

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



THESE

Présentée pour l'obtention du **grade de DOCTORAT 3^{ème} Cycle**

En : Génie Civil

Spécialité : Durabilité des Matériaux et Durée de Vie des Ouvrages

Par : BENALI Yacine

Sujet

Etude du comportement mécanique et de durabilité des mortiers de polymères modifiés au latex

Soutenue publiquement, le 18 Janvier 2018, devant le jury composé de :

M/ Sidi Mohamed el Amine BOUKLI HACENE	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
M/ Fouad GHOMARI	Professeur	Univ. Tlemcen	Directeur de thèse
M/ Rafik BELARBI	Professeur	Univ. La Rochelle	Examineur 1
M/ Hamid KHELAFI	Professeur	Univ. Adrar	Examineur 2

Remerciements:

Mes premiers remerciements vont à monsieur Fouad GHOMARI mon encadreur, tout d'abord pour avoir dirigé ce travail, mais également pour ses qualités humaines formidables, son soutien permanent et son immense (le mot est presque faible) expérience dont j'ai eu l'honneur de profiter à de plusieurs reprises. Je tiens à le remercier notamment pour la confiance et l'indépendance qu'il m'a accordées et également pour ses conseils avisés et l'orientation qu'il m'a donnée dans les moments critiques.

Je témoigne également ma profonde gratitude aux membres du jury. Tout d'abord, à monsieur Rafik BELARBI, Professeur à l'Université de La Rochelle, et à monsieur Hamid KHELAFI, Professeur à l'Université d'Oran, pour avoir accepté de rapporter cette thèse et pour les remarques pertinentes qu'ils ont apportées au manuscrit. Ensuite, à monsieur Sidi Mohamed el Amine BOUKLI HACENE, Professeur à l'Université de Tlemcen pour avoir assumé la responsabilité de présider le jury.

Ce travail de thèse a été réalisé au sein du laboratoire EOLE de la Faculté de Technologie de l'Université Abou-Bekr Belkaid de Tlemcen. J'en profite pour remercier tous les membres du groupe de suivi de la thèse : Abdel Illah BEZZAR, Sidi Mohammed El Amine BOUKLI HACENE, et à tous ceux qui sont venus à nos réunions, pour leur participation et leurs remarques toujours constructives.

Je ne voudrais pas oublier de remercier également tous les travailleurs des laboratoires du département de génie civil, génie mécanique et hydraulique qui ont su créer une ambiance chaleureuse de camaraderie et de travail.

Je tiens également à remercier tous ceux qui ont participé de près ou de loin à ce travail. Je pense également à madame Naima BELAYACHI, Maître de Conférences au laboratoire PRISME, pour sa contribution lors des essais thermo-hydro-mécanique.

Je tiens tout particulièrement ainsi à saluer tous les thésards du laboratoire EOLE avec qui j'ai pu lier des liens d'amitié. Sans eux et leur bonne humeur, les moments passés au laboratoire n'aurait pas eu la même saveur.

Ma reconnaissance ira aussi à mes parents, à ma sœur, à mon frère et à mes amis pour leur amour et leur soutien dans les moments difficiles.

Enfin, je ne peux conclure sans dédie ce travail à mon cher ami Adjel SEKHAL, parti trop tôt... Allah yarhamah.

Résumé :

On constate au cours de ces dernières décennies, la diversification des mortiers pour de nombreuses applications dans le domaine des enduits, des colles à carrelages, des mortiers de réparation et de protection. La diversité de ces applications nécessite une formulation spécifique et adaptée. À ce titre, l'intégration des polymères aux mortiers, désignés sous le nom de mortiers modifiés aux polymères, s'avère une technique qui peut offrir une bonne adhérence aux supports tout en améliorant leur durée de vie.

Dans ce travail de recherche, on met en revue l'incidence de la substitution d'un ciment Portland (CEM II/A 42.5) dans des mortiers, par deux polymères de type latex : un styrène butadiène (SBR) et un styrène acrylique (SA). Une série de mélanges de mortiers contenant 0, 2.5, 5, 10, 15 et 20 % de polymère latex solide (en poids), ont été préparés et testés aux états frais et durci. Les paramètres d'essais comprennent la fluidité, la résistance à la compression, la traction par flexion, la porosité accessible à l'eau, l'absorption d'eau, l'adhérence aux briques de terre cuite et aux supports cimentaires. En outre, l'influence de certains paramètres, tels que le pré - conditionnement, et l'âge a été déterminé.

Les résultats expérimentaux ont montré que la substitution du ciment dans les mortiers a produit une amélioration sur la fluidité, la ténacité, la porosité à l'eau, l'absorption d'eau et l'adhérence. Dans le cas des supports en terre cuite, il en résulte une rupture cohésive dans le support au-delà de 10 % de substitution ; tandis que la rupture a lieu à l'interface pour toutes les formulations testées sur les supports cimentaires à l'exception des mortiers modifiés par le SBR ($\geq 10\%$), où la rupture est cohésive. Une amélioration a été notée également sur la résistance à la traction par flexion au-delà de 60 jours. En revanche, la résistance à la compression des mortiers polymères a diminué avec l'augmentation du taux de substitution du ciment pour l'ensemble des échéances étudiées. De plus, la cure mixte est plus bénéfique du point de vue résistance mécanique que la cure sèche des composites mortiers modifiés aux latex. Quant à la porosité accessible à l'eau, les résultats suivent une fonction linéaire avec une inflexion à 5 % de substitution de latex.

Mots clés : Mortiers modifiés, Latex, Styrène butadiène, Styrène acrylique, Fluidité, Résistance, Ténacité, Adhérence, Porosité, et Absorption.

Abstract:

Over the last few decades, diversification of mortars has been observed for many applications in the field of plasters, tile glues, and repair mortars. The diversity of these applications requires a specific and adapted formulation. As such, the integration of polymers in mortars, known as polymer-modified mortars, is a technique that can offer good adhesion to substrates while improving their lifetime.

In this research paper, the impacts of the substitution of Portlet cement (CEM II / A 42.5) by two latex polymers: styrene butadiene (SBR) and styrene acrylic (SA) is investigated in mortars. A series of mortar mixtures containing 0, 2.5, 5, 10, 15 and 20% (by weight) of solid latex polymer, were prepared and tested in the fresh and hardened states. The test parameters include fluidity, compressive and flexural strengths, porosity, water absorption; adhesion to clay bricks and cementitious substrates. In addition, the influence of certain parameters, such as pre-conditioning, and age was determined.

The experimental results showed that substituting cement in mortars improves their fluidity, toughness, porosity to water, water absorption and adhesion. In the case of clay substrates, a cohesive failure occurs within the substrate layer beyond 10% of substitution; while the rupture takes place at the interface for all the formulations tested on the cementitious substrates except for the mortars modified by the SBR ($\geq 10\%$), where the rupture is cohesive. It was also noted that flexural tensile strength improved beyond 60 days. However, the compressive strength of polymer mortars decreased with the substitution rate of cement, for all maturities considered. In addition, mixed curing is more beneficial from a mechanical point of view than dry curing of latex-modified mortar composites. However, for porosity accessible to water, the results follow a linear function, with an inflection at 5% of latex substitution.

Key words: Modified mortars, Latex, Styrene butadiene, Styrene acrylic, Fluidity, strength, Toughness, Adhesion, Porosity, and Absorption.

ملخص:

خلال العقود الماضية لوحظ تنوع في تركيبات مونت الاسمنت نتيجة اختلاف و تنوع مجالات استعمالها ك لصق البلاط و حماية و إصلاح هياكل الخرسانات. كنتيجة لهذا التنوع تحتم اللجوء إلى تركيبات مدروسة تتضمن مواد جديدة مبتكرة ومصممة بإحكام. من هذا المنظور تم دمج البوليمير في مونة الاسمنت للحصول على ما يسمى مونة معدلة بالبوليمير. اكتشف فيما بعد أنها تقنية جد جيدة يمكن أن توفر التصاق محكم بين مختلف الأجسام المستخدمة في البناء.

في هذا البحث سوف نستعرض نتائج استبدال الاسمنت البورتلاندي باتئين من البوليمير لاتكس ستيران بوتاديين و ستيران اكرليك. تم تحضير نماذج مونة تحتوي على 0, 2.5, 5, 10, 15 و 20 % من البوليمير الصلب الموجود في اللاتكس. بعد ذلك تم دراسة تأثيرات مستحلب اللاتكس على التدفق، الخصائص الميكانيكية وديمومة مونة الاسمنت.

وقد أوضحت النتائج التجريبية أن استبدال الاسمنت بالبوليمير في المونة ينتج عنه تحسنا ملحوظا في التدفق، الصلابة، كما ينتج عنه زيادة مقاومتها ضد النفاذية ، امتصاص الماء و الالتصاق. ففي حالة أجسام الدعم الطينية أوضحت النتائج أن الكسر حدث في الأجسام نفسها بالنسبة لخلائط المونة التي تحتوي على 10% لاتكس ستيران بوتاديين فما فوق. أما فيما يخص أجسام الدعم الاسمنتية فقد لوحظ أن الكسر حدث في السطح البيني للأجسام وخلائط المونة، ماعدا بالنسبة للمونة المعدلة ب10% فما فوق بالستيران بوتاديين فان الكسر لوحظ في أجسام الدعم الاسمنتية. أظهرت النتائج أيضا تحسن في مقاومة الانتشاء للمونة المعدلة بالنسبة للأعمار التي تفوق 60 يوم. من ناحية أخرى لوحظ انخفاض في مقاومة الانضغاط لكل النسب المضافة و الأعمار المدروسة. أما بالنسبة لطريقة العلاج فقد لوحظ أن العلاج المزوج رطب ثم جاف له تأثير أكبر في زيادة الخصائص الميكانيكية للمونة. أما فيما يخص المسامية فقد أظهرت النتائج أنها تتبع دالة خطية مع نقطة انعطاف عند نسبة 5% من اللاتكس المضاف.

الكلمات الرئيسية: المونة المعدلة، اللاتكس، ستيران بوتاديين، ستيران اكرليك، التدفق، القوة، الصلابة، الالتصاق، المسامية، الامتصاص.

Sommaire

Remerciements	i
Résumé	ii
Sommaire	v
Liste des figures	vii
Liste des Tableaux	xiii
Liste des notations et abréviations	xiv
Introduction générale	1
Organisation générale du mémoire	1
Chapitre 1. Description générale des bétons et mortiers de polymères	3
1.1. Introduction:	3
1.2. Concept du composite béton et mortier- polymère	3
1.3. Classification des composites-polymère	5
1.3.1. Béton ou mortier imprégné par polymère BIP/MIP	5
1.3.2. Béton ou mortier polymère BP/MP	7
1.3.3. Béton ou mortier modifié par polymère BMP/MMP	10
1.4. Conclusions	29
Chapitre 2. Propriétés des mortiers modifiés au latex	31
2.1. Introduction	31
2.2. Propriétés des mortiers modifiés	31
2.2.1. Les propriétés à l'état frais	31
2.2.2. Propriétés à l'état durci	36
2.3. Les applications typiques des mortiers modifiés au latex.....	78
2.4. Conclusions	79
Chapitre 3. Matériaux et méthodes	80
3.1. Introduction	80
3.2. Choix des matériaux	80
3.2.1. Le ciment	80
3.2.2. Les caractéristiques physico-mécaniques des ciments	80
3.2.3. Les granulats	83
3.2.4. Les latex utilisés	85
3.3. Mélange et cure des mortiers	87
3.4. Procédure des essais effectués	91
3.4.1. À l'état frais	91
3.4.2. À l'état durci	92
3.5. Conclusions	103

Chapitre 4. Analyses et discussions des résultats.....	104
4.1. Introduction	104
4.2. Propriétés des mortiers à l'état frais	104
4.2.1. La fluidité	104
4.3. Propriétés des mortiers à l'état durci	106
4.3.1. Effet des conditions de cure sur la résistance à la compression des mortiers	106
4.3.2. Effet des conditions de cure sur la résistance à la traction par flexion des mortiers.....	110
4.3.3. La ténacité	114
4.3.4. L'adhérence des mortiers	118
4.3.5. Modes de rupture	123
4.3.6. La porosité accessible à l'eau	126
4.3.7. L'absorption d'eau	127
4.4. Conclusions :	128
Conclusion générale et perspectives	130
Références bibliographiques	132

Liste des figures

Figure 1.1. Formation de polymère (Mouton, 1967).....	4
Figure 1.2. Classification des composites béton ou mortiers-polymère (Ohama, 2011) (Elalaoui, 2012).	5
Figure 1.3. Schéma de la méthode de la production de BIP (ACI, 1997).	6
Figure 1.4. Les polymères disponibles dans le commerce et utilisés comme liants dans les systèmes BP/MP (Ribeiro, 2006).	8
Figure 1.5. Polymères pour modifier les mortiers et les bétons de ciment (Ohama, 1998) (Knapen, 2007).	11
Figure 1.6. Illustration schématique de la fabrication des poudres redispersables (Baueregger, 2014).	12
Figure 1.7. Schéma du modèle du mécanisme de la formation de film polymère (Baueregger, 2014).	21
Figure 1.8. Observations par microscopie électronique à balayage des mortiers non modifiés et mortiers modifiés par 5% EVA (Afridi, 2003).	22
Figure 1.9. Modèle décrivant la microstructure des mortiers modifiés (Gemert, 2005).	24
Figure 1.10. Modèle chimique des systèmes modifiés aux latex. (a) Réaction chimique entre le latex et les produits d'hydratation. (b) La structure du réseau 3D qui a été obtenu par des réactions chimiques dans le système du ciment modifié au latex (Wang, 2016).	25
Figure 1.11. Interactions possibles entre les particules de SBR et les grains de ciment ou les hydrates de ciment (Yang, 2009).	26
Figure 1.12. (a) les réactions d'hydratation du ciment. (b) l'hydrolyse d'un latex de polyacrylate dans le système modifié. (c) La réaction de réticulation entre le latex et le ciment de polyacrylate. (d) La structure du réseau réticulé qui a été obtenu par des réactions chimiques dans le système modifié par le polyacrylate (Wang, 2015).	27
Figure 1.13. Réactions entre Ca^{2+} et de la chaîne de polymère PA (Tian, 2013).	28
Figure 1.14. Illustration de la réaction entre un polymère contenant un groupe carboxylase et un granulat (Ohama, 1995).	29
Figure 1.15. Modèle de mécanisme des mortiers modifiés (Sakai, 1995).	29
Figure 2.1. Fluidité des mortiers modifiés en fonction du rapport P/C (Ohama, 1995).	31
Figure 2.2. Pourcentages de réduction de l'eau de gâchage pour produire des mortiers modifiés par SAE à consistance de (170 ± 5) mm (Wang, 2010).	32
Figure 2.3. Rapport E/C nécessaire pour : (a) obtenir une consistance normale Vicat ; (b) pour fixer la fluidité des mortiers modifiés par SBR (Barluenga, 2004).	33
Figure 2.4. Teneur en air des mortiers modifiés par le SAE (Wang, 2010).	33
Figure 2.5. Rétention d'eau des différents mortiers modifiés (Ohama, 1995).	34
Figure 2.6. Relation entre le taux de rétention d'eau et le rapport P/C des mortiers modifiés au SAE (Wang, 2010).	34
Figure 2.7. Durcissement des mortiers modifiés par différents types de latex (Ohama, 1995).	35
Figure 2.8. Temps de prise en fonction du rapport P/C (Marceau, 2012).	35
Figure 2.9. Temps de début de prise des mortiers formulés au laboratoire et des produits commerciaux (Ngassam, 2013).	36
Figure 2.10. Propriétés dynamiques, ténacité aux chocs et abrasivité des pâtes modifiés aux latex (Wong, 2003).	37

Figure 2.11. Influence des polymères sur l'évolution du module d'élasticité: (a) mortiers modifiés aux PA; (b) mortiers modifiés aux PUPA (Ma, 2013).	37
Figure 2.12. Ténacité des mortiers modifiés par SBR (Wang, 2005).	38
Figure 2.13. Ténacité des mortiers modifiés au PAE (Parghi, 2016).	39
Figure 2.14. Ténacité des mortiers modifiés par le SAE (Wang, 2010).	39
Figure 2.15. Ténacité des mortiers modifiés par VA / VeoVa (Wang, 2011b).	40
Figure 2.16. Ténacité des mortiers modifiés par PA et le (PU / PA) (Ma, 2013).	40
Figure 2.17. Influence du rapport des monomères sur la résistance en flexion et en compression des mortiers modifiés par de l'ÉVA, le SBR et de SAE (Ohama, 1995).	41
Figure 2.18. Effet du plastifiant contenu dans le latex PVAC sur la résistance à la compression et à la flexion des mortiers modifiés (Ohama, 1995).	41
Figure 2.19. Relation entre les surfactants contenus dans les latex et la résistance à la flexion des mortiers modifiés (Ohama, 1995).	42
Figure 2.20. Effet des anti-mousses de type silicone sur l'air entraîné et la résistance à la compression des mortiers modifiés (Ohama, 1995).	43
Figure 2.21. Effet du type de ciment sur la résistance à la flexion des mortiers (Ohama, 1995).	43
Figure 2.22. Effet des additions minérales sur la résistance à la flexion des mortiers pour une cure sèche (Ohama, 1995).	44
Figure 2.23. Effet de la combinaison latex / fumée de silice et laitiers sur le développement de la résistance à la compression des mortiers (Ahmed, 2011).	44
Figure 2.24. Effet de la combinaison latex / fumée de silice et laitiers sur le développement de la résistance à la flexion des mortiers (Ahmed, 2011).	45
Figure 2.25. Effet du module de finesse du sable sur la résistance à la compression et à la flexion des mortiers (Ohama, 1995).	45
Figure 2.26 (a) et (b) Résistance à la compression et à la flexion des mortiers formulés au laboratoire après une cure en milieu ambiant (Ngassam, 2013).	46
Figure 2.27. Effet du contenu en polymère et des conditions de cure sur la résistance à la compression et à la flexion des mortiers préparés à base du ciment aluminat de calcium (Ukrainczyk, 2013).	47
Figure 2.28. Influence de la cure et du taux de polymère sur la résistance à la compression et à la flexion des mortiers (Aggarwal, 2007).	47
Figure 2.29. Influence du rapport P/C sur la résistance à la compression et à la flexion des mortiers après 28 jours de cure humide (Marceau, 2012).	48
Figure 2.30. Résistance à la compression et à la flexion des mortiers modifiés par SAE (Wang, 2010).	48
Figure 2.31. Résistance à la compression et à la flexion des mortiers modifiés avec différents pourcentages de latex et plusieurs consistances fixes (180, 200 et 220 ± 10 mm) (Barluenga, 2004).	49
Figure 2.32. Résistances à la compression et la flexion des mortiers modifiés avec différents pourcentages de latex et un E/C constant (0,55) à plusieurs âges. (Barluenga, 2004).	49
Figure 2.33. (a) et (b) Résistances à la compression et à la flexion des mortiers modifiés par le SA sous différentes cures (Ngassam, 2013).	50
Figure 2.34. (a) et (b) Résistances à la compression et à la flexion des mortiers modifiés par l'ÉVA sous différentes cures (Ngassam, 2013).	51
Figure 2.35. Résistances à la compression et à la traction des différents mortiers de réparation (Hassan, 2000).	51
Figure 2.36. Effet de la cure sur le comportement mécanique des mortiers (Wang, 2005).	52
Figure 2.37. Résistance à la compression et à la flexion des mortiers modifiés de la cure (sept jours dans de l'eau + air du laboratoire (Ramli, 2012a).	53

Figure 2.38. Porosités et diamètre moyen des pores de différents types de mortiers de réparation (Hassan, 2000).	54
Figure 2.39. Distribution du diamètre des pores et porosité en fonction du rapport P/C (Rozenbaum, 2005).	54
Figure 2.40. Distribution porale des mortiers modifiés aux SBR1 et SBR2 (Ohama, 1991). .	55
Figure 2.41. Évolution de la porosité ouverte, fermée et totale en fonction de la teneur massique en latex dans le mortier (Barluenga, 2004).	55
Figure 2.42. Effet de la teneur en polymère et des conditions de cure sur la porosité des mortiers préparés à base de ciment aluminat de calcium (Ukrainczyk, 2013).	56
Figure 2.43. Effet de la modification des polymères sur la porosité totale des mortiers ayant subi 7 jours d'immersion sous l'eau suivis par un durcissement à l'air (Ramli, 2013).	57
Figure 2.44. Effet de la modification des polymères sur la porosité totale des mortiers ayant mûri pendant 7 jours à l'air, suivis par un durcissement dans l'eau (Ramli, 2013).	57
Figure 2.45. Effet de la modification des polymères sur la porosité totale des mortiers dont la cure est cyclique eau / air (Ramli, 2013).	57
Figure 2.46. Variation de la perméabilité intrinsèque à 18 mois des mortiers modifiés, en fonction des conditions de cure (Ramli, 2012).	58
Figure 2.47. Variation de la perméabilité à l'oxygène pour les différents mortiers de réparation (Hassan, 2000).	59
Figure 2.48. Perméabilité à l'eau en fonction du temps pour différents types de mortiers de réparation (Hassan, 2000).	59
Figure 2.49. Absorption d'eau des mortiers de ciment ayant subi une cure de 7 jours dans l'eau + air (Ramli, 2013).	60
Figure 2.50. Absorption d'eau des mortiers de ciment ayant subi une cure de 7 jours dans l'air + eau (Ramli, 2013).	60
Figure 2.51. Absorption d'eau des mortiers de ciment de durcissement cyclique dans l'eau et l'air (Ramli, 2013).	61
Figure 2.52. Effet de l'addition de polymère sur l'absorption d'eau (Aggarwal, 2007).	61
Figure 2.53. Absorption capillaire en fonction du temps (Wang, 2010).	62
Figure 2.54. Effet de la teneur en polymère sur l'absorption d'eau par capillarité des échantillons de 7 jours de cure (Ukrainczyk, 2013).	62
Figure 2.55. Influence du SBR sur la diffusion des ions chlorure (Yang, 2009).	63
Figure 2.56. Diffusion des chlorures des mortiers (Zhong, 2002).	63
Figure 2.57. Effet de l'addition de polymère sur la pénétration des ions chlorures (Aggarwal, 2007).	64
Figure 2.58. Effet de l'addition du polymère sur la profondeur de carbonatation (Aggarwal, 2007).	64
Figure 2.59. Retrait des différents mortiers de réparation (Hassan, 2000).	65
Figure 2.60. Taux de retrait des mortiers modifiés aux latex SAE (Wang, 2010).	65
Figure 2.61. Schémas des types de rupture obtenus par le Pull off test. A) rupture dans le substrat, B) rupture à l'interface, C) rupture dans le mortier de réparation (Bakhsh, 2010). ..	67
Figure 2.62. Principe du test d'adhérence par flexion 3 points sur les mortiers.	67
Figure 2.63. Essai d'adhérence en flexion 4 points (Anagnostopoulos, 2002).	69
Figure 2.64. Principe de l'essai d'adhérence par fendage.	69
Figure 2.65. Principe de l'essai d'adhérence par cisaillement incliné.	69
Figure 2.66. Principe de l'essai d'adhérence par cisaillement directe.	70
Figure 2.67. Principe de l'essai bi-surface (Momayez, 2005).	70
Figure 2.68. Influence du type de polymère et du rapport P/C sur l'adhérence des mortiers modifiés (Afridi, 1995).	71
Figure 2.69. Mode de rupture des mortiers modifiés par des polymères (Afridi, 1995).	71

Figure 2.70 (a) Effet de la teneur en polymère sur la force de liaison de l'ÉVA aux mortiers de ciment Portland modifiés à carreaux de porcelaine. (B) Variation de la force d'adhérence due à la modification des polymères (Mansur, 2009).	72
Figure 2.71. Mode de rupture des mortiers modifiés (Mansur, 2009).	72
Figure 2.72. Adhérence des mortiers modifiés (N / mm ²) (a) Formulation 1: exposition à l'extérieur. (b) Formulation 1: exposition intérieure (Schulze, 2001).	73
Figure 2.73. Schéma des types d'interactions développées entre divers supports et les mortiers modifiés par l'ÉVA en fonction de l'absorption d'eau (Abs) des supports utilisés. (A) Abs > 6%, mortier ordinaire; (B) Abs → 0%, mortier ordinaire; (C) Abs >6%, mortier modifié à l'ÉVA; (D) de 0% → Abs, mortier modifié à l'ÉVA (Mansur, 2009).	75
Figure 2.74. Influence de la rugosité sur l'adhérence des mortiers (a) Rugosités de surface étudiées (b) Pourcentage d'augmentation de l'adhérence sur surface très rugueuse par rapport aux surfaces peu rugueuses (Momayez, 2005).	76
Figure 2.75. Mesure de la force de liaison par différentes méthodes: (a) faible rugosité et (b) rugosité élevée (Momayez, 2005).	77
Figure 2.76. Essais d'adhérence en traction directe et cisaillement par compression, résultats pour différentes teneurs en polymères (Ohama, 1995).	78
Figure 3.1. Dispositif utilisé pour mesurer la masse volumique apparente.	81
Figure 3.2. Dispositif utilisé pour déterminer la masse volumique absolue.	81
Figure 3.3. Essai de consistance.	82
Figure 3.4. Courbes granulométriques des granulats utilisés.	84
Figure 3.5. Structure moléculaire des latex utilisés.	86
Figure 3.6. Malaxeur à mortier utilisé.	87
Figure 3.7. Moules couverts par des films plastiques.	89
Figure 3.8. Cure sous l'eau.	89
Figure 3.9. Cure à l'aire libre dans une chambre contrôlée.	90
Figure 3.10. Dispositif de mesure de l'humidité et la température dans la chambre contrôlée.	90
Figure 3.11. Étapes de mesure de la fluidité des mortiers.	92
Figure 3.12. Essai de résistance à la traction par flexion des mortiers.	93
Figure 3.13. Essai de résistance à la compression des mortiers.	93
Figure 3.14. Protocole de saturation - (a) : procédure AFPC-AFREM (1997) (b) : procédure AFPC-AFREM modifiée (Kamèche, 2015).	94
Figure 3.15. Dispositif de saturation.	94
Figure 3.16. Essai d'absorption d'eau.	95
Figure 3.17. Dispositif expérimental pour la mesure de l'adhérence par Pull-off.	95
Figure 3.18. Dispositif expérimental pour la mesure de l'adhérence par la méthode de traction par flexion.	96
Figure 3.19. Supports en briques utilisés.	96
Figure 3.20. Moules utilisés pour fabriquer les dalles de 30 x 30 x 10 cm ³ .	97
Figure 3.21. Etalement du béton utilisé pour fabriquer les dalles.	97
Figure 3.22. Dalles avant cure.	97
Figure 3.23. Dalles en béton utilisé pour l'adhérence.	98
Figure 3.24. Etapes de l'application des mortiers sur les supports en briques.	98
Figure 3.25. Etapes de l'application des mortiers d'enduisage sur les dalles en béton.	99
Figure 3.26. Dispositif de carottage.	99
Figure 3.27. Enduit carotté sur les deux supports en briques creuse et en béton.	100
Figure 3.28. Collage des pastilles métalliques sur les deux supports.	100
Figure 3.29. Déroulement de l'essai d'arrachement.	100

Figure 3.30. Déroulement de l'essai d'adhérence de traction par flexion.....	101
Figure 3.31. Eprouvettes bicomposés utilisées pour l'essai d'adhérence.	101
Figure 3.32. Eprouvettes 4x4x16 cm ³ sciées.....	102
Figure 3.33. Positionnement des mortiers supports dans les moules 4x4x16 cm ³	102
Figure 3.34. Collage des mortiers réparations dans les moules 4x4x16 cm ³ contenant les supports.	102
Figure 4.1. Influence du SBR et du rapport E/C sur la fluidité des mortiers.	104
Figure 4.2. Influence du SA et du rapport E/C sur la fluidité des mortiers.....	105
Figure 4.3. Influence de l'âge sur la résistance à la compression en fonction de la teneur en latex SBR des mortiers soumis à la cure mixte.	107
Figure 4.4. Influence de l'âge sur la résistance à la compression en fonction de la teneur en latex SA des mortiers soumis à la cure mixte.	107
Figure 4.5. Influence de l'âge sur la résistance à la compression en fonction de la teneur en latex SBR des mortiers ayant subi la cure sèche.	109
Figure 4.6. Influence de l'âge sur la résistance à la compression en fonction de la teneur en latex SA des mortiers ayant subi la cure sèche.	110
Figure 4.7. Influence de l'âge sur la résistance à la traction par flexion en fonction de la teneur en latex SBR des mortiers soumis à la cure mixte.	111
Figure 4.8. Influence de l'âge sur la résistance à la traction par flexion en fonction de la teneur en latex SA des mortiers soumis à la cure mixte.....	112
Figure 4.9. Influence de l'âge sur la résistance à la traction par flexion en fonction de la teneur en latex SBR des mortiers soumis à la cure sèche.	113
Figure 4.10. Influence de l'âge et la teneur en latex le SA sur la résistance à la traction par flexion des mortiers soumis à la cure sèche.	114
Figure 4.11. Influence de l'âge et la teneur en latex le SBR sur la ténacité des mortiers soumis à la cure mixte.	115
Figure 4.12. Influence de l'âge et la teneur en latex le SA sur la ténacité des mortiers soumis à la cure mixte.	116
Figure 4.13. Influence de l'âge et la teneur en latex le SBR sur la ténacité des mortiers soumis à la cure sèche.	117
Figure 4.14. Influence de l'âge et la teneur en latex le SA sur la ténacité des mortiers soumis à la cure sèche.	117
Figure 4.15. Influence de l'âge et la teneur en SBR sur l'adhérence des mortiers aux briques en terre cuite.	118
Figure 4.16. Influence de l'âge et la teneur en SA sur l'adhérence des mortiers aux briques de terre cuite.....	119
Figure 4.17. Influence de l'âge et la teneur en latex le SBR sur l'adhérence des mortiers aux dalles en béton.	119
Figure 4.18. Influence de l'âge et la teneur en latex le SA sur l'adhérence des mortiers aux dalles en béton.	120
Figure 4.19. Influence de la cure et la teneur en SBR sur l'adhérence des mortiers bicomposés.....	121
Figure 4.20. Influence de la cure et la teneur en SA sur l'adhérence des mortiers bicomposés.	122
Figure 4.21. (a) et (b) Modes de rupture des mortiers appliqués sur les briques en terre cuite.	124
Figure 4.22. (a) et (b) Modes de rupture des mortiers modifiés appliqués sur des dalles en béton.	125
Figure 4.23. Mode de rupture des éprouvettes bicomposées.	125

Figure 4.24. Influence du taux de substitution sur la porosité accessible à l'eau des mortiers.	126
Figure 4.25. Echantillons coupés après le test de la porosité accessible à l'eau.....	127
Figure 4.26. Influence du taux de substitution sur l'absorption l'eau des mortiers.	128

Liste des Tableaux

Tableau 1.1. Durabilité des bétons imprégnés par polymère (Elalaoui, 2012).	7
Tableau 1.2. Propriétés-types des bétons de polymère courants et du béton de ciment Portland (Elalaoui, 2012).	9
Tableau 1.3. Les applications typiques de BP (Ribeiro, 2006).	10
Tableau 1.4. Malaxage selon la norme ASTM C 1439 (1 ^{ère} Méthode).	17
Tableau 1.5. Malaxage en adoptant le pré-mouillage (2 ^{ème} Méthode).	17
Tableau 2.1. Principales normes et standards relatifs à la mesure de l'adhérence sur béton ou de la cohésion des surfaces (Courard, 2004).	68
Tableau 3.1. Composition chimique du ciment de Béni-saf.	80
Tableau 3.2. Composition de Bogue minéralogique du ciment de Béni-saf.	80
Tableau 3.3. Caractéristiques physico-chimiques et mécaniques du ciment de Béni-saf.	83
Tableau 3.4. Propriétés physiques des granulats utilisés.	85
Tableau 3.5. Propriétés physiques des deux types de latex (SBR et SA) utilisés.	86
Tableau 3.6. Performances mécaniques des mortiers témoins préparés pour E/C= 0.5 et 0.55.	87
Tableau 3.7. Mélanges des composants des mortiers modifiés au latex selon la méthode de pré-mouillage.	88
Tableau 3.8. Détail des proportions de mélange des mortiers modifiés.	91

Liste des notations et abréviations

A

AFPC; Association Française pour la Construction

AFREM; Association Française de Recherches et d'Essais sur les Matériaux

B

BIP/MIP; Béton imprégné par polymère / Mortier imprégné par polymère

BMP/MMP; Béton modifié par polymère/ Mortier modifié par polymère

BP/MP; Béton polymère/ Mortier polymère

C

C₂S; Silicate bicalcique « Bélite »

C₃A; Aluminate tricalcique

C₃S; Silicate tricalcique « Alite »

C₆AS₃H₃₁; Trisulfoaluminate de calcium hydraté « l'ettringite »

Ca (HCOO)₂; Formiate de calcium « sel de calcium de l'acide formique »

Ca(OH)₂; Hydroxyde de calcium

CH; Hydroxyde de calcium « Portlandite »

CO₂; Dioxyde de carbone

COVs; Composés organiques volatils

CR; Caoutchouc chloroprène

C-S-H; Silicate de Calcium Hydraté

D

D_{Cl}; Coefficient de diffusion des chlorures

E

E; Module d'élasticité

E/C; Rapport eau sur ciment

EP; Résine époxydique

EVA; Éthylène-acétate de vinyle

F

FA; Cendres volantes

$f_c / f_f = R_c / R_f = \sigma_c / \sigma_f$; Rapport résistance à la compression sur la résistance à la flexion « ténacité »

FS = SF; Fumée de silice

H

HEC; Hydroxyéthylcellulose

HMWM; Méthacrylate, de masse moléculaire élevée

HR = (HR); Humidité relative

M

MBR; Méthacrylate de méthyle-butadiène
MC; Méthylcellulose
MMA; Méthacrylate de méthyle
 $m_p / m_c = P/C$; Rapport polymère sur ciment

N

NR; Latex naturel

O

OPC; Ciment Portland ordinaire ou mortier ordinaire

P

$P/C = m_p / m_c$; Rapport polymère sur ciment,
PA; Polyacrylate
PAA; Acide polyacrylique
PAAM; Polyacrylamide
PAE; Polyacrylique Ester
PEI; Polyéthylène imine
PEO; Polyoxyde d'éthylène
pH; Potentiel hydrogène
PP; Polypropylène
PSS; Sulfate de polystyrène
PU / PA; Polyuréthane modifié par le Polyacrylate
PVA = PVOH; Polyalcool vinylique
PVAA; Acétate alcool polyvinylique
PVP; Polyvinyle Propionate

R

R_c ; Résistance à la compression
 R_f ; Résistance à la flexion
 R_t ; Résistance à la traction

S

SA; Styène acrylique
SAE; Styène- acrylique ester
SBR; Caoutchouc Styène Butadiène
 SiO_2 ; Dioxyde de silicium

T

T; Température
TMFF; Température minimale de formation de film polymère
TMPTMA; Tri-méthacrylate de triméthylolpropane
 T_v ; Température de transition vitreuse

U

UMA; Méthacrylate d'uréthane
UV; Rayons ultra violet

V

Va / VeoVa; Polyvinyl Acétate-Vinyle Carboxylate
VAC; Copolymères d'acétate de vinyle

Introduction générale

Ces dernières années, les innovations techniques dans l'industrie de la construction ont progressé considérablement et la recherche et le développement des matériaux de construction de hautes performances ont suivis activement pour faire face aux innovations.

Parmi les matériaux qui ont vu un développement considérable, on trouve les mortiers. Contrairement à l'idée très réputée, les applications des mortiers ne sont pas limitées aux menus travaux de maçonnerie : jointoiement ou revêtement de murs ou de sols. Ils permettent aussi de réaliser des travaux d'isolation, de réparation et de rénovation (bâtiments, ouvrages d'art). En plus de ces fonctions, ils protègent et décorent les supports (enduits d'imperméabilisation et de parement). Cette diversité d'applications, nécessite des formulations spécifiques et adaptées utilisant des matériaux innovants qu'on appelle adjuvants. A ce titre, l'intégration des polymères aux mortiers, désignés sous le nom de mortiers modifiés aux polymères, est une technique qui peut offrir une bonne adhérence aux supports tout en améliorant leur durée de vie. Ces polymères ajoutés aux mortiers peuvent être soit des polymères solubles dans l'eau, des résines liquides, ou bien des poudres redispersibles ; mais les plus utilisés sont les polymères latex.

Depuis leur innovation, la formulation de ces systèmes modifiés a reposé sur une simple association : ciment, eau, sable et un polymère (latex). Ces latex sont ajoutés en tant qu'adjuvants plastifiants réducteurs d'eau, avec un rapport polymère / ciment variant généralement de 5 à 20% d'extrait sec de latex rapporté à la masse du ciment dans le mélange.

L'objectif de la présente thèse est d'étudier les performances mécaniques et de durabilité des matériaux cimentaires aux ajouts de latex. En effet, un programme d'essai expérimental est élaboré sur des mortiers modifiés avec différents pourcentages de latex. Dans ce cadre, deux familles de latex ont été utilisées les styrènes butadiènes (SBR) et les styrènes acryliques (SA). S'il est vrai que les propriétés des mortiers de ciment sont améliorées par l'ajout de latex comme adjuvant, le mécanisme de modification par substitution du ciment portland suscite encore des interrogations. C'est ce que nous proposons d'élaborer dans le cadre de ce travail, à caractère expérimental, pour lever le voile sur quelques zones d'ombre et tenter de répondre à certains questionnements.

Organisation générale du mémoire :

Cette thèse comporte quatre chapitres : une synthèse bibliographique est élaborée dans le premier chapitre sur les principaux constituants, le mélange, le mécanisme de filmification, la formation de la co-matrice et les différentes interactions qui peuvent exister dans les mortiers modifiés aux latex.

Le deuxième chapitre est consacré à un état de l'art relatif au comportement mécanique aux états frais et durci ainsi que la durabilité des mortiers modifiés aux latex.

On présente dans le troisième chapitre, les procédures relatives à la préparation, la confection et la cure des mortiers et bétons testés, ainsi qu'une description des modes opératoires préconisés. Le programme expérimental y a été donc détaillé.

Introduction générale

Le quatrième chapitre est consacré à l'analyse des différents résultats relatifs aux corps d'épreuve réalisés. La première partie de ce chapitre analyse les propriétés à l'état frais des mortiers. Dans la deuxième partie, on met en revue l'influence des latex polymères sur les résistances mécaniques et les propriétés d'adhérence des mortiers sur différents supports. La troisième partie, en revanche, portera sur les propriétés de durabilité.

La conclusion générale et les perspectives envisageables à ce travail sont présentées à la fin du manuscrit.

Chapitre 1. Description générale des bétons et mortiers de polymères

1.1. Introduction:

Les matériaux conventionnels à base de matrice cimentaire à l'exemple des bétons et mortiers de ciment Portland, sont devenus ces dernières décennies les matériaux de construction les plus largement utilisés dans le monde, spécialement lorsqu'ils sont associés à l'acier. Leurs propriétés mécaniques atteintes au jeune âge et leur coût relativement faible associé à un processus de fabrication relativement simple, ont conduit à une utilisation hégémoniale de ces matériaux dans le domaine de la construction.

En dépit de leur large utilisation, les mortiers de ciment et bétons présentent un certain nombre de défauts : tels qu'une faible résistance à la traction et à la flexion, une faible déformation à la rupture, la sensibilité au gel, une faible force de liaison dans les applications de réparation, et une mauvaise résistance aux agents agressifs. Pour pallier à certains de ces défauts et pour répondre aux nouveaux besoins qui cherchent des matériaux multifonctionnels possédant un rendement élevé, les chercheurs ont trouvé des matériaux composites, intégrant des polymères à la place ou en combinaison avec le ciment Portland (bétons ou mortiers-polymères).

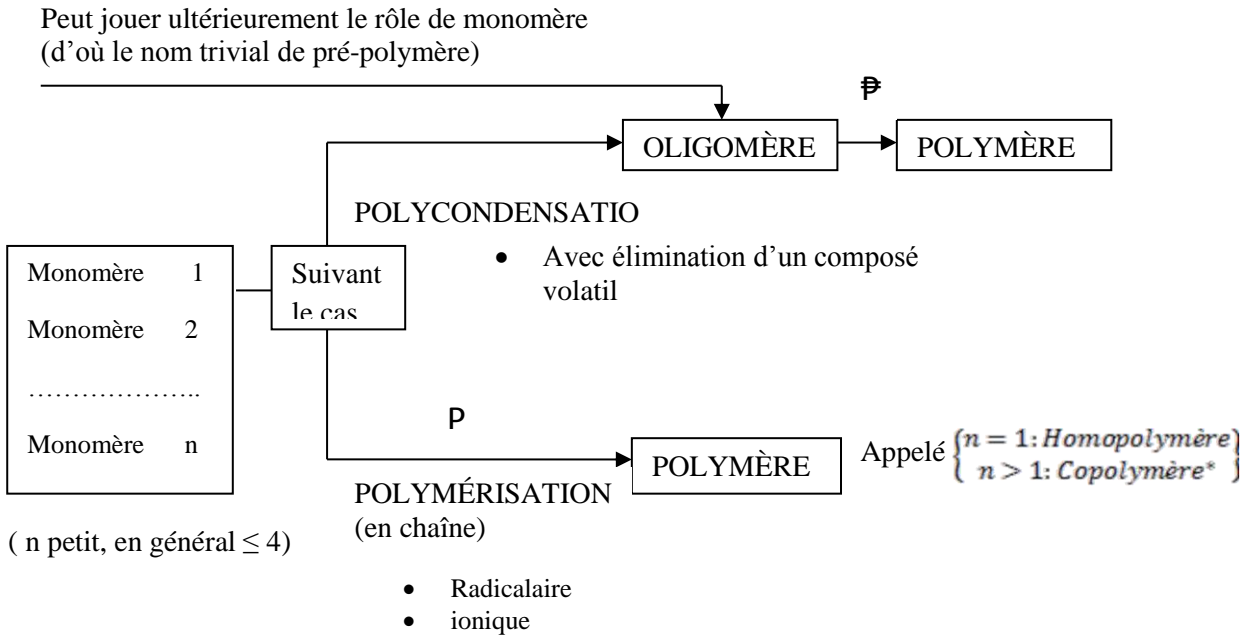
Ce chapitre a pour objectif de présenter les différentes classes de ces matériaux innovants, leurs composantes ainsi que leurs applications potentielles dans le génie civil. En outre, une synthèse bibliographique sera dédiée aux principaux constituants, au mélange, au mécanisme de la filmification, à la formation de la co-matrice ainsi que les différentes interactions qui gouvernent l'évolution des mortiers modifiés aux latex en fonction du temps.

1.2. Concept du composite béton et mortier- polymère :

Le concept général des composites béton ou mortier-polymère, du point de vue technique, implique un processus par lequel des produits chimiques (polymères), sont introduits dans une matrice cimentière (Ribeiro, 2006). Leurs combinaisons avec ces mélanges, a donné un effet synergique (Benosman, 2010) (Czanecki, 2015).

Les produits chimiques dits polymères utilisés sont des structures ayant une architecture le plus souvent linéaire ou tridimensionnelle constituée par l'enchaînement covalent de plusieurs unités ou motifs unitaires appelés monomères (Elalaoui, 2012). La réaction par laquelle ces monomères sont liés les uns aux autres pour former de longues chaînes polymériques s'appelle la polymérisation. On distingue deux types de polymérisation ; la polymérisation en chaîne ou polyaddition (donnant par exemple le polyéthylène, polystyrène, polypropylène, etc.) et la polymérisation par étapes ou polycondensation (conduisant aux polyesters, polyamides, polyuréthanes, phénoplastes, aminoplastes, etc.) (cf. figure 1.1).

Chapitre 1. Description générale des bétons et mortiers de polymères



Copolymère : statistique, séquencé, greffé, alterné, n=2 bi-polymère (terme peu courant), n=3 ter-polymère.

Figure 1.1. Formation de polymère (Mouton, 1967).

Semblables aux matériaux de ciment classiques, les matériaux composites aux polymères comprennent trois phases: une phase dispersée, constituée par des agrégats et des renforts (si elle est appliquée); une phase continue formée par la matrice de liant (ciment et/ou polymère), et une certaine porosité imposée, soit par la granulométrie du granulat ou par le procédé lui-même (Ribeiro, 2006), voir figure 1.2.

Au regard de cette définition, un nombre infini de mélanges peuvent être réalisés en fonction de la nature chimique des composants, leur contenu et leur procédé de fabrication. Généralement, ces composites sont issus de la substitution partielle ou totale de la matrice cimentaire, du mortier ou du béton conventionnel par le polymère en vue de les renforcer (Benosman, 2010). Ohama (Ohama, 1997), distingue trois classes de béton ou mortier-polymère :

- Béton (ou mortier) imprégné par polymère (BIP /MIP);
- Béton (ou mortier) polymère (BP/MP);
- Béton (ou mortier) modifié par polymère (BMP/MMP).

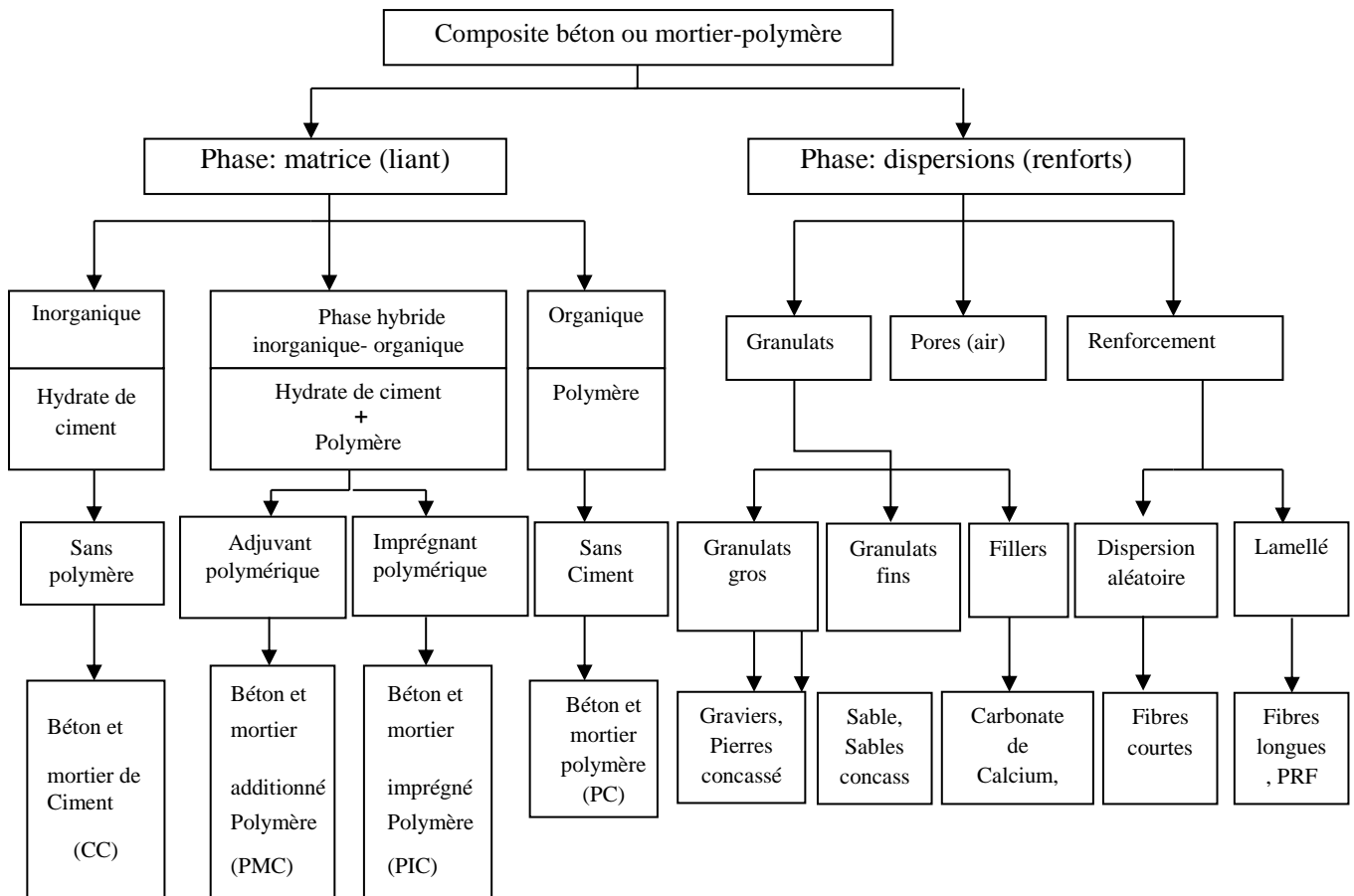


Figure 1.2. Classification des composites béton ou mortiers-polymère (Ohama, 2011) (Elalaoui, 2012).

1.3. Classification des composites-polymère :

1.3.1. Béton ou mortier imprégné par polymère BIP/MIP :

Les BIP et MIP sont les premiers composites qui sont, depuis la fin des années 1960 aux années 1970, largement connus (Fowler, 1999), (Ohama, 2011). Ce système est un composite formé par injection d'un monomère de faible viscosité (Fowler, 1999) (Knapen, 2007) (Elalaoui, 2012), généralement le méthacrylate de méthyle MMA (Fowler, 1999) (ACI, 1997) sous forme liquide ou gazeuse dans les pores du béton (ou mortier) de ciment Portland après durcissement (Fowler, 1999) (Elalaoui, 2012) ; bien que les monomères de type liquide sont plus facilement adaptables à l'imprégnation du béton durci (ACI, 1997).

En règle générale, presque n'importe quelle forme, taille, configuration, qualité de béton (ou mortier) de ciment Portland peuvent être imprégnées, à condition que le monomère ait accès à l'espace vide à l'intérieur du béton (ou mortier). Une partie importante de cet espace est généralement obtenue par l'élimination de l'eau libre des pores par simple séchage (ACI, 1997). Il est clair que le remplissage de monomères de l'espace disponible dans le réseau poreux du béton (ou du mortier), détermine si ce composite est partiellement ou totalement imprégné. Selon le guide (ACI, 1997), l'imprégnation totale implique qu'environ 85% de l'espace vide disponible après séchage soit rempli.

Après imprégnation, le béton ou le mortier contenant la quantité souhaitée de monomères est soumis à un traitement de conversion du monomère en polymère (la polymérisation). Les

deux méthodes les plus couramment utilisées pour la polymérisation dans les systèmes imprégnés sont appelées thermo-catalytique et promu-catalytique. Une troisième méthode, impliquant des rayonnements ionisants, est moins fréquemment utilisée (ACI, 1997) (Fowler, 1999).

Une description du processus simplifié pour les BIP, utilisant la polymérisation thermo-catalytique est montrée dans la figure 1.3.

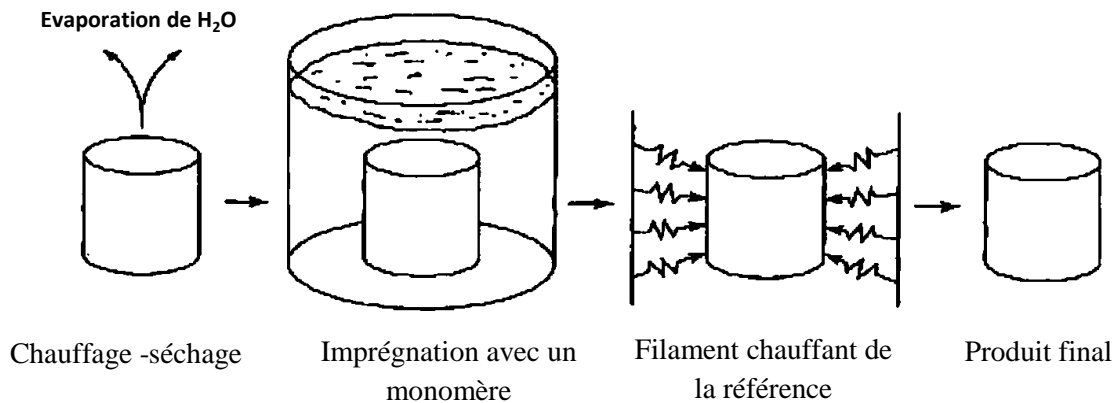


Figure 1.3. Schéma de la méthode de la production de BIP (ACI, 1997).

1.3.1.1. Propriétés des systèmes imprégnés :

Généralement, l'imprégnation des bétons (ou mortiers) affecte positivement plusieurs propriétés importantes, y compris les résistances à la traction, à la flexion et à la compression (Fowler, 1999) (Elalaoui, 2012). Ces nouveaux matériaux imprégnés de polymères présentent, dans la majeure partie des cas, une résistance à la compression égale à quatre ou cinq fois la résistance du béton conventionnel (ACI, 2009). Aussi une amélioration peut être signalée sur le module d'Young, la résistance à l'abrasion, la résistance à la pénétration et les dommages causés par l'eau, les acides, les sels, et la résistance au cycle de gel / dégel (Fowler, 1999) (Elalaoui, 2012) (Czarnecki, 2013), voir le tableau 1.1.

1.3.1.2. Applications des systèmes imprégnés :

Avec ses propriétés exceptionnelles, de nombreux domaines d'applications sont recensés, tels que : la préservation des monuments, la réhabilitation des bâtiments anciens et dégradés, la fabrication des tabliers de ponts, les canalisations, les conduits des fluides agressifs, les carrelages, les poutres, les dalles, les trottoirs, les bordures et les revêtements de tunnel (Fowler, 1999) (ACI, 2009). En outre, ils sont utilisés pour la réalisation de panneaux minces préfabriqués ainsi que pour la réparation des surfaces des revêtements routiers dégradés (Kardon, 1997).

1.3.1.3. Inconvénients des systèmes imprégnés :

Le principal inconvénient des systèmes imprégnés BIP et MIP est leur coût, qui n'est pas économiquement viable. Actuellement, les monomères utilisés pour l'imprégnation sont chers et le procédé de fabrication est plus compliqué par rapport aux produits conventionnels (Knapen, 2007) (Elalaoui, 2012) (Ohama, 2011). Aussi, l'imprégnation partielle ne rend pas le béton complètement imperméable, et son exposition à des agents très agressifs, tels que l'acide sulfurique, peut être préjudiciable (le béton ou le mortier peut être attaqué lentement).

Chapitre 1. Description générale des bétons et mortiers de polymères

De plus, la technique d'imprégnation nécessite l'application de la chaleur pour sécher la surface du béton, ce qui peut provoquer la fissuration et entraîner une diminution de la résistance. Toutefois, l'opération d'imprégnation nécessite beaucoup de temps (environ deux jours pour l'imprégnation partielle) (ACI, 2009).

Tableau 1.1. Durabilité des bétons imprégnés par polymère (Elalaoui, 2012).

		Béton témoin	Béton imprégné de polymère (MMA)	Béton imprégné de polymère (Styrène).
Gel- dégel	Nombre de cycles	740	3650	5440
	Perte de masse (%)	25	2	2
Attaque aux sulfates	Dilatation (%)	0.466	0.006	0.03
	Nombre de jours	480	Non	690
Résistance aux acides (15% HCl)	Perte de masse (%)	27	9	12
	Nombre de jours	105	805	805
Résistance à l'usure	Profondeur d'usure (mm)	1.25	0.38	0.93
	Perte de masse (g)	14	4	6

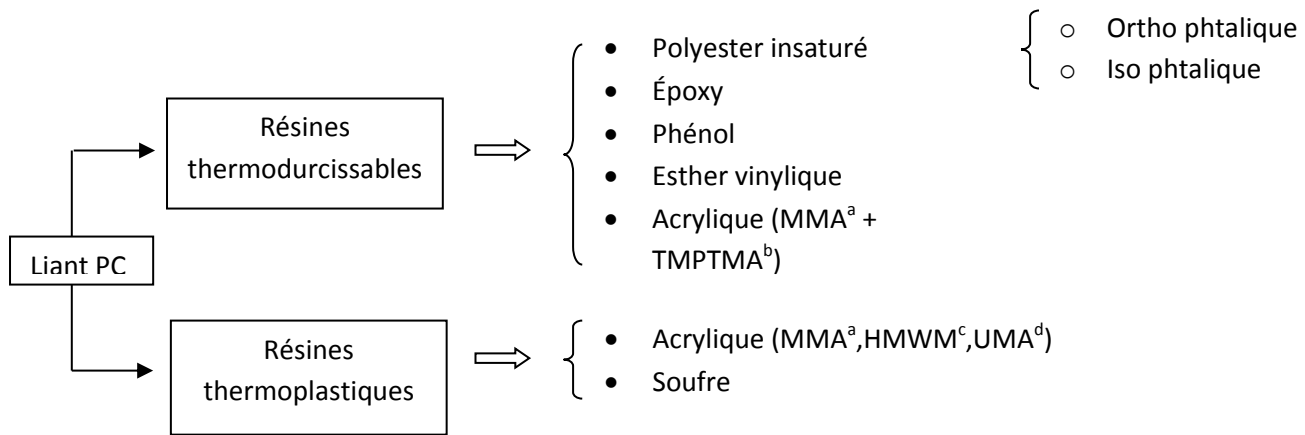
1.3.2. Béton ou mortier polymère BP/MP :

Il font partie de la catégorie des matériaux à matrice organique d'où sa désignation de béton (ou mortier) à matrice organique (Elalaoui, 2012) (Haidar, 2011). Il est connu aussi sous l'appellation de béton (ou mortier) de résine synthétique ou de béton (ou mortier) de résine plastique ou tout simplement par le béton (ou le mortier) de résine ou de polymère (Ribeiro, 2006) (Haidar, 2011).

Ce système est entré en usage à la fin des années 50 et au début des années 1960 (Ohama, 2011), même si les demandes étaient très limitées. Il a d'abord été utilisé dans l'industrie de la construction aux États-Unis, puis en 1958, pour la fabrication innovante de panneaux muraux préfabriqués et marbre artificiel (Fowler, 1999). En Europe, il a été utilisé comme matériau de réparation dès 1961 (Ribeiro, 2006). Cependant, ce n'est que dans la fin des années 60 et le début des années 70, après le développement des BIP, que le BP est rendu plus connu.

Ces composites sont généralement formés par un squelette granulaire et un liant polymère (Haidar, 2011). Ils ne contiennent pas de phase de ciment hydraté (Salbin, 1996) (Czarnecki, 2007) (Kardon, 1997) (Zabihi, 2015), bien que le ciment Portland peut être utilisé comme une charge « sans l'eau » (Ribeiro, 2006). Lorsque les renforts sont formés par des sables ou des inclusions de dimensions plus petites, le composite est dit mortier de résine ou de polymère (Elalaoui, 2012) (Haidar, 2011).

Les polymères utilisés pour ce système sont parfois thermoplastiques, mais dans la plupart des cas thermodurcissables, voir la figure 1.4.



a) MMA -le méthacrylate de méthyle ; b) TMPTMA -Triméthacrylate de triméthylolpropane ;
c) HMWM -Méthacrylate de masse moléculaire élevée ; d) UMA -le méthacrylate d'uréthane.

Figure 1.4. Les polymères disponibles dans le commerce et utilisés comme liants dans les systèmes BP/MP (Ribeiro, 2006).

1.3.2.1. Propriétés des composites bétons ou mortiers de polymère :

Le remplacement total de la matrice cimentaire dans le cas des bétons ou les mortiers ordinaires par un liant polymérique, se justifie par l'amélioration de ses tenues contre les diverses agressions de types mécaniques, chimiques ou autres (Elalaoui, 2012) (Czarnecki, 2013). En effet, ce type de matériau présente certains avantages, tels que :

- Une bonne résistance aux agents chimiques et aux agents corrosifs ;
- Une faible perméabilité à l'eau et une bonne résistance aux cycles de gel-dégel ;
- Un faible coefficient de dilatation thermique ;
- Un durcissement rapide à des températures ambiantes (-18 à 40 °C) ;
- Une bonne adhérence aux granulats et aux bétons anciens ;
- Des résistances mécaniques meilleures que celles des bétons hydrauliques surtout en traction, voir le tableau 1.2. ;
- Une bonne résistance à l'abrasion ;
- Une excellente durabilité avec un coût raisonnable et un faible poids ;
- Ils présentent ainsi un module d'élasticité réduit et ils ont la capacité d'être utilisé avec des couches minces pour des finitions décoratives et architecturales ;

De plus, ils présentent une bonne résistance au fluage, et sont très résistants aux UV en raison de la teneur en polymère très faible et les charges inertes.

Chapitre 1. Description générale des bétons et mortiers de polymères

Tableau 1.2. Propriétés-types des bétons de polymère courants et du béton de ciment Portland (Elalaoui, 2012).

Matériau	Masse volumique (kg/l)	Absorption en eau (%)	R _c (MPa)	R _t (MPa)	R _f (MPa)	E (GPa)
Poly-méthacrylate de méthyl	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

1.3.2.2. Applications des composites bétons ou mortiers de polymère :

A cause de ses nombreux avantages, le béton ou le mortier polymère est devenu un matériau dominant dans l'industrie de la construction au Japon et en Europe pendant les années 1970 et dans les années 80 aux États-Unis (Ohama, 2011) (Elalaoui, 2012). Ils ont été utilisés dans les applications où il y a un besoin de durabilité, comme pour la fabrication des systèmes de drainage et de canalisation (les regards, les réservoirs d'acides et de confinement des déchets dangereux, etc.). Ils ont été utilisés aussi pour les revêtements de réparation des surfaces et pour les produits préfabriqués. Le tableau 1.3 résume les applications importantes de ces composites.

1.3.2.3. Inconvénients des composites bétons ou mortiers de polymère:

Ces systèmes présentent quelques inconvénients. En effet, le coût de la matière première (principalement le liant) est plus élevé (jusqu'à 8 fois) comparé à celui des liants hydrauliques (Elalaoui, 2012). Sachant que ce coût supplémentaire peut être compensé dans certaines applications par la réduction du coût de la main-d'œuvre et la diminution du prix des produits à base de polymère qui sont plus chers seulement de 10 à 25% que les liants hydrauliques (Elalaoui, 2012). Cette économie est réalisable compte tenu de plusieurs facteurs comme la diminution de l'économie de matières (jusqu'à 50%) en augmentant les dimensions des produits grâce aux résistances élevées du béton résineux, de la réduction des frais de transport grâce aux volumes plus petits et de la diminution considérable des dépenses d'investissements pendant la fabrication et pendant les opérations de manutention et le stockage comme résultat de décoffrage et de durcissement rapide du matériau, qui diminue l'espace nécessaire pour la production et le stockage des produits finis.

