de carbonatation pour les échantillons de béton M6	76
<b>Tableau III.10 :</b> Profondeur de carbonatation pour les échantillons de béton M7	76
<b>Tableau III.11 :</b> Profondeur de carbonatation pour les échantillons de béton M8	77
<b>Tableau III.12 :</b> Profondeur de carbonatation pour les échantillons de béton M9	77
<b>Tableau III.13 :</b> Résultats des tableaux(5-6-7-8-9-10-11-12 )	78

# Table de matière

Remerciements	01
Dédicace	02
Dédicace	03
Résumés	04
Liste des figures	05
Liste des tableaux	09
Introduction générale	11
<b>CHAPITRE I. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	<b>12</b>
Introduction	12
I-1 Les polymères	13
I-2 Mortier de résine	15
I-2-1. Hydratation du ciment résineux	17
I-2-2. Maniabilité	17
I-2-3. Résistances mécaniques des polymères	18
I-2-4. Durabilité des mortiers et bétons résineux	18
I-3 Classification des Bétons résineux	20
I-4 Béton additionné de résine	21
I-5 Utilisations de résine	21
I-5-1 Utilisation de résine dans les bâtiments	21
I-5-2 Utilisation de résine dans les travaux de drainage et hydrauliques	22
I-6 Carbonatation	22
I-6-1 Processus de carbonatation des bétons	23
I-6-1-1 Diffusion du CO <sub>2</sub> dans le béton et sa dissolution dans la solution Interstitielle	23
I-6-1-2 Carbonatation de la portlandite ( Ca(OH) <sub>2</sub> )	25
I-6-1-3 Carbonatation des C-S-H	25
I-6-1-4 Carbonatation de l'ettringite et monosulfoaluminate	25
I-6-1-5 Carbonatation des aluminates de calcium hydratés	25
I-6-1-6 Carbonatation du C <sub>3</sub> S et C <sub>2</sub> S	25
I-6-1-7 Carbonatation des alcalins	26
I-6-2 Principaux paramètres influençant la carbonatation des bétons	26
I-6-2-1 Paramètres intrinsèques aux bétons	28
I-6-2-2 Paramètres extrinsèques aux bétons	29
I-6-3 Conséquences de la carbonatation	29
I-6-3-1 Corrosion des armatures	30
I-6-3-2 Evolution de la porosité	30
I-6-3-3 Evolution de la teneur en eau	30
I-6-3-4 Modification des propriétés mécaniques	30
I-6-4 Vitesse de carbonatation	31
I-6-5 Cinétique de la carbonatation	31
I-6-6 Retrait de carbonatation	31
I-6-7 Effet des ajouts cimentaires sur la carbonatation du béton	32
I-6-7-1 additions minérales	32
I-6-7-2 Les pouzzolanes	35
I-6-7-3 Les fumées de silice	36
I-6-7-4 Les ajouts calcaire	38
I-6-8 caractérisation expérimentale de la Carbonatation	39
I-7 Conclusion	

## **CHAPITRE II. CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES**

Introduction	41
II-1 Matériaux utilisés	41
II -1-1 Ciment	41
II-1-2 Sable	42
II-1-3 Résine	43
II-1-4 super plastifiant	43
II-1-5 Eau	44
II-2 Formulation des mortiers	44
II-2-1 Composition des mortiers	44
II-2-2 Elaboration des mortiers	45
II-3 Essais réalisés	45
II-3-1 Maniabilité	45
II-3-2 Confection des éprouvettes	46
II-3-3 Mode de cure	47
II-3-4 Absorption par immersion	48
II-4 Résistances mécaniques	48
II-4-1 Essai de rupture par flexion	48
II-4-2 Essai de rupture par compression	50
II-5 Compagne expérimentale	51
II-5-1 Essai de carbonatation	51
II-6 Conclusion	56

## **CHAPITRE III. RESULTATS ET ANALYSES**

Introduction	58
III-1 Effet de résine	58
III-1-1 : Maniabilité	58
III-1 -2: Absorption d'eau par immersion	59
III-1-3: Résistances à la traction par flexion	60
III-1 -3-1 : Résistances de l'âge de 3 jours	60
III-1 -3-2 : Résistances de l'âge de 7 jours	61
III-1 -3-3 : Résistances de l'âge de 28 jours	61
III-1-4: Résistances à la compression	63
III-1 -4-1 : Résistances de l'âge de 3 jours	63
III-1 -4-2 : Résistances de l'âge de 7 jours	64
III-1 -4-3 : Résistances de l'âge de 28 jours	64
III-2: Effet des additions minérales	66
III -2-1 : Maniabilité	66
III-2-2: Résistances à la traction par flexion	67
III-2-2 -1 : Résistances de l'âge de 3 jours	67
III-2-2-2 : Résistances de l'âge de 7 jours	68
III-2-2-3 : Résistances de l'âge de 28 jours	68
III-2-3: Résistances à la compression	70
III-2-3 -1 : Résistances de l'âge de 3 jours	70
III-2-3 -2 : Résistances de l'âge de 7 jours	70
III-2-3- 3 : Résistances de l'âge de 28 jours	71
III-3 : Effet des additions minérales sur la carbonatation	72
III-3 -1 : Evolution de la masse des échantillons dans la chambre de carbonatation	72
III-3 -2 : Evolution de la profondeur de carbonatation avec différents ajouts et différents pourcentages d'ajouts	73

III-3 -3 : Comparaisons de la profondeur de carbonatation des différents bétons	78
III-3 -4 : Evolution de la masse en fonction de la profondeur de carbonations	81
III-3 -5 : Effets de la carbonatation sur la résistance à la compression	82
III-4 : Conclusion	83
<b>Conclusion générale</b>	86
<b>Référence bibliographique</b>	89
<b>Annexes</b>	94

## Introduction Générale

Au cours du dernier demi-siècle, les matériaux de construction (bétons et mortiers) modifiés par des polymères ont été largement utilisés dans le domaine de la construction, cette modification peut améliorer la maniabilité, l'adhérence, l'étanchéité et de nombreuses propriétés des matériaux à base de ciment Portland. Outre ces propriétés, les mortiers et bétons modifiés par polymère ont été utilisés essentiellement comme matériaux de finition ou de réparation, mais le développement de techniques de polymérisation favorise l'utilisation de ces matériaux comme des matériaux principaux de construction dans certains projets. Dans ces applications, l'incorporation de polymère dans les matériaux cimentaire peut permettre d'augmenter la résistance à la traction et à la flexion sans provoquer de diminution sévère de résistance à la compression.

Jusqu'à présent, plusieurs travaux de recherche ont étudié l'effet de divers polymères sur les propriétés physiques, mécaniques, micro structurelles et la durabilité des mortiers et bétons polymériques modifiés. Tandis que les effets d'additions minérales sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité des mortiers modifiés par polymère nécessitent des études supplémentaires et approfondies.

Le but de cette étude est de suivre:

- **en premier lieu**, l'influence de l'ajout de résine sur le comportement physico-mécanique du mortier, et de mettre en évidence l'optimisation du rapport (P/C) (Polymère sur Ciment).
- **en second lieu**, l'effet de substitution partielle du ciment par des additions minérales (filler calcaire, pouzzolane naturelle et fumée de silice) sur le comportement mécaniques des mortiers étudiés.
- **en troisième lieu**, la durabilité des mortiers essentiellement vis-à-vis de la carbonatation accélérée.

Ce travail est composé de trois chapitres:

Une introduction générale

**Le premier chapitre** est consacré à une étude bibliographique orientée autour des mortiers et bétons de résine, ses différentes classes et leurs applications potentielles d'application et le processus de carbonatation.

**Le deuxième chapitre** présente l'ensemble des matières premières utilisées dans la confection des mortiers, et les techniques expérimentales effectuées.

## INTRODUCTION GENERALE

---

**Le troisième chapitre** s'attache à présenter les résultats de l'étude du comportement physico-mécanique et de la durabilité des mortiers testés.

L'analyse est effectuée en se basant sur l'effet d'un certain nombre de paramètres sur les caractéristiques physico-mécaniques surtout la maniabilité, l'absorption par immersion et les résistances mécaniques à la traction et à la compression (3,7, 28 jours), on effectue l'étude de la durabilité du mortier vis-à-vis de la carbonatation accélérée (profondeur de carbonatation, évolution de la masse et des résistances mécaniques après carbonatation).

Enfin, nous présentons une **conclusion générale** sur l'influence de résine et des additions minérales sur le comportement mécanique et la carbonatation des mortiers, en se référant aux résultats obtenus de l'étude expérimentale.

# **CHAPITRE I. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

## Introduction

Ce chapitre comporte deux parties principales :

Une première partie a pour objectif de présenter les différentes classes de béton et mortier de résine, le type de polymère utilisé en tant que liant ou addition ainsi que leurs applications potentielles. Un intérêt tout particulier sera accordé aux travaux réalisés sur l'étude du comportement physico-mécanique des bétons et mortiers résineux.

Le processus de carbonatation est donc décrit dans une deuxième partie de ce chapitre tout en passant en revue sur les principaux paramètres influençant (les additions minérales) ainsi que ses principales conséquences sur la durabilité des structures en béton armé.

### I-1 Les polymères

Un polymère est une matière organique constituée en chaîne de monomères différents ou identiques reliés par des liaisons covalentes. Un monomère peut contenir une ou plusieurs fonctions chimiques susceptibles de participer à la réaction de polymérisation. Si le monomère est bivalent, la polymérisation fournit un homopolymère linéaire ou ramifié. Par contre, si la valence moyenne du monomère est supérieure à deux, les macromolécules formées contiendront des points de branchement (nœuds) et, au-delà d'un taux de conversion critique de la réaction de polymérisation, se produira une réticulation.

La polymérisation désigne une réaction chimique permettant l'obtention d'un polymère solide à partir de monomères de faibles masses molaires. Le produit de synthèse qui en découle est alors un composé linéaire ou ramifié appelé polymère thermoplastique ou un système réticulé de structure tridimensionnelle appelé thermodurcissable préparé à partir de pré polymères linéaires ou ramifiés de faible masse moléculaire, réticulés sous l'effet de la chaleur en présence de durcisseur et d'un catalyseur.

Les deux grands procédés de base de la polymérisation sont :

- La polycondensation ou la polymérisation par étape : C'est une réaction entre monomères di- ou plurifonctionnels tendant à former des macromolécules avec élimination d'un sous-produit, l'eau en général. Le polymère solide se construit par l'intermédiaire d'une série de réactions de condensation successives entre les groupements fonctionnels portés par les monomères et par les macromolécules en cours de formation.
- La polyaddition ou la polymérisation en chaîne : C'est une réaction qui génère des polymères de longueurs spécifiques, sans aucun sous-produit. L'obtention du produit de synthèse final se fait en un temps très court grâce à la présence de centres actifs très réactifs dans les groupes fonctionnels. Ces centres actifs bien qu'ils soient en très petite

concentration permettent d'ajouter en un laps de temps très court un grand nombre de molécules du monomère [BLAG ,1975].

### I-2 Mortier de résine

Afin d'améliorer la tenue des bétons et mortier aux agressions environnementales sous contraintes mécanique la matrice cimentaire peut être remplacé par une matrice de résine. On obtient ainsi un béton de résine qui est un matériau hétérogène constitué d'un liant d'une matrice polymère et d'un charge minérale.

Ce mortier est un matériau composite dont le liant est formé entièrement d'un polymère organique synthétique. **Le tableau I.1:** représente Propriétés des types des bétons de résine courants et du béton de ciment Portland

Lorsque les renforts sont formés par des sables ou des inclusions de dimensions plus petites, le composite est dit mortier de résine dans les autres cas, on parle de béton de résine. Le remplacement de la matrice cimentaire dans le cas des bétons conventionnels par une matrice polymérique est justifié par l'amélioration de la tenue des bétons aux différentes agressions environnementales de types mécaniques, chimiques ou autres effets ce type de matériaux présente certains avantages:

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 ;

## Chapitre I : Etude bibliographique

**Tableau I.1:** Propriétés des types des bétons de résine courants et du béton de ciment Portland [Blaga et al, 1986]

Matériau	Masse volumique (Kg/dm <sup>3</sup> )	Absorption d'eau (%)	Résistance en compression (MPa)	Résistance à la traction (MPa)	Résistance à la flexion (MPa)	Module d'élasticité (GPa)
Poly(méthacrylate de méthyle)	2-2.4	0.05-0.6	70-210	9-11	30-35	35-40
Polyester	2-2.4	0.3-1	50-150	8-25	15-45	20-40
Époxy	2-2.4	0.02-1	50-150	8-25	15-50	20-40
Furane	1.6-1.7	0.2	48-64	7-8	-	-
Béton de ciment Portland	1.9-2.5	5-8	13-35	1.5-3.5	2-8	20-30

Le béton résineux possède toutefois quelques inconvénients. En effet, le coût de la matière première (principalement le liant) est plus élevé (jusqu'à 8 fois) comparé à celui des bétons hydrauliques constituent un frein quant au développement des bétons de résine.

Par contre le béton de résine peut assurer dans certains domaines d'application une réduction du coût de la main d'œuvre pouvant atteindre 2/3 et une diminution du prix des produits à base de résine qui sont seulement 10% à 25% plus chères que les produits de bétons hydrauliques. Cette économie est réalisable compte tenu de la réduction de l'économie de matières (jusqu'à 50%) en réduisant les dimensions des produits grâce aux résistances élevées du béton résineux, de la réduction des frais de transport 'investissements pendant les opérations de manutention et pendant la fabrication et le stockage comme résultat de décoffrage rapide et de durcissement rapide du matériau qui diminue l'espace nécessaire pour la production et le stockage des produits finis. De plus, 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 place.

Mais, à l'heure actuelle, le frein majeur quant à leur développement est leur comportement aux températures élevées et au feu. Ceci est d'une importance cruciale sur tout lorsqu'on utilise ce béton comme matériau de parement ou pour la décoration intérieure puisque les résines agissant comme liant dans les bétons de résine sont des substances organiques qui résistent beaucoup moins à la chaleur que les matières inorganiques et l'exposition prolongée à des températures élevées n'est donc pas recommandée, car elle entraîne la dégradation de la résine, ce qui se traduit éventuellement par une perte de résistance mécanique.

### I-2-1 Hydratation du ciment résineux

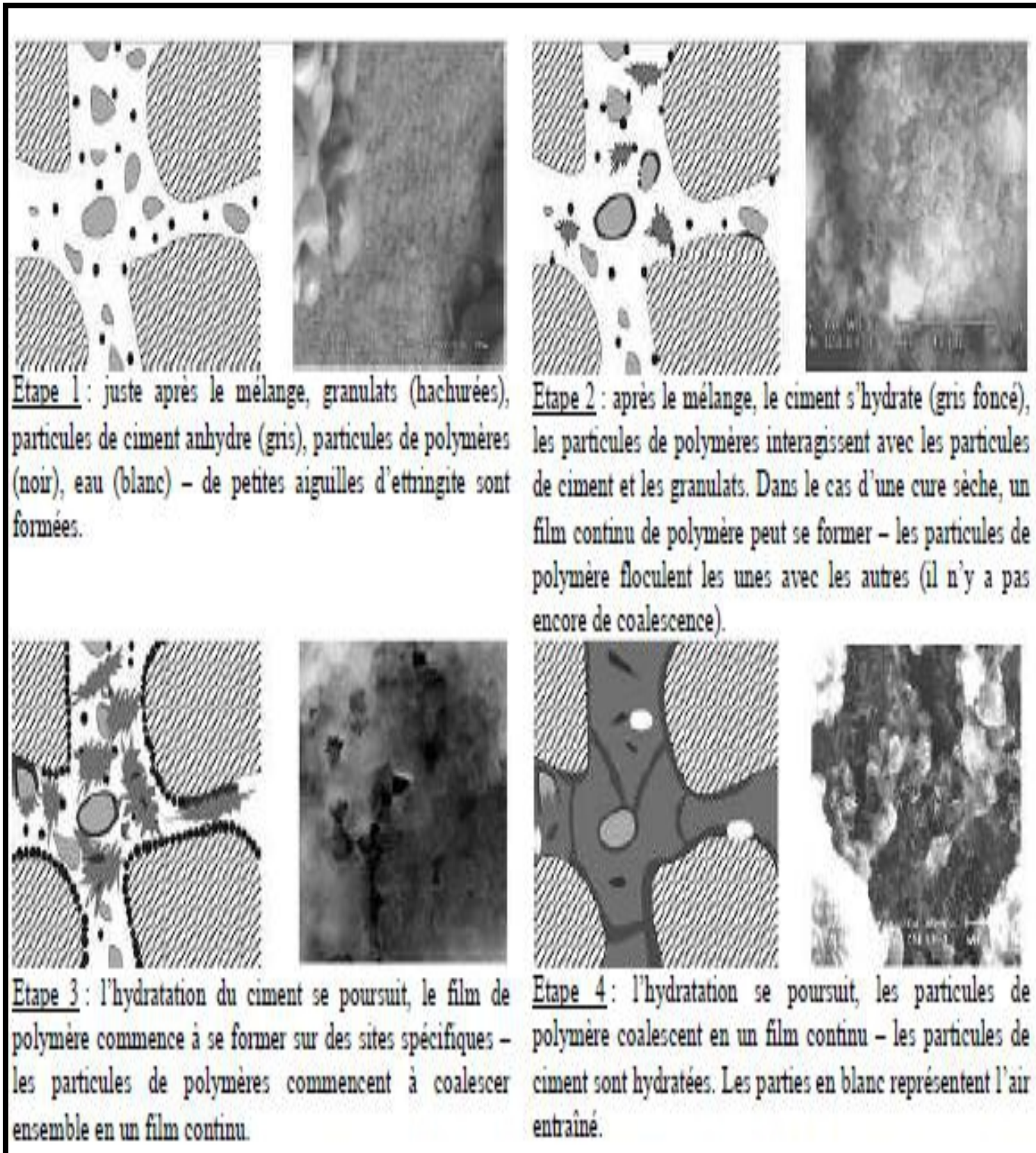
L'hydratation du ciment se fait en même temps que la formation d'une phase pure de polymère correspondant à la coalescence des particules de polymères au moment de l'appauvrissement en eau de la matrice cimentaire.

Il se forme aussi une co-matrice ciment-polymère formant un réseau où les deux phases s'interpénètrent et se lient ainsi aux granulats [OHAMA ,1998].

propose un modèle d'interactions entre la matrice cimentaire et le latex. Quand le latex est mélangé au ciment, les particules de latex sont alors réparties de manière homogène dans la pâte.

Les latex diminuent le taux d'hydratation du ciment à cause de la dispersion du polymère et de son adsorption, mais aussi à cause du système de stabilisation utilisé [RAMAKRISHNA, 1994].

**La figure I.1:** représente Modèle d'interactions entre la matrice cimentaire et un latex lors de l'hydratation du ciment d'un mortier modifié latex.



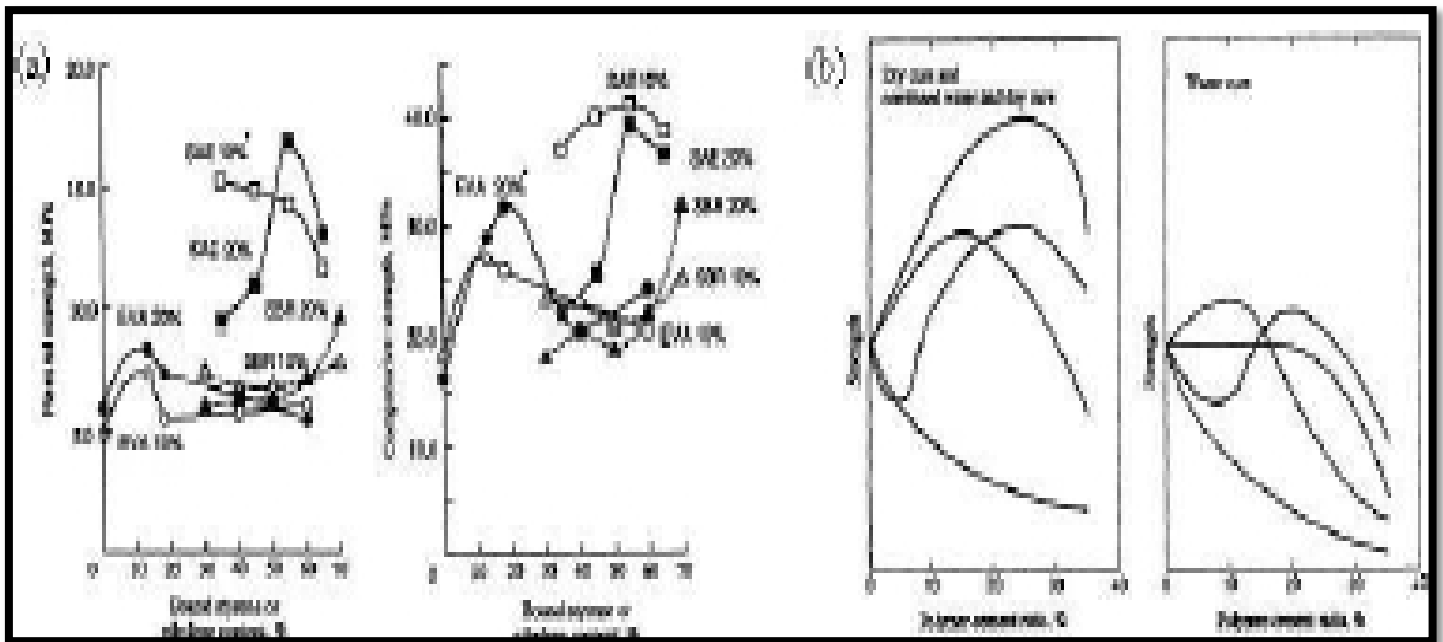
**Figure I.1:** Modèle d'interactions entre la matrice cimentaire et un latex lors de l'hydratation du ciment d'un mortier modifié latex [GEMERT, 2004]

### I-2-2 Maniabilité

Le latex est sous forme liquide, le fait de mélanger le ciment, le sable et l'eau préalablement, l'ajout du latex diminue la quantité d'air entraîné [KIM, 1997], donc l'ajout de latex améliore la maniabilité du mélange ; le mortier nécessite alors moins d'eau pour une même consistance [SU, 1995].

### I-2-3 Résistances mécaniques des polymères

Les polymères époxydes présentent généralement un bon comportement mécanique en traction, compression et flexion (classiquement en traction), une tenue thermique satisfaisante jusqu'à des températures relativement élevées (de 100 à 180°C) et des bonnes propriétés physiques. Les principaux inconvénients sont leur ténacité limitée et leur ductilité faible ; En général, plus la proportion de latex est grande, plus les résistances sont élevées jusqu'à l'ajout d'une quantité seuil où cet effet est inversé (figure I-2 (a)). Les conditions de cure ont également une influence sur les résistances en flexion et en compression. [OHAMA, 1998]. Ces augmentations sont à relier à l'amélioration globale de la liaison entre les grains de ciment par le latex, à la formation du film de polymère et au pontage des microfissures par le polymère [SHAKER, 1997 ; BUREAU, 2001]. On observe une augmentation de la résistance en compression et une continuité des valeurs de résistances en flexion, ce qu'il associe à la bonne résistance en traction des films de polymère.



**Figure I.2:**(a) Résistances en flexion et en compression de mortiers modifiés latex en fonction du taux des substitutions et du taux de latex, (b) résistances en fonction de la cure subie par le mortier et différents latex [OMAHA, 1998]

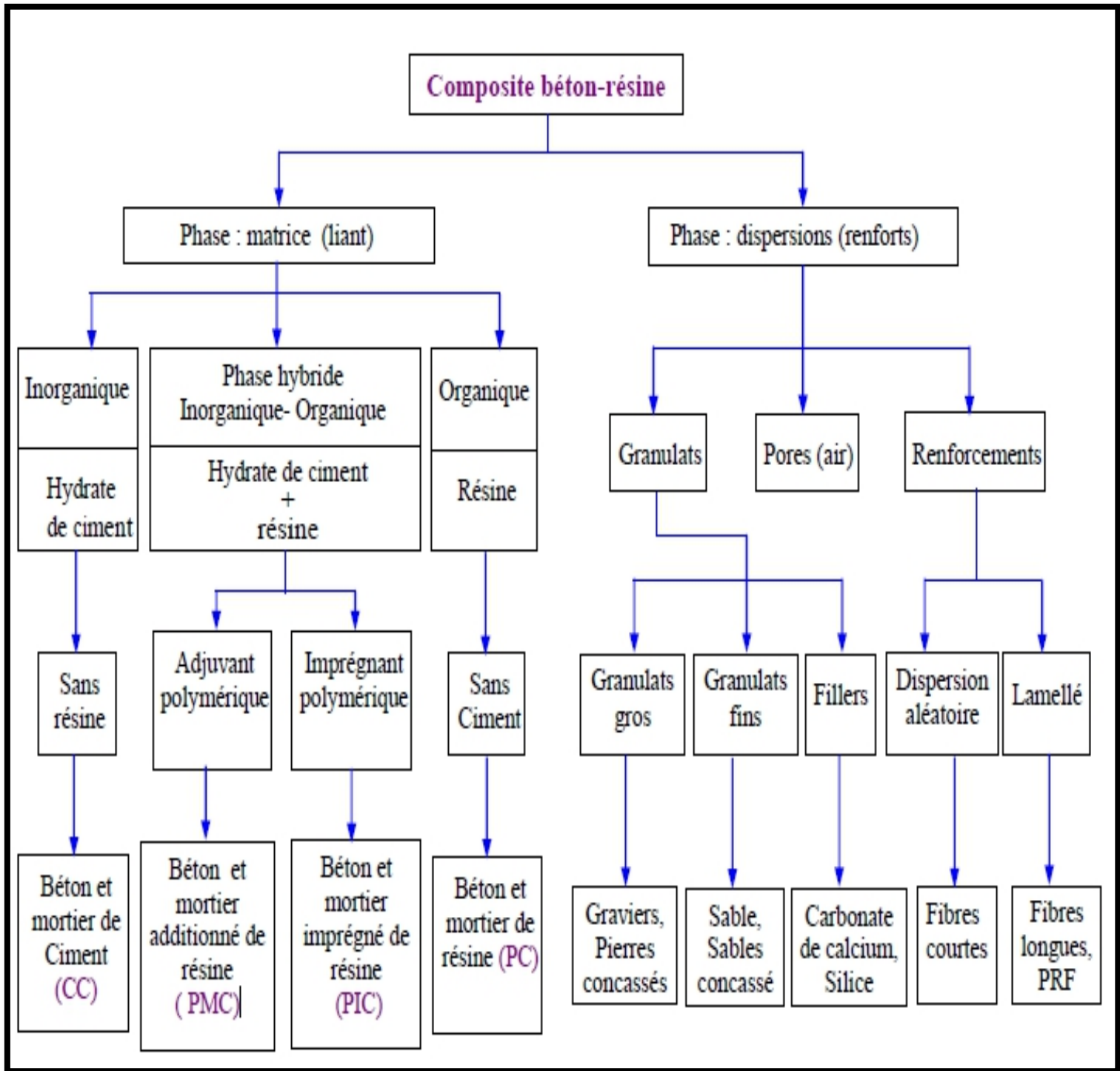
### **I-2-4 Durabilité des mortiers et bétons résineux**

La durée de vie d'un matériau est définie comme étant l'aptitude d'un matériau à conserver ses propriétés originales physiques, chimiques et mécaniques après son exposition à des conditions atmosphériques sévères. L'introduction de polymères améliore considérablement la résistance, l'adhérence, la flexibilité, l'imperméabilité et la résistance aux attaques chimiques des mortiers et bétons [ACI, 2000 ; MIRZ ,2002]. Par ailleurs, une façon fiable d'estimer la durabilité d'une structure en béton résineux est d'étudier ses performances dans des conditions d'exposition naturelles. Ainsi Reis et al. [REIS, 2005] montrent que la période la plus agressive pour le mortier d'époxyde à base d'une résine DGEBA réticulée avec une amine aliphatique est la période printemps/été due aux effets de la température et des rayonnements UV. Dans ce cadre des travaux expérimentaux ont montré que le béton résineux subit des dégradations négligeables sous l'effet de la pollution climatique et peuvent atteindre, une durée de vie de plus de 30 ans.