Chapitre 1. Description générale des bétons et mortiers de polymères

Tableau 1.3. Les applications typiques de BP (Ribeiro, 2006).

Fonction/ Application	Utilisations finales
Les planchers et les trottoirs	Planchers des maisons, hangars, écoles, hôpitaux, bureaux, magasins, toilettes, couloirs, salles de sport, les usines, les installations industrielles, les escaliers, les garages, les plates-formes de chemin de fer, pistes d'aéroport, etc.
Revêtements d'imperméabilisation	Les toitures en béton, réservoirs d'eau, les fosses, les piscines, les silos, etc.
Revêtements décoratifs	Revêtements muraux, matériaux de revêtement pour finitions texturées de bâtiments, le matériel de préparation de surface pour les revêtements, etc.
Revêtements anticorrosion	Les effluents des drains, coulis pour carreaux résistants aux acides, planchers pour les laboratoires chimiques et pharmaceutiques, bains chauds des resorts, revêtements anticorrosion pour les terrasses avec des toits en acier, etc.
Les revêtements de ponts	Tabliers de ponts, les terrasses des navires internes et externes, les terrasses des passerelles, les étages des trains et des métros, etc.

De plus, ces bétons se caractérisent par une mauvaise odeur et une toxicité provenant de la partie liante du matériau (la résine et le durcisseur) lors du malaxage et la mise en place. Aussi, le comportement de ces composites aux températures élevées et au feu freine leur développement, surtout lorsqu'on les utilise comme matériau de parement ou pour la décoration intérieure. Puisque les résines sont des substances organiques qui résistent mal à la chaleur et leur exposition prolongée à des températures élevées n'est donc pas recommandée, car elle entraîne sa dégradation ; ce qui se traduit éventuellement par une perte de sa résistance mécanique (Elalaoui, 2012) (Kardon, 1997).

1.3.3. Béton ou mortier modifié par polymère BMP/MMP :

Ce matériau dont la teneur en polymère, par rapport au ciment, est supérieure à 5%, a été mis en usage au début des années 1950, et dans les années 1970. Il est devenu l'un des matériaux de construction dominants dans les pays avancés (Ohama, 2011). Il est défini comme un mélange de liant (ciment Portland) et agrégat combiné au moment du mélange à un polymère organique usuellement comme adjuvant (Czarneck, 2013) (ACI, 2003) (Kardon, 1997). Lorsque les hydrates de ciment et la coalescence du polymère se produisent, une co-matrice est entraînée à travers le béton (ou le mortier). En conséquence, une matrice hybride est obtenue, formée par cette co-matrice, ce qui entraîne une amélioration du produit final.

D'après Ohama (Ohama, 1995), les mortiers modifiés sont plus utilisés que le béton du point de vue de l'équilibre entre les performances et le coût, ce qui justifie le choix que nous avons fait de les valoriser dans le cadre de nos travaux.

Plusieurs types de polymères sont utilisés pour fabriquer un béton ou un mortier modifié par polymères. Les plus utilisés, se présentent sous forme de dispersion aqueuse que l'on désigne sous le nom de latex (Haidar, 2011) (Kardon, 1997). Aussi, il existe les polymères redispersibles, les polymères solubles dans l'eau, et aussi les résines liquides (Knapen, 2007) (Zabihi, 2015), voir la figure 1.5.

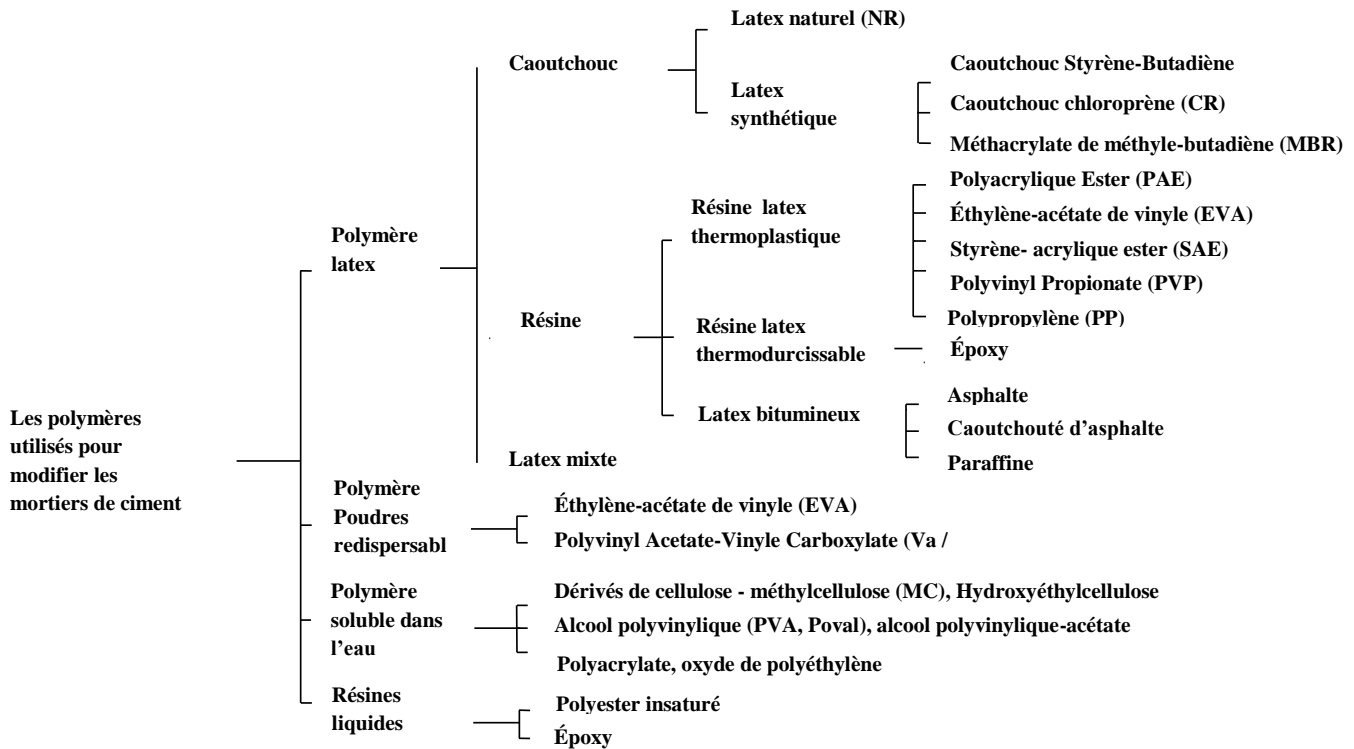


Figure 1.5. Polymères pour modifier les mortiers et les bétons de ciment (Ohama, 1998) (Knapen, 2007).

1.3.3.1. Les mortiers modifiés par les poudres redispersables :

Quant aux poudres, le principe est presque le même que celle de la modification par les latex, sauf qu'il comporte à la place de la solution aqueuse (le latex), des poudres re-dispersables de polymère (Ohama, 1995).

Ces poudres sont utilisées essentiellement pour la fabrication de mélanges dont les constituants sont : les ciments et les agrégats (généralement de taille < 6 mm), l'eau et les agents anti-mousse si la poudre n'en contient pas (ACI, 2003). Après l'ajout d'eau, les poudres re-dispersables sont re-émulsionnées dans le mélange cimentier, et se comportent de la même manière que les latex (Knapen 2007).

Le dosage des mélanges de ciment modifiés par des polymères en poudre re-dispersable est similaire à celle des autres systèmes modifiés par des polymères, à l'exception que l'eau n'est pas fournie par le polymère. Le rapport P/C en masse varie de 5 à 20% (ACI, 2003). Le durcissement des systèmes modifiés est similaire à celui des systèmes modifiés au latex (Ohama, 1995).

1.3.3.1.1. Fabrication des poudres redispersables :

Les premières poudres re-dispersables sont à base de polyvinylacétate. Ils ont été développés par (Max Ivanovits), chercheur chimiste chez Wacker AG, en 1952 (Baueregger, 2014). Ces poudres sont obtenues par un procédé en deux étapes (Ohama, 1998).

Tout d'abord, les latex de polymères qui sont les matières premières, sont réalisées par polymérisation en émulsion. Ces derniers sont séchés après par pulvérisation pour obtenir ce qu'on appelle les poudres re-dispersables (ACI, 2003), (Baueregger, 2014) (Knapen, 2007).

Avant le séchage par pulvérisation, les latex sont formulés en outre avec des ingrédients tels que des bactéricides, des adjuvants de séchage par atomisation et les agents anti-mousse, voir la figure 1.6.

Des antiblocages tels que le carbonate d'argile, la silice et le calcium sont ajoutés à la poudre de polymère pendant ou après le séchage par pulvérisation pour empêcher la prise en masse des poudres pendant le stockage. À l'heure actuelle, les seuls polymères disponibles sous forme de poudres redispersibles sont PAE, SA, VAE, VA-VEOVA, et le PVA (ACI, 2003) (Ohama, 1995).

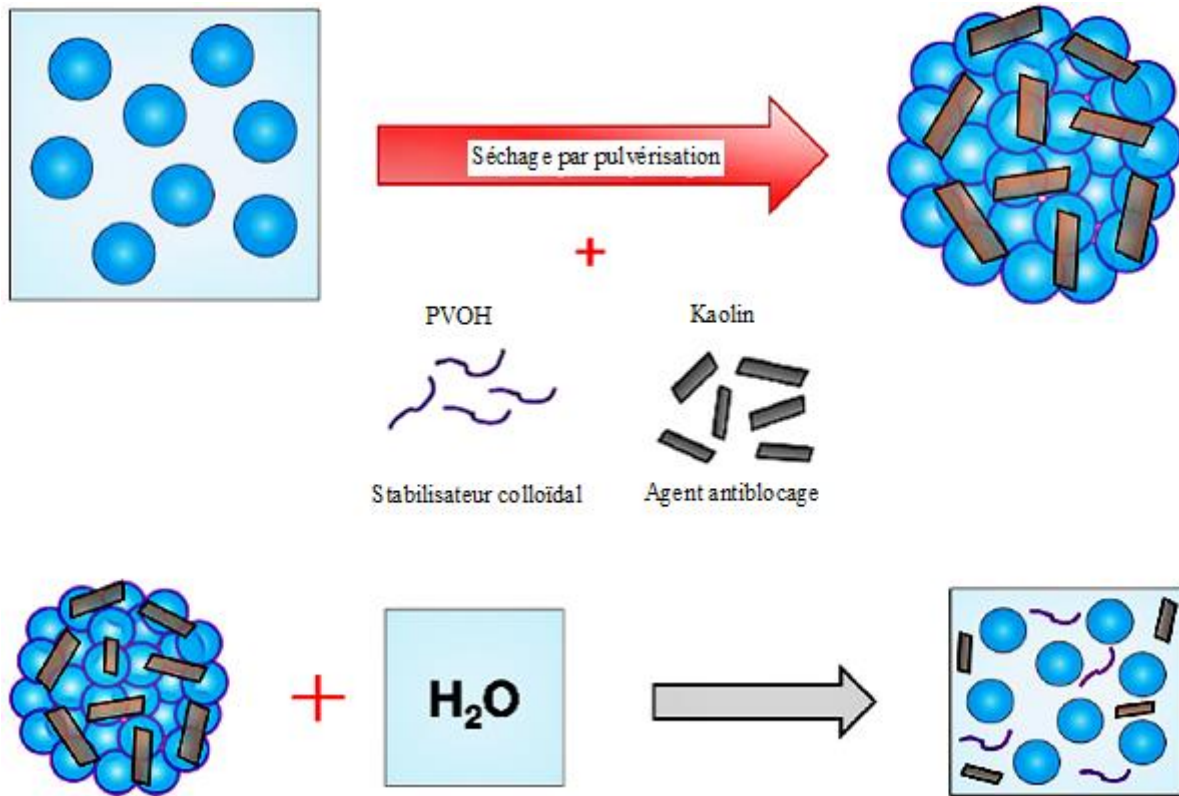


Figure 1.6. Illustration schématique de la fabrication des poudres redispersibles (Bauerregger, 2014).

1.3.3.1.2. Les propriétés des mortiers modifiés par les poudres redispersibles :

L'avantage de l'utilisation des poudres redispersibles, c'est que le dosage du mélange est mieux contrôlé, avec le dosage des ingrédients secs qui intervient le plus souvent à l'usine et non sur le chantier, comme lorsqu'on utilise les latex.

En règle générale, les mêmes propriétés signalées pour les mortiers après modification par latex sont obtenues aussi pour les mortiers après modification par les poudres redispersibles (Ohama, 1995), voir chapitre 2 ; seulement ces propriétés sont légèrement réduites par rapport à celles du latex de composition analogue (ACI, 2003). En effet, l'addition des latex aux mortiers a tendance à former plus facilement et de manière uniforme un film polymère par rapport à l'addition des poudres redispersibles (Afridi, 2003).

1.3.3.1.3. Applications des systèmes modifiés par les poudres redispersables :

Les poudres re-dispersables sont toujours plus chères que leur équivalent en latex parce qu'ils sont généralement obtenus par un procédé en deux étapes comme nous l'avons précédemment mentionné. Par conséquent, les systèmes modifiés par les poudres sont utilisés lorsque le coût n'est pas un souci majeur et la commodité est plus importante, comme dans des applications qui nécessitent l'utilisation de petites quantités. D'après le guide de l'ACI (ACI, 2003), les mortiers modifiés par les poudres re-dispersables sont utilisés très efficacement dans :

- Les colles à carrelages en céramique et pour le jointoiement ;
- Pour construire les revêtements des sols industriels ;
- Pour la réparation des structures en bétons et les mortiers ;
- En outre, ces poudres sont utilisées à un degré limité dans les systèmes de finition d'isolation extérieurs.

1.3.3.2. Mortiers modifiés par les polymères solubles dans l'eau :

Ce type de mortier modifié comporte des polymères hydrosolubles à la place des latex et des poudres avec des rapports polymère très bas, variant entre 0.5 et 4%, selon le type de polymère utilisé (Knapen, 2007). Ces polymères peuvent être ajoutés sous forme de poudres ou en solutions aqueuses dans les mortiers de ciment au cours du mélange (Ohama, 1995) (Ohama, 1998). Lorsqu'ils sont ajoutés sous forme de poudre, il est conseillé de mélanger à sec les polymères avec les mélanges de ciment globaux, puis les mélanger avec de l'eau.

La littérature montre que ce type de modification est appliqué moins fréquemment (Knapen, 2007), parce qu'il existe peu de polymères qui sont solubles dans l'eau. En outre, leur faible solubilité provoque des difficultés lors de leur utilisation comme modificateur de mortier. D'un autre côté, ces polymères ont l'avantage de l'absence d'agents tensio-actifs qui sont utilisés pour maintenir les polymères en solution. L'absence de ces derniers facilite la formation du film polymère, et les propriétés des matériaux peuvent être mieux réglées. Par conséquent, de faibles teneurs en polymère sont nécessaires (Knapen, 2007).

1.3.3.2.1. Les polymères solubles dans l'eau utilisés :

Il existe les polymères non ioniques ayant un atome d'oxygène ou d'azote dans le squelette du polymère. Comme exemple, on peut citer l'oxyde de polyéthylène (PEO) et de polyéthylèneimine (PEI). Il existe également des polymères non ioniques solubles dans l'eau contenant un groupe acrylique, tel que l'acide polyacrylique (PAA) et de polyacrylamide (PAAM). En outre, les polymères solubles de type alcool polyvinylique (PVA) et l'acétate d'alcool de polyvinyle (PVAA) qui sont fréquemment utilisés pour modifier les mortiers de ciment, appartiennent à la classe des polymères non ioniques solubles dans l'eau contenant un groupe vinyle. Enfin, il y a les éthers de cellulose, comme le méthylcellulose (MC) et l'hydroxyéthylcellulose (HEC), et les polyélectrolytes, comme le sulfate de polystyrène (PSS) (Knapen, 2007).

D'autre part, un autre classement est donné par (Knapen, 2007): les polymères naturels, semi-synthétiques et synthétiques. Les polymères naturels comprennent les amidons, etc. Les dérivées de cellulose telles que l'hydroxyéthylcellulose et la méthylcellulose, appartiennent aux groupes semi-synthétiques. Enfin, les polymères synthétiques constituent des polymères à base d'éthylène tels que l'oxyde de polyéthylène, et à base de vinyle, tel que l'alcool de

polyvinyle et l'acétate d'alcool de polyvinyle. Les acrylates tels que l'acrylate de calcium et d'acrylate de magnésium, qui sont ajoutés sous forme de monomères pendant le mélange, sont aussi des polymères solubles dans l'eau (Ohama, 1998).

Aucune cure spéciale n'est requise pour les systèmes modifiés par les polymères solubles (Ohama, 1995).

1.3.3.2.2. Les propriétés des mortiers modifiés par les polymères solubles dans l'eau :

D'après Ohama et col. (Ohama, 1995) les systèmes modifiés par les polymères solubles présentent une rétention d'eau, un entraînement d'air et un effet plastifiant remarquable. Et cela peut grandement contribuer à une amélioration de la maniabilité et à la prévention du phénomène de «séchage» (Ohama, 1995) (Knapen, 2007). De plus, la capacité de rétention d'eau de ces polymères peut contribuer également à une adhérence supérieure aux différents supports poreux tels que les carreaux de céramique, et les matériaux cimentaires (Knapen, 2007) (Jenni, 2005). En outre, la capacité de rétention d'eau se traduit souvent par une viscosité accrue ; cela tend à diminuer l'eau libre et la tendance à la ségrégation dans la pâte de ciment (Knapen, 2007). De plus, une homogénéité et une meilleure dispersion des fibres de carbone et d'acier sont obtenues dans la pâte de ciment modifié (Knapen, 2007).

D'autre part, les polymères solubles dans l'eau tendent à diminuer la résistance à la compression en raison de l'augmentation de l'air entraîné (Ohama, 1995) (Fu, 1996a) ; tandis qu'une augmentation de la résistance à la traction est trouvée pour certaines applications (Fu, 1996a). En revanche, la force de liaison entre la pâte de ciment et les granulats (Knapen, 2015), entre la pâte de ciment et des fibres d'acier (Knapen, 2015), et entre la pâte de ciment et les fibres de carbone (Fu, 1996c), est améliorée. Dans leurs travaux, (Fu, 1996a) ont étudié l'effet de l'incorporation du méthylcellulose dans les mortiers. Ils ont trouvés que la résistance à la traction a été augmentée jusqu'à 72%, la ductilité à la rupture jusqu'à 620%, tandis que la résistance à la compression a été diminuée jusqu'à 30% et la ductilité à la compression jusqu'à 34%. D'autre part, les mêmes auteurs dans une autre étude (Fu, 1996b) ont trouvés que l'addition de 0,4 % de méthylcellulose et 20% de latex dans la pâte de ciment a donné une augmentation similaire et significative de l'adhérence entre les fibres d'acier inoxydable et la pâte de ciment.

De plus, l'amélioration de l'interface entre les granulats et la pâte de ciment peut entraîner aussi une diminution à la fois de la perméabilité et la formation de fissures (Knapen, 2015).

Ces polymères même si on les ajoute à de petites quantités, ils ont la capacité de former un film polymère dans le mélange cimentier, comme nous l'avons mentionné auparavant. Cette tendance est citée par quelques auteurs dans la littérature (Knapen, 2015). Ces derniers ont étudié la présence du film polymère dans la structure durcie des mortiers de ciment modifiés par l'acétate d'alcool polyvinyle, la méthylcellulose et l'hydroxyéthylcellulose. Les résultats trouvés ont prouvé la présence de films polymères dans les mortiers modifiés avec 1% d'alcool de polyvinyle-acétate et de méthylcellulose. Les mêmes tendances ont été signalées par (Jenni, 2005).

D'une manière générale, le but de la modification des polymères solubles dans l'eau est l'amélioration des propriétés fraîches du mortier, tandis que l'impact sur les propriétés mécaniques est considéré comme un effet secondaire (Knapen, 2007).

1.3.3.2.3. Applications des mortiers modifiés par les polymères solubles dans l'eau :

Ces polymères sont souvent utilisés comme adjuvants pour fabriquer les mortiers adhésifs pour les carreaux de céramiques et les chapes autonivelantes (Knapen, 2007). De plus, ils sont fréquemment utilisés comme des agents de rétention d'eau, appelés modificateurs de rhéologie ou des agents modifiant la viscosité (Knapen, 2007). Ils sont également utilisés pour la réparation des structures détériorées. D'autre part, ces systèmes montrent des propriétés qui les rendent adaptés pour des applications sous-marines.

Les polymères solubles sont utilisés également pour fabriquer les ciments (MDF) qui ont une résistance à la traction très élevée. Ces systèmes sont généralement fabriqués à très faibles rapports eau-ciment variant de 0,08 à 0,2 (Donatello, 2009), avec des pressions et des températures élevées. Les polymères solubles dans l'eau les plus fréquemment utilisés pour fabriquer ces ciments sont l'alcool de polyvinyle ou l'alcool de polyvinyle-acétate d'éthyle (Zhang, 2014) (Chetrashekhar, 1989), le polyacrylamide et l'hydroxypropylméthylcellulose (Knapen, 2007).

1.3.3.3. Les mortiers modifiés par les résines liquides :

Sont des mortiers modifiés par des polymères visqueux tels qu'une résine époxy, une résine de polyester insaturé ou une résine de polyuréthane (Ohama, 1998).

Le mélange de ce type de composites est semblable à celui des systèmes modifiés au latex (Ohama, 1995) (Ohama, 1998) ; seulement ces résines réagissent, avec des durcisseurs ou des agents de durcissement pour former une structure en réseau (polymères à deux composants).

Usuellement, les mortiers modifiés par les résines liquides sont obtenus en mélangeant d'abord : le ciment, les granulats et la moitié de l'eau de gâchage, puis le durcisseur pré-mélangé avec la résine et le reste de l'eau de gâchage. La teneur en « résine, durcisseur » est pratiquement la même ou supérieure à celui des systèmes de latex modifiés ; les plus pratiquées varient entre 15 à 20% (Ohama, 1995) (Ohama, 1998). Néanmoins en Allemagne, selon (Ohama, 1995), on remarque que le durcissement de la résine époxy peut se produire dans le milieu alcalin des mortiers de ciment sans durcisseur. Ces auteurs ont mené une étude sur des mortiers modifiés par des résines époxydes sans durcisseur. Ils ont observé que les mortiers sont réalisés avec succès, et ont des propriétés supérieures par rapport aux mortiers modifiés par les résines époxydiques classiques (avec durcisseur). De plus, ils ont conclu qu'un rapport polymère-ciment variant de 5 à 10%, est considéré comme optimal pour la préparation de ces nouveaux mortiers.

Pour le durcissement, ces systèmes ont l'avantage d'être durcis dans des conditions humides ou mouillées.

1.3.3.3.1. Les propriétés des mortiers modifiés par les résines liquides :

Contrairement aux polymères solubles, peu d'études sont consacrées à l'effet des résines liquides sur les propriétés fraîches des mortiers. La majorité des études qui existent dans la littérature, mentionnent les propriétés durcies des mortiers modifiés par les résines liquides.

Dans ce type de mortier, la polymérisation est initiée en présence d'eau pour former une phase polymère, alors que l'hydratation du ciment se produit en même temps. Le degré de cette dernière diminue probablement à cause du recouvrement des particules de ciment par les particules de résine, ce qui réduit le contact entre le ciment et l'eau. Par conséquent, l'addition

de la résine époxy retarde le durcissement des pâtes et des mortiers. Après durcissement, une phase co-matrice est formée avec une structure combinée de réseau de polymères et une phase d'hydrates de ciment et d'agrégats qui s'interpénètrent ; ce qui les lie fortement. Par conséquent, la résistance et d'autres propriétés du mortier sont améliorées pratiquement de la même manière que ceux des systèmes modifiés par latex (Ohama, 1998). Ce qui signifie une résistance et une adhérence élevée, une faible perméabilité, et une résistance chimique améliorée tout comme les systèmes modifiés au latex (Ohama, 1995).

Dans leurs études Aggarwal et col. (Aggarwal, 2007) visent à comparer les propriétés des mortiers de ciment modifiés avec des émulsions époxydiques et celles modifiées avec des latex acryliques. Ils ont trouvé que pour un rapport (P/C) similaire, les mortiers modifiés par les époxydes ont montré des propriétés mécaniques et de durabilité relativement meilleure que celles des émulsions acryliques.

1.3.3.3.2. Applications des mortiers modifiés par les résines liquides :

D'après Ohama et col. (Ohama, 1995) (Ohama, 1998), les polymères liquides sont moins largement employés comme additifs dans les mortiers de ciment Portland par rapport aux autres additifs tels que les latex, les poudres de polymère redispersables et les polymères solubles dans l'eau. Ces résines sont produites pour fabriquer les bétons et les mortiers polymères sans ciment hydraté.

1.3.3.4. Les mortiers modifiés au latex :

Ce sont des mortiers qui comportent un polymère de type latex plus les mêmes ingrédients que les mortiers classiques (ciment, granulats, eau et autres additifs s'ils sont utilisés). Un intérêt bien particulier sur ce type de mortier sera porté en détail, dans cette thèse.

Comme nous l'avons précisé précédemment, ces mortiers sont préparés en ajoutant aux composants classiques des mortiers (ciment, sable et eau), un polymère sous forme de dispersion aqueuse (latex) (Ngassam, 2013) (Salbin, 1996), souvent utilisé comme adjuvant plastifiant réducteur d'eau (Dhaini ; 2014).

Le rapport polymère latex / ciment varie de 5 à 20% d'extrait sec de polymère rapporté à la masse du ciment dans le mélange (Ohama, 1995) (ACI, 2003) (Zohhadi, 2014).

Les latex de polymère sont d'abord mélangés à l'eau de gâchage, et directement ajoutés au ciment et on mélange ensuite avec les agrégats ; c'est la méthode classique recommandée par Ohama (Ohama, 1995) et la norme ASTM C 1439 (ASTM C1439, 1999), voir tableau 1.4.

La vitesse et le temps de malaxage doivent être bien choisis pour éviter d'emprisonner de l'air inutile. Les bulles d'air qui se forment lorsque le ciment et les granulats sont mélangés avec une solution aqueuse de polymère ne sont pas faciles à enlever, car ils ont tendance à être stabilisés par les polymères ; ce qui a pour conséquence la diminution de la résistance (Ngassam, 2013) (Ukrainczyk, 2013), même si ce phénomène peut être favorable à l'amélioration de la maniabilité et la durabilité des mortiers.

Chapitre 1. Description générale des bétons et mortiers de polymères

Tableau 1.4. Malaxage selon la norme ASTM C 1439 (1^{ère} Méthode).

Opérations	Durée des opérations (s)	État du malaxeur
Introduction de l'eau, le latex et l'agent anti-mousse.		Arrêt
Introduction du ciment		
	30	Vitesse lente
Introduction du sable	30	
	30	Vitesse moyenne
Raclage de la cuve	15	Arrêt
	75	
	60	Vitesse moyenne

Certains chercheurs (Salbin, 1996) (Ukrainczyk, 2013), proposent d'utiliser les agents anti-mousse dans le mélange, dans le cas où ces agents ne sont pas contenues dans le latex. D'autres (Kim, 1997) (Barluenga, 2004) (Li, 2012), proposent d'utiliser une approche alternative pour réduire la formation des bulles d'air dans les mortiers modifiés, c'est de pré mouiller le ciment et le sable avec de l'eau, puis ajouter le latex (cf. le tableau 1.5).

Tableau 1.5. Malaxage en adoptant le pré-mouillage (2^{ème} Méthode).

Opérations	Durée des opérations	État du malaxeur
Introduction de l'eau		Arrêt
Introduction du ciment		
	30s	Vitesse lente
Introduction du sable	30s	
	30s	Vitesse moyenne
Raclage de la cuve	15s	Arrêt
	75s	
	60s	Vitesse moyenne
	120s	Vibration
Introduction de latex	180s	Vitesse lente + vibration

1.3.3.4.1. Description des principaux constituants des mortiers modifiés au latex:

1.3.3.4.1.1. Le ciment :

Les plus utilisés sont les ciments portland (Dhaini, 2014), il s'agit d'une poudre minérale qui a la propriété de durcir lorsqu'elle est en contact avec l'eau (Ngassam, 2013) (Goto, 2006).

a)- Composition et processus de fabrication du ciment Portland:

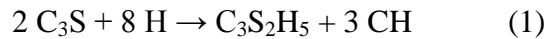
Il est obtenu par broyage du clinker avec environ (3 à 5%) de gypse (sulfate de calcium), qui permet de réguler sa prise (Belkhodja, 2013) (Dhaini, 2014). Le clinker est produit après cuisson à haute température (1450°C) d'un mélange de carbonate de calcium ~ 80%, et 20% d'argile composée de : Silice ~ 15% alumine ~ 3%, Oxyde ferrique ~ 3% (Belkhodja, 2013) (Baueregger, 2014).

b)- Hydratation du ciment :

Les phases du ciment s'hydratent, à différentes vitesses, suivant un processus exothermique pour former un matériau cohésif (Dhaini, 2014).

Hydratation des silicates :

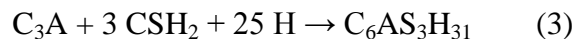
Il se produit au contact des ciments Portland avec l'eau une réaction qui donne lieu au silicate de calcium hydraté (C-S-H) et de l'hydroxyde de calcium (CH) désigné par la portlandite (Ngassam, 2013). Les réactions ayant lieu sont les suivantes (1, 2) :



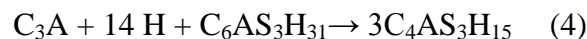
L'hydratation de l'alite C_3S est rapide (Ngassam, 2013). Elle commence directement après les premières heures de gâchage (Ngassam, 2013). C'est donc cette phase qui est responsable de la prise de la pâte de ciment, la cohésion, et l'évolution des propriétés mécaniques du ciment au jeune âge (Ngassam, 2013) (Dhaini, 2014). Par contre, l'hydratation de la bélite C_2S est beaucoup plus lente (Ngassam, 2013). Leur contribution à la résistance mécanique du ciment devient significative à partir d'une semaine (Ngassam, 2013).

Hydratation des aluminates :

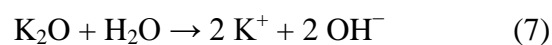
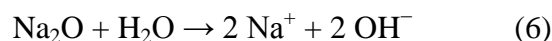
Les C_3A sont très réactives en l'absence de sulfates (Ngassam, 2013). Ils entraînent un raidissement de la pâte de ciment (prise flash) et empêche sa mise en place (Dhaini, 2014). C'est pour cette raison que le gypse (CSH_2) est utilisé dans la fabrication du ciment (Ngassam, 2013). En présence d'eau, les aluminates (C_3A et C_4AF) réagissent avec le gypse pour former du trisulfoaluminate de calcium hydraté, désigné par l'ettringite ($C_6AS_3H_{31}$) (Ngassam, 2013) (Dhaini, 2014). La réaction ayant lieu est la suivante (3).



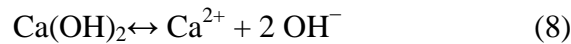
Les aluminates C_3A restants réagissent d'une part avec une partie de l'ettringite pour donner du monosulfoaluminate de calcium (4) et d'autre part avec de l'eau pour donner des aluminates hydratés (5).



Par ailleurs, le ciment contient, en faible quantité (moins de 1%), des alcalins sous forme d'oxydes qui se dissolvent totalement au contact de l'eau et libèrent des ions hydroxydes (6, 7).



Il s'établit aussi dans le milieu un équilibre entre la portlandite et les ions calcium (8) :



c)- Développement durable et impact environnemental des ciments portland :

Le réchauffement climatique de la planète lié aux émissions de gaz à effet de serre telle que le dioxyde de carbone (CO₂) a été observé depuis la moitié du 20^e siècle. La maîtrise de ces émissions est donc devenue un enjeu mondial majeur. Ce problème implique tous les secteurs d'activités et plus particulièrement ceux concernant la gestion de l'énergie, les ressources naturelles, les matières premières et le transport (Bur, 2012).

Dans le domaine du génie civil, la prise en compte des exigences liées au développement durable induit la réduction des impacts environnementaux tout au long du cycle de vie des ouvrages réalisés tout en conservant leur qualité d'usage (fonctionnalité et performance).

L'analyse du cycle de vie des structures en ciment montre que, parmi les différents constituants utilisés, le ciment et particulièrement la production du ciment représente la source principale des impacts environnementaux (Bur, 2012). Elle est non seulement consommatrice de calcaires, d'argiles, de marnes et de combustible ; mais est également à l'origine de la majeure partie des émissions de gaz à effet de serre. La production du clinker nécessite une grande quantité d'énergie (de l'ordre de 4 GJ/t) (Bur, 2012). Aussi, elle est l'une des plus grosses émettrices de dioxyde de carbone ; elle émet dans l'atmosphère de 5 à 10% des émissions mondiales de CO₂ (Atsonios, 2015) (Deventer, 2012). En règle générale, un (01) kilogramme de clinker génère à peu près 0.9 kg de CO₂ (Brien, 2013) (Hasanbeigi, 2012).

La différence entre cette industrie et les autres industries est que la combustion du carburant n'est pas le seul facteur dominant des émissions de CO₂ dégagé (Hasanbeigi, 2012). Plus de la moitié des émissions de CO₂ produites pendant le processus de la fabrication du ciment provient de la calcination des matières premières, tandis que le reste provient de la combustion des carburants pour fournir une température de 1450 °C, pour laquelle la clinkérisation a lieu (Hasanbeigi, 2012) (Hot, 2013). De plus, les carrières, le transport et les sites de production sont autant de sources potentielles de bruit, de vibrations, de poussières et de différents gaz polluants tels que les oxydes d'azote (NO_x) ou de soufre (SO_x) qui peuvent avoir des répercussions sur la santé publique (Henni-Chebra, 2012).

La réduction des émissions de CO₂ dans la production du ciment passe désormais par la diminution de la part liée à la décarbonatation des matières premières, et le moyen le plus efficace à l'heure actuelle, semble être la diminution de la quantité de ciment par l'utilisation des matériaux de substitution (Bur, 2012). Notamment, l'utilisation de sous-produits industriels ajoutés directement au clinker ou en forte charge comme matériaux de substitution dans les mélanges cimentiers. Les produits les plus couramment utilisés sont : les cendres volantes, les fumées de silice et les laitiers de haut-fourneau (Bur, 2012).

1.3.3.4.1.2. Les latex:

Les latex sont un ensemble de particules de polymères sphériques hydrophobes en suspension dans une phase aqueuse (Dhaini, 2014) (Goto, 2006). Ils sont aussi définis comme des suspensions colloïdales de polymères stabilisées dans l'eau (Ngassam, 2013) (Belkhodja, 2013). Les latex sont apparus dans les années 1930 (Dhaini, 2014). La taille moyenne de ses particules varie de 50 à 5000 nm (ACI, 2003) (Sivakumar, 2011).

a)- Le processus de fabrication des latex synthétiques:

La plupart des latex sont fabriqués par un procédé connu sous le nom de la polymérisation en émulsion (Soni, 2014) (Thickett, 2007). Un procédé très réussi du point de vue technique et environnemental, grâce à l'utilisation de l'eau comme solvant et aussi la négligeable quantité des composés organiques volatils (COVs) dégagés lors de leur préparation et de leur application (Amaral, 2004) (Nguyen, 2008) (Erdmenger, 2010) (Pragliola, 2013) (Ojeda, 2013).

Il s'agit de monomères issus de la pétrochimie, fabriqués à partir du pétrole brut (Gélinas, 2013) (Elalaoui, 2012). Toutefois, ils peuvent être produits à partir du charbon, du gaz naturel, du bois ou des substances végétales (Gélinas, 2013) (Elalaoui, 2012). Après la phase de distillation du pétrole, les naphthas sont cassés en molécules légères « monomères » par le vapocraquage sous une température de 850° C et en présence de la vapeur d'eau. Ces monomères sont préalablement dispersés sous forme de gouttelettes dans une phase aqueuse (Benyahia, 2009) (Youssef, 2012). On ajoute à ces gouttelettes un initiateur hydrosoluble ou soluble dans la phase aqueuse (ACI, 2003) (Youssef, 2012) (Benyahia, 2009) et un agent tensio-actif souvent de type non ionique (frais) pour une utilisation avec les ciments Portland (ACI, 2003) (Salbin, 1996). Le rôle de l'agent tensio-actif est la stabilisation de la dispersion des gouttelettes de monomère ainsi que les particules de polymères (Benyahia, 2009), du fait que, sans stabilisation, les particules ont tendance à s'agréger par floculation, sous l'effet du mouvement brownien (Ngassam 2013). Parfois, des tampons de pH y sont ajoutés, ainsi que des agents anti-mousse et des agents de transfert de chaîne pour contrôler les masses molaires, souvent excessives (ACI, 2003) (Salbin, 1996).

b)- Les principaux types des latex utilisés pour modifier les mortiers :

Une grande variété de types de latex a été étudiée pour une utilisation dans les mortiers modifiés (Ngassam, 2013) (Ohama, 1995) (Pierre, 2008) (Salbin, 1996) ; mais les principaux types en usage aujourd'hui sont les suivants : les polymères et les copolymères acryliques (PAE), les copolymères de styrène-acrylique (SA), les copolymères de styrène-butadiène (SBR), les copolymères d'acétate de vinyle (VAC), et les homopolymères d'acétate de vinyle (PVA). Les copolymères d'acétate de vinyle principaux sont ceux de l'éthylène (VAE) et de l'ester vinylique de l'acide versatique (VA/VEOVA), également les copolymères d'Acétate Acrylique sont un peu utilisés.

Récemment, les latex de types caoutchoucs du Styrène Butadiène (SBR) et les polymères acryliques (SA et PAE) sont les principaux types en usage (Benali, 2017). Ces latex représentent respectivement 37% (SBR) et 30% (SA et PAE) du total des latex synthétiques d'origine hydrique fabriqués industriellement (Ojeda, 2013). Ils ont été utilisés depuis longtemps pour modifier les mortiers et apparurent très bons (Benali, 2017).

Dans ce que suit, nous présentons d'abord le procédé de formation du film de polymère, de la co-matrice, puis nous présentons, succinctement, l'influence des latex sur les propriétés mécaniques et de durabilité des matrices cimentières.

c)- Filmification des latex:

Pour des applications telles que les revêtements ou les mortiers, les polymères latex subissent une étape de séchage (Baueregger, 2014). En raison de la perte d'eau par évaporation et ensuite par hydratation du ciment, un film de polymère homogène peut se former à partir

d'une température seuil appelée température minimale de formation de film (TMFF) (Goto, 2006) (Ngassam, 2013) (Kardon, 1997). En dessous de cette température, le polymère ne peut pas former ce film continu (Pierre, 2008) (Belkhodja, 2013) (Kardon, 1997).

Une autre température permet de caractériser les latex proches de la température TMFF est la température de transition vitreuse (T_v en français, T_g en anglais) (Pierre, 2008). Elle est la température à partir de laquelle les chaînes deviennent mobiles (Goto, 2006). Elle correspond à la température de changement du comportement du polymère lorsqu'il passe de l'état vitreux, dur et relativement fragile à un état plus souple « caoutchouc » (Pierre, 2008) (Kardon, 1997). La dureté du polymère modificateur est liée aussi à cette température T_v . En général, plus la valeur de T_v est grande, le polymère est plus dur et la résistance de compression qui en résulte est plus élevée. Par contre, lorsque la valeur de T_v est petite, le système résultant a une faible perméabilité (ACI, 2003).

Quant à ce film, les travaux de recherche récents (Baueregger, 2014), décrivent le mécanisme de sa formation (cf. figure 1.7). Dans un premier temps, la perte d'eau du latex (stage 1) augmente la concentration du polymère dans le mélange, engendrant par la suite la formation d'un empilement de polymère en contact (stage 2). Ce dernier se déforme progressivement (stage 3), cela est produit à des températures supérieures à la température minimale de formation du film (TMF) de sorte que les espaces inter particulaires disparaissent lors de la formation d'une structure hexagonale (Baueregger, 2014). Une coalescence des particules de latex se produit ensuite, lorsque la température ambiante dépasse la température de transition vitreuse du polymère (stage 4) (Baueregger, 2014). Ici, les interfaces entre les particules de latex se décomposent et les chaînes polymères des particules individuelles se diffusent dans l'autre (inter diffusion) en produisant un film polymère cohérent et continu (stage 5).

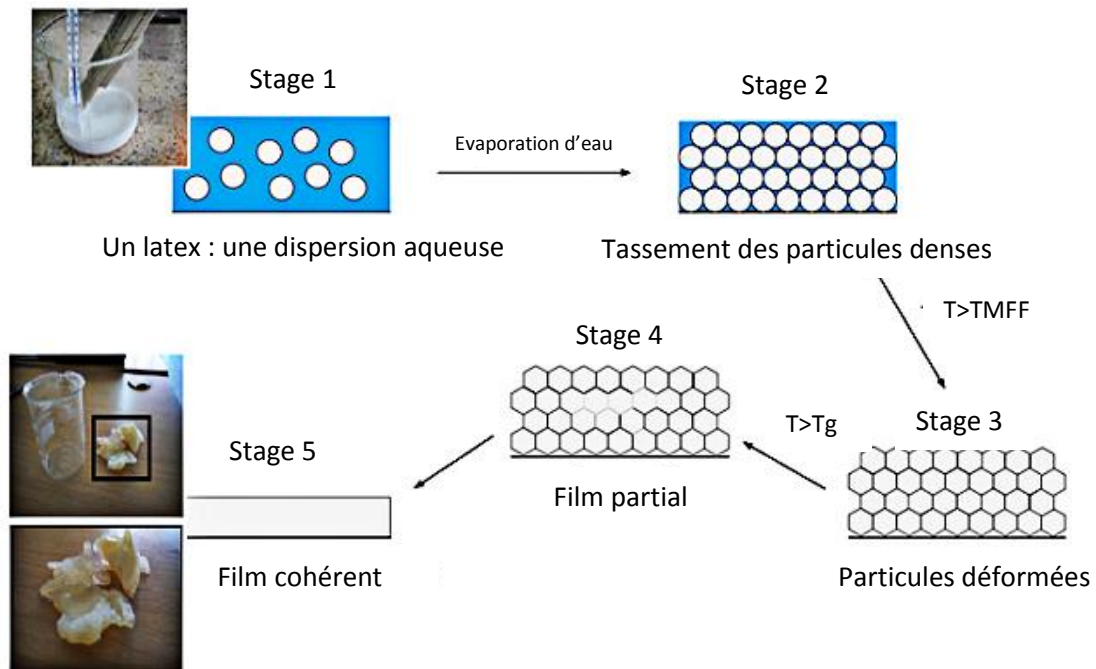


Figure 1.7. Schéma du modèle du mécanisme de la formation de film polymère (Baueregger, 2014).

Les études menées sur la formation du film polymère ont montré qu'il existe également un taux de polymère à ajouter au matériau cimentaire en dessous duquel il n'y a pas formation de

film. L'analyse microscopique (microscopie électronique à balayage) faite par (Afridi, 2003) sur la microstructure des pâtes de ciment modifiées et non modifiées, a montré que ce taux est de 5% de polymère latex par rapport au poids du ciment (cf. figure 1.8).

En outre, les latex ajoutés aux matériaux cimentaires ne forment pas seulement le film polymère, ils peuvent interagir physiquement et éventuellement chimiquement avec la matrice cimentaire pour former ce qu'on appelle la co-matrice qui est une structure en réseau dans laquelle la phase du ciment hydraté et la phase du polymère s'interpénètrent. Le paragraphe qui suit, présente sommairement la formation de cette co-matrice.

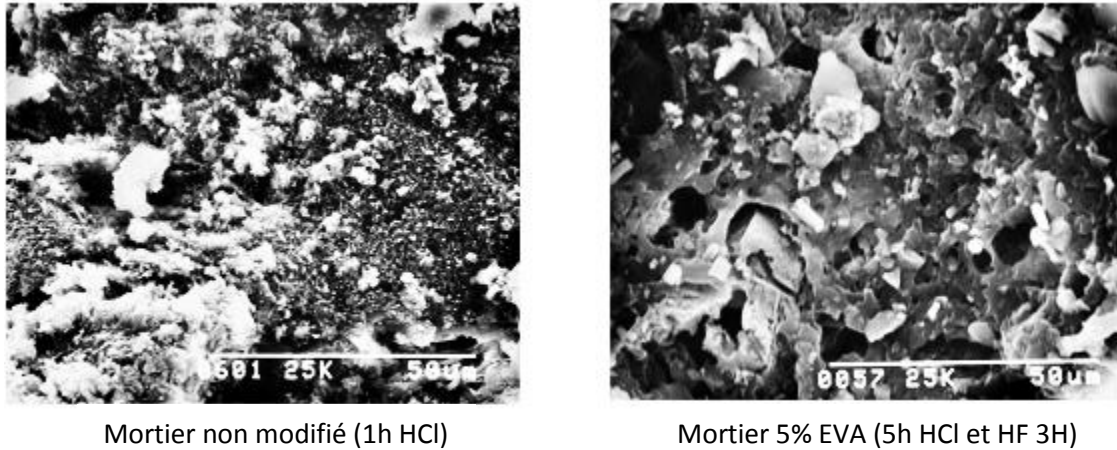


Figure 1.8. Observations par microscopie électronique à balayage des mortiers non modifiés et mortiers modifiés par 5% EVA (Afridi, 2003).

1.3.3.4.2. Mécanisme de formation de la co-matrice :

En raison de la grande variété des latex, des liants minéraux et les agrégats, ainsi que le mécanisme complexe de l'hydratation de ciment, il est difficile d'élaborer une description générale valable pour la formation de la microstructure des mortiers modifiés aux latex (Baueregger, 2014).

Une structure en réseau est obtenue, après la période de durcissement et d'évaporation de l'eau du mélange, où les hydrates de ciment et le polymère s'interpénètrent pour former une co-matrice (Benali, 2017). Cette co-matrice se construit en plusieurs étapes (Ngassam, 2013). Les différentes étapes du modèle proposé par (Ohama, 1995), généralement acceptés et modifiée après par (Gemert, 2005) (Beeldens, 2005), sont présentées par la figure 1.9.

Immédiatement après le mélange, les particules de ciment et les particules de polymère sont dispersées de façon homogène dans la pâte de ciment. Dans un premier temps, l'hydratation du ciment a lieu, ce qui donne une solution alcaline. Dans l'étape 1, une partie des particules de polymère se déposent sur la surface des grains de ciment anhydres et les granulats. Tandis que, l'autre partie peut fondre en un film continu. Cela peut envelopper partiellement ou totalement les grains de ciment, et inhibe par conséquent la prise et limite l'hydratation des grains de ciment.

Dans l'étape qui suit, les produits hydratés du ciment et les floculats du polymère coalescent en un film polymère. Les processus qui ont lieu dans cette étape dépendent des conditions de durcissement. Si la période de durcissement à sec n'est pas appliquée lors de la maturation, la

formation du film polymère est retardée et l'influence sur les propriétés du mélange frais est limitée à ce stade. En revanche, si une période de durcissement à sec est ajoutée après la cure humide, la structure hydratée se développe et la formation du film de polymère a lieu. Au fur et à mesure que l'eau du mélange s'évapore et se consomme par l'hydratation du ciment, les particules de polymères flocculent et forment une couche organique à la surface des particules de ciment non hydraté et adhèrent à la couche de silicate de calcium sur les granulats. Des réactions ont également lieu entre les particules de polymère, de ciment et des granulats.

Au final, Il se forme alors un film continu de polymère où des membranes lient les hydrates de ciment entre eux et forment un réseau monolithique tridimensionnel. Dans ce réseau, la phase polymérique interpénètre dans la phase cimentaire partiellement hydratée. Ainsi, les propriétés de mortiers de ciment ordinaires sont fortement améliorées.

1.3.3.4.1. Interactions ciments – polymères

Lorsqu'un polymère de type latex est ajouté à un mélange cimentaire, des interactions peuvent avoir lieu au cours de l'hydratation du ciment (Ngassam, 2013). Les mécanismes réels de ces interactions ne sont pas complètement compris (Salbin, 1996) (Soufi, 2015). Certaines recherches estiment que seules des interactions physiques existent entre les deux phases avec la formation du film polymère responsable de l'amélioration de certaines propriétés physiques et mécaniques (Soufi, 2013). D'autres, pensent qu'il y a en plus des interactions physiques, des interactions chimiques entre les polymères et les hydrates de ciment responsables du changement de la microstructure des mortiers modifiés (Soufi, 2013) (Ngassam, 2013) (Soufi, 2015).

Dans une étude très récente, Wang et col. (Wang, 2016) ont étudié le mécanisme de modification des polymères latex sur les pâtes de ciment. Les auteurs ont utilisé deux types de latex l'un est à base de Butyl benzène, ce type a été utilisé pour représenter le groupe des polymères sans groupes actifs dans leurs chaînes de polymère. Le deuxième est un latex de type carboxylique de styrène-butadiène qui contient des groupes actifs capables de réagir avec les produits d'hydratation afin de produire une structure de réseau 3D dans les systèmes modifiés. Ils ont pu constater que, concernant le premier latex sans groupe actif, le mécanisme responsable de l'interaction est un mécanisme physique. Le film de latex ayant couvert les surfaces des cristaux d'hydratation et remplit les fissures et les pores du ciment, est en mesure de donner une meilleure performance aux systèmes modifiés. Tandis que, pour l'autre polymère utilisé, ils ont démontré que le mécanisme responsable comprend à la fois des mécanismes physiques et chimiques.

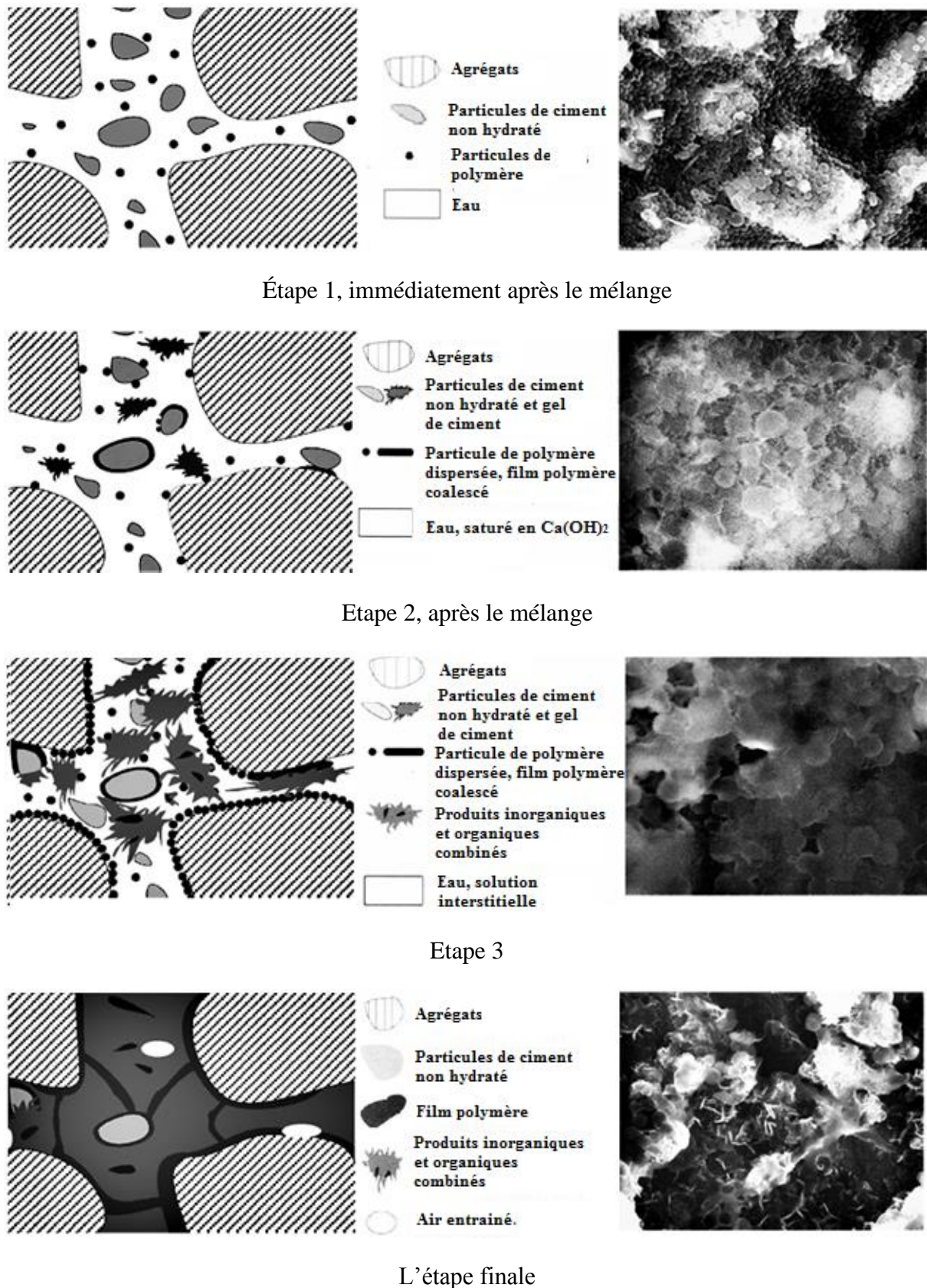


Figure 1.9. Modèle décrivant la microstructure des mortiers modifiés (Gemert, 2005).

Le mécanisme de modification physique était le même que celui sans groupes actifs, cependant, dans le mécanisme chimique, les groupes actifs réagissent avec les produits

d'hydratation, liant ensemble les chaînes de polymère latex. Ces réactions chimiques créent une structure de réseau 3D, qui augmente la résistance à la flexion des systèmes modifiés (cf. figure 1.10.).

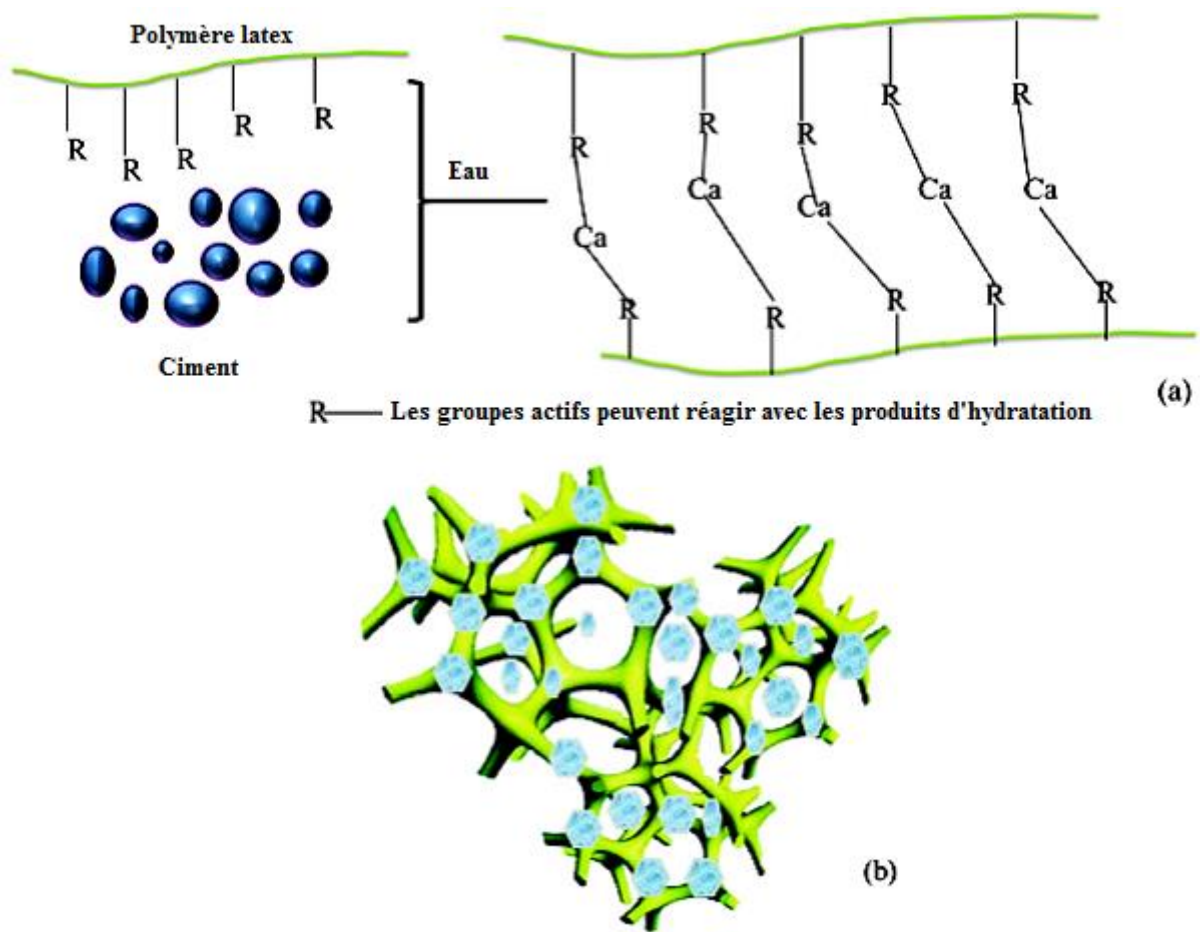


Figure 1.10. Modèle chimique des systèmes modifiés aux latex. (a) Réaction chimique entre le latex et les produits d'hydratation. (b) La structure du réseau 3D qui a été obtenu par des réactions chimiques dans le système du ciment modifié au latex (Wang, 2016).

D'autre part, selon Yang et col. (Yang, 2009), le polymère ajouté absorbe le calcium formé et réduit ainsi la formation de la Portlandite. La figure 1.11., illustre les interactions possibles entre les particules de SBR et les hydrates de ciment.

Le milieu très alcalin du mortier frais ionise la faible quantité d'acide carboxylique (qui est lié chimiquement à la surface des particules de polymère), ce qui tend à interagir avec les ions de calcium produit par l'hydratation de ciment, qui se traduit par la suite par une meilleure stabilité du polymère latex et une forte adhérence aux supports existants (Benali, 2017) (Yang, 2009) (Rossignolo, 2009).

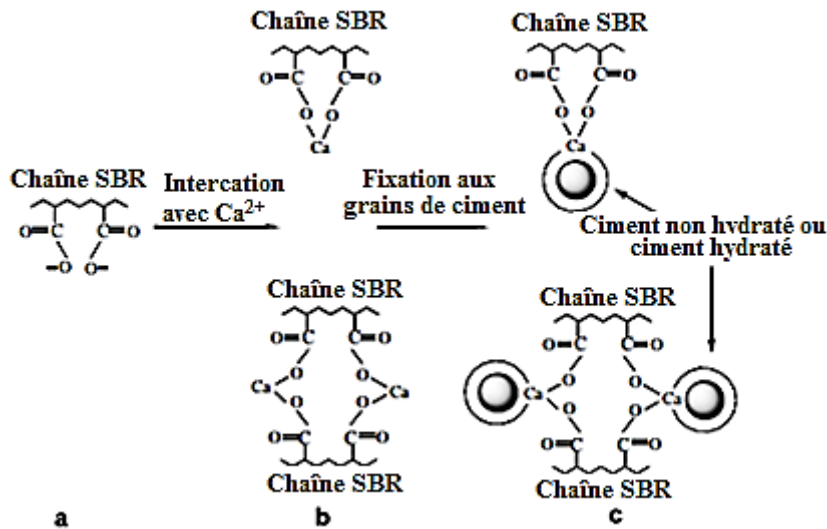


Figure 1.11. Interactions possibles entre les particules de SBR et les grains de ciment ou les hydrates de ciment (Yang, 2009).

Ces résultats sont confirmés également par les travaux de Wang et col. (Wang, 2015) où ils ont étudié le mécanisme d'interaction chimique dans les pâtes de ciment modifiées par le polyacrylate (PA). Ils ont trouvé que les réactions chimiques peuvent être divisées en trois étapes : la première concerne la réaction d'hydratation du ciment. Cette réaction crée la forte alcalinité du mélange. Dans la seconde étape, les groupes ester des chaînes de polyacrylate hydrolysé produisent dans cet environnement très alcalin des groupes carboxylés. En troisième étape; ces groupes carboxylés réagissent avec les produits d'hydratation du ciment les $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pour générer un nouveau produit $\text{Ca}(\text{HCOO})_2$. La réaction chimique entre le latex et le ciment a généré une structure de réseau réticulé, dans lequel Ca^{2+} a servi de point de réticulation et relier ensemble les différentes chaînes de polyacrylate (cf. figure 1.12). Le résultat de cette structure du réseau réticulé est le développement des propriétés du ciment.

Tian et col. (Tian, 2013) ont enquêté sur le processus de formation de la microstructure des systèmes modifiés au latex le PA. Les auteurs ont constaté que les particules de PA réagissent avec les ions de calcium dans les pores de la solution interstitielle et les hydrates de ciment. Ces polymères PA sont combinés et adsorbés sur les particules de ciment et les hydrates formant des liaisons de type C composé de polymère - ciment (cf. figure 1.13.). En conséquence, le polymère PA ne va pas se disperser uniformément dans le mélange frais.

Larbi et col. (Larbi, 1990), ont étudié le mécanisme de ces interactions aussi. Pour ce faire, ils ont utilisé trois types de polymère latex l'un à base de styrène acrylique, l'autre est à base de styrène acrylique avec un agent de couplage, et le dernier est de type chlorure de polyvinylidène. Les résultats montrent que ces polymères réagissent avec les Ca^{2+} , les SO_4^{2-} , et les OH^- qui sont produit par le ciment en cours d'hydratation. Une diminution a été signalée de la concentration des ions Ca^{2+} , contre un contenu élevé de SO_4^{2-} et OH^- dans la solution interstitielle des mortiers modifiés par rapport à celle des mortiers non modifiés. Ce qui montre que les ions Ca^{2+} sont piégés par les polymères, qui diminuent à leur tour la formation de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et l'ettringite.

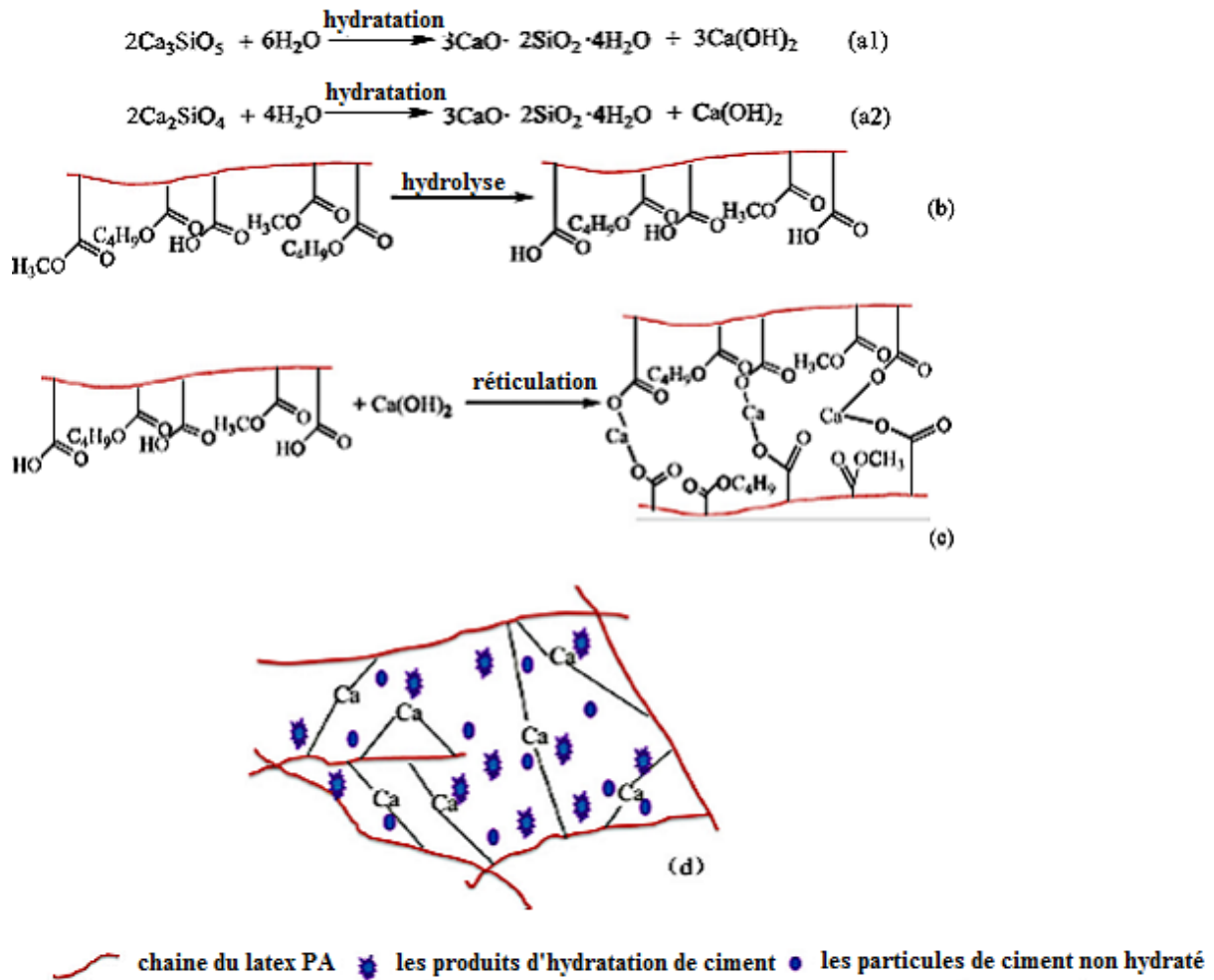


Figure 1.12. (a) les réactions d'hydratation du ciment. (b) l'hydrolyse d'un latex de polyacrylate dans le système modifié. (c) La réaction de réticulation entre le latex et le ciment de polyacrylate. (d) La structure du réseau réticulé qui a été obtenu par des réactions chimiques dans le système modifié par le polyacrylate (Wang, 2015).

Ces résultats sont confirmés par d'autres études, telle que l'étude réalisée par Afridi et col. (Afridi, 1989), où ils ont trouvé que la formation de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dans les mortiers modifiés est réduite probablement en raison de l'absorption du $\text{Ca}(\text{OH})_2$ par le film polymère formé. Cette réduction dépend du rapport P/C, et du type de polymère utilisé. À travers cette étude les poudres de polyvinyle carboxylate acétate de vinyle, le polyéthylène-acétate de vinyle, et les émulsions de polyéthylène-acétate de vinyle, sont avérés être plus efficaces que le styrène-butadiène latex en réduisant la quantité de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dans les mortiers modifiés.

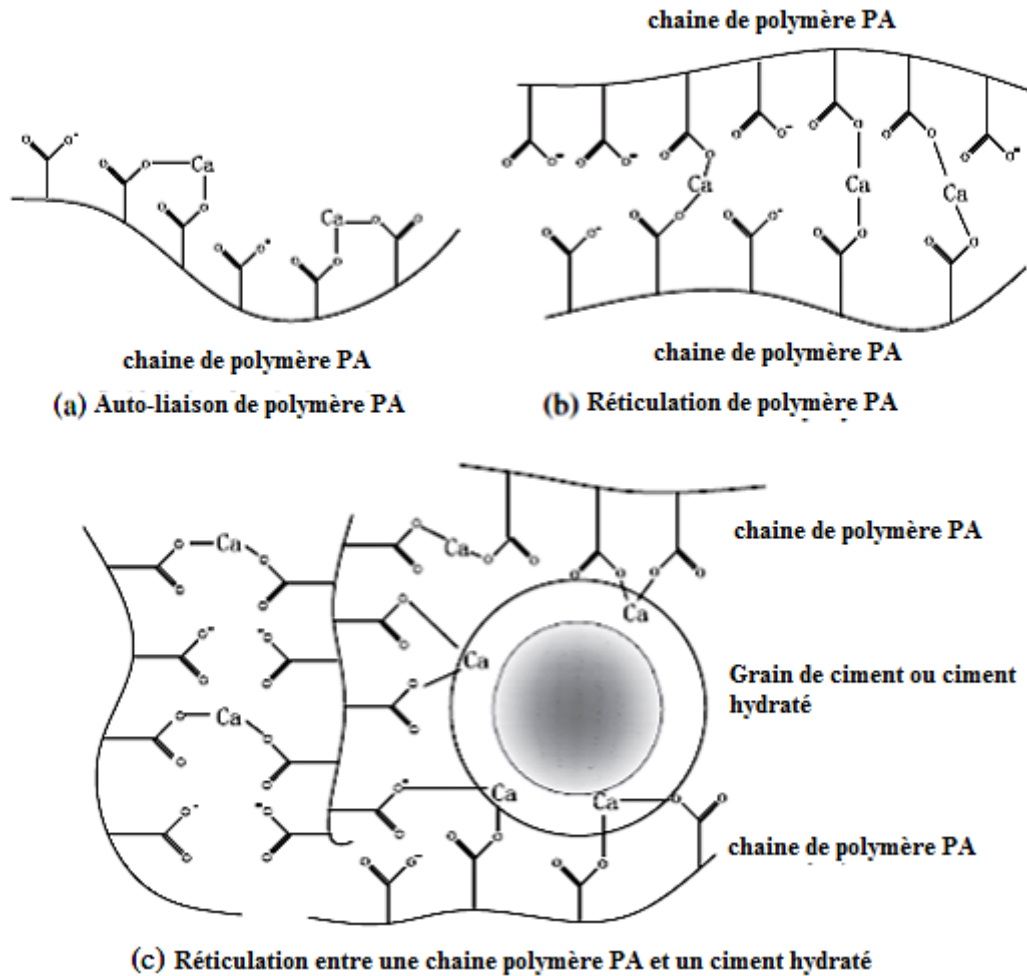


Figure 1.13. Réactions entre Ca^{2+} et de la chaîne de polymère PA (Tian, 2013).

Gomes et col. (Gomes, 2005), ont trouvé que l'addition du copolymère (VA / VeoVa) réduit fortement la formation de la portlandite. Ces auteurs corroborent par leurs interprétations la théorie de l'interaction chimique éventuelle entre le polymère et les produits d'hydratation du ciment Portland. Betioli et col. (Betioli, 2009), dans leur étude ont trouvé également que l'ajout du polymère EVA dans la pâte de ciment réduit l'hydroxyde de calcium dû à l'interaction chimique entre les ions Ca^{2+} et les anions d'acétate.

1.3.3.4.2. Interactions liants – granulat s:

Selon Ngassam (Ngassam, 2013), l'interface liant-granulat est la zone la plus fragile des mortiers, du fait qu'elle contient une porosité importante et une grande quantité de cristaux de portlandite orientée.

Plusieurs chercheurs (Ohama, 1995) (Yang, 2009) (Sakai, 1995), montrent que la réaction entre les ions Ca^{2+} et les groupes carboxyliques dans les mortiers modifiés, réduit fortement la formation de la portlandite et peut entraîner des liaisons chimiques du polymère avec les SiO_2 issus de la surface des granulats. Cela tend à diminuer la porosité qui existe dans l'interface liant- granulat et ponte les fissures, ce qui renforce la résistance dans cette zone dite fragile (cf. figures 1.14. et 1.15.).

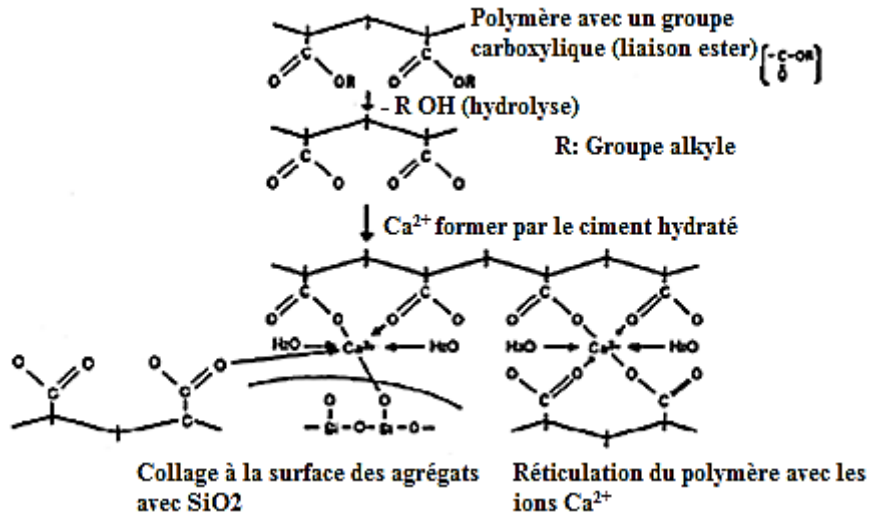


Figure 1.14. Illustration de la réaction entre un polymère contenant un groupe carboxylate et un granulat (Ohama, 1995).

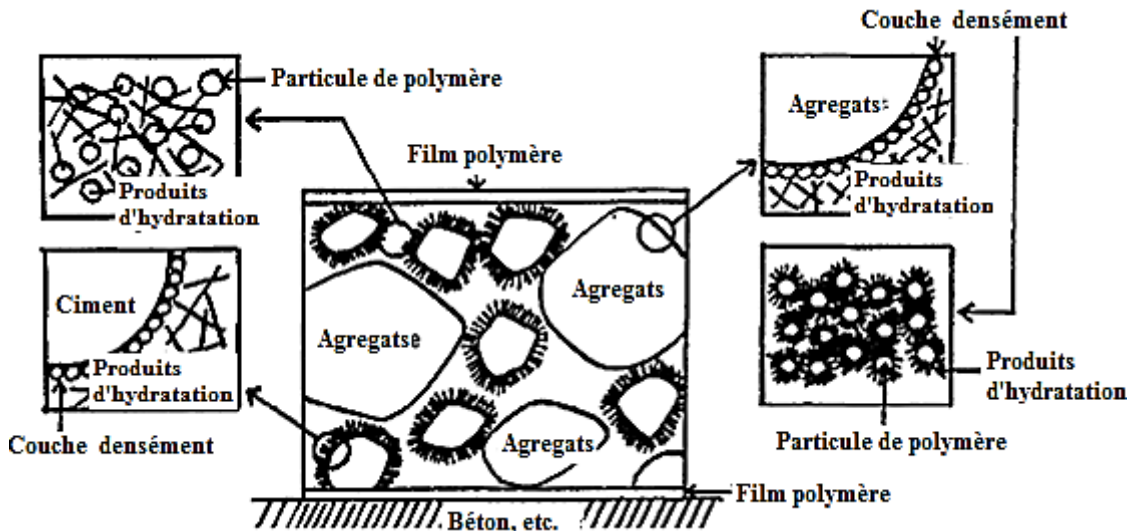


Figure 1.15. Modèle de mécanisme des mortiers modifiés (Sakai, 1995).

1.4. Conclusions :

Les travaux publiés sur les mortiers et les bétons polymères montrent qu'il existe trois voies principales pour sa production. Dans ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art concernant ces trois concepts généraux à savoir;

- **Béton et mortier imprégné par polymère (BIP/BIM)** : Il est le système le moins utilisé, obtenu en imprégnant des éléments bétons ou mortiers de ciment portland durci préfabriqués par un monomère à faible viscosité qui est ensuite polymérisé in situ sous l'action d'agents physiques (rayons ultraviolets ou chaleur) ou chimiques (amorce par catalyseurs),
- **Bétons et mortiers de polymère (BPMP)** : Dans ces systèmes les polymères sont utilisés pour remplacer le ciment hydraté en tant que liant des agrégats,
- **Béton et mortier modifié par polymère (BMP/MMP)** : Il est habituellement le système le plus utilisé, il est défini comme un composite où l'on ajoute un polymère souvent du

Chapitre 1. Description générale des bétons et mortiers de polymères

genre latex, qui est un ensemble de particules de polymères sphériques hydrophobes en suspension dans une phase aqueuse, à ajouter au mélange du béton ou mortier hydraulique à l'état frais (avant la prise). Le résultat de cette combinaison donne naissance à différentes interactions entre les hydrates de ciment et le film polymère formant par la suite la co-matrice.

Chapitre 2. Propriétés des mortiers modifiés au latex

2.1. Introduction :

Les mortiers modifiés aux latex sont utilisés dans les projets de construction, notamment en tant que mortiers de réparation et de protection. Une meilleure connaissance de leurs comportements à l'état frais, à l'état durci ainsi que leur durabilité, ont permis le développement de ces systèmes. Dans ce chapitre, nous décrivons l'ensemble de ces propriétés.

2.2. Propriétés des mortiers modifiés :

2.2.1. Les propriétés à l'état frais :

En règle générale, l'incorporation des latex dans les mortiers entraîne une modification dans leurs propriétés rhéologiques à l'état frais (Ngassam, 2013).

2.2.1.1. La maniabilité :

L'impact principal lié à l'incorporation des latex dans les matériaux cimentaires est la nette amélioration de leur maniabilité (Dhaini, 2014) (Ohama, 1995) (Goto, 2006) (Ukrainczyk, 2013) (cf. figure 2.1.). Cela est attribué à plusieurs phénomènes tels que : l'effet de roulement à billes dû aux particules de polymère, l'air entraîné et l'effet de dispersion de l'agent tension-actif (Ngassam, 2013) (Ohama, 1995) (Benali, 2017) (Barluenga, 2004) (Ukrainczyk, 2013) (Knapen, 2007).

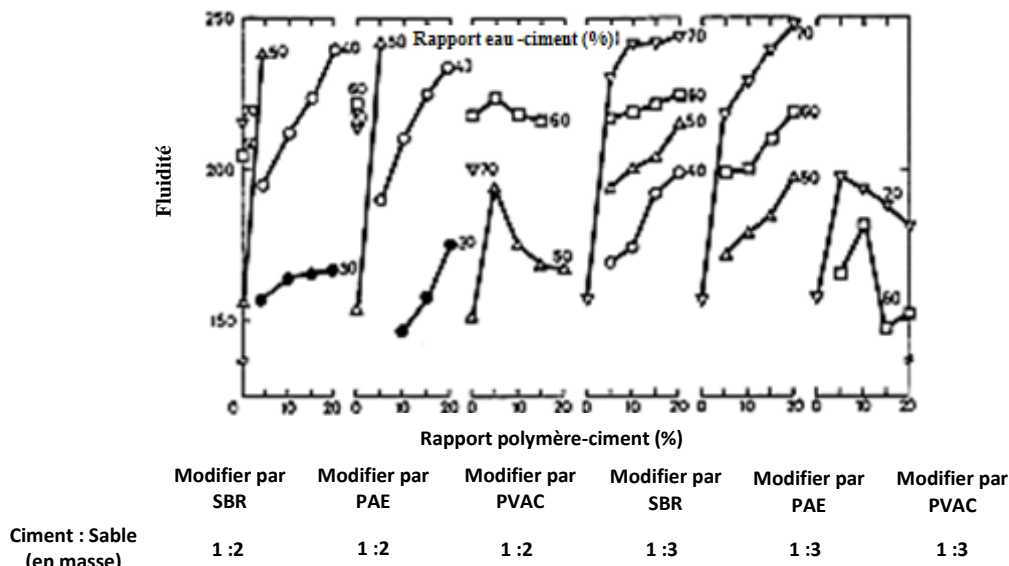


Figure 2.1. Fluidité des mortiers modifiés en fonction du rapport P/C (Ohama, 1995).

Cette maniabilité améliorée a plusieurs impacts : un impact direct sur le rapport E/C qui sera plus faible pour une même consistance, ce qui a pour conséquence la réduction de la porosité des mortiers et in fine un impact sur leur comportement mécanique où les résistances sont augmentées (Dhaini, 2014) (Goto, 2006) (Knapen, 2007) (Ukrainczyk, 2013).

En effet, l'étude menée par Wang et col. (Wang, 2010) sur l'influence du latex (SAE) le styrène-acrylique ester ajouté aux mortiers de ciment Portland, a montré que la réduction de la quantité d'eau de gâchage utilisée pour produire des mortiers modifiés à consistance fixe (170 ± 5) mm, tend à augmenter linéairement avec l'augmentation du rapport P/C, pour atteindre environ 40% lorsque P/C est de 20%, (cf. figure 2.2.).

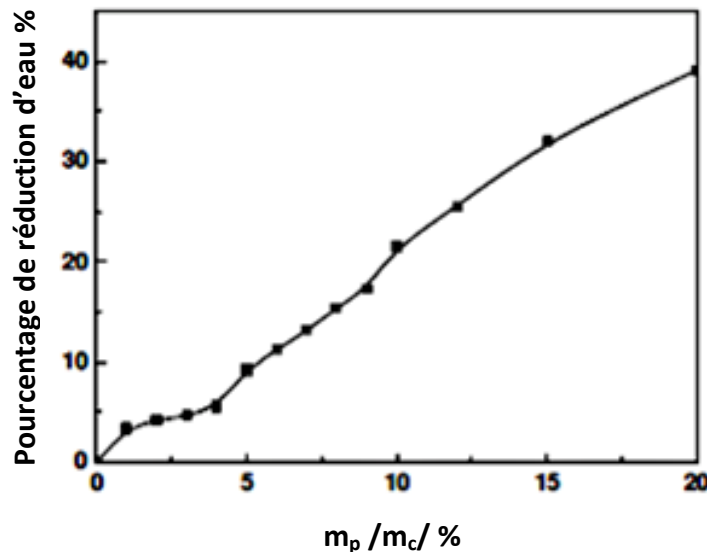


Figure 2.2. Pourcentages de réduction de l'eau de gâchage pour produire des mortiers modifiés par SAE à consistance de (170 ± 5) mm (Wang, 2010).

Dans leur étude Barluenga et col. (Barluenga, 2004), ont traité également l'influence du rapport E/C et le pourcentage de polymère sur la rhéologie des mortiers modifiés par le latex SBR. Pour ce faire, ils ont utilisé l'essai de Vicat pour obtenir une consistance normale et l'essai de la table à secousses pour obtenir des diamètres d'étalement fixés à : 180, 200 et 220 mm. À travers cette étude, les auteurs ont constaté qu'il est nécessaire de réduire le rapport E/C pour obtenir une consistance normale de tous les mortiers et aussi pour ajuster la même fluidité (cf. figures 2.3). Les mêmes résultats ont été trouvés également dans l'étude menée par Aggarwal et col. (Aggarwal, 2007).

2.2.1.2. L'air entraîné :

Généralement, les mortiers modifiés au latex présentent un volume d'air entraîné élevé en comparaison aux mortiers conventionnels (Ohama, 1995) (Soufi, 2013) (Ukrainczyk, 2013). Selon plusieurs chercheurs (Pierre, 2008) (Ngassam, 2013), la proportion volumique de cet air entraîné se situe entre 5 et 20 %. Ceci est dû principalement à l'effet des surfactants utilisés pour la stabilisation des latex (Salbin, 1996) (Pierre, 2008) (ACI, 2003) (Ukrainczyk, 2013).

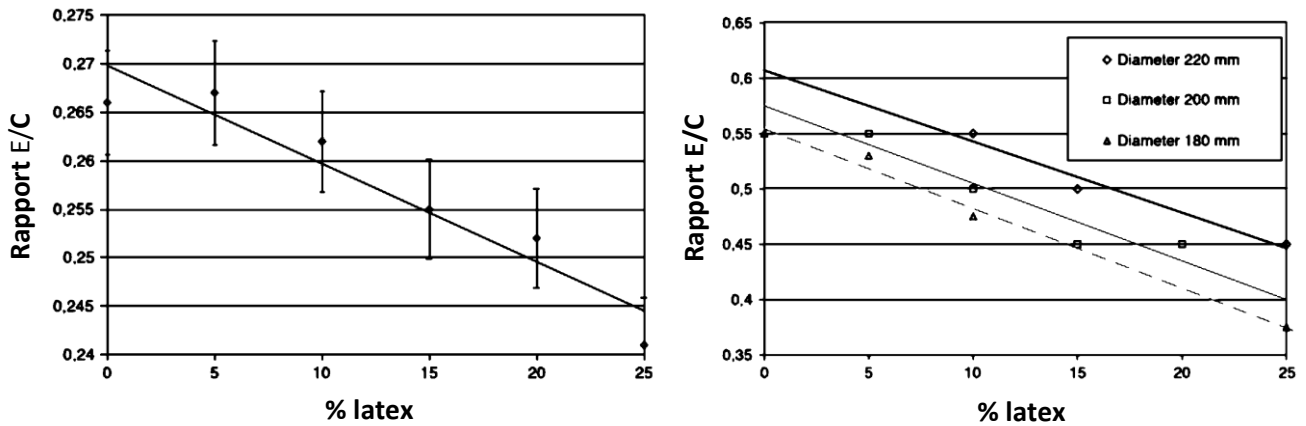


Figure 2.3. Rapport E/C nécessaire pour : (a) obtenir une consistance normale Vicat ; (b) pour fixer la fluidité des mortiers modifiés par SBR (Barluenga, 2004).

Dans leur travail Wang et col. (Wang, 2010), ont examiné l'effet de l'ajout des SAE sur l'air entraîné dans les mortiers. Les résultats obtenus ont confirmé que l'incorporation de ces latex a un effet d'entraînement d'air. Ils ont trouvé que les mortiers de contrôle présentent une teneur en air égal à 4,5% ; en revanche, l'addition de 1% seulement de SAE augmente le taux de l'air entraîné à 7%. En outre, lorsque le rapport P / C augmente de 1% à 15%, la teneur en air augmente progressivement, passant de 7% à environ 12%. Tandis que, lorsque le rapport P/ C passe de 15% à 20%, l'effet de l'augmentation de l'air n'est pas notable (cf. figure 2.4.).

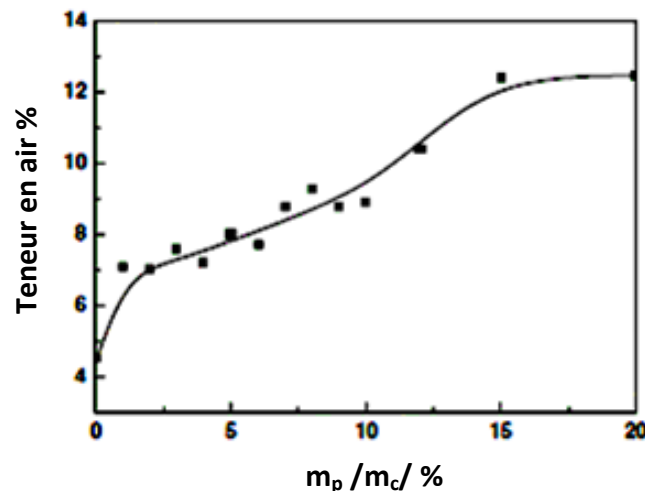


Figure 2.4. Teneur en air des mortiers modifiés par le SAE (Wang, 2010).

2.2.1.3. Rétention d'eau :

Tout comme l'air entraîné, les mortiers modifiés au latex ont une rétention d'eau nettement améliorée en comparaison aux mortiers non modifiés (Salbin, 1996) (Ohama, 1995). C'est le résultat des propriétés hydrophiles des particules colloïdales et aussi de la formation du film polymère qui empêche le départ d'eau (Ohama, 1995) (Salbin, 1996).

Ohama (Ohama, 1995) a constaté que les mortiers modifiés par SBR, NBR, PAE et PVAC, présentent une rétention d'eau améliorée en comparaison aux mortiers conventionnels. Cette amélioration est fonction du rapport P/C. La rétention donc augmente avec l'augmentation du rapport P/C (cf. figure 2.5).

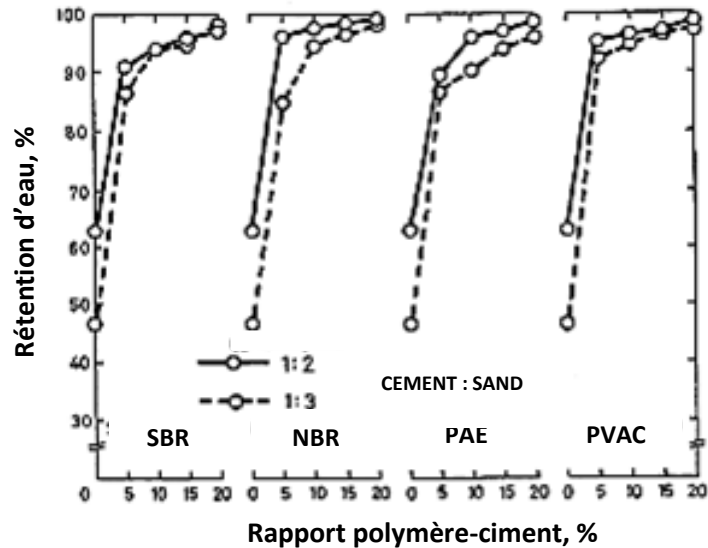


Figure 2.5. Rétention d'eau des différents mortiers modifiés (Ohama, 1995).

L'étude menée par Wang et col. (Wang, 2010), sur l'effet du SAE ajouté aux mortiers de ciment Portland, a trouvé que la rétention d'eau augmente progressivement de 85% à plus de 98% avec des rapports P/C passant de 0 à 10%. Au-delà, le rapport P/C n'a pas d'effet significatif sur le taux de rétention d'eau qui se maintient à environ 99% (cf. figure 2.6.).

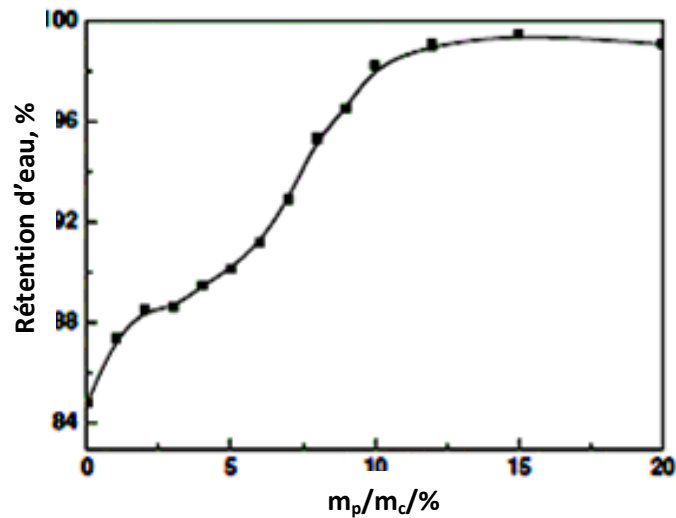


Figure 2.6. Relation entre le taux de rétention d'eau et le rapport P/C des mortiers modifiés au SAE (Wang, 2010).

2.2.1.4. Temps de prise :

En général, l'incorporation du polymère latex dans les mortiers entraîne des temps de prise plus longs (Ohama, 1995) (Salbin, 1996).

Ohama (Ohama, 1995), dans ses travaux a observé des retards dans la prise plus ou moins longs en fonction du type de polymère utilisé et du rapport P/C (cf. figure 2.7).

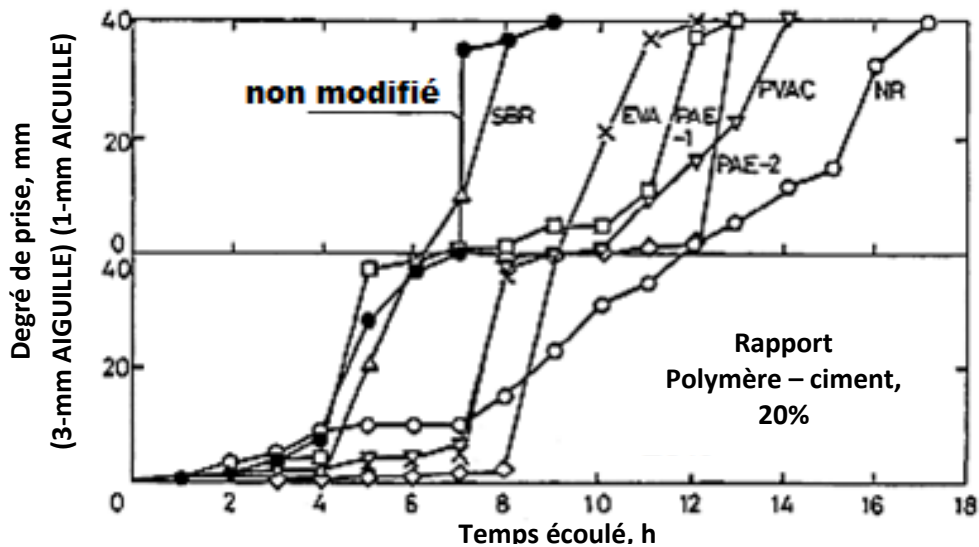


Figure 2.7. Durcissement des mortiers modifiés par différents types de latex (Ohama, 1995).

Dans leur étude Marceau et col. (Marceau, 2012) ont examiné également l'effet de l'ÉVA, SA et SBR sur le temps de prise des mortiers. Ils ont trouvé que l'augmentation du rapport P/C induit l'augmentation du temps de prise des mortiers, quel que soit le type de polymère latex ajouté (cf. figure 2.8).

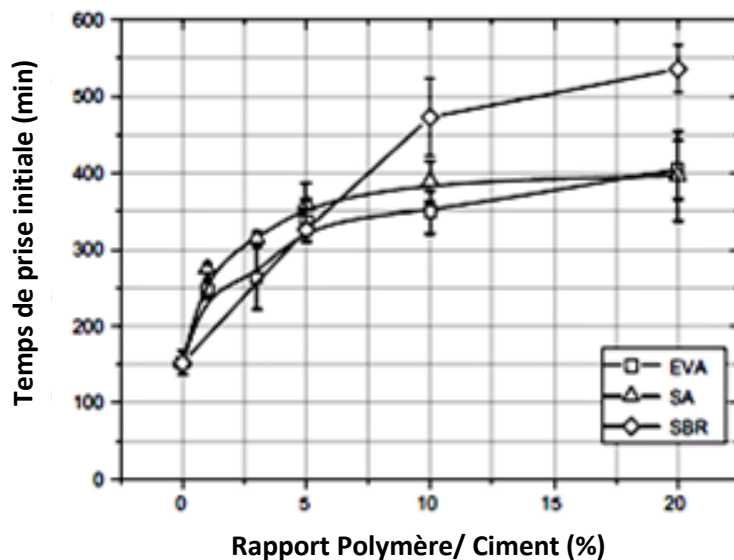


Figure 16. Temps de prise en fonction du rapport P/C (Marceau, 2012).

Cela est attribué aux particules de polymères qui emballent les particules de ciment non hydratées, ce qui ralentit la diffusion de l'eau vers les particules de ciment (Ngassam, 2013) (Marceau, 2012). Aussi, les surfactants utilisés pour stabiliser le latex ont de fortes interactions avec les molécules d'eau et les rendent donc moins disponibles pour l'hydratation du ciment (inhibe l'hydratation) (Ohama, 1995) (Salbin, 1996) (Ngassam, 2013).

Ngassam (Ngassam, 2013), a trouvé que le temps de prise des mortiers modifiés par le SA et l'ÉVA augmente jusqu'à une valeur maximale correspondant à des teneurs en polymères comprises entre 5 et 10 %, puis il diminue (cf. figure 2.9). Ces auteurs justifient ces résultats par les mécanismes de durcissement du matériau. Dans les mortiers avec de faibles

pourcentages en polymère, les particules de polymères viennent s'adsorber à la surface des grains de ciment. Le polymère ralentit donc la diffusion de l'eau vers les grains de ciment anhydres, et entraîne le ralentissement de la prise.

Tandis que pour les mortiers avec de forts pourcentages de polymère, l'eau et le polymère interagissent toujours avec le ciment comme dans le premier cas. Le rapport E/C est plus faible, il y a donc moins d'eau disponible pour l'hydratation du ciment. Cependant, cette faible teneur en eau favorise la formation des films de polymères et la création d'un réseau entremêlé de polymères et d'hydrates de ciment. Le début de prise mesuré s'assimile dans ce cas au début de la formation du film polymère.

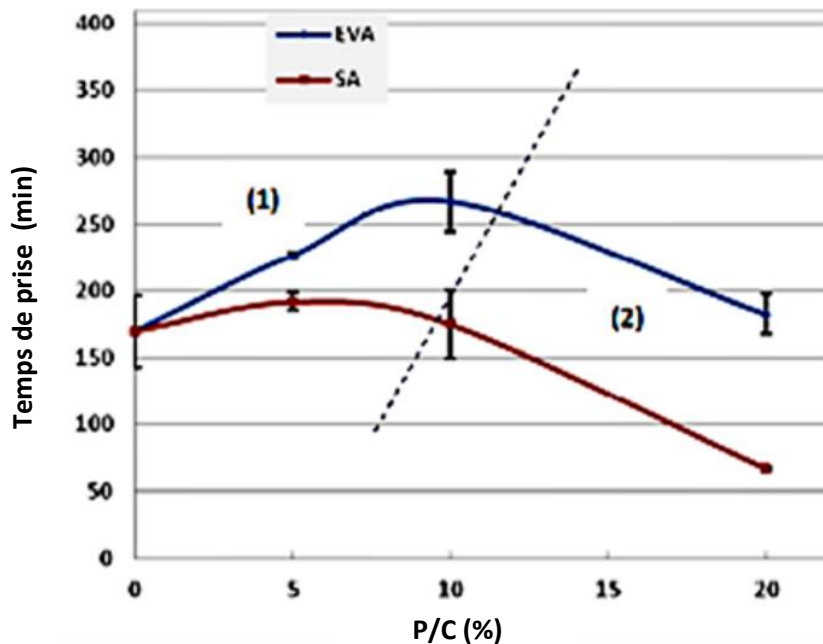


Figure 17. Temps de début de prise des mortiers formulés au laboratoire et des produits commerciaux (Ngassam, 2013).

2.2.2. Propriétés à l'état durci :

2.2.2.1. Propriétés mécaniques :

D'après plusieurs études, l'ajout des polymères latex dans les mortiers peut entraîner une augmentation de leur résistance à la flexion (Ohama, 1995) (Ngassam, 2013) (Metalssi, 2006) ; mais pas en compression (Ohama 1995). En revanche, d'autres études ont trouvé que ces latex entraînent une réduction des deux propriétés en mêmes temps, en fonction de la nature, de la composition des matériaux utilisés (polymère, ciments, granulats), et aussi de la méthode de cure appliquée (Ohama, 1995) (Ngassam, 2013) (Metalssi, 2006) (Parghi, 2016).

Il est connu que l'addition des latex diminue le module d'élasticité dynamique, augmente la déformation à la rupture des mortiers, la capacité d'amortissement et la ténacité aux chocs. En effet, l'étude menée par Wong et col. (Wong, 2003), montre que lorsqu'on ajoute au ciment un polymère latex de type ester styrène acrylique (SAE) avec des taux croissants, le module d'élasticité dynamique et la vitesse de propagation diminue. Toutefois, leur capacité spécifique d'amortissement, leur résistance aux chocs, et leur abrasivité augmentent (cf. figure 2.10.). Ce qui rend ces matériaux fortement recommandés pour une utilisation dans la construction des structures ou des éléments qui doivent résister aux charges dynamiques.

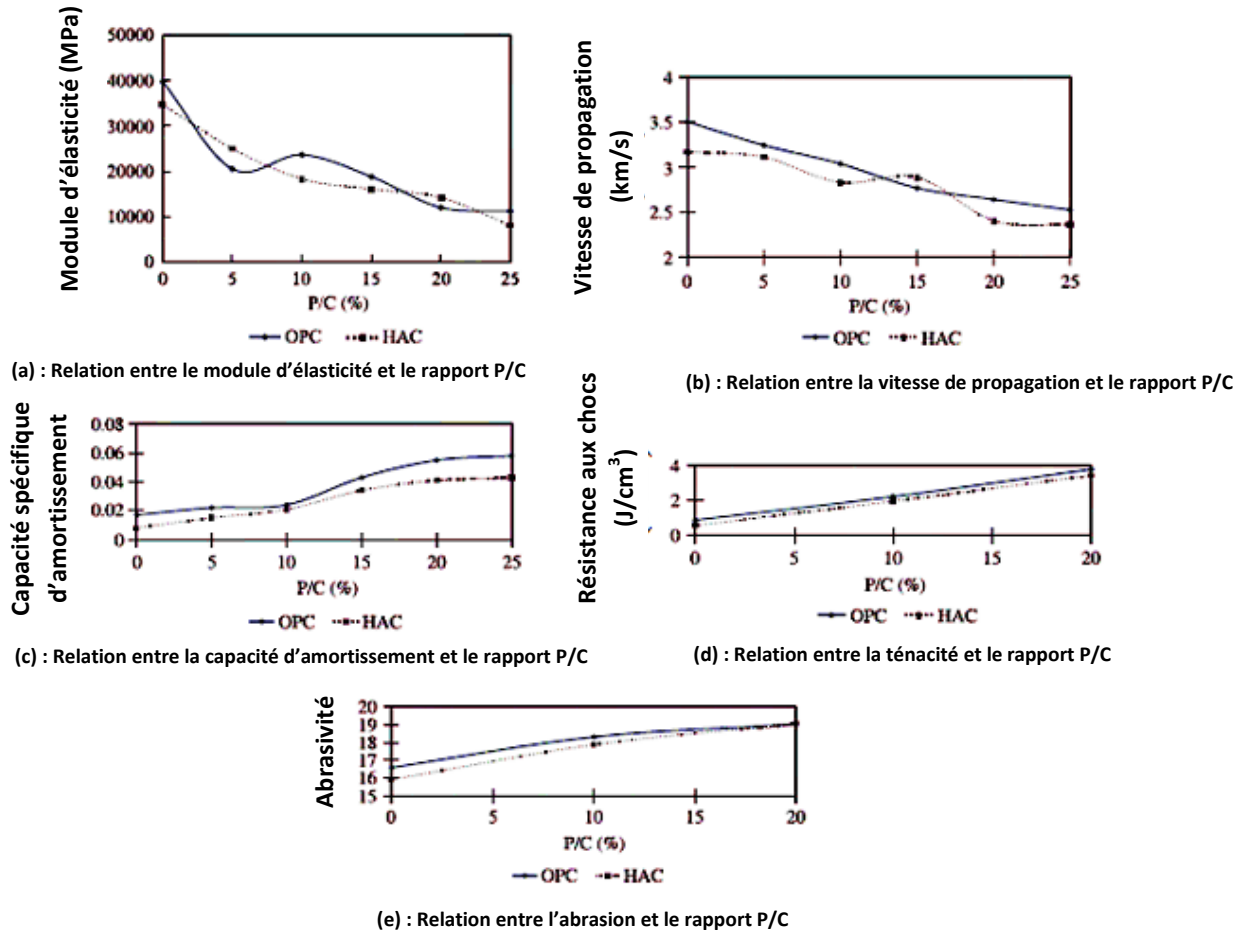


Figure 18. Propriétés dynamiques, ténacité aux chocs et abrasivité des pâtes modifiés aux latex (Wong, 2003).

L'étude menée par Ma et col. (Ma, 2013), a montré également que l'addition des latex de type PA (polyacrylate) et PU / PA (polyuréthane modifié par le PA) dans les mortiers fabriqués avec un rapport ($E/C=0,5$), engendre une diminution du module d'élasticité pour différents âges (cf. figure 2.11).

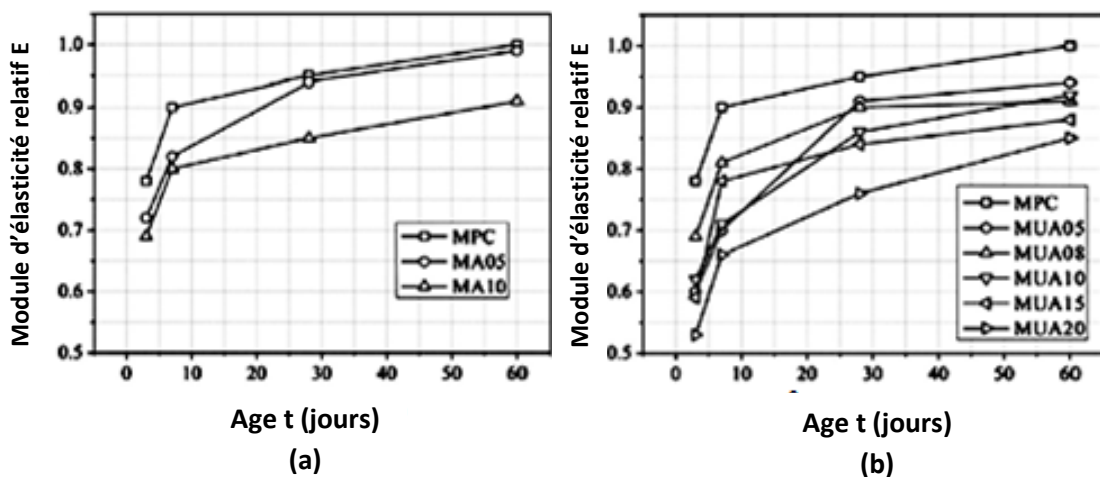


Figure 2.11. Influence des polymères sur l'évolution du module d'élasticité: (a) mortiers modifiés aux PA; (b) mortiers modifiés aux PUPA (Ma, 2013).

Chapitre 2. Propriétés des mortiers modifiés au latex

Les travaux de Barluenga et col. (Barluenga, 2004) et Ukrainczyk et col. (Ukrainczyk, 2013) confirment ces résultats aussi.

Aussi, le rapport de la résistance à la compression sur la résistance à la flexion (R_c/R_f) des mortiers préparés à base de ciment Portland, est un facteur très important pour juger de leur ténacité (Wang, 2005) (Wang, 2011a) (Wang, 2010) (Wang, 2011b) (Ma, 2013) (Parghi, 2016). Plus ce rapport est petit plus la ténacité est meilleure (Wang, 2010) (Wang, 2011a) (Wang, 2011b). En outre, pour de meilleures performances, ce rapport doit être inférieur à 3 (Wang, 2011b).

En effet, dans l'étude menée par Wang et col. (Wang, 2005), les auteurs ont constaté que le rapport (R_c/R_f) diminue fortement avec l'augmentation de la teneur en polymère SBR jusqu'à P/C égal à 8 à 10%. Au-delà, la diminution n'est pas significative. Cela suggère que la ténacité des mortiers modifiés peut être améliorée de façon marquée pour des rapports P/C inférieurs à 10%. Toutefois, lorsque le rapport P/C est supérieur à 10%, l'effet sur la ténacité est faible. Les résultats indiquent aussi que le traitement mixte est préférable pour l'amélioration de ce paramètre (cf. figure 2.12).

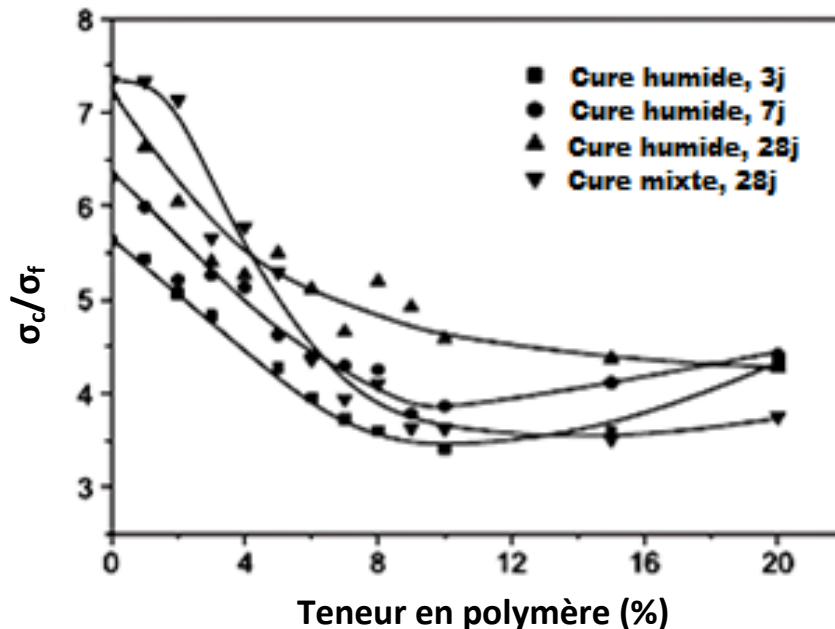


Figure 192. Ténacité des mortiers modifiés par SBR (Wang, 2005).

Parghi et col. (Parghi, 2016), ont observé également que la ténacité décroît fortement avec l'augmentation de la teneur en latex PAE de 0 à 15%. Cependant, pour des taux plus élevés, l'effet n'est plus significatif. De plus, les résultats ont montré que la cure combinée sèche et humide est la plus appropriée pour le développement de la ténacité des mortiers (cf. figure 2.13).

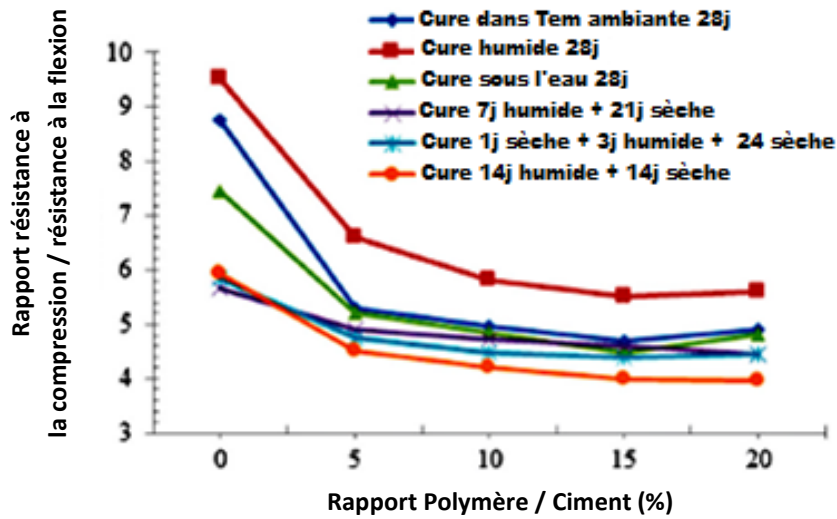


Figure 2.13. Ténacité des mortiers modifiés au PAE (Parghi, 2016).

Wang et col. (Wang, 2010), dans leur étude ont trouvé également que la valeur du rapport (R_c/R_f) des mortiers modifiés par le SAE, diminue significativement avec l'augmentation du rapport P/C durant tous les âges examinés (3, 7 et 28 jours) (cf. figure 2.14). Cela signifie que l'addition des SAE améliore la ténacité des mortiers.

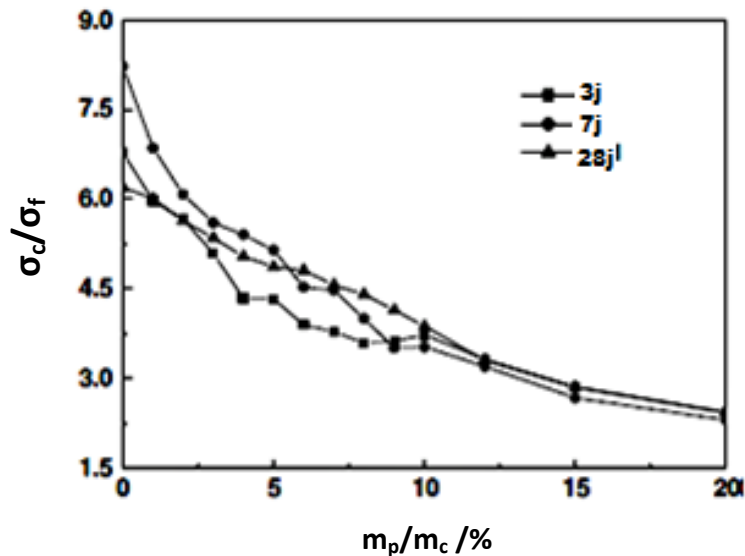


Figure 20. Ténacité des mortiers modifiés par le SAE (Wang, 2010).

Dans une autre étude Wang et col. (Wang, 2011b), ont montré que la ténacité des mortiers modifiés par (VA / VeoVa) en poudre pendant 3 jours et 28 jours diminue fortement avec l'augmentation de P/C, ce qui indique que la ténacité des mortiers est améliorée de manière significative. De plus, lorsque le rapport P/C est supérieur à 5%, la ténacité pour tous les mortiers modifiés est inférieure à 3 (cf. figure 2.15.).

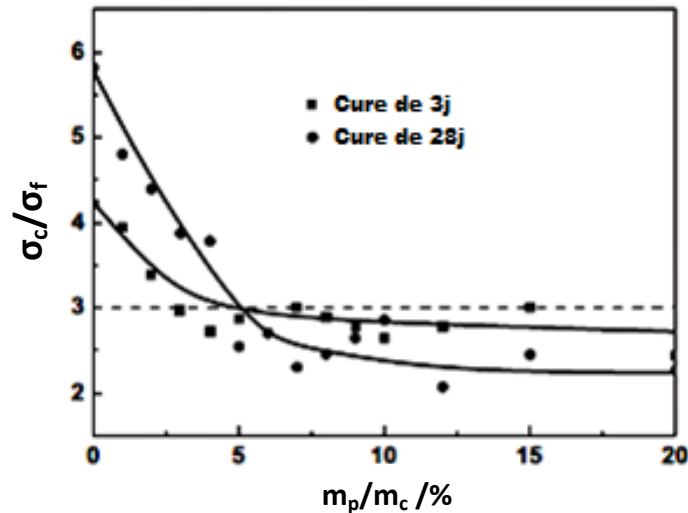


Figure 2.15. Ténacité des mortiers modifiés par VA / VeoVa (Wang, 2011b).

Les mêmes résultats sont trouvés dans l'étude menée par Ma et col. (Ma, 2013) (cf. figure 2.16). Sachant que ces auteurs ont calculé l'inverse de la ténacité : (R_f/R_c) .

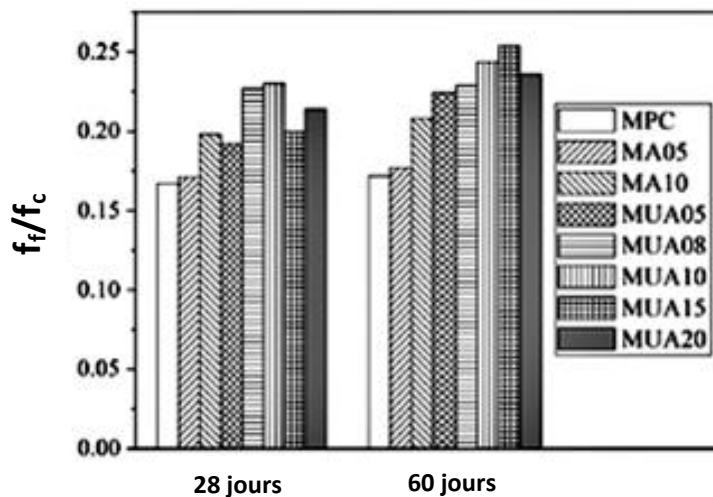


Figure 2.16. Ténacité des mortiers modifiés par PA et le (PU / PA) (Ma, 2013).

2.2.2.1.1. Influence de la nature des matériaux sur les résistances à la compression et à la flexion:

- La nature des polymères latex :

La nature des polymères latex dépend principalement du rapport du monomère utilisé dans la fabrication des copolymères, et aussi du type et de la quantité des agents plastifiants (Ohama, 1995). Aussi, les propriétés du latex telles que la stabilité mécanique et chimique ainsi que la coalescence lors du séchage, dépendent aussi du type et de la quantité des agents tensio-actifs, des anti-mousses et de la taille des particules de polymère dispersées (Ohama, 1995).

Ohama (Ohama, 1995) a étudié l'effet du rapport du monomère dans les copolymères d'ÉVA, SBR, et le polystyrène-acrylate de butyle, (SAE) sur la résistance des mortiers modifiés. Il a constaté que le rapport des monomères affecte la résistance des mortiers de la même manière que le rapport P/C. Les résistances maximales des mortiers modifiés par l'ÉVA et le

Chapitre 2. Propriétés des mortiers modifiés au latex

polystyrène-acrylate de butyle, sont obtenues respectivement, avec une teneur en éthylène égal à 13% et une teneur en styrène égal à 55%. En revanche, pour les mortiers modifiés par le SBR, la résistance augmente en augmentant la teneur en styrène (cf. figure 2.17).

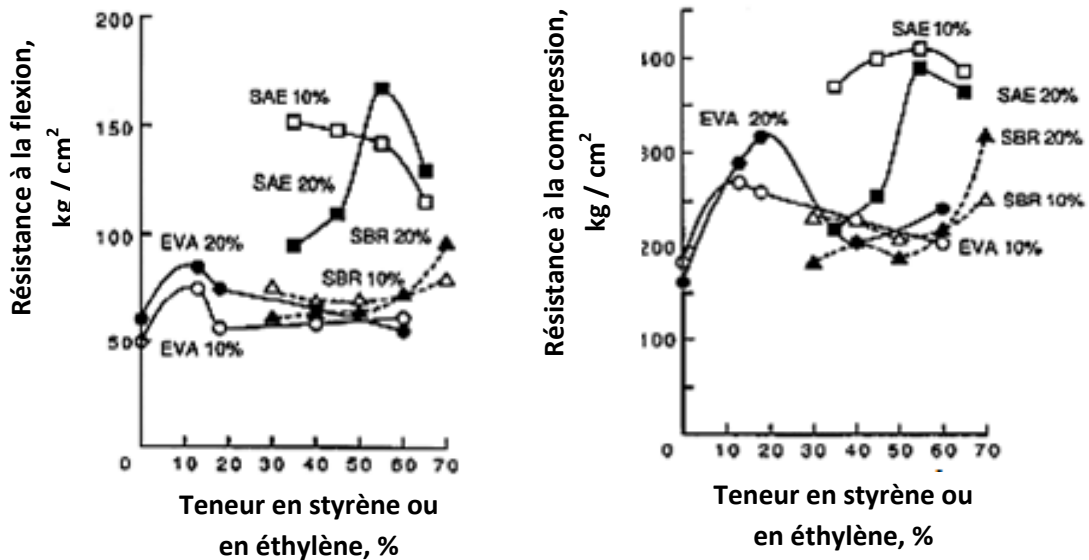


Figure 2.17. Influence du rapport des monomères sur la résistance en flexion et en compression des mortiers modifiés par de l'EVA, le SBR et de SAE (Ohama, 1995).

L'effet des plastifiants (à savoir le dibutylphtalate) sur la résistance des mortiers modifiés par le latex PVAC est représenté sur la figure 2.18. Les résultats montrent que les résistances dépendent de la nature de l'acétate de polyvinyle. Avec l'augmentation de la teneur en plastifiant, la résistance diminue.

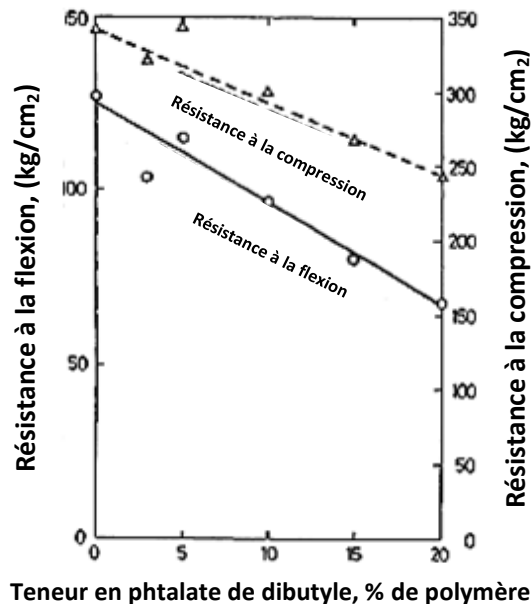


Figure 2.18. Effet du plastifiant contenu dans le latex PVAC sur la résistance à la compression et à la flexion des mortiers modifiés (Ohama, 1995).

Chapitre 2. Propriétés des mortiers modifiés au latex

Dans ses travaux (Ohama, 1995) a montré que la stabilisation mécanique et chimique du latex peut être améliorée par l'augmentation de teneur des agents tensio-actifs choisis en tant que stabilisants. En outre, les latex stabilisés peuvent se disperser de manière efficace sans coagulation dans les mortiers modifiés au latex. D'autre part, l'ajout d'une quantité excessive d'agents tensio-actifs peut devenir néfaste à la résistance des mortiers modifiés au latex en raison de la résistance réduite du film polymère, l'hydratation du ciment retardé et l'entraînement d'air en excès. Par conséquent, les latex utilisés comme modificateurs de ciment doivent avoir une teneur en agent tensio-actif optimal pour fournir la haute résistance des mortiers modifiés. Généralement, le taux optimal de l'agent tensio-actif varie entre 5 et 30% du poids des solides totaux. La figure 2.19 illustre la relation entre la teneur en agent tensio-actif du latex et la résistance à la flexion des mortiers modifiés au latex.

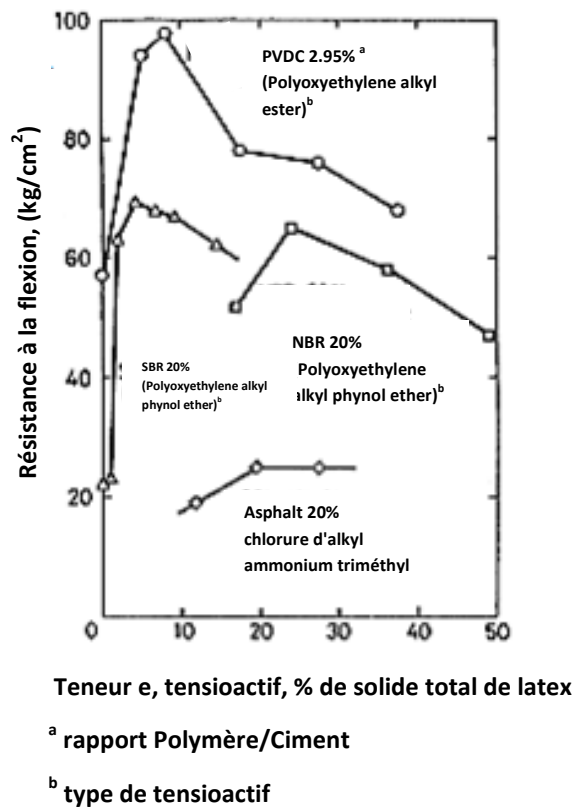


Figure 2.19. Relation entre les surfactants contenus dans les latex et la résistance à la flexion des mortiers modifiés (Ohama, 1995).

Quant aux agents anti-mousses les résultats de (Ohama, 1995) montrent que l'augmentation de leur teneur, provoque une diminution marquée de la teneur en air, ce qui tend à augmenter la résistance à la compression des mortiers modifiés (cf. figure 2.20).

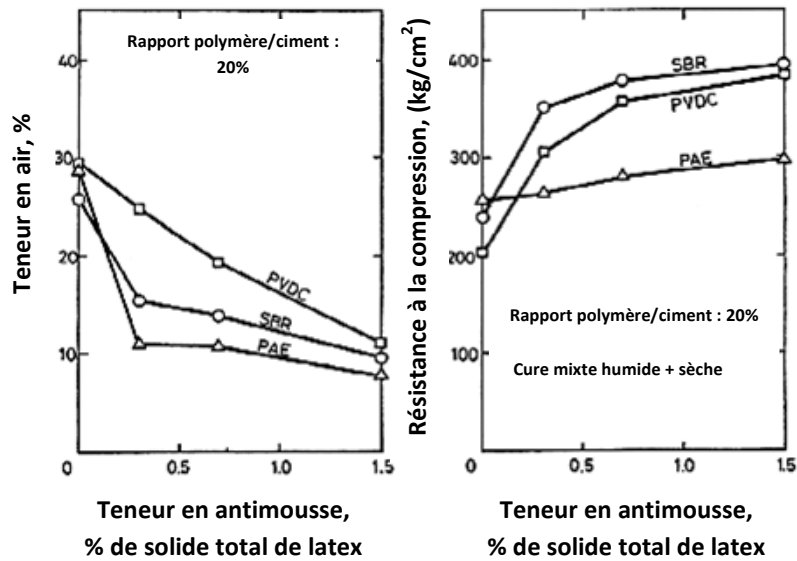


Figure 2.20. Effet des anti-mousses de type silicone sur l'air entraîné et la résistance à la compression des mortiers modifiés (Ohama, 1995).

Pour la taille des particules, la littérature montre que plus la taille des particules est faible et plus la coalescence est rapide, ce qui augmente les propriétés finales des matériaux (Ohama, 1995).

- La nature du ciment utilisé :

Selon (Ohama, 1995), la résistance des mortiers modifiés peuvent être affectés par le type de ciment utilisé, surtout pour le cas des ciments de haute teneur en aluminates comme le montre la figure 2.21.