### **I-3 Classification des bétons résineux**

Les bétons de résine sont classés généralement en trois catégories selon le processus technologique de fabrication [OHAM, 1997]:

- Béton ou Mortier Résineux « BR ou MR » .
- Béton ou Mortier Additionné par des Polymères « MAP ou BAP ».
- Béton ou Mortier Imprégné par des Polymères « MIP ou BIP ».



**Figure I.3:** Classification des composites béton-résine [OMAHA, 1997]

Les applications les plus courantes des bétons et mortiers résineux sont la réalisation d'escaliers, de plaques et panneaux de parements de diverses structures où le rechange partiel ou complet du liant inorganique par un liant organique : le remplacement partiel de la matrice inorganique implique la présence d'une interaction entre la résine synthétique et le ciment donnant naissance à un nouveau matériau avec des caractéristiques un peu particulier. La dernière application des bétons

imprégnés par des polymères concerne la construction du chemin de fer du Grand Coulee Dam en 1982 aux Etats-Unis [OHAMA ,1997].

### I-4 Béton additionné de résine

Les bétons additionnés de résine sont fabriqués en incorporant des mélanges soit des pré-polymères de polyesters insaturés ou d'époxydes, soit dans latex. Les latex sont constitués de microparticules de polymères dispersés dans une solution aqueuse. Les polymères servant à la réalisation des latex sont essentiellement le styrène butadiène (SBR) [SHAKER, 1997 ; MIRZ, 2002], l'acétate de polyvinyle et les acryliques [OHAMA ,1997]. Pour effectuer la polymérisation du monomère ou du pré-polymère-monomère, un catalyseur est ajouté au mélange. La technologie transformatrice utilisée est très semblable à celle du béton conventionnel. Par conséquent, le béton de ciment additionné de polymère peut être moulé sur place, tandis que le béton imprégné par un polymère doit être employé comme structure préfabriquée.

D'autres propriétés y compris la perméabilité à l'eau, la ductilité, l'adhésion à l'acier d'armature et au béton ancien, la résistance en flexion, la résistance en traction, le module d'élasticité et la résistance aux chocs sont modifiées par la présence du polymère dans la matrice (tableau I.2).

Tableau I.2 : Propriété types des bétons [Blaga et al , 1986 ;Kirlikovali ,1981]

Maériau	Résistance à la traction (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Résistance en compression (MPa)
Béton imprégné de résine	10.3	42	144
Béton modifié au résine	4.1	26.2	41.4
Béton de résine	9.6	36.4	137.9
Béton de ciment Portland	1.7	24.8	34.5

L'ajout des modificateurs peuvent être réalisé selon deux procédés:

Les additions modificatrices sont ajoutées au béton frais sous forme d'émulsion polymère. Un tensioactif est nécessaire pour éviter la coagulation et la séparation des polymères (latex, élastomères, thermoplastiques) avant le début de prise;

Les éléments (résine synthétique chimiquement réactive, ou des pré-polymères et des monomères) sont ajoutés au béton frais et la polymérisation est réalisée par un amorçage chimique en même temps que l'hydratation du ciment.

Étant donné que le polymère forme une pellicule superficielle qui empêche dans une certaine mesure l'humidité de s'échapper du béton, la période de cure du béton modifié au latex est habituellement plus courte que celle du béton ordinaire grâce au maintien de l'hydratation.

### **I-5 Utilisations de résine**

Pour les 40 dernières années ou plus, le développement des bétons et mortiers de résine a été mené dans plusieurs pays. Comme résultat, le béton et mortier de résine est devenu un matériau dominant dans l'industrie de la construction pendant les années 1970 en Japon et en Europe et dans les années 80 aux États-Unis.

Aujourd'hui le béton (et mortier) de résine est employé, d'une façon compétitive (rentabilité élevée), comme un matériau de construction courant. Le béton de résine a plusieurs domaines d'application dans le génie civil. Aujourd'hui, le BR est utilisé (d'une façon compétitive) très efficacement comme un matériau de construction courant pour fabriquer un large éventail de produit.

#### **I-5-1 Utilisation de résine dans les bâtiments**

-Production du marbre artificiel.

-Matériau de revêtement et conception des façades pour les formes plus complexes de point de vue architecturale avec des exigences économique et techniques plus strictes.

-Fabrication des éléments (panneaux, appuis de fenêtres, marbres d'escalier, table de travail, haut de table; équipement techniques sanitaire.

#### **I-5-2 Utilisation de résine dans les travaux de drainage et hydrauliques**

L'utilisation du BR 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 BR peuvent avoir jusqu'à 15 mm d'épaisseur (réduction de 1/3 du poids par rapport au béton cimentaire pour des produits similaires).

L'utilisation des formulations à base d'époxyde dans plus de 10 installations hydrauliques aux USA (Mississippi, Missouri, Pennsylvanie, Californie, Arkansas,...) ont donné des résultats satisfaisants. Des études similaires sont menées en France et d'autres pays.

Des conduites fabriquées en BR ont été utilisées en ex-USSR pour les égouts et les systèmes d'irrigation (milieu agressif avec un PH de 3 à 10, pression de 0,2 MPA) en 1970 ne révélant aucun dégâts après 8 ans de service.

Un BR furanique a été utilisé dans le revêtement de la ligne principale des égouts de Prague sur une longueur de 11 km. La conception adoptée a été fort bénéfique puisqu'elle a réduit à 1/3 la main d'œuvre dans les tunnels et à 1/6 dans les fossés à plein air (une économie de 70% sur la main d'œuvre).

Des déversoirs de quelques rivières de l'Asie centrale sont revêtus en BR à base furane (100 à 150 mm d'épaisseur et une aire de 900m<sup>2</sup> dans 5 barrages). Pendant 25 ans de service, ces barrages montrent une grande résistance à l'usure causée par le transport des sédiments.

### **I-6 Carbonatation**

La carbonatation est un phénomène de vieillissement naturel des matériaux à base de liant minéral qui conduit à la formation de carbonates de calcium par réaction entre les composés des ciments principalement la portlandite  $\text{Ca(OH)}_2$  et le dioxyde de carbone atmosphérique ( $\text{CO}_2$ ), présent dans l'air.

Un taux moyen de 0,03 % en volume, ce taux est plus important en milieu urbain qu'en milieu rural.

Cette réaction entraîne la consommation de bases alcalines présentes dans la solution interstitielle des bétons aboutissant une diminution du pH.

Cette réaction chimique naturelle est très lente : dans une structure en service, exposée à l'air libre, seulement 2 ou 3 cm de profondeur sont carbonatés après 50 ans.

La carbonatation est l'un des facteurs principaux de détérioration des structures en béton armé exposées à l'atmosphère.

#### **I-6-1 Processus de carbonatation des bétons**

La carbonatation des bétons est la réaction de neutralisation des bases présentes dans le ciment hydraté, essentiellement la Portlandite et les CSH, par le dioxyde de carbone naturellement présent dans l'air à raison d'environ 0,035 % en volume.

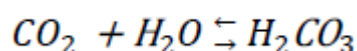
Le processus de carbonatation peut être succinctement décrit comme suit : le dioxyde de carbone atmosphérique diffuse dans le béton sous forme gazeuse, se dissout dans la solution interstitielle

et réagit avec les hydrates de la pâte de ciment, notamment la Portlandite, pour former des carbonates de calcium  $\text{CaCO}_3$  qui existent à l'état solide sous trois formes cristallines différentes : la calcite, l'aragonite et la vénérite [HOUST, 1992]. Cette réaction s'accompagne d'une diminution du pH de la solution interstitielle à une valeur inférieure à 9, dépassant ainsi les aciers dans le cas du béton armé ou précontraint et favorisant, par conséquent, leur corrosion.

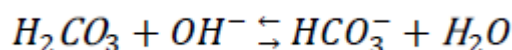
### I-6 -1-1 Diffusion du $\text{CO}_2$ dans le béton et sa dissolution dans la solution Interstitielle

Sous l'effet d'un gradient de concentration, le dioxyde de carbone atmosphérique diffuse dans le réseau poral du béton et se dissout dans la solution interstitielle. Selon le pH de la solution interstitielle, le  $\text{CO}_2$  en solution peut prendre différentes formes [PASCAL, 1968 ; VALSARAJ, 1990]

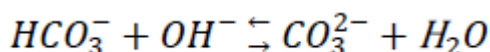
Il se forme de l'acide carbonique si  $\text{pH} < 4$ .



Il se forme de l'ion bicarbonate si  $6 < \text{pH} < 10,5$ .



Il se forme de l'ion carbonate si  $\text{pH} > 10,5$ .

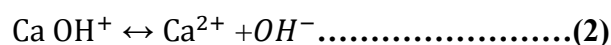
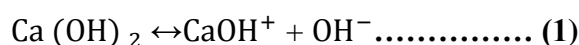


Cette dernière configuration prédomine dans le cas de bétons sains, avant toute attaque Chimique.

### I-6 -1-2 Carbonatation de la portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )

La portlandite est le produit responsable du maintien du pH basique de la solution interstitielle des pores, sa consommation par la réaction de carbonatation induit une baisse du pH, provoquant ainsi le dépassivation des armatures et par conséquent induit la corrosion des armatures.

La carbonatation de la portlandite se fait par dissolution et en deux étapes d'ionisation :



D'après [HOYLE, 2000 ; SHAKHASHIRI 1989], la portlandite s'ionise totalement dans un matériau cimentaire, c'est-à-dire que les molécules de la portlandite solide n'existent pas dans la solution interstitielle du matériau cimentaire, car elles passent directement de la phase solide à la phase ionisée sous forme de trois espèces ioniques:  $\text{CaOH}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{OH}^-$ .

L'équilibre chimique entre ces trois espèces reste maintenu dans la solution, il est décrit par l'équation suivante :

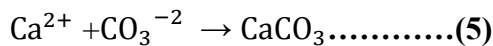
$$[Ca^{2+}] [OH^{-}] = [CaOH^{+}] k_{CAOH^{+}} \dots\dots\dots(3)$$

Où :  $[Ca^{2+}]$ ,  $[OH^{-}]$  et  $[CaOH^{+}]$  expriment les activités des ions considérés.

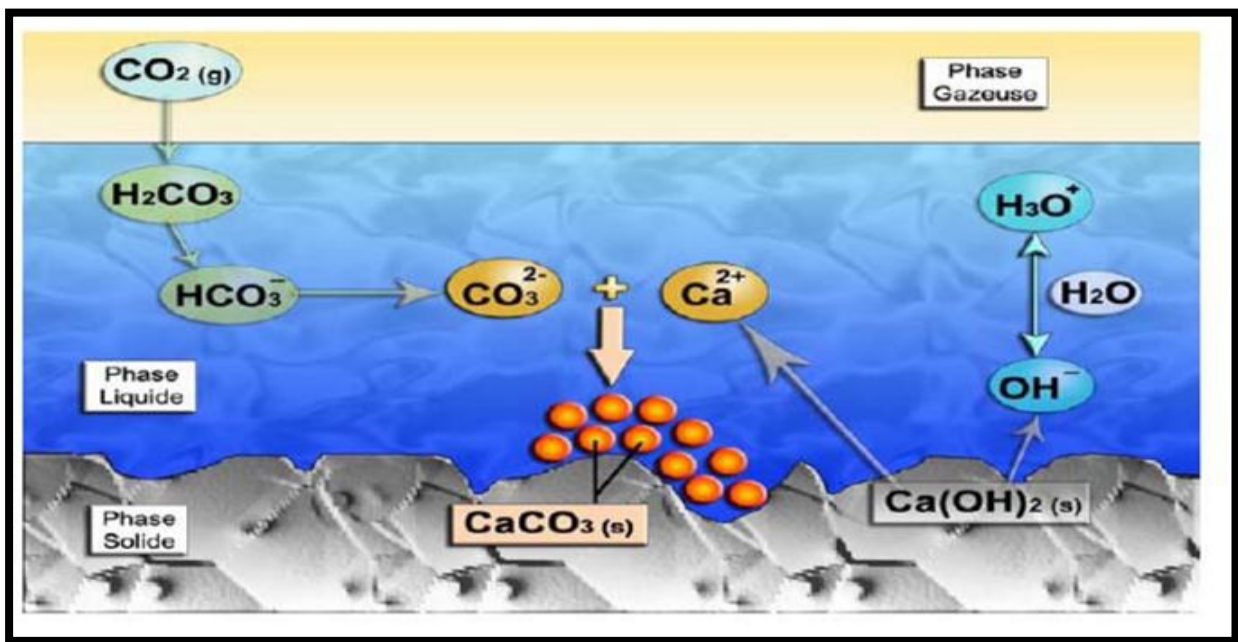
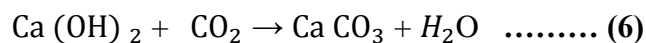
La valeur de la constante d'équilibre à 20° C et 10<sup>5</sup> Pa est égale à :

$$k_{CAOH^{+}} = 5.10^{-2} \dots\dots\dots(4)$$

Les ions calcium ainsi libérés précipitent avec les ions carbonates suivant la réaction 3.8 pour former du carbonate de calcium  $CaCO_3$ .



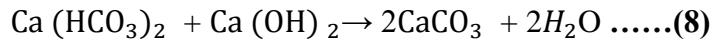
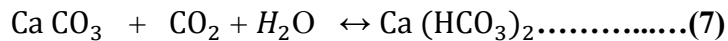
La figure I.4 illustre l'intervention combinée des trois phases : gazeuse, aqueuse et solide au cours du processus de carbonatation de la portlandite. Dans le cadre d'une approche simplifiée, le mécanisme réactionnel de carbonatation de  $Ca(OH)_2$  est synthétisé par la réaction chimique suivante :



**Figure I.4 :** Illustration des réactions chimiques de la carbonatation [Delmi M.]

L'inconvénient de cette formulation (Equation 5) est qu'elle masque toutes les étapes intermédiaires du mécanisme. En revanche, elle a l'avantage d'indiquer que la carbonatation de la portlandite s'accompagne globalement d'une libération d'eau de structure. Au-delà d'un

certain degré de carbonatation, l'acide carbonique forme par dissociation des ions carbonates qui, à leur tour, par réaction avec la portlandite, forment de la calcite.



### I-6-1-3 Carbonatation des C-S-H

Les C-S-H, qui représentent la phase hydratée la plus importante dans la pâte de ciment, confèrent au matériau béton l'essentiel de sa résistance mécanique. En revanche, leur pouvoir tampon sur le pH de la solution est plus faible que celui de  $\text{Ca (OH)}_2$ , donc leur prise en compte dans le mécanisme de carbonatation n'est pas primordial [THIERY ,2005].

### I-6-1-4 Carbonatation de l'ettringite et du monosulfoaluminate

GRANDET et KOUZNETSOVA, indiquent que la carbonatation de l'ettringite et du monosulfoaluminate de calcium produit du gypse. Ces hydrates sont présents en petite quantité dans les matériaux cimentaires, c'est pourquoi leur carbonatation est négligée [GRANDET ,1995 ; KOUZNETSOVA ,2003].

### I-6-1-5 Carbonatation des aluminates de calcium hydratés

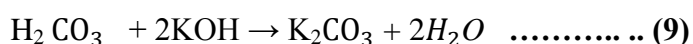
SAUNAN et LACH indiquent que les aluminates de calcium hydratés se carbonatent en produisant des carbonates de calcium, des hydroxydes d'aluminium et de l'eau [SAUNAN ,1972 ;LACH ,1972]

### I-6-1-6 Carbonatation du $\text{C}_3\text{S}$ et $\text{C}_2\text{S}$

Les constituants anhydres, principalement les silicates  $\text{C}_3\text{S}$  et  $\text{C}_2\text{S}$ , ne se carbonatent que s'il y'a suffisamment de l'eau libre dans les pores. Généralement, la carbonatation des silicates se fait en concomitance avec leur hydratation. Cette phase de couplage de l'hydratation avec la carbonatation constitue l'unique possibilité de carbonatation des silicates [DELMI M, 2004].

### I-6-1-7 Carbonatation des alcalins

Les bases présentes dans la solution interstitielle sous la forme de soude (NaOH) et de potasse (KOH), se carbonatent rapidement au contact du dioxyde de carbone dissous. La dégradation des bases alcalines par le dioxyde de carbone s'effectue selon les réactions :



[MIRAGLIOTTA-R et al , 2000] ont remarqué que l'augmentation de la teneur en alcalins entraîne une carbonatation plus importante du béton.

### I-6-2 Principaux paramètres influençant la carbonatation des bétons

La cinétique de carbonatation des bétons est influencée par une multitude de paramètres liés aux caractéristiques des bétons et à leur milieu environnant.

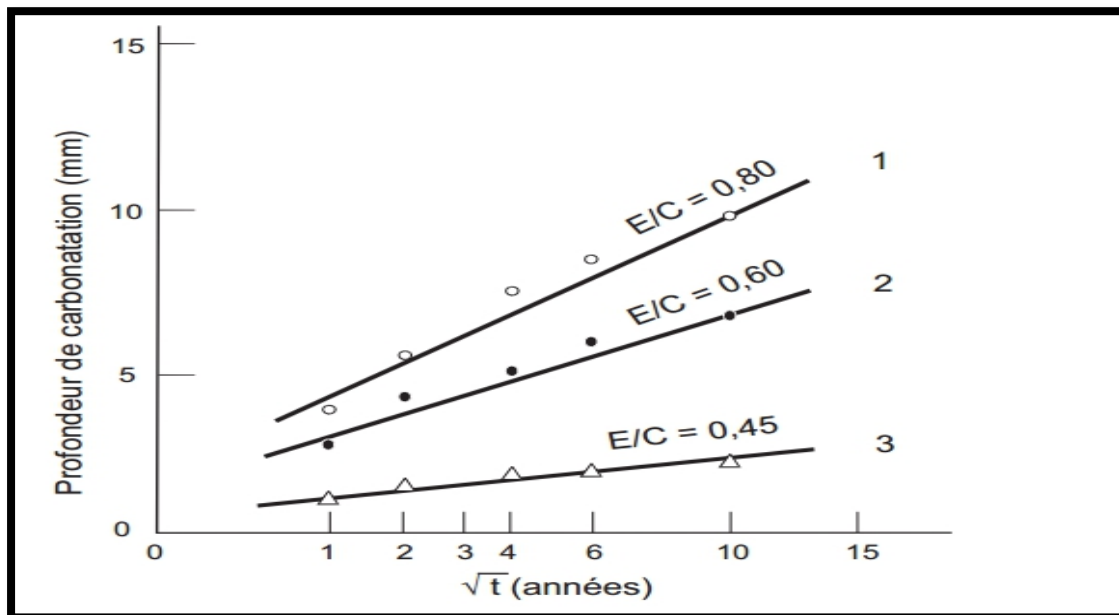
#### I-6-2-1 Paramètres intrinsèques aux bétons

##### a) Rapport E/C

Toutes les études réalisées pour déterminer l'influence du rapport E/C sur la cinétique de carbonatation s'accordent à conclure que plus ce rapport est bas.

Le rapport E/C a une importance considérable sur l'interconnexion du réseau poreux et par conséquent sur la perméabilité du béton et sur la diffusivité des espèces gazeuses ou ioniques au sein du béton.

La relation linéaire entre la profondeur de carbonatation et la racine carrée du temps est observée expérimentalement confirmant ainsi que la diffusion est le phénomène dominant dans le processus de carbonatation et ce dans une large gamme de rapports E/C.



**Figure I.5:** Evolution de la profondeur carbonatée en fonction de la racine carrée du temps [Jean-Pierre OLLIVIER].

### b) Dosage en ciment

Un dosage en ciment élevé diminue la profondeur de carbonatation [VENUAT ,1968 ; ALEXANDRE ,1968] car il réduit la porosité du béton, améliore sa compacité et augmente la quantité de produits carbonate les. La figure (I.6) montre l'influence du dosage en ciment sur la profondeur de carbonatation de bétons préparés avec du CEM I et conservés à 20 °C et 50 % HR pendant 5 ans. On constate que la profondeur carbonatée est d'autant plus faible que le dosage en ciment est important car la porosité du béton, et donc la diffusion, sont réduites

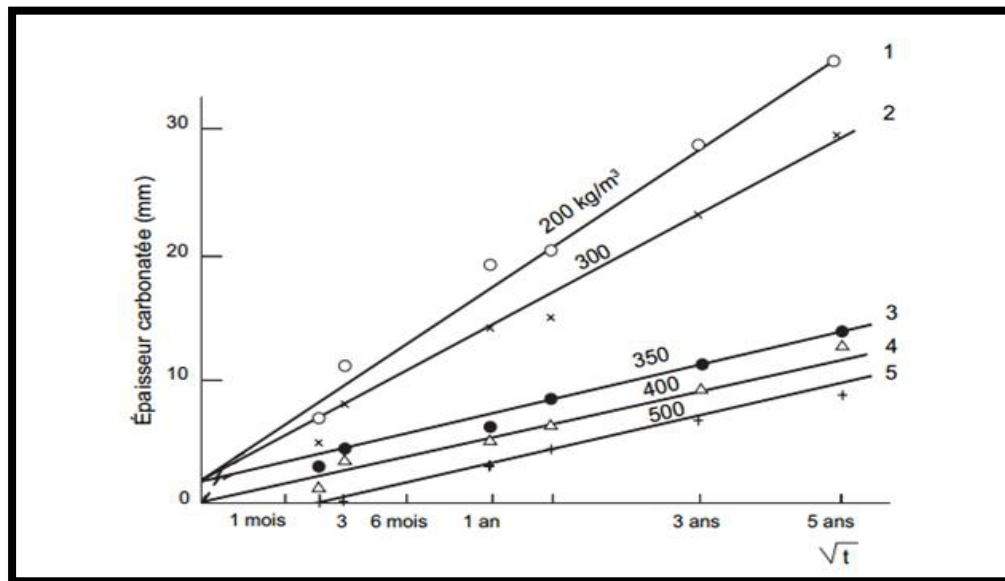


Figure I.6 : Relation entre épaisseur carbonatée et dosage en ciment [Jean-Pierre OLLIVIER].

### c) Résistance à la compression

La profondeur de carbonatation diminue lorsque la résistance en compression à 28 jours s'accroît [NISCHER ,1984 ; PARROTT, 1987]. Cependant, deux bétons de même résistance mécanique peuvent avoir deux rapports E/C distincts et donc deux comportements différents vis-à-vis de la carbonatation.

### d) Perméabilité au gaz

La profondeur de carbonatation diminue avec la diminution de la perméabilité [LAWRENCE ,1984 ; HILSDORF, 1989].

### e) Degré de saturation des pores en eau

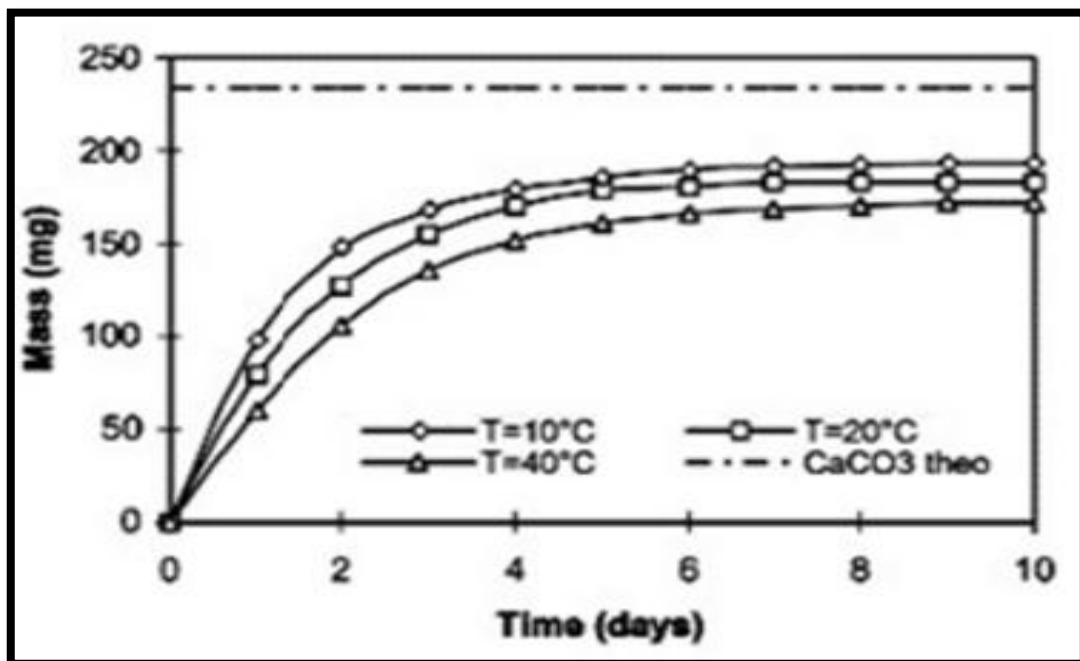
Si le béton est totalement saturé en eau liquide, la diffusion du  $\text{CO}_2$  n'est possible qu'à travers la solution interstitielle, ceci freine considérablement la progression de la carbonatation dans la mesure où les coefficients de diffusion du  $\text{CO}_2$  dans l'air et dans l'eau sont respectivement de l'ordre de  $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  et  $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ . En revanche, si le degré de saturation est trop faible, la

dissolution du  $\text{CO}_2$  est fortement limitée et la cinétique de carbonatation des hydrates est alors ralentie [THIERY, 2005].

### I-6-2-2 Paramètres extrinsèques aux bétons

#### a) Température

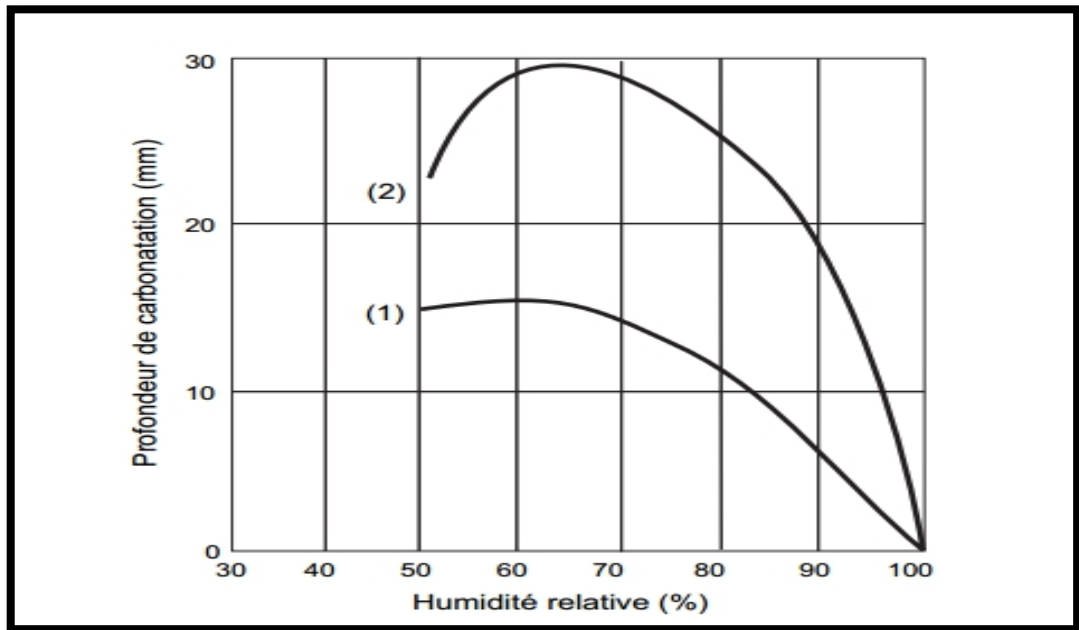
L'augmentation de température sur la vitesse de carbonatation accélère les réactions chimiques [VAN BALEN, 1994 ; VAN GEMERT, 1994], et diminue la solubilité du  $\text{CO}_2$  et réduit sa concentration dans la phase gazeuse [CHAUSSADENT, 1997].



**Figure I.7 :** Formation de la calcite lors d'une carbonatation accélérée de la portlandite ( $\text{CO}_2=50\%$ ), en fonction de la température [Dheilly R M., Tudo J., Sebai Y. and Queneudec M.]

#### b) Humidité relative

La carbonatation soit maximale, l'humidité relative doit être suffisamment faible pour qu'une phase gazeuse connectée permette la diffusion du  $\text{CO}_2$  gazeux et suffisamment élevée pour que la réaction de carbonatation proprement dite puisse avoir lieu en phase aqueuse [AFGC, 2004]. Selon les bétons, il est souvent admis que la vitesse de carbonatation est maximale entre 50% et 70% d'humidité relative. En dessous de 50% et au-dessus de 90% à 95% la vitesse est très faible ou nulle [HOUST, 1992].



**Figure I.8 :** Influence de l'humidité relative sur la profondeur de carbonatation pour des bétons confectionnés avec des rapports E/C de 0.6 (courbe 1) et 0.8 (courbe 2) et conservés 16 ans à 20°C [Wierig Hannover, 1984 ]

### c) Cure humide

Une bonne cure humide, qui consiste à maintenir le béton dans des conditions de température et d'humidité relative propices à une meilleure hydratation [DELMY, 2004], diminue la vitesse de carbonatation. Contrairement à une conservation à l'air libre, une cure dans l'eau favorise l'hydratation du ciment et réduit ainsi la porosité du béton ce qui conduit à un béton plus résistant à la carbonatation, cette résistance à la carbonatation est d'autant plus importante que la cure est longue. [FATTUHI, 1988 ; ATIS, 2003].

### d) Concentration en CO<sub>2</sub>

L'augmentation de la vitesse de carbonatation est augmentée par la concentration en CO<sub>2</sub> de carbonatation [NISCHER, 1984 ; PARROTT, 1987]. En fournissant du CO<sub>2</sub> en quantités continuellement suffisantes, les produits carbonatés à une profondeur donnée se carbonatent rapidement et se consomment donc d'autant. Ainsi, le front de carbonatation avance plus vite.

## I-6-3 Conséquences de la carbonatation

### I-6-3-1 Corrosion des armatures

La principale conséquence de la carbonatation est la corrosion des armatures du béton armé ou précontraint lorsqu'on veut étudier la durabilité des différents types d'ouvrages (bâtiment

résidentiel, bâtiment industriels, ouvrages de génie civil tels que les ponts, les structures portuaires...). La corrosion reste la cause de détérioration la plus coûteuse en terme de maintenance. Elle est à l'origine de nombreux défauts apparents qui, s'ils n'engendrent pas de pertes de capacité portante de la structure, se révèlent nuisibles à l'exploitation de l'ouvrage, parmi les causes principales de cette dégradation, on peut citer le phénomène de carbonatation [TUUTTI, 1982 ; BAROGHEL-BOUN, 2005].

### **I-6-3-2 Evolution de la porosité**

La phénomène de carbonatation correspond à une densification de la zone carbonatée, conduire à une diminution relative de 10% à 15 % de la porosité de la zone carbonatée, la microporosité diminue au profit de pores plus grossiers, notamment à forte concentration en  $\text{CO}_2$  et en présence d'additions minérales comme les cendres volantes ou le laitier de haut-fourneau [THIERY, 2005] formant ainsi une barrière diffusion elle limitant les phénomènes de transfert.

### **I-6-3-3 Evolution de la teneur en eau**

L'eau liquide qui résulte de la carbonatation. Il démontre que cette augmentation est liée physiquement à la diminution de porosité engendrée par la carbonatation, et chimiquement à la seule carbonatation du  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . [PIHLAJAVAARA, 1968 ; SWENSON, 1968, SEREDA, 1968].

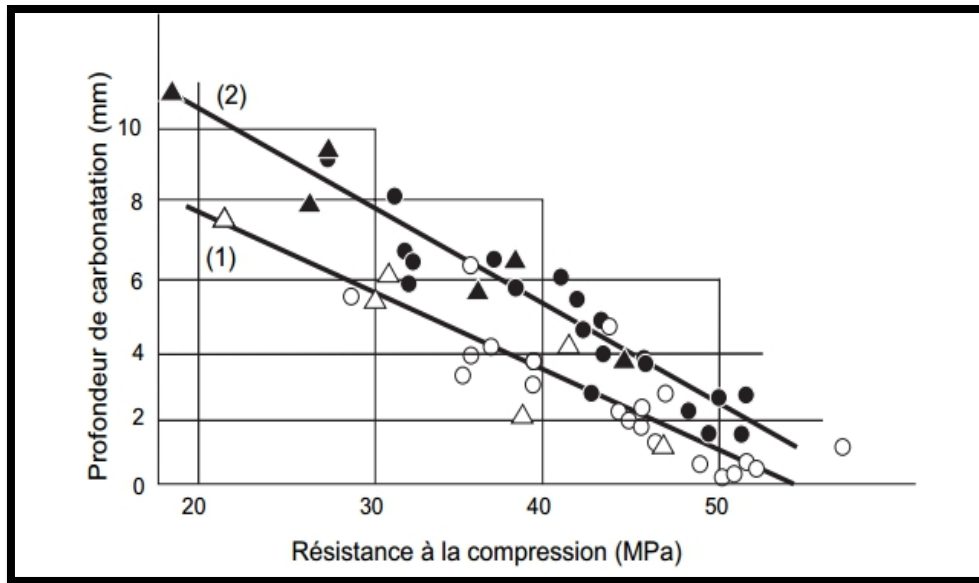
### **I-6-3-4 Modification des propriétés mécaniques**

La résistance à la compression et à la flexion de bétons au ciment conservés dans une atmosphère de  $\text{CO}_2$  peut augmenter au maximum jusqu'à 30 % par rapport aux mêmes bétons conservés en atmosphère exempte de  $\text{CO}_2$  [LEA, 1970].

La résistance à la compression et à la flexion de mortiers modifiés polymères augmente d'environ 48 % après 5 jours de carbonatation accélérée [METALSSI, 2006].

La résistance à la traction est également augmentée par la carbonatation, notamment dans le cas de mortiers médiocres et relativement poreux. Cette augmentation est marquée par un accroissement du module d'Young [MEYERS, 1949].

En revanche, la résistance mécanique après carbonatation diminue lorsque la teneur en clinker des ciments est inférieure à 40 % [HOUST, 1992].



**Figure I.9** : Relation entre résistance à la compression à 28 jours et profondeur carbonatée [Jean-Pierre OLLIVIER]

#### I-6-4 Vitesse de carbonatation

La vitesse de carbonatation progression du front de carbonatation diminue avec le temps parce que le CO<sub>2</sub> doit diffuser à travers la zone de surface du béton déjà carbonatée [THIERY, 2005]. Cette vitesse dépend des caractéristiques du matériau (porosité, nature du ciment, etc.).

#### I-6-5 Cinétique de la carbonatation

La pénétration du CO<sub>2</sub> et sa réaction avec les hydrates de la pâte divise le béton en deux : une zone carbonatée et une zone non carbonatée. Malgré la complexité des phénomènes, on admet généralement que l'épaisseur de la zone carbonatée  $x(t)$ , à un instant donné  $t$  de la vie d'un ouvrage, est donnée par la relation (1) :

$$X(t) : x_0 + K\sqrt{t} \dots \dots \dots (11)$$

où :

$x_0$  : est l'épaisseur carbonatée initiale ;

$K$  : est une constante prenant en compte à la fois la composition du béton (rapport E/C, dosage et nature du liant...) et les conditions d'environnement (humidité relative, température, pression...);

$t$  : la durée d'exposition (années)

### **I-6-6 Retrait de carbonatation**

La carbonatation entraîne une augmentation du volume de la phase solide, celle –ci induit un retrait et non un gonflement. [POWERS ,1962] émet l’hypothèse selon laquelle ce retrait est dû à la dissolution des cristaux de Portlandite alors que ceux-ci sont soumis à des contraintes de compression, ce qui provoque une contraction dimensionnelle.

### **I-6-7 Effet des ajouts cimentaires sur la carbonatation du béton**

#### **I-6-7-1 Additions minérales**

Des travaux réalisés sur divers matériaux cimentaires, avec des protocoles expérimentaux différents, montrent que la présence dans le ciment (ciments avec ajouts) ou le béton de cendres volantes, laitiers de haut-fourneau ou pouzzolanes augmente la profondeur carbonatée [HAMADA, 1968 ; MEYER ,1968] talques additions minérales génèrent des bétons à faible teneur en Portlandite (produit carbonatable). Toutefois, elles permettent de diminuer la porosité et l’effet négatif peut être annulé.

La composition d’un mortier consiste à fixer les pourcentages optimums de ses différents constituants afin d’assurer à la fois la maniabilité et la résistance désirées. Ohama et Bureau Dans ce travail, la maniabilité est maintenue constante pour tous les mortiers. Les études antérieures ont montré que, Pour une même maniabilité, les résistances en flexion et en traction augmentent tandis que la résistance en compression reste identique à celle du mortier non adjuvanté. En revanche, si le rapport E/C est maintenu constant, les résistances diminuent [OHAMA ,1998 ; BUREAU, 2001].

#### **I-6-7-2 Les pouzzolanes**

Les pouzzolanes proviennent de Pouzzoles, nom d’une ville italienne. Elles sont des roches d’origine magmatiques (pyrolusites) projetées dans l’atmosphère au cours des éruptions volcaniques. Le refroidissement rapide de ces roches applique un effet de trempe au magma, ce qui explique la présence de verre volcanique, matière amorphe non cristallisée, composants majeurs dans ces roches volcaniques ainsi que d’autres minéraux tels que : feldspath, pyroxène, olivine, etc. [ROCHER ,1992].Les pouzzolanes naturelles sont définies comme étant des matériaux d’origine volcanique (verre volcanique, ponce, rhyolite, tuf, etc.) ou bien des roches sédimentaires (diatomites, gaize, phonolites) ainsi que des argiles et des schistes activés thermiquement.

Les pouzzolanes naturelles sont siliceux ou siliceux-alumineux composées de silice ( $\text{SiO}_2$ ), d’alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), et d’oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). La proportion de  $\text{SiO}_2$  réactive, définie selon la

norme ENV 197-1 constituée d'au moins de 25% (60 à 85%) en masse, et la somme des trois oxydes ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) doit être supérieure à 70% selon la norme [ASTMC 618-94]. La pouzzolane naturelle ne possède par lui-même aucune ou à peu près aucune valeur liante mais qui, sous forme de poudre très fine et en présence d'humidité, réagit chimiquement avec l'hydroxyde de calcium à des températures ordinaires pour former des composés possédant des propriétés liantes. D'après cette définition, le sable de quartzite ordinaire ne constitue pas une pouzzolane, car les mélanges de sable pulvérisé et de chaux ne peuvent former un produit liant sans savoir d'abord subi un traitement hygrothermique. Cependant plusieurs sous-produits industriels tels les cendres volantes, la cendre de balle de riz ou les fumées de silice condensées, qui peuvent réagir avec de la chaux à une température ordinaire sont considérés comme des pouzzolanes. Depuis l'invention du Ciment Portland au XIX siècle, les mélanges pouzzolanes-chaux sont rarement utilisés dans la fabrication du béton armé, car le temps de prise et de durcissement est beaucoup plus court avec le ciment Portland qu'avec ces mélanges. Le ciment Portland renferme en majeure partie des silicates tricalcique et bicalcique, lesquelles produisent au cours de l'hydratation du silicate de calcium hydraté et de l'hydroxyde de calcium. Puisque l'hydroxyde de calcium ne constitue pas un matériau liant, il ne peut en devenir un que si l'on ajoute une pouzzolane au mélange de béton. A cette fin, il est possible de mélanger la pouzzolane avec le ciment Portland ou de servir de la pouzzolane à titre d'adjuvant incorporé directement au béton.

Les travaux de KRITSADA montrent que des bétons pouzzolaniques ont été longtemps considérés moins capables de résister à la carbonatation que des ciments portland dus à leur contenu de portlandite [KRITSADA, 2005].

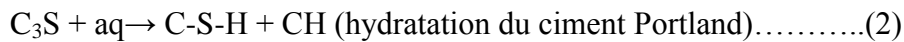
### **a ) Production et disponibilité de la pouzzolane en algerie**

Les études géologiques montrent que l'Algérie possède de grands gisements de matériau pouzzolanique d'origine volcanique, qui s'étendent de façon sporadique le long de 160 km entre la frontière Alghero-Marocaine et le Sahel d'Oran, dont l'utilisation jusqu'à présent reste limitée uniquement par certaines cimenteries, malgré de nombreuses études faites dans les institutions et les universités algériennes quant à l'utilisation de ces matériaux comme ajouts aux bétons. La région intéressée ne correspond en réalité à aucune unité structurale bien définie, mais à une mosaïque de petits secteurs ayant chacun des caractéristiques propres aussi bien du point de vue géologique que géographique, qui appartiennent pour la plus part à des ensembles structuraux plus vastes. Elle appartient du point de vue géographique au grand ensemble connu sous le nom du Tell Oranais, la régularité structurale ne s'y retrouve que très partiellement. Le massif volcanique de Béni-Saf et de la Basse-Tafna correspond à un ensemble important de déjections

basaltiques qui couvre une superficie d'environ 200 km<sup>2</sup>. Il s'étend sur 30 km de côte entre le Cap Ou lassa au Nord et le Cap de Sidi Mohamed Bel Ourdini au sud-ouest.

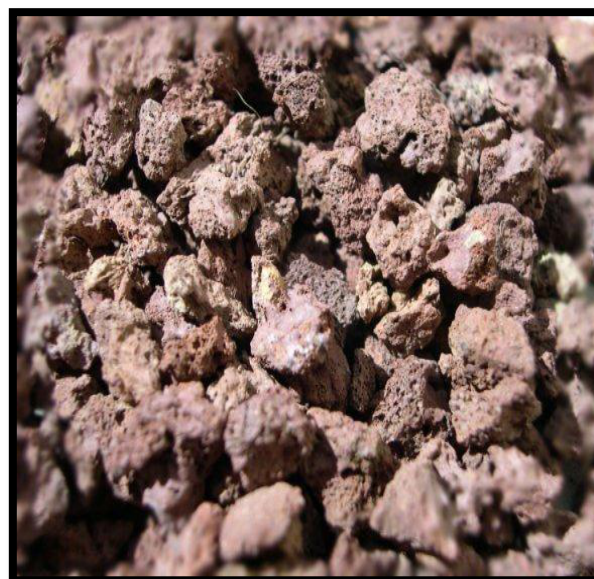
### b) Exigences en matière de composition chimique

Puisque les pouzzolanes naturelles contiennent d'ordinaire une teneur élevée en SiO<sub>2</sub>, la mise en œuvre du principal effet pouzzolanique donne lieu à la formation des C-S-H, semblable à celui qui est produit par suite de l'hydratation du principal composé de silicate de calcium C<sub>3</sub>S que renferme le ciment Portland :



Les pouzzolanes naturelles sont exploitées pour la production des ciments composés économiques. Les pouzzolanes sont des matériaux naturels ou artificiels riches en silice et en alumine capables de réagir avec la chaux en présence de l'eau pour former à l'issue de cette réaction des produits manifestant des propriétés liantes. Les principales pouzzolanes sont : les matériaux volcaniques (cendre, scorie...) (figure I-10). D'autres minéraux, tels que les feldspaths et les zéolites, peuvent manifester des propriétés pouzzolaniques. La chaux libérée au cours de l'hydratation des composés du clinker, réagit avec le matériau pouzzolanique à l'intérieur d'un mortier pour former des produits qui participent au développement des résistances mécaniques du mortier. Les avantages du remplacement partiel du ciment par les matériaux pouzzolaniques sont divers : ils participent au renforcement de la résistance aux attaques chimiques, au renforcement de l'imperméabilité et de la durabilité du mortier, à la réduction des réactions alcali-agrégats et du retrait du mortier au séchage. Ils permettent la réduction de la quantité de clinker utilisée dans la composition du ciment.

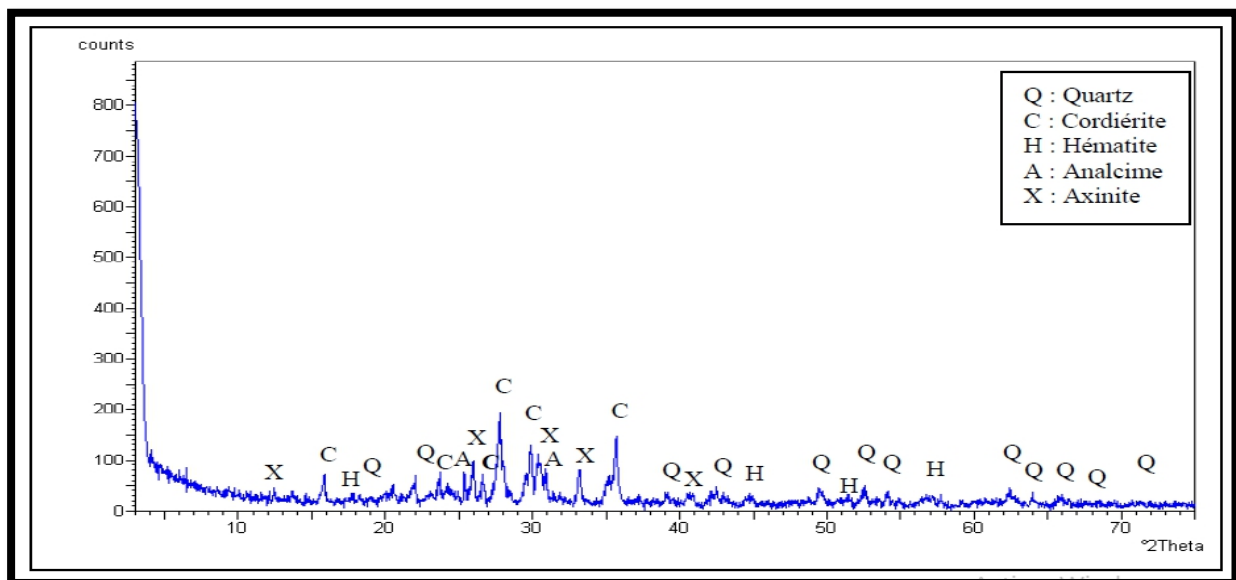
**Figure I-10:** Pouzzolane naturelle



La poudre utilisée dans la confection des liants est obtenue par broyage des roches naturelles d'origine volcanique extraite du gisement de Bouhamdi situé à 2,5 km au sud de Béni-saf, puis tamisage au tamis 80  $\mu\text{m}$ . Les analyses chimiques sont présentées dans le tableau I-3. La composition minéralogique est représentée dans la figure I-11. Leur poids spécifique est de 265  $\text{kg/m}^3$ , leur surface spécifique (Blaine) est de 3800  $\text{cm}^2/\text{g}$ .

**Tableau I.3** : Composition chimique de la pouzzolane naturelle (%)

$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{SO}_3$	Perte au feu
57.10	15.82	6.16	5.95	2.09	2.0	1.1	0.28	1.2



**Figure I-11** : Diffractogramme aux R.X de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf

### I-6-7-3 Les fumées de silice

C'est un produit en Poudre amorphe finement divisée résultant de la production d'alliages de silicium. Elle est entraînée par les gaz, depuis la zone de combustion des fours, vers le système de captage. La fumée de silice est considérée, aujourd'hui, comme l'un des meilleurs produits à haute activité pouzzolanique [AMOURI, 2009].

Les fumées de silice ont une place particulière puisqu'elles permettent de confectionner des bétons à hautes performances. L'ajout de fumées de silice consomme la portlandite et ceci peut donc modifier la vitesse de carbonatation. On peut retenir les éléments suivants :

- les bétons contenant des fumées de silice sont plus sensibles que les bétons de ciment Portland

aux effets d'une cure médiocre ;

– la présence de fumées de silice ne donne lieu à une carbonatation importante que dans le cas des bétons de résistance à la compression moyenne ou médiocre.

KAZIM et al. montrent qu'il y a une diminution de résistance à la compression en cas d'utilisation des fumées de silice avec un pourcentage de 25% à 40% , tandis que la résistance à la carbonatation est augmentée. Dans notre travail, on s'intéresse à l'effet de l'ajout calcaire sur la carbonatation du béton [KAZIM ,1999].

### **a)Caractéristiques**

La fumée de silice est constituée de 93% à 98% de particules sphériques de  $\text{SiO}_2$  amorphes avec des dimensions de quelques dixièmes de microns, c'est ainsi que sa surface spécifique s'élève à environ 220.000  $\text{cm}^2/\text{g}$  . Cette caractéristique lui permet de capter et de fixer l'hydrate de calcium  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$  et de le transformer, en un premier temps, en silicate hydraté et successivement en silicate de calcium stable et irréversible.

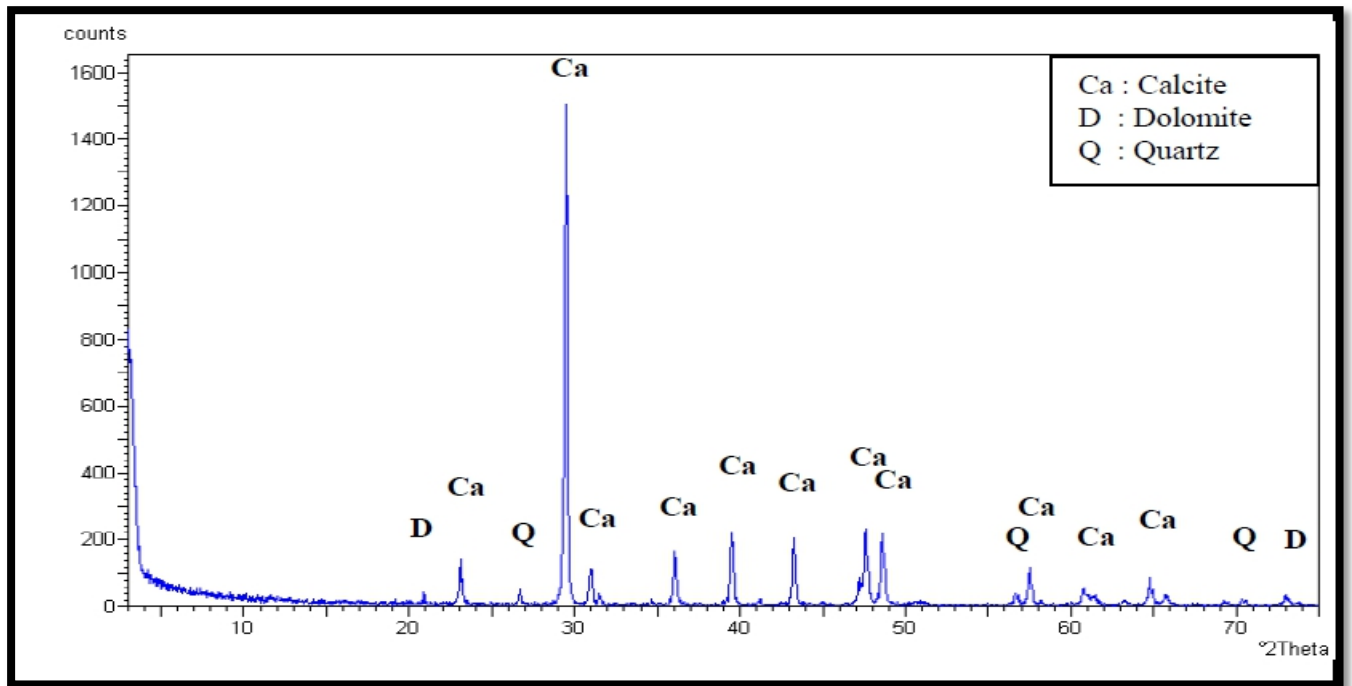
Cette particularité permet de modifier le comportement des bétons à l'état frais, comme à l'état durci.

### **I-6-7-4 Ajouts calcaires**

Les additions calcaires sont des produits secs finement divisés, obtenus par broyage et/ou sélection, provenant de gisement de roches calcaires. Elles peuvent être dolomitiques, massives ou meubles [AMOURI, 2009].

Les fillers calcaires obtenus dans le secteur de production de la chaux sont des produits principalement secs et particulièrement riches en calcite ( $\text{CaCO}_3 > 95\%$ ).

La composition chimique de ces calcaires est montrée dans les Tableaux I-4. Ces calcaires sont presque purs où le pourcentage des carbonates de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) est égal à 97.5 % en poids du matériau avec une très faible présence d'éléments nocifs. La composition minéralogique est représentée sur la figure I.12 (DRX). Leur poids spécifique est de 2700  $\text{kg}/\text{m}^3$  et leur surface spécifique (Blaine) est de 3800  $\text{cm}^2/\text{g}$ .



**Figure I.12:** Diffractogramme aux R-X du fi

<b>CaCO<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>CaSO<sub>4</sub></b>	<b>SO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>Insolubles</b>
97.50	00.74	00.67	00.83	00.59

**Tableau I.4 :** Analyse chimique des fillers calcaires (%)

RAN a montré que l'ajout de fillers calcaires (15 et 20 % en masse par rapport au ciment) et de fillers siliceux (10 et 25 %) à des clinkers conduit à des épaisseurs de carbonatation du même ordre de grandeur que celles obtenues avec des ciments Portland de même classe de résistance. Par contre, avec un CEM II à 15 % de laitier de haut-fourneau, les bétons se carbonatent plus qu'avec des CEM II aux fillers calcaires ou siliceux de même classe. [RAN,1989]

D'après l'étude expérimentale de FEDERIC et al. Il Ya une diminution de résistance à la compression en cas d'utilisation des (34%) fillers calcaire avec de pourcentage [FEDERIC, 2008] .

Dans le même contexte Falih et al montrent aussi que les ajouts calcaires augmentent la profondeur de carbonatation avec une perte de résistance à la compression et une augmentation des porosités capillaires avec des pourcentages (30% à 72%), [FALIH, 2011].

LUCA et al. montrent aussi qu'il y a augmentation de profondeur de la carbonatation avec la perte de résistance à la compression et une augmentation de la teneur en calcaire en cas d'utilisation des fillers calcaires avec des pourcentages (10% à 30%) [LUCA, 2011].

### **a) Problématique des additions calcaires (demande en eau)**

L'eau dans les mortiers joue un double rôle : elle est nécessaire pour hydrater le ciment, mais aussi pour assurer la maniabilité du mortier à l'état frais. En général, l'augmentation de la quantité de particules fines dans un mortier accroît la demande en eau pour le maintien de son ouvrabilité, puisqu'il faut davantage d'eau pour enrober et donc lubrifier les grains. Dans le cas particulier des fillers riches en calcite, la finesse des particules joue un rôle, bien que limité, sur cette caractéristique.

### **I-6-8 Caractérisation expérimentale de la Carbonatation**

L'essai de carbonatation des bétons peut être effectué selon deux modes d'exposition :

#### **— Carbonatation naturelle**

Bien qu'il soit très long, cet essai reflète davantage la réalité car il consiste à conserver des échantillons directement à l'air libre, en salle ou in situ.