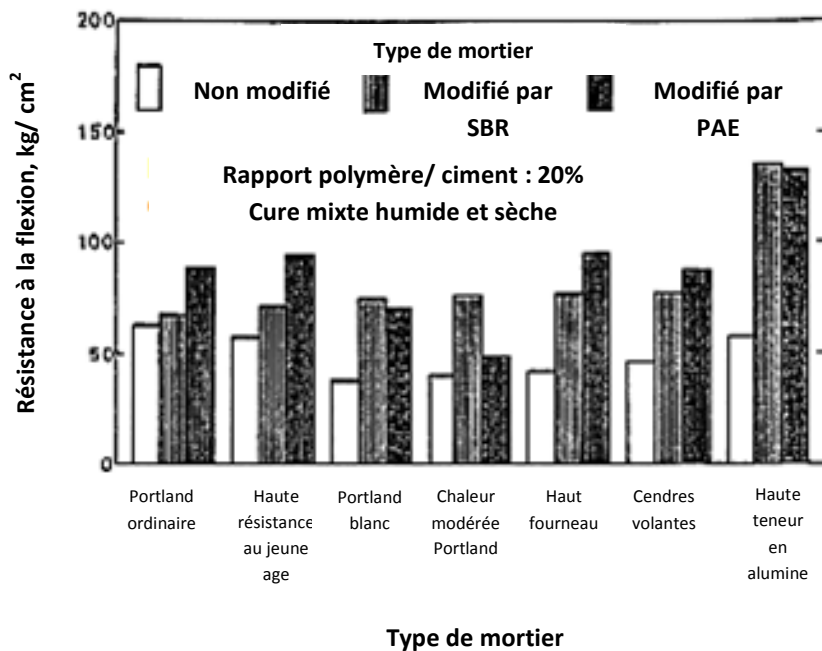


Figure 2.21. Effet du type de ciment sur la résistance à la flexion des mortiers (Ohama, 1995).

Chapitre 2. Propriétés des mortiers modifiés au latex

Pour les mortiers modifiés avec l'ÉVA mélangés avec différents additifs minéraux tels que les laitiers, les fumées de silice et les cendres volantes, les résultats montrent que généralement la résistance à la flexion de ces mortiers augmente avec l'augmentation du pourcentage de polymère par rapport aux mortiers témoins (sans additions) jusqu'à P/C = 7% ; au-delà, la tendance s'inverse (cf. figure 2.22).

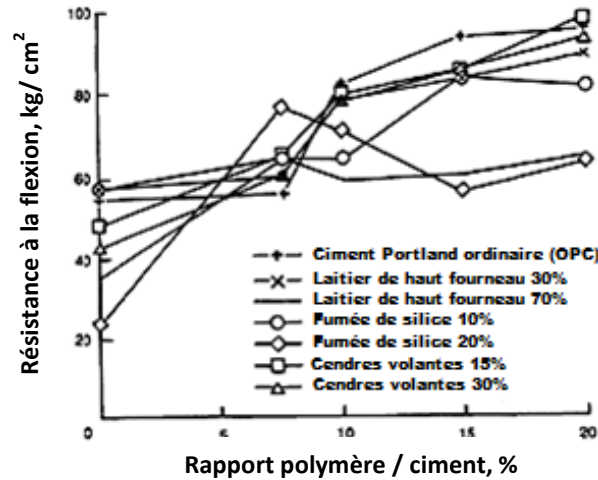


Figure 2.22. Effet des additions minérales sur la résistance à la flexion des mortiers pour une cure sèche (Ohama, 1995).

Ces résultats sont confirmés aussi par l'étude menée par (Ahmed, 2011) où il a trouvé qu'une combinaison de polymères latex SBR et 10% de fumée de silice offre d'une part une augmentation de la résistance à la compression allant de 34 à 38% par rapport au mortier ordinaire et d'autre part, une augmentation de la résistance à la flexion comprise entre 30 et 60%. Par contre, l'addition de 40% de laitier avec des polymères latex (SBR, ÉVA et PAE), présente une amélioration variant entre 20 et 27% de la résistance à la compression.

En revanche, des gains légèrement inférieurs à celle des mortiers modifiés au SBR et fumées de silice sont signalés sur les mortiers contenant les laitiers entre 20 et 45% (cf. figures 2.23 et 2.24.).

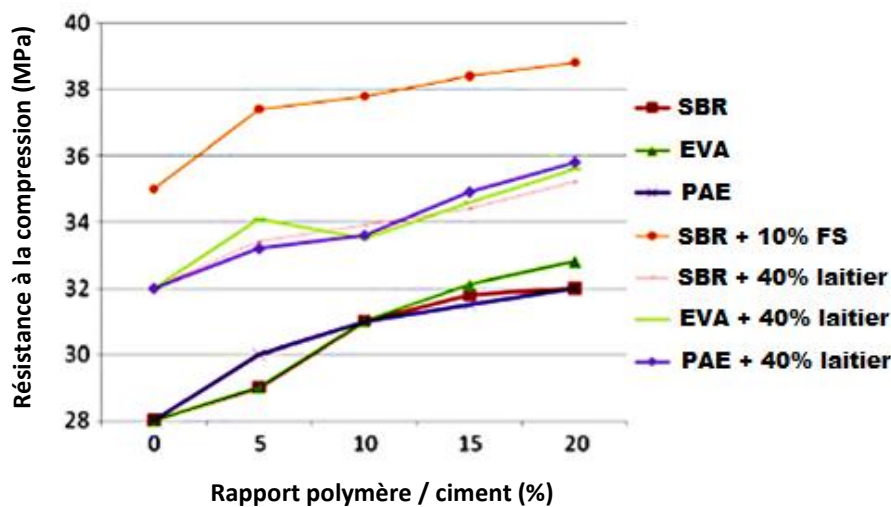


Figure 2.23. Effet de la combinaison latex / fumée de silice et laitiers sur le développement de la résistance à la compression des mortiers (Ahmed, 2011).

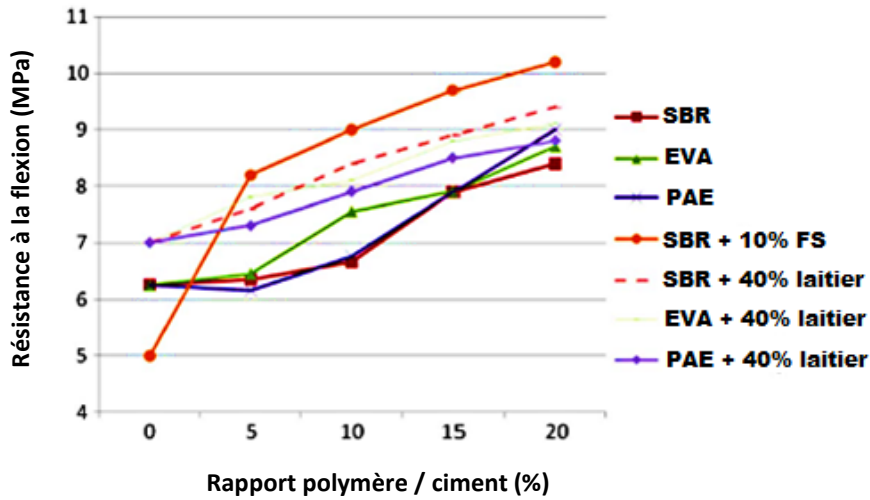


Figure 2.24. Effet de la combinaison latex / fumée de silice et laitiers sur le développement de la résistance à la flexion des mortiers (Ahmed, 2011).

- La nature du sable :

En règle générale, comme le cas des mortiers témoins, la résistance à la compression et à la flexion des mortiers modifiés ont tendance à augmenter, en augmentant le module de finesse des sables (Ohama, 1995) (cf. figure 2.25).

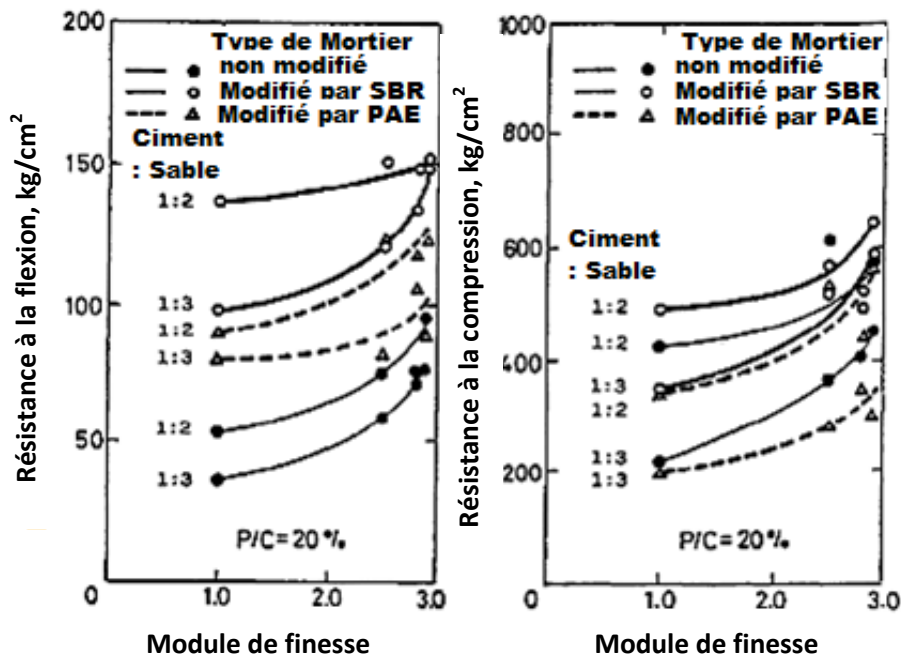


Figure 2.25. Effet du module de finesse du sable sur la résistance à la compression et à la flexion des mortiers (Ohama, 1995).

2.2.2.1.2. Influence de la composition sur les résistances à la compression et à la flexion:

- La quantité et le type de polymère latex utilisé:

Plusieurs travaux expérimentaux ont montré que les propriétés mécaniques surtout en traction et en flexion augmentent en augmentant le taux de polymère dans le mélange cimentaire, car les polymères renforcent la résistance de l'interface liant-granulat, particulièrement sollicitée pendant les essais en flexion (Ngassam, 2013) (Benali, 2017).

Dans ses travaux (Ngassam, 2013), a examiné l'influence du type et de la quantité des polymères sur les propriétés mécaniques après une cure des mortiers dans des conditions normales. Il a trouvé que les résistances à la compression des mortiers modifiés sont inférieures à celles du mortier référence et que seule la résistance des mortiers modifiés avec 20% de styrène acrylate atteint celle du mortier ordinaire. En dessous de cette teneur, les résistances sont identiques pour les deux mortiers modifiés par un même taux de polymère. Toutefois, la résistance en flexion croit fortement avec le taux de polymère. Cette augmentation est encore plus remarquée pour les mortiers contenant le styrène acrylate (cf. figure 2.26 (a) et (b)).

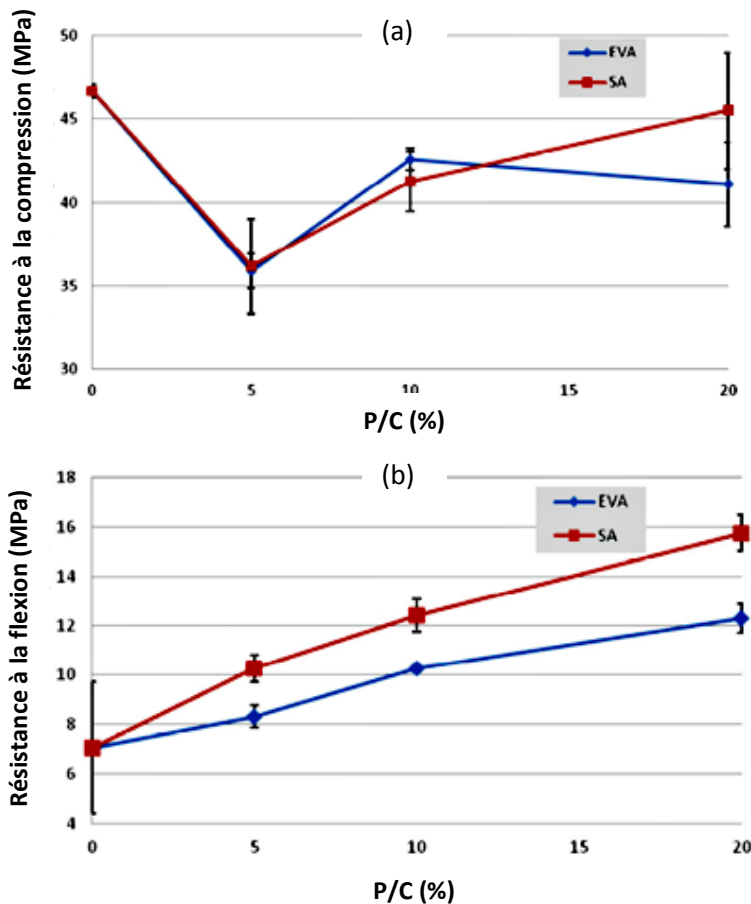


Figure 2.26 (a) et (b) Résistance à la compression et à la flexion des mortiers formulés au laboratoire après une cure en milieu ambiant (Ngassam, 2013).

Ukrainczyk et col. (Ukrainczyk, 2013) dans leur étude confirment que l'addition des latex de type SBR avec des rapports croissants et un rapport E/C constant égal à 0,45 dans les mortiers préparés à base de ciment d'aluminate de calcium, diminue leur résistance à la compression et

augmente leur résistance à la flexion. Cette tendance est signalée pour toutes les conditions de cure utilisées (cf. figure 2.27).

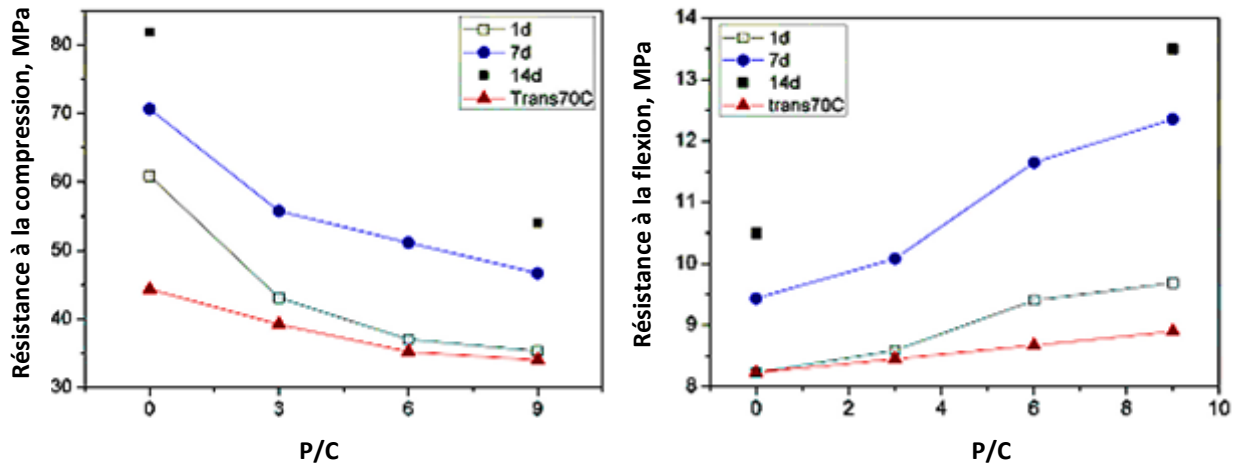


Figure 2.27. Effet du contenu en polymère et des conditions de cure sur la résistance à la compression et à la flexion des mortiers préparés à base du ciment aluminat de calcium (Ukrainczyk, 2013).

Aggarwal et col.(Aggarwal, 2007) ont montré que l'addition de polymère latex acrylique et époxy dans les mortiers ayant subi une cure de 27 jours à 20°C et 50% d'humidité relative, améliore son comportement mécanique surtout en flexion (cf. figure 2.28). Les auteurs montrent qu'en ajoutant 30% de latex au mortier, on retrouve les mêmes propriétés mécaniques du mortier témoin dont la cure est humide.

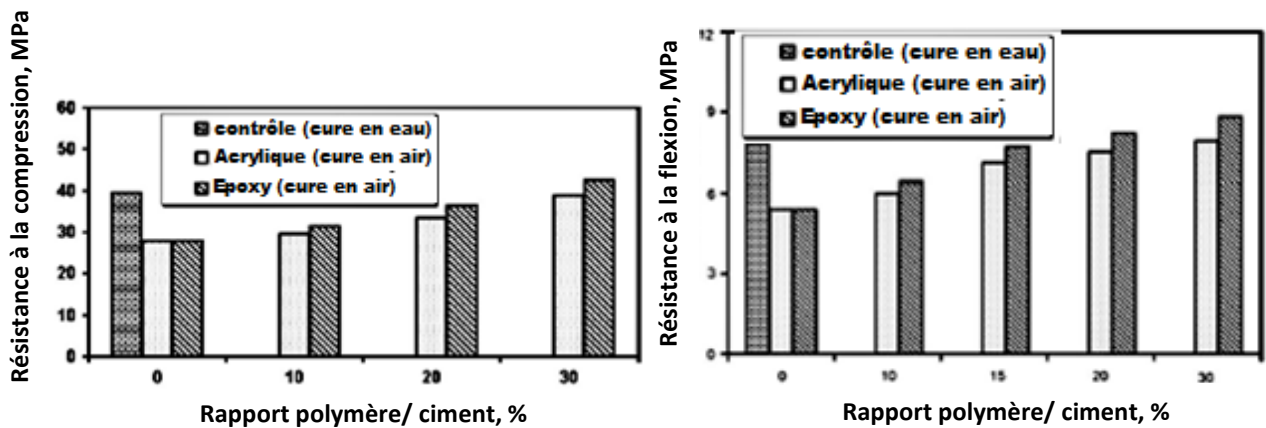


Figure 2.28. Influence de la cure et du taux de polymère sur la résistance à la compression et à la flexion des mortiers (Aggarwal, 2007).

D'autres études ont montré que la présence des latex dans les mortiers, tend à diminuer plus à la fois les résistances à la compression et à la flexion des mortiers. Les résultats de la littérature étant contradictoires, apporte une certaine difficulté dans leur exploitation.

L'étude menée par (Marceau, 2012) sur l'effet de la présence des polymères de type ÉVA, SA, et SBR dans les mortiers fabriqués avec un rapport E/C constant (fluidité non ajustée) a montré que la présence de polymère diminue les propriétés mécaniques des mortiers (cf. figure 2.29). Ces auteurs ont justifié ces observations par l'augmentation de la porosité due à l'entraînement d'air dans les mortiers modifiés.

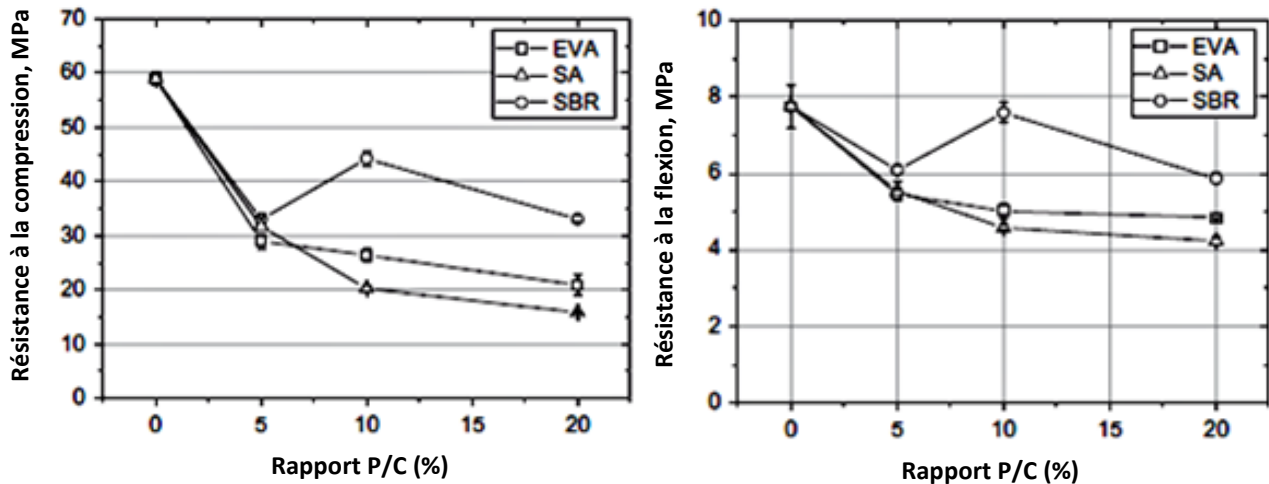


Figure 2.29. Influence du rapport P/C sur la résistance à la compression et à la flexion des mortiers après 28 jours de cure humide (Marceau, 2012).

Les mêmes résultats ont été trouvés par (Wang, 2010), dans leur étude sur l'effet du polymère SAE sur les performances des mortiers où ils ont utilisé un rapport E/C ajusté à (170 ± 5) mm et des rapports de P/C variant de 0 à 20% (cf. figure 2.30).

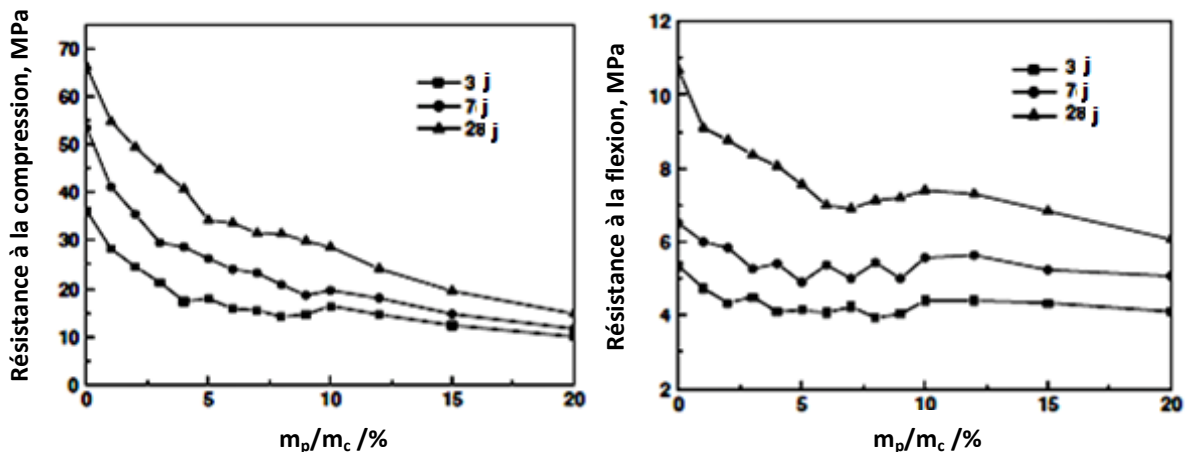


Figure 2.30. Résistance à la compression et à la flexion des mortiers modifiés par SAE (Wang, 2010).

- Influence du rapport E/C:

Tout comme les mortiers témoins, les résistances à la flexion et à la compression des mortiers modifiés dépendent du rapport E/C (Metalssi, 2006). À rapport E/C ajusté pour avoir une fluidité constante, cette résistance surtout en flexion augmente en ajoutant des polymères aux mortiers. En effet, l'étude menée par Barluenga et col. (Barluenga, 2004) sur l'effet de l'ajout du polymère SBR au mortier (E/C ajusté) soumis à une cure sèche à l'air libre, a constaté que cet ajout a une influence relativement faible sur l'augmentation des résistances à la compression et à la flexion. De plus, ces résistances diminuent avec l'augmentation de la fluidité des mortiers (cf. figure 2.31).

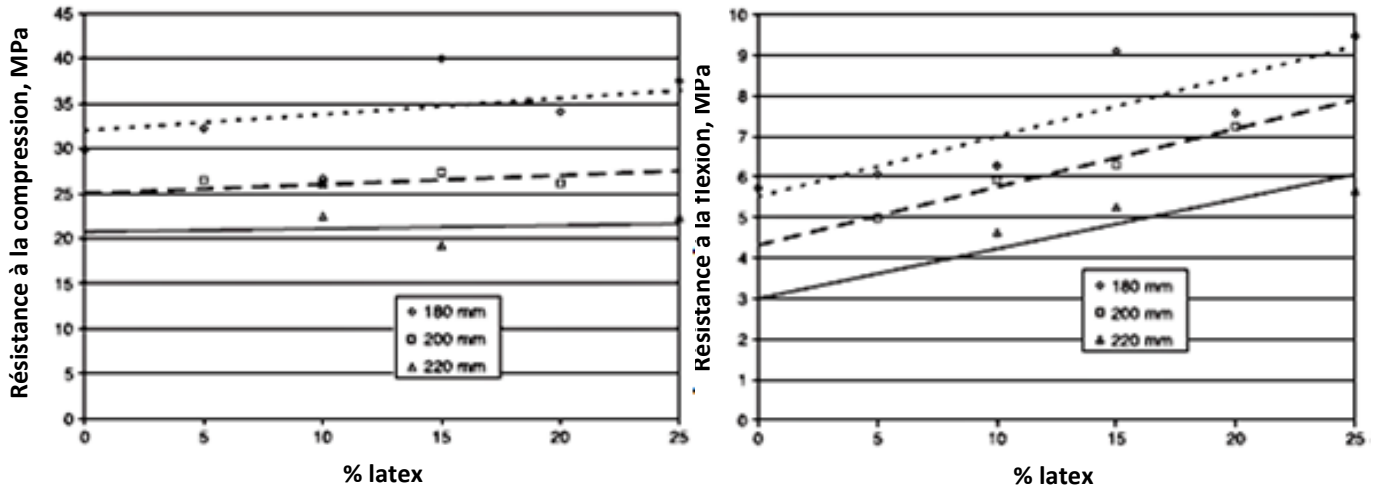


Figure 2.31. Résistance à la compression et à la flexion des mortiers modifiés avec différents pourcentages de latex et plusieurs consistances fixes (180, 200 et 220 ± 10 mm) (Barluenga, 2004).

En revanche, les mêmes auteurs ont constaté qu'avec un rapport E/C constant (fluidité non ajustée), les mortiers modifiés au latex développent des résistances mécaniques décroissantes en augmentant le taux de polymère dans le mélange. En outre, plus la durée de cure augmente plus la résistance des mortiers modifiés devient importante (cf. figure 2.32).

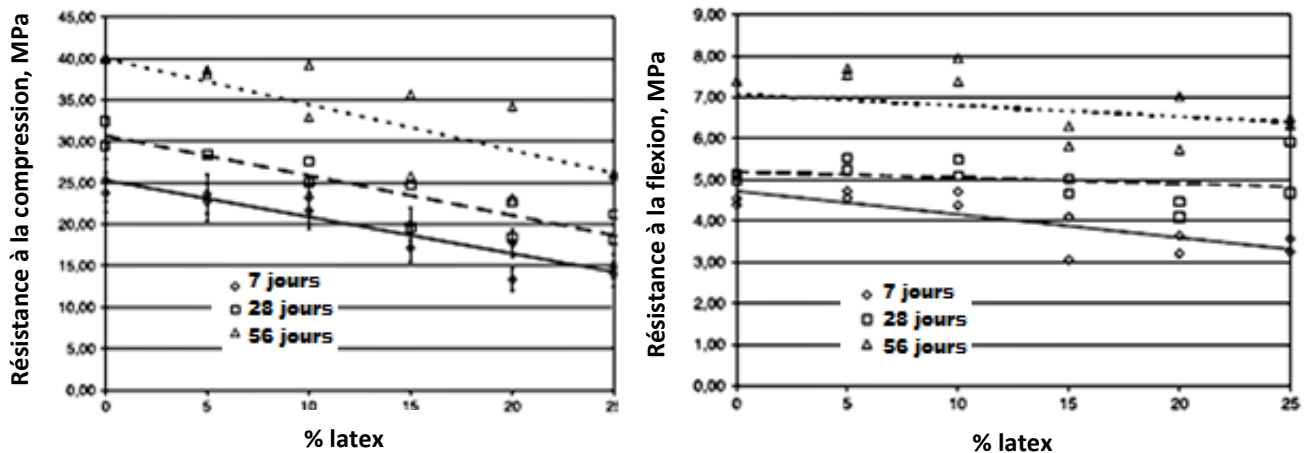


Figure 2.32. Résistances à la compression et la flexion des mortiers modifiés avec différents pourcentages de latex et un E/C constant (0,55) à plusieurs âges. (Barluenga, 2004).

- Influence des conditions de cure:

Différentes recherches ont étudié le comportement mécanique des mortiers modifiés au latex. Ces études trouvent que les propriétés mécaniques sont très influencées par les conditions de cure auxquelles ils ont été soumis.

Parmi ces études, celle menée par (Ngassam, 2013). Ces auteurs mettent en exergue l'effet de trois conditions de cure sur le comportement mécanique des mortiers modifiés par le SA et l'ÉVA à l'âge de 28 jours. Les cures utilisées sont:

- Cure 1 : milieu ambiant contrôlé (21° C et 60% d'humidité relative) jusqu'à l'âge de l'essai,

Chapitre 2. Propriétés des mortiers modifiés au latex

- Cure 2 : milieu chaud à 40°C jusqu'à l'âge de l'essai,
- Cure 3 : immersion dans l'eau jusqu'à l'âge de l'essai.

Les résultats de ces travaux montrent que la cure à 40°C est celle qui favorise les résistances les plus élevées pour les deux types de polymères utilisés (cf. figures 2.33 et 2.34.).

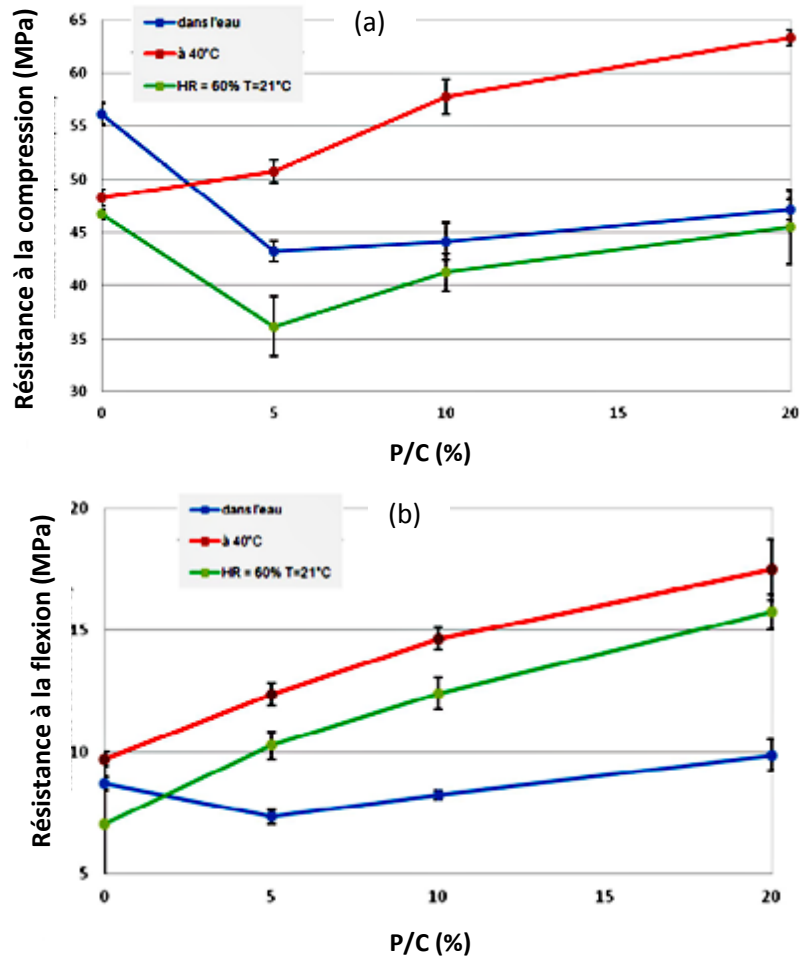
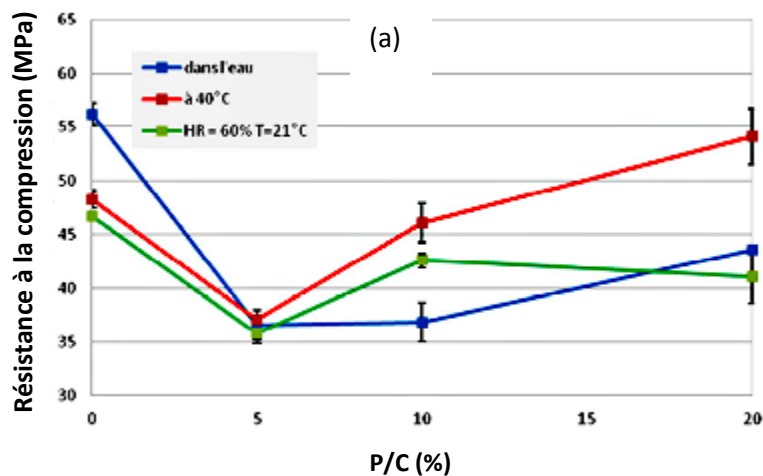


Figure 2.33. (a) et (b) Résistances à la compression et à la flexion des mortiers modifiés par le SA sous différentes cures (Ngassam, 2013).



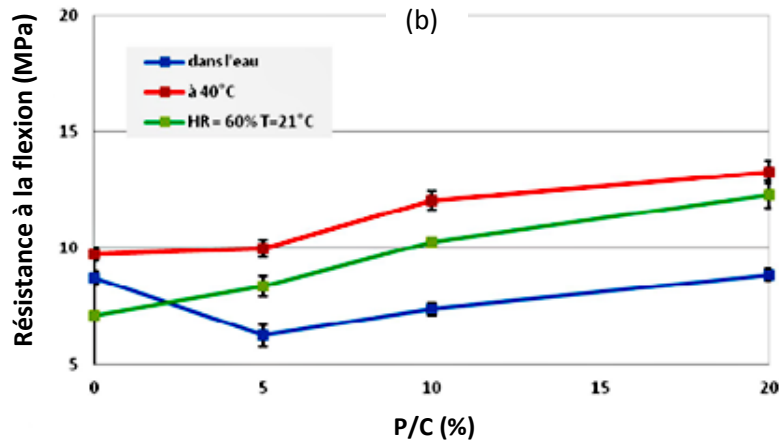


Figure 2.34. (a) et (b) Résistances à la compression et à la flexion des mortiers modifiés par l'ÉVA sous différentes cures (Ngassam, 2013).

Dans leur étude Hassan et col. (Hassan, 2000), ont montré également qu'une cure à température de 35° C et 45% d'humidité relative pendant 27 jours était possible pour des mortiers contenant un polymère de type acrylique. Ils ont constaté aussi que les propriétés mécaniques des composites obtenus sont supérieures à celles des liants hydrauliques après une cure humide (cf. figure 2.35).

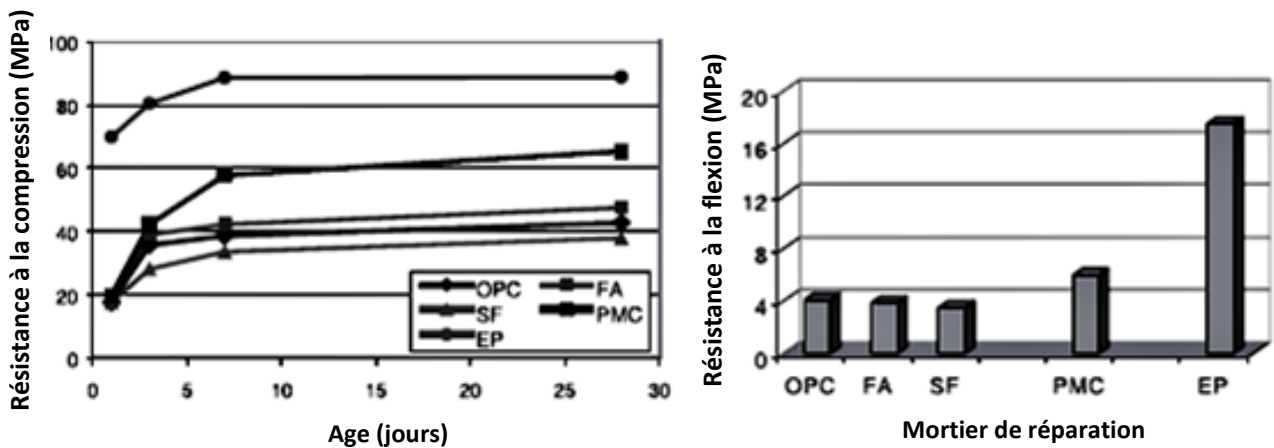


Figure 2.35. Résistances à la compression et à la traction des différents mortiers de réparation (Hassan, 2000).

Ainsi, en analysant la littérature dans ce domaine, on trouve que les propriétés des liants modifiés sont moins sensibles aux conditions dans lesquelles la cure s'est effectuée, contrairement aux liants ordinaires qui nécessitent la cure humide pour atteindre des résistances mécaniques optimales (Ohama, 1995) (Ngassam, 2013). La cure idéale pour les matrices mixtes est la cure combinée constituée d'une période humide et une autre sèche (Wang, 2005).

- Humide : pour hydrater le ciment et pour éviter la fissuration due au retrait plastique (ACI, 2003).
- Sec : pour évaporer l'excès de l'eau qui permet le développement du film polymère (ACI, 2003) (Ohama, 1995).

Chapitre 2. Propriétés des mortiers modifiés au latex

En effet, l'étude menée par Folic et col. (Folic, 1998) a examiné l'effet des conditions de cure sur les propriétés des bétons modifiés au latex le SBR. Les cures utilisées sont :

- Cure A : après démoulage, les échantillons sont soumis à une cure à l'air pendant 27 jours,
- Cure B : après démoulage, les échantillons ont été immergés 2 jours dans l'eau, suivie d'une cure de 25 jours à l'air libre,
- Cure C : après démoulage, les échantillons ont été immergés 6 jours dans l'eau, suivie d'une cure de 21 jours à l'air libre,
- Cure D : après démoulage, les échantillons ont été immergés pendant 27 jours dans l'eau.

Les résultats obtenus sont en accord aussi avec les résultats précités ; c'est-à-dire les conditions de cure les plus appropriées sont une combinaison de conditions d'humidité élevée (jusqu'à 6 jours) puis une cure à l'air libre.

D'autres études confirment ces résultats, telles que l'étude menée par Wang et col. (Wang, 2005). Ces auteurs ont étudié l'influence de l'ajout de différents rapports de SBR dans les mortiers avec un rapport E/C constant, égal à 0,4. Deux cures à savoir cure à l'eau: 2, 6 ou 27 jours immergés dans l'eau à 20 °C ; et cure mixte: 6 jours immergés dans l'eau à 20° C, suivie de 21 jours à 20° C et 70% d'humidité relative (HR), ont également été évalués. Les résultats de cette étude ont montré que le traitement mixte est plus bénéfique pour l'amélioration des propriétés des mortiers (cf. figure 2.36).

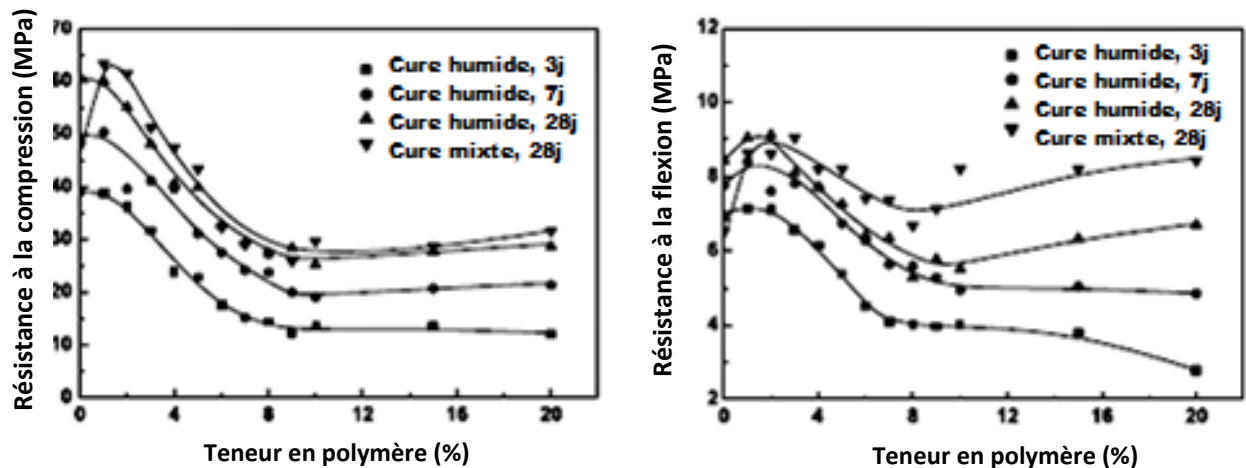


Figure 2.36. Effet de la cure sur le comportement mécanique des mortiers (Wang, 2005).

Ramli et col. (Ramli, 2012a) ont testé également l'effet de l'âge et trois différentes cures sur le comportement mécanique des mortiers modifiés par des polymères latex : SBR, PAE, VAE. Les tests ont été effectués à l'âge de 1, 3, 7, 28, 182, 364 et 546 jours.

Quant à la cure, les auteurs ont utilisé trois régimes, à savoir:

- Cure mixte : après démoulage, les échantillons ont été immergés 6 jours dans l'eau à $22\pm 2^\circ\text{C}$, suivie d'une cure à l'air du laboratoire à température de $27\pm 2^\circ\text{C}$ et $80\pm 5\%$ d'humidité relative jusqu'à l'âge de l'essai,
- Cure mixte : après démoulage, les échantillons sont restés 7 jours à l'air du laboratoire à température de $27\pm 2^\circ\text{C}$ et $80\pm 5\%$ d'humidité relative, suivie d'une cure sous l'eau à $22\pm 2^\circ\text{C}$ jusqu'à l'âge de l'essai,
- Après démoulage les échantillons ont été conservés dans un réservoir d'eau (humidité relative 100% et une température de $22\pm 2^\circ\text{C}$) pendant six jours, suivis par une

conservation à l'air ambiant (humidité relative de $80\pm 5\%$ et une température de $27\pm 2^\circ\text{C}$) pendant sept jours, et ensuite placés de façon cyclique dans l'eau et à l'air durant sept jours jusqu'à l'âge de l'essai.

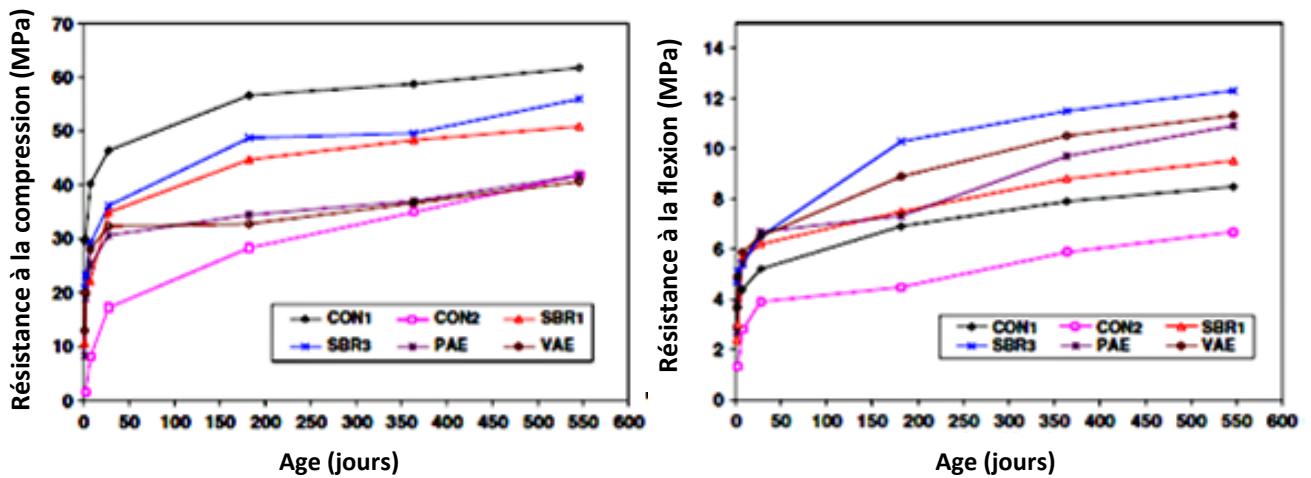


Figure 2.37. Résistance à la compression et à la flexion des mortiers modifiés de la cure (sept jours dans de l'eau + air du laboratoire (Ramli, 2012a)).

Les résultats ont montré que le développement des résistances à la compression et à la flexion des mortiers modifiés a été nettement amélioré par la cure initiale dans l'eau que dans l'air. Aussi, plus la durée de cure augmente plus la résistance des mortiers modifiés augmente (cf. figure 2.37).

Une autre étude très récente réalisée par Parghi et col. (Parghi, 2016), a évalué l'effet de six cures différentes sur les performances mécaniques des mortiers modifiés par différents teneurs massiques de latex PAE (0, 5, 10, 15 et 20%) avec un rapport E/C constant égal à 0,45. Les différents régimes utilisés sont :

- Cure 1 : 28 jours à température ambiante et 60 à 70% (HR),
- Cure 2 : 28 jours immergés dans l'eau à 23°C ,
- Cure 3 : 28 jours dans une chambre de durcissement, contrôlée à 23°C et 95% HR,
- Cure 4 : 7 jours dans l'eau à 23°C plus 21 jours de durcissement à température ambiante et 0% HR, (7W21D).
- Cure 5 : 1 jour à température ambiante et 60-70% HR plus 3 jours dans l'eau à 23°C et 24 jours à température ambiante et 60-70% HR, (1D3W24D).
- Cure 6 : 14 jours dans l'eau à 23°C et 14 jours à température ambiante et 60-70% HR, (14W14D).

Les résultats trouvés ont montré que la méthode de cure-4 (cure mixte, 7W21D) est la plus recommandée pour améliorer les propriétés des mortiers modifiés.

2.2.2.2. Propriétés de durabilité :

Différents travaux ont montré que l'addition de polymères latex dans les mortiers a une influence significative sur leurs durabilités. En règle générale, les liants mixtes ont une structure dans laquelle les plus gros pores peuvent être remplis avec des polymères ou scellés avec les films continus de polymère. Cet effet de remplissage ou de scellement augmente avec l'augmentation de la teneur en polymère dans la matrice cimentaire. Ces caractéristiques se

traduisent, par de faibles porosité et perméabilité et par conséquent une absorption réduite, plus un comportement amélioré contre les différentes agressions chimiques (Ngassam, 2013).

2.2.2.2.1. Porosité et distribution de la taille des pores:

Selon l'étude menée par Hassan et col. (Hassan, 2000), l'ajout d'un polymère acrylate et l'augmentation de l'âge de conservation réduisent fortement la porosité et la taille moyenne des pores dans les matrices mixtes (cf. figure 2.38).

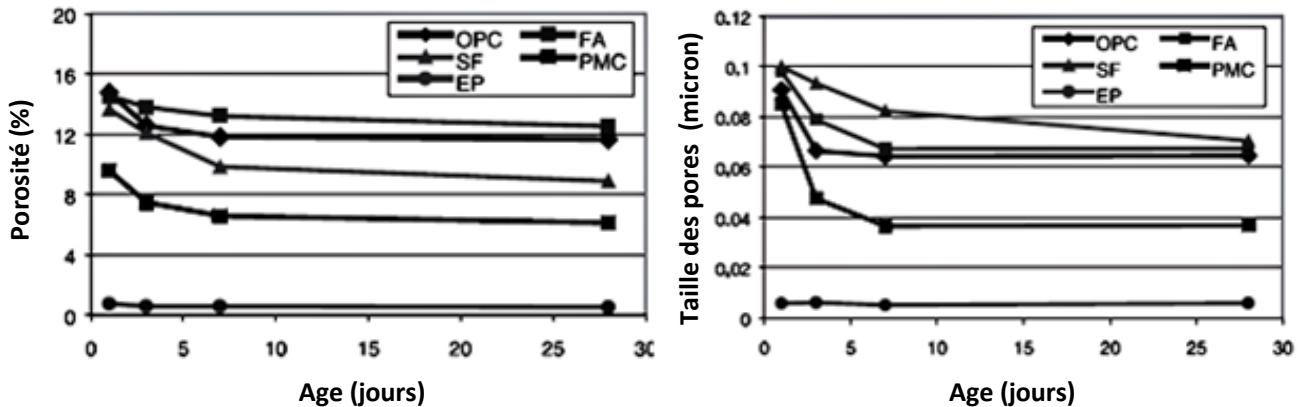


Figure 2.38. Porosités et diamètre moyen des pores de différents types de mortiers de réparation (Hassan, 2000).

Rozenbaum et col. (Rozenbaum, 2005) ont montré que l'augmentation du taux de SBR dans les mortiers formulés avec un rapport E/C constant (0.4), entraîne une diminution quasi linéaire de la porosité totale. En outre, la taille moyenne des pores se décale également vers des dimensions plus faibles, de 0.3 μm pour les mortiers non modifiés à 0.03 μm pour un rapport P/C de 20% (cf. figure 2.39).

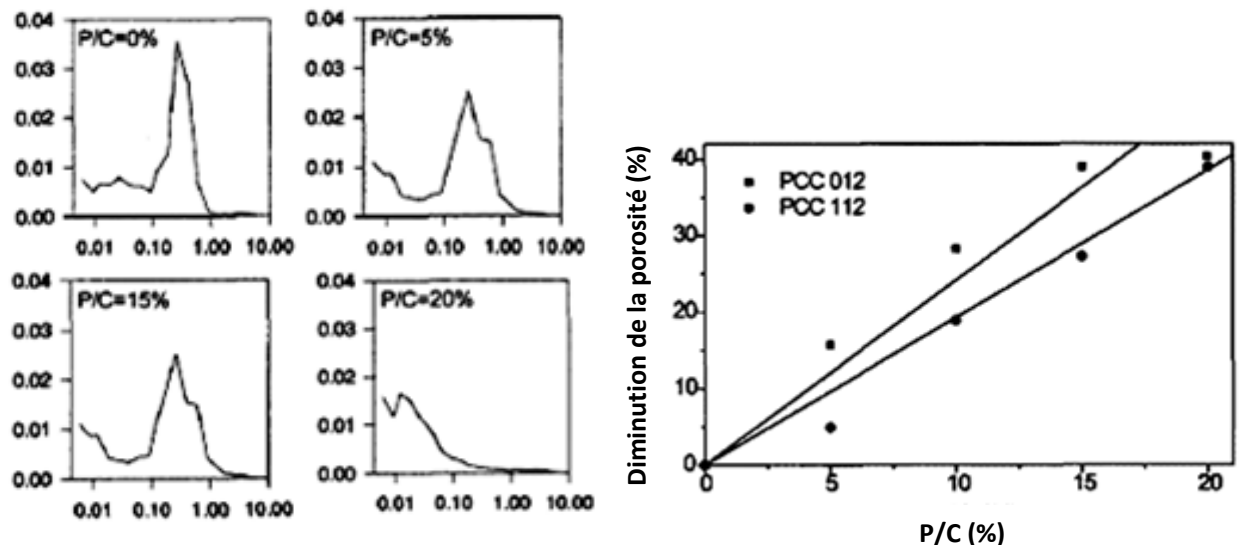


Figure 2.39. Distribution du diamètre des pores et porosité en fonction du rapport P/C (Rozenbaum, 2005).

Ohama et col. (Ohama, 1991) ont montré aussi que l'incorporation des latex SBR, VAE, PAE dans les mortiers de ciment Portland, diminue le nombre des pores de rayon supérieur à 200

nm. En revanche, son incorporation augmente les pores de rayon inférieur ou égal à 140 nm, (cf. figure 2.40.).

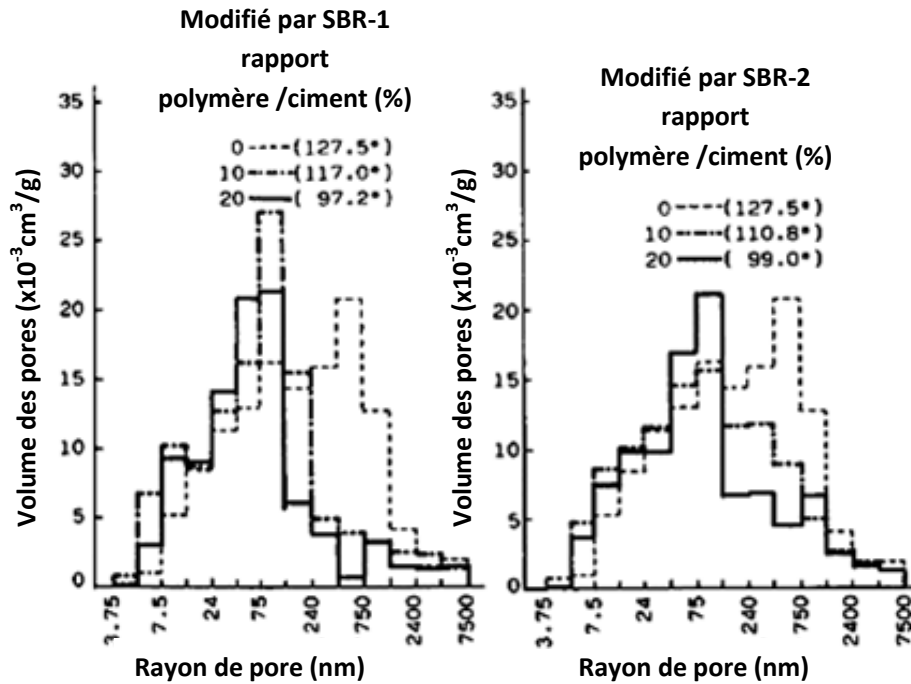


Figure 2.40. Distribution porale des mortiers modifiés aux SBR1 et SBR2 (Ohama, 1991).

L'étude menée par Barluenga et col. (Barluenga, 2004) a montré que la porosité ouverte, fermée et totale des mortiers modifiés par SBR, varie en fonction de la quantité ajoutée du polymère. Comme le montre la figure 2.41, l'augmentation du pourcentage de SBR conduit à l'augmentation de la porosité fermée et totale des mortiers. En revanche, une diminution a été signalée sur la porosité ouverte.

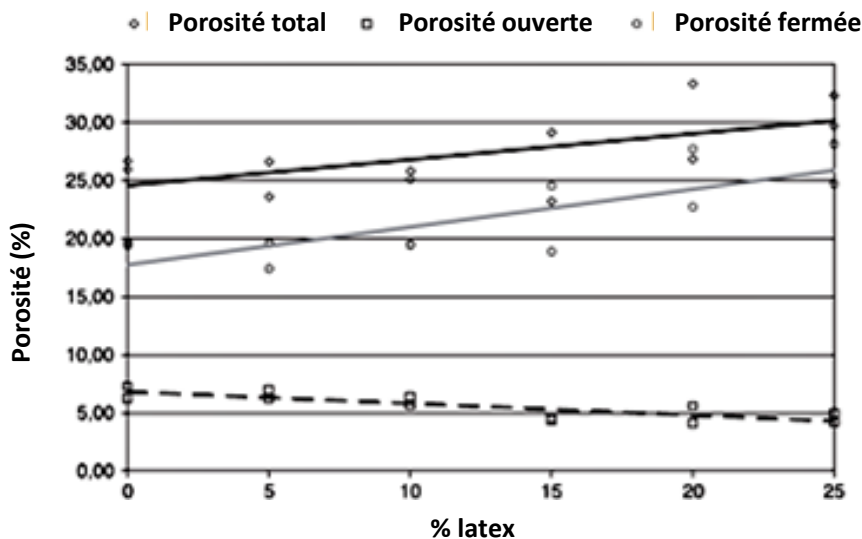


Figure 2.41. Évolution de la porosité ouverte, fermée et totale en fonction de la teneur massique en latex dans le mortier (Barluenga, 2004).

Ukrainczyk et col. (Ukrainczyk, 2013) dans leur étude qui concerne l'effet des SBR sur les mortiers préparés avec les ciments d'aluminate de calcium ont confirmé également la réduction signalée dans la porosité ouverte des mortiers, voir la figure 2.42.

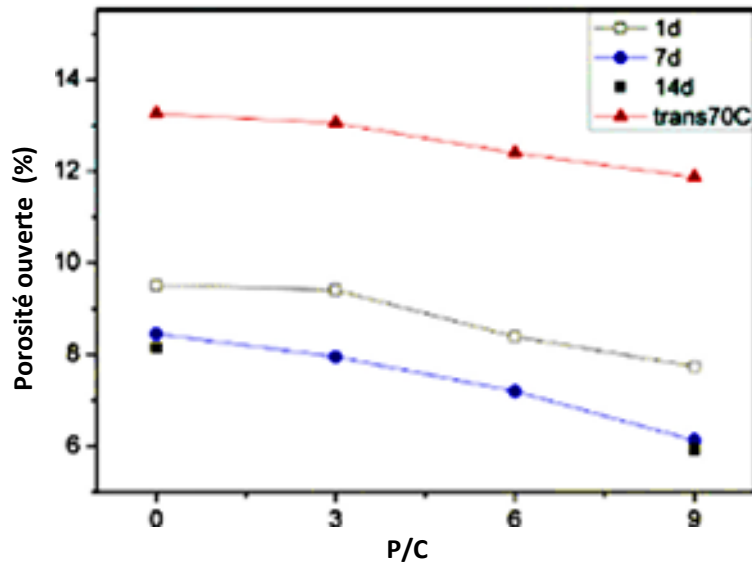


Figure 2.42. Effet de la teneur en polymère et des conditions de cure sur la porosité des mortiers préparés à base de ciment aluminaté de calcium (Ukrainczyk, 2013).

Dans leur étude Ramli et col. (Ramli, 2013) ont testé également l'influence du type de polymère latex, la cure et l'âge sur la porosité au mercure des mortiers. Les conditions de cure utilisées sont les suivantes:

- Cure I : Immersion dans l'eau pendant 7 jours, puis conditions ambiantes jusqu'à l'âge de l'essai,
- Cure II : Conditions ambiantes pendant 7 jours, puis immersion dans l'eau jusqu'à l'âge de l'essai,
- Cure III : Cycles d'immersion dans l'eau pendant 7 jours, puis en conditions ambiantes pendant 7 jours ; jusqu'à l'âge de l'essai.

À travers cette étude, les auteurs ont montré que la porosité de tous les mortiers modifiés et témoin est comparable à l'âge de 28 jours et 6 mois. Toutefois, à l'âge de 12 et 18 mois, il y avait une forte diminution de la porosité des mortiers modifiés par 15% de polymère désigné par SBR3, PAE et VAE dans l'étude. Cela est dû à la structure formée dans les mortiers modifiés dans laquelle les micropores et les vides qui se produisent habituellement dans les systèmes de ciment Portland pure sont partiellement remplis avec des polymères ou scellés par un film polymère. Cet effet de remplissage augmente avec l'augmentation de la teneur en polymère et aussi en fonction de l'âge de durcissement. Les conditions de cure les plus favorables sont 7 jours initiales sous l'eau puis le reste à l'air libre (cf. figures 2.43, 2.44, et 2.45).

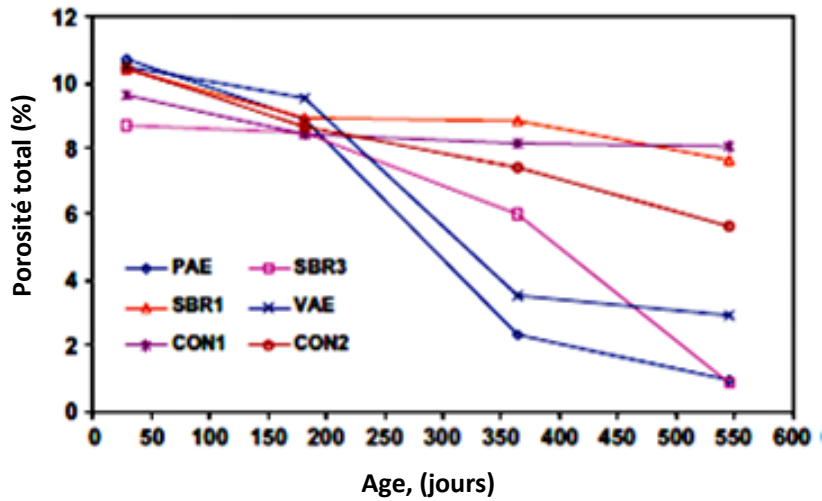


Figure 2.43. Effet de la modification des polymères sur la porosité totale des mortiers ayant subi 7 jours d'immersion sous l'eau suivis par un durcissement à l'air (Ramli, 2013).

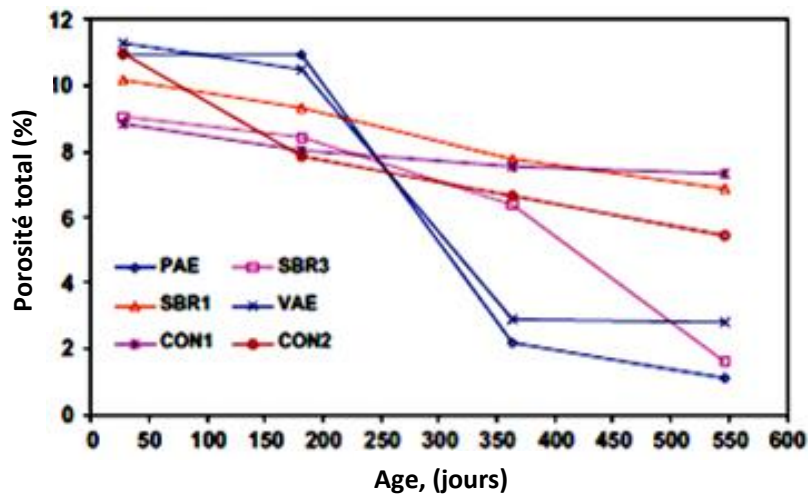


Figure 2.44. Effet de la modification des polymères sur la porosité totale des mortiers ayant mûri pendant 7 jours à l'air, suivis par un durcissement dans l'eau (Ramli, 2013).

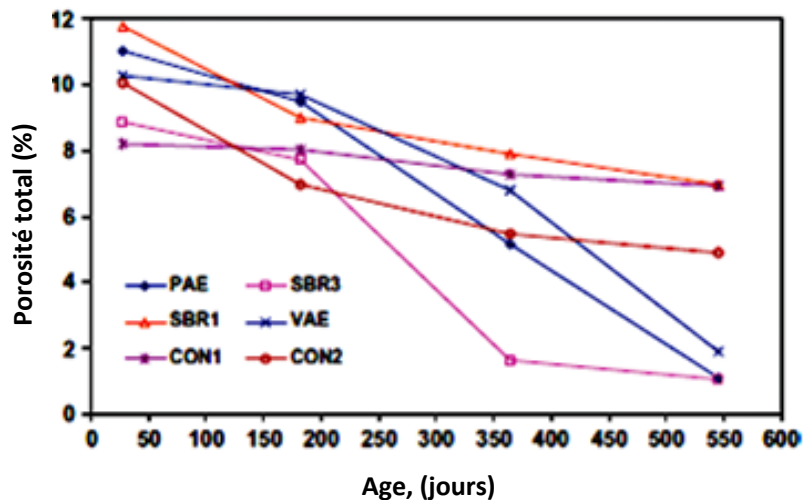


Figure 2.45. Effet de la modification des polymères sur la porosité totale des mortiers dont la cure est cyclique eau / air (Ramli, 2013).