#### **— Carbonatation accélérée**

L'essai consiste à placer des échantillons dans une enceinte hermétique régulée en humidité relative, en température et en concentration de CO<sub>2</sub>.

Les valeurs de ces trois paramètres, ainsi que les traitements que subissent les échantillons avant leur mise en enceinte, varient selon les laboratoires et les normes en vigueur dans chaque pays. En France, cet essai fait l'objet de la norme [XP P 18-458, 2008].

### **I-7 Conclusion**

Après la recherche bibliographique, nous avons présenté des caractéristiques essentielles des différentes classes des bétons et mortiers à base de résine, et nous avons expliqué l'effet de la pouzzolane naturelle, de la fumée de silice et des fillers calcaires sur la propriété béton de résine.

Et on a effectué la recherche sur le phénomène de carbonatation, paramètres qu'il l'influence, ces conséquences sur la durabilité des structures et sur les ajouts cimentaires et leur effet sur la profondeur de carbonatation ont montré que pratiquement tous ces ajouts font augmenter la profondeur de carbonatation et diminuer la résistance à la compression.

**CHAPITRE II. CARACTÉRISATION DES  
MATÉRIAUX ET TECHNIQUES  
EXPERIMENTALES**

## Introduction

Le choix des matériaux utilisés dans la confection des mortiers modifiés par la résine exige la connaissance de leurs diverses caractéristiques physiques, chimiques, minéralogiques, physico-chimiques et mécaniques qui peuvent prédire la qualité de ces mortiers en fonction de leur utilisation.

Dans ce chapitre, nous présentons en premier lieu, les caractéristiques des matériaux utilisés, suivies d'une présentation d'ensemble des formulations. En deuxième lieu, nous décrivons les différentes méthodes expérimentales utilisées pour les expériences des résistances mécaniques et de carbonatation des mortiers résineux modifiés.

### II-1 Matériaux utilisés

Dans le but de mettre en évidence l'influence d'utilisation des additions minérales sur les propriétés des mortiers et bétons à l'état frais, à l'état durcis et sur la carbonatation, on a utilisé le ciment, les fillers calcaires (FC), la pouzzolane naturelle (PN) et la fumée de silice (FS) et la résine. Le type de sable employé est un sable calcaire, en outre un super plastifiant a été ajouté. La caractérisation générale de ces matériaux est présentée en détails ci-dessous :

#### II-1-1 Ciment

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous forme de poudre minérale s'hydratant en présence d'eau. Il forme une pâte qui fait prise et qui durcit progressivement à l'air. C'est le constituant fondamental des matériaux de construction (béton ou mortier) puisque c'est lui qui joue un rôle de cohésion des différents constituants.

Le ciment utilisé appartient à la classe CEM I/42,5 provenant de l'usine BISKRIA (wilaya de Biskra), utilisé pour tout le mortier élaboré. La composition minéralogique potentielle du clinker est calculée selon la formule empirique de Bogue. Elle est contenue dans le tableau II.1 Ensuite, les propriétés physiques et mécaniques sont données dans les tableaux II.2 et II.3 respectivement.

**Tableau II.1:** Composition minéralogique du ciment CEM I 42.5

Composition minéralogique (%)	
$C_3S$	62
$C_2S$	13
$C_3A$	1.5
$C_4AF$	17

**Tableau II.2 :** Caractéristiques physiques du ciment CEM I 42.5

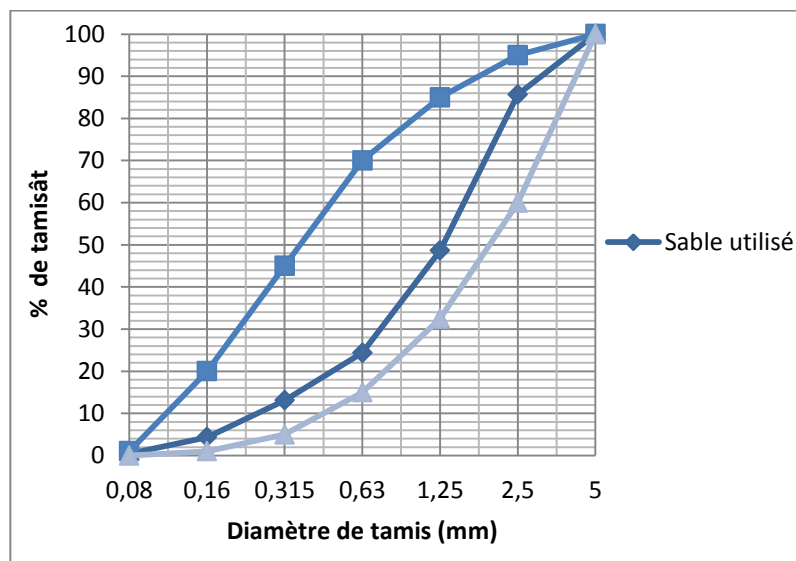
Désignation	Mesures	Garanties
Surface spécifique Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	3420	(NA231)
Début de prise (min)	180	(NA233) ≥60 min
Expansion à chaud (min)	0.5	≤10mm(NA232)
Consistance (%)	25.7	(NA290)

**Tableau II.3:** Propriétés mécaniques du ciment CEM I 42.5

Caractéristiques mécaniques			
Résistance à la compression (MPa) (NA 234)	2 jours	≥12.5	21
	28 jours	42.5 ≤ R ≤ 62.5	49.5

### II-1-2 Sable

Dans le cadre de valorisation des matériaux locaux de la région de l'atlas saharien algérien, le sable calcaire concassé de fraction 0/5 mm provenant d'une carrière située au nord de la ville de Laghouat a été utilisé. Les caractéristiques physiques et la courbe granulométrique du sable sont présentées dans le tableau II.4 et la figure II.1 respectivement. On a remarqué que le sable calcaire est moyennement grossier, à granulométrie continue et étalée et sa courbe granulométrique se situe à l'intérieur du fuseau normalisé.



**Figure II.1 :** Courbe granulométrique du sable calcaire

**Tableau II.4** : Propriétés du sable calcaire

Caractéristique	Norme	Valeur trouvée
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	NF EN 1097-6	2.59
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )		1.49
Equivalent de sable : ES(%)	NF EN 933-8	66
% des éléments <0.08 mm	NF EN 933-1	7.5
Module de finesse : Mf	NF EN 12620	3.21
Coefficient d'absorption : WA 24 (%)	NF EN 1097-6	1.90

### II-1-3 Résine

La résine utilisée nommée TEKWELD provenant de l'entreprise de TECKNACHEM, est une résine synthétique du type de Styrène-Butadiène (SBR) en solution aqueuse à haute densité, stable en milieu alcalin, spécialement conçue pour être additionné à l'eau de gâchage des mortiers, coulis de ciment ou de l'enduit.

Les principales caractéristiques de la résine utilisée sont récapitulées dans le tableau II.5.

**Tableau II.5** : Caractéristiques de résine utilisée

Etat physique	Couleur	Densité (g/cm <sup>3</sup> , à 20°C)	pH (à 20°C)	Extrait sec
Liquide	Blanc	1.04 ± 0,02	4± 1	26 %±2%

### II-1-4 Super plastifiant

Dans cette étude, on a utilisé un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération pour bétons prêts à l'emploi appelé SUPERIOR9WG commercialisé par la société TEKNACHEM située à Sidi Bel Abbès.

Il est à base de poly-carboxylates de nouvelle génération qui permettent de réaliser des bétons très fluides avec des rapports E/C très réduits. Il est compatible avec tous les types de ciment Sa plage

normale d'utilisation est variée par la fiche technique entre 0.6% à 2% (en extrait sec) du poids de ciment. Il est sous forme liquide de couleur brune de 33% ( $\pm 2\%$ ) d'extrait sec. Sa densité est de 1.10 ( $\pm 0.03$ ), son pH (à 20°C) est de 5.5 ( $\pm 1$ ) il contient d'une teneur en chlore inférieure à 0.1%.

### II-1-5 Eau

L'eau qui a été utilisée pour le gâchage de mortier est une eau potable sans aucun traitement supplémentaire.

## II-2 Formulation des mortiers

### II-2-1 Composition des mortiers

Pour tous les mélanges, la composition des mortiers a été maintenue constante comme suit :

Eau / Sable / Liant : 0,5/ 3/ 1. En plus, les essais préliminaires ont montré que l'incorporation des additions minérales dans les mélanges fait changer la maniabilité des mortiers élaborés. Donc, le super plastifiant a été ajouté aux mélanges afin d'ajuster une maniabilité constante d'obtenir aussi un travail comparable où le temps de l'écoulement est de l'ordre de  $8 \pm 2$  s pour tous les mélanges. Il est également utile de signaler que cette méthode permet aussi d'obtenir une hydratation similaire des liants.

La composition d'un mortier consiste à fixer les pourcentages optimums de ses différents constituants afin d'assurer à la fois la maniabilité et la résistance désirées. Ohama et Bureau Dans ce travail, la maniabilité est maintenue constante pour tous les mortiers. Les études antérieures ont montré que, Pour une même maniabilité, les résistances en flexion et en traction augmentent tandis que la résistance en compression reste identique à celle du mortier non adjuvanté. En revanche, si le rapport E/C est maintenu constant, les résistances diminuent [OHAMA ,1998 ; BUREAU, 2001].

La quantité de la résine optimale a été choisie sur la base d'une étude de maniabilité et de résistance mécanique en faisant varier le rapport P/C (Polymère sur Ciment) de 0 à 10% par pas de 2.5%. Cette étude a permis d'optimiser le rapport P/C.

A noter que dans ce travail, la quantité de résine est compte en extrait sec où cette résine utilisée comprend presque 74% d'eau.

Ensuite, pour des raisons économiques et technologiques, une substitution partielle de ciment par les trois additions minérales a été faite. Le pourcentage de 30% de la quantité de ciment a été remplacé par des fillers calcaires, de la pouzzolane naturelle et de la fumée de silice. Le tableau 6 présente les différentes compositions des liants.

**Tableau II.6 :** Composition des liants

<b>Compositions (%)</b>	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>M4</b>	<b>M5</b>	<b>M6</b>	<b>M7</b>	<b>M8</b>	<b>M9</b>
<b>Ciment</b>	<b>100</b>	<b>100</b> <b>(C+R)</b>	<b>70</b>	<b>70</b>	<b>70</b>	<b>70</b>	<b>70</b>	<b>70</b>	<b>70</b>
<b>Filler calcaire</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>30</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>15</b>	<b>15</b>	<b>0</b>	<b>10</b>
<b>Pouzzolane</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>30</b>	<b>0</b>	<b>15</b>	<b>0</b>	<b>15</b>	<b>10</b>
<b>Fumée de silice</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>30</b>	<b>0</b>	<b>15</b>	<b>15</b>	<b>10</b>

D'après ce tableau, il est utile de signaler que la composition **M1** est un mortier de ciment ordinaire (sans résine), mais la composition **M2** présente un mortier de ciment modifié par résine (sans ajouts minéraux).

### **II-2-2 Elaboration des mortiers**

La préparation de mortier modifié par latex est habituellement réalisée de la même manière que celle du mortier de ciment ordinaire, selon la norme japonaise industrielle (Japanese Industrial Standard **JIS**). Les matières premières, préalablement séchées, sont introduites dans un malaxeur. Un malaxage à sec du mélange constitué de sable, de ciment et des additions minérales pendant 2 minutes. Puis on ajoute progressivement le mélange de 90% d'eau de gâchage et de résine et malaxer durant une minute. Ensuite, 10% d'eau et de super plastifiant ont été ajoutés au mélange et malaxer pendant 2 minutes. On remplit ensuite les moules 4x4x16 cm<sup>3</sup> en trois couches d'épaisseurs égales qui seront compactées par vibration à l'aide d'une table vibrante. Immédiatement après le coulage, les éprouvettes ont été couvertes d'un film plastique pour éviter l'évaporation de l'eau et elles seront stockées dans les conditions normales du laboratoire (23±2°C et 50± 10% RH). Enfin, les éprouvettes seront démoulées après 24 heures.

### **II-3 Essais réalisés**

#### **II-3-1 Maniabilité**

L'essai d'écoulement effectué selon la norme [NF P18-452] est choisi pour l'étude de la maniabilité du mortier à l'état frais. Le temps d'écoulement est mesuré à l'aide d'un maniabilimètre à mortier type B de dimensions (180x90x90mm<sup>3</sup>) disponible au niveau du laboratoire de génie civil de

l'université de Laghouat. Il s'agit du temps nécessaire au volume du mélange frais pour atteindre un trait repère tracé sur le maniabilimètre sous l'effet des vibrations entraînées par un moteur.



Figure II.2 : Maniabilimètre type B

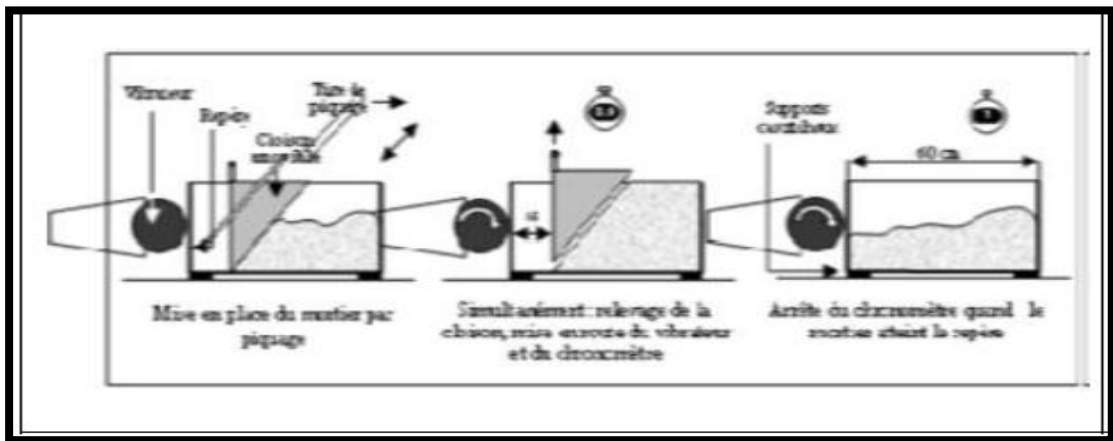


Figure II.3 : Essai de maniabilité

### II-3-2 Confection des éprouvettes

Toutes les formulations des mortiers modifiés de résine étudiées ont été confectionnés suivant le même mode opératoire, avec des moyens matériels identiques et coulés dans les mêmes géométries de moules dans des conditions similaires.

Les éprouvettes préparées dans cette étude sont de formes prismatiques ( $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ ) pour la détermination de la résistance à la flexion à raison de trois éprouvettes par essai. Les 06 demi-éprouvettes issues d'essai de traction sont utilisées pour la mesure de la résistance à la compression selon des prismes ( $4 \times 4 \times 8 \text{ cm}^3$ ).

Les moules utilisés ont été lubrifiés, remplis de mortier et compactés mécaniquement à l'aide de table vibrante afin d'avoir un mortier bien compact avec moins de vide.

Après la mise en œuvre, les moules sont couverts par du plastique jusqu'au démoulage qui aura lieu 24 heures après le coulage du mortier.



**Figure II.4 :** Confection des éprouvettes

### II-3-3 Mode de cure

Les éprouvettes de mortier sont conservées dans leur moule en salle humide ( $(20\pm 2^\circ\text{C}, 80\% \text{ HR})$ ) durant 6 jours. Elles subissent ensuite une cure sèche au sein du laboratoire de recherche de génie civil d'université de Laghouat ( $20\pm 2^\circ\text{C}$ ) jusqu'à échéances de 3, 7, 28 jours (jours de l'essai).

En effet, Les travaux précédents ont montrés que la cure s'avère le meilleur moyen de cure pour améliorer les résistances mécaniques [OHAMA, 1998].



**Figure II.5:** Conservation des échantillons

### II-3-4 Absorption par immersion

Pour déterminer l'absorption d'eau, les échantillons sont été séchés dans une étuve à 105 c° durant 4 jours, après séchages on pèse les éprouvettes, sur Ms échantillon de l'état sec. Ensuite, on immerge les échantillons dans l'eau robinet pendant 24 heures.

Après 24 heures, on les pèse sur Mh (poids à l'état sature) [NF P 18-554].

$$A_b = \frac{(M_h - M_s)}{M_s}$$

Avec :

$A_b$  : coefficient d'absorption [%].

$M_s$  : masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105°C [g].

$M_h$ : masse de l'échantillon imbibé à surface sèche [g].



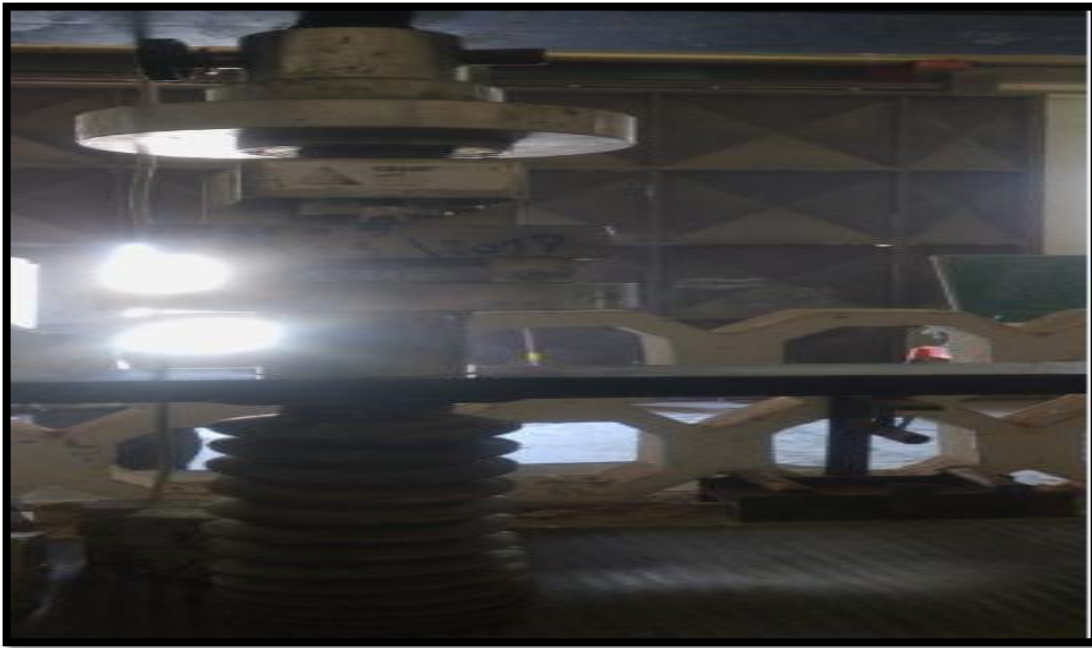
Figure II.6 : Montage expérimental utilisé dans l'essai d'absorption par immersion

## II-4 Résistances mécaniques

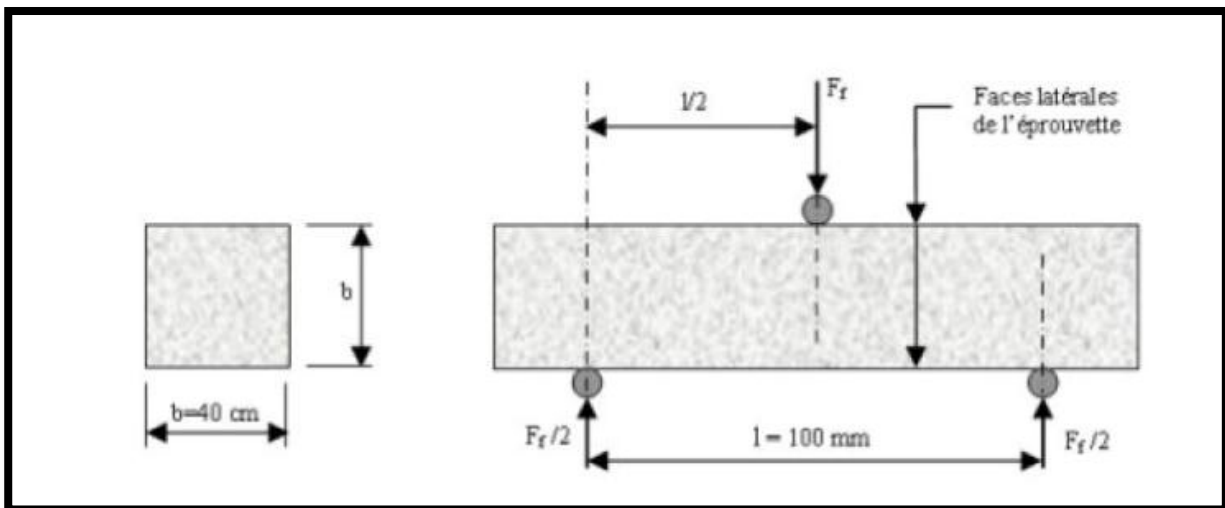
### II-4-1 Essai de rupture par flexion

Les éprouvettes de mortier subissent un essai de traction par flexion suivi d'un essai de compression aux âges de 3, 7 et 28 jours.

L'essai de traction par flexion à trois points est effectué sur les prismes 4x4x16 cm<sup>3</sup> [EN 196-1.2006] Le dispositif permettant la réalisation de l'essai est schématisé ci-dessous (Figures II-7, II-8). Il s'agit d'une machine de traction universelle. La vitesse de chargement a été réglée à 5kg/s jusqu'à la rupture selon la norme [NF P 18-406].



**Figure II.7:** Dispositif expérimental de mesure des résistances à la traction par flexion



**Figure II.8 :** Schéma du dispositif de charge en flexion pour les éprouvettes de mortiers

Si  $F$  est la charge de rupture en Newton, la résistance à la traction par flexion est donnée par l'expression :

$$R_f = \frac{1.5F \cdot l}{b^3}$$

Avec

$l$  = distance entre axes des appuis = 100 mm,

$b$  = arrête de l'éprouvette = 40 mm.

$F$  = charge de rupture (N)

### II-4-2 Essai de rupture par compression

Cet essai est régi suivant la norme [EN 196-1 , 2006], exécuté avec la même presse, sur les demi-éprouvettes provenant de l'essai précédent. Chaque demi-prisme est mis entre deux plaques de métal dur puis testé en compression sur ses faces latérales (de moulage) de section de  $4 \times 4 \text{ cm}^2$ . Le demi-prisme est placé entre elles de manière que son extrémité intacte dépasse d'environ 1cm. Le dispositif de cet essai est présenté par la figure II-9.

Le comportement mécanique de tous les mortiers a été étudié en flexion simple (3 points) et en compression uni axiale sur des éprouvettes prismatiques  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ .

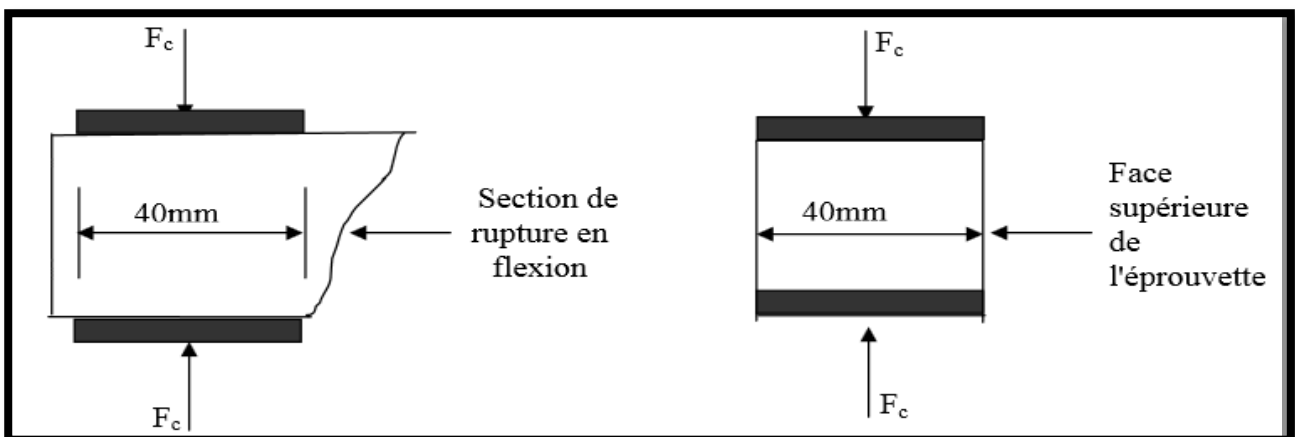
Les six demi-éprouvettes obtenus après rupture en flexion sont alors soumis à une compression uni axiale sur le bâti de compression d'une presse de marque «Controles » à double quadrant ayant une capacité maximale.

La charge appliquée sur une face carrée de l'éprouvette ( $S = 4 \times 4 \text{ cm}^2$ ) doit croître d'une manière graduelle avec une vitesse de chargement de 240 kg/s jusqu'à rupture. La résistance à la compression est donnée par la relation :

$$R_c = \frac{F_c}{S}$$

$F_c$ : charge de rupture (Newton),

$S$  : surface de section carrée ( $4 \times 4 \text{ cm}^2$ ).





**Figure II.9:** Dispositif de l'essai de compression

## **II-5 compagne expérimentale**

### **II-5-1 Essai de carbonatation**

L'objectif de l'essai est de caractériser le comportement d'échantillons de mortier vis-à-vis la carbonatation. L'essai consiste à suivre l'évolution de l'épaisseur carbonatée d'échantillons de mortiers conservés dans une atmosphère riche en dioxyde de carbone. Il a été effectué dans notre cas sur des échantillons moulés mais peut aussi être appliqué à des échantillons carottés de bétons, ainsi qu'à des mortiers et pâtes de ciment durcis [AFPC-AFREM ,1997].

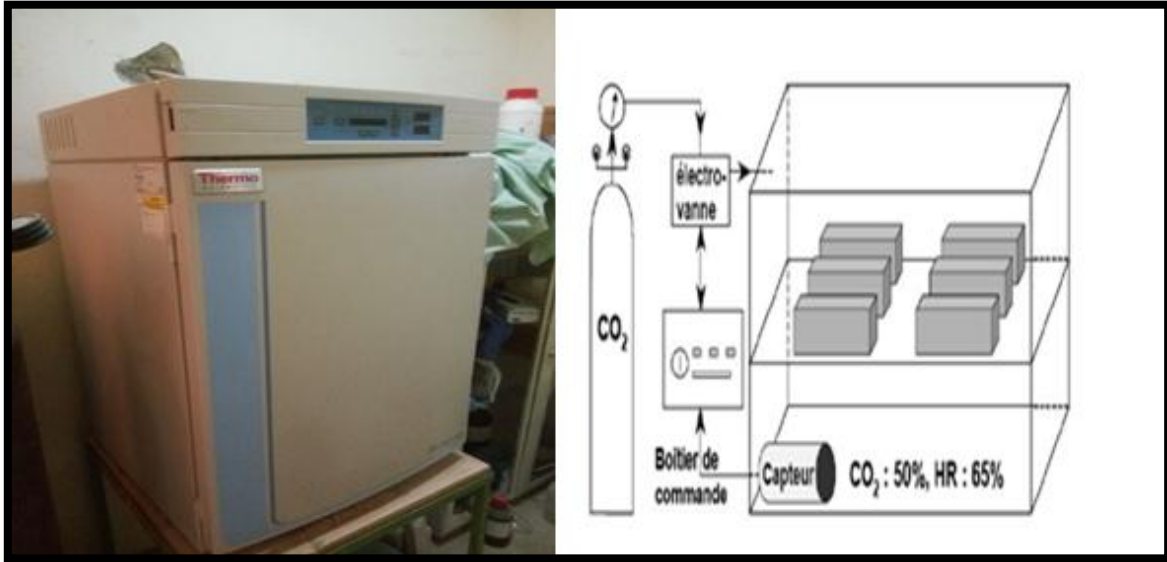
Les échantillons testés sont des mortiers normaux de forme prismatique (40x40x160) mis en œuvre suivant la norme [NF EN 196-1 ,2006]. La dimension des éprouvettes choisie respecte celle qui est donnée par les recommandations françaises [AFPC-AFREM9197]. Pour chaque composition de mortier, trois échantillons subissent l'essai de carbonatation accéléré. La procédure de reconditionnement est la suivante :

- Les éprouvettes sont conservées après démoulage dans une ambiance humide (humidité relative. Supérieure à  $95\pm 5\%$ ) pendant 45 jours pour toutes les compositions de mortier étudiées.
- Avant le démarrage de l'essai de carbonatation accéléré, les échantillons sont placés durant 48 heures dans une étuve ventilée réglée à une température de  $40 \pm 2^\circ\text{C}$  (pour favoriser la carbonatation).