2.2.2.2.2. Perméabilité :

- Perméabilité au gaz :

Ramli et col. (Ramli, 2012b) ont évalué l'influence du type de polymère latex, la cure et l'âge sur la perméabilité à l'oxygène des mortiers. Les conditions de cure sont celles citées dans les pages 55-56 (Ramli, 2013).

Ils ont observé que l'addition de polymère et la durée de cure entraînent la diminution de la perméabilité des mortiers (cf. figure 2.46). Cela est attribué comme nous l'avons précisé auparavant à la formation de la co-matrice (film polymère et les hydrates de ciment), qui remplit les micropores, réduit la porosité et limite la formation de fissures. Les variations de la perméabilité en fonction de la cure sont surtout visibles pour les polymères SBR1 et VAE. Les conditions de cure les plus favorables pour tous les mortiers sont ceux dont la maturation est cyclique : dans l'eau et après à l'air.

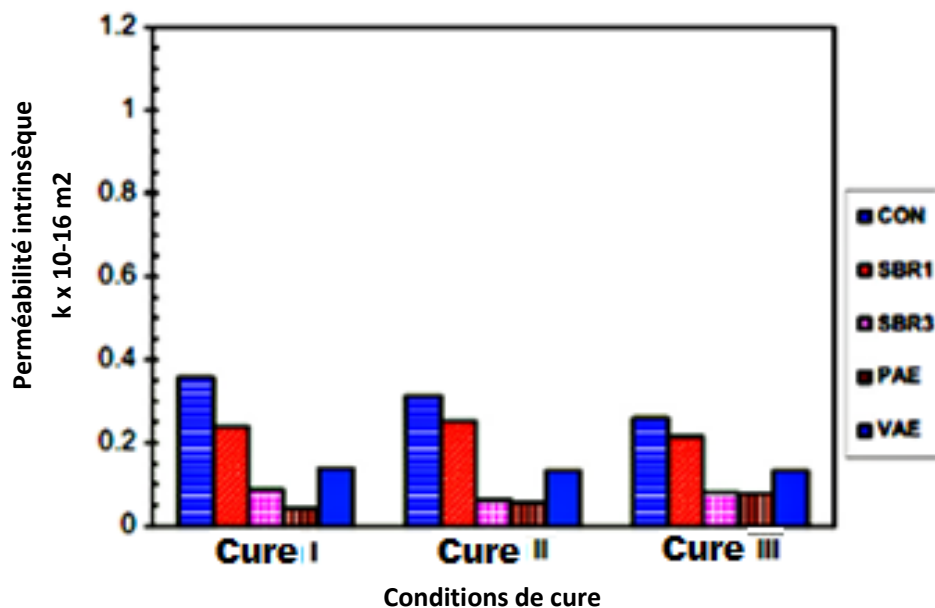


Figure 2.46. Variation de la perméabilité intrinsèque à 18 mois des mortiers modifiés, en fonction des conditions de cure (Ramli, 2012).

L'étude menée par Hassan et col. (Hassan, 2000) sur les mortiers de réparation soumis à des conditions environnementales extrêmes 35° C plus 45% HR, à savoir : mortiers ordinaires (OPC), mortiers avec cendre volante (FA), mortiers avec fumée de silice (SF), mortiers avec résine époxy (EP) et mortiers modifiés par copolymère acrylique (PMC) confirme les résultats observés auparavant, c'est-à-dire qu'une diminution de la perméabilité à l'oxygène des mortiers modifiés a été signalée par rapport aux mortiers de référence. Ces résultats montrent que l'augmentation de l'âge participe aussi à la diminution de ce paramètre (cf. figure 2.47).

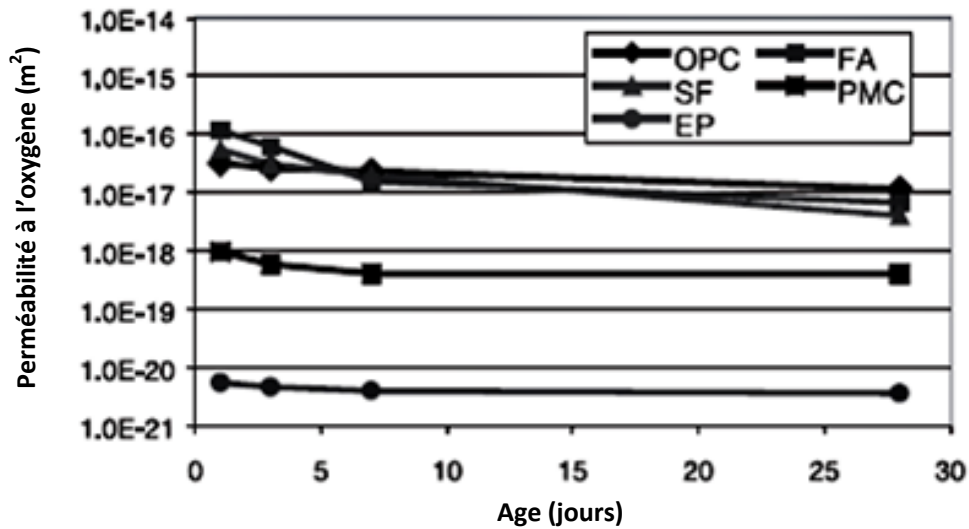


Figure 2.47. Variation de la perméabilité à l'oxygène pour les différents mortiers de réparation (Hassan, 2000).

- La perméabilité à l'eau :

La même tendance signalée par rapport à la perméabilité à l'oxygène des mortiers modifiés, est retrouvée pour la perméabilité à l'eau. La diminution de la porosité observée dans les matrices mixtes par rapport au liant seul, engendre la diminution de la perméabilité à l'eau de ces matériaux (Hassan, 2000) (cf. figure 2.48).

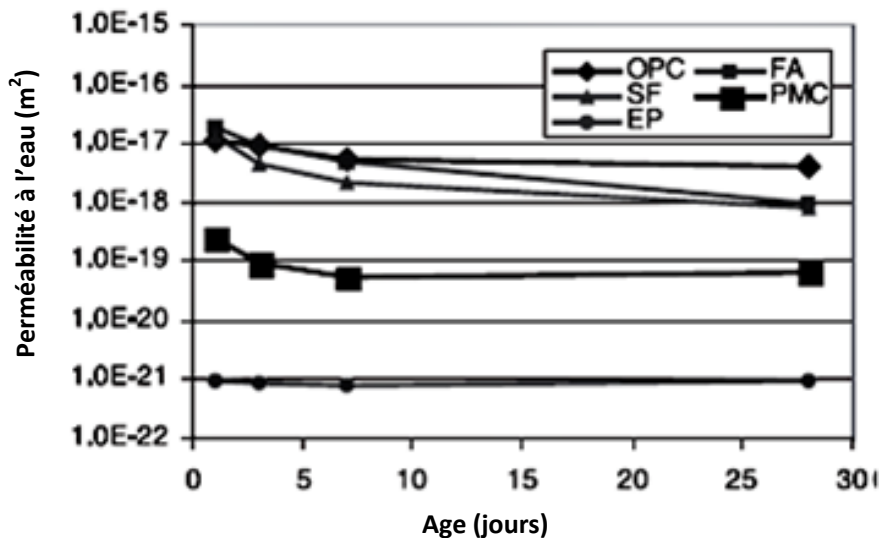


Figure 2.48. Perméabilité à l'eau en fonction du temps pour différents types de mortiers de réparation (Hassan, 2000).

2.2.2.2.3. Absorption d'eau :

Plus la perméabilité est faible et plus les mortiers modifiés présentent une absorption d'eau réduite en comparaison avec les mortiers de ciment Portland témoin.

Dans leur étude Ramli et col. (Ramli, 2013), ont montré que l'incorporation des latex et l'augmentation de l'âge de conservation diminuent l'absorption d'eau des mortiers modifiés. Ils ont trouvé que les mortiers exposés à l'air après une cure initiale à l'eau présentaient une

Chapitre 2. Propriétés des mortiers modifiés au latex

absorption d'eau réduite inférieure à 1% par rapport aux mortiers de ciment témoin. En revanche, l'augmentation de la teneur en polymère a entraîné une réduction d'environ 60% d'absorption en eau (cf. figures 2.49, 2.50 et 2.51).

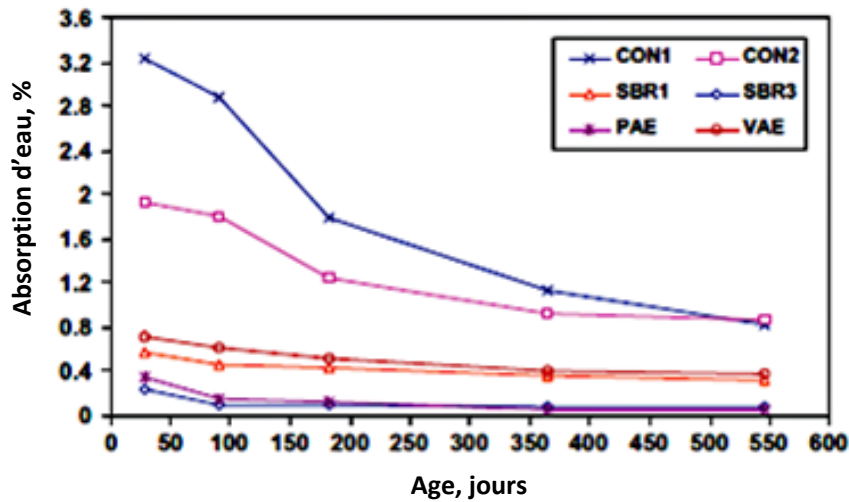


Figure 2.49. Absorption d'eau des mortiers de ciment ayant subi une cure de 7 jours dans l'eau + air (Ramli, 2013).

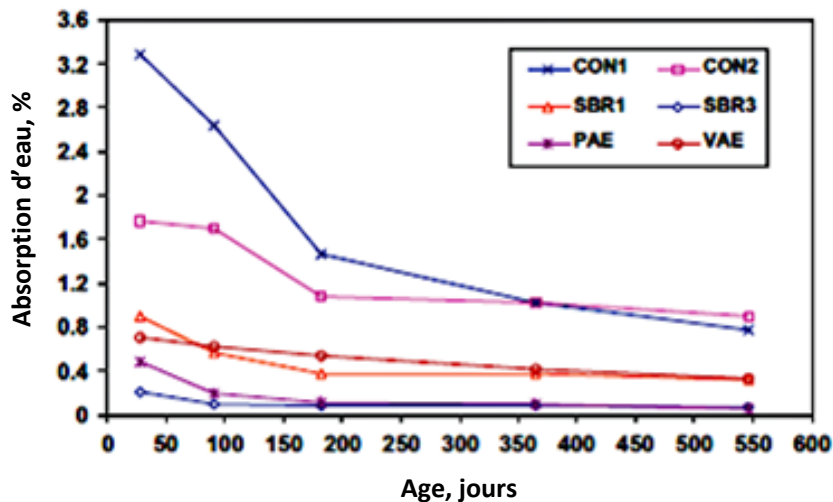


Figure 2.50. Absorption d'eau des mortiers de ciment ayant subi une cure de 7 jours dans l'air + eau (Ramli, 2013).

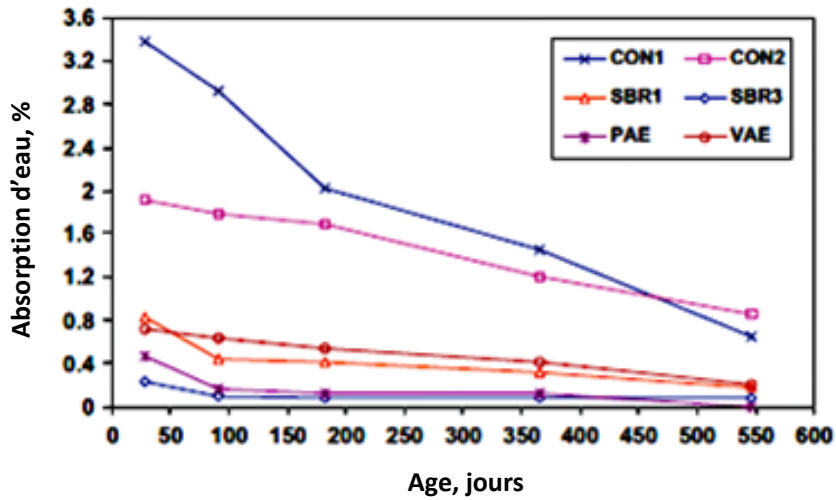


Figure 2.51. Absorption d'eau des mortiers de ciment de durcissement cyclique dans l'eau et l'air (Ramli, 2013).

Aggarwal et col. (Aggarwal, 2007), ont montré également que l'absorption d'eau des mortiers modifiés au latex acrylique diminue en augmentant la teneur en latex dans le mélange de 0 à 30% de la masse de ciment. Cette diminution est de l'ordre de 45% pour un rapport P/C de 30% (cf. figure 2.52).

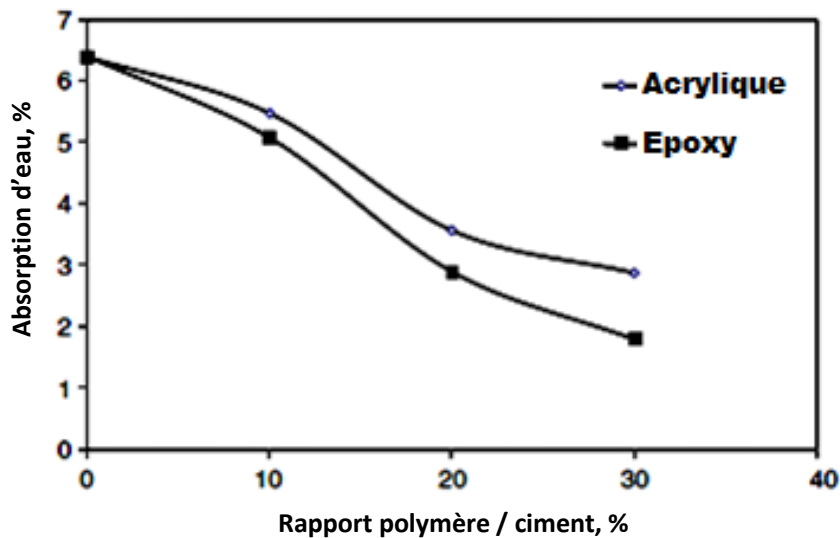


Figure 2.52. Effet de l'addition de polymère sur l'absorption d'eau (Aggarwal, 2007).

Quant à l'étude menée par Wang et col. (Wang, 2010), elle a montré que l'addition du polymère SAE dans les mortiers de ciment Portland, diminue l'absorption capillaire. Cette diminution est plus importante pour des rapports P/C inférieur à 8% (cf. figure 2.53).

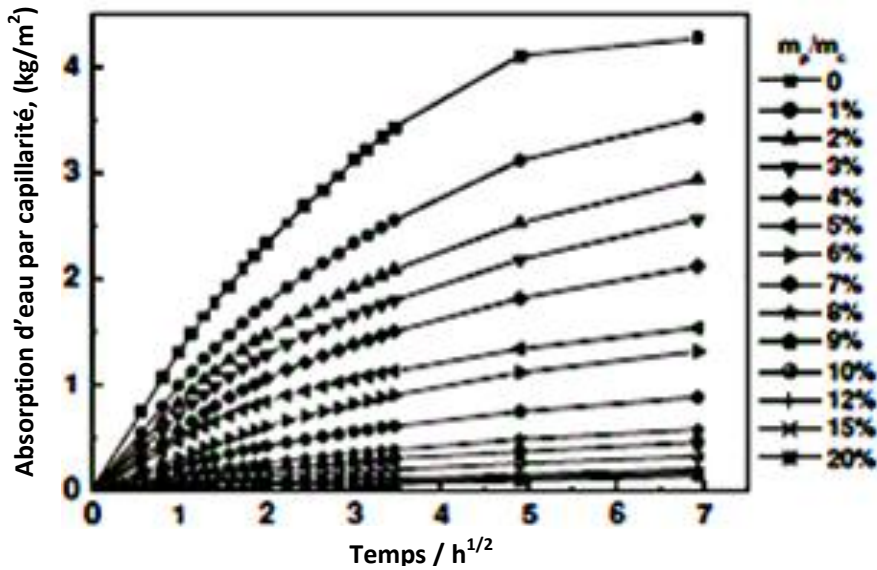


Figure 2.53. Absorption capillaire en fonction du temps (Wang, 2010).

Ces résultats corroborent les résultats de l'étude menée par (Ukrainczyk, 2013). Ces auteurs ont pu montrer que l'addition du polymère SBR dans les mortiers de ciment d'aluminat de calcium diminue l'absorption capillaire (cf. figure 2.54).

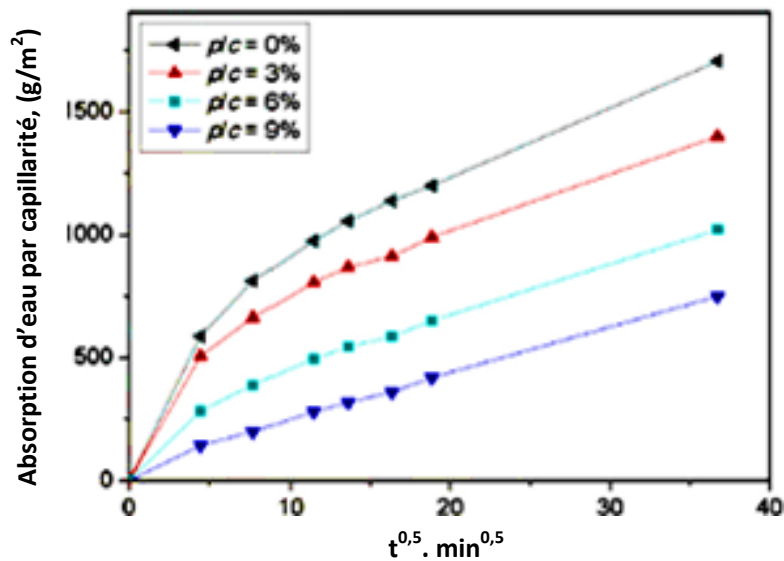


Figure 2.54. Effet de la teneur en polymère sur l'absorption d'eau par capillarité des échantillons de 7 jours de cure (Ukrainczyk, 2013).

2.2.2.2.4. Diffusion des ions chlore :

L'incorporation de polymères latex diminue le coefficient de diffusion des chlorures des mortiers (Ngassam, 2013) (Yang, 2009). Dans leur étude Yang et col. (Yang, 2009) ont évalué l'influence de l'addition du SBR sur la diffusion des ions chlorure des mortiers. Pour ce faire, ils ont utilisé un rapport E/C égal à 0,45 et des rapports P/C massiques variant de 0 à 16%. Les échantillons témoins (sans polymère) après 24 h de démoulage, ont subies une cure de 27 jours à 20±2° C et humidité relative supérieure à 95%. Tandis que, les échantillons modifiés ont subi une cure de 6 jours à 20° C et 95% HR, puis 22 jours à 65% HR. Les

résultats ont montré que l'addition des latex réduit le coefficient apparent de diffusion, ceci indique que l'incorporation des SBR améliore la résistance à la pénétration des chlorures des mortiers, (cf. figure 2.55).

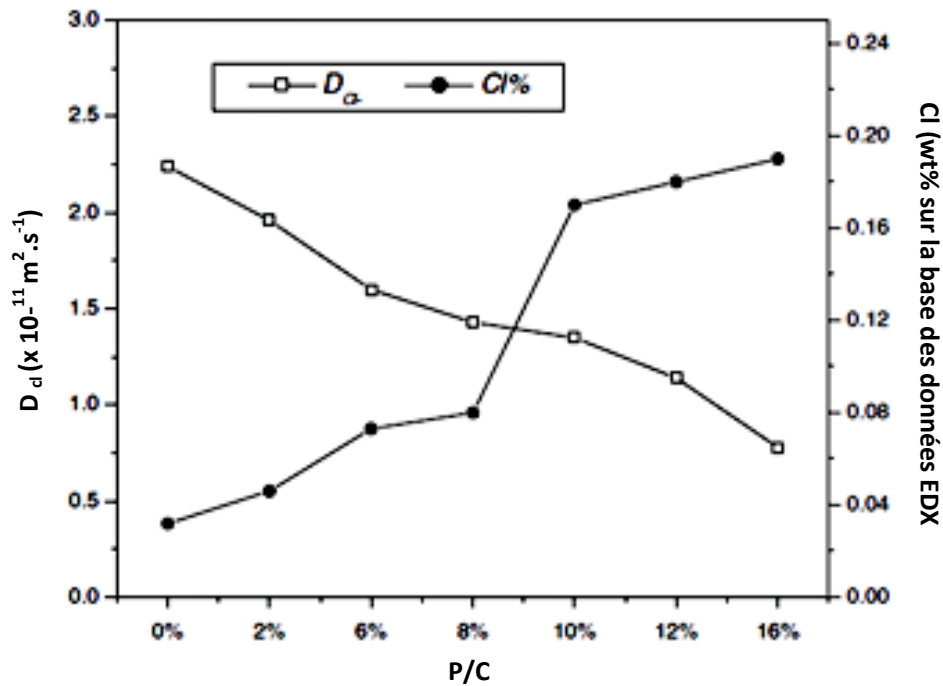


Figure 2.55. Influence du SBR sur la diffusion des ions chlorure (Yang, 2009).

Les mêmes résultats sont trouvés par (Zhong, 2002), où ils ont testé l'effet de l'ajout de 10% de latex à savoir le SBR, PVDC et le SAE sur la diffusion des chlorures des mortiers (cf. figure 2.56).

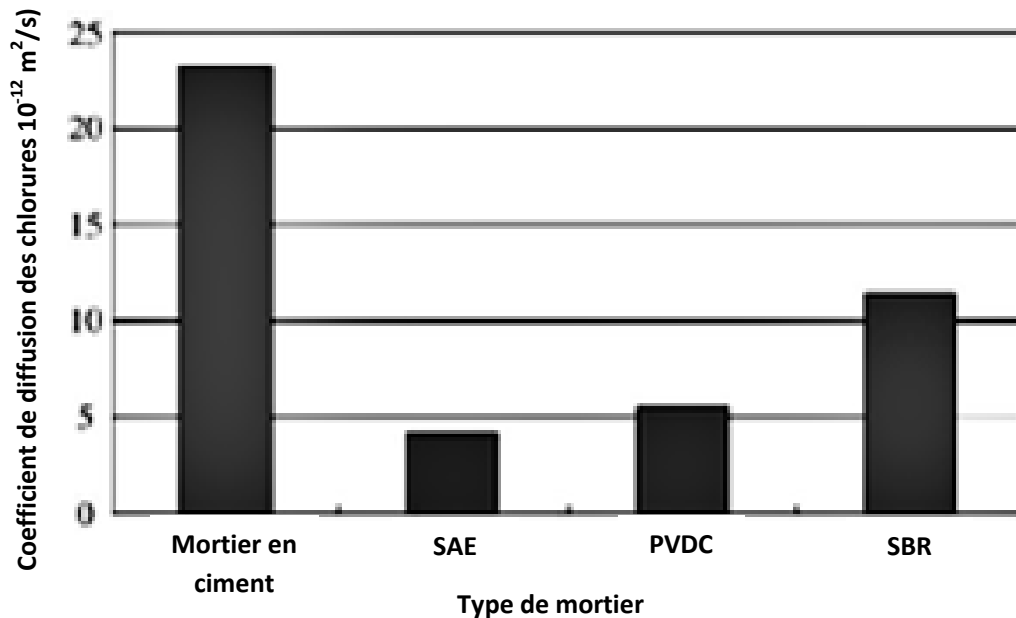


Figure 2.56. Diffusion des chlorures des mortiers (Zhong, 2002).

Aussi, l'étude menée par Aggarwal et col. (Aggarwal, 2007) a montré également que l'ajout croissant des latex de type acrylique dans les mortiers diminue la pénétration des ions chlorure (cf. figure 2.57).

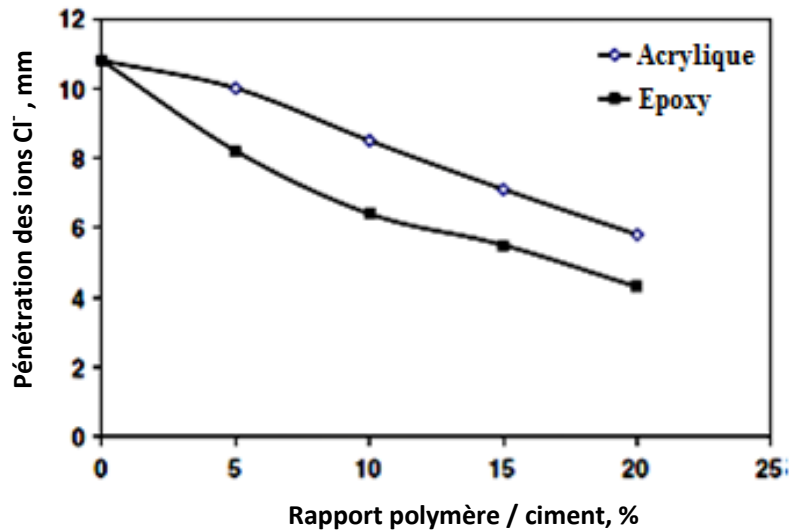


Figure 2.57. Effet de l'ajout de polymère sur la pénétration des ions chlorures (Aggarwal, 2007).

2.2.2.2.5. Carbonatation :

Plusieurs recherches ont montré que l'ajout des latex dans les mélanges à base de ciment, diminue la capacité de pénétration du dioxyde de carbone.

Aggarwal et col. (Aggarwal, 2007) ont mesuré la profondeur de carbonatation des composites contenant un polymère latex de type acrylique. Ils ont observé que l'ajout de ce polymère réduit la profondeur de carbonatation. (cf. figure 2.58).

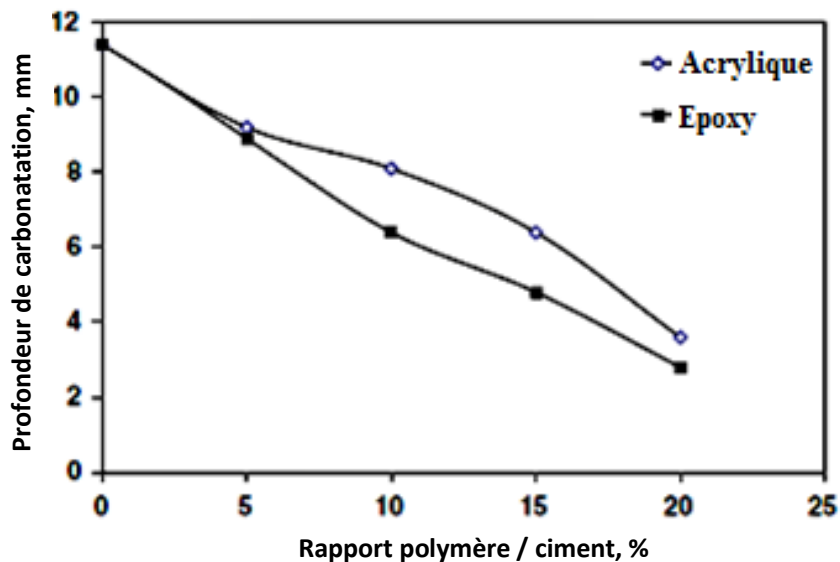


Figure 2.58. Effet de l'ajout du polymère sur la profondeur de carbonatation (Aggarwal, 2007).

2.2.2.2.6. Retrait :

Hassan et col. (Hassan, 2000) ont montré qu'une réduction considérable du retrait de séchage (50%) peut être obtenue pour les mortiers modifiés par polymères (acrylique) par rapport aux mortiers conventionnels (non modifiés), (cf. figure 2.59).

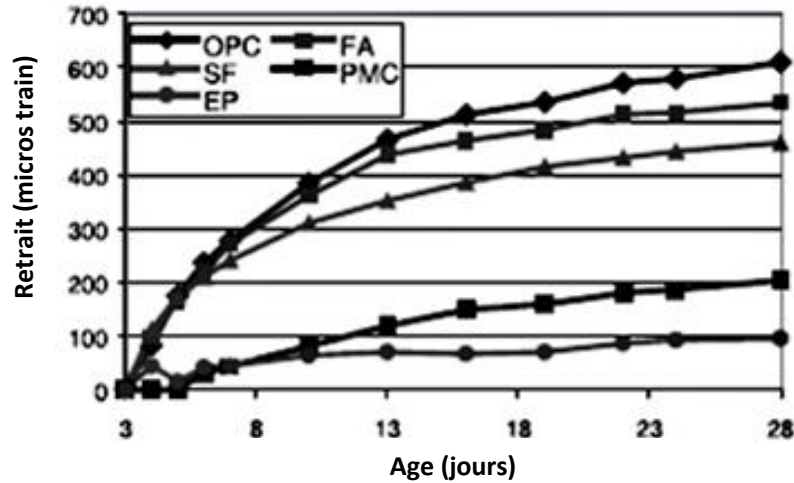


Figure 2.59. Retrait des différents mortiers de réparation (Hassan, 2000).

Wang et col. (Wang, 2010) ont montré que l'addition de 10% ou plus de SAE dans les mortiers de ciment réduit leurs retraits de façon marquée, contrairement aux faibles taux où la variation est négligeable (cf. figure 2.60).

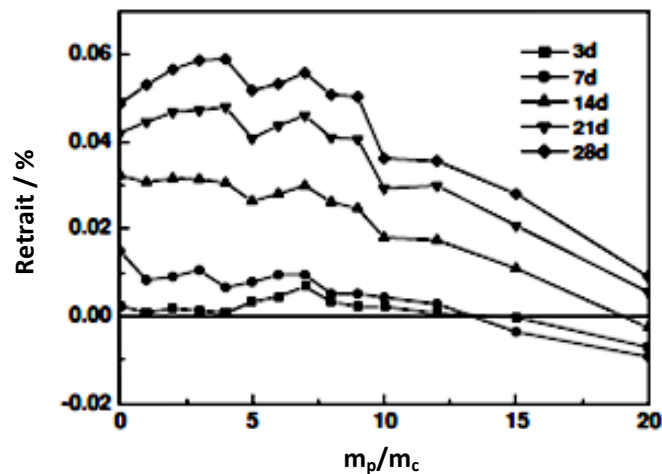


Figure 2.60. Taux de retrait des mortiers modifiés aux latex SAE (Wang, 2010).

2.2.2.3. Propriétés d'adhérence mortiers modifiés-supports :

a)- Définition de l'adhérence et l'adhésion :

Plusieurs chercheurs précisent que le but fondamental de l'utilisation des polymères dans le mélange cimentaire est l'amélioration de l'adhérence et la durabilité de l'adhésion car la qualité de la réparation et la protection des ouvrages dépend principalement de l'adhérence des mortiers au support à réparer ou à protéger (Courard, 1998) (Ngassam, 2013) (Courard, 2014).

En terme général, l'adhérence est définie comme l'énergie ou la force exercée pour séparer deux corps attachés (Pierre, 2008) (Courard, 1998). Tandis que, l'adhésion est l'ensemble des phénomènes physico-chimiques qui sont responsables de la cohésion entre deux corps (Pierre, 2008).

Généralement, la théorie d'adhésion est divisée en deux types (Pierre, 2008) (Courard, 1998) (Ngassam, 2013)

- *Adhésion mécanique* : est assurée par ancrage mécanique du matériau de réparation ou de protection qui pénètre dans les pores du support avant durcissement. La préparation de la surface à réparer ou à protéger est donc une étape essentielle pour garantir un bon ancrage du mortier (Ngassam, 2013). De plus, il faut veiller à ce que la technique de préparation (burinage, marteau-piqueur, hydro-sablage, etc.) n'endommage pas la couche superficielle du béton support et ne provoque pas le décohésion (Courard, 2004).
- *Adhésion spécifique* : elle prend en compte les interactions chimiques, électrostatiques et l'approche thermodynamique ou de mouillage (Ngassam, 2013).

b)- Différents types de tests utilisés pour mesurer l'adhérence des mortiers :

Des travaux antérieurs dans le domaine de l'adhérence ont montré que les tests de mesure d'adhérence sont généralement des tests de rupture entre deux matériaux. Ils peuvent être obtenus soit par traction, par flexion et/ou par cisaillement direct ou indirect (Benali, 2017) (Silfwerbret, 2011) (Ohama, 1995).

- Essai d'arrachement par traction directe ou pull off test :

C'est l'essai le plus utilisé dans l'industrie, du fait qu'il soit simple à réaliser au laboratoire et sur site (Pierre, 2008) (Silfwerbret, 2011). Ce test fournit de bons résultats en comparaison à d'autres tests de mesures, car il n'est pas influencé par le frottement ou d'autres forces qui influent sur les autres méthodes (Momayez, 2005). Le principe de l'essai est décrit par la norme NF EN1542 (Ngassam, 2013). Par ailleurs, il existe d'autres normes qui le décrivent avec des paramètres qui peuvent différer, ce qui peut poser des problèmes pour comparer les résultats obtenus (Courard, 2004).

La mesure est réalisée, en faisant à l'âge souhaité des carottes sur les mortiers appliqués sur les supports. Par la suite, des pastilles (disques) métalliques complétées par une tige filetée sont collées à l'aide d'une colle époxydique rapide sur la surface carottée afin de pouvoir exercer un effort de traction à l'aide d'une pompe hydraulique. Cette méthode permet de mesurer la force d'adhérence entre le support et le produit de réparation ou de protection, et d'observer également le type et la localisation de la rupture : adhésive à l'interface, cohésive dans le support ou dans le produit de réparation, ou mixte, (cf. figure 2.61). Dans cet essai, pour qu'un produit testé soit considéré conforme aux prescriptions, il faut une proportion plus importante de ruptures cohésives dans le support (Pierre 2008).

Le pull off test dépend de nombreux facteurs et ces derniers peuvent perturber la mesure de l'adhérence. L'épaisseur et le diamètre du disque métallique, la distance entre les carottages, la profondeur de carottage, la vitesse de mise en charge, le nombre d'essais, la perpendicularité de la traction et la cohésion du support sont autant de facteurs qui peuvent influencer les résultats (Pierre, 2008) (Courard, 2004), voir le tableau 2.1.

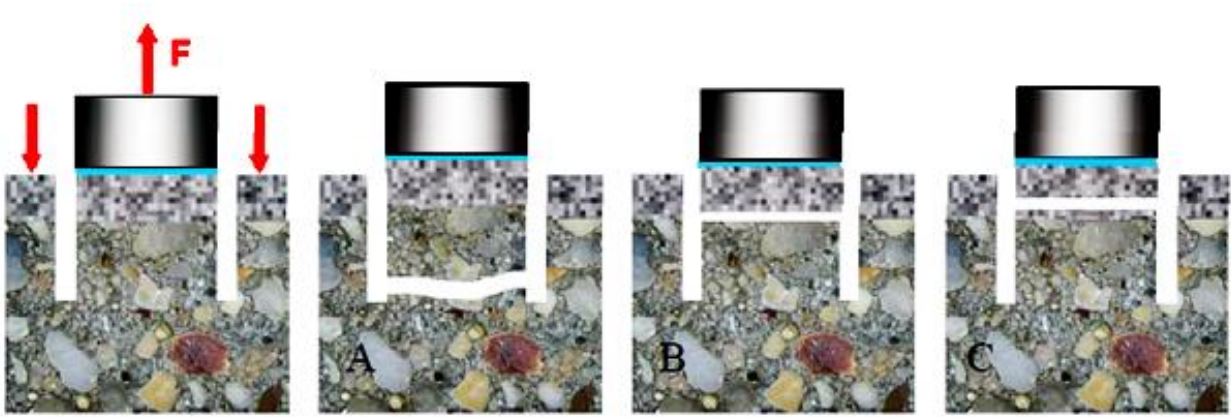


Figure 2.61. Schémas des types de rupture obtenus par le Pull off test. A) rupture dans le substrat, B) rupture à l'interface, C) rupture dans le mortier de réparation (Bakhsh, 2010).

- Essai d'adhérence en flexion :

Une autre technique, fréquemment utilisée, est l'essai d'adhérence par flexion trois-points. Le principe de cet essai est représenté dans la figure 2.64. Selon (Ngassam, 2013), cette technique est facile et ne nécessite pas un appareillage sophistiqué. Les éprouvettes utilisées sont dites bicomposées. Leurs dimensions restent les mêmes que celles utilisées pour les essais mécaniques ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) ; mais elles se composent de deux parties différentes pour simuler un système de réparation (cf. figure 2.62).

Le déroulement de la mesure d'adhérence est identique à celui de la mesure de la résistance à la flexion d'une éprouvette ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$). L'éprouvette est centrée sur les deux appuis inférieurs en s'assurant que l'appui supérieur sollicite l'interface support/mortier de réparation. En outre, le calcul de la valeur d'adhérence (résistance à la flexion) des composites est élaboré en utilisant la même équation utilisée pour les éprouvettes homogènes. Cette technique permet d'observer le type et la localisation de la rupture : adhésive à l'interface, cohésive dans le support ou dans le produit de réparation.

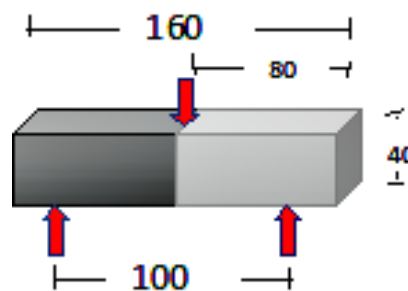


Figure 2.62. Principe du test d'adhérence par flexion 3 points sur les mortiers.

Chapitre 2. Propriétés des mortiers modifiés au latex

Tableau 2.1. Principales normes et standards relatifs à la mesure de l'adhérence sur béton ou de la cohésion des surfaces (Courard, 2004).

Norme	Objet	Matière et épaisseur du disque	Diamètre ou section des disques	Profondeur carottage	Vitesse	Nombre d'essais	Prescriptions
CSA A23.2-6B	Ã	-	3,5 D _{max}	min 30 mm	100 N/s	3	
G0008	Č	-	-	-	-	-	≥ adhérence
G0007	C	-	-	-	-	-	≥ adhérence tjrs ≥ 1 MPa
NBN B14-210	A	indéformable	min 16 cm ² (mieux 50 cm ²)	≥ épaisseur réparation	progressive	5	-
NBN B15-201	A.İ	-	100 cm ²	complet	-	3/5	-
NBN B15-211	T	Acier dur	Surface de la carotte	min ≥ √S (mieux ≥ 2√S)	0,1 ± 0,05 MPa	-	-
BS1881-7	A	≥ 0,4 diamètre du disque	-	nécessaire	0,05 ± 0,03 MPa	6	-
Pr EN 1542	A	Acier : 20mm Alu : 30 mm	50 mm	15 ± 5 mm	0,05 ± 0,01 MPa	-	-
Pr EN 1766	C	-	-	-	-	-	3/2,5 MPa
CUR 20	A	Acier : 20mm Alu : 30 mm	50 ± 5 mm	15 ± 5 mm	0,05 ± 0,01 MPa	-	-

* si mesure d'adhérence, à compter à partir de l'interface

Ã = adhérence du système de réparation

Č = cohésion du système en béton

İ = traction directe

Anagnostopoulos et col. (Anagnostopoulos, 2002) ont utilisé un autre type d'essai de flexion (flexion quatre points) pour évaluer l'adhérence des éprouvettes mixtes brique/mortier représentée sur la figure 2.63. Les auteurs ont examiné ces systèmes afin de les utiliser dans la restauration des maçonneries anciennes.

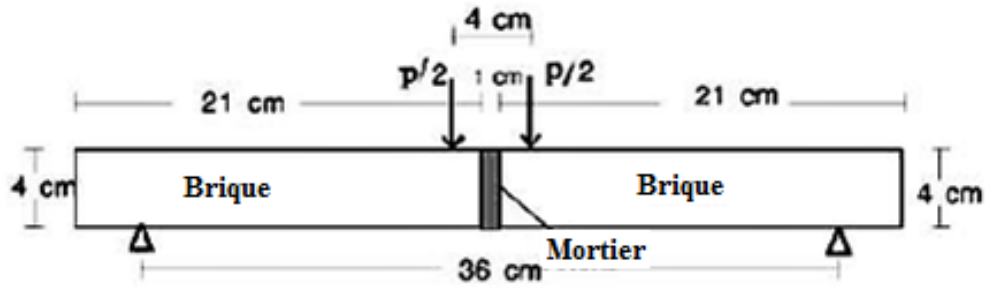


Figure 2.63. Essai d'adhérence en flexion 4 points (Anagnostopoulos, 2002).

- Essai d'adhérence par fendage :

Selon Momayez et col. (Momayez, 2005), ce test est proposé par des chercheurs japonais puis d'autres développements ont été réalisés au Brésil. Par la suite, la méthode a été adoptée comme norme ASTM C496. La méthode d'essai est simple à réaliser ; mais elle nécessite beaucoup de matière. Généralement, elle utilise le même échantillon et la même machine du test de compression standard sur des éprouvettes cylindriques ($16 \times 32 \text{ cm}^2$) (Ngassam, 2013), (cf. figure 2.64).

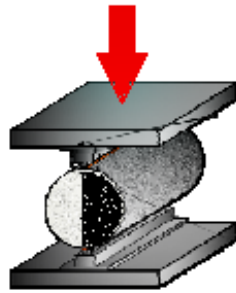


Figure 2.64. Principe de l'essai d'adhérence par fendage.

- Essais d'adhérence par cisaillement :

Une autre technique est la mesure de l'adhérence par cisaillement incliné (cf. figure 2.65). Les essais peuvent être réalisés avec des éprouvettes cylindriques ou prismatiques ; de grandes dimensions ou de plus petites ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) (Ngassam, 2013). La difficulté de cette technique réside dans la confection des supports avec des angles d'inclinaison voulus (Ngassam, 2013).

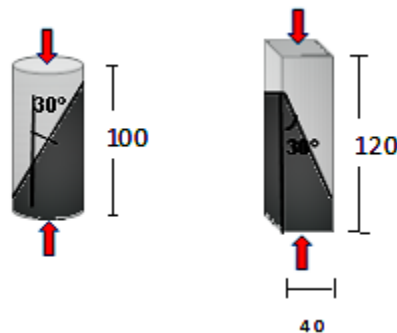


Figure 2.65. Principe de l'essai d'adhérence par cisaillement incliné.

Il existe aussi la mesure de l'adhérence par cisaillement direct (cf. figure 2.66).

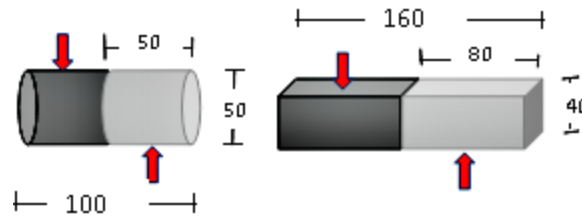


Figure 2.66. Principe de l'essai d'adhérence par cisaillement direct.

- Essai bi-surface :

Sur la base de l'essai de fendage et le test de cisaillement incliné Momayez et col. (Momayez, 2005) a développé une nouvelle méthode de cisaillement direct appelé Bi-Surface. Selon l'auteur, cette méthode est facile à réaliser et produit des résultats cohérents (cf. figure 2.67).

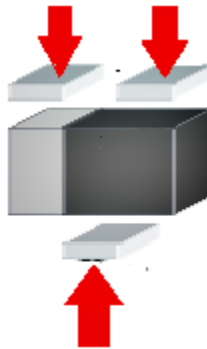


Figure 2.67. Principe de l'essai bi-surface (Momayez, 2005).

c)- Paramètres qui influent sur l'adhérence :

Dans le domaine du génie civil, la qualité de la réparation et la protection dépendent de l'adhésion du mortier au support à réparer ou à protéger. Selon plusieurs chercheurs (Pierre, 2008) (Courard, 2014), la création et la durabilité de cette liaison dépendent de plusieurs facteurs qui ont une relation directe avec le support et le mortier de réparation.

Dans ce qui suit, nous présentons les paramètres que nous pensons être les plus importants qui ont une incidence sur l'adhérence des mortiers modifiés aux différents supports.

- Paramètres intrinsèques dépendant des mortiers :

- ✓ Influence de la concentration et du type de polymères :

Dans leur étude Afridi et col. (Afridi, 1995), ont montré que l'amélioration de l'adhérence dépend du type et de la quantité de polymère utilisé. À travers ce travail, les auteurs ont trouvé que l'ajout des polymères de type EVA, SBR, et Va/VeoVa sous forme de latex ou de poudre augmente l'adhérence des mortiers sur des supports en ciment portland (cf. figure 2.68).

Chapitre 2. Propriétés des mortiers modifiés au latex

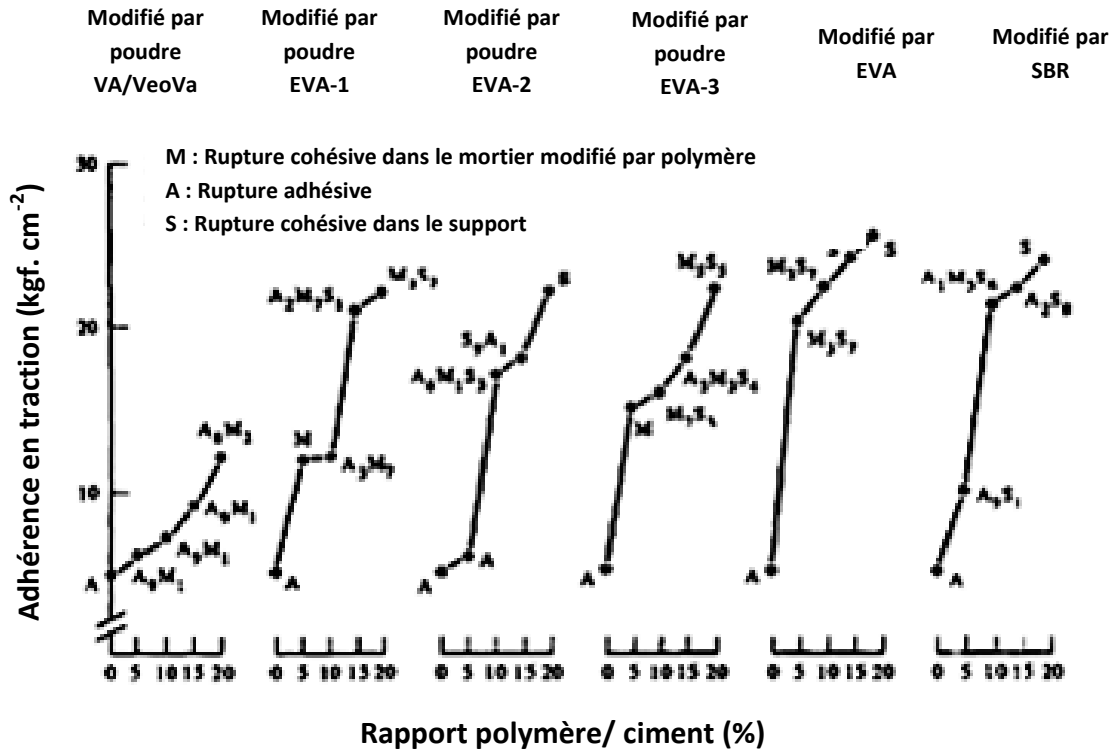


Figure 2.68. Influence du type de polymère et du rapport P/C sur l'adhérence des mortiers modifiés (Afridi, 1995).

Cependant, les modes de rupture sont différents selon le type de polymère utilisé, sa nature liquide ou en poudre ou encore sa concentration (cf. figure 2.69). Avec 20 % de latex ÉVA et SBR, la rupture est purement cohésive dans le support. Pour les latex sous forme de poudre nommés EVA-1 et EVA-3, la rupture est cohésive dans le support ; mais aussi dans la couche du mortier modifié. En revanche, avec EVA-2 et à partir de P/C égal à 15 %, la rupture est quasiment cohésive dans le support, contrairement aux faibles taux où la rupture est adhésive.

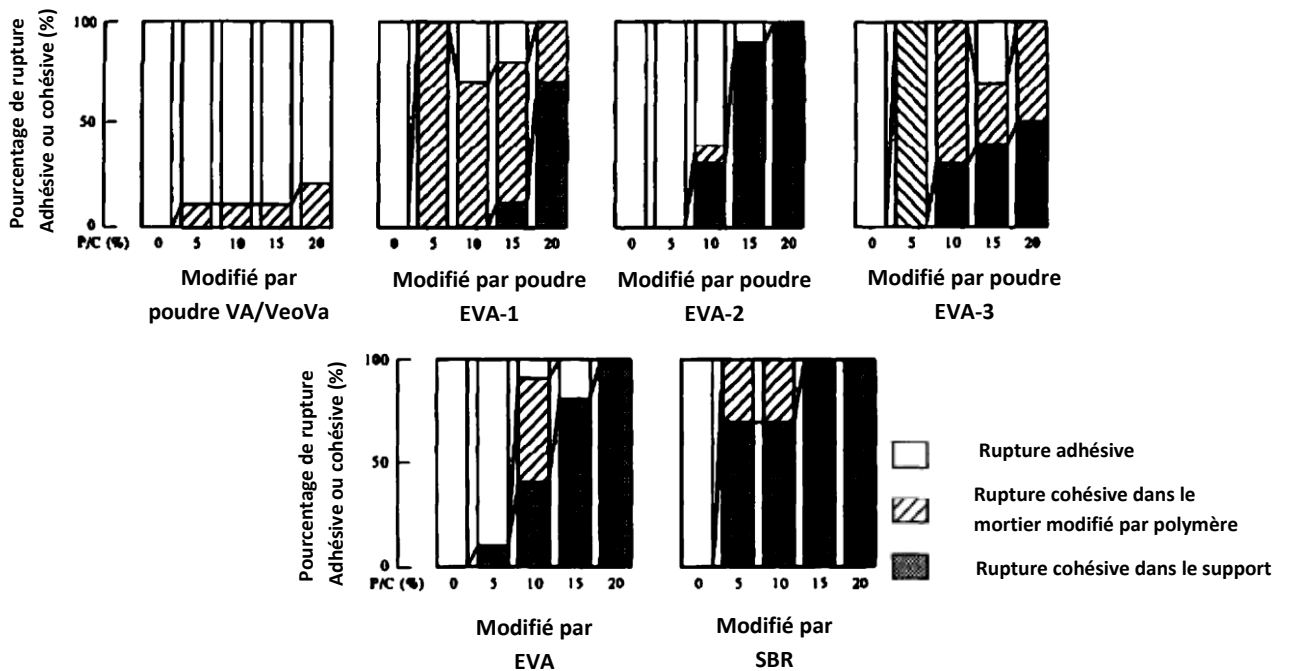


Figure 2.69. Mode de rupture des mortiers modifiés par des polymères (Afridi, 1995).

Mansur et col. (Mansur, 2009) ont également trouvé que l'ajout de deux poudres re-dispersibles de type ÉVA dans les mortiers avec un rapport P/C varie de 5 à 15%, a augmenté la force de liaison de près de 40% par rapport au mortier non modifié (cf. figure 2.70).

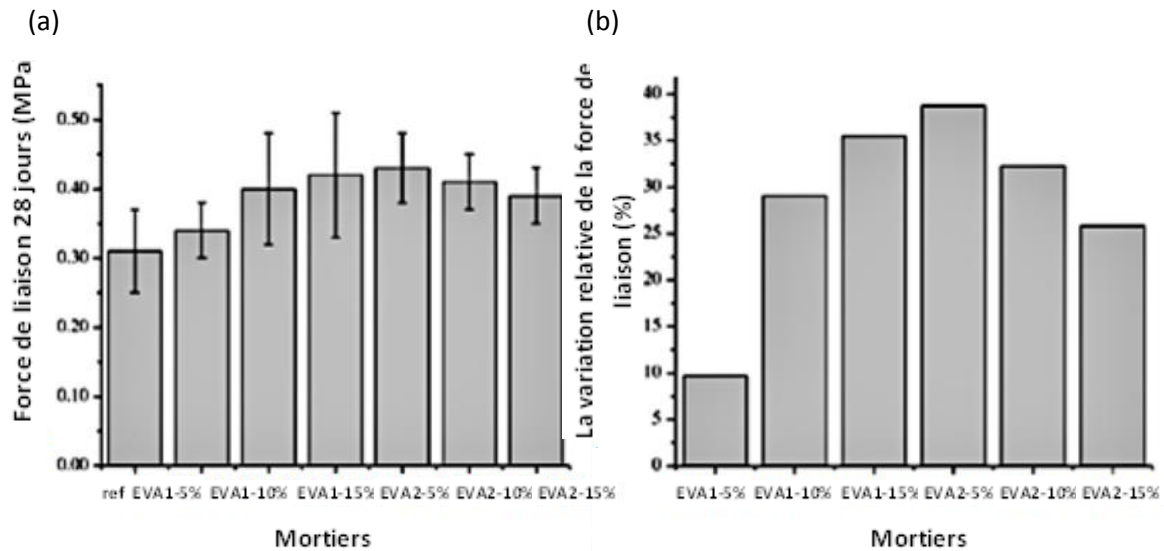


Figure 2.70 (a) Effet de la teneur en polymère sur la force de liaison de l'ÉVA aux mortiers de ciment Portland modifiés à carreaux de porcelaine. (B) Variation de la force d'adhérence due à la modification des polymères (Mansur, 2009).

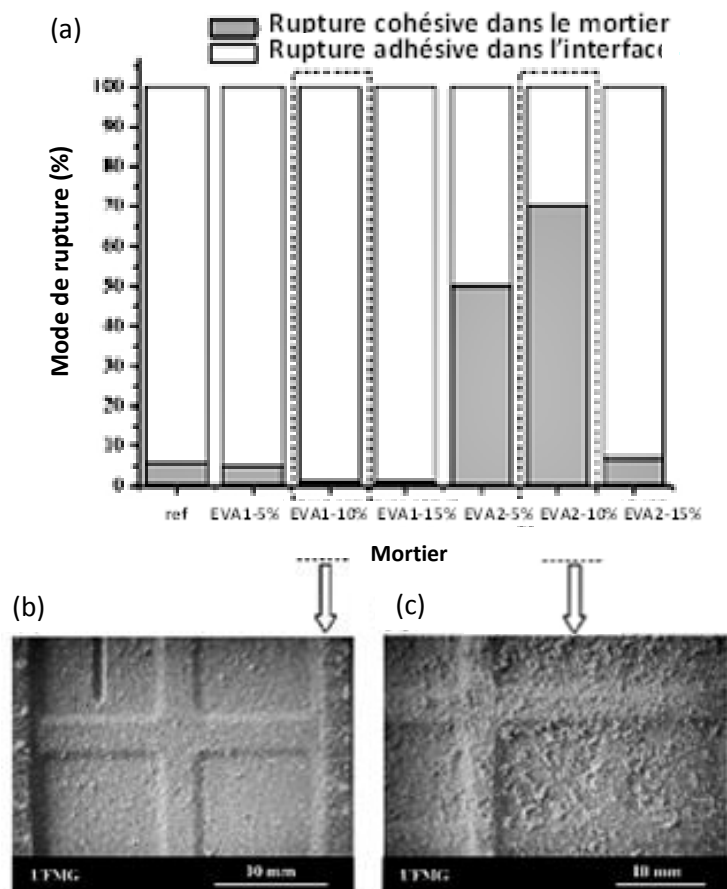


Figure 2.71. Mode de rupture des mortiers modifiés (Mansur, 2009).

Chapitre 2. Propriétés des mortiers modifiés au latex

Pour la rupture, les auteurs ont constaté qu'elle dépend de la nature de l'EVA utilisé et aussi de la quantité de polymère ajouté dans le mélange. Les mortiers modifiés avec l'EVA1 et l'EVA2-15% ont montré une rupture adhésive à l'interface carrelage / mortier modifié ($\geq 93\%$), semblable aux mortiers de référence. En revanche, les mortiers modifiés par l'EVA2-5% et 10% ont montré une rupture mixte cohésive à la fois dans le mortier modifié et adhésif à l'interface (cf. figure 2.71).

Ces observations sont sûrement dues à la forte adhésion des polymères aux différents matériaux. La principale raison de l'amélioration de l'adhérence provient de la formation du film polymère et la co-matrice à l'interface du mortier modifié-support. Ces derniers viennent s'infiltrer dans les réseaux poreux des supports et former ainsi avec le support une adhésion mécanique, s'il est poreux. Pour des supports peu poreux, c'est la liaison entre le film, la co-matrice et le support qui peut augmenter l'adhérence en comblant les pores et les fissures, existants au niveau de l'interface (Pierre, 2008) (Ngassam, 2013) (Mansur, 2009).

✓ *Influence de la mouillabilité, les conditions de cure et l'âge:*

Luc Courard dans ses travaux (Courard, 1998) (Courard, 2004) (Courard, 2014) a défini la mouillabilité comme étant la facilité avec laquelle le liquide va s'étaler sur la surface du support. Il a précisé que le mortier doit avoir une bonne mouillabilité afin d'augmenter la surface de contact effectif. Ce qui améliore la force de liaison. On ne trouve dans la littérature que très peu d'études consacrées à l'étude de l'influence de l'âge et des conditions de cure sur l'adhérence des mortiers modifiés aux latex. Selon Coville et col. (Coville, 1999) la force de liaison, des mortiers modifiés au latex sont très influencés par les conditions de cure. Une cure humide ne semble pas être bénéfique à l'adhérence. La formation du film de latex nécessite l'évaporation de l'eau interstitielle, une action qui est empêchée par le procédé de durcissement humide. Donc un durcissement sec, paraît essentiel pour la valeur finale de l'adhérence.

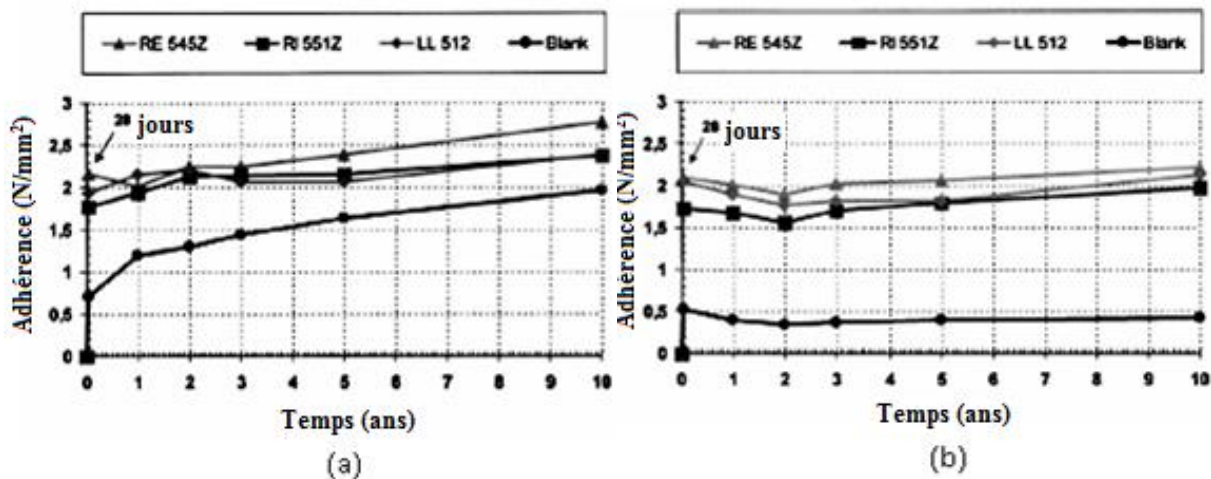


Figure 2.72. Adhérence des mortiers modifiés (N / mm^2) (a) Formulation 1: exposition à l'extérieur. (b) Formulation 1: exposition intérieure (Schulze, 2001).

Quant à l'évolution de l'adhérence à long terme des mortiers modifiés par des polymères (Schulze, 2001) ont mesuré la force de liaison des mortiers pendant une durée de 10 ans dans deux climats différents, intérieurs et extérieurs. Ils ont constaté que l'adhérence des mortiers augmente avec l'ajout du polymère ; elle augmente également en fonction du temps pendant les dix années de conservation en climat extérieur. Toutefois, ils ont remarqué que

l'adhérence, en climat intérieur, reste pratiquement inchangeable après 28 jours pour tous les mortiers et que les mortiers modifiés par l'ÉVA développent l'adhérence la plus élevée (voir figure 2.72).

- Paramètres extrinsèques dépendant du support

- ✓ *Influence de la porosité du support :*

Selon plusieurs chercheurs l'un des principaux facteurs qui influe sur l'adhérence des mortiers aux différents supports est la porosité de ces derniers.

Mansur et col. (Mansur, 2009) ont développé un modèle qui explique le mode d'interaction entre les mortiers modifiés avec l'ÉVA et non modifiés et les différents supports ; à savoir supports poreux avec forte absorption d'eau (abs > 6% (wt)), et des supports avec faible absorption d'eau. Selon ce modèle, la forte interaction des mortiers modifiés aux supports poreux est due, comme nous l'avons mentionné auparavant, à la forte adhésion mécanique formée entre la co-matrice, le film polymère et le réseau poreux du support. Le latex et les hydrates de ciment peuvent s'infiltrer dans le réseau poreux. Aussi, ils ont observé qu'en plus de l'adhésion mécanique et les forces de Van der Waals, des liaisons hydrogènes peuvent être développées entre les groupes silane de la surface du support poreux et la polyalcoolvinylique provenant de l'hydrolyse de l'ÉVA. Par contre, pour les mortiers témoins, seuls les liaisons mécaniques et les forces de Van der Waals sont responsables de l'interaction mortiers-support, ce qui les rend moins adhérents que les mortiers modifiés.

Toutefois, les mêmes interprétations sont préconisées pour les supports non poreux, sauf qu'ils ont constaté que l'adhésion mécanique est négligeable pour ces supports (faible porosité) (cf. figure 2.73).

La faible absorption en eau implique une haute teneur en eau à l'interface, qui se traduit par une zone de transition poreuse, ce qui favorise la précipitation des cristaux de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ près de l'interface. Ces deux aspects réduisent la résistance de liaison du système. Tandis que pour les mortiers modifiés, les polymères viennent combler les pores à l'interface ce qui tend à augmenter la liaison des mortiers modifiés par rapport aux mortiers non modifiés.