Les échantillons sont alors pesés puis disposés dans l'enceinte de carbonatation (espacés de 2 cm). L'enceinte de carbonatation accélérée au sein du laboratoire de Génie Civil de l'université de LAGHOUAT (figure II.10) est régulée en humidité relative ( $65\pm 5\%$ ) et en dioxyde de carbone (50% volumique).

Les échéances de mesure de l'épaisseur de mortier carbonaté sont de 7, 14 et 28 jours et même au-delà si possible (jusqu'à carbonatation totale des échantillons). A chaque échéance, les échantillons sont retirés de l'enceinte et les épaisseurs de mortier carbonaté sont mesurées.

Un morceau de mortier (épaisseur  $4 \pm 1$  cm) est prélevé sur chaque éprouvette par fracturation par fendage. Les corps d'épreuve résiduels sont ensuite replacés immédiatement dans l'enceinte.



**Figure II-10 :**Schéma et photographie de l'enceinte de carbonatation accélérée

Les mesures de l'épaisseur de mortier carbonaté sont réalisées après humidification des surfaces et pulvérisation d'une solution de phénolphaléine. Cette dernière révèle l'interface entre la zone saine et la zone carbonatée. Les mesures correspondent aux distances (en mm) entre la surface externe du mortier et le front de coloration, en dehors de zones particulières (coins et interfaces pâte-granulat) [AFPC-AFREM, 1997], Les profondeurs de carbonatation ont été relevées périodiquement jusqu'à carbonatation totale des échantillons, en pulvérisant une solution de phénolphaléine. Un vidéo microscope est utilisé pour la mesure de la profondeur de carbonatation. Il est équipé d'une caméra et d'un objectif autorisant divers grossissements. Ce système optique est en interface avec un logiciel, Videomet, qui permet de traiter les images et notamment de mesurer des distances après avoir pris soin d'étalonner le dispositif. Pour chaque échantillon, l'épaisseur dégradée retenue est la moyenne d'au moins vingt mesures.

### **-Essai de carbonatation accélérée**

Il s'agit de la détermination de la profondeur de la zone du mortier de peau carbonatée pour les différents mortiers (M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9) à l'âge 7, 14 et 28 jours.

Durée de l'essai 28 jours de conservation, les échantillons de mortiers sont placés dans une enceinte hermétique (Figure II.11).



**Figure II.11** : Enceinte de carbonation

### **-Principe de l'essai**

L'essai consiste à suivre l'évolution de l'épaisseur de mortier carbonaté dans mortiers conservés dans une atmosphère riche en dioxyde de carbone à une humidité relative de 65%.

La chambre de carbonation est composée d'un système d'alimentation en mélange gazeux (50% de CO<sub>2</sub> et 50% d'air) AFREM.

Selon les recommandations AFREM , et avant le démarrage de l'essai de carbonation accélérée , les échantillons qui ont subi une cure en ambiance humide (dans l'eau ) pendant 28 jours seront soumis à une phase de pré-conditionnement .Cette phase se compose d'une phase où les échantillons sont saturés en eau pour la détermination la masse volumique apparente et de la teneur en eau , suivie d'une seconde phase ou elles sont placés dans une étuve réglée a une température de  $40 \pm 2$  °C pendant deux jours .

Les deux faces carrés de chaque échantillons sont recouverte de papier aluminium adhésif afin d'orienter la diffusion du CO<sub>2</sub> (figure II.12) les échantillons sont ensuite pesés avant démarrage de l'essai

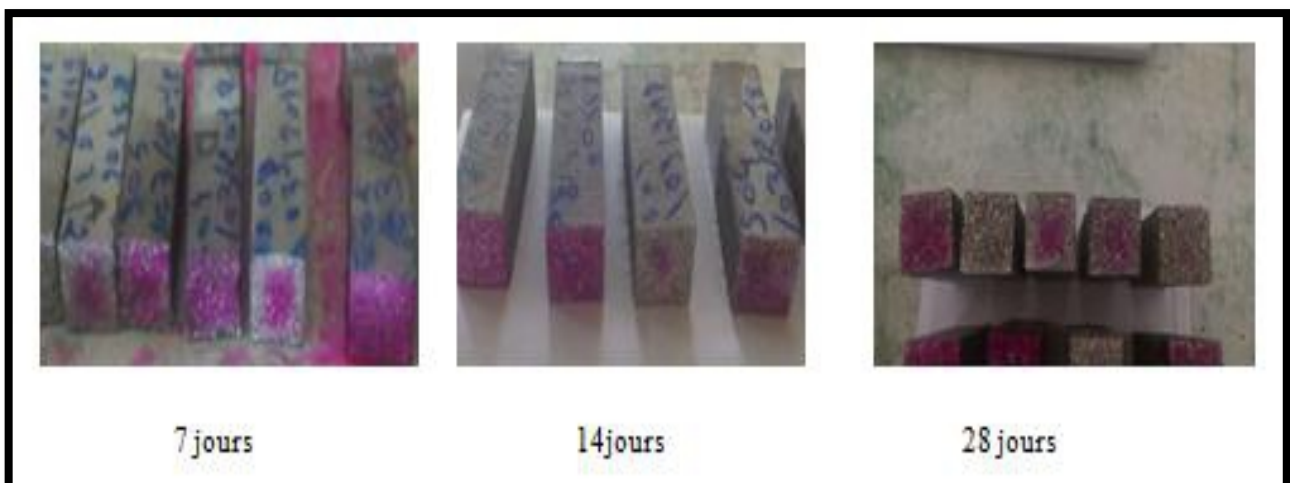


**Figure II.12 :** Préparation des échantillons pour l'essai de carbonatation (1<sup>er</sup> étape)

Les échantillons sont ensuite mis dans l'enceinte, le gaz carbonique CO<sub>2</sub> est injecté à 50% avec le même volume d'air à une humidité relative toujours maintenue à 60± 5%, avec une température de 20± 2 °C, espacés de 2 cm l'un de l'autre. Les échantillons testés sont retirés de l'enceinte après (7,14 et 28 jours) et sont pesés.

Pour la mesure des épaisseurs de mortier carbonaté, les échantillons sont fendus en deux et la lecture se fait immédiatement à l'aide d'un indicateur appelé, la phénolphthaléine qui est aussi préconisé par le mode opératoire de la norme [NF P18-458]. Il colore de mortier non carbonaté en rose tandis que le béton carbonaté ne change pas de couleur.

Après quelque minute de la pulvérisation de la solution de phénolphthaléine sur une fracture fraîche, et pour chaque face, la profondeur de carbonatation est mesurée selon le mode opératoire AFREM, à l'aide d'une règle graduée en millimètres.

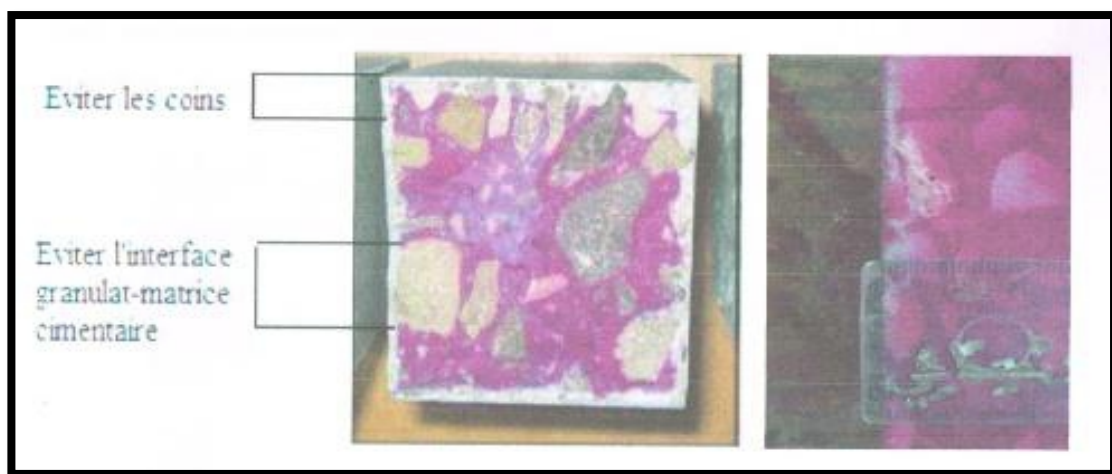


**Figure II.13 :** Mise en évidence de l'épaisseur carbonatée par la solution de phénolphthaléine

Les mesures correspondent aux distances en millimètres entre la surface externe de mortier et le front de coloration, en dehors des coins et lorsque le front de carbonatation passe par une interface granulats-matrice, sont concernées les granulats dont le  $D > 3$  mm.

Cinq mesures sont faites pour chaque face. Nous retenons comme résultat la moyenne arithmétique des épaisseurs mesurées à savoir :

- L'épaisseur la plus faible.
- L'épaisseur la plus importante.
- La moyenne relative aux trois épaisseurs intermédiaires.



**Figure II.14 :** Principe de mesure l'épaisseur carbonatée sur l'échantillon

Pour l'essai de carbonatation accélérée on a utilisé des échantillons de béton de dimensions de  $(4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3)$  pour chaque composition.

L'enceinte de carbonatation accélérée qui se trouve au laboratoire de génie civil est dotée des indicateurs de température et du gaz, par contre l'humidité à l'intérieur pourra être contrôlée à l'aide d'un hygromètre (figure II.15).



**Figure II.15:** Enceinte de la carbonatation accélérée

## II-6 Conclusion

Ce chapitre est divisé en trois parties: une première partie consacrée à la caractérisation des matériaux de base (ciment, résine, sable calcaire, fillers calcaires, fumée de silice, pouzzolane naturelle, super plastifiant et eau de gâchage) et une deuxième partie consacrée à la présentation des techniques expérimentales utilisées pour la caractérisation des mortiers résineux. Elle a également été consacrée à l'optimisation de la formulation de ce type de mortier.

L'étape suivante comprend aussi une présentation des méthodes expérimentales utilisées à savoir la méthode de formulation du béton et l'essai de carbonatation accélérée et ses différentes étapes.

A partir des résultats obtenus, on a fait varier le pourcentage des additions minérales en remplacement du ciment. On a confectionné des échantillons ( $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ ) pour l'essai de carbonatation accélérée et l'essai de résistance à la compression et traction par flexion.

# **CHAPITRE III. RESULTATS ET ANALYSES**

## Introduction

Dans ce chapitre, on présente les résultats de l'étude expérimentale réalisée sur les différents mortiers élaborés. Une discussion de ces résultats est aussi donnée.

Nous abordons tout d'abord l'étude de l'influence de l'ajout de résine sur le comportement physico- mécanique des mortiers résineux modifiés , à savoir la résistance à la compression, à la traction par flexion et l'absorption par immersion où on fait une optimisation du rapport P/C , puis nous étudions l'effet de substitution partielle du ciment par des additions minérales sur les propriétés mécaniques des mortiers résineux modifiés. Enfin, on étudie l'action de carbonatation accélérée sur les caractéristiques physico- mécaniques des mortiers élaborés.

### III-1 Effet de l'ajout de résine

Tableau III.1 : Composition des différents mortiers résineux

Désignation des mortiers	Ciment (g)	Sable (g)	P/C (%)	E/C	Sp (g)
M1	450	1350	0	0.45	1.3
M2	450	1350	2.5	0.45	0.9
M3	450	1350	5	0.45	0
M4	450	1350	7.5	0.37	0
M5	450	1350	10	0.34	0

**Sp : super plastifiant.**

**P=R : polymère=résine.**

#### III-1-1 Maniabilité

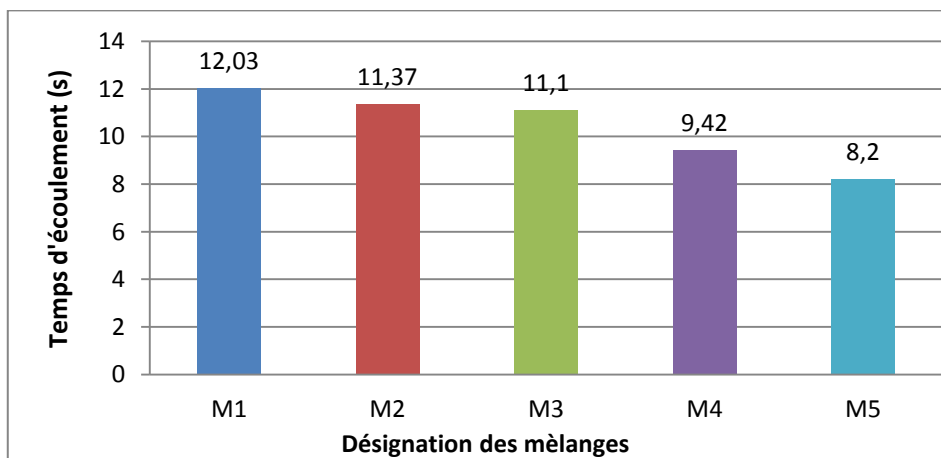


Figure III.1: Effet de l'ajout de résine sur la maniabilité des mortiers résineux modifiés

La substitution massive simultanée du ciment par la résine engendre une variation de la maniabilité du mélange caractérisée par l'écoulement des mortiers à l'état frais. Les essais réalisés, permettant de mesurer le temps d'écoulement au maniabilimètre de mortier type «B». Les résultats de l'évolution de la maniabilité à l'état frais des mortiers étudiés en fonction de taux de substitution partielle de matrice cimentaire par une matrice polymérique sont représentés sur la figure III.1.

Nous constatons également que les comportements de tous les mélanges sont proches les uns des autres où le temps d'écoulement de ces mélanges varie de 12.03 à 8.20s. Enfin, l'ajout du polymère améliore la maniabilité du mélange où le mortier nécessite alors moins d'eau pour une même consistance.

### III-1-2 Absorption d'eau par immersion

Tableau III.2 : Coefficients d'absorption des mortiers préparés

Désignation des mélanges	Coefficient d'absorption (%)
M1	9.24
M2	7.16
M3	6.03
M4	5.58
M5	4.41

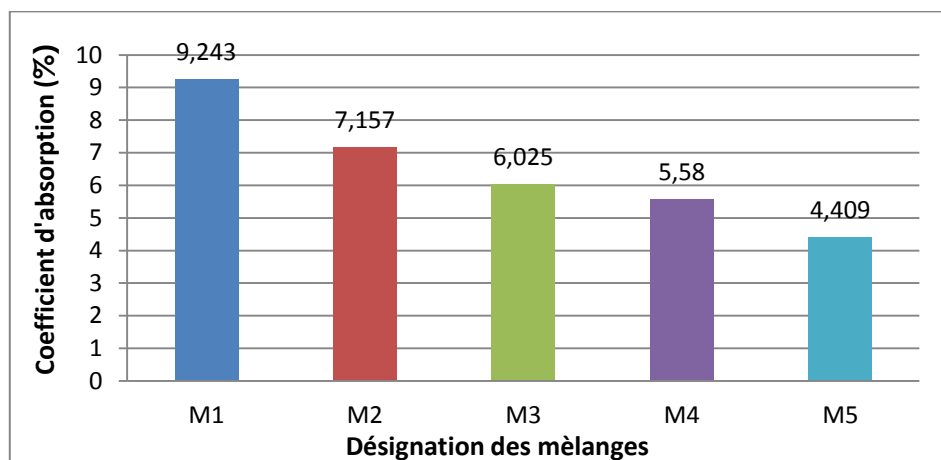


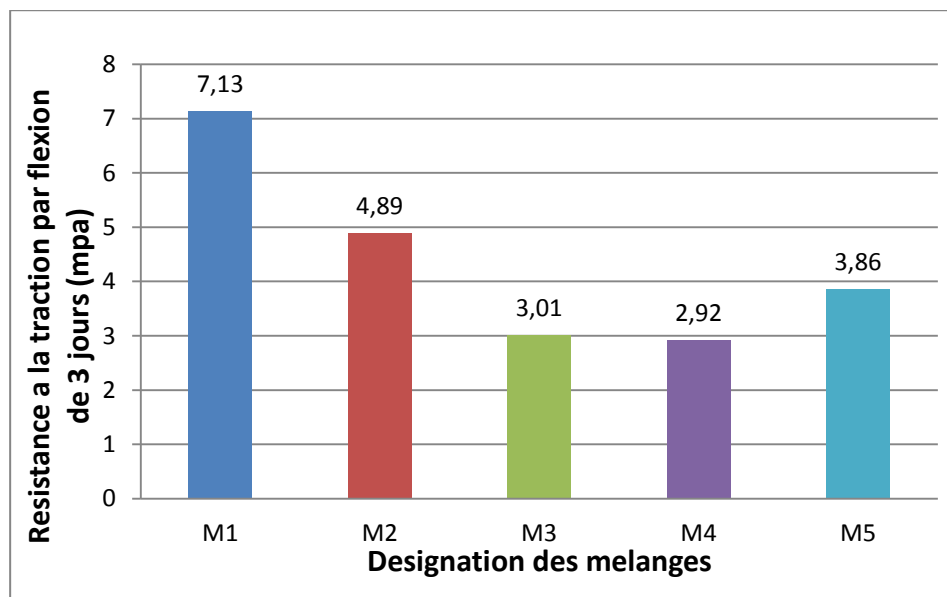
Figure III.2 : Coefficient d'absorption par immersion des mortiers (28 jours)

D'après le tableau III.2 et la Figure III.2, on constate que l'ajout de résine est très avantageux, car il donne le coefficient d'absorption faible par rapport à celui du mortier cimentaire classique. Ceci peut être expliqué par le remplissage des pores de mortier par les polymères ou bien les pores peuvent être scellés avec un film continu de polymère. Ceci dépend de la nature du polymère et du rapport P/C.

En outre, les résultats montrent aussi que l'introduction d'additions minérales conduit à une diminution de l'absorption d'eau et donc la porosité, cela est dû à la réduction de la quantité d'eau de gâchage. Pour cela, le mortier **M5** présente une faible valeur d'absorption qui est égale à 4.4%, c'est-à-dire une porosité non accentuée. Donc, ces résultats montrent bien l'efficacité de l'ajout de résine sur l'absorption d'eau des mortiers élaborés.

### III-1-3 Résistances à la traction par flexion

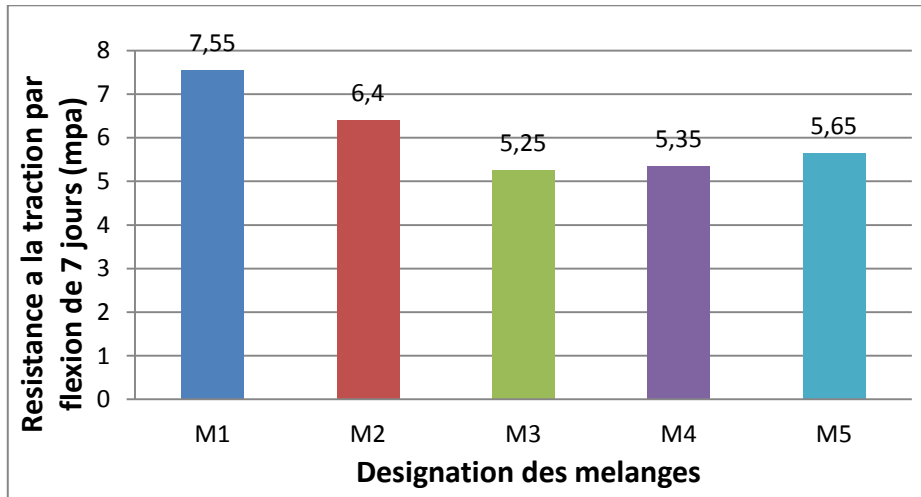
#### III-1-3-1 Résistances à 3 jours



**Figure III.3 :** Influence de résine sur la résistance à la traction par flexion des mortiers à 3 jours

La figure III.3 indique la résistance à la traction par flexion des différents mortiers à 3 jours. D'après cette figure, on remarque que la résistance du mortier **M1** (mortier de référence sans polymère) à l'âge de 3 jours est la plus élevée, elle est de l'ordre de 7.13MPa en comparaison avec celle des mortiers modifiés par la résine. La résistance du mortier **M2** est de 4.89MPa, cette résistance est meilleure que celle des autres mortiers résineux modifiés. **M4** et **M3** présentent des résistances proches les unes des autres qui sont respectivement de 2.92MPa et 3.01 MPa. La résistance la plus faible est du mortier **M4**.

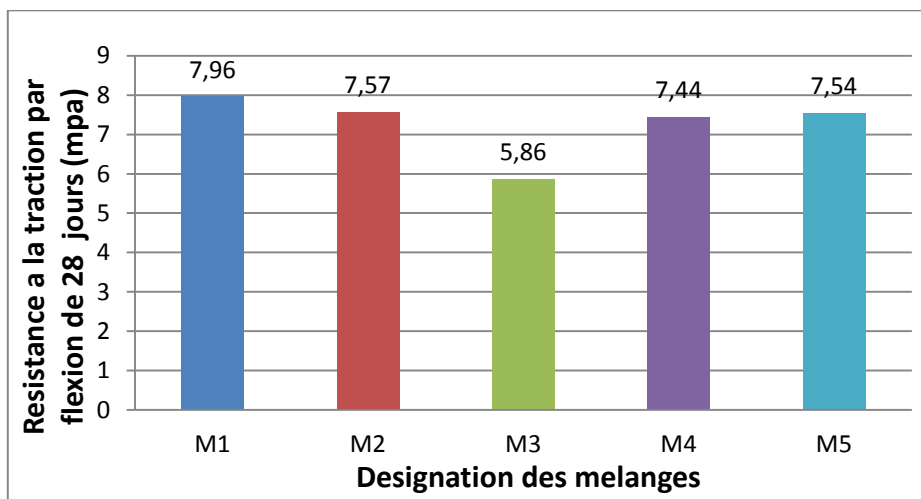
### III-1-3-2 Résistances à 7 jours



**Figure III.4 :** Influence de résine sur la résistance à la traction par flexion des mortiers à 7journs

D'après la figure III.4, les résultats obtenus montrent que la résistance à la traction par flexion à l'âge de 7 jours .Le mortier **M1** (mortier de ciment ordinaire) montre toujours la résistance la plus élevée dont la valeur est égale 7.55 MPa, la résistance du mortier **M2** est égale à 6.4 MPa. Les autres mortiers **M5**, **M4** et **M3** présentent des résistances proches les unes des autres qui sont respectivement 5.25, 5.35 et 5.65 MPa.

### III-1-3-3 Résistances à 28 jours

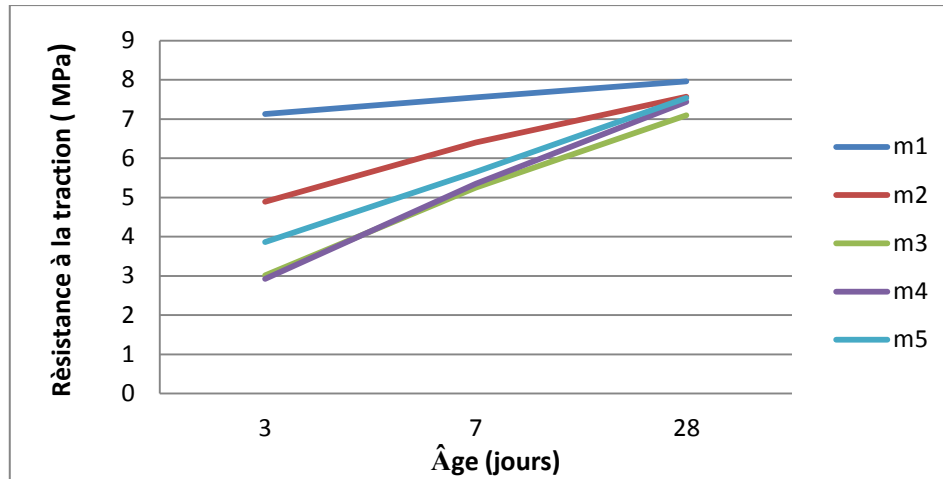


**Figure III.5:** Influence de la résine sur la résistance à la traction par flexion des mortiers à 28 jours

On constate d'après la Figure III.5 que la résistance du mortier de référence **M1** à l'âge de 28 jours indique que la résistance la plus élevée est égale à 7.96 MPa, tandis que les autres mortiers

M2, M5 et M4 présentent des résistances proches les unes des autres qui sont respectivement de 7.57, 7.44 et 7.54 MPa.

La résistance la plus faible est celle du mortier M3, sa valeur est égale à 5.86MPa. Donc, on peut dire que, pour une même maniabilité, le taux de résine améliore les résistances en traction.



**Figure III.6 :** Evolution de la résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge pour les différents mortiers

On constate d'après ces résultats obtenus que, quel que soit le rapport P/C, la résistance à la traction évolue positivement avec le temps. Notons aussi, que la résistance du mortier témoin composé de 100% de ciment Portland ordinaire est constamment la plus élevée que celle des mortiers modifiés de résine à 28 jours. En outre, à 28 jours, le mortier contenant 2.5% de résine semble le plus approprié pour les mortiers modifiés de résine, la valeur de résistance à la traction est égale à 7.57 MPa. Au-delà de 2.5%, BUREAU et PASCAL la résistance à la traction diminue lorsque le rapport P/C croît. Ceci est en concordance avec d'autres résultats qui ont montré que la résistance à la traction ou à la flexion augmente avec l'augmentation du taux de polymère latex incorporé aux mortiers jusqu'à une quantité seuil qui est égale à 2.5% de résine dans cette étude [BUREAU 2001 ; PASCAL 2002].

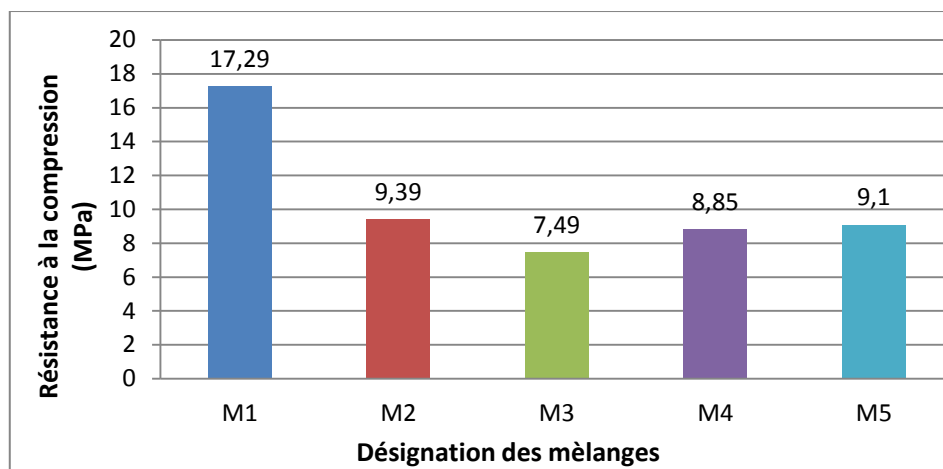
les résultats obtenus montrent que la résistance à la traction par flexion évolue positivement avec l'âge 3 à 7 jours. C'est-à-dire que la résistance augmente pour tous les mortiers.