- ✓ *Influence de la rugosité :*

La rugosité est obtenue par le traitement de surface du support par différentes méthodes telles que : la méthode de brossage ou le sablage, etc. (Courard, 2000). En outre, le degré de rugosité peut être mesuré par la méthode dite tâche de sable, ou par la méthode profilométriques (Ngassam, 2013).

D'après plusieurs chercheurs (Courard, 2000) (Momayez, 2005) (Garbacz, 2006), l'augmentation de la rugosité des surfaces des supports peut favoriser l'accrochage mécanique qui est l'un des mécanismes fondamentaux de l'augmentation de la force de liaison. En effet, dans leurs enquêtes Momayez et col. (Momayez, 2005) ont étudié l'effet de la rugosité de la surface sur la force de liaison de six mortiers de réparation. Deux rugosités à savoir haute et faible ont été utilisées. Pour la mesure de la force de liaison, les auteurs ont utilisé les essais suivants : pull off, cisaillement incliné, fendage et cisaillement Bi-surface. Ils ont trouvé que la haute rugosité de la surface favorise la force de liaison.

De plus, cette augmentation est plus ou moins importante selon le type de l'essai utilisé. Ces augmentations ont été en moyenne de 9% pour le pull off, 13% pour le fendage, 19% pour le cisaillement bi-surface, et 25% pour le cisaillement incliné. Ce travail montre également que l'effet de la rugosité est plus important pour les matériaux peu adhérents, constitués de ciment, alors qu'il est plus faible pour les mortiers contenant 20% de SBR qui ont une adhésion plus élevée, voir les figures 2.74.

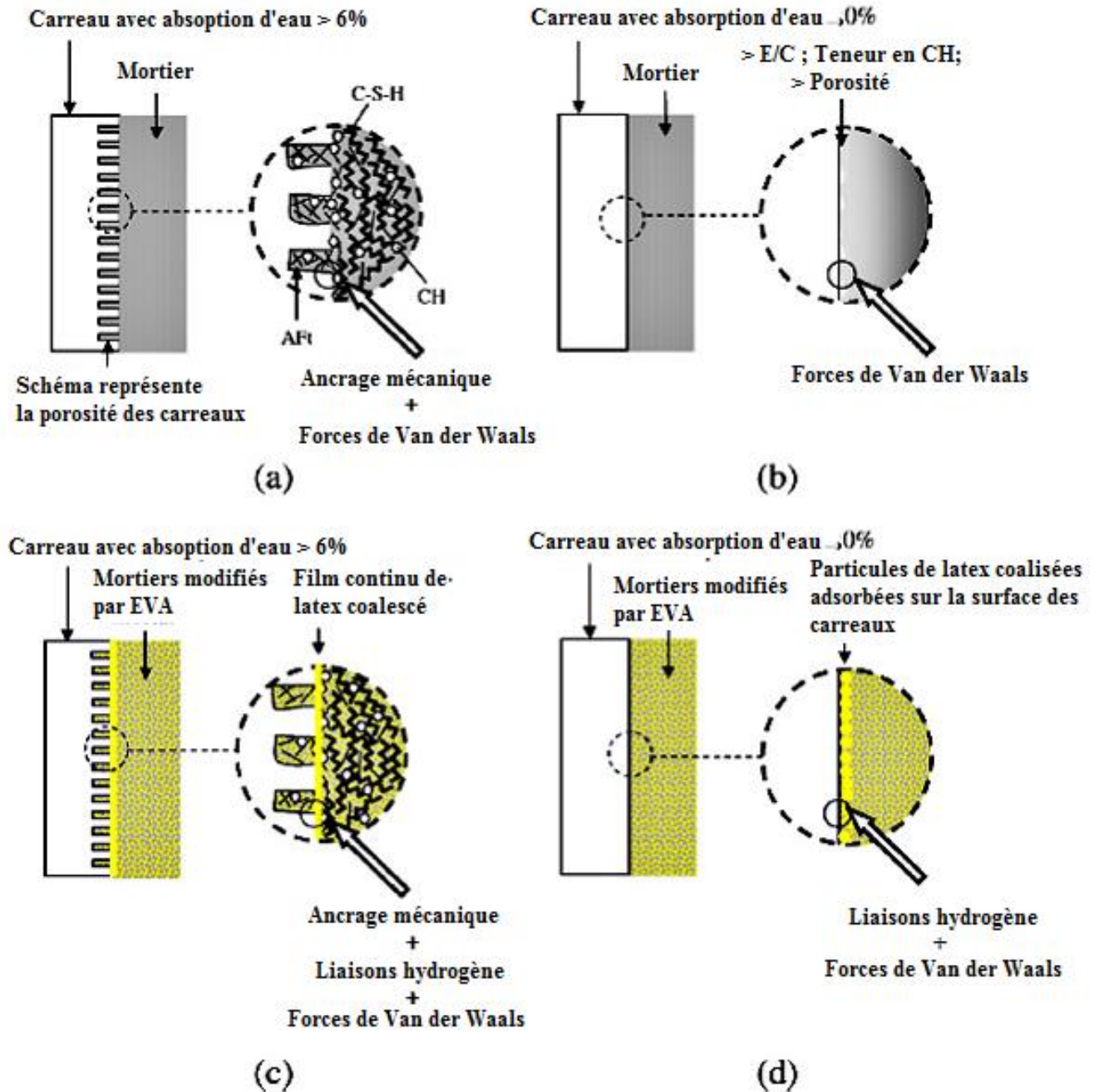


Figure 2.73. Schéma des types d'interactions développées entre divers supports et les mortiers modifiés par l'ÉVA en fonction de l'absorption d'eau (Abs) des supports utilisés. (A) Abs > 6%, mortier ordinaire; (B) Abs → 0%, mortier ordinaire; (C) Abs > 6%, mortier modifié à l'ÉVA; (D) de 0% → Abs, mortier modifié à l'ÉVA (Mansur, 2009).

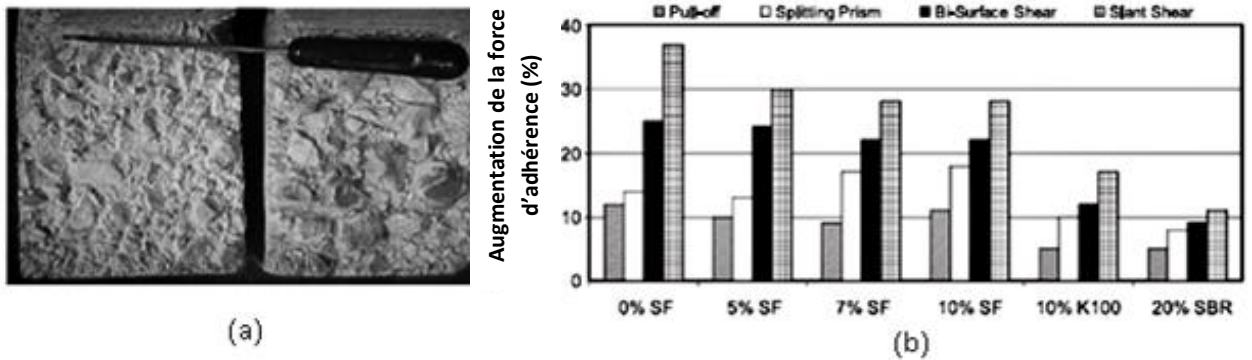


Figure 2.74. Influence de la rugosité sur l'adhérence des mortiers (a) Rugosités de surface étudiées (b) Pourcentage d'augmentation de l'adhérence sur surface très rugueuse par rapport aux surfaces peu rugueuses (Momayez, 2005).

✓ *Influence de la saturation en eau :*

Il a été rapporté que l'adhésion dépend de nombreux phénomènes qui ont lieu dans la zone d'interface (Pierre, 2008) (Ngassam, 2013) (Mirza, 2014). Parmi ces phénomènes, l'humidification de la surface du support avant la réparation (Courard, 2011).

Certains travaux montrent (Ngassam, 2013), que les transferts d'eau à l'interface support-mortier de réparation peuvent créer une zone de grande porosité, dont l'épaisseur peut varier de 10 à 100 μm ; ceci tend à diminuer la force de liaison. La présence de cette zone peut résulter de deux phénomènes :

- Si le support est sursaturé en eau, le phénomène de capillarité n'existe pas, il reste à sa surface un mince film d'eau qui provoque une augmentation du rapport (E/C) à l'interface, et donc l'augmentation de la porosité dans cette zone.
- Si le support est sec, il absorbe rapidement l'eau du mortier frais, ce qui entraîne la chute du rapport (E/C) à l'interface, et donc une hydratation incomplète du ciment.

Pour ces raisons Courard et col. (Courard, 2011) ont lancé un vaste projet de recherche pour connaître les meilleures spécifications et les bons critères de performance des supports pour améliorer la force de liaison de ces supports aux mortiers de réparation. Un essai a été développé pour évaluer l'humidité optimale de conditionnement des supports en béton avant l'application du matériau de réparation; cela a été calibré et comparé à l'aide d'essais destructifs et non destructifs sur trois types de béton et deux types de préparation de surface.

Afin d'évaluer les différents niveaux de saturation, des échantillons de béton ont mûris dans plus de 12 modes de conservation. Enfin, les mortiers de réparation ont été appliqués sur les supports en béton et l'adhérence a été mesurée pour différents niveaux de saturation de la surface. Les résultats de cette étude ont montré que des niveaux de saturation supérieurs à 50% et inférieurs à 90% sont recommandés pour favoriser l'adhérence des mortiers aux supports en béton.

- Autres paramètres :

- ✓ *Influence de la méthode d'essai:*

De nombreux chercheurs (Ohama, 1995) (Naderi, 2012) (Silfwerbret, 2011), ont conclu que la mesure de la force d'adhérence est dans une large mesure influencée par le choix de la méthode d'essai. Selon (Naderi, 2012), les essais de traction directe donnent les plus faibles valeurs ; en revanche, les essais de cisaillement par compression donnent les plus grandes.

Ces résultats sont confirmés par l'étude menée par (Momayez, 2005) où ils ont montré que les résultats obtenus avec différents essais (Pull off, cisaillement incliné, fendage et bi-surface), réalisées sur plusieurs formulations de mortiers, sont différents. Les auteurs ont observé que les valeurs les plus élevées sont obtenues par les éprouvettes sollicitées au cisaillement par compression. En revanche, les plus faibles, sont obtenues par les essais de traction directe « pull off » et le fendage, voir les figures 2.75 (a) et (b).

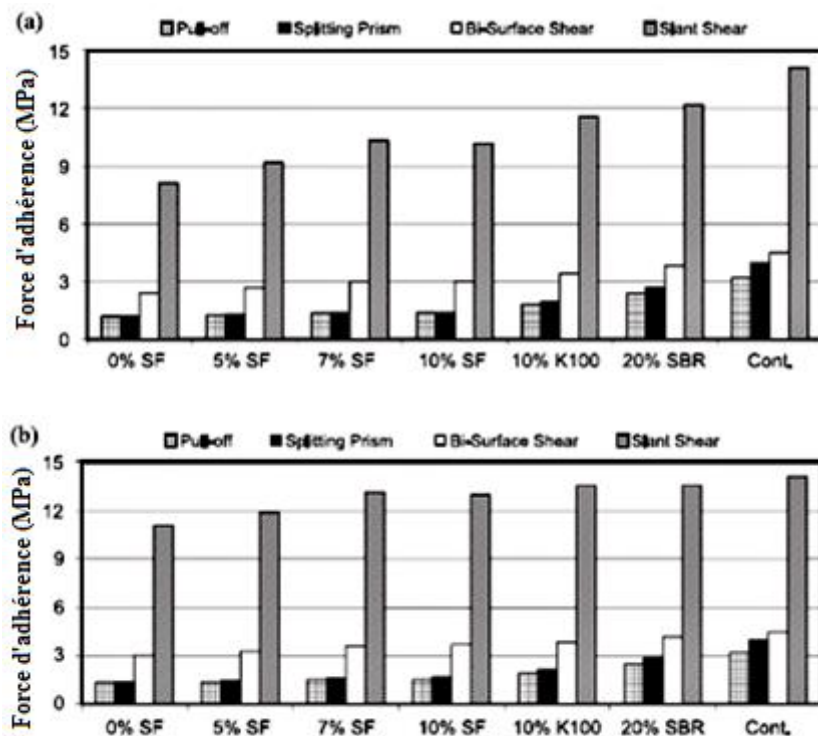
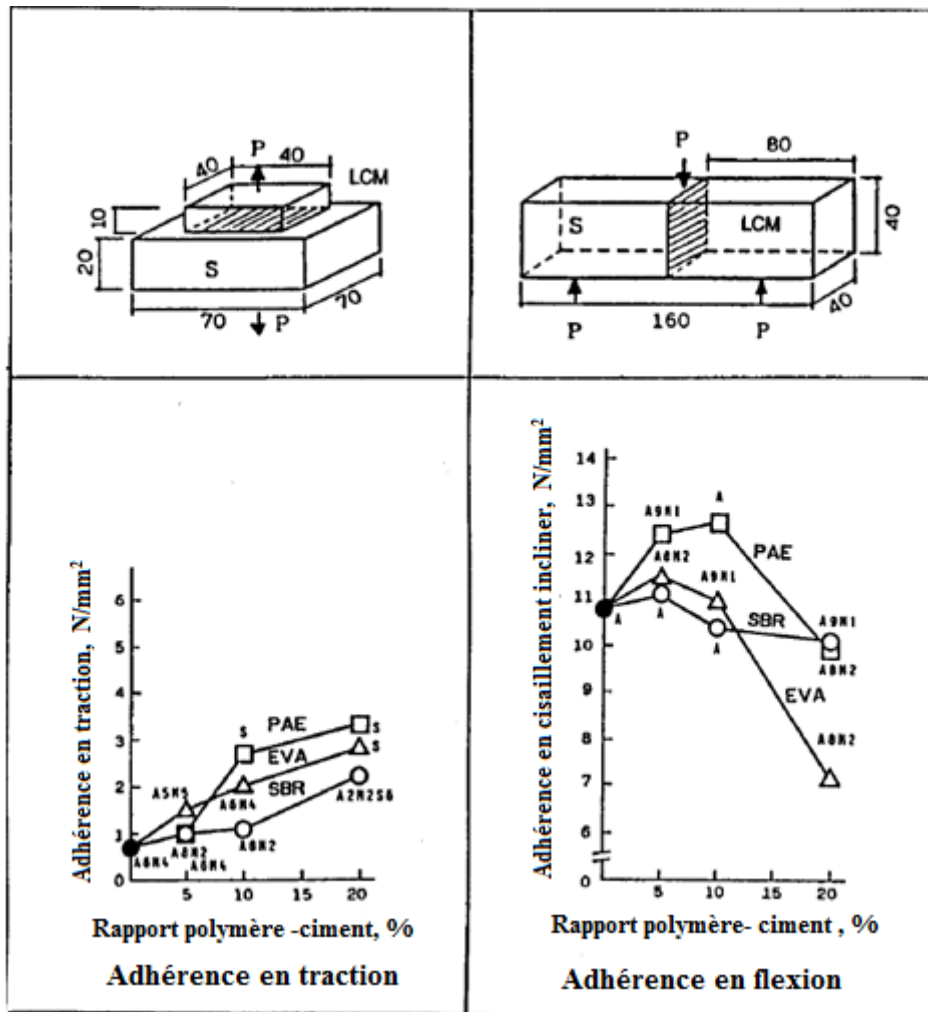


Figure 2.75. Mesure de la force de liaison par différentes méthodes: (a) faible rugosité et (b) rugosité élevée (Momayez, 2005).

Les mêmes tendances ont été trouvées par Ohama et col. (Ohama, 1995), où il a effectué des mesures d'adhérence en traction directe « pull off » et en cisaillement par compression. Il a observé qu'avec l'essai de traction directe, l'adhérence est améliorée avec l'augmentation du rapport P/C. Par contre, avec l'essai de cisaillement en compression, à partir des rapports P/C égal à 5 ou 10 %, selon le latex utilisé, les valeurs d'adhérence chutent, voir la figure 2.76.



Dans les méthodes d'essai, S: Support
 LMC: Mortier modifié par latex
 ■ : Joint de liaison
 P: Charge

Unité de la taille des des spécimens : mm

Type de rupture,

A: rupture adhésive (dans l'interface)
 M: rupture cohésive (dans le mortier modifié au latex)
 S: rupture cohésive dans le support (dans le mortier de ciment ordinaire)

Figure 2.76. Essais d'adhérence en traction directe et cisaillement par compression, résultats pour différentes teneurs en polymères (Ohama, 1995).

2.3. Les applications typiques des mortiers modifiés au latex:

Toutes les propriétés que nous venons de présenter dans le détail, permettent l'identification des applications potentielles des mortiers modifiés aux polymères. Nous avons montré qu'ils améliorent l'adhérence, augmentent la résistance à la traction, et réduisent ainsi la tendance à la fissuration et le décollement.

Les latex agissent également comme des agents réducteurs d'eau, ce qui se traduit par l'augmentation de la résistance, une faible porosité et la meilleure maniabilité. Ils sont

largement utilisés pour fabriquer les sols et les revêtements des ponts avec des épaisseurs qui ne dépassent pas les 30 mm (Fowler, 1999).

En outre, les mortiers modifiés au latex trouvent des applications pour (Salbin, 1996) (Ohama, 1995) (Sivakumar, 2011) (Zohhadi, 2014) : les chapes, les mortiers de jointoiement des maçonneries en briques et les carreaux de céramique, les mortiers de protection et d'isolation extérieurs, les mortiers pour les finitions architecturales, les revêtements de tuyauterie, les revêtements des ponts et surtout pour les travaux de réparation. De plus, ils ont été utilisés pour les planchers porteurs, les structures à haute performance, les bâtiments de transformation des aliments, les conduits d'égout, les réservoirs de stockage de l'eau de mer, les usines de dessalement et les usines d'eau distillée, les structures marines, les panneaux muraux, les doublures de tunnels préfabriqués, les éléments des tunnels et les piscines.

2.4. Conclusions :

Dans ce chapitre, on s'est intéressé aux mortiers modifiés au latex. Une étude de leur comportement à l'état frais, durci et de durabilité semblait d'une grande utilité afin de mieux comprendre l'effet de l'intégration de ces latex polymères dans les matériaux cimentaires. Les principaux résultats publiés ont montré que l'incorporation des latex dans les mortiers entraîne une nette amélioration dans leurs propriétés rhéologiques, mécaniques et de durabilité.

Pendant le durcissement de ces mortiers, le polymère est filmifié et la phase liante est composée donc de films polymères entremêlés aux hydrates de ciment (co-matrice). Pour cela, une période de conservation sèche plus la période humide est nécessaire pendant la maturation du mortier afin d'assurer la filmification du polymère. La force de liaison liant-granulat est dans ce cas, notamment améliorée. De plus, la porosité des mortiers modifiés par des polymères diminue, entraînant l'augmentation de leurs propriétés mécaniques, de leur adhérence aux différents supports et la diminution de leur perméabilité.

Ces résultats montrent qu'on peut attendre des durées de vie supérieures pour les ouvrages réalisées avec des liants hydrauliques modifiés.

Des études complémentaires sont donc nécessaires pour estimer l'utilisation des latex en substitution du ciment, au lieu d'être utilisé comme ajout au ciment.

Chapitre 3. Matériaux et méthodes

3.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons présenter les procédures relatives à la préparation, la confection et la cure des mortiers testés, ainsi qu'une description des méthodes expérimentales préconisées. Les résultats obtenus nous permettront par la suite de conclure l'effet de l'incorporation des latex (SBR et SA) sur les mortiers de ciment Portland.

3.2. Choix des matériaux:

Les matériaux de base utilisés pour formuler les mortiers de laboratoire sont les suivants :

3.2.1. Le ciment :

Dans cette recherche, la confection des corps d'épreuves a été faite au sein du laboratoire EOLE (Université de Tlemcen). Tous les mélanges formulés sont à base d'un ciment composé CEM II/A 42.5, qui répond à la norme algérienne NA 442 (NA 442, 2001). Ce type de ciment est fabriqué par la société des ciments de Béni-Saf de la wilaya d'Ain-Temouchent. Il est le ciment le plus utilisé pour les constructions dans toute la région de Tlemcen. Les compositions chimiques et minéralogiques (Bogue) de ces ciments sont présentées respectivement dans les tableaux 3.1 et 3.2. Les analyses chimiques et les compositions minéralogiques ont été réalisées dans le laboratoire d'analyse de la cimenterie.

Tableau 3.1. Composition chimique du ciment de Béni-saf.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl	P ₂ O ₅	TiO ₂	PF
22,17	6,18	3,62	59,45	1,05	2,63	0,49	0,19	0,004	0,18	0,43	2,62

Tableau 3.2. Composition de Bogue minéralogique du ciment de Béni-saf.

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Gypse
55.65	20.18	9.71	9.33	5.27

On remarque que ce ciment (CPJ CEM II/A 42.5) se caractérise par une forte teneur en silice et une faible teneur en Al₂O₃ (conduit à une faible quantité de C₃A + C₄AF).

3.2.2. Les caractéristiques physico-mécaniques des ciments :

L'étude des caractéristiques physico-mécaniques des ciments a été réalisée au laboratoire EOLE (Université de Tlemcen).

3.2.2.1. Masses volumiques apparente et absolue :

Les masses volumiques apparente et absolue ont été déterminées respectivement en utilisant un entonnoir porté par un trépied, muni d'une passoire et d'un opercule mobile, placé au-dessus d'un récipient calibré (cf. figure 3.1), tandis que pour la masse volumique absolue la méthode la plus pratique le densitomètre Le Chatelier est adoptée NF P 18-558 (P 18-558, 1990) (voir figure 3.2).



Figure 3.1. Dispositif utilisé pour mesurer la masse volumique apparente.



Figure 3.2. Dispositif utilisé pour déterminer la masse volumique absolue.

Pour chacune des masses volumiques caractérisées, nous avons réalisé trois essais. Les résultats des masses volumiques apparentes et absolues sont récapitulés dans le tableau 3.3.

3.2.2.2. Essai de consistance :

La consistance de la pâte caractérise sa fluidité. L'objectif de cet essai est de définir la quantité d'eau nécessaire pour obtenir la consistance dite normalisée. Cette dernière a été mesurée par l'appareil Vicat conformément aux prescriptions de la norme NF EN 196-3 (NF EN 196-3+A1, 2009), en mesurant l'enfoncement dans la pâte, d'une tige cylindrique sous l'effet d'une charge constante (cf. figure 3.3).



Figure 3.3. Essai de consistance.

Les résultats concernant la consistance des pâtes de ciment CPJ CEM II/A 42.5, que nous avons utilisés, sont résumés dans le tableau 3.3.

3.2.2.3. Essai de prise :

Nous avons utilisé le même appareil qui est utilisé pour mesurer la consistance (appareil Vicat) (cf. figure 3.3), à l'exception de la sonde qui cisaille l'échantillon, à un diamètre beaucoup plus petit. L'essai est réalisé selon la méthode expérimentale normalisée NF EN 196-3 (NF EN 196-3+A1, 2009), qui permet de suivre l'évolution de la structuration de la pâte de ciment et notamment le moment de sa prise, comprise entre deux échéances : le temps de début et de fin de prise Vicat, définis par des hauteurs normalisées d'enfoncement de l'aiguille. Trois essais simultanés à l'aiguille Vicat ont été réalisés sur la pâte de ciment étudiée. Le temps de début de prise Vicat est indiqué sur le tableau 3.3.

3.2.2.4. Essais mécaniques sur les mortiers normalisés :

Pour chaque échéance 2, 7 et 28 jours, nous avons effectué l'essai sur trois éprouvettes prismatiques $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ avec le mortier normalisé, préparé conformément aux prescriptions de la norme EN 196-1 (NF EN 196-1, 2016). Les essais de flexion et compression ont été réalisés) l'aide d'un portique universel didactique. Il comporte un cadre métallique avec différents perçages et un vérin hydraulique d'une capacité de 160 kN qui peut être à la fois utilisé en compression avec une vitesse de mise en charge de $2400 \pm 200 \text{ N/s}$, en flexion et en traction à une échelle de 10 kN à une vitesse de mise en charge de $50 \pm 10 \text{ N/s}$. Le tableau 3.3 résume les résultats trouvés.

Tableau 3.3. Caractéristiques physico-chimiques et mécaniques du ciment de Béni-saf.

Masse volumique apparente (T/m ³)		0.953
Masse volumique absolue (Densitomètre Le Chatelier) (T/m ³)		2.980
Consistance (%) selon NF EN 196-3		27.5
Temps de début de prise selon NF EN 196-3		2h 40
Résistance à la compression (MPa) Selon EN 196-1	2 jours	17.80
	7 jours	33.80
	28 jours	48.70
Résistance à la flexion (MPa) selon EN 196-1	2 jours	3.49
	7 jours	5.72
	28 jours	6.80

Les résultats récapitulés dans le tableau 3.3 montrent que, les masses volumiques apparente et absolue du ciment utilisé sont incluses dans l'intervalle imposé par la norme NA 231 (NA 231, 2006), compris entre 0.9 – 1.1 T/m³ pour la masse volumique apparente et 2.9 – 3.15 T/m³ pour la masse volumique absolue. En outre, la consistance obtenue est conforme à la norme NF EN 196-3 (NF EN 196-3+A1, 2009) où les valeurs sont généralement comprises entre 26 et 33%. De même, un temps de prise minimal de 60 minutes est prescrit par la norme EN 197-1 (NF EN 197-1, 2012) pour les ciments de classe 42,5. Quant aux résistances mécaniques, les résultats obtenus sont conformes aux exigences de la norme EN 197-1 (NF EN 197-1, 2012).

3.2.3. Les granulats :

Les agrégats utilisés (gravier et sable) sont obtenus après concassage des roches de calcaire de Djebel Abiod dont la carrière appartient à l'Entreprise Nationale des Granulats (ENG) à Sidi-Abdelli (Wilaya de Tlemcen). Ce choix a été déterminé par le fait que l'ENG reste le principal pourvoyeur de granulats de toute la région.

La carrière de Djebel Abiod produit des granulats calcaires concassés commercialisés en tant que classes granulaires : sable 0/4 mm et gravillons de classes 4/8, 8/16 et 16/25 mm. Les échantillons ont été préparés suivant les prescriptions de la norme NA 453 (NA 453, 2006) et les analyses granulométriques faites conformément à la norme NA 2607 (NA 2607, 2009).

Les résultats des analyses granulométriques sont présentés sur la figure 3.4.

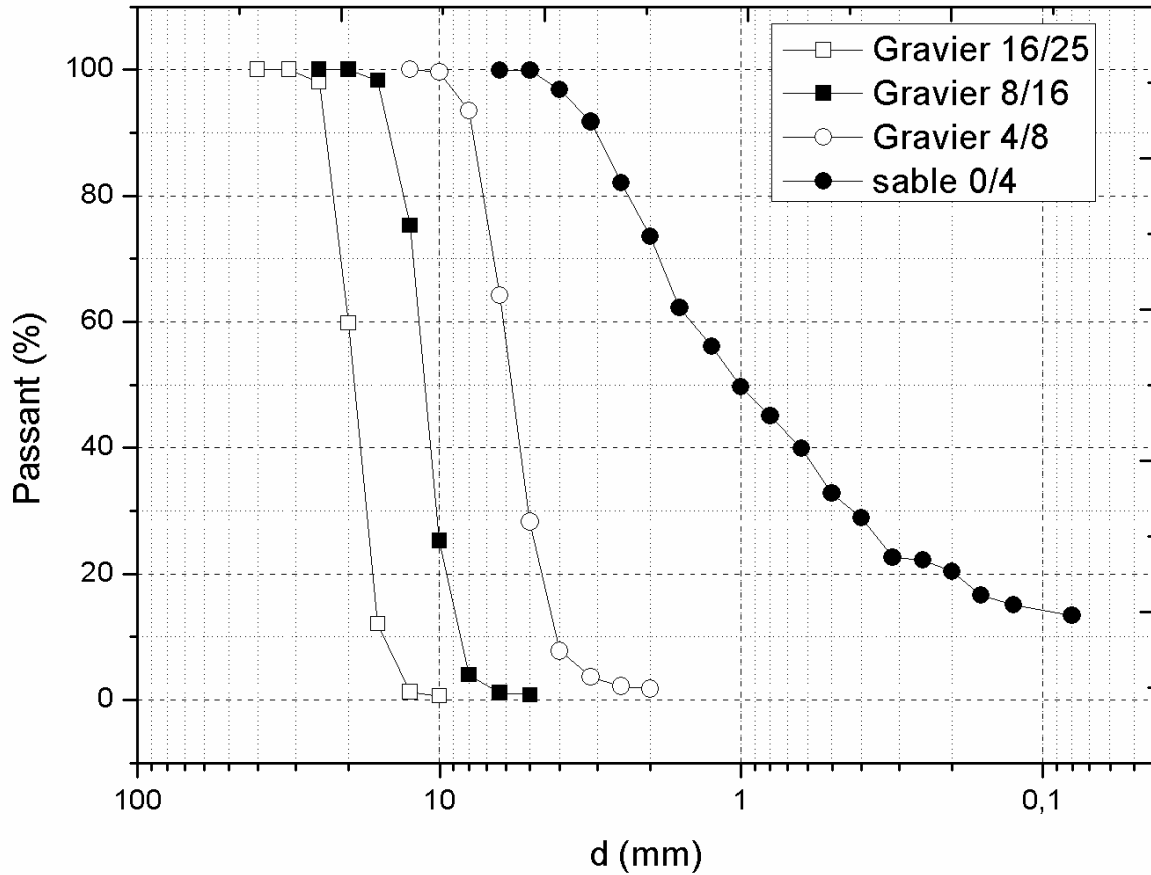


Figure 3.4. Courbes granulométriques des granulats utilisés.

Les trois classes granulaires citées auparavant ont été utilisées pour confectionner les bétons supports afin de mesurer l'adhérence des mortiers. Toutefois, pour la fabrication des mortiers le sable 0/4 mm est tamisé avec un tamis de maille 3.15 mm. Le choix du tamisage est dicté par le fait que le sable 0/3 mm est le type le plus fréquemment utilisé dans la littérature pour la préparation des mortiers. Aucun traitement par lavage ou correction de taille n'a été pratiqué pour la réalisation des différentes formulations de mortiers.

Les propriétés physiques des différents granulats de l'ENG sont regroupées dans le tableau 3.4. Tous les essais caractérisant les granulats sont effectués au sein du laboratoire EOLE (Université de Tlemcen), selon les normes internationales.

Tableau 3.4. Propriétés physiques des granulats utilisés.

Caractéristiques des granulats	Classes granulaires			
	Sable (0/4)	Gravier (4/8)	Gravier (8/16)	Gravier (16/25)
Masse volumique apparente (T/m ³)	1.427	1.350	1.420	1.370
Masse volumique absolue (T/m ³)	2.500	2.585	2.587	2.565
Équivalent de sable (%) selon NA 455	84.5	–	–	–
Module de finesse	2.99	–	–	–
Teneur en fines (%)	17%	–	–	–

3.2.3.1. Teneur en fines et module de finesse :

L'analyse granulométrique effectuée sur le sable utilisé montre une teneur en fines de 17% et un module de finesse de 2.99 pour le sable de Djebel Abiod, comme indiqué sur le tableau 3.4. Donc la carrière de Djebel Abiod produit des sables avec des modules de finesse grossiers présentant de légères discontinuités.

3.2.3.2. Équivalent de sable :

L'équivalent sable a été déterminé selon les spécifications de la norme NA 455 (NA 455, 2006), c'est-à-dire un rapport multiplié par 100, de la hauteur de la partie sédimentée à la hauteur totale du floculat et de la partie sédimentée. Comme l'indique le tableau 3.4, l'essai nous a donné un équivalent de sable de 84.5 %. Selon la norme P 18-541 (P 18-541, 1994), ce sable est propre.

3.2.3.3. Masses volumiques des granulats :

Quant aux masses volumiques, nous avons déterminé les masses volumiques apparentes et absolues des graviers conformément à la norme NA 255 (NA 255, 2005). Pour la détermination de la masse volumique absolue des graviers, nous avons utilisé la méthode de l'éprouvette graduée, qui est une méthode simple et rapide. Les graviers ont donné des masses volumiques (apparente et absolue) qui répondent aux spécifications de la norme NF EN 12620+A1 (NF EN 12620+A1, 2008). La masse volumique apparente est comprise entre 1.3 et 1.6 T/m³ et la masse volumique absolue est nettement plus élevée et est comprise entre 2.5 T/m³ et 2.7 T/m³. Les résultats des masses volumiques obtenus pour les différents graviers sont récapitulés sur le tableau 3.4.

3.2.4. Les latex utilisés :

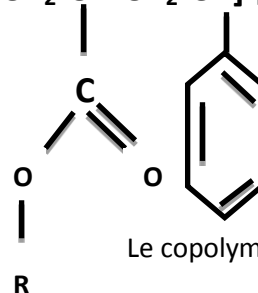
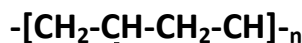
Deux polymères latex ont été utilisés : le premier est de type Styrene-Butadiène et le second un Styrene acrylique fabriqués respectivement par Sika El Djazaire et TechnaLab. Leurs caractéristiques physiques et chimiques sont consignées sur le tableau 3.5 et la figure 3.5.

Tableau 3.5. Propriétés physiques des deux types de latex (SBR et SA) utilisés.

Nom commercial du produit	SikaLatex	D-70
Nature	Copolymère le caoutchouc de Styrene Butadiène	Copolymère le Styrene Acrylique
Couleur et forme	Blanc laiteux visqueux	Blanc laiteux visqueux
Odeur	Légère	Légère
Propriétés du film formé	Non clair, souple.	Clair, dur.
Masse volumique (T/m ³)	1,02 à 20°C (d'après le fabricant). 1,01 à 19°C (mesurée)	— 1.07 à T=19°C (mesurée)
La viscosité (cps, 30°C) (Brookfield RVT20 rpm)	—	1,5-1,6
Solide total en masse (%)	50 (d'après le fabricant). 45 (mesuré par séchage).	(50±1) (d'après le fabricant). 50 (mesuré par séchage).
pH	7.5 (d'après le fabricant). 9.65 à 19° C (mesuré à l'aide d'un pH-mètre).	— pH= 7.90 à T= 19° C (mesuré à l'aide d'un pH-mètre).
La taille des particules (µm)	—	0,1-0,3
MFFT, °C	—	17
Point de transition vitreuse (Tg), °C	—	+16
Type d'agent tensio-actif	—	non ionique



Le copolymère le caoutchouc
de Styrene Butadiène



Le copolymère
le Styrene Acrylique

Figure 3.5. Structure moléculaire des latex utilisés.

3.3. Mélange et cure des mortiers:

Les mortiers ont été confectionnés dans un malaxeur de capacité trois litres (figure 3.6).



Figure 3.6. Malaxeur à mortier utilisé.

Notre programme expérimental consiste à substituer des quantités de ciment par des proportions de latex solide allant de 2.5 à 20%. Les résultats obtenus sont comparés avec des mortiers de référence qui sont de même composition ; mais dont le liant est le ciment seul.

Le rapport ciment-sable (C/S) est égal à 1/3. Ce choix est dicté par le fait que ce sont les compositions les plus fréquemment utilisées dans la littérature.

Le rapport E/C utilisé pour la fabrication des mortiers de référence est de 1/2. Ce rapport est validé après le test de résistance mécanique de deux mortiers avec deux rapports différents 0.5 et 0.55. Les résultats du comportement mécaniques à 60 jours ont été récapitulés dans le tableau 3.6. Les valeurs présentées sont la moyenne de 3 essais de traction par flexion sur des éprouvettes de dimensions 4x4x16 cm³ et la moyenne de 6 essais de compression sur les fragments des éprouvettes récupérées de l'essai de traction par flexion. Les éprouvettes ont été immergées dans l'eau à (20 ±3)° C après démoulage à 24 heures, jusqu'à l'âge de 60 jours. Le mélange des composants des mortiers de référence a été fait selon la norme EN 196-1 (NF EN 196-1, 2016).

Tableau 3.6. Performances mécaniques des mortiers témoins préparés pour E/C= 0.5 et 0.55.

Type d'essai	E/C=0.5	E/C=0.55
Résistance à la compression (MPa)	50,10	45,80
Résistance à la traction par flexion (MPa)	11,46	11,38
Fluidité (mm)	125	165

En analysant les résultats du tableau 3.6, on remarque une légère différence entre les performances mécaniques des deux formulations surtout pour la résistance à la traction par flexion.

Dans cette étude les mortiers de polymère ont été préparés par un remplacement partiel du ciment à différents rapports massiques : 2.5, 5, 10, 15 et 20%. Les rapports de substitution ont été calculés en utilisant la teneur en solide total dans le latex (cf. le tableau 3.8). Pour le rapport E/C, nous avons constaté à partir des recherches disponibles dans la littérature (cf. chapitre 1) qu'il existe deux manières pour fabriquer un mortier modifié par polymères (latex) (Barluenga, 2004) (Balayssac, 2011). La première consiste à maintenir constant le rapport E/C, afin d'obtenir une hydratation proche de la pâte de ciment (procédure typique de laboratoire). La seconde, plus répandue (la résistance mécanique des mortiers augmente), consiste à ajuster la viscosité du mélange modifié par polymère à celle du mortier ordinaire, habituellement en ajustant le rapport E/C.

Nous avons utilisé la seconde pour la présente étude, la viscosité des mortiers modifiés par le Styrène Butadiène a été ajusté pour avoir une fluidité qui varie de 125-165 mm (fluidité des mortiers utilisés dans la pratique, cf. tableau 3.8) ; tandis que ce rapport est ajusté pour avoir la même fluidité des mortiers de référence pour les mortiers modifiés par le copolymère le Styrène acrylique 125 ±5 mm. Ceci est fait en utilisant le test de la table à secousses, selon la norme ASTM C230/C230M-08 (ASTM C230, 2008) où l'étalement est la moyenne de deux diamètres perpendiculaires.

Le mélange des composants de ces mortiers polymères a été réalisé selon la méthode du pré-mouillage (cf. tableau 3.7), pour éviter d'emprisonner de l'air inutile. Pour plus de détail sur le choix de cette méthode (cf. chapitre 1).

Tableau 6. Mélanges des composants des mortiers modifiés au latex selon la méthode de pré-mouillage.

Opérations	Durée des opérations	État du malaxeur
Introduction de l'eau		Arrêt
Introduction du ciment		
	30s	Vitesse lente
Introduction du sable	30s	
	30s	Vitesse moyenne
Raclage de la cuve	15s	Arrêt
	75s	
	60s	Vitesse moyenne
	120s	Vibration
Introduction de latex	180s	Vitesse lente + vibration

Pour déterminer les paramètres mécaniques des mortiers modifiés, les moules contenant les échantillons de mortiers polymères ont été couverts d'un film plastique (figure 3.7).



Figure 3.7. Moules couverts par des films plastiques.

Après 24 heures, nous avons procédé au démoulage des échantillons que nous avons conservés dans deux cures différentes (figures 3.8, 3.9 et 3.10) :

Cure mixte : immergés totalement dans l'eau pendant 6 jours à $(20 \pm 3)^\circ \text{C}$ puis à l'air libre dans une chambre contrôlée $(20 \pm 3)^\circ \text{C}$ et $\text{HR} = 55 \pm 10 \%$ jusqu'à l'âge de l'essai.

Cure à l'aire libre : cure à l'aire libre $(20 \pm 3)^\circ \text{C}$ et $\text{HR} = 55 \pm 10 \%$ jusqu'à l'âge de l'essai.



Figure 3.8. Cure sous l'eau.



Figure 3.9. Cure à l'aire libre dans une chambre contrôlée.



Figure 3.10. Dispositif de mesure de l'humidité et la température dans la chambre contrôlée.

Pour les propriétés de durabilité, nous avons utilisé la cure mixte ; c'est-à-dire qu'après démoulage, les échantillons ont été immergés sous l'eau pendant 6 jours puis ont continué leur maturation à l'air libre jusqu'à l'âge de l'essai.

Les mortiers de référence ont été plongés dans l'eau à $(20 \pm 3)^\circ \text{C}$ jusqu'à l'âge de l'essai. En revanche, les échantillons utilisés pour l'essai d'adhérence par pull off sur les deux supports en briques et dalles en béton, ont mûri à l'environnement du laboratoire à $(20 \pm 3)^\circ \text{C}$ et $\text{HR} = 55 \pm 10 \%$ jusqu'à l'âge de l'essai, ceci pour simuler l'application. En outre, les systèmes bicomposés sont préservés dans les mêmes milieux mixtes et à l'air libre, cités auparavant.

Tableau 3.8. Détail des proportions de mélange des mortiers modifiés.

Désignation des mélanges	Sable(g)	Ciment (g)	P (g)	E/C	fluidité (mm)
M. Réf	1350	450	0	0.5	125
Le copolymère le caoutchouc de styrène Butadiène					
M. 2,5 % SBR	1350	438,75	25	0.498	125
M. 5 % SBR		427,5	50	0.48	130
M. 10 % SBR		405	100	0.425	145
M. 15 % SBR		382	150	0.35	160
M. 20 % SBR		360	200	0.25	165
Le copolymère le styrène acrylique					
M. 2,5 % SA	1350	438,75	22,5	0.498	125
M. 5 % SA		427,5	45	0.48	125
M. 10 % SA		405	90	0.425	125
M. 15 % SA		382	135	0.35	125
M. 20 % SA		360	180	0.25	125

3.4. Procédure des essais effectués

Nous avons étudié les caractéristiques des mortiers à l'état frais et à l'état durci.

3.4.1. À l'état frais :

3.4.1.1. La fluidité :

La fluidité des matériaux cimentaires est la caractéristique généralement utilisée sur les chantiers pour juger de leur comportement rhéologique et notamment leur consistance. À ce stade, les tests de fluidité ont été réalisés en utilisant le test de la table à secousses, selon la norme ASTM C 1437-07 (ASTM C143, 2007), avec un moule tronconique qui répond aux exigences de la norme ASTM C230 / C 230 M-08 (diamètres de 70 et 100 mm, hauteur de 50 mm)(ASTM C230, 2008). Trois essais ont été réalisés par composition.

Le principe de l'essai consiste à placer le mortier dans le moule en deux couches, en les piquants 20 fois par couche avec une tige métallique. On soulève ensuite le moule tronconique une (1) minute après avoir terminé la mise en place du mortier. On secoue la table 25 fois en 15 s. Une galette se forme, et on mesure ses deux diamètres perpendiculaires. L'étalement est donc la moyenne des diamètres mesurés (figure 3.11).



Étape 1. Placement du mortier dans le moule tronconique.



Étape 2. Soulèvement du moule



Étape 3. Mesure des deux diamètres perpendiculaires de la galette obtenue.

Figure 3.11. Étapes de mesure de la fluidité des mortiers.

3.4.2. À l'état durci :

3.4.2.1. Les résistances mécaniques :

Les résistances à la compression et à la traction par flexion ont été réalisées à l'âge de 7, 14, 28, 60, 90, 180 et 360 jours pour la cure mixte, ainsi qu'à l'âge de 7, 14, 28, 60, 90 jours pour la cure à l'aire libre. Les mesures ont été réalisées suivant la norme EN 196-1 (NF EN 196-1, 2016) à l'aide de deux presses à mortier (voir figures 3.12 et 3.13).

Ces deux types de presse permettent de réaliser, un test de résistance à la flexion sur une éprouvette $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, et deux tests de résistance à la compression avec les fragments récupérés de l'essai de résistance à la traction par flexion. Pour chaque composition et chaque âge, trois éprouvettes ont été utilisées.



Figure 3.12. Essai de résistance à la traction par flexion des mortiers.

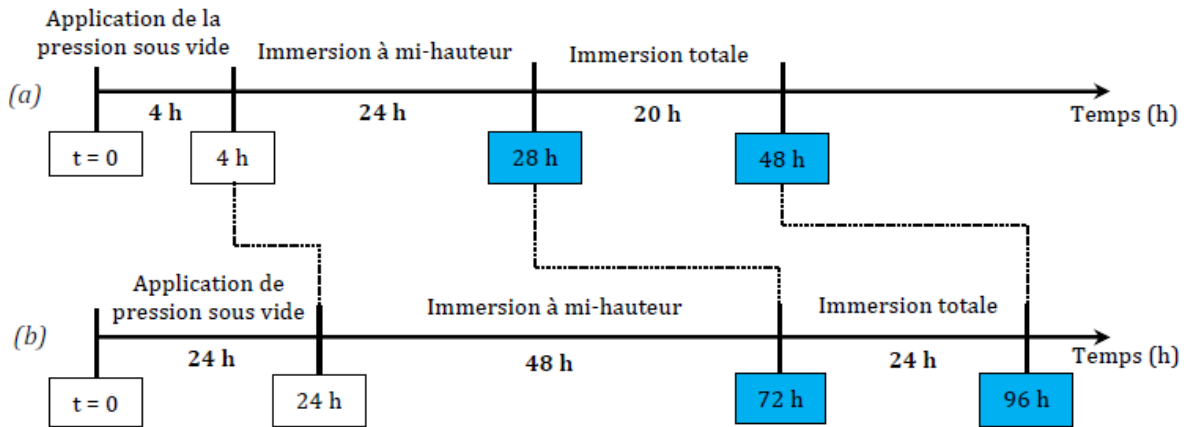


Figure 3.13. Essai de résistance à la compression des mortiers.

3.4.2.2. La porosité accessible à l'eau :

La porosité ouverte accessible à l'eau est un paramètre très important dans l'évaluation et la prévision de la durabilité des structures (Soufi, 2013). C'est en effet un indicateur de qualité du matériau. Il décrit l'espace total disponible pour le transport des gaz, des liquides et des ions (Kamèche, 2015).

Les essais sont réalisés sur des fragments récupérés du test de résistance 3 points (traction par flexion). Le protocole expérimental utilisé dans cette étude pour mesurer la porosité est le protocole modifié de l'AFPC-AFREM (Kamèche, 2015). L'essai se déroule en trois phases : séchage des échantillons, saturation sous vide et pesées hydrostatiques (cf. figure 3.14).



Le calcul de la porosité a été fait en utilisant la relation suivante :

$$P(\%) = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100$$

Où : M_{air} , M_{sec} et M_{eau} sont respectivement la masse de l'échantillon saturé, pesé dans l'air, la masse de l'échantillon sec et sa masse hydrostatique.

À l'issue d'une cure mixte de 28 jours, nous avons procédé aux séchages des échantillons à une température de 60° C, jusqu'à stabilisation de la masse (M_{sec}), c'est-à-dire lorsque deux pesées consécutives espacées de 24 heures ne diffèrent pas de plus de 0,05%. Cette température est choisie pour éviter toute dégradation de la microstructure.

L'échantillon sec est placé dans un récipient étanche (dessiccateur, cloche à vide) (figure 3.15). Une fois le récipient fermé, on fait le vide pendant 24h. On reconnecte le récipient à la pompe à vide et on introduit progressivement l'eau d'immersion jusqu'à mi-hauteur et on laisse pendant 24h, ensuite on immerge complètement l'échantillon et on laisse pendant 24h. L'échantillon est ensuite pesé après saturation pour obtenir M_{air} et par pesée hydrostatique pour obtenir M_{eau} .



Figure 3.15. Dispositif de saturation.

3.4.2.3. L'absorption d'eau :

La mesure de l'absorption de l'eau a été faite selon la méthode suggérée par Ramli et col.(Ramli, 2013). L'essai est habituellement mesuré sur des échantillons séchés ensuite immergés partiellement dans l'eau et on mesure l'augmentation de la masse en pourcentage de la masse sèche. Pour la représentativité des échantillons, un ensemble de trois échantillons cylindriques de taille Ø70 x 70 mm sont placés dans un four pendant 72 h à une température de 105° C. Après séchage jusqu'à masse constante, on retire les échantillons et on les laisse refroidir dans un récipient hermétique pendant une période de 24±0,5 h. Chaque échantillon a ensuite été pesé et immédiatement immergé dans l'eau pendant une période de 30±0,5 min (figure 3.16). L'échantillon est ensuite sorti de l'eau, la surface essuyée et pesée à nouveau. L'absorption d'eau a été calculée à partir de l'augmentation de masse de l'échantillon et exprimée en pourcentage de spécimens secs multipliés par un facteur de correction comme suit:

$$\text{Facteur de correction} = \frac{\text{Volume (mm}^3\text{)}}{\text{Surface(mm}^2\text{)} \times 12.5}$$



Figure 3.16. Essai d'absorption d'eau.

3.4.2.4. L'adhérence :

Dans ce programme expérimental, deux techniques ont été adoptées pour mesurer l'adhérence : la méthode d'arrachement (Pull — off) et la traction par flexion (figures 3.17 et 3.18).



Figure 3.17. Dispositif expérimental pour la mesure de l'adhérence par Pull-off.



Figure 3.18. Dispositif expérimental pour la mesure de l'adhérence par la méthode de traction par flexion.

a)- La méthode d'arrachement :

Le Pull off test a été utilisé sur deux supports différents :

- *Des briques de terre cuite :*

Briques de terre cuite creuses de dimensions : $10 \times 20 \times 30 \text{ cm}^3$ à perforations horizontales et rainures sur sa surface à enduire (figure 3.19). Ces briques ont une absorption d'eau d'environ 13,5 %, et une masse volumique apparente de l'ordre de 1.41 T/m^3 .



Figure 3.19. Supports en briques utilisés.

- *Les dalletes en béton :*

Des dalletes en béton dont la surface a été rainurée, de dimensions $30 \times 30 \times 10 \text{ cm}^3$ ont été confectionnés (figures 3.20 à 3.23) afin de voir l'influence d'un support différent de la brique sur l'adhérence par pull off. Ces dalletes présentent la même composition que le béton de référence que nous utilisons au sein de l'équipe de recherche « Matériaux granulaires » du laboratoire EOLE (Boukli Hacène 2010). Il est caractérisé par un rapport E/C égal à 0.5, une

Chapitre 3. Matériaux et méthodes

masse volumique apparente d'environ 2471 kg/m^3 , un affaissement au cône d'Abrams de 6 cm (figure 3.21), et une absorption en eau de 6.3%



Figure 3.20. Moules utilisés pour fabriquer les dalletes de $30 \times 30 \times 10 \text{ cm}^3$.



Figure 3.21. Etalement du béton utilisé pour fabriquer les dalletes.



Figure 3.22. Dalletes avant cure.

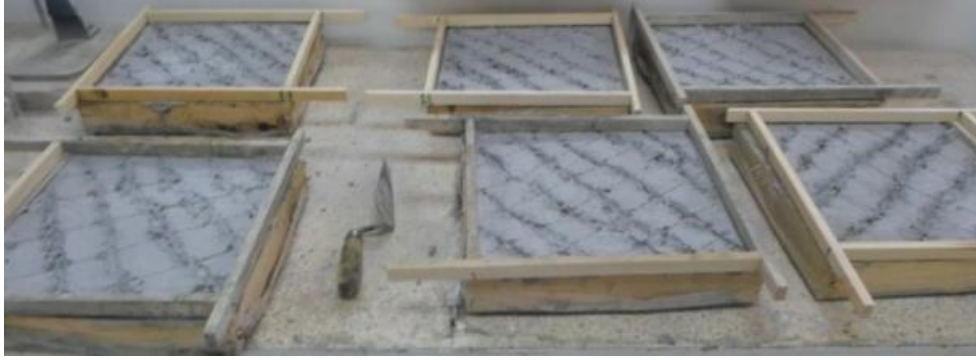
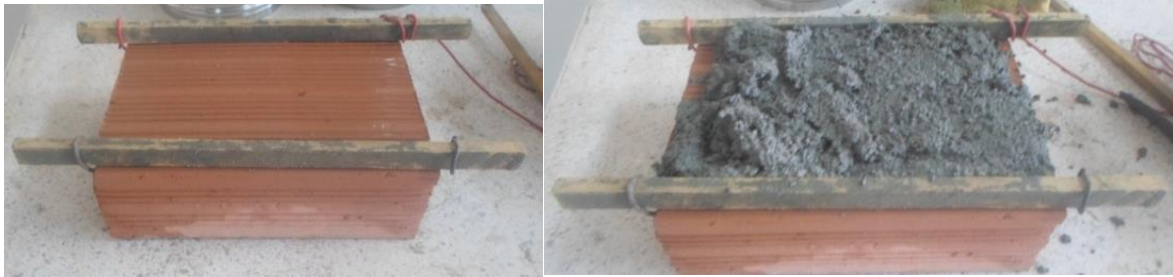


Figure 3.23. Dallettes en béton utilisé pour l'adhérence.

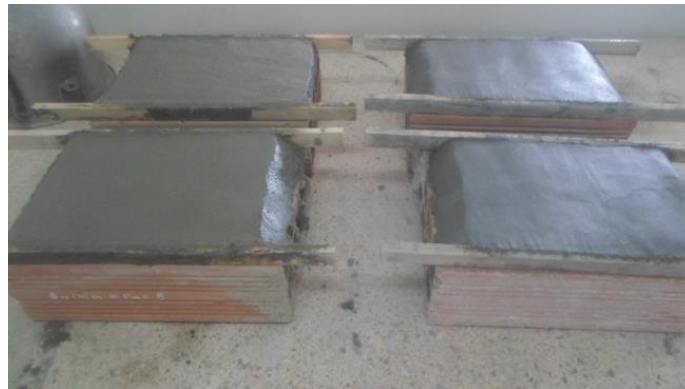
- Mélange, application et cure des mortiers :

Les mêmes formulations des mortiers précités ont été appliquées comme enduit sur les briques et les dalles en béton. Les surfaces des supports ont été mouillées avant l'application des mortiers frais afin d'éviter à ces derniers un grillage précoce (voir figures 3.24 et 3.25). L'épaisseur de l'enduit est de 2 cm, ce choix est justifié par le fait que l'épaisseur du mortier de réparation ou de protection dépasse généralement les 1 cm.



Etape 1. Mouillage de la surface de la brique

Etape 2. Application des mortiers sur la surface de la brique.



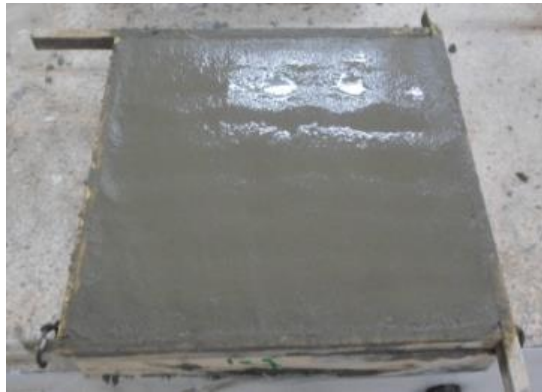
Etape 3. Briques après application des mortiers d'enduisage.

Figure 3.24. Etapes de l'application des mortiers sur les supports en briques.



Etape 1. Mouillage de la surface des dalles en béton.

Etape 2. Application des mortiers sur la surface des dalles en béton.



Etape 3. Dalles après application des mortiers d'enduisage.

Figure 3.25. Etapes de l'application des mortiers d'enduisage sur les dalles en béton.

Ensuite, les corps d'épreuve sont laissés en maturation au laboratoire jusqu'à l'âge de 28 ou 90 jours, où ils sont sujets après ces échéances à l'essai d'arrachement. Pour les besoins de cet essai, les échantillons sont préparés en carottant au diamètre de 50 mm, 24 heures avant l'essai, toute l'épaisseur de l'enduit jusqu'au support (figures 3.26-3.29). On procède ensuite au collage de pastilles en aluminium sur la surface de l'enduit carotté à l'aide d'une colle époxydique.



Figure 3.26. Dispositif de carottage.



Figure 3.27. Enduit carotté sur les deux supports en briques creuse et en béton.



Figure 3.28. Collage des pastilles métalliques sur les deux supports.

On fixe ensuite, sur les pastilles collées une rotule male qui vient ensuite se loger dans la rotule femelle située à la base de l'axe central de l'appareil d'essai d'adhérence. Le test d'arrachement consiste à exercer sur la rotule male, un effort croissant de traction normal à la surface de la pastille jusqu'à la rupture (figure 3.29).



Figure 3.29. Déroulement de l'essai d'arrachement.

On obtient ainsi la valeur de l'adhérence de l'enduit sur le support en divisant la force maximale de rupture sur la surface de la pastille métallique ; cette valeur est notée, et l'endroit où s'est produite la rupture est analysé pour chaque cas.

$$L'adhérence(MPa) = \frac{P}{A}$$

Où : P : est la force maximale de rupture [N] et A : est la surface de la pastille en [mm²].

b)- la méthode de traction par flexion:

Le déroulement de la mesure de l'adhérence par cette méthode est identique à celui de la mesure de la résistance à la traction par flexion d'une éprouvette 4x4x16 cm³ de mortier (figure 3.30). Les éprouvettes utilisées pour les essais d'adhérence sont dites bicomposées. Les prismes se composent de deux parties différentes pour simuler un système de réparation (figure 3.31).



Figure 3.30. Déroulement de l'essai d'adhérence de traction par flexion.



Figure 3.31. Eprouvettes bicomposées utilisées pour l'essai d'adhérence.

La partie support qui représente la partie du système à réparer, est une demi-éprouvette 4x4x16 cm³ de surface plane obtenue par sciage d'une éprouvette de mortier normal réalisée avec un E/C =0.5 et C/S= 1/3 ; sa consistance est égale à 125 cm (figure 3.32).



Figure 3.32. Epreuves 4x4x16 cm³ sciées.

Elle doit avoir été fabriqué au moins 28 jours avant son utilisation et ne pas avoir subie de traitement pendant cette période. Elle est ainsi conservée à l'environnement du laboratoire (à 21° C et 60% d'HR) avant son utilisation.

L'autre moitié représente la partie produit de réparation réalisée avec les mortiers modifiés testés. Elle est coulée directement dans le moule 4x4x16 cm³ après que la partie support y ait été positionnée (figure 3.33). Les étapes de moulage du mortier restent les mêmes que celles utilisées pour la fabrication des éprouvettes ordinaires (cf. figure 3.34).



Figure 3.33. Positionnement des mortiers supports dans les moules 4x4x16 cm³.

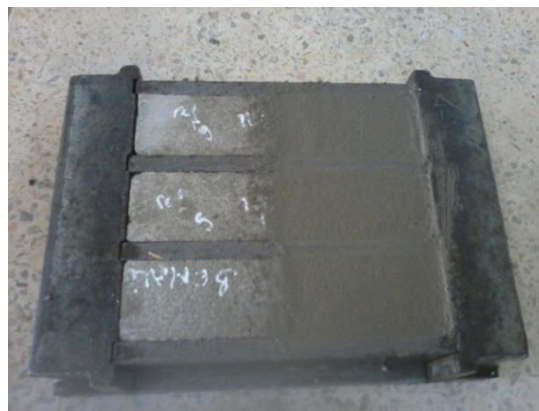


Figure 3.34. Collage des mortiers réparations dans les moules 4x4x16 cm³ contenant les supports.

3.5. Conclusions :

Ce chapitre a été consacré à la présentation des méthodes expérimentales et des matériaux étudiés. Les résultats des essais de caractérisation montrent que les matériaux utilisés sont conformes aux exigences des normes en vigueur.

Le chapitre suivant est consacré à la description des résultats expérimentaux et leur analyse.

Chapitre 4. Analyses et discussions des résultats

4.1. Introduction :

Dans le cadre de ce chapitre, nous allons présenter l'analyse des différents résultats obtenus relatifs au programme expérimental élaboré au laboratoire. La première partie de ce chapitre est consacré à l'analyse des propriétés des mortiers modifiés à l'état frais. Nous analysons ensuite l'influence des latex sur les résistances mécaniques et les propriétés d'adhérence des mortiers modifiés. Enfin, la troisième partie portera sur les propriétés de durabilité.

Nous nous focaliserons dans ce chapitre d'une part, sur l'effet des latex et de l'âge des échantillons et d'autre part sur les effets de maturation sur l'ensemble des propriétés citées auparavant.

4.2. Propriétés des mortiers à l'état frais :

4.2.1. La fluidité :

Les résultats du test de la fluidité des mortiers témoins et modifiés par le SBR et le SA en fonction de la teneur en latex et le rapport E/C utilisé, sont représentés respectivement sur les figures 4.1 et 4.2. Ces résultats sont la moyenne de trois essais en utilisant le test de la table à secousses comme nous l'avons mentionné dans le chapitre précédent.

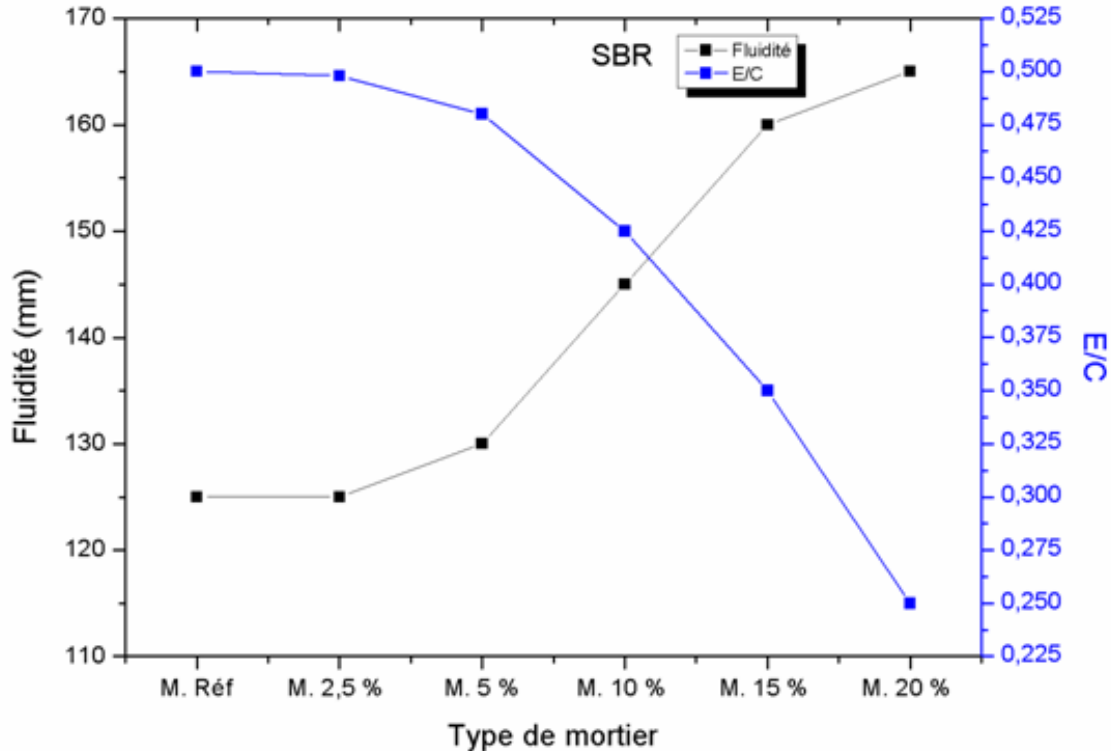


Figure 4.1. Influence du SBR et du rapport E/C sur la fluidité des mortiers.

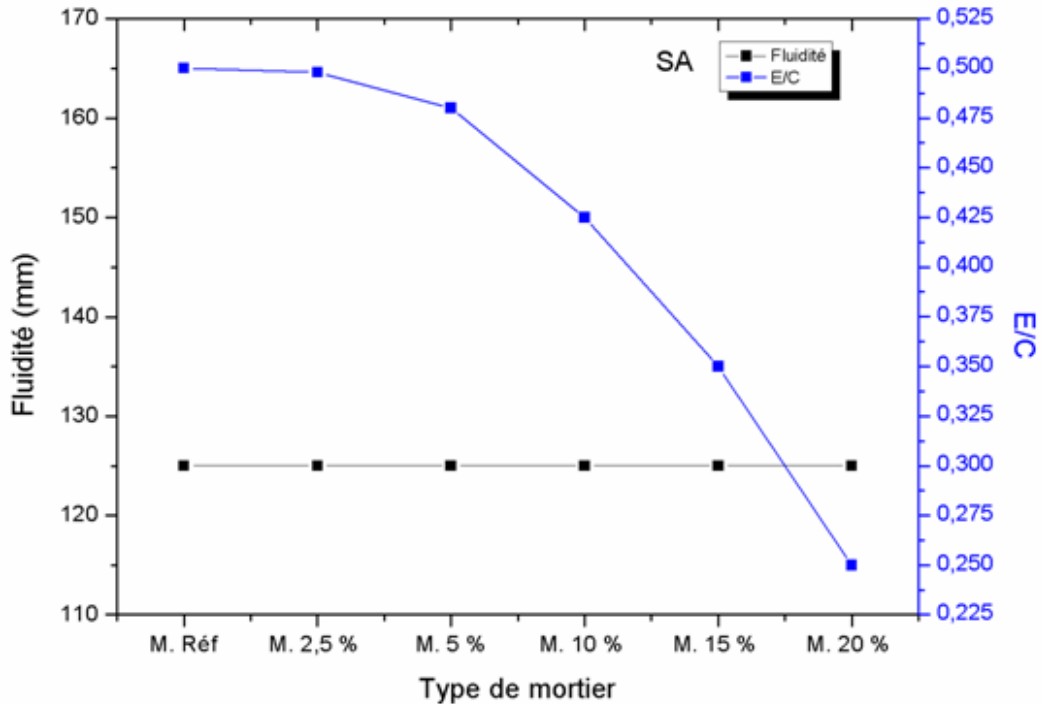


Figure 4.2. Influence du SA et du rapport E/C sur la fluidité des mortiers.

Compte tenu des résultats des figures 4.1 et 4.2, on peut dire que les deux latex SBR et SA sont des réducteurs d'eau. En fait, lorsque la quantité de substitution passe de 0 à 20%, la fluidité du mélange frais augmente de façon remarquable de 125 mm à 165 mm pour les SBR et reste constante à 125 mm pour les SA, tandis que le rapport E/C est passé de 0,5 à 0,25.

Dans la littérature, de nombreuses études ont montré que la présence de polymères, en particulier sous forme de latex, dans le mortier et le béton de ciment Portland, améliore la fluidité des mortiers. En effet, Folic et col. (Folic, 1998) ont trouvé que l'incorporation du latex (SBR) dans le béton frais provoque un effet typique des adjuvants super-plastifiants. Ils ont constaté que l'ajout de latex permet de fabriquer des mélanges de béton, avec une quantité d'eau jusqu'à 30% inférieure à celle utilisée dans le béton sans latex pour obtenir une fluidité constante.

Muthadhi et col. (Muthadhi, 2014) ont étudié l'effet de la température élevée et de la durée d'exposition sur le béton polymère modifié. Les latex de styrène-butadiène ont été ajoutés en termes massique de 0, 5, 10 et 20% de ciment. Les auteurs ont constaté que la fluidité des mélanges augmente avec l'augmentation de la teneur en polymère. La valeur d'affaissement du béton variait entre 60 et 170 mm. Cependant, la quantité d'eau du mélange a diminué de 148 à 109,6 L / m³.

Soni et col. (Soni, 2014) ont montré aussi que l'addition de SBR à 5, 10, 15 et 20% dans le béton augmente la valeur de l'affaissement de 25 à 90 mm.

Wang et col. (Wang, 2010) se sont intéressés dans leur étude, à l'effet du latex utilisé, le styrène-acrylique (SAE) sur les performances des mortiers de ciment Portland. Ces auteurs ont constaté que la fluidité de ces mortiers modifiés augmente linéairement avec l'augmentation du rapport P/C, atteignant environ 40% de fluidité supplémentaire, lorsque le rapport P/C atteint 20%.

Aliabdo et col. (Aliabdo, 2012) ont étudié l'effet de l'ajout des polymères dans le béton auto-plaçant. Les auteurs de cette étude ont constaté que pour maintenir un diamètre d'étalement constant à $(70 \pm 2 \text{ cm})$, il est nécessaire de diminuer la quantité du super plastifiant (le naphthalène et l'éther polycarboxylique) tout en augmentant la teneur en polymère (SBR et PVA). Ils ont également constaté que l'utilisation du styrène-butadiène est plus efficace en matière de diminution du dosage en super-plastifiant (éther polycarboxylique) par rapport à l'acétate de polyvinyle PVA. Ces auteurs ont interprété ces résultats en concluant que la cohérence est améliorée grâce à l'action de roulement à billes due aux particules de polymère, l'air occlus et l'effet de dispersion des agents tensio-actifs dans les latex de polymères.

Les résultats obtenus montrent également que les deux types de latex sont des réducteurs d'eau, mais le SBR est un réducteur d'eau de gamme plus élevée que le latex SA.

4.3. Propriétés des mortiers à l'état durci :

4.3.1. Effet des conditions de cure sur la résistance à la compression des mortiers :

4.3.1.1. Résistance à la compression des mortiers de la cure mixte :

La résistance à la compression des mortiers témoins et modifiés par le SBR et le SA en fonction de la teneur en latex et l'âge de la cure mixte est illustrée en échelle semi-logarithmique respectivement sur les figures 4.3 et 4.4. Ces résultats sont la moyenne de six essais sur les fragments récupérés du test de la résistance à la traction par flexion.

Une première analyse des résultats, conduit aux observations suivantes : les courbes d'évolution de la résistance en compression en fonction du temps (de 7 à 360 jours) présentent la même allure. Globalement, la résistance de tous les mortiers augmente régulièrement avec l'âge de conservation des éprouvettes de 7 à 60 jours. Au-delà, la résistance de tous les mortiers reste constante, compte tenu des incertitudes expérimentales. Cela peut être attribué au temps nécessaire à l'hydratation du ciment et son durcissement. En effet, lors du gâchage, les silicates tricalciques (alite) et bicalciques (Bélite) subissent une dissolution et produisent les silicates de calcium hydratés « CSH », et l'hydroxyde de calcium « la portlandite », désigné par les cimentiers par CH (Ngassam, 2013). Les CSH précipitent autour des grains de ciment et forment des ponts entre eux ; ce qui provoque par la suite le durcissement des échantillons. La formation continue des CSH remplit progressivement les pores capillaires, il en résulte l'augmentation de la compacité des échantillons et l'amélioration de la résistance à la compression (Diab, 2013).

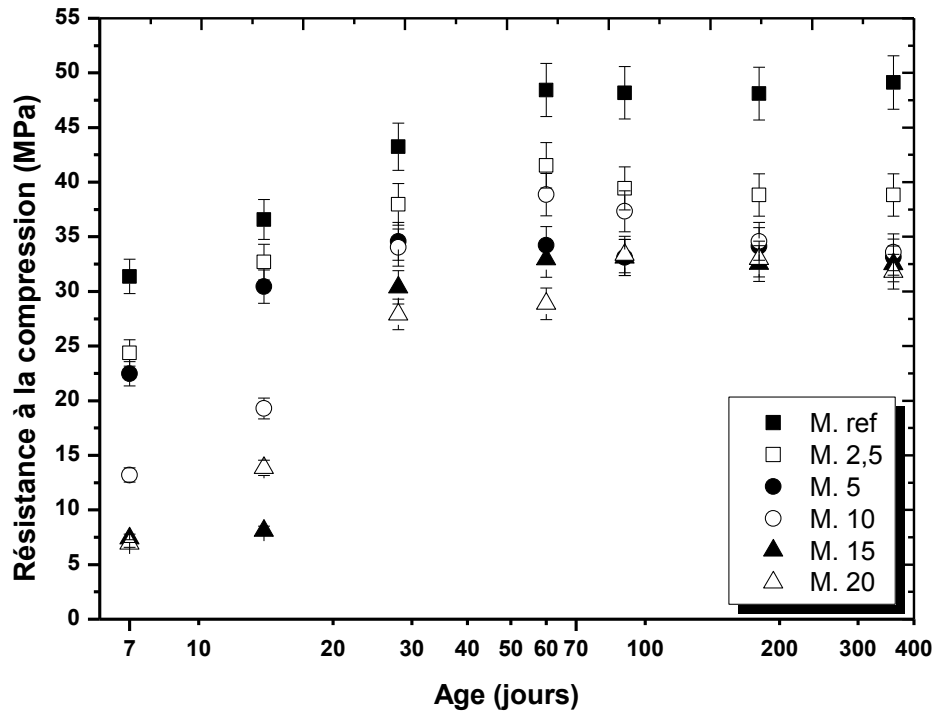


Figure 4.3. Influence de l'âge sur la résistance à la compression en fonction de la teneur en latex SBR des mortiers soumis à la cure mixte.

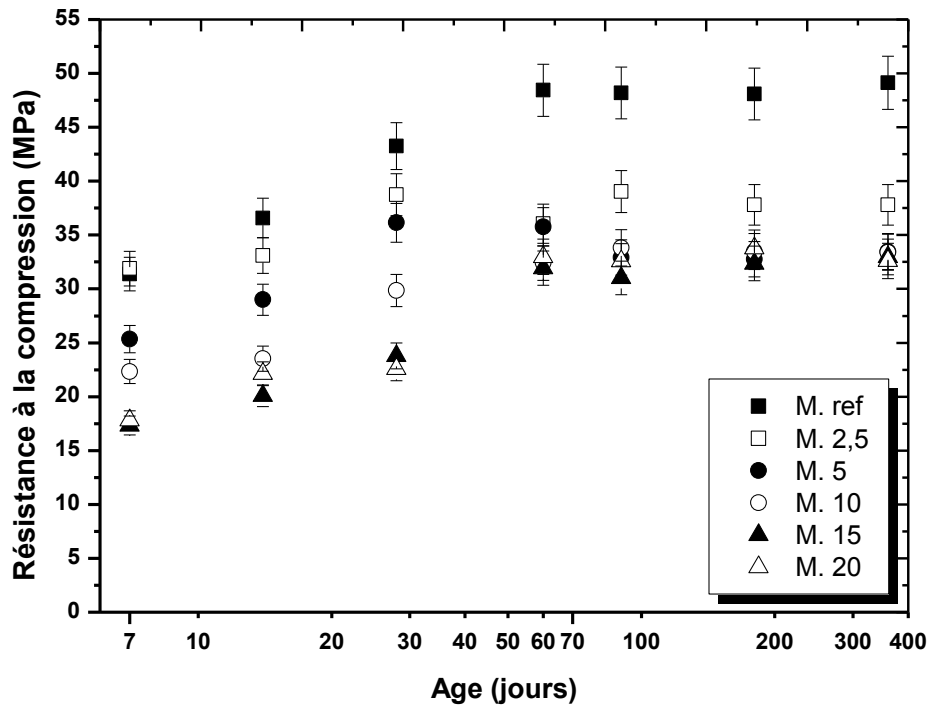


Figure 4.4. Influence de l'âge sur la résistance à la compression en fonction de la teneur en latex SA des mortiers soumis à la cure mixte.

On constate aussi lorsqu'on examine de plus près les valeurs obtenues aux échéances considérées que les mortiers de référence développent la plus grande résistance en compression pour toutes les périodes (7 à 360j). Il est clair que la résistance à la compression des mortiers diminue avec l'augmentation du taux de substitution du ciment pour l'ensemble des échéances examinées. Cette perte est de 21, 33, 32, 34 et 35% en comparant les résistances des mortiers témoins à celle des différents mortiers modifiés par le SBR à l'âge de

360 jours, et elle est de 23, 28, 32, 33 et 34% en comparant les résistances des mortiers témoins à celle des différents mortiers modifiés par le SA au même âge. Il faut noter qu'au-delà de 10% d'ajouts en polymères les valeurs de résistance se confondent généralement.

Plusieurs travaux de recherche ont montré que la présence des polymères a un faible impact sur la résistance en compression, et il peut même avoir un impact négatif (ACI, 2003) (Ngassam, 2013) (Sikora, 2015). Wang et col. (Wang, 2005) ont trouvé que pour un (E/C) constant, la résistance à 28 jours augmente légèrement pour de faibles quantités de SBR $\leq 2\%$, puis elle diminue fortement en augmentant la quantité ajoutée. Wang et col. (Wang, 2010) ont conclu que pour un rapport (E/C) ajusté -comme l'étude que nous menons-, la résistance à la compression des mortiers modifiés par le Styrène Acrylique (SAE) chute brutalement avec l'augmentation du rapport P/C pour 3, 7 et 28 jours de conservation. Les mêmes auteurs (Wang, 2011a) ont trouvé dans une autre étude, que la résistance à la compression augmente avec l'âge de conservation des échantillons dans l'eau, tandis qu'elle diminue avec l'augmentation de la quantité du SBR jusqu'à 10% ; au-delà de cette quantité, la résistance augmente légèrement pour les échantillons à 7 et 28 jours.

Marceau et col. (Marceau, 2012), montrent que l'addition d'un rapport P/C $\leq 5\%$ de (SBR : dispersion aqueuse) ou bien (SA : en poudre) entraîne une grande diminution des propriétés mécaniques, et plus précisément la résistance à la compression. Tandis que pour des rapports P/C supérieurs à cette valeur, la résistance mécanique chute lentement. Ngassam (Ngassam, 2013) a trouvé aussi que l'addition du polymère Éthylène Vinyle Acétate (EVA) ou le Styrène Butadiène SBR en poudre, diminue la résistance à la compression des mortiers à 28 jours de cure sèche (à l'aire libre).

Chew et col. (Chew, 2011) ont trouvé que pour des mortiers conservés à l'air libre avec une fluidité ajustée, la résistance à la compression des mortiers modifiés par le SAE a été diminuée d'environ 52% en augmentant le rapport P/C de 0 à 44%. Barluenga et col. (Barluenga, 2004) ont trouvé que l'inclusion du SBR dans les mortiers de ciment, produit une diminution de la résistance à la compression, pour un rapport (E/C) fixe, tandis que la résistance à la compression n'a pas beaucoup changé pour des rapports ajustés, pour tous les âges examinés.

Ramli et col. (Ramli, 2012c) ont trouvé que la résistance à la compression des mortiers du ferrociment modifiés par le SBR, le PAE (en dispersion aqueuse) et le VAE (en poudre) a été diminuée par rapport aux mortiers de référence, d'environ 27% concernant les mortiers conservés à l'air libre et environ 23% pour les mortiers plongés dans l'eau de mer.

La plupart de ces auteurs justifient ces observations par le fait que le polymère a une plus grande propriété de rétention d'eau, une porosité fermée élevée due à l'effet d'entraînement d'air par le polymère (Wang, 2005) (Wang, 2010) (Marceau, 2012) (Ngassam, 2013) et aussi au retard dans l'hydratation du ciment, causé par la présence d'agents tensioactifs dans le mélange (Gemert, 2005) (Sikora, 2015); tandis que d'autres (Barluenga, 2004) (Chew, 2011) justifient les mêmes observations par la faible capacité mécanique des latex et le changement signalé dans la microstructure du mélange. En effet, dans le réseau co-matriciel des mortiers modifiés, il existe deux types de liaisons ciment-ciment et ciment-polymère. Ces derniers sont plus faibles que les liaisons ciment-ciment. Avec une augmentation de la teneur en polymère, le film polymère enveloppe le ciment hydraté et les agrégats, formant plusieurs liaisons polymère-ciment. Par conséquent, une baisse de la résistance à la compression des échantillons modifiés est observée.

Il apparaît donc, si on prend en considération les exigences de la norme EN 1504-3 (BS EN 1504-3, 2006) sur les performances applicables aux produits de réparation et aussi le règlement d'application TRA 651 (Gregoire, 2011) des mortiers de maçonnerie ainsi que l'équilibre entre les performances et la quantité de polymère introduit; un pourcentage de substitution variant de 10 à 15% de latex qui développe une résistance ≥ 25 MPa à 28 jours, semble être efficace pour des mortiers de réparation non structurale de type R1 (≥ 10 MPa) et de type R2 (≥ 15 MPa), pour la réparation structurale de type R3 (≥ 25 MPa) et aussi pour les mortiers de maçonnerie (≥ 12.5 MPa).

4.3.1.2. Résistance à la compression des mortiers de la cure sèche:

Nous avons reporté sur les figures 4.5 et 4.6 les valeurs de la résistance à la compression des mortiers témoins et modifiés par le SBR et le SA en fonction de la teneur en polymère et l'âge de la cure sèche. Ces valeurs sont illustrées comme celles de la cure mixte en échelle semi-logarithmique.

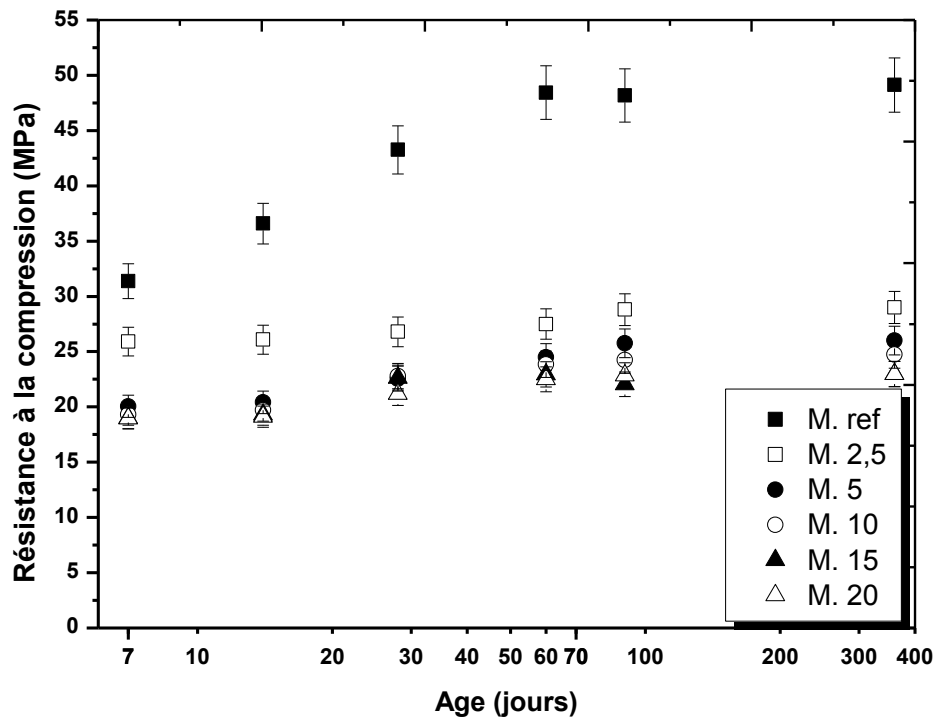


Figure 4.5. Influence de l'âge sur la résistance à la compression en fonction de la teneur en latex SBR des mortiers ayant subi la cure sèche.

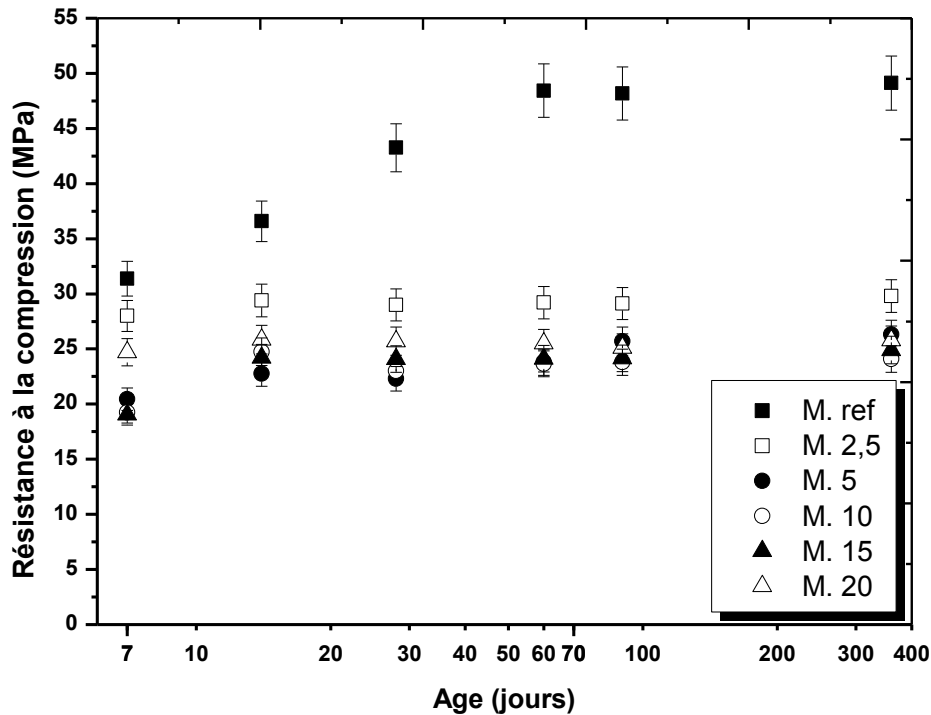


Figure 4.6. Influence de l'âge sur la résistance à la compression en fonction de la teneur en latex SA des mortiers ayant subi la cure sèche.

Il apparaît que les courbes d'évolution des mortiers modifiés, présentent la même allure. Généralement, la résistance de tous les mortiers modifiés reste identique en fonction de l'âge de conservation de 7 à 360 jours, compte tenu des incertitudes expérimentales. Ceci est sûrement dû à l'hydratation du ciment retardé dans des conditions sèches et à la fixation des particules de polymère sur les grains de ciment (empêche le contact avec l'eau).

En outre, les valeurs obtenues aux échéances considérées, montrent que les mortiers témoins développent la plus grande résistance en compression pour toutes les périodes (7 à 360j). Il est clair que tout comme la cure mixte, la résistance à la compression des mortiers ayant mûri à l'air libre, diminue avec l'augmentation du taux de substitution du ciment pour l'ensemble des échéances examinées. La perte est de 41, 47, 50, 53 et 53 % en comparant la résistance des mortiers témoins à celle des différents mortiers modifiés par le SBR à l'âge de 360 jours, et elle est de 39, 46, 51, 49 et 47% en comparant la résistance des mortiers témoins à celle des différents mortiers modifiés par le SA au même âge. Il faut noter ainsi qu'au-delà de 10% d'ajouts en polymère, les valeurs de résistance se confondent généralement.

Ces résultats confirment également les conclusions citées dans la littérature: la présence des polymères a un impact négatif sur la résistance à la compression que ce soit pour la cure mixte ou la cure sèche.

4.3.2. Effet des conditions de cure sur la résistance à la traction par flexion des mortiers :

3.4.2.1. Résistance à la traction par flexion des mortiers de la cure mixte :

Les résultats des résistances à la traction par flexion des mortiers témoins et modifiés en fonction de l'âge et la teneur en polymère sont illustrés en échelle semi-logarithmique respectivement par les figures 4.7 et 4.8. Ces résultats sont la moyenne de trois essais sur des éprouvettes prismatiques de dimensions 40x40x160 mm³.

Sur la base de ces résultats expérimentaux, on peut dire que la résistance à la traction par flexion de tous les mortiers modifiés par polymère et de référence augmente régulièrement avec l'âge de conservation des éprouvettes de 7 à 60 jours. Au-delà de cet âge, on trouve que la résistance des mortiers présente une allure constante, compte tenu des incertitudes expérimentales. Ceci est dû comme nous l'avons précisé pour la résistance à la compression, à l'hydratation du ciment, son durcissement et aussi à la formation du film polymère en fonction du temps. Ces résultats corroborent ceux obtenus dans la littérature (Barluenga, 2004) (Wang, 2005) (Wang, 2010).

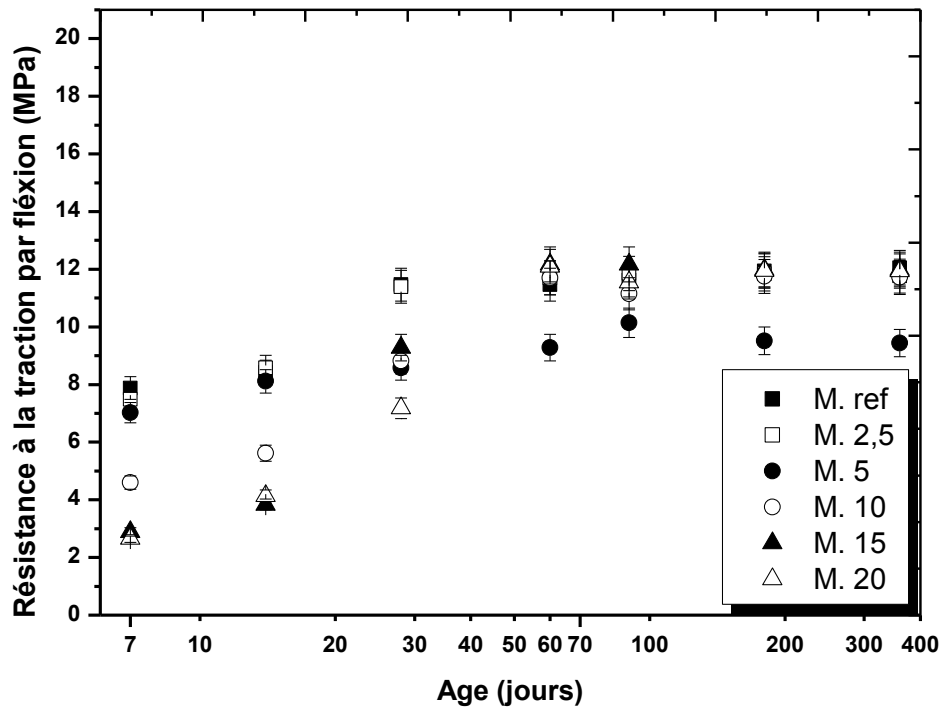


Figure 4.7. Influence de l'âge sur la résistance à la traction par flexion en fonction de la teneur en latex SBR des mortiers soumis à la cure mixte.

Les figures 4.7 et 4.8 montrent aussi que la résistance à la traction par flexion des mortiers diminue avec l'augmentation du taux de substitution du polymère pour l'ensemble des échéances (7 à 28 jours). La diminution de la résistance peut être attribuée à la quantité de ciment substituée, à l'hydratation du ciment retardé dans les conditions sèches, à la fixation des particules de polymère sur les grains de ciment, et aussi à la co-matrice et le film polymère non développé.

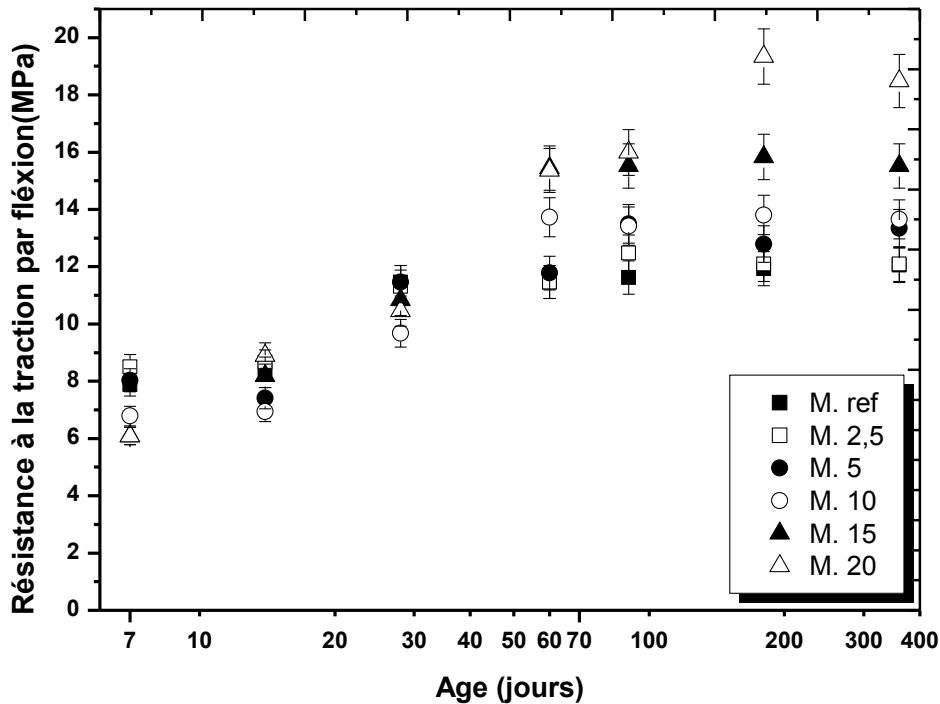


Figure 4.8. Influence de l'âge sur la résistance à la traction par flexion en fonction de la teneur en latex SA des mortiers soumis à la cure mixte.

En revanche, la perte de la résistance est rattrapée à 60 jours, puisque cette dernière augmente respectivement de 5% et 34 % en comparant les mortiers modifiés à 20% de SBR et de SA au mortier témoin. On peut l'expliquer par l'amélioration de la cohésion entre les granulats et la pâte de ciment ; due à la formation à la fois du film polymère et la co-matrice qui est une structure en réseau dans laquelle la phase de ciment hydraté et la phase de polymère s'interpénètrent. Un modèle a été proposé par Ohama (Ohama, 1995) (Ohama, 1998), qui explique le mécanisme de la microstructure des systèmes modifiés. Ce modèle a été développé par la suite par Gemert et col. (Gemert, 2005) et Tian et col. (Tian, 2013) (cf. figure 1.9, chap.1).

En résumant ce modèle, on peut dire que lors du gâchage des mortiers modifiés, un gel de ciment hydraté se forme et quelques particules de polymère se fixent sur les grains de ciment non hydraté et les granulats (Ngassam, 2013) (Soufi, 2013). Ces grains de polymère limitent l'hydratation du ciment et entraînent un retard de prise (Ngassam, 2013) (Wang, 2013) (Pierre, 2008). La phase aqueuse est trouvée donc saturée par l'hydroxyde de calcium formé pendant l'hydratation. Ce dernier réagit avec la surface des agrégats de silice pour former une couche de silicate de calcium (Ohama, 1995). Dans le cas d'une cure sèche, et au fur à mesure de la consommation de l'eau par le ciment, la structure hydratée se développe et un film continu de polymère peut se former, les particules de polymère se rapprochent, flocculent les unes avec les autres, se déforment progressivement puis coalescent. Ce dernier lie les hydrates de ciment formés et adhère à la couche de silicate de calcium sur les granulats (Ngassam, 2013) (Soufi, 2013). Des réactions ont lieu également entre les groupes réactifs de certains polymères et les ions calcium Ca^{2+} , l'hydroxyde de calcium $Ca(OH)_2$ et les couches de silicate à la surface des granulats (Ngassam, 2013) (Soufi, 2013). Ce qui augmente par la suite la cohésion entre les hydrates de ciment et les agrégats, et améliore par conséquent la résistance de ces mortiers.

En comparant les deux figures 4.7 et 4.8, il est clair que l'amélioration de la résistance à la traction par flexion des mortiers modifiés avec le SA est plus visible que celle des mortiers modifiés par le SBR. Cela s'explique par la nature et le fonctionnement du polymère ainsi que par la quantité d'eau qui existe dans les mortiers qui est plus grande dans les mortiers modifiés par le polymère SBR par rapport aux mortiers modifiés par SA avec des pourcentages de polymère identiques.

3.4.2.2. Résistance à la traction par flexion des mortiers de la cure sèche :

Les figures 4.9 et 4.10 présentent les valeurs de la résistance à la traction par flexion des mortiers témoins et modifiés par le SBR et le SA en fonction de la teneur en polymère et l'âge de la cure sèche. Chaque valeur est la moyenne de trois échantillons testés.

Nous remarquons que, tout comme le cas de la cure mixte, la résistance à la traction par flexion de tous les mortiers modifiés par polymère et de référence augmente avec l'âge de conservation des éprouvettes de 7 à 60 jours. Au-delà, on trouve que la résistance des mortiers présente la même allure, compte tenu des incertitudes expérimentales.

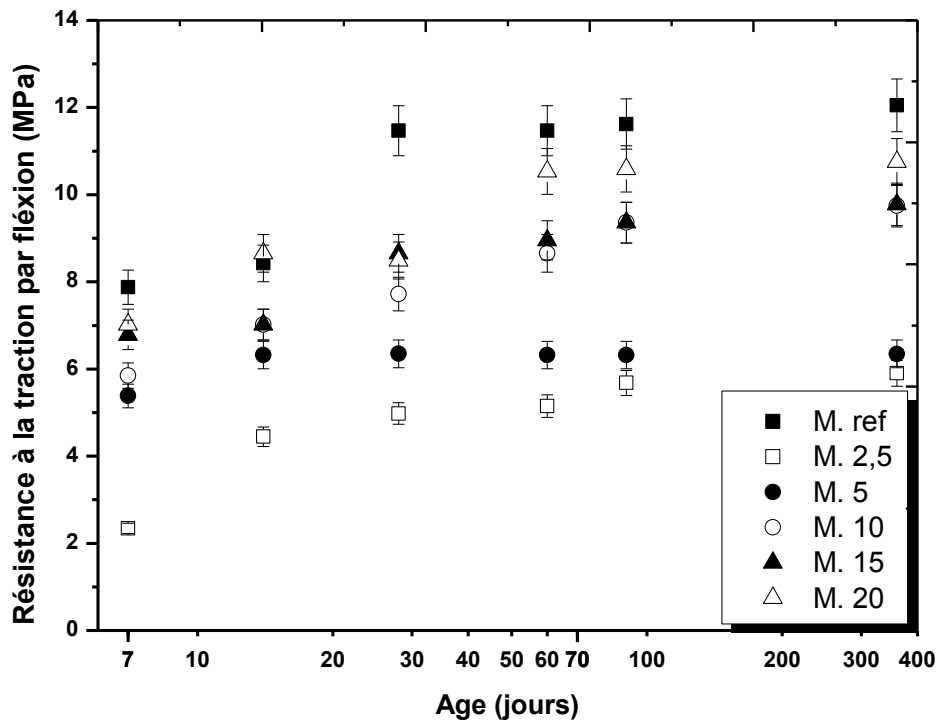


Figure 4.9. Influence de l'âge sur la résistance à la traction par flexion en fonction de la teneur en latex SBR des mortiers soumis à la cure sèche.

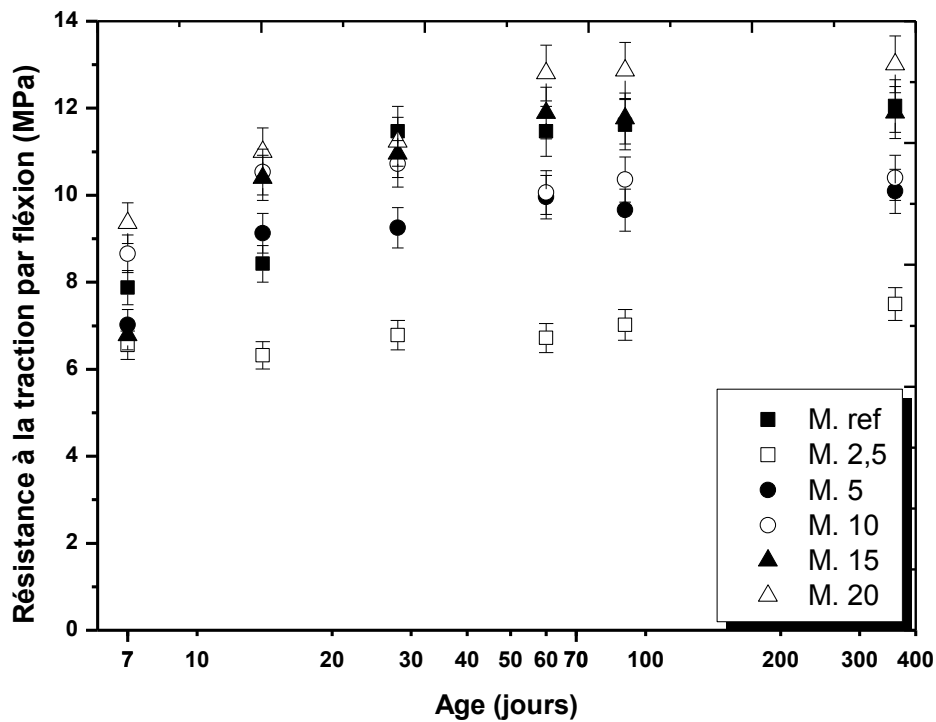


Figure 4.10. Influence de l'âge et la teneur en latex le SA sur la résistance à la traction par flexion des mortiers soumis à la cure sèche.

De plus, les résultats obtenus montrent, que les mortiers témoins développent la plus grande résistance en traction par flexion sauf pour les mortiers modifiés au taux de 20% de SA, où on remarque qu'au-delà de 60 jours, ces mortiers développent des valeurs de résistance légèrement plus grande.

La diminution de la résistance peut être due à la quantité de ciment substitué, l'hydratation de ciment retardé dans des conditions sèches et la fixation des particules de polymère sur les grains de ciment.

Nos résultats confirment bien les résultats trouvés dans la littérature. En effet :

- L'effet bénéfique des polymères est généralement plus visible en traction par flexion qu'en compression, car les polymères renforcent la résistance de l'interface liant-granulat, particulièrement sollicité pendant les essais de traction par flexion (Gemert, 2005) (Ngassam, 2013).
- La cure combinée favorise l'obtention de performances mécaniques élevées par rapport aux cures ambiante (sèche) (Folic, 1998) (Wang, 2005) (Parghi, 2016).

4.3.3. La ténacité :

4.3.3.1. Cure mixte :

Les histogrammes des figures 4.11 et 4.12 présentent le rapport entre la résistance à la compression et la résistance à la traction par flexion des mortiers modifiés par les polymères SBR et SA en fonction de la teneur en polymère et l'âge.

Chapitre 4. Analyses et discussions des résultats

Nous remarquons que les mortiers témoins développent un rapport (R_c/R_f) plus grand par rapport aux mortiers contenant le SBR ou le SA durant toutes les périodes examinées. En outre, on observe que la ténacité décroît fortement avec l'augmentation de la teneur en latex de 0 à 15%. Cependant, pour des teneurs en latex plus élevées, l'effet n'est pas significatif.

Ces résultats sont en accord avec les résultats trouvés dans la littérature (Wang, 2005) (Wang, 2010) (Wang, 2011a) (Wang, 2011b) (Ma, 2013) (Parghi, 2016). Cela suggère que la ténacité des mortiers modifiés s'améliore en incorporant les latex.

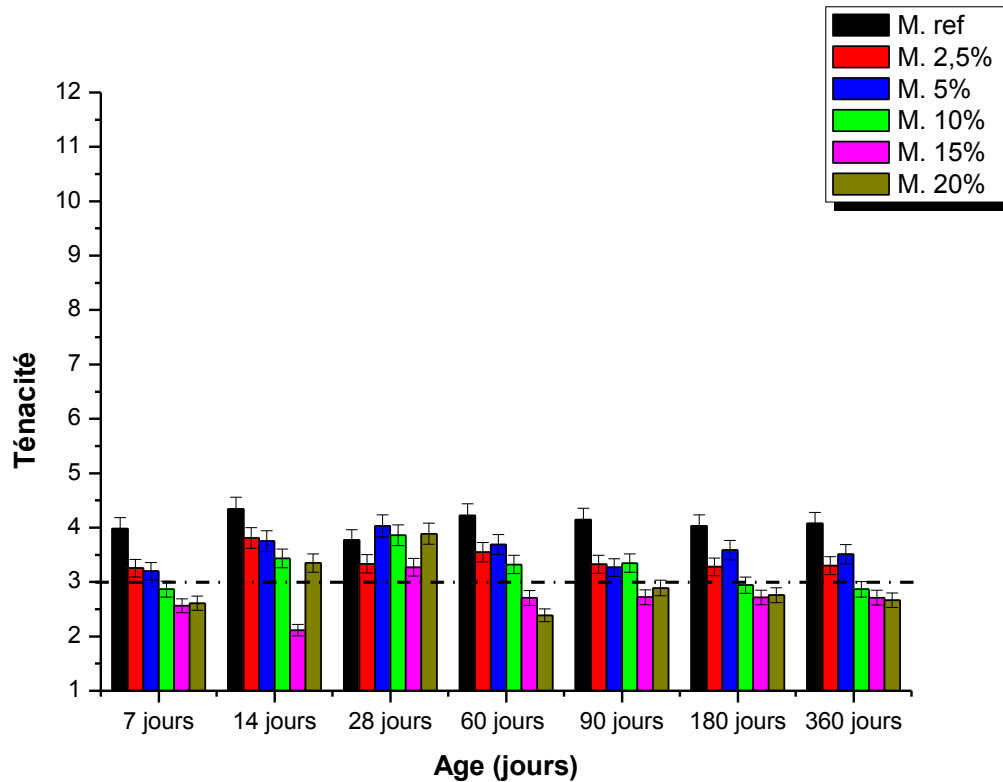


Figure 4.11. Influence de l'âge et la teneur en latex le SBR sur la ténacité des mortiers soumis à la cure mixte.

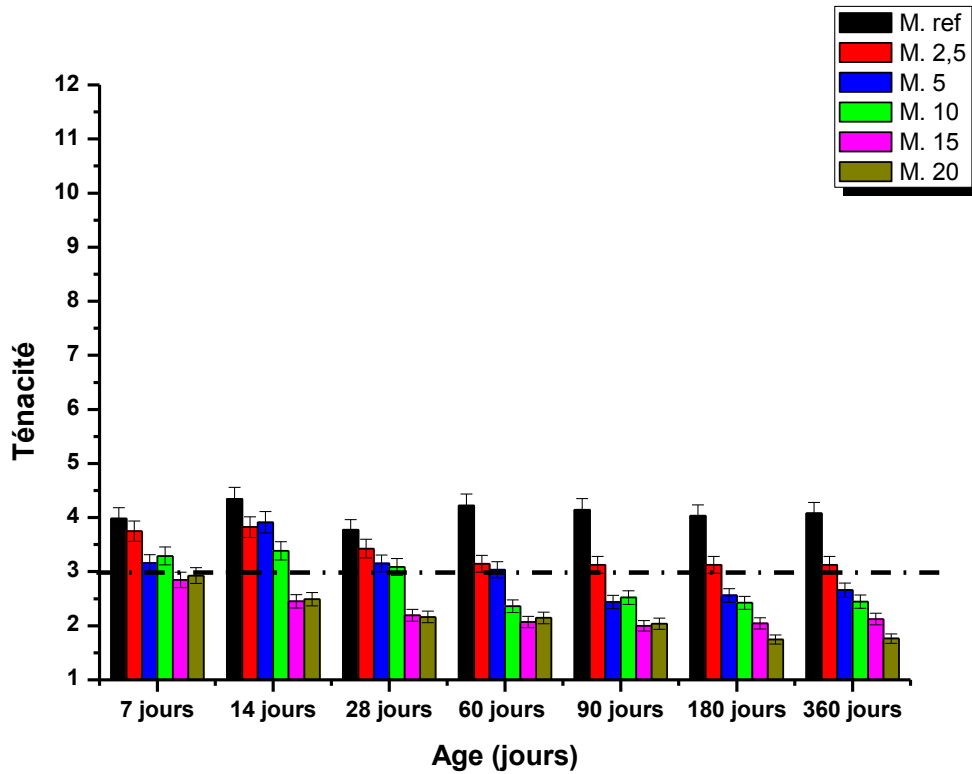


Figure 4.12. Influence de l'âge et la teneur en latex le SA sur la ténacité des mortiers soumis à la cure mixte.

4.3.3.2. Cure sèche :

En analysant également les deux figures 4.13 et 4.14 qui présentent les valeurs de la ténacité des mortiers modifiés par le SBR et le SA en fonction de la teneur en polymère et l'âge (cure sèche), on remarque que les valeurs de la ténacité décroissent avec l'augmentation du dosage en latex de 5 à 20%. Cela suggère que la ténacité des mortiers modifiés s'améliore en incorporant les latex.

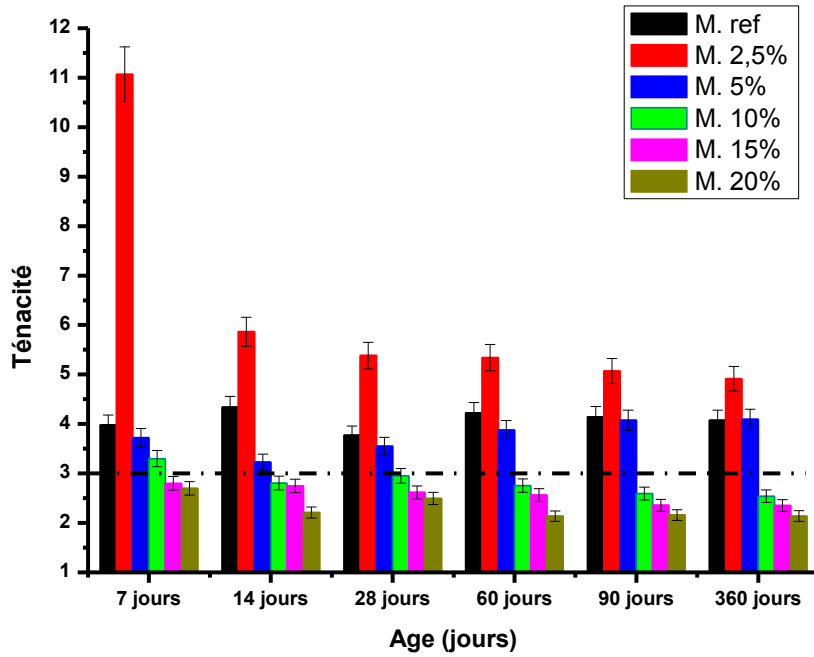


Figure 4.13. Influence de l'âge et la teneur en latex le SBR sur la ténacité des mortiers soumis à la cure sèche.

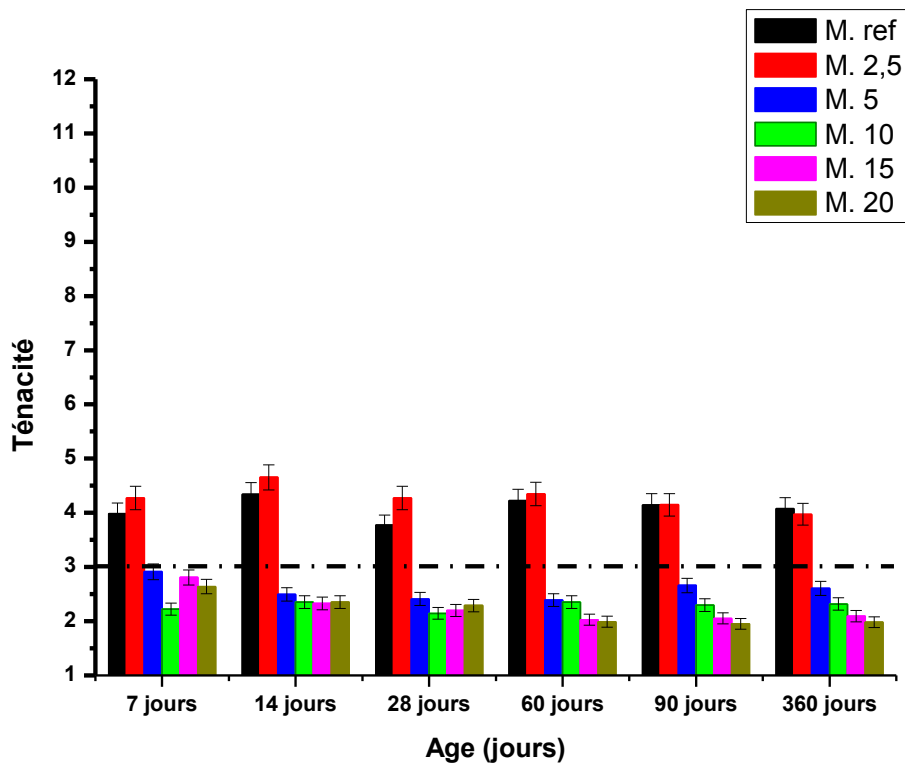


Figure 4.14. Influence de l'âge et la teneur en latex le SA sur la ténacité des mortiers soumis à la cure sèche.

Toutefois, en observant les résultats des deux cures, on trouve que la cure mixte est nettement préférable pour le développement de la ténacité des mortiers. Ces résultats corroborent les résultats trouvés par (Wang, 2005) (Parghi, 2016).

4.3.4. L'adhérence des mortiers :

4.3.4.1. Adhérence des mortiers aux briques de terre cuite :

Les résultats de l'adhérence aux briques, des mortiers témoins et modifiés en fonction du taux de substitution et de l'âge sont illustrés par les figures 4.15 et 4.16. Ces résultats sont la moyenne de trois essais sur des mortiers appliqués aux briques de terre cuite.

Une influence significative du taux de substitution du ciment a été constatée pour l'adhérence au support-briques. Cette influence est remarquable au-delà de 5% de substitution du ciment par les deux types de latex. Ces derniers à 20% de substitution et à 28 jours, ont entraîné une augmentation de l'adhérence aux briques en terre cuite par rapport aux mortiers témoins de 84% et 82 % respectivement pour le styrène butadiène (SBR) et le styrène acrylique (SA) et une augmentation de 82% et 81% à l'âge de 90 jours.

4.3.4.2. Adhérence des mortiers aux dalletes en béton :

Les figures 4.17 et 4.18 illustrent les résultats de l'adhérence aux dalletes en béton, des mortiers témoins et modifiés en fonction du taux de substitution et de l'âge.

Les résultats montrent une influence significative du taux de substitution du ciment sur l'adhérence aux dalletes en béton comme celles des briques ; toutefois l'influence sur ce support est plus grande. En effet, l'incorporation respectivement de 20% du styrène-butadiène (SBR) et du styrène acrylique (SA) a entraîné une augmentation respective de l'ordre de 58% et 36 % en comparaison aux mortiers de référence à l'âge de 28 jours et une augmentation de 52% et 28% à l'âge de 90 jours.

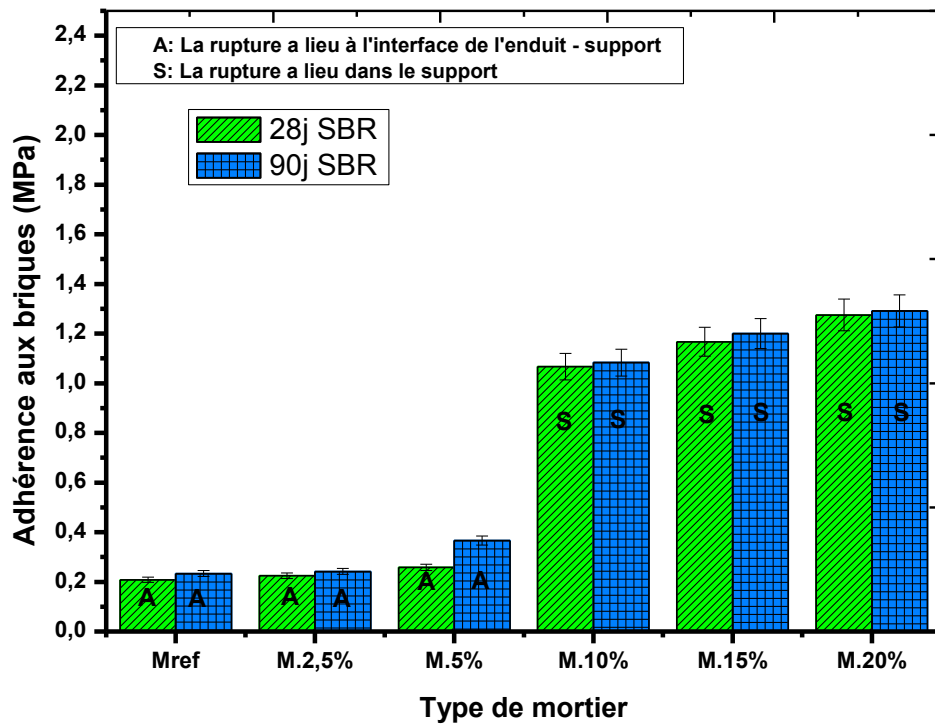


Figure 4.15. Influence de l'âge et la teneur en SBR sur l'adhérence des mortiers aux briques en terre cuite.

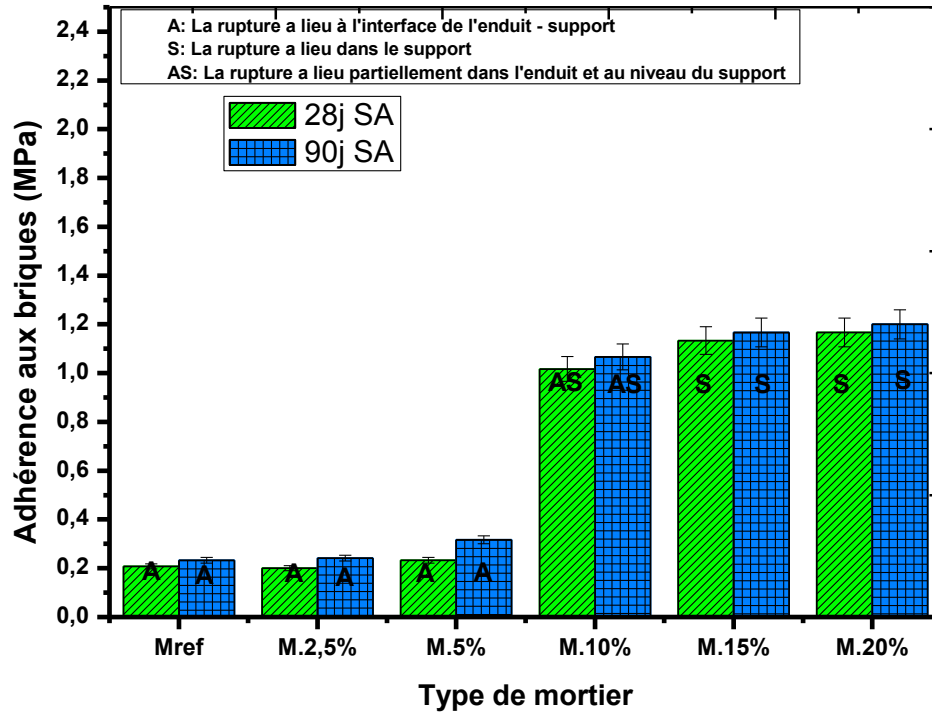


Figure 4.16. Influence de l'âge et la teneur en SA sur l'adhérence des mortiers aux briques de terre cuite.

En comparant les deux histogrammes, on remarque que les mortiers modifiés par le SBR développent une adhérence plus grand que celles modifiées par le SA.

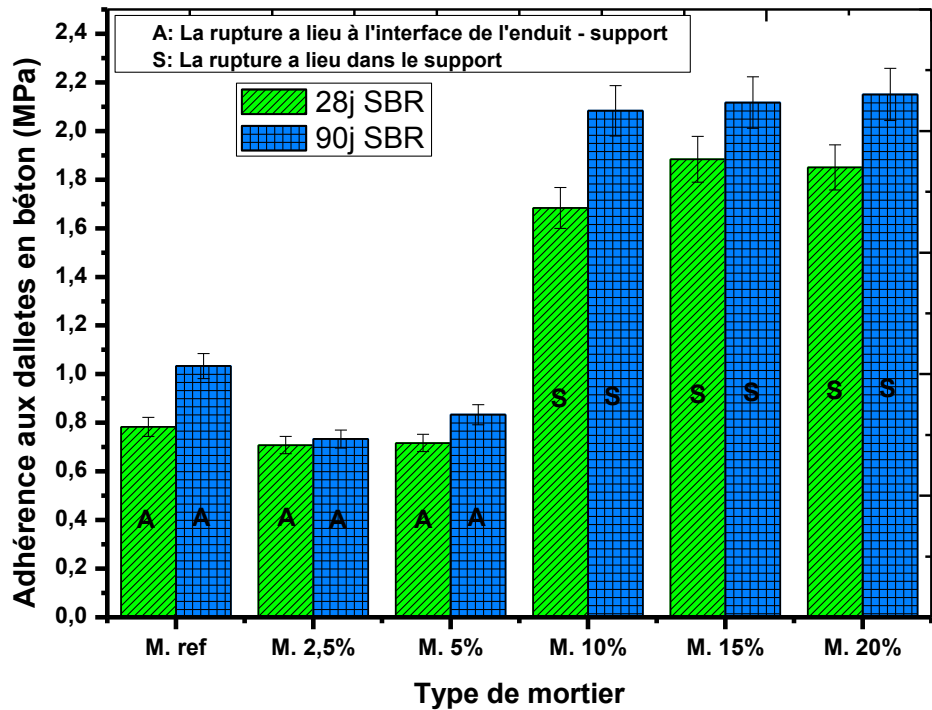


Figure 4.17. Influence de l'âge et la teneur en latex le SBR sur l'adhérence des mortiers aux dalles en béton.

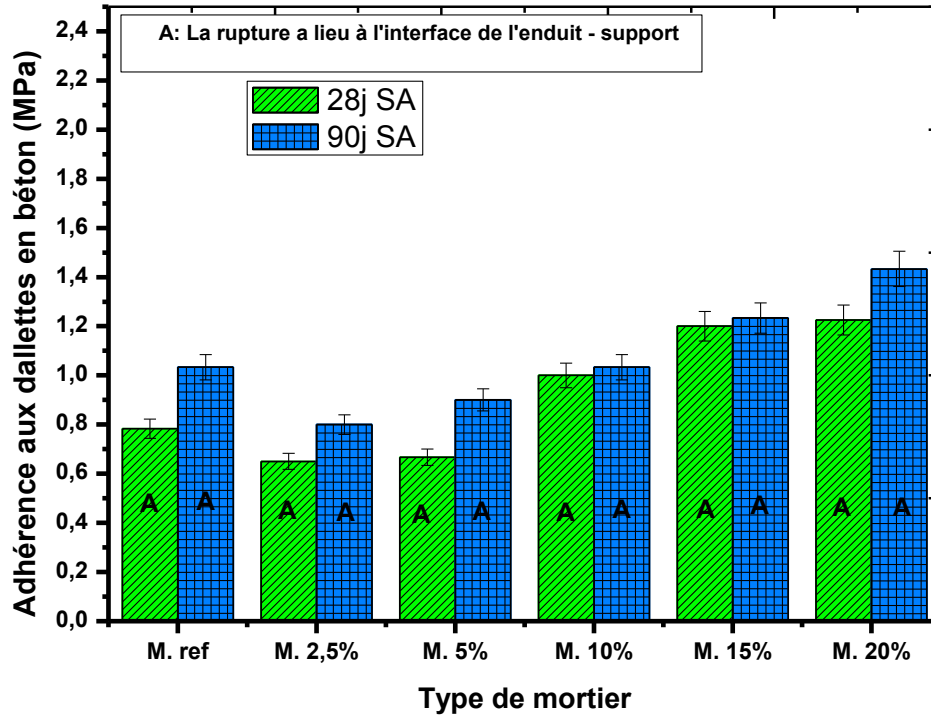


Figure 4.18. Influence de l'âge et la teneur en latex le SA sur l'adhérence des mortiers aux dalles en béton.

4.3.4.3. Adhérence des mortiers bicomposés:

Les résultats de l'adhérence des mortiers bicomposés, en fonction du taux de substitution à l'âge de 28j, soumis à la cure sèche et mixte sont illustrés par les figures 4.19 et 4.20. Ces résultats sont la moyenne de trois essais.

Une première analyse des résultats que l'adhérence des mortiers augmente en augmentant le taux de substitution ; cette tendance est plus remarquée au-delà du taux de 10% de substitution. D'autre part, les mortiers modifiés soumis à une cure sèche de 28j, développent des résistances plus grandes que celles soumises à la cure mixte au même âge. Ces derniers peuvent développer des résistances plus importantes à long terme que celles dont la cure était sèche, après que le film polymère ne se développe totalement.

Toutefois, pour les mortiers non modifiés, on remarque que la cure sèche développe des liaisons faibles en comparaison aux autres types de cure testés (hydratation incomplète).

Dans la littérature, on trouve plusieurs travaux ayant examiné l'effet de l'ajout du polymère sur l'adhérence des mortiers aux différents supports. Afridi et col. (Afridi, 1995) ont effectué plusieurs essais d'adhérence sur des supports en mortiers. Ils ont remarqué que l'ajout aux mortiers des latex EVA ou SBR avec des taux croissants allant de 0 à 20% sous forme de poudre ou émulsion, augmente l'adhérence. Ohama (Ohama, 1995) (Ohama, 1998) montre aussi que l'adhérence des mortiers modifiés par le SBR, le PAE et l'EVA augmente avec l'augmentation du rapport P/C de 0 à 20%. L'effet bénéfique de l'introduction des polymères en poudre l'EVA polyéthylène-covinyleacétate sur l'adhérence des mortiers appliqués sur des supports en céramique a été démontré aussi par Mansur et al. (Mansur, 2009).

Chapitre 4. Analyses et discussions des résultats

Des observations similaires ont été faites par Jenni et col. (Jenni, 2005) sur l'adhérence des mortiers préparés par la poudre de l'alcool polyvinyle et l'éther de cellulose. Brien et col. (Brien, 2013) ont aussi étudié l'effet de quatre types de poudre polymère l'une est à base d'acrylique, l'autre à base de styrène butadiène, et deux autres à base d'acétate de vinyle, sur l'adhérence des mortiers préparés au ciment sulfo-aluminate de calcium. Les auteurs utilisent trois différents supports : un béton ordinaire préparé en ciment Portland, des substrats en bois, des plats métalliques et des pièces en verres avec un P/C égal à 15%. Ils ont trouvé que tous les mortiers modifiés affichent de bonnes caractéristiques en termes d'adhérence surtout pour les supports à base de béton.