En général, ces augmentations peuvent être expliquées par l'amélioration globale de la liaison entre les grains de ciment par le latex, à la formation du film de polymère qui est en partie responsable de l'amélioration mécanique des mortiers modifiés et au pontage des microfissures par le polymère. JENNI et ZHONG ont observé une augmentation de la résistance en

compression et une continuité des valeurs de résistances en flexion, ils l'associent donc à la bonne résistance en traction des films de polymère [JENNI , 2005 ; ZHONG ,2002]. Toutefois, ils ont montré que la présence du film n'est pas nécessaire à l'amélioration des propriétés mécaniques si le latex utilisé est apte à former des complexes avec les minéraux du ciment où la nature et la stabilité de certains hydrates sont modifiées, par exemple l'ettringite formée est plus stable.

### III-1-4 Résistances à la compression

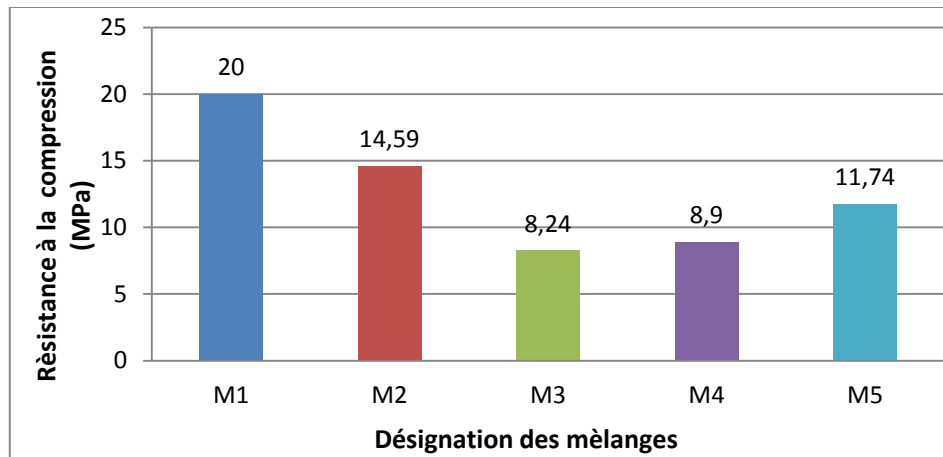
#### III-1-4-1 Résistances à 3 jours



**Figure III.7** : Influence de la résine sur la résistance à la compression des mortiers à 3 jours

La figure III.7 montre que la résistance à la compression à l'âge de 3 jours des différents mortiers. On remarque que la résistance de mortier témoin **M1** est la plus élevée, elle est de l'ordre de 17.29 MPa en comparaison avec celle des mortiers modifiés par la résine. La résistance du mortier **M2**, **M4** et **M5** sont de l'ordre de 9.39, 8.85 et 9.10 MPa respectivement. Le mortier **M3** présente la faible résistance qui est de l'ordre de 7.49 MPa.

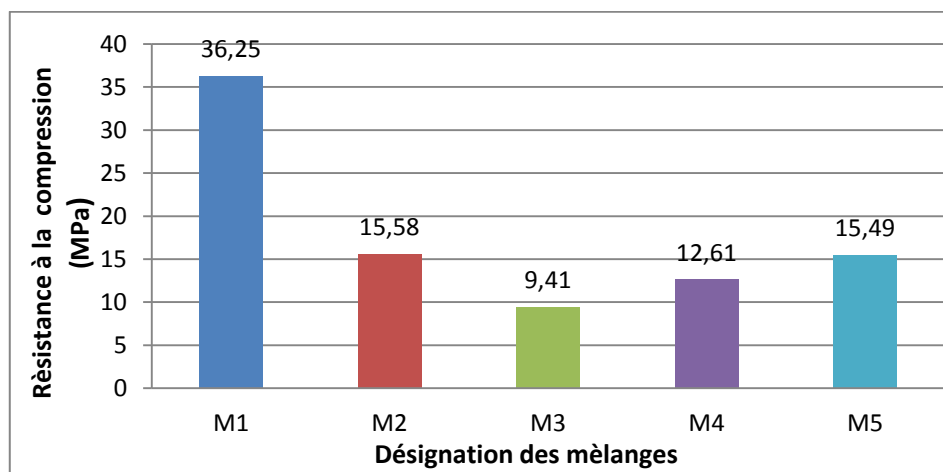
### III-1-4-2 Résistances à 7 jours



**Figure III.8 :** Influence de la résine sur la résistance à la compression des mortiers à 7 jours

La figure III.8 représente la résistance à la compression à l'âge de 7 jours. On a constaté que la résine influe sur la résistance des mortiers et la résistance la plus élevée est celle de mortier **M1** où elle dépasse la valeur de 20 MPa. Par contre, la résistance la plus faible est celle du mortier **M3**, sa valeur est de l'ordre de 8.24MPa.

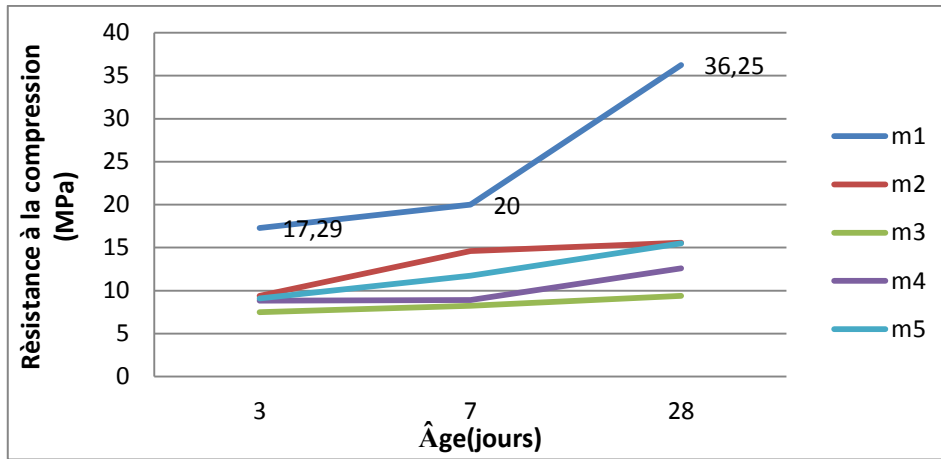
### III-1-4-3 Résistances à 28 jours



**Figure III.9 :** Influence de la résine sur la résistance à la compression des mortiers à 28 jours

On constate d'après la **figure III.9** Il est nettement clair selon les résultats trouvés que le mortier contenant 2.5% de résine possède une meilleure résistance à la compression que celle de tous les mortiers modifiés par la résine à 28 jours.

la résistance du mortier témoin **M1** reste la plus élevée, par contre, la résistance des autres mortiers augmente en fonction du temps mais de la même manière qu'à l'âge de 3 et 7 jours.



**Figure III.10 :** Evolution de la résistance à la compression des mortiers en fonction de l'âge

On constate d'après la figure III.10 que la résistance à la compression de tous les mortiers croît avec le temps, tandis qu'à l'âge de 28 jours.

la résistance en compression du mortier de contrôle est plus élevée que celle des autres mortiers. Ceci confirme les résultats de plusieurs chercheurs qui ont travaillé depuis plusieurs années dans ce domaine et qui ont montré que l'addition de polymère a un effet néfaste sur la résistance à la compression des mortiers, où cette résistance reste identique à celle du mortier non adjuvanté [MIRZA ,2002]. En outre, il a été noté que la résistance à la compression diminue rapidement quand le rapport P/C augmente quel que soit l'âge des éprouvettes des mortiers testés (3, 7 et 28 jours) ; cela est dû à la réduction de la partie cimentaire, dans les matériaux hybrides, ce qui est une partie indispensable et responsable de l'amélioration de la résistance à la compression.

### III-2 Effet des additions minérales

Tableau III.3 : Composition des liants

Compositions (%)	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
P/C	0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Ciment	100	100	70	70	70	70	70	70	70
Filler calcaire	0	0	30	0	0	15	15	0	10
Pouzzolane	0	0	0	0	30	15	15	15	10
Fumée de silice	0	0	0	30	0	0	0	15	10

#### III-2-1 Maniabilité

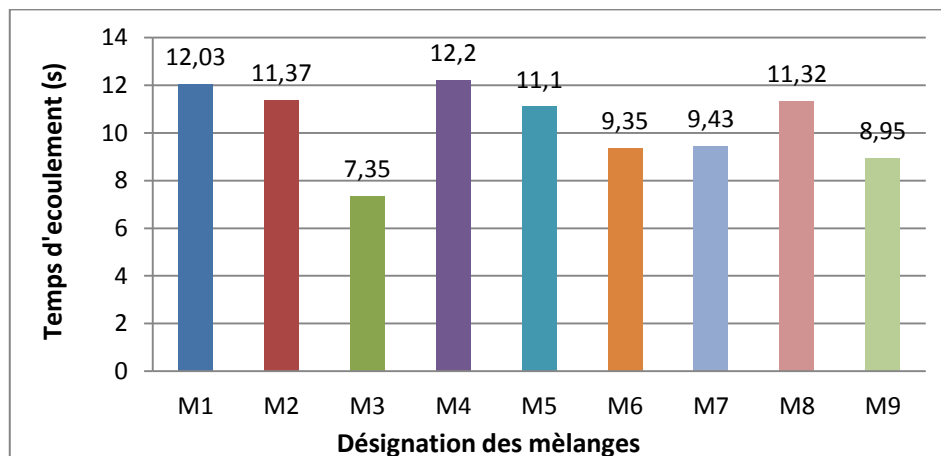


Figure III.11 : Variation du temps d'écoulement en fonction de la composition des mortiers élaborés

La maniabilité des mortiers a été testée à l'aide du maniabilimètre LCL (type B) à mortier, conformément à la norme [NFP 18-437]. Cette grandeur est caractérisée par la mesure du temps d'écoulement qui est d'autant plus grand que la consistance du mortier est épaisse. D'autre part, on note que toutes les valeurs du temps d'écoulement sont dans l'intervalle de 6 à 12s.

D'après la figure III.11, l'incorporation des ajouts minéraux affecte la maniabilité des mortiers frais. En effet, la pouzzolane naturelle et la fumée de silice ont augmenté le temps de vibration de maniabilité c'est-à-dire ont diminué la maniabilité du mortier, en remarquant que le mortier

résineux modifié **M3** présente un temps minimal par rapport à celle du mortier **M4** qui présente un temps maximal égale à 12.2s.

On constate l'effet bénéfique du filler calcaire sur le plan de maniabilité, comme il a été observé pour le mortier **M3**, cela est dû à l'effet de dilution engendrée par les fillers calcaires et la diminution de la viscosité des mortiers d'une manière considérable.

### III-2-2 Résistances à la traction par flexion

#### III-2-2 -1 Résistances à 3 jours

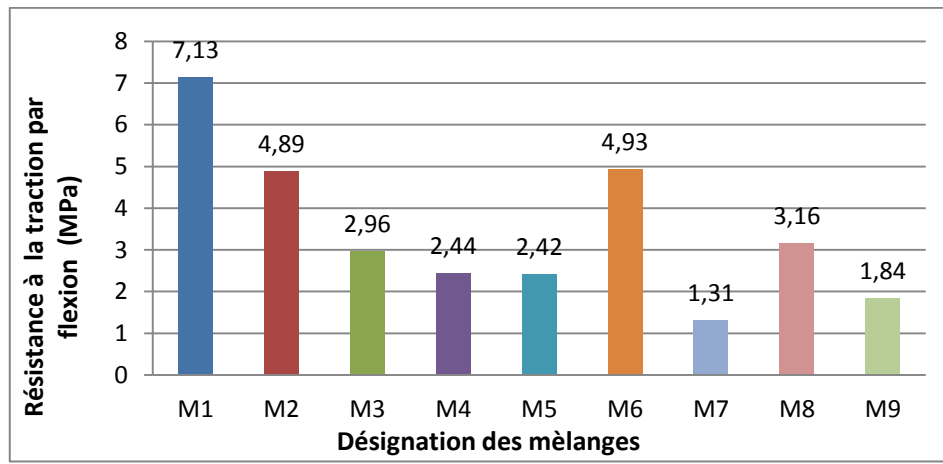


Figure III.12 : Résistance à la traction par flexion des mortiers à 3 jours

La figure III.12 se présente la résistance à la traction par flexion des différents mortiers. On remarque que la résistance du mortier **M1** (mortier de référence sans addition et sans polymère) à l'âge de 3 jours est la plus élevée, elle est de l'ordre de 7.13MPa en comparaison avec celle des mortiers modifiés de résine. La résistance de mortier **M6** (15% FS et 15% FC) est de 4.93MPa est la meilleure résistance.

D'autre part, les résistances des mortiers **M5**, **M4** sont de 2.42 MPa et 2.44 MPa respectivement. La résistance la plus faible est du mortier **M7** (15% FC et 15% PN) et sa valeur est égale à 1.31MPa.

### III-2-2-2 Résistances à 7 jours

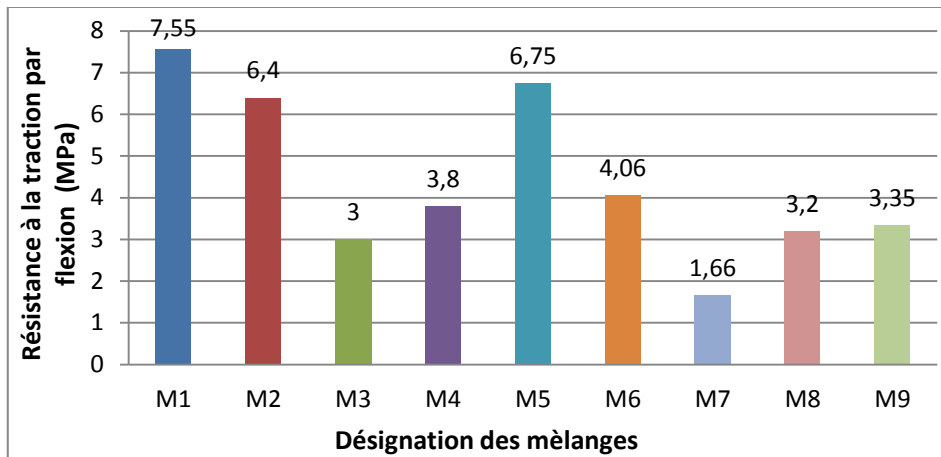


Figure III.13: Résistance à la traction par flexion des mortiers à 7jours

La figure III.13 montre la résistance à la traction par flexion à l'âge de 7 jours, Le mortier de ciment ordinaire **M1** montre la résistance la plus élevée dont la valeur est 7.55 MPa. Les valeurs des résistances du mortier résineux modifié sans ajouts minéraux **M2** est égale 6.4MPa, du mortier **M6** (15% FC et 15% FS) et du mortier **M3** (30 % FC) sont égales à 4.06MPa, 3 MPa respectivement. Tandis que les autres mortiers **M8**, **M9**, **M5** et **M4** donnent des résistances proches les unes des autres dont les valeurs sont égales à 3.2, 3.35 ,6.75 et 3.8 MPa respectivement. La résistance la plus faible est celle du mortier **M7** (15% PN et 15% FC) et sa valeur est égale à 1.66 MPa.

### III-2-2-3 Résistances à 28 jours

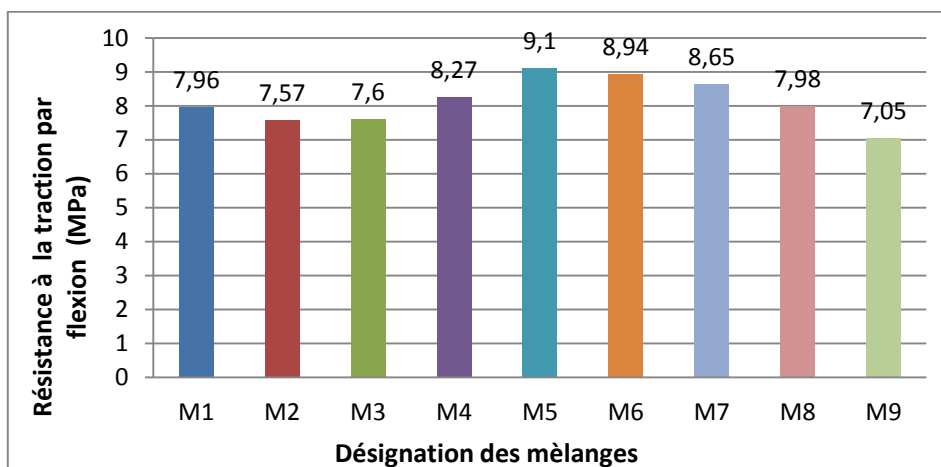
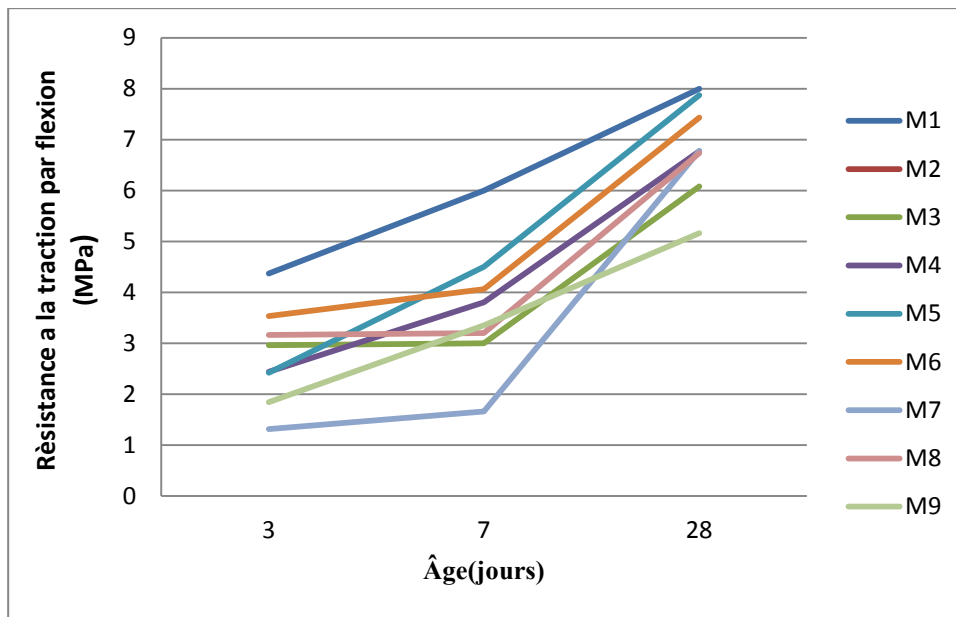


Figure III.14 : Résistance à la traction par flexion des mortiers à 28jours

On montre d'après la figure III.14 que la résistance à la traction évolue positivement avec le temps comme le rapport P/C est constant, aussi que la résistance du mortier du **M5** qui contient 30% de pouzzolane naturelle devient la plus élevée, sa valeur est de 9.10 MPa, car le PN a un effet bénéfique surtout à long terme. Le mortier **M6** (15% FC et 15% FS) la résistance est égale 8.94 MPa. On remarque que les mortiers de contrôle **M1** et **M2** présentent des résistances de 7.96MPa et 7.57 MPa. Donc, on peut dire que les additions minérales sont avantageuses pour la résistance des mortiers résineux modifiés à long terme.

D'autre part, les résistances des mortiers **M8**, **M7**, **M4** et **M3** sont de 7.98, 8.65, 8.27 et 7.60 (en MPa) respectivement. La résistance la plus faible est du mortier **M9** et sa valeur égale 7.05 MPa.



**Figure III.15 :** Evolution de la résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge pour les différents mortiers

D'après la figure III.15 les résultats obtenus indiquent que la résistance à la traction par flexion croît avec le temps pour tous les mortiers

La résistance de mortier **M1** et **M2** reste la plus élevée à 3 et 7 jours en comparaison avec les mortiers modifiés de résine contenant des additions minérales, Dans cette étude, nous avons remarqué que l'incorporation des ajouts minéraux tels que PN, FC et FS est bénéfique sur la résistance à la traction.

### III-2- 3 Résistances à la compression

#### II-2-3-1 Résistances à 3 jours

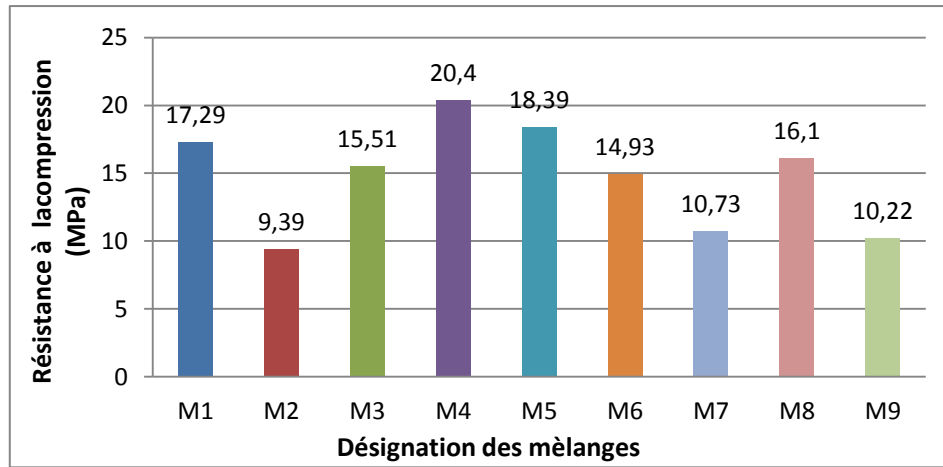


Figure III.16 : Résistance à la compression des mortiers à 3jours

D'après La figure III.16, la résistance du mortier **M4** (30% FS) est la plus élevée et elle est de l'ordre de 20.04 MPa en comparaison à celles des autres mortiers. D'autre part, les valeurs de résistances à la compression des mortiers **M7**, **M8** et **M3** sont 10.73 ,16.1et 15.51 MPa respectivement. La résistance la plus faible est du mortier **M2** et sa valeur égale à 9.39 MPa.

#### III-2-3-2 Résistances à 7 jours

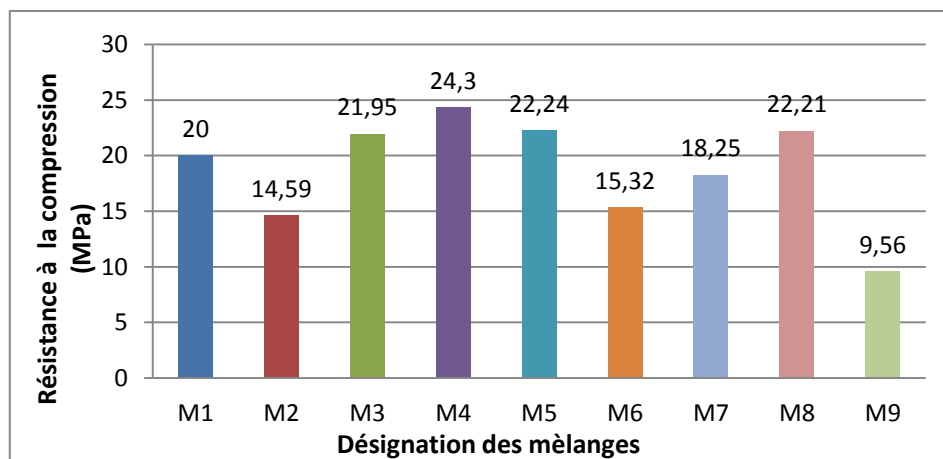


Figure III.17 : Résistance à la compression des mortiers à 7jours

La figure III.17 représente la résistance à la compression de chaque mortier. La résistance la plus élevée est celle du mortier **M4** (30% FS) qui est de 24.30MPa. Par contre, le mortier **M5** (30% PN) et le mortier **M3** (30% FC) donnent des résistances égales à 22.24 MPa et 21.95MPa Le mortier **M9** présente la faible résistance qui égale à 9.56MPa.

### III-2-3-3 Résistances à 28 jours

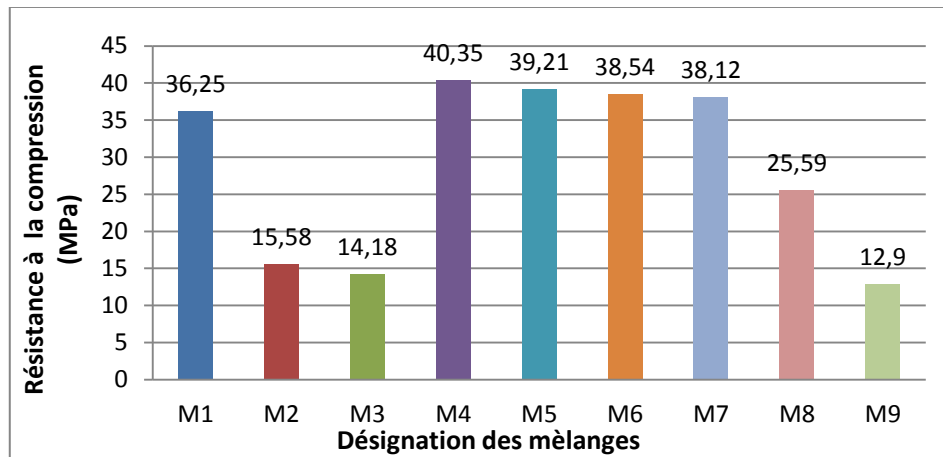


Figure III.18 : Résistance à la compression des mortiers à 28jours

On remarque d'après la figure III.18, que la résistance à la compression de tous les mortiers s'est accrue en fonction du temps, mais ce n'est pas de la même manière. En plus, il y'a des mortiers qui marquent une nette augmentation comme le mortier **M4** où sa résistance à la compression atteint 40.35MPa et **M5** (30% PN) est égale 39.21MPa qui ont enregistré les meilleures résistances à la compression à long terme, par contre, la résistance du mortier **M9** reste la plus faible.

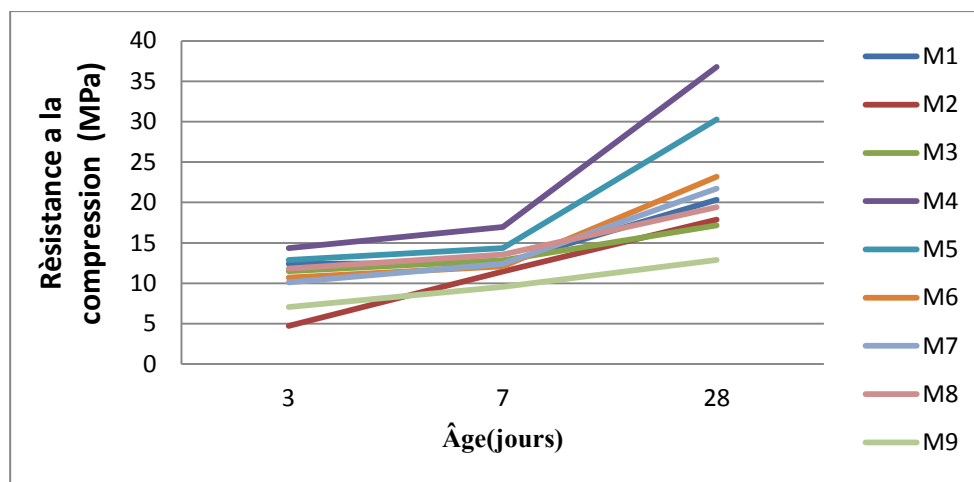


Figure III.19 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge pour les différents mortiers

On peut conclure d'après la figure III.19 que les additions minérales sont avantageuses pour les mortiers résineux modifiés et elles présentent les meilleures résistances mécaniques que ce soit à court ou à long terme, il y'a des mortiers qui marquent une nette augmentation comme le mortier **M4**, par contre le mortier **M9** reste la plus faible.