De manière générale, on remarque que l'ensemble des résultats des travaux réalisés dans ce contexte arrive à conclure qu'indépendamment de la nature et du type de latex incorporé, l'adhérence des mortiers modifiés est meilleure par rapport à celle obtenue avec le mortier non-modifié (Ngassam, 2013).

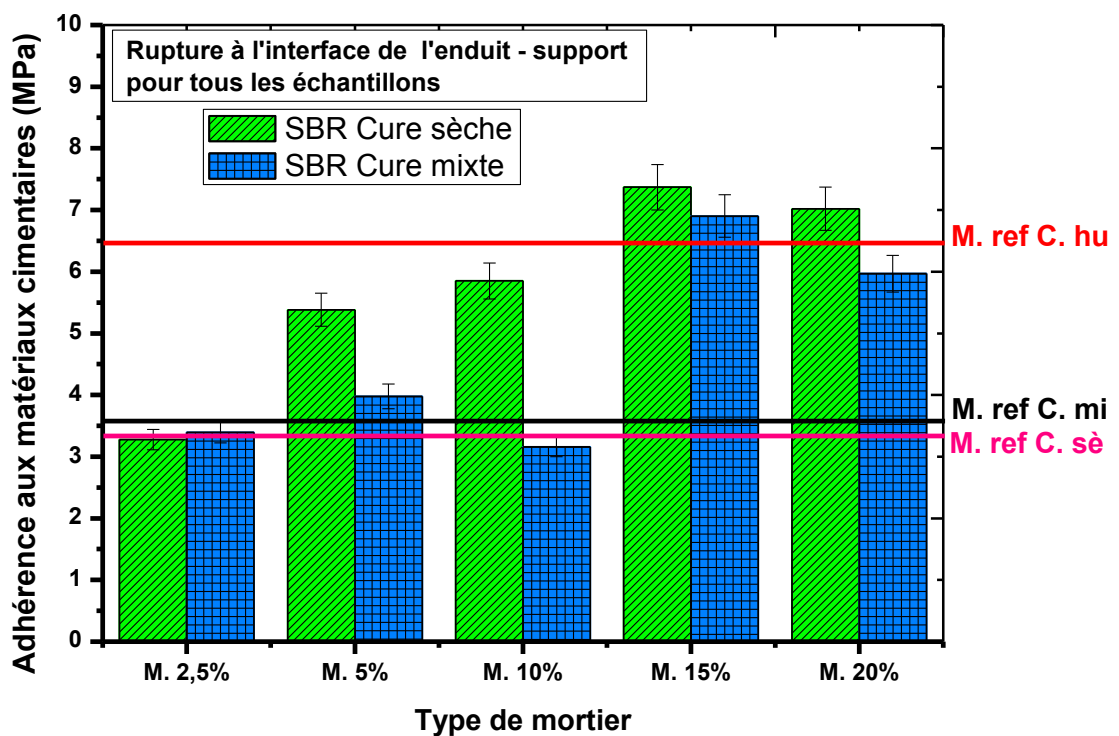


Figure 4.19. Influence de la cure et la teneur en SBR sur l'adhérence des mortiers bicomposés.

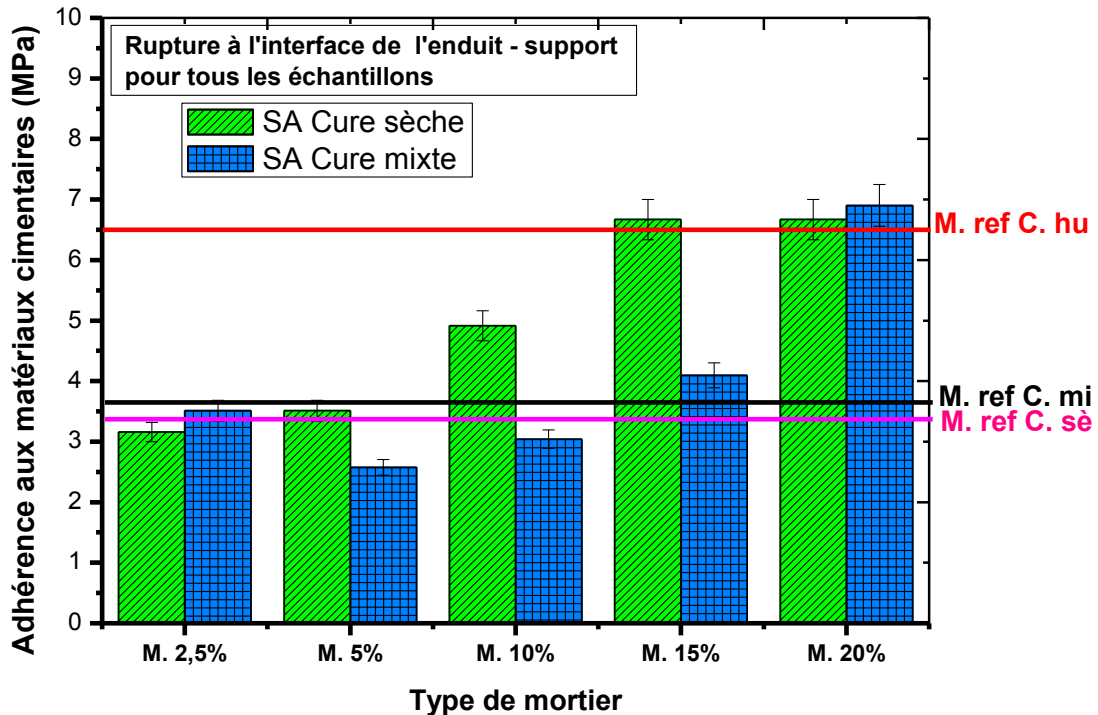


Figure 4.20. Influence de la cure et la teneur en SA sur l'adhérence des mortiers bicomposés.

Ces observations sont sûrement dues à la forte adhésion des polymères aux différents matériaux. La principale raison de l'amélioration de l'adhérence provient de la formation d'un film polymère et des hydrates de ciment à l'interface du mortier modifié et du support (Do, 2003) (Mansur, 2009) (Ngassam, 2013)(Pierre, 2008). Les films de latex entrelacent les hydrates de ciment en formant une structure monolithique polymère-ciment qui viennent ponter les pores et les fissures dans l'interface mortier-substrat (Mansur, 2009).

De plus, certaines études expliquent cette augmentation par la création de liaisons hydrogènes entre les hydrogènes des groupements hydroxydes du polymère et les ions et molécules à la surface du support (Mansur, 2009). Toutefois, la majorité des auteurs s'accorde à dire que cette amélioration est l'une des conséquences de la réaction entre les groupements acides du polymère et les ions calcium présents à la surface du matériau support, réaction qui est également responsable de la hausse des résistances mécaniques (cf. figure 1.14 du chapitre 1).

Lorsque l'acide carboxylique lié chimiquement à la surface des particules de polymère ionise dans l'environnement fortement alcalin (milieu à pH élevé), les mortiers ont tendance à réagir avec les ions de calcium trouvés dans les supports. Le résultat de cette interaction est une stabilité améliorée du latex polymère et une amélioration de la résistance de la liaison entre les mortiers modifiés et les substrats existants (Mansur, 2009) (Yang, 2009) (Ngassam, 2013). Les substrats utilisés dans cette étude sont connus comme des matériaux très poreux. Selon Mansur et col. (Mansur, 2009), la liaison des mortiers modifiés aux supports très poreux, qui ont une absorption d'eau élevée (> 6% en poids), présente un ancrage mécanique et une amélioration générale des propriétés des mortiers en plus de la formation du film polymère à l'interface. Les hydrates de ciment et les latex s'infiltrèrent dans le réseau poreux des supports utilisés (briques et matériaux cimentaires), et adhérer ainsi fortement à ces substrats. (cf. figure 2.73 du chapitre 2).

En observant les résultats de plus près, on remarque aussi que de meilleures propriétés d'adhérence sont obtenues avec les mortiers modifiés par le SBR surtout pour des taux de substitution importants en comparaison avec les mortiers modifiés par le SA. Une explication a été avancée par Ngassam (Ngassam, 2013) sur l'adhérence des mortiers modifiés par l'EVA et le SA. Les meilleures performances d'adhérence obtenues par les mortiers modifiés par le SBR sont dues au comportement rhéologique des mortiers. En effet, ces mortiers ont une fluidité plus importante que celle des mortiers contenant le SA. Plusieurs chercheurs (Courard, 1998) (Courard, 2000) (Ngassam, 2013) (Courard, 2014), définissent cette fluidité par la mouillabilité du matériau. Ces derniers disent que, le matériau doit avoir une bonne mouillabilité et un bon étalement pour augmenter la surface effective de contact entre le mortier et le support, ce qui favorise par la suite l'adhérence des mortiers aux différents supports.

4.3.5. Modes de rupture :

Les figures 4.21, 4.22 et 4.23 représentent les modes de rupture des échantillons après l'essai d'arrachement et l'essai de traction par flexion des mortiers bicomposés.

Dans le cas des briques, on constate qu'au-delà de 10% de substitution de ciment par les latex, la rupture est purement cohésive dans le support à l'âge de 28 et 90 jours, contrairement aux faibles taux où la rupture est quasiment à l'interface. Tandis qu'à 10% de substitution par le SA, la rupture est à la fois cohésive dans le support et aussi à l'interface.

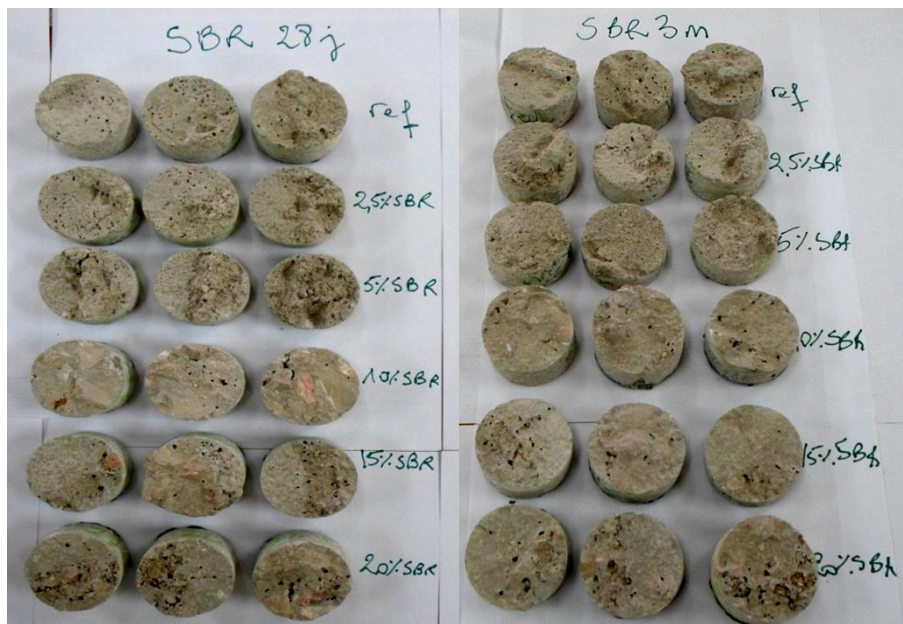


(a) Mode de rupture des mortiers modifiés SBR–brique à l'âge de 28 et 90 jours



(b) Modes de rupture des mortiers modifiés SA– brique à l'âge de 28 et 90 jours

Figure 4.21 (a) et (b) Modes de rupture des mortiers appliqués sur les briques en terre cuite.



(a) Modes des ruptures des mortiers modifiés SBR–dalletes en béton à l'âge de 28 et 90 jours



(b) Modes de rupture des mortiers modifiée SA-dalletes en béton à l'âge de 28 et 90 jours

Figure 4.22 (a) et (b) Modes de rupture des mortiers modifiés appliqués sur des dalles en béton.



Figure 4.23. Mode de rupture des éprouvettes bicomposées.

En revanche, pour les dalles en béton, la rupture est quasiment à l'interface pour tous les mortiers modifiés par le SA, alors que le SBR développe des ruptures cohésives dans les dalles au-delà de 10% de substitution. Ceci est sûrement dû à la nature de la surface des dalles (plus dure que la surface des briques) et aussi à la grande fluidité des mortiers modifiés par le SBR.

Quant aux éprouvettes bicomposées, elles présentent des ruptures à l'interface mortiers – matériau cimentaire pour toutes les formulations étudiées et les cures utilisées. Ceci est certainement dû à l'état de la surface de la couche du substrat (surfaces planes) ou à l'inadéquation de cet essai dont la préparation des corps d'épreuve reste délicate. A ce propos et pour mieux faire ressortir la rupture cohésive, il est nécessaire que les supports en ciment pour les éprouvettes bicomposées aient une surface rugueuse. L'augmentation de celle-ci

provoque une augmentation de la surface de contact qui augmente l'adhérence (Momayez, 2005) (Garbacz, 2006) (Courard, 2014) (Mirza, 2014).

4.3.6. La porosité accessible à l'eau :

Nous présentons dans ce qui suit les résultats des porosités accessibles à l'eau obtenus après une cure mixte de 28 jours et un séchage à 60° C jusqu'à stabilisation de leur masse. Les résultats ont été obtenus sur six essais pour chaque échantillon. Les valeurs moyennes des porosités sont présentées dans la figure 4.24.

La porosité accessible à l'eau est fortement influencée par les taux de substitution, surtout pour ceux dont le taux est élevé comme déjà signalé dans la littérature pour les mortiers modifiés (Barluenga, 2004) (Ngassam, 2013) (Soni, 2014).

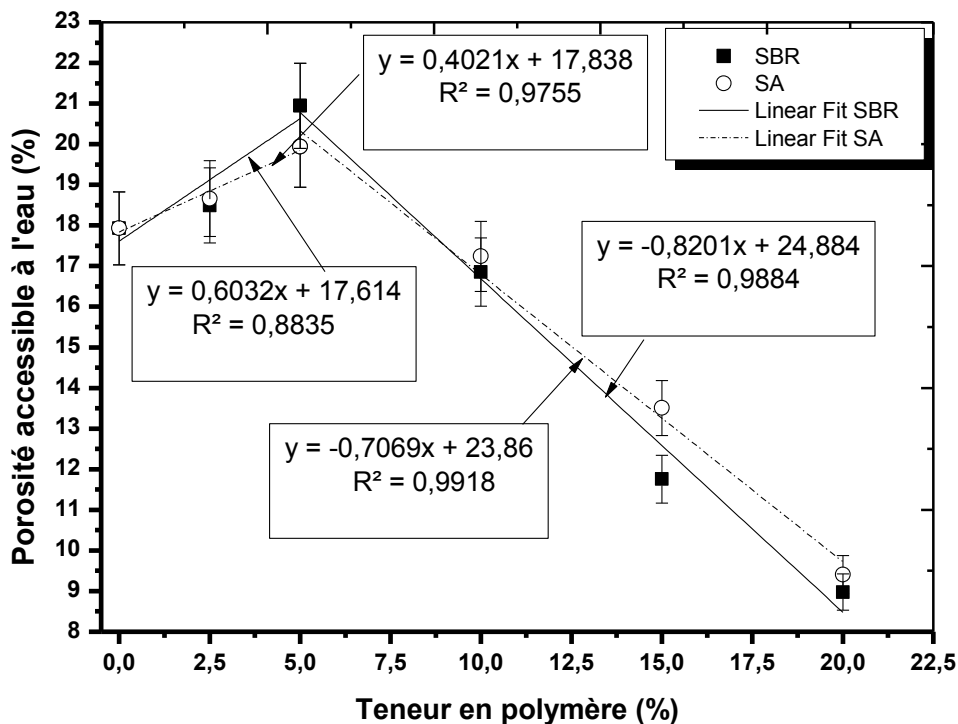


Figure 4.24. Influence du taux de substitution sur la porosité accessible à l'eau des mortiers.

La figure 4.24 montre que la porosité ouverte du mortier modifié par respectivement les polymères SBR et SA, suit une fonction linéaire avec une inflexion à 5% de substitution. De plus, on note que la porosité diminue dans les mortiers modifiés par rapport au mortier témoin pour les taux de remplacement du ciment au-delà de 10%. Elle est d'environ 50% et 48% en comparant les mortiers témoins à celui présentant 20% de polymère respectivement pour SBR et SA. Ces observations sont aussi bien confirmées par la figure 4.25 où on voit clairement que le cœur des échantillons est resté sec au-delà de 10% de substitution après l'essai de la porosité accessible à l'eau, cela signifie que l'eau n'a pas atteint le cœur de ces échantillons.

Ces résultats sont sûrement dus au changement signalé dans la microstructure des mortiers à cause de l'introduction des polymères en quantité suffisante et du séchage. L'apparition du film polymère et la co-matrice dans le réseau matriciel des systèmes modifiés viennent ponter les pores ouverts et les fissures, ralentir leur propagation, ce qui diminue par la suite le

nombre de pores (pores de 200 nm de rayon) et renforce la résistance de l'interface liant-granulat comme nous l'avons expliqué précédemment (ACI, 2003) (Ramli, 2012b) (Ngassam, 2013) (Ramli, 2013) (Soufi, 2013) (Soni, 2014). Cependant, l'empêchement du développement d'un film polymère cohérent et aussi la diminution de la quantité de ciment dans les mortiers présentant 2.5 et 5% de substitution par rapport aux témoins, peut être justifiée par la légère augmentation de la porosité accessible à l'eau. Afridi et col. (Afridi, 2003) ont remarqué qu'au-delà de 10% d'introduction de polymère dans les mortiers, un film polymère cohérent peut être développé contrairement aux faibles taux où le film est moins prononcé donc l'effet bénéfique n'apparaît guère.

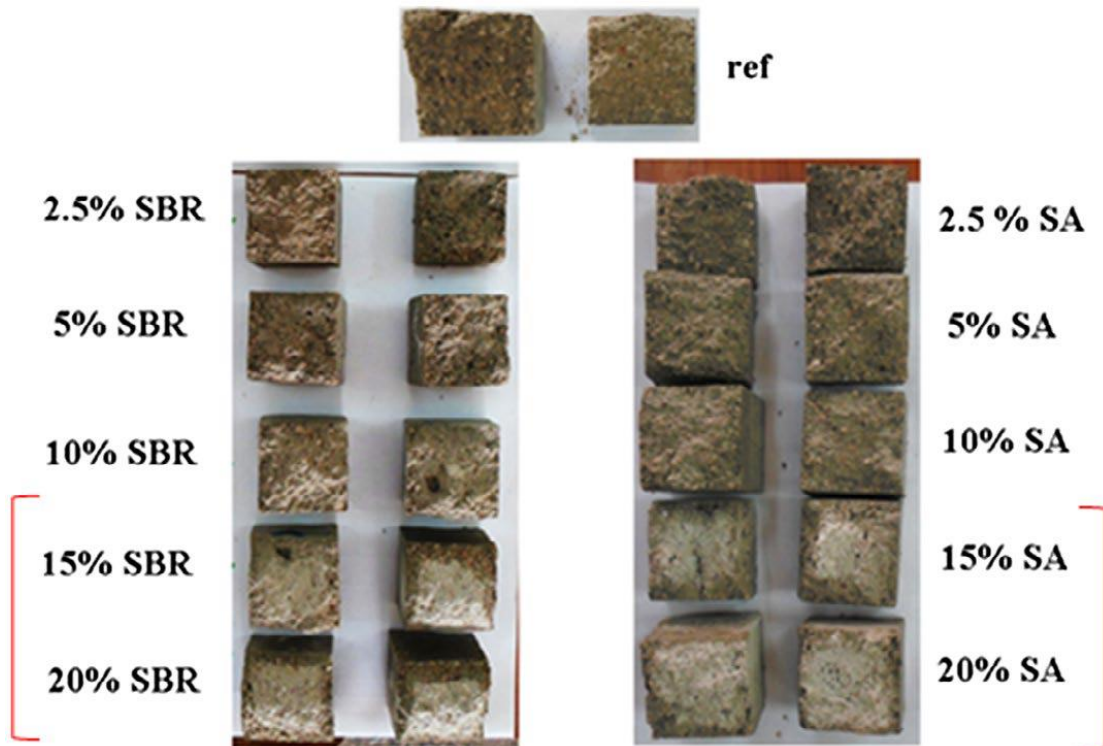


Figure 4.25. Echantillons coupés après le test de la porosité accessible à l'eau.

4.3.7. L'absorption d'eau :

Dans la détermination des performances des mortiers vis-à-vis de la durabilité, la porosité ouverte accessible à l'eau est un indicateur majeur ; mais il est tout aussi nécessaire d'observer leur absorption en eau. La figure 4.26 décrit l'absorption d'eau des différents mortiers en fonction du taux de substitution des deux latex utilisés.

Comme déjà expliqué auparavant, le film polymère remplit ou scelle les micropores et les vides qui se produisent généralement dans les mortiers de ciment portland. Ce remplissage des fissures augmente avec la teneur croissante de polymère introduit dans la matrice cimentaire. En conséquence, une diminution significative de l'absorption d'eau est signalée.

La figure 4.26 présente une corrélation entre l'absorption en eau et le taux de substitution de ciment par les latex respectivement le SBR et le SA.

On remarque une nette réduction du pourcentage d'absorption d'eau avec l'augmentation du taux de substitution. En effet, l'augmentation de ce dernier de 0 à 20% a entraîné une

réduction pour les deux polymères avoisinant 90.5% de l'absorption en eau. A ce stade, on peut dire que l'absorption d'eau des mortiers modifiés respectivement par le SBR et le SA est proportionnelle au dosage de substitution et suit une tendance linéaire, dont les coefficients de corrélation, sont satisfaisants, de l'ordre de 0,90 et 0,73.

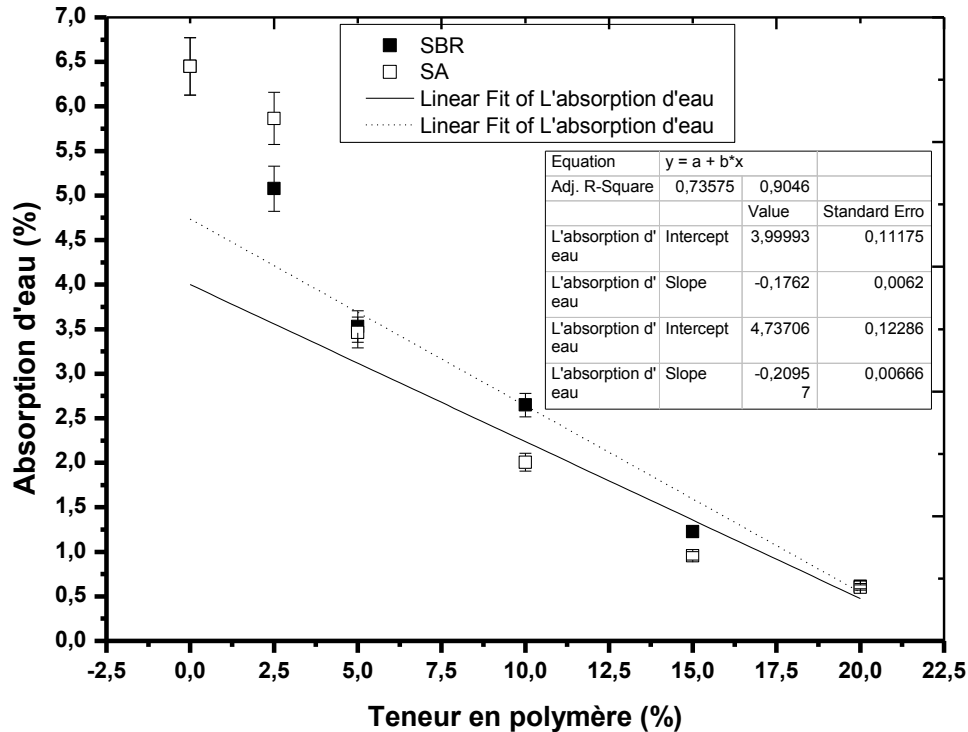


Figure 4.26. Influence du taux de substitution sur l'absorption l'eau des mortiers.

4.4. Conclusions :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats expérimentaux réalisés dans le cadre de cette recherche. Nous avons à la fin, pu tirer les enseignements suivants :

L'utilisation des latex SBR et SA en substitution au ciment portland composé, améliore la fluidité des mortiers testés. Lorsque la quantité de substitution est passée de 0 à 20%, le rapport E/C est réduit de 0.5 à 0.25 pour la même fluidité. Cela est attribué à l'effet de roulement à billes dû aux particules de polymère, l'air entraîné et l'effet dispersant des surfactants que contient le latex.

La résistance à la compression augmente avec l'augmentation de l'âge et du dosage en ciment dans le mélange; toutefois la substitution du minéral (ciment) par le polymère diminue la porosité ouverte accessible à l'eau, l'absorption en eau, la résistance à la compression et favorise un accroissement de la résistance de la traction par flexion au-delà de 60 jours.

Une cure mixte est plus bénéfique du point de vue résistance mécanique que la cure sèche des composites mortiers modifiés aux latex.

Les latex (SBR et SA) induisent une augmentation de l'adhérence des mortiers aux supports : briques de terre cuite et dalles en béton. Au-delà de 10% de substitution du ciment, la rupture des mortiers modifiés est purement cohésive sur le support en terre cuite, contrairement aux faibles taux où la rupture se situe à l'interface. En revanche, pour les

supports cimentaires, la rupture est toujours au niveau de l'interface excepté le cas du mortier modifié au SBR ($\geq 10\%$), la rupture est cohésive. Les principales raisons de cette amélioration proviennent de la formation d'un film polymère et des hydrates de ciment à l'interface du mortier modifié –support. Les films de latex entrelacent les hydrates de ciment en formant une structure monolithique polymère-ciment qui viennent ponter les pores et les fissures dans l'interface (mortier-substrat). En outre, les substrats utilisés dans cette étude sont connus comme des matériaux très poreux. Donc les hydrates de ciment et les latex s'infiltrèrent dans le réseau poreux des supports utilisés (briques et matériaux cimentaires), et adhérer ainsi fortement à ces substrats.

L'augmentation de la mouillabilité et l'étalement des mortiers ont tendance à augmenter la surface effective de contact entre le mortier et le support, ce qui provoque par la suite l'accroissement de la force de liaison.

Une plage de substitution variant de 10 à 15% du ciment par le latex, semble efficace selon les applications requises, si on prend en compte l'équilibre entre les performances mécaniques, la durabilité, la quantité de polymère introduite et le coût de l'opération.

Conclusion générale et perspectives

Le concept des mortiers modifiés par des polymères synthétiques (latex) utilisés comme adjuvants existe depuis plusieurs décennies. En revanche, dans la littérature, les études expérimentales qui exposent l'effet de la substitution d'une partie de la matrice cimentaire par du polymère latex dans les mortiers, sont encore rares.

Notre étude s'inscrit dans ce contexte et la campagne expérimentale réalisée au laboratoire EOLE apporte quelques éclairages à ce sujet. On a en effet procédé à la substitution de quantités de ciment CPJ CEM II/A 42.5 de plus en plus croissantes par du latex synthétique : le styrène butadiène (SBR) et le styrène acrylique (SA) allant de 2.5 à 20 % en extrait sec. Les résultats obtenus sont comparés avec des mortiers de référence qui sont de même composition ; mais dont le liant est uniquement le ciment.

L'objectif fondamental de ce travail de recherche est de mettre en évidence l'influence de ces fluides sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et de durabilité des mortiers classiques.

Pour la fluidité, les résultats montrent que la substitution croissante du ciment par les latex (SBR et SA) dans le mélange cimentaire conduit à une diminution de la quantité d'eau de gâchage, ce qui explique l'utilisation avec succès de ces latex comme plastifiants réducteurs d'eau.

Du point de vue mécanique, il s'est avéré que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation du dosage en ciment dans le mélange et en fonction de l'âge ; tandis que l'accroissement de la quantité de polymère substituée au ciment diminue à la fois la porosité ouverte accessible à l'eau des mortiers modifiés, leur absorption en eau et leur résistance à la compression et favorise en revanche l'accroissement de la résistance à la traction par flexion. Pendant le durcissement de ces mortiers, le polymère est filmifié et la phase liante est composée donc de films polymères entremêlés aux hydrates de ciment (co-matrice). Cela renforce la résistance de l'interface liant-granulat, particulièrement sollicité pendant les essais de traction par flexion.

Les résultats expérimentaux ont aussi montré qu'une cure mixte offre aux mortiers modifiés plus de résistance mécanique que la cure sèche.

La modification des mortiers par les latex (SBR et SA) provoque une augmentation de la force de liaison des mortiers aux briques de terre cuite et aux supports cimentaires. Au-delà de 10% de substitution de ciment, la rupture des mortiers modifiés est purement cohésive sur le support en terre cuite, contrairement aux faibles taux où la rupture se situe à l'interface. Tandis que pour les supports cimentaires, la rupture est toujours au niveau de l'interface sauf pour le cas du mortier modifié au SBR ($\geq 10\%$), où la rupture est cohésive. L'augmentation de la mouillabilité et l'étalement des mortiers ont tendance à augmenter la surface effective de contact entre le mortier et le support, ce qui favorise par la suite l'adhérence.

En comparant l'effet des deux latex, on trouve que les mortiers contenant du SA ont une meilleure résistance à la compression, à la traction par flexion et à la ténacité alors que ceux contenant le SBR ont une adhérence légèrement plus grande.

Conclusion générale et perspectives

La substitution du ciment allant de 10 à 15% par le latex semble efficace selon les applications requises, si on prend en compte l'équilibre entre les performances mécaniques, de durabilité et la quantité de polymère introduit.

À partir des résultats obtenus, on peut dire que l'utilisation des latex en substitution du ciment portland dans les mortiers, peut leur offrir une meilleure durabilité, une meilleure adhérence aux différents supports et un comportement mécanique légèrement amélioré ce qui leur confère une plus grande durée de vie.

Les perspectives de cette recherche sont nombreuses et peuvent s'exprimer dans ce qui suit :

- Quantification de l'effet des latex sur la microstructure des mortiers par l'utilisation des essais de diffraction aux rayons X et de microscopie électronique à balayage,
- Etude de la similitude pour différents modes de pré-conditionnement,
- Etude du comportement thermo-hydro-mécanique des mortiers modifiés.
- Etendre le travail aux bétons modifiés au latex pour caractériser leur durabilité, après optimisation de leur formulation, préparation et maturation.

Références bibliographiques

- (ACI, 1997) ACI Committee 548 (1997). Guide for the Use of Polymers in Concrete: 29.
- (ACI, 2003) ACI Committee 548 (2003). Polymer-Modified Concrete: 40.
- (ACI, 2009) ACI Committee 548 (2009). Guide for the Use of Polymers in Concrete: 30.
- (Afridi, 2003) Afridi, M. U. K., Y. Ohama, K. Demura, M.Z. Iqbal. (2003). "Development of polymer films by the coalescence of polymer particles in powdered and aqueous polymer-modified mortars." *Cement and Concrete Research* **33**: 1715 – 1721.
- (Afridi, 1989) Afridi, M. U. K., Y. Ohama, M. Zafar Iqbal, K. Demura. (1989). "Behaviour of Ca(OH)₂ in polymer modified mortars " *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete* **11**(4): 235-244
- (Afridi, 1995) Afridi, M. U. K., Y. Ohama, M. Zafar Iqbal & K. Demura. (1995). "Water Retention et Adhesion of Powdered and Aqueous Polymer-Modified Mortars " *Cement and Concrete Composites* **17**(2): 113-118.
- (Aggarwal, 2007) Aggarwal, L. K., P. C. Thapliyal, S.R. Karade. (2007). "Properties of polymer-modified mortars using epoxy and acrylic emulsions." *Construction and Building Materials* **21**: 379–383.
- (Ahmed, 2011) Ahmed, S. F. U. (2011). "Mechanical and Durability Properties of Mortars Modified with Combined Polymer and Supplementary Cementitious Materials." *Journal of Materials in Civil Engineering* **23**: 1311-1319.
- (Aliabdo, 2012) Ali Abd-Elhakam Aliabdo and A. E. M. Abd-Elmoaty (2012). "Experimental investigation on the properties of polymer modified SCC." *Construction and Building Materials* **34**: 584–592.
- (Amaral, 2004) Amaral, M. D. (2004). "Assessing the environmental cost of recent progresses in emulsion polymerization." *Reactive & Functional Polymers* **58**: 197–202.
- (Anagnostopoulos, 2002) Anagnostopoulos, C. A. and A. C. Anagnostopoulos (2002). "Polymer-cement mortars for repairing ancient masonries mechanical properties." *Construction and Building Materials* **16**: 379–384.
- (ASTM C230, 2008) ASTM C230/C230M-08 (2008). Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement.
- (ASTM C1437, 2007) ASTM C1437-07 (2007). Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar.
- (ASTM C1439, 1999) ASTM C1439-99 (1999). Standard Test Methods for Polymer-Modified Mortar et Concrete: 4.
- (Atsonios, 2015) Atsonios, K., P. Grammelis, S.K. Antiohos, N. Nikolopoulos, Em. Kakaras. (2015). "Integration of calcium looping technology in existing cement plant for CO₂ capture: Process modeling et technical considerations." *Fuel* **153**: 210–223.
- (Bakhsh, 2010) Bakhsh, K. N. (2010). Evaluation of Bond Strength between Overlay and Substrate in Concrete Repairs Master's thesis, KTH Architecture and the Built Environment, Sweden.
- (Balayssac, 2011) Balayssac, J. P., P. Nicot, B. Ruot, O. Devès, C.H. Détriché. (2011). "Influence of admixtures on the cracking sensitivity of mortar layers applied to a mineral substrate." *Construction and Building Materials* **25**: 2828–2836.
- (Barluenga, 2004) Barluenga, G. and F. Hernaández-Olivares (2004). "SBR latex modified mortar rheology and mechanical behaviour." *Cement and Concrete Research* **34**: 527 – 535.
- (Baueregger, 2014) Baueregger, S. M. (2014). Interaction of Latex Polymers with Cement-Based Building Materials. Ph.D. Thesis, University of Munich, Germany.

Références bibliographiques

- (Beeldens, 2005) Beeldens, A., D. V. Gemert, H. Schorn, Y. Ohama, L. Czarnecki. (2005). "From microstructure to macrostructure: an integrated model of structure formation in polymer-modified concrete " *Materials and Structures* **38**: 601-607
- (Belkhodja, 2013) Belkhodja, A. (2013). Etude des interactions ciment – polymères dans un matériau de construction. Mémoire de magister, Université Abou-Bekr Belkaid de Tlemcen, Algérie.
- (Benali, 2017) Benali, Y. and F. Ghomari (2017). "Latex influence on the mechanical behavior and durability of cementitious materials." *Journal of Adhesion Science and Technology* **31**(3): 219-241.
- (Benosman, 2010) Benosman, A. S. (2010). Performances Mécaniques et Durabilité des Matériaux Cimentaires Modifiés par Ajout de Polymère (PET). Thèse de doctorat, Université d’Oran, Algérie.
- (Benyahia, 2009) Benyahia, B. (2009). Modélisation, expérimentation et optimisation multicritère d’un procédé de copolymérisation en émulsion en présence d’un agent de transfert de chaîne, Thèse de doctorat, Université de Nancy, France.
- (Betioli, 2009) Betioli, A. M., J. H. Filho, M.A. Cincotto, P.J.P. Gleize, R.G. Pileggi. (2009). "Chemical interaction between EVA and Portl and cement hydration at early-age." *Construction and Building Materials* **23**: 3332–3336.
- (Boukli Hacène, 2010) Boukli Hacène, S. M. A. (2010). Contribution à l’étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de Tlemcen. Thèse de doctorat, Université AbouBakr Belkaïd, Tlemcen, Algérie.
- (Brien, 2013) Brien, J. V. and K. C. Mahboub (2013). "Influence of polymer type on adhesion performance of a blended cement mortar." *International Journal of Adhesion & Adhesives* **43**: 7–13.
- (BS EN1504-3, 2006) BS EN1504-3 (2006). Products et systems for the protection et repair of concrete structures. Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity. Structural and non-structural repair, British Standard.
- (Bur, 2012) Bur, N. (2012). Etude des caractéristiques physico-chimiques de nouveaux bétons éco-respectueux pour leur résistance à l’environnement dans le cadre du développement durable. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg, France.
- (Chetrashekhar, 1989) Chetrashekhar, G. V., E. I. Cooper, M. W. Shafer. (1989). "Dielectric properties of macro-defect-free (M D F) cements " *Journal of materials science* **24**: 3356 3360
- (Chew, 2011) Chew, M. Y. L., P. P. Tan, Y. S. Yeo BSc.. (2011). "Effect of Styrene Acrylic Ester Polymer on Mortar Render Properties." *Architectural Science Review* **47**: 43-52.
- (Colville, 1999) Colville, J., A. M. Amde, and M. Miltenberger. (1999). "Tensile bond strength of polymer modified mortar " *Journal of Materials in Civil Engineering* **11**: 1-5.
- (Courard, 1998) Courard, L. (1998). Contribution à l'analyse des paramètres influençant la création de l'interface entre un béton et un système de réparation, Thèse de doctorat, Université de Liège, Belgique.
- (Courard, 2000) Courard, L. (2000). "Parametric study for the creation of the interface between concrete and repair products " *Materials and Structures* **33**: 65-72
- (Courard, 2004) Courard, L. and B. Bissonnette (2004). "Adaptation of the pull-off test for the evaluation of the superficial cohesion of concrete substrates in repair works: analysis of the test parameters." *Materials and Structures* **37**(269): 342-350.
- (Courard, 2011) Courard, L., J.-F. Lenaers, F. Michel, A.Garbacz. (2011). "Saturation level of the superficial zone of concrete and adhesion of repair systems." *Construction and Building Materials* **25**: 2488–2494.

Références bibliographiques

- (Courard, 2014) Courard, L., T. Piotrowski, A. Garbacz. (2014). "Near-to-surface properties affecting bond strength in concrete repair." *Cement & Concrete Composites* **46**: 73–80.
- (Czanecki, 2015) Czanecki, L. (2015). "Use of Polymers to Enhance Concrete Performance " *Advanced Materials Research* **1129**: 49-58.
- (Czarnecki, 2007) Czarnecki, L. (2007). "Concrete- polymer Composites : Trends Shaping the Future " *Int. J. Soc. Mater. Eng. Resour* **15**(1): 1-5.
- (Czarnecki, 2013) Czarnecki, L., H. Ózkul, R. Wang. (2013). "Driving Forces Concrete-Polymer Composites " *Advanced Materials Research* **687**: 68-74.
- (Deventer, 2012) Deventer, J. S. J. v., J. L. Provis, P. Duxson. (2012). "Technical and commercial progress in the adoption of geopolymers cement." *Minerals Engineering* **29**: 89–104.
- (Dhaini, 2014) Dhaini, F. (2014). Etude des interactions latex-ciment modèle. Conséquences sur les propriétés rhéologiques. Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, France.
- (Diab, 2013) Diab, A. M., H. E. Elyamany, A. H. Ali. (2013). "Experimental investigation of the effect of latex solid/water ratio on latex modified co-matrix mechanical properties." *Alexetria Engineering Journal* **52**: 83–98.
- (Do, 2003) Do, J. and Y. Soh (2003). "Performance of polymer-modified self-leveling mortars with high polymer–cement ratio for floor finishing." *Cement and Concrete Research* **33**: 1497–1505.
- (Donatello, 2009) Donatello, S., M. Tyrer, C.R. Cheeseman. (2009). "Recent developments in macro-defect-free (MDF) cements." *Construction and Building Materials* **23**: 1761–1767.
- (Elalaoui, 2012) Elalaoui, O. (2012). Optimisation de la formulation et de la tenue aux hautes températures d'un béton à base d'époxyde, Thèse de doctorat, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Tunisie.
- (Erdmenger, 2010) Erdmenger, T., C. Guerrero-Sanchez, J. Vitz, R. Hoogenboom and U. S. Schubert. (2010). "Recent developments in the utilization of green solvents in polymer chemistry." *Chemical Society Reviews* **39**: 3317–3333.
- (Folic, 1998) Folic, R. J. and V. S. Radonjanin (1998). "Experimental Research on Polymer-Modified Concrete." *ACI Materials Journal* **95**(4): 463-468.
- (Fowler, 1999) Fowler, D. W. (1999). "Polymers in concrete: a vision for the 21st century." *Cement and Concrete Composites* **21**(5-6): 449–452.
- (Fu, 1996a) Fu, X. and D. D. L. Chung (1996). "Effect of Methylcellulose admixture on the mechanical properties of cement " *Cement and Concrete Research* **26**(4): 535-538.
- (Fu, 1996b) Fu, X. and D. D. L. Chung (1996). "Effect of polymer admixtures to cement on the bond strength and electrical contact resistivity between steel fiber and cement " *Cement and Concrete Research* **26**(2): 189-194.
- (Fu, 1996c) Fu, X., W. Lu, D.D.L. Chung. (1996). "Improving the bond strength between carbon fiber and cement by fiber surface treatment et polymer addition to cement mix. " *Cement and Concrete Research* **26**(7): 1007-1012.
- (Garbacz, 2006) Garbacz, A., L. Courard, K. Kostana. (2006). "Characterization of concrete surface roughness et its relation to adhesion in repair systems." *Materials Characterization* **56**: 281–289.
- (Gélinas, 2013) Gélinas, L. (2013). Plastiques biosourcés: étude de leur performance environnementale comparativement aux plastiques pétrochimiques, mémoire de master, Université de Sherbrooke, Canada.
- (Gemert, 2005) Gemert, D. V., L. Czarnecki, M. Maultzsch, H. Schorn, A. Beeldens, P. Łukowski, E. Knapen. (2005). "Cement concrete and concrete–polymer composites:

Références bibliographiques

- Two merging worlds. A report from 11th ICPIC Congress in Berlin, 2004." *Cement & Concrete Composites* 27: 926–933.
- (Gomes, 2005) Gomes, C. E. M. and O. P. Ferreira (2005). "Analyses of Microstructural Properties of VA/VeoVA Copolymer Modified Cement Pastes." *Polímeros: Ciência e Tecnologia* 15(3): 193-198.
- (Goto, 2006) Goto, T. (2006). Influence des paramètres moléculaires du latex sur l'hydratation, la rhéologie et les propriétés mécaniques des composites ciment/latex. Thèse de doctorat, Université de Paris VI, France.
- (Gregoire, 2011) Gregoire, Y. and A. Smits (2011). Choix des mortiers de maçonnerie. Les dossiers du CSTC.
- (Haidar, 2011) Haidar, M. (2011). Optimisation et durabilité des micro-bétons à base d'époxyde, Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, France.
- (Hasanbeigi, 2012) Hasanbeigi, A., L. Price, E. Lin. (2012). "Emerging energy-efficiency et CO₂ emission-reduction technologies for cement and concrete production: A technical review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16: 6220–6238.
- (Hassan, 2000) Hassan, K. E., P. C. Robery, L. Al-Alawi. (2000). "Effect of hot-dry curing environment on the intrinsic properties of repair materials." *Cement & Concrete Composites* 22: 453-458.
- (Henni-Chebra, 2011) Henni-Chebra, K., A. Bougara, E. Kadri. (2011). Détermination du niveau d'empoussièrement engendrée par la fabrication du ciment, XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil, Vol. 2, 247-257, 29-31Mai, Tlemcen, Algérie,
- (Hot, 2013) Hot, J. (2013). Influence des polymères de type superplastifiants et agents entraîneurs d'air sur la viscosité macroscopique des matériaux cimentaires. Thèse de doctorat, Université de Paris-Est, France.
- (Jenni, 2005) Jenni, A., L. Holzer, R. Zurbruggen. M. Herwegh. (2005). "Influence of polymers on microstructure and adhesive strength of cementitious tile adhesive mortars." *Cement and Concrete Research* 35: 35 – 50.
- (Kamèche, 2015) Kamèche, Z. E. A. (2015). Contribution à l'étude de la perméabilité relative au gaz et à l'eau liquide du béton ordinaire partiellement saturé, Thèse de doctorat, Université of AbouBekr Belkaid, Tlemcen, Algérie.
- (Kardon, 1997) Kardon, J. B. (1997). "Polymer-modified concrete: review " *J. Mater. Civ. Eng.* 9: 85-92.
- (Khattab, 2013) Khattab, M. M. (2013). "Effect of gamma irradiation on polymer modified white set cement mortar composites." *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 20(1): 1–8.
- (Kim, 1997) Kim, J.-H. and R. E. Robertson (1997). "Prevention of air void formation in polymer-modified cement mortar by pre-wetting " *Cement and Concrete Research* 27(2): 171-176.
- (Knapen, 2007) Knapen, E. (2007). Microstructure formation in cement mortars modified with water-soluble polymers, Ph.D. Thesis, Catholic University of Louvain, Belgium.
- (Knapen, 2015) Knapen, E. and D. V. Gemert (2015). "Polymer film formation in cement mortars modified with water-soluble polymers." *Cement & Concrete Composites* 58: 23–28.
- (Larbi, 1990) Larbi, J. A. and J. M. J. M. Bijen (1990). "Interaction of polymers with portland cement during hydration: a study of the chemistry of the pore solution of polymer-modified cement systems", *Cement et concrete research* 20: 139-147.
- (Li, 2012) Li, J., S. Zhong, and C. Zhang. (2012). "Influence of superplasticiser and mixing procedure on properties of styrene–acrylic ester latex modified mortars." *Magazine of Concrete Research* 64(5): 411-417.

Références bibliographiques

- (Ma, 2013) Ma, H. and Z. Li (2013). "Microstructures et mechanical properties of polymer modified mortars under distinct mechanisms." *Construction and Building Materials* **47**: 579–587.
- (Mansur, 2009) Mansur, A. A. P., O. L. d. Nascimento, H. S. Mansur. (2009). "Physico-chemical characterization of EVA-modified mortar and porcelain tiles interfaces." *Cement and Concrete Research* **39**: 1199–1208.
- (Marceau, 2012) Marceau, S., F. Lespinasse, J. Bellanger, C. Mallet, and F. Boinski. (2012). "Microstructure and mechanical properties of polymer-modified mortars." *European Journal of Environmental and Civil Engineering* **16**(5): 571–581.
- (Metalssi, 2006) Metalssi, O. O. (2006). Étude des couplages hydratation-échanges hydriques-carbonatation dans les mortiers modifiés polymères, Thèse de doctorat, Université of La Rochelle, France.
- (Mirza, 2014) Mirza, J., B. Durand, A.R. Bhutta, M. M. Tahir. (2014). "Preferred test methods to select suitable surface repair materials in severe climates." *Construction and Building Materials* **50**: 692–698.
- (Momayez, 2005) Momayez, A., M. R. Ehsani, A. A. Ramezani pour, H. Rajaie. (2005). "Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials." *Cement and Concrete Research* **35**: 748 – 757.
- (Mouton, 1967) Mouton, Y. (1967). Les liants organiques utilisés en génie civil * Notions fondamentales-Nomenclature. L. s. d. p. d. l. c. d. p. e. chaussées: 18.
- (Muthadhi, 2014) Muthadhi, A. and S. Kothetaraman (2014). "Experimental investigations on polymer modified concrete subjected to elevated temperatures." *Materials and Structures* **47**(6): 977–986.
- (NA 231, 2006) NA 231 (2006). " Méthodes d'essais des ciments - Détermination de la finesse".
- (NA 255, 2005) NA 255 (2005). "Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau."
- (NA 442, 2001) NA 442 (2001). "Ciment - Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants".
- (NA 453, 2006) NA 453 (2006). Essais pour déterminer les propriétés générales des granulats - Méthodes de réduction d'un échantillon de laboratoire.
- (NA 455, 2006) NA 455 (2006). Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Evaluation des fines -
- (NA 2607, 2009) NA 2607 (2009). Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1: Détermination de la granularité – Analyse.
- (Naderi, 2012) Naderi, M. and O. Ghodousian (2012). "Adhesion of Self-Compacting Overlays Applied to Different Concrete Substrates and Its Prediction by Fuzzy Logic." *The Journal of Adhesion* **88**: 848–865.
- (NF EN 196-1, 2016) NF EN 196-1 (2016). Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances.
- (NF EN 196-3+A1, 2009) NF EN 196-3+A1 (2009). Méthodes d'essais des ciments - Partie 3 : détermination du temps de prise et de la stabilité.
- (NF EN 197-1, 2012) NF EN 197-1 (2012). Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.
- (NF EN 12620+A1, 2008) NF EN 12620+A1 (2008). Granulats pour béton.
- (Ngassam, 2013) Ngassam, I. L. T. (2013). Durabilité des réparations des ouvrages d'art en béton, Thèse de doctorat, University de Paris-Est, France.

Références bibliographiques

- (Nguyen, 2008) Nguyen, D. (2008). Etude de la nucleation contrôlée de latex polymère à la surface de nanoparticules d'oxyde pour l'élaboration de colloïdes hybrides structures, Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, France.
- (Ohama, 1995) Ohama, Y. (1995). *Hetbook do polymer-modofied concrete and mortars : Properties and Process Technology in the United States of America*, Noyes Publications.
- (Ohama, 1997) Ohama, Y. (1997). "Recent Progress in Concrete-Polymer Composites " *Advn Cem Bas Mat* **5**: 31-40.
- (Ohama, 1998) Ohama, Y. (1998). "Polymer-based Admixtures." *Cement and Concrete Composites* **20**: 189-212.
- (Ohama, 2011) Ohama, Y. (2011). "Concrete-Polymer Composites – The Past, Present et Future " *Key Engineering Materials* **466**: 1-14.
- (Ohama, 1991) Ohama, Y. and K. Demura (1991). "Pore size distribution and oxygen diffusion resistance of polymer-modified mortars. " *Cement and Concrete research* **21**: 309-315.
- (Ojeda, 2013) Ojeda, T., H. B. Yamak, K. A. Ross, S. D. Arntfield, S. Cenkowski, U. Maver, T. Maver, Z. Peršin, M. Mozetič, A. Vesel, M. Gaberšček, K. Stana-Kleinschek, K. Furukawa, T. Nakaoki, O. Lyutakov, J. Tuma, J. Siegel, I. Huttel, V. Švorčík, P. Slepíčka, T. Hubáček, Z. Kolská, S. Trostová, N. S. Kasálková, L. Bačáková, Z. Makajová, K. Kolářová, A. Řezníčková, P. J. Baker, K. Numata. (2013). *Polymer science. InTech*.
- (P 18-541, 1994) P 18-541 (1994). *Granulats pour betons hydrauliques*.
- (P 18-558, 1990) P 18-541 (1990). *Granulats- determination de la masse volumique absolue des fines*.
- (Parghi, 2016) Parghi, A. and M. S. Alam (2016). "Effects of curing regimes on the mechanical properties and durability of polymer-modified mortars – an experimental investigation." *Journal of Sustainable Cement-Based Materials* **5**(5): 324-347.
- (Pierre, 2008) Pierre, N. (2008). *Interactions mortier-support : éléments déterminants des performances et de l'adhérence d'un mortier*, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, France.
- (Pragliola, 2013) Pragliola, S., R. D. Vita, P. Longo. (2013). "Aqueous emulsion polymerization of styrene and substituted styrenes using titanocene compounds." *Polymer* **54**: 1583-1587.
- (Ramli, 2012a) Ramli, M. and A. A. Tabassi (2012). "Effects of Different Curing Regimes on Engineering Properties of Polymer-Modified Mortar." *Journal of Materials in Civil Engineering* **24**: 468-478.
- (Ramli, 2012b) Ramli, M. and A. A. Tabassi (2012). "Effects of polymer modification on the permeability of cement mortars under different curing conditions: A correlational study that includes pore distributions, water absorption et compressive strength." *Construction and Building Materials* **28**: 561–570.
- (Ramli, 2012c) Ramli, M. and A. A. Tabassi (2012). "Mechanical behaviour of polymer-modified ferrocement under different exposure conditions: An experimental study." *Composites: Part B* **43**: 447–456.
- (Ramli, 2013) Ramli, M., A. A. Tabassi, K. W. Hoe. (2013). "Porosity, pore structure and water absorption of polymer-modified mortars: An experimental study under different curing conditions." *Composites: Part B* **55**: 221–233.
- (Ribeiro, 2006) Ribeiro, M. C. d. S. (2006). *New Polymer Mortar Formulations - Development, Characterization and Application Forms*. Thèse de doctorat, Université de Porto, Portugal.

Références bibliographiques

- (Rossignolo, 2009) Rossignolo, J. A. (2009). "Interfacial interactions in concretes with silica fume and SBR latex." *Construction and Building Materials* **23**: 817–821.
- (Rozenbaum, 2005) Rozenbaum, O., R. J.-M. Pellenq, H. V. Damme. (2005). "An experimental and mesoscopic lattice simulation study of styrene-butadiene latex-cement composites properties." *Materials and Structures* **38**: 467-478
- (Sakai, 1995) Sakai, E. and J. Sugita (1995). "Composite mechanism of polymer modified cement", *Cement and Concrete Research* **25**(1): 127-135.
- (Salbin, 1996) Salbin, M. K. (1996). Properties et performance of polymer modified cements et mortars Ph.D. Thesis, University of Aston in Birmingham, Englet.
- (Schulze, 2001) Schulze, J. and O. Killermann (2001). "Long-term performance of redispersible powders in mortars." *Cement and Concrete Research* **31**: 357-362.
- (Sikora, 2015) Sikora, P., P. Łukowski, K. Cendrowski, E. Horszczaruk, E. Mijowska. (2015). "The Effect of Nanosilica on the Mechanical Properties of polymer-Cement Composites (PCC)." *Procedia Engineering* **108**: 139-145.
- (Silfwerbret, 2011) Silfwerbret, J., H. Beushausen, and L. Courard. (2011). Bond. Bonded Cement-Based Material Overlays for the Repair, the Lining or the Strengthening of Slabs or Pavements. B. Bissonnette, L. Courard, D. W. Fowler and J.-L. Granju, Springer Netherlands. **3**: 197.
- (Sivakumar, 2011) Sivakumar, M. V. N. (2011). "Effect of Polymer modification on mechanical and structural properties of concrete An experimental investigation." *International journal of civil and structural engineering* 1(4): 732-740.
- (Soni, 2014) Soni, K. and Y. P. Joshi (2014). "Performance Analysis of Styrene Butadiene Rubber-Latex on Cement Concrete Mixes", *Journal of Engineering Research and Applications* **4**(3): 838-844.
- (Soufi, 2013) Soufi, A. (2013). Étude de la durabilité des systèmes béton armé – mortiers de réparation en milieu marin, Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, France.
- (Soufi, 2015) Soufi, A., P.-Y. Mahieux, A. Aït-Mokhtar, O. Amiri. (2015). "Influence of polymer proportion on transfer properties of repair mortars having equivalent water porosity." *Materials and Structures* **49**(1): 383–398.
- (Thickett, 2007) Thickett, S. C. and R. G. Gilbert (2007). "Emulsion polymerization: State of the art in kinetics and mechanisms." *Polymer* **48**: 6965-6991.
- (Tian, 2013) Tian, Y., X.-y. Jin, N. Jin, R. Zhao, Z. Li, H. Ma. (2013). "Research on the microstructure formation of polyacrylate latex modified mortars." *Construction and Building Materials* **47**: 1381–1394.
- (Ukrainczyk, 2013) Ukrainczyk, N. and A. Rogina (2013). "Styrene–butadiene latex modified calcium aluminate cement mortar." *Cement & Concrete Composites* **41**: 16–23.
- (Wang, 2016) Wang, M., R. Wang, H. Yao, S. Farhan, S. Zheng, Z. Wang. (2016). "Research on the mechanism of polymer latex modified cement." *Construction and Building Materials* **111**: 710–718.
- (Wang, 2015) Wang, M., R. Wang, S. Zheng, S. Farhan, H. Yao, H. Jiang. (2015). "Research on the chemical mechanism in the polyacrylate latex modified cement system." *Cement and Concrete Research* **76**: 62–69.
- (Wang, 2011a) Wang, R., R. Lackner, P.-M. Wang. (2011). "Effect of Styrene–Butadiene Rubber Latex on Mechanical Properties of Cementitious Materials Highlighted by Means of Nanoindentation." *Strain* **47**: 117–126.
- (Wang, 2011b) Wang, R. and P.-M. Wang (2011). "Action of redispersible vinyl acetate et versatate copolymer powder in cement mortar." *Construction et Building Materials* **25**: 4210–4214.

Références bibliographiques

- (Wang, 2005) Wang, R., P.-M. Wang, X. Li. (2005). "Physical and mechanical properties of styrene–butadiene rubber emulsion modified cement mortars." *Cement and Concrete Research* **35**: 900 – 906.
- (Wang, 2010) Wang, R. and P. Wang (2010). "Function of styrene-acrylic ester copolymer latex in cement mortar." *Materials and Structures* **43**: 443–451.
- (Wang, 2013) Wang, R., L. Yao, P. Wang. (2013). "Mechanism analysis and effect of styrene–acrylate copolymer powder on cement hydrates." *Construction and Building Materials* **41**: 538–544.
- (Wong, 2003) Wong, W. G., P. Fang, J.K. Pan. (2003). "Dynamic properties impact toughness and abrasiveness of polymer-modified pastes by using nondestructive tests." *Cement and Concrete Research* **33**: 1371–1374.
- (Yang, 2009) Yang, Z., X. Shi, A. T. Creighton, M. M. Peterson. (2009). "Effect of styrene–butadiene rubber latex on the chloride permeability et microstructure of Portlet cement mortar." *Construction and Building Materials* **23**: 2283–2290.
- (Youssef, 2012) Youssef, I. (2012). Polymérisation en émulsion et en miniémulsion. Influence de la combinaison de stabilisants moléculaires et macromoléculaires et suivi in situ par spectroscopie Raman. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, France.
- (Zabihi, 2015) Zabihi, N. and M. H. Ozkul (2015). "The Effect of Nano-Silica Particles on Fresh et Hardened State Properties of Polymer Cement Mortars " *Advanced Materials Research* **1129**: 113-120.
- (Zhang, 2014) Zhang, W. (2014). Synthesis and fracture toughness of macro-defect-free (MDF), cement Master's, Illinois at Urbana-Champaign.
- (Zhong, 2002) Zhong, S. and Z. Chen (2002). "Properties of latex blends and its modified cement mortars." *Cement and Concrete Research* **32**: 1515 – 1524.
- (Zohhadi, 2014) Zohhadi, N. (2014). Bio-Inspired et Low-Content Polymer Cement Mortar for Structural Rehabilitation. Master's thesis, University of South Carolina, Columbia.

Résumé : On constate au cours de ces dernières décennies, la diversification des mortiers pour de nombreuses applications dans le domaine des enduits, des colles à carrelages, des mortiers de réparation et de protection. La diversité de ces applications nécessite une formulation spécifique et adaptée. À ce titre, l'intégration des polymères aux mortiers, désignés sous le nom de mortiers modifiés aux polymères, s'avère une technique qui peut offrir une bonne adhérence aux supports tout en améliorant leur durée de vie.

Dans ce travail de recherche, on met en revue l'incidence de la substitution d'un ciment Portland (CEM II/A 42.5) dans des mortiers, par deux polymères de type latex : un styrène butadiène (SBR) et un styrène acrylique (SA). Une série de mélanges de mortiers contenant 0, 2.5, 5, 10, 15 et 20 % de polymère latex solide (en poids), ont été préparés et testés aux états frais et durci. Les paramètres d'essais comprennent la fluidité, la résistance à la compression, la traction par flexion, la porosité accessible à l'eau, l'absorption d'eau, l'adhérence aux briques de terre cuite et aux supports cimentaires. En outre, l'influence de certains paramètres, tels que le pré-conditionnement, et l'âge a été déterminé.

Les résultats expérimentaux ont montré que la substitution du ciment dans les mortiers a produit une amélioration sur la fluidité, la ténacité, la porosité à l'eau, l'absorption d'eau et l'adhérence. Dans le cas des supports en terre cuite, il en résulte une rupture cohésive dans le support au-delà de 10 % de substitution ; tandis que la rupture a lieu à l'interface pour toutes les formulations testées sur les supports cimentaires à l'exception des mortiers modifiés par le SBR ($\geq 10\%$), où la rupture est cohésive. Une amélioration a été notée également sur la résistance à la traction par flexion au-delà de 60 jours. En revanche, la résistance à la compression des mortiers polymères a diminué avec l'augmentation du taux de substitution du ciment pour l'ensemble des échéances étudiées. De plus, la cure mixte est plus bénéfique du point de vue résistance mécanique que la cure sèche des composites mortiers modifiés aux latex. Quant à la porosité accessible à l'eau, les résultats suivent une fonction linéaire avec une inflexion à 5 % de substitution de latex.

Mots clés : Mortiers modifiés, Latex, Styrène butadiène, Styrène acrylique, Fluidité, Résistance, Ténacité, Adhérence, Porosité, et Absorption.

Abstract: Over the last few decades, diversification of mortars has been observed for many applications in the field of plasters, tile glues, and repair mortars. The diversity of these applications requires a specific and adapted formulation. As such, the integration of polymers in mortars, known as polymer-modified mortars, is a technique that can offer good adhesion to substrates while improving their lifetime.

In this research paper, the impacts of the substitution of Portlet cement (CEM II / A 42.5) by two latex polymers: styrene butadiene (SBR) and styrene acrylic (SA) is investigated in mortars. A series of mortar mixtures containing 0, 2.5, 5, 10, 15 and 20% (by weight) of solid latex polymer, were prepared and tested in the fresh and hardened states. The test parameters include fluidity, compressive and flexural strengths, porosity, water absorption; adhesion to clay bricks and cementitious substrates. In addition, the influence of certain parameters, such as pre-conditioning, and age was determined.

The experimental results showed that substituting cement in mortars improves their fluidity, toughness, porosity to water, water absorption and adhesion. In the case of clay substrates, a cohesive failure occurs within the substrate layer beyond 10% of substitution; while the rupture takes place at the interface for all the formulations tested on the cementitious substrates except for the mortars modified by the SBR ($\geq 10\%$), where the rupture is cohesive. It was also noted that flexural tensile strength improved beyond 60 days. However, the compressive strength of polymer mortars decreased with the substitution rate of cement, for all maturities considered. In addition, mixed curing is more beneficial from a mechanical point of view than dry curing of latex-modified mortar composites. However, for porosity accessible to water, the results follow a linear function, with an inflection at 5% of latex substitution.

Key words: Modified mortars, Latex, Styrene butadiene, Styrene acrylic, Fluidity, strength, Toughness, Adhesion, Porosity, and Absorption.