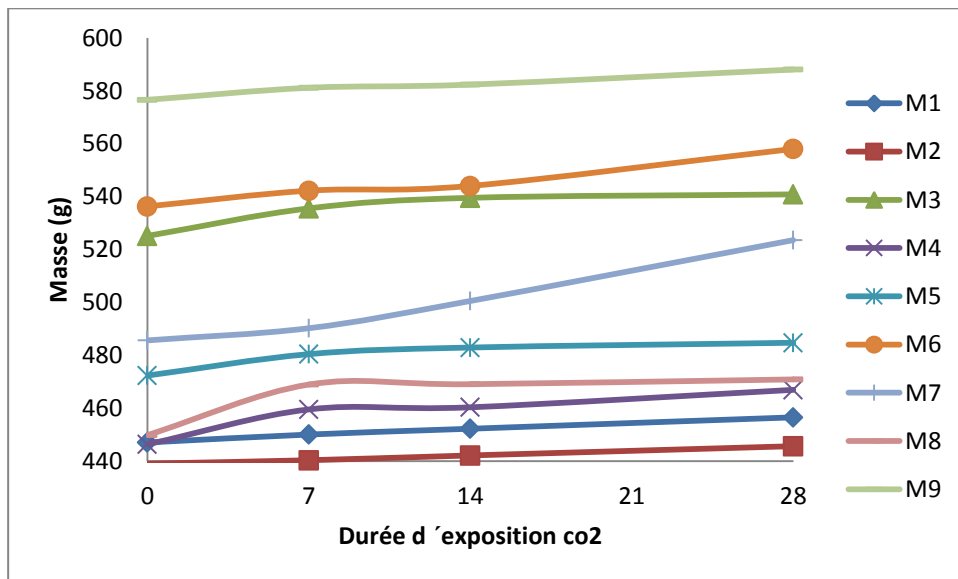
### III-3 Effet des additions minérales sur la carbonatation accélérée

#### III-3-1 Evolution de la masse des échantillons dans l'enceinte de carbonatation

**Tableau III.4:** Résultats de la masse d'échantillons pour les différents mortiers, après la carbonatation

Age (jours)	Masse des mortiers (g)								
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
7	450	440.3	535.5	459.5	480.4	542.2	490.2	468.9	581.1
14	452.2	442.1	539.5	460.3	482.9	544	500.5	469.03	582.3
28	456.5	445.6	540.8	466.9	484.7	558	523.5	470.85	588

Le tableau III.4 montre les résultats de l'évolution de la masse d'échantillons pour les différents mortiers après 7,14 et 28 jours d'exposition au CO<sub>2</sub> dans l'enceinte de carbonatation.



**Figure III.20 :** Gain de masse des échantillons pour les différents mortiers en fonction de la durée d'exposition au CO<sub>2</sub>

D'après la figure III.20, on remarque que la carbonatation fait augmenter la masse des échantillons en fonction de la substitution de ciment par les additions minérales et la masse des échantillons augmentent encore avec la durée d'exposition.

Cette augmentation est principalement due aux changements de la microstructure (remplacement de la portlandite par la calcite).

### III-3-2 Evolution de la profondeur de carbonatation

La grandeur issue de l'essai de carbonatation accéléré est la profondeur carbonatée, elle est déterminée, selon le mode opératoire [AFPC-AFREM ,1997], par une méthode colorimétrique, sur la section des éprouvettes (4×4×16 cm<sup>3</sup>) coupées en deux, à l'échéance de 7,14 et 28 jours d'exposition.

**Tableau III.5 : Profondeur de carbonatation pour les échantillons du mortier M1**

(jours)	Eprouvettes	Face	Profondeur (mm)	Pr max (mm)	Pr min (mm)	Pr moy(3 distance) (mm)	Pr moy total (mm)
7 j	1	1	0	0	0	0	0
		2	0	0	0	0	
		3	0	0	0	0	
		4	0	0	0	0	
14j	1	1	0	0	0	0	0
		2	0	0	0	0	
		3	0	0	0	0	
		4	0	0	0	0	
28j	1	1	3-9-4-2-3	9	2	3.3	0.9
		2	1-2-0-0-0	2	0	0.3	
		3	0-0-0-0-0	0	0	0	
		4	1-0-0-0-0	1	0	0	

**Tableau III.6 : Profondeur de carbonatation pour les échantillons du mortier M2**

(jours)	Eprouvettes	Face	Profondeur (mm)	Pr max (mm)	Pr min (mm)	Pr moy(3 distance) (mm)	Pr moy total (mm)
7 j	2	1	0	0	0	0	0
		2	0	0	0	0	

**chapitreIII : Résultats et analyse**

		3	0	0	0	0	
		4	0	0	0	0	
<b>14j</b>	2	1	0	0	0	0	0
		2	0	0	0	0	
		3	0	0	0	0	
		4	0	0	0	0	
<b>28j</b>	2	1	0	0	0	0	0
		2	0	0	0	0	
		3	0	0	0	0	
		4	0	0	0	0	

**Tableau III.6 : Profondeur de carbonatation pour les échantillons du mortier M3**

<b>(jours)</b>	<b>Eprouvettes</b>	<b>Face</b>	<b>Profondeur (mm)</b>	<b>Pr max (mm)</b>	<b>Pr min (mm)</b>	<b>Pr moy(3 distance) (mm)</b>	<b>Pr moy total (mm)</b>
<b>7 j</b>	<b>3</b>	1	40-10-6-5-34	40	5	16	11.7
		2	40-9-8-10-5	40	5	9	
		3	40-13-8-10-17	40	8	13.3	
		4	10-9-6-7-40	40	6	8.6	
<b>14j</b>	<b>3</b>	1	40-19-10-15-9	40	9	14.6	17.55
		2	40-11-13-18-40	40	11	23.6	
		3	12-40-13-16-13	40	12	14	
		4	40-20-8-15-19	40	8	18	
<b>28j</b>	<b>3</b>	1	40-20-14-15-9	40	9	16.3	19.23
		2	40-12-15-18-40	40	12	24.33	
		3	40-12-13-15-14	40	12	14	
		4	40-14-13-10-40	40	10	22.3	

**Tableau III.7 : Profondeur de carbonatation pour les échantillons du mortier M4**

(jours)	Eprouvettes	Face	Profondeur (mm)	Pr max (mm)	Pr min (mm)	Pr moy(3 distance) (mm)	Pr moy total (mm)
7 j	4	1	0	0	0	0	0.15
		2	5-2-1-0-0	5	1	0.6	
		3	0	0	0	0	
		4	0	0	0	0	
14j	4	1	0	0	0	0	0.41
		2	5-7-0-0-0	7	0	1.6	
		3	0	0	0	0	
		4	0	0	0	0	
28j	4	1	20-6-1-2-10	20	1	6	1.9
		2	1-3-2-1-1	3	1	1.33	
		3	1-0-0-0-0	1	0	0	
		4	2-1-0-1-0	2	1	0.3	

**Tableau III.8 : Profondeur de carbonatation pour les échantillons du mortier M5**

(jours)	Eprouvettes	Face	Profondeur (mm)	Pr max (mm)	Pr min (mm)	Pr moy(3 distance) (mm)	Pr moy total (mm)
7 j	5	1	1-3-4-2-5	5	1	3	2.9
		2	5-2-2-4-3	5	2	3	
		3	6-2-3-1-2	6	1	2.3	
		4	3-5-4-3-2	5	2	3.3	
14j	5	1	6-7-5-8-4	8	4	6	6.86
		2	5-7-7.5-6.5-8	8	5	7	
		3	5.5-7-6.5-8.5-7	8.5	5.5	6.83	
		4	7-6-8-8-6.5	8	6	7.61	
28j	5	1	11-12.5-14-15-12	15	11	12.8	12.6

**chapitreIII : Résultats et analyse**

		2	-11-15-14.5- 13-11.5	15	11.5	12.8	
		3	14-13-12-11.5- 12	14	11.5	12.3	
		4	14.5-11-12-13- 12.5	14.5	11	12.5	

**Tableau III.9 :** Profondeur de carbonatation pour les échantillons du mortier M6

(jours)	Eprouvettes	Face	Profondeur (mm)	Pr max (mm)	Pr min (mm)	Pr moy(3 distance) (mm)	Pr moy total (mm)
<b>7 j</b>	<b>6</b>	1	4-5-3-5-6	6	3	4.6	4.7
		2	2-3-3-5-6	6	2	3.6	
		3	6-3-6-4-3	6	3	4.3	
		4	6-6-7-5-8	8	5	6.3	
<b>14j</b>	<b>6</b>	1	40-40-12-15-40	40	12	31.6	25.62
		2	40-16-15-17-40	40	15	24.3	
		3	40-40-10-12-15	40	10	22.3	
		4	40-16-15-17-40	40	15	24.3	

**Tableau III.10 :** Profondeur de carbonatation pour les échantillons du mortier M7

(jours)	Eprouvettes	Face	Profondeur (mm)	Pr max (mm)	Pr min (mm)	Pr moy(3 distance) (mm)	Pr moy total (mm)
<b>7 j</b>	<b>7</b>	1	6-7-5-8-4	8	4	6	6.86
		2	5-7-7.5-6.5-8	8	5	7	
		3	5.5-7-6.5-8.5-7	8.5	5.5	6.83	
		4	7-6-8-8-6.5	8	6	7.61	
<b>14j</b>	<b>7</b>	1	11-12.5-14-15- 12	15	11	12.8	12.6
		2	-11-15-14.5- 13-11.5	15	11.5	12.8	
		3	14-13-12-11.5-	14	11.5	12.3	

**chapitreIII : Résultats et analyse**

			12				
		4	14.5-11-12-13- 12.5	14.5	11	12.5	
<b>28j</b>	<b>7</b>	1	40-19-10-11-9	40	9	13.3	16.75
		2	40-11-13-16-40	40	11	23	
		3	12-40-13-13-13	40	12	13	
		4	40-20-8-12-19	40	8	17	

**Tableau III.11 : Profondeur de carbonatation pour les échantillons du mortier M8**

(jours)	Eprouvettes	Face	Profondeur (mm)	Pr max (mm)	Pr min (mm)	Pr moy(3 distance) (mm)	Pr moy total (mm)
<b>7 j</b>	<b>8</b>	1	2-5-4-3-2	5	2	3	2.12
		2	1-1.5-2-2-5	5	1	1.83	
		3	5-2-1-3.5-3	5	2	2.5	
		4	4-2-1.5-1-2	4	1	1.16	
<b>14j</b>	<b>8</b>	1	1-1.5-5-2-4	5	1	2.5	3.03
		2	4-2-3.5-1-1.5	4	1	2.33	
		3	5-2-4.5-3-2	5	2	4.16	
		4	5-2.5-3-4-1	5	1	3.16	
<b>28j</b>	<b>8</b>	1	6-7-6-8-4	8	4	6.3	7.03
		2	5-8-7.5-6.5-8	8	5	7.33	
		3	5.5-7-6.5-8.5- 7.5	8.5	5.5	7	
		4	7.5-6.5-8.5-9-6	9	6	7.5	

**Tableau III.12 : Profondeur de carbonatation pour les échantillons du mortier M9**

(jours)	Eprouvettes	Face	Profondeur (mm)	Pr max (mm)	Pr min (mm)	Pr moy(3 distance) (mm)	Pr moy total (mm)
<b>7 j</b>	<b>9</b>	1	40-40-40- 29-40	40	29	40	37.24
		2	40-29-28-	40	28	32.66	

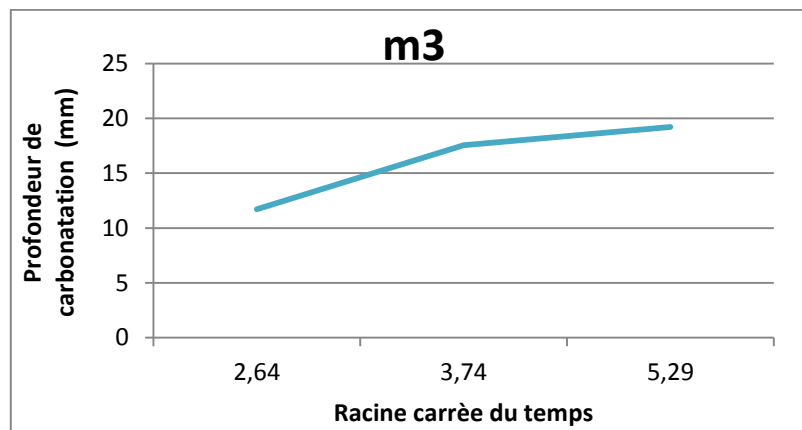
			29-40				
		3	40-40-29- 40-40	40	29	40	
		4	40-29-28- 40-40	40	28	36.3	

### III-3-3 : Comparaisons de la profondeur de carbonatation des différents mortiers

Le mortier **M9** nous remarquons que la profondeur de carbonatation atteint le max à 7 jours.

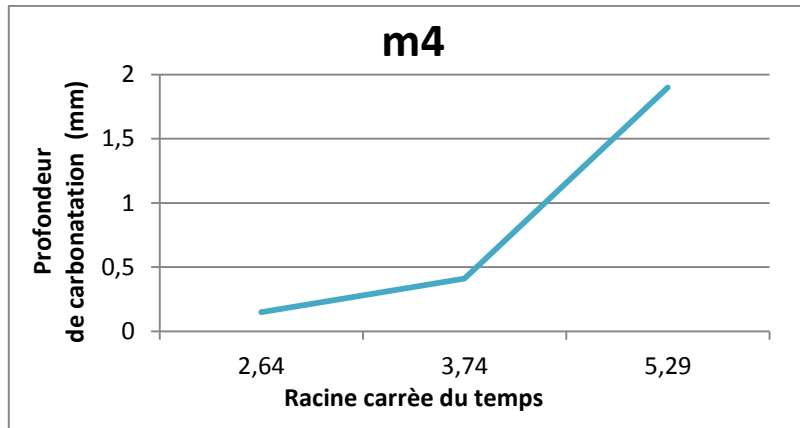
**Tableau III.13** : Résultats des tableaux (5-6-7-8-9-10-11-12 )

Age (jours)	La profondeur de la carbonatation (mm)								
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
7	0	0	11.7	0.15	2.9	4.7	6.86	2.12	37.24
14	0	0	17.55	0.41	6.86	25.62	12.6	3.03	/
28	0.9	0	19.23	1.9	12.6	/	16.75	7.03	/



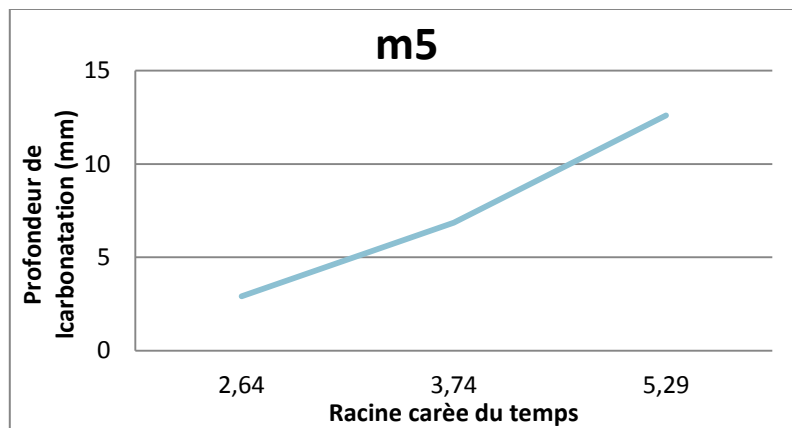
**Figure III.21**: Evolution de la profondeur de la carbonatation en fonction de la racine carrée temps pour **M3**

D'après la figure III.21, on remarque que la profondeur de la carbonatation augmente avec l'augmentation de la durée d'exposition au CO<sub>2</sub>. Mais cette fois devient linéaire de 7 à 28 jours. La profondeur de mortier **M3** est la plus élevée par rapport les mortiers **M4** et **M5**. Ceci permet de nous dire que l'effet de calcaire sur la résistance à la de carbonatation est faible.



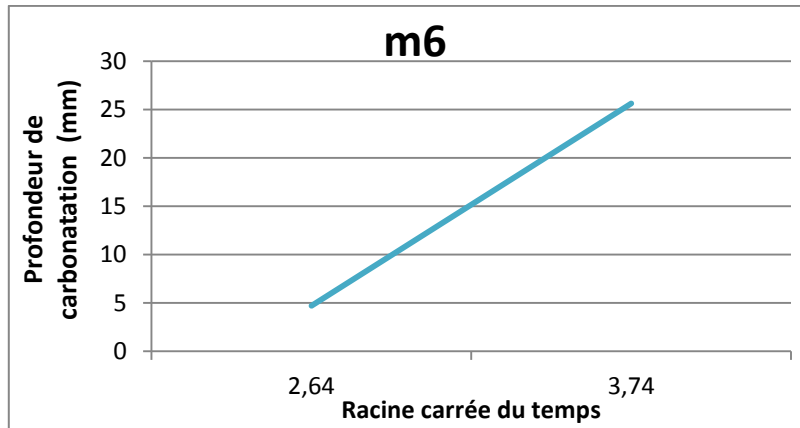
**Figure III.22:** Evolution de la profondeur de la carbonatation en fonction de la racine carrée du temps pour M4

D'après la figure III.22, on remarque que la profondeur de la carbonatation augmente aussi avec l'augmentation de la durée d'exposition au  $\text{CO}_2$ . L'évolution de la carbonatation n'est pas linéaire. Elle est accentuée de 7 à 14 jours, presque constante de 14 à 28 jours d'exposition, mais le mortier **M4** montre la plus faible profondeur par ce que l'effet de la fumée de silice sur la résistance à la de carbonatation est augmenté.



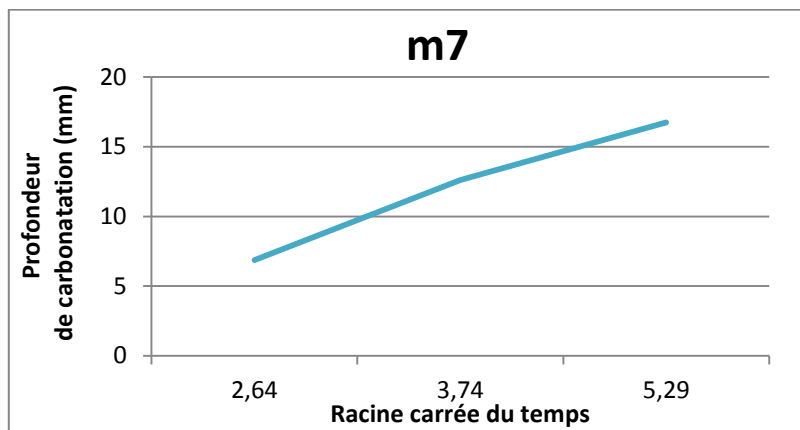
**Figure III.23:** Evolution de la profondeur de la carbonatation en fonction de la racine carrée du temps pour M5

D'après la figure III.23, on constate que la profondeur de la carbonatation augmente avec la durée d'exposition au  $\text{CO}_2$ . L'évolution de la carbonatation n'est pas totalement linéaire et on conclut que la pouzzolane résiste moins à la carbonatation en comparaison à la fumée de silice.



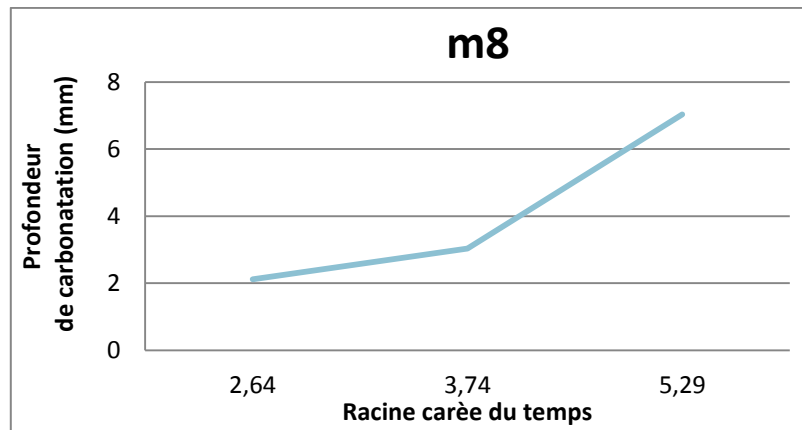
**Figure III.24:** Evolution de la profondeur de la carbonatation en fonction de la racine carrée du temps pour M6

D'après la figure III.24, on remarque que la profondeur de la carbonatation augmente avec la durée d'exposition au CO<sub>2</sub>, mais cette fois devient linéaire.



**Figure III.25:** Evolution de la profondeur de la carbonatation en fonction de la racine carrée du temps pour M7

D'après la figure III.25, on remarque que la profondeur de la carbonatation augmente aussi avec la durée d'exposition au CO<sub>2</sub>, mais cette fois devient linéaire de 7 à 28 jours.



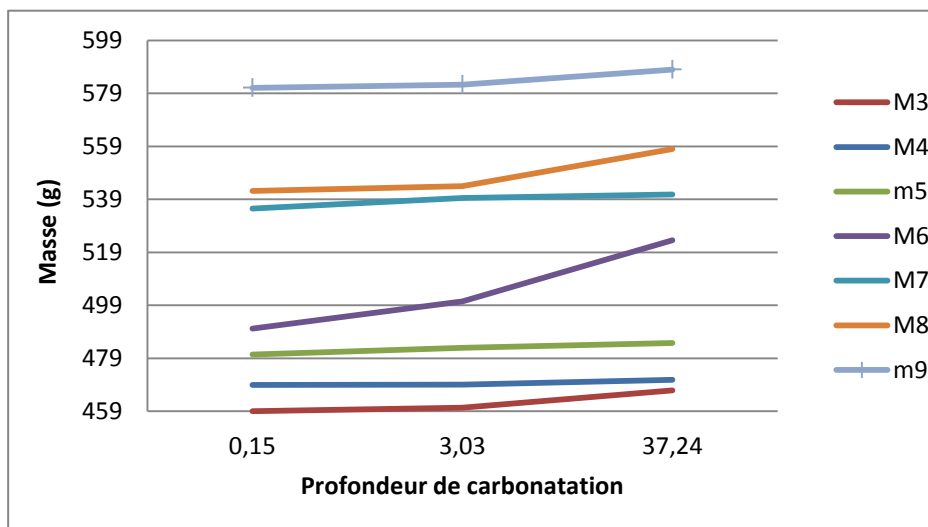
**Figure III.26:** Evolution de la profondeur de la carbonatation en fonction de la racine carrée du temps pour M8

D'après la figure III.26, on remarque que la profondeur de la carbonatation augmente toujours avec la durée d'exposition au CO<sub>2</sub>, mais cette fois, l'augmentation n'est pas linéaire. Elle est accentuée de 7 à 14 jours, presque constante de 14 à 28 jours d'exposition

**Remarques**

- ✚ Durant la période de 7 à 14 jours, la quantité disponible de la portlandite est plus importante, ce qui fait que la carbonatation est plus rapide avec formation de calcite.
- ✚ Pour la période entre 14 et 28 jours, la quantité de portlandite disponible devient faible, vu qu'elle est consommée pendant la première période. cela va réduire la vitesse de carbonatation.

**III-3-4 : Evolution de la masse en fonction de la profondeur de la carbonatation**

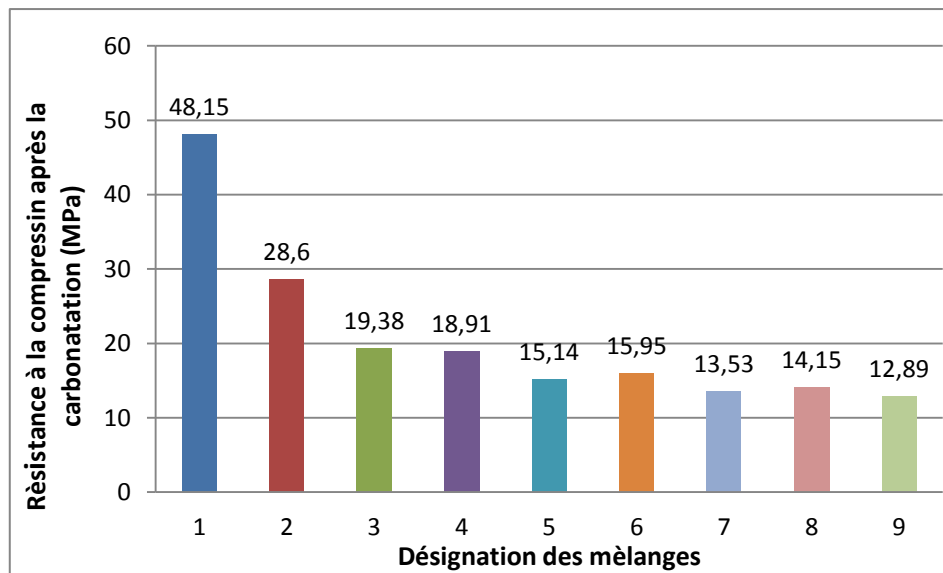


**Figure III.27 :** Evolution de la masse en fonction de la profondeur de la carbonatation

La figure III.27 montre l'évolution de la masse en fonction de la profondeur de la carbonatation. D'après cette figure, on remarque que la masse des échantillons carbonatés augmente avec l'augmentation de la profondeur de carbonatation, ce qui laisse à penser qu'il existe une relation qui lie le gain de masse à la profondeur de carbonatation, c'est à dire qu'on peut estimer la profondeur de carbonatation à partir d'une simple pesée, en évitant ainsi l'utilisation de solution de phénol.

Cette augmentation est due principalement à ce que la carbonatation du béton effectue des changements au niveau de la microstructure (remplacement de la portlandite par la calcite).

#### III-3-5 Effets de la carbonatation sur la résistance à la compression



**Figure III.28** : Résistance à compression après carbonatation de 28 jours (MPa)

La figure III.28 représente la résistance à la compression après carbonatation de 28 jours (MPa) des différents mortiers.

D'après cette figure La résistance à la compression pour le mortier **M1** montre qu'il s'agit d'un mortier de bonne qualité.

On remarque que le taux des additions dans les mortiers **M3** (30% FC), **M4**(30% FS) et **M5**(30% PN) diminue la résistance à la compression, elles sont de 19.38 MPa, 18.9 MPa 15.14 MPa, tandis que le mortier **M1**(mortier sans addition) qui est égale à 48.15 MPa .

Donc mes résultats sont également conformes aux résultats antérieurs :

- D'après l'étude expérimentale de FEDERIC et al. Federic et al Ils montrent qu'il y a une diminution de résistance à la compression en cas d'utilisation des filler calcaire avec de pourcentage (34%) [FEDERIC et al, 2008].

- Kazim et al. montrent qu'il y a une diminution de résistance à la compression en cas d'utilisation des fumées de silice avec un pourcentage de 25% à 40% , tandis que la résistance à la carbonatation est augmentée. Dans notre travail, on s'intéresse à l'effet de l'ajout calcaire sur la carbonatation du béton [KAZIM, 1999].

- Les travaux de KRITSADA montrent que des bétons pouzzolaniques ont été longtemps considérés moins capables de résister à la carbonatation que des ciments portland dus à leur contenu de portlandite [KRITSADA ,2005].

#### III-6 Conclusion

Dans ce chapitre on a analysé les résultats de l'étude expérimentale sur le comportement physico-mécanique des différents mortiers à l'état frais et durci, qui peuvent être résumés comme suit :

- ✓ L'ajout du polymère améliore la maniabilité du mélange où le mortier nécessite alors moins d'eau pour une même consistance.
- ✓ Le coefficient d'absorption diminue avec l'augmentation du pourcentage de résine.
- ✓ Les résistances mécaniques des mortiers, que ce soit en compression ou en traction par flexion, augmentent avec le temps quel que soit le paramètre étudié.
- ✓ Les additions minérales ont un effet bénéfique au cours du temps surtout à long terme notamment la pouzzolane naturelle
- ✓ Le mortier **M4** présente une résistance à la compression la plus élevée est égale 40.35 MPa
- ✓ L'ajout des additions minérales améliore la résistance mécanique et le mortier **M5** présente la résistance la plus élevée à la traction et elle est égale à 9.10 MPa.
- ✓ L'ajout de la pouzzolane naturelle et de la fumée de silice augmente le temps d'écoulement du mortier frais.

L'essai de la carbonatation accélérée des mortiers résineux modifiés contenant les additions minérales a permis de tirer les conclusions suivantes :

- ✓ La fumée de silice augmente la résistance à la carbonatation.
- ✓ La pouzzolane naturelle est moins capable de résister à la carbonatation que la fumée de silice.
- ✓ L'effet du filler calcaire sur la résistance de carbonatation est faible.
- ✓ La profondeur de la carbonatation augmente avec la durée d'exposition.
- ✓ L'augmentation de la profondeur de carbonatations engendre l'augmentation de la masse.
- ✓ Les ajouts minéraux augmentent la profondeur carbonatée.
- ✓ Un dosage en ciment élevé diminue la profondeur de carbonatation.
- ✓ Le mortier résineux modifié possède une meilleure résistance à la carbonatation accélérée.
- ✓ Le taux des additions dans les mortiers (30% FC), (30% FS) et (30% PN) a diminué la résistance à la compression à 28 jours par rapport au mortier **M1** (sans addition minérale)

# **CONCLUSION GENERALE**

# Conclusion générale et perspective

---

## Conclusion générale

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre général de l'étude des nouveaux mortiers et la valorisation des ressources locales également.

Le premier objectif de ce travail expérimental est une contribution à l'amélioration du comportement physico-mécanique des mortiers par ajout de résine et substitution partielle du ciment par les additions minérales. Nous avons utilisé trois types d'ajouts avec différents taux (fillers calcaires, pouzzolane naturelle et fumée de silice). Les résultats obtenus dans cette étude expérimentale nous permettent de tirer les conclusions suivantes:

- ✓ Il a été constaté que la maniabilité des mélanges s'améliore avec l'ajout de résine .
- ✓ La principale remarque à noter est que la maniabilité des mortiers résineux modifiés contenant des additions minérales est fortement influencée par la résine, ainsi que la nature et la proportion des ajouts minéraux.
- ✓ le coefficient d'absorption diminue avec l'augmentation de pourcentage de résine (la résine est avantageuse car elle donne de meilleure coefficient d'absorption).
- ✓ Les résistances mécaniques des mortiers, que ce soit en compression ou en traction par flexion, augmentent avec le temps quelque soit le paramètre étudié.
- ✓ Les additions minérales ont un effet bénéfique au cours du temps surtout à long terme notamment la pouzzolane naturelle.
- ✓ Le mortier **M4** contenant 30% de fumée de silice présente une résistance à la compression plus élevée.
- ✓ L'ajout des additions minérales améliorent la résistance mécanique. Il est à noter que le mortier **M5** contenant 30% de pouzzolane naturelle présente la résistance la plus élevée à la traction qui est égale à 9.10 MPa, par contre, le **M4** présente la résistance la plus élevée à la compression et elle est égale à 40.35 MPa .

La deuxième étape de ce travail expérimental consiste à étudier la carbonatation des mortiers (mesure de la profondeur de carbonatation, l'évolution de la masse et l'évolution de la résistance à la compression en fonction de la durée d'exposition au CO<sub>2</sub> et l'évolution de la profondeur de carbonatation avec différents ajouts et différents taux du remplacement). Cette étude expérimentale nous a permis d'avancer certaines conclusions, parmi lesquelles :

- ✓ La fumée de silice augmente la résistance à la carbonatation.
- ✓ La pouzzolane naturelle est moins capable de résister à la carbonatation que la fumée de silice.
- ✓ L'effet du filler calcaire sur la résistance de carbonatation est faible.

## Conclusion générale et perspective

---

- ✓ La profondeur de la carbonatation augmente avec la durée d'exposition.
- ✓ L'augmentation de la profondeur de carbonatations engendre l'augmentation de la masse.
- ✓ Les ajouts minéraux augmentent la profondeur carbonatée.
- ✓ Un dosage en ciment élevé diminue la profondeur de carbonatation.
- ✓ Le mortier résineux modifié possède une meilleure résistance à la carbonatation accélérée.
- ✓ Le taux des additions dans les mortiers (30% FC), (30% FS) et (30% PN) a diminué la résistance à la compression à 28 jours par rapport au mortier **M1** (sans addition minérale)

### 2- Perspectives

Ce travail offre de nombreuses perspectives de recherches :

- \* Etude de la microstructure des mortiers résineux (les phases minérales au cours de l'hydratation).
- \* Etude de l'effet des autres produits polymériques sur les mortiers modifiés de résine.
- \* Etude de la chaleur d'hydratation des mortiers modifiés de résine à l'état frais.
- \* Etude d'effet des modes de cure sur le comportement physico-mécanique de ces mortiers.
- \* Etude de l'effet des additions minérales sur la profondeur de carbonatation.

Enfin, nous espérons que ce travail présente une contribution à la valorisation des matériaux locaux et ouvre d'autres axes de recherche sur l'étude des mortiers résineux avec addition minérales.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## Référence bibliographique

[ACI 2000 et MIRZ 2002] : ACI 548.3R-95. State of the art report on polymer-modified concrete. In: ACI Manual of Concrete Practice, Part-5. Farnington Hills, USA: American Concrete Institute, -1-548.3R-47. 2000. p. 548.3R

[AFGC 2004] : AFGC, Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages – Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction –État de l'art et Guide pour la mise en oeuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité, Documents scientifiques et techniques, AFGC,2004, 252 p.

[AFPC-AFREM 1997] :Journées Technique, Durabilité des bétons Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associés à la durabilité, Toulouse, France

[AFPC-AFREM 1997] :Durability of concretes, recommended methods for measurement of quantities associated with the durability”.compte rendu des Journées techniques

[AMOURI.C 2009] :“Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, Performances, Durabilité) ”.Thèse : doctorat , université mentouri constantine 2009,p 27.

[ATIS 2003] : C.D. Atiş, Accelerated carbonation and testing of concrete made with flyash, Construction and Building Materials, 17 (3), 2003, 147-152)

[BAROGHEL-BOUNY 2005] : Baroghel-Bouny .V, Nouvelle approche de la durabilité du béton. Indicateurs et méthodes, Éditions Techniques de l'Ingénieur, Base Structure et Gros OEuvre, Rubrique Bétons Hydrauliques, C 2 245.

[BLAG 1975-2] A : Blaga, Les plastiques thermodurcissables, Conseil national de recherches Canada, Publications de l'IRC-CNRC, Institut de recherche en construction du CNRC > CBD-159-F. Le béton de résine.

[BUREAU 2001] :l. bureau, a. alliche, p. pilvin, s. pascal. mechanical characterization of styrene-butadiene modified mortar. materials, science and engineering a, vol. 308, 2001, pages 233-240.

[CHAUSSADENT 1997] :T. Chaussadent, État des lieux et réflexions sur la carbonatation du béton armé, Rapport technique, Thème de recherche OA9, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1997.

[DELEMI. M 2004 ]: « Etude de l'hydratation et du couplage carbonatation-échanges hydriques dans les mortiers et bétons ». Thèse de Doctorat, Université de la Rochelle.

[FALIH R.M 2011] : « La carbonatation des bétons aux fortes additions calcaires ». Université Abou BakrBelkaid, Tlemcen, Algérie, 29 au 31 Mai 2011

[FATTUHI 1988 ]:N.I. Fattuhi, Concretecarbonationasinfluenced by curingregime, Cement and ConcreteResearch, 18 (3), 1988, 426-430.

[Fédéric Michel 2008]: “ Application du concept de performance équivalente aux bétons addionnés de fillers calcaires”, Université Belgique, 2008.

[FEDERIC M.2008] : “ Application du concept de performance équivalente aux bétons addionnés de fillers calcaires”, Université Belgique.

[GEMERT 2004] D. : Van Gemert, E. Knapen. RecentDevelopment of ConcretePolymerComposites in Belgium. 11th ICPIE Congress in Berlin.

[GRANDET. J 1975] : « Contribution à l'étude de la prise et de la carbonatation des mortiers au contact des matériaux poreux ». Thèse de doctorat es sciences physiques, Université Paul Sabatier,Toulouse.

[HAMADA, M. HAMADA 1968] : Neutralisation (carbonation) of concrete and corrosion of reinforcingsteel, 5th International Symposium on the Chemistry of Cement, Cementassociation of Japan, Tokyo.

[HILSDORFET 1989] : H.K. Hilsdorf, J. Kropp, M. Günter, Carbonation, pore structure and durability, RILEM Seminar on the Durability of concrete Structure under Normal OutdoorExposure, UniversitätHannover, 1984.

[HOUST, 1992] :Y.F. Houst, Diffusion de gaz, carbonatation et retrait de la pâte de ciment durcie, Thèse de Doctorat de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1992

[JENNI 05] :A. Jenni, L. Holzer, R. Zurbriggen, M. Herwegh. Influence on microstructure and

[KAZIM TURK ]: “Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress ”, Université Denmark, 1999.

[KAZIMTURK 1999] et al: “Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress ”, Université Denmark,

[KIM 1997] :J. Kim, R. E. Robertson. Prevention of Air void formation in polymer-modified cement mortar by pre-wetting. Cement and Concrete Research, vol. 27 (2), 1997, pages 171-176.

[KOUZNETSOVA T. V2003].Ivaschenko S. I. et Samchenko S.V. Stability of ettringite under carbonate corrosion at hydration of sulpho aluminates ”. In; 11th International

[KRITSADA SISOMOPHON] :Lutz Franke carbonation of concretes containing high volume of pozzolanic materials –department of building physics and building materials , technical University Hamburg-harburg , Eißendorferstraße 42 ,21071,Hamburg ,Germany Received 20 april 2005; accepted 17 August 2007 .

[KRITSADASISOMOPHON 2005 ]: Lutz Franke carbonation of concretes containing high volume of pozzolanic materials –department of building physics and building materials , technical University Hamburg-harburg , Eißendorferstraße 42 ,21071,Hamburg ,Germany Received 20 april 2005; accepted 17 August 2007 .

[LAWRENCE 1984] C.D. Lawrence, Transport of oxygen through concrete, British

[LEA, 1970] :F.M. Lea, The Chemistry of Cement and Concrete, Edward Arnold, 1970, 727 p.

[les normes NF P 18-554] : Granulats-Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d’absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux, Octobre 1997.

[LUCA BERTOLINI 2011]:“ The Effect of Ground Limestone Addition on Carbonation and Chloride Resistance of Concrete”. University Porto, PORTUGAL, 2011.

[METALSSI 2006] : O. Metalssi, Étude des couplages hydratation-échanges hydriques carbonatation dans les mortiers modifiés polymères, Thèse de Doctorat de l’Université de La Rochelle, 2006.

[MEYER 1968 ]: A. Meyer, Investigations on the carbonation of concrete, 5th International Symposium on the Chemistry of Cement, Tokyo, 1968,.

[MEYERS 1949] : S.L. Meyers, Effects of CarbonDioxide on HydratedCement and Concrete, Rock Products, 1949, 96-98.

[MIRAGLIOTTA R 2000] : “Modélisation des processus physico-chimiques de la carbonatation des bétons préfabriqués – prise en compte des effets de paroi ». Thèse de doctorat, Université de la Rochelle002, 16:365–74.

[MIRZ 2002] :Mirza J, Mirza MS, Lapointe R. Laboratory and field performance of polymer-modifiedcement-basedrepairmortars in cold climates. ConstrBuild Mater 2002, 16:365–74.

[NF EN 196-1, 2006 ]:AFNOR. NF EN 196-1. Methods of testingcement - Part 1: Determination of strength. April 2006.

[NISCHER, 1984] :P. Nischer, Effect of environment and concretequality on carbonation, BetonwerkundFertigteil-Technik, 50 (11), 1984, 752-757.

[Norme XP-P18-458]: accelerated carbonation teste , depth carbonation measuring of carbonated c[ Normes, francaise.NF P18-406] : Essai de compression.1981oncrete. AFPC-AFREM-concrete durability, 1997, pp 153-158,

[OHAM 1997]: YoshihikoOhama 1997, Recent Progress in Concrete-Polymer Composites, Advanced CementBasedMaterials, Volume 5, Issue 2, March 1997, Pages 31-40.

[OHAMA 1998] : Y. Ohama. Polymerbasedadmixtures. Cement and Concrete Composites, vol.20, 1998, pages 189-212.

[PARROTT1987] L.J. Parrott, A review of carbonationinreinforcedconcrete, British Cement Association, 1987, 126 p.

[Pascal 2002] :S. Pascal. Comportement mécanique de composites mortier-polymère. Thèse de doctorat de l’Ecole Centrale des Arts et Manufactures, Ecole Centrale Paris , 2002, 206 pages.

[PASCAL1968] :P. Pascal, Nouveau traité de chimie minérale. Propriétés physiques de l’analyse carbonique, 8, Masson, 1968.

[PIHLAJAVAARA1968] :S.E. Pihlajavaara, Someresults of the effect of carbonation on theporosity and pore size distribution of cementpaste, Materials and Structures, 1 (6), 1968,521-525.

[POWERS 1962] :T.C. Powers, A Hypothesis on Carbonation Shrinkage, Journal of the PCA Research and Development Laboratories, 4 (2), 1962, 40-50

[RAMAKRISHNAN 1994] : V. Ramakrishnan. Properties and applications of latex-modified concrete. Advances in Concrete Technology, seconde editions, V.M. Malhotra ed. Canada. Ctr. for Mineral and Energy Technol., 1994, pages 839-890.

[REIS 2005] :J.M.L. Reis, A.J.M. Ferreira, Effect of marine exposure on fracture properties of epoxy concretes, Polymer Testing 24(2005) 121-125.

[ROCHER 1992]. : rocher ph memento roches et minereaux industriels :ponces et pozzolanes ;rapport scientifique BRGM ,paris ,1992 ,45p

[Saunan et Lach] : (1972). “ Long term carbonation of the phases  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  and  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$  ”. Cement and concrete Research, 2(4):453-446

[SHAKER 1997] :F.A. Shaker, A.S. El Dieb, M.M. Reda. Durability of styrene-butadiene latex modified concrete. Cement and Concrete Research, vol. 27 (5), 1997, pages 711-720.

[SU 1995] : Z. Su. Microstructure of polymer cement concrete. PhD thesis. Delft University Press, The Netherlands, 1995, 189 pages.

[SWENSON ET SEREDA 1968] :E.G. Swenson, P.J. Sereda, Some ageing characteristics of lime, Journal of Applied Chemistry, 17 (7), 1967, 198-202.

[THIERY 2005] : M. Thiery, Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires – Prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurales et hydriques, Thèse de Doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées de Paris, 2005

[TUUTTI 1982] : K. Tuutti, Corrosion of steel in concrete, CBI Research Report, n° 4.82, Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982.

[VALSARAJ 1990] :K.T. Valsaraj, Elements of environmental engineering. Thermodynamics and kinetics, CRC Press, 1990, 649 p.

[Van Balen et Van Gemert 1994] :K. Van Balen, D. Van Gemert, Modelling lime mortar carbonation, Materials and Structures, 27 (7), 1994, 393-398.

[Von Euw V] : « Ciment contenant des additions minérales, Preceding of the 8<sup>ème</sup> Congrès International de la Chimie des Ciments ». RIO de Janeiro-Brasil, V7 pp 170-177, 1986

[Zhong 02] :S. Zhong, Z. Chen. Properties of latex blends and its modified cement mortars. adhesive strength of cementitious tile adhesive mortars. Cement and Concrete Research, vol.35, 2005, pages 35-50.

Cement and Concrete Research, vol. 32, 2002, pages 1515-1524. modified concrete. Cement and Concrete Research, vol. 27 (5), 1997, pages 711-720.

# **ANNEXES**

## Les annexes

### I-Fiche technique de super plastifiant

**SUPERIOR 9 WG** est un adjuvant super plastifiant à base de poly-carboxylates de nouvelle génération, qui permettent de réaliser des bétons très fluides avec des rapports E/C très réduits.

Il est compatible tous les types de ciments.

**-est particulièrement indiqué durant les périodes hivernales.**

#### 1- PROPRIETES CHIMIQUES ET PYSIQUES

Etat physique :.....Liquide

Couleur :.....Brun

Densité (g/cm<sup>3</sup>, à 20 °C) :.....1,10 (≠ 0.03)

PH(20 °C) :.....5,5(≠ 1)

Extrait sec :.....33%(≠ 2%)

Teneur en chlorures :.....≤ 0.1%

#### 2-CARACTERISTIQUES

Le **SUPERIOR 9 WG** est particulièrement recommandé pour la fabrication de bétons exigeant :

- Un faible rapport E/C.
- Un long maintien d'ouvrabilité.
- Des performances mécaniques élevées à court à et long terme.
- Une diminution du retrait.
- Une imperméabilité.
- Un meilleur parement.
- Une durabilité.

#### 3-DOMAINES D'APPLICATION

- Béton à hautes performance.
- Béton pour fondations profondes.
- Béton pompé transporté sur de longues distances.
- Béton précontraint.

#### **4-DOSAGE**

-Le dosage de **SUPERIOR 9 WG** varie entre 0.6 à 2% du poids du ciment soit de 0.6 à 1.8 litre pour 100 kg de ciment.

-Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction de matériaux disponibles, de la classe de béton et des effets recherchés.

#### **5-MODE D 'EMPLOI**

-L'addition du **SUPERIOR 9 WG** ne doit jamais se faire sur un béton sec avant l'ajout de l'eau (il serait adsorbé par les agrégats et le sable d'où une inefficacité avec le ciment).

-Il est conseillé d'ajouter le **SUPERIOR 9 WG** après l'ajout des composants du béton et environ 90% de l'eau de gâchage nécessaire, terminer le mélange en ajoutant graduellement l'eau restante (10%) jusqu'à l'obtention de la consistance désirée. Les dosages sont évalués au poids du ciment.

#### **6- VALIDITE**

12 mois dans son emballage hermétiquement fermé, stocké entre 5°C et 35°C et à l'abri du soleil.

## II-Fiche technique de la résine utilisée

**1-TEKWELD** est une résine synthétique en solution aqueuse haute densité, stable en milieu alcalin, spécialement conçue pour être additionné à l'eau de gâchage des mortiers, coulis de ciment ou de l'enduit.

### 2-PROPRIETES CHIMIQUES ET PHYSIQUES

Etat physique :.....Liquide

Couleur :.....Blanche

Densité (g/cm<sup>3</sup> , à 20°C) :.....1,040(≠ 0.02%)

PH (à 20°C) :.....4 (≠ 1)

Extrait sec :.....26 % (≠2%)

### 3-CARACTERISTIQUES

-Améliore l'adhérence entre béton frais et béton durci

-Améliore l'imperméabilité

-Améliore les résistances à la traction par flexion

-Diminue les fissurations

-Diminue le retrait

-Résistant à l'usure

-Les films formés par le **TEKWELD** ne se dissolvent pas dans l'eau chaude ou dans l'eau froide.

-L'addition de **TEKWELD** à des colles à base de ciment ou à des micro- bétons de réparation permet d'obtenir un produit amélioré dans ses caractéristiques d'adhérence, de flexibilité, de retrait, de résistances aux vibration , d'imperméabilité à l'eau , aux l'huiles, aux solutions acides et alcalis ,de résistance au gel aux excursions thermiques, des adhérences améliorées aux des armatures et supports métalliques et à l'usure.

#### 4-DOMAINES D'APPLICATION

- Utilise dans la préparation de composés adhésifs (barbotine) pour reprise de bétonnage.
- Colmatage de fissures.
- Enduit de cuvelage
- Restauration et remise à niveau de surfaces planes en béton.

#### 5-DOSAGE

Coulis de ciment :

TEKWELD :.....1 litre

Eau :.....1 litre

Ciment portland ou pouzzolane :.....2 litres environ

**Mortier pour épaisseur <10 mm :**

TEKWELD :.....1 litre

Eau :..... 2 litres

Ciment portland ou pouzzolane :.....5 litres environ

Sable (0-1mm).....12litres environ

**Mortiers pour épaisseur > 10 mm :**

TEKWELD :.....1 litre

Eau :..... 3litres

Ciment portland ou pouzzolane :.....7 litres environ

Sable (0-1mm).....8 litres environ

Sable (0-5mm) :.....8 litres environ

La fluidité des mortiers doit être réglée selon l'utilisation, sans oublier que l'emploi de l'eau doit être réduit au maximum.

## 6- MODE D'EMPLOI

Les coulis adhésifs, comme les mortiers de réparation, doivent être appliqués sur des supports sains, débarrassés des parties non adhérentes, et dépoussières.

Par temps chaud, humidifier légèrement les supports.

### **Coulis adhésif :**

Prépare la solution **TEKWELD +Eau** puis sous agitation ajouter le ciment jusqu'à l'obtention d'un coulis homogène et sans grumeaux.

### **Micro béton de reprise :**

Après mélange des agrégats et du ciment, comme spécifié aux dosages donnés ajouter la solution de

**TEKWELD +EAU** jusqu'à l'obtention de la consistance désirée.



**FACULTE: GENIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE**  
**DEPARTEMENT : GÉNIE CIVIL**

**RESUME DE MEMOIRE DE MASTER**

**-Domaine :** science et technologie - **Filière :** génie civil - **Option :** Matériaux de génie civil.

**Thème : Effet des additions minérales sur le comportement physico-mécanique et sur la durabilité des mortiers résineux**

**Encadré par:** Makhloufi Zoubir et Berkak Hichem

**Présenté par :** Bellakhdar fatna

**Présenté par :** Boussiha marwa

**ملخص**

يستخدم ملاط الأسمنت المعدل بالبوليمر على نطاق واسع في البنية التحتية المدنية ، الجسور ، ملاط العزل الخارجي بسبب خواصه الفيزيائية و الميكانيكية الممتازة وديمومته الجيدة. تتوفر الإضافات المعدنية مثل البوزولان أو حتى الحشوات الجيرية بكثرة في الجزائر ولكن للأسف لا يتم استغلالها بشكل كاف كإضافات لمخاليط الأسمنت. وقد تم تنفيذ العديد من الأعمال على أداء الملاط الأسمنتي العادي على أساس هذه الإضافات المعدنية. ومع ذلك ، تم إنجاز القليل من العمل على الملاط الأسمنتي المعدل بالبوليمر. الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير الإضافات المعدنية (حشوة الجيرية ، البوزولان الطبيعي وأبخرة السليكا) على تجربة الكربنة المتسارعة للملاط الأسمنتي المعدل بالبوليمر من خلال الاستبدال الجزئي للأسمنت بواسطة البوزولان الطبيعي المستخرج من بني صاف. و / أو حشو كلسي و / أو السليكا. أظهرت الدراسة التي أجريت أن نسبة البوليمر على الأسمنت والتيتساوي 2.5٪ يمكن أن تكون الأمثل فيما يتعلق بتحسين محتوى البوليمر الإضافي. وقد أظهرت الدراسة الفيزيائية والميكانيكية لقذف للملاط الأسمنتي المعدل بالبوليمر بما في ذلك إضافات المعادن أن قابلية استخدام الملاط الأسمنتي المعدل بالبوليمر التي تحتوي على إضافات معدنية تتأثر بشدة بالبوليمر ، وكذلك طبيعة ونسبة الإضافات المعدنية. بالإضافة إلى ذلك ، تزداد القوة الميكانيكية مع إضافة السليكا وحده ، البوزولان بمفرده أو في توليفة من الاثنين «النظام الثلاثي». من وجهة نظر تجربة الكربنة المتسارعة ، فإن الحشوة الجيرية تزيد من عمق الكربنة. من ناحية أخرى ، يقلل الدخان السليكا من عمق الكربنة. بالإضافة إلى ذلك ، فإن إضافة البوزولان الطبيعي أقل قدرة على تقليل الكربنة من السليكا. وأخيراً ، تتمتع ملاط الأسمنت العادي وملاط المعدل بالبوليمر بمقاومة أفضل للكربنة

**الكلمات المفتاحية:** ملاط المعدل بالبوليمر ، تجربة الكربنة المتسارعة ، بخار سليكا ، بوزولانا طبيعي ، حشوة جيرية ، خواص فيزيائية ميكانيكية.

**Résumé**

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence des additions minérales (fillers calcaires, pouzzolane naturelle et fumée de silice) sur la carbonatation accélérée des mortiers résineux modifiés à travers la substitution partielle du ciment par la pouzzolane naturelle de Beni-Saf et/ou le filler calcaire et/ou la fumée de silice.

L'étude menée a montré que le rapport P/C (Polymère sur Ciment) égal à 2.5% pouvait être optimal concernant l'optimisation de la teneur en résine ajoutée. L'étude physico-mécanique des mortiers résineux modifiés comprenant des ajouts minéraux a montré que leur maniabilité est fortement influencée par la résine, ainsi que la nature et la proportion des ajouts minéraux. En outre, leurs résistances mécaniques augmentent avec l'addition de la fumée de silice seule, de la pouzzolane seule ou en combinaison des deux (système ternaire). Du point de vue carbonatation accélérée, le filler calcaire fait augmenter la profondeur de carbonatation. Par contre, la fumée de silice diminue la profondeur de carbonatation. Par ailleurs, l'ajout de la pouzzolane naturelle est moins capable de minimiser la carbonatation que la fumée de silice. Enfin, le mortier de ciment ordinaire et mortier résineux modifié présentent une meilleure résistance à la carbonatation

**Mots clés:** mortier résineux modifiés, carbonatation, fumée de silice, pouzzolane naturelle, filler calcaire, propriétés physico-mécaniques.

**Abstract**

The Polymer-modified cement mortars are widely used in civil infrastructure, bridges, exterior wall insulation mortars because of their excellent physical-mechanical properties and their improved durability. Mineral additions such as pozzolan or even limestone are available in abundance in Algeria but unfortunately not sufficiently exploited as additions to cement mixtures. Several works have been carried out on the performance of ordinary cementitious mortars based on these mineral additions. However, little work has been done on modified softwood mortars. The objective of this work is to study the influence of mineral additions (limestone, natural pozzolan and silica fume) on the accelerated carbonation of modified resinous mortars through the partial substitution of cement by the natural pozzolan of Beni-Saf and / or filler and / or silica fume. The study carried out showed that the P / C ratio (Polymer on Cement) equal to 2.5% could be optimal concerning the optimization of the added resin content. The physico-mechanical study of modified resinous mortars including mineral additions has shown that the workability of modified resinous mortars containing mineral additions is strongly influenced by the resin, as well as the nature and proportion of the mineral additions. In addition, their mechanical strength increases with the addition of silica fume alone, pozzolan alone or in combination of both (ternary system).

From the point of view of accelerated carbonation, the limestone there increases the depth of carbonation. On the other hand, silica fume decreases the depth of carbonation. In addition, the addition of natural pozzolan is less able to minimize carbonation than silica fume. Finally, the ordinary cement mortar and modified resin mortar have better resistance to carbonation

**Key words:** modified resinous mortar, carbonation, silica fume, natural pozzolana, limestone, and physical-mechanical properties.