



**Ministère de l'enseignement
supérieur et de la recherche
scientifique**

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

**Faculté de technologie
Département de GENIE CIVIL**



MEMOIRE

**Présenté pour l'obtention du
diplôme de MASTER**

FILIERE : Génie Civil

SPECIALITE : Matériaux

Présenté par

MAACHE AYMEN et GACEM ZAKARIA

THEME

**Formulation et caractérisation des mortiers
autoplaçant à base des ciments ternaires aux
hautes températures**

Devant le jury :

Pr NACERI Abdelghani	Université de M'sila	Président
Pr. RAHMOUNI Zine El Abidine	Université de M'sila	Encadreur
Dr. BELOUADEH Messaouda	Université de M'sila	Co-Encadreur
Dr. BOUALLAG Saida	Université de M'sila	Examineur

Promotion : 2022/2023.

Remerciement

Nous tenons à remercier tout premièrement Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

En second lieu, Je tiens à remercier aussi et chaleureusement notre encadreur Pr. RAHMOUNI ZINE EL ABIDINE, et notre Co-encadreur Dr. BELOUADAH MESOUDA, pour l'orientation, la confiance, la patience qui a constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené à bon port. Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à leur haute personnalité.

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidés à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à accomplir ce travail

Nos remerciements vont aussi à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail, à tous les enseignants et au chef de département de génie civil Dr. Baali Laïd et l'ensemble des membres du laboratoire sur tout werida saidane qui a contribué à notre formation par ailleurs.

En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et camarades pour le soutien moral et matériel.

Résumé

Dans le domaine de la construction, les recherches actuelles visent la production des éco matériaux afin de parvenir au développement durable. Ce nouveau type de matériau doit répondre aux doubles exigences économiques et écologiques.

Ce travail se propose de mener une série d'essais permettant de compléter ou d'asseoir les connaissances déjà acquises sur le comportement à haute température des mortiers auto plaçant, notamment d'observer le rôle que joue la matrice cimentaire sur l'évolution des propriétés mécaniques des mortiers auto plaçant avec l'élévation de la température.

Les matériaux testés sont plusieurs types des mortiers qui couvrent la gamme des mortiers auto plaçant ordinaires, et offrent la particularité d'avoir un squelette granulaire et un volume de pâte constants. Les essais de compression est été réalisés au L'évolution des températures de 100°C, 300°C, 500°C et 700°C au éprouvettes après chauffage, ainsi que la perte de masse des éprouvettes ont été également suivis, et ceci mortiers testés avec les fillers poudre de brique et de poudre de Métakaolin.

Les résultats expérimentaux montrent une corrélation entre l'évolution de la perte de masse et de la différence de température au sein de l'élément chauffée.

Ils révèlent l'existence de deux grandes zones de comportement des mortiers situées avant et après 500°C. Dans la première zone, on note une évolution des résistances à la compression, tandis que dans la seconde on observe une baisse considérable des propriétés mécaniques.

Mots-Clés : Mortiers auto plaçants, Poudre de brique, Métakaolin, Température élevée, Propriétés mécaniques, Propriétés physiques.

Abstract

In the field of construction, current research is aimed at the production of Eco-materials in order to achieve sustainable development. This new type of material must meet both economic and ecological requirements.

This work proposes to carry out a series of tests making it possible to complete or establish the knowledge already acquired on the behavior at high temperature of self-placing mortars, in particular to observe the role that the cementitious matrix plays on the evolution of the properties. mechanics of self-placing mortars with the rise in temperature.

The materials tested are several types of mortars that cover the range of ordinary self-placing mortars, and offer the particularity of having a granular skeleton and a constant paste volume. The compression tests were carried out at The evolution of the temperatures of 100°C, 300°C, 500°C and 700°C on the specimens after heating, as well as the loss of mass of the specimens were also monitored, and this mortars tested with brick powder and Métakaolin powder fillers.

The experimental results show a correlation between the evolution of the mass loss and the temperature difference within the heated element.

They reveal the existence of two major mortar behavior zones located before and after 500°C. In the first zone, we note an evolution of the compressive strengths, while in the second we observe a considerable drop in the mechanical properties.

Keywords: Self-placing mortars, brick powder, Métakaolin, high temperature, mechanical properties, physical properties.

ملخص

في مجال البناء، تهدف الأبحاث الحالية إلى إنتاج مواد صديقة للبيئة من أجل تحقيق التنمية المستدامة. يجب أن يفي هذا النوع الجديد من المواد بالمتطلبات الاقتصادية والبيئية.

يقترح هذا العمل إجراء سلسلة من الاختبارات التي تجعل من الممكن إكمال أو إثبات المعرفة المكتسبة بالفعل حول السلوك في درجات حرارة عالية لقذائف الهاون ذاتية الوضع، ولا سيما ملاحظة الدور الذي تلعبه المصفوفة الإسمنتية في تطور الخصائص • ميكانيكا الملاط الذاتي مع ارتفاع درجة الحرارة.

المواد التي تم اختبارها هي عدة أنواع من الملاط التي تغطي نطاق الملاط العادي ذاتية الوضع، وتوفر خصوصية وجود هيكل عظمي حبيبي وحجم معجون ثابت. تم إجراء اختبارات الانضغاط عند تطور درجات حرارة 100 درجة مئوية و 300 درجة مئوية و 500 درجة مئوية و 700 درجة مئوية على العينات بعد التسخين، كما تمت مراقبة فقدان كتلة العينات، وهذا تم اختبار قذائف الهاون بمسحوق الطوب ومسحوق الميكاكولين.

تظهر النتائج التجريبية علاقة ارتباط بين تطور فقدان الكتلة وفرق درجة الحرارة داخل العنصر المسخن.

إنها تكشف عن وجود منطقتين رئيسيتين لسلوك الهاون تتعان قبل وبعد 500 درجة مئوية. في المنطقة الأولى، نلاحظ تطوراً لقوى الانضغاط، بينما في المنطقة الثانية نلاحظ انخفاضاً كبيراً في الخواص الميكانيكية.

الكلمات المفتاحية: ملاط ذاتي الضغط ، مسحوق طوب ، ميكاكولين ، حرارة عالية ، خواص ميكانيكية ، خواص فيزيائية.

Tableaux des matières

Tableau des figures	
Figure I.01 : Mortier en état frais	5
Figure I.02 : Constituants des mortiers.	5
Figure I.3 : La différence entre les constituants des mortiers ordinaires et des mortiers auto plaçant	5
Figure I.4:Utiliser le mortier pour remplir les conduites	6
Figure. I. 5: Dispersion des granulats par excès de pâte .	8
Figure I.6 : Mode d'action des super-plastifiants-Défloculation des grains de ciment [2].	9
Figure I.7: Table à secousses	13
Figure I.8 : Essai au Maniabilimètre LCPC-B	14
Figure I.9. Déroulement de l'essai d'entonnoir en V	15
Figure I.10. Appareil de compression.	16
Figure I. 11 : Appareil de flexion	16
Figure I.12 : Déchets de brique	23
Figure I.13.Fluidité des mortiers à base de différents taux de substitution de sables par esPBR	25
Figure I.14 effet des DB sur la résistance à la compression des mortiers [10]	26
Figure I.15: Influence de la teneur en MK sur la demande en super-plastifiant des mortiers.	28
Figure. II. 1 : Illustrations de dégradations d'ouvrages en béton suite à un incendie[15].	31
Figure. II. 2 : Section effondrée du faux plafond dans le tunnel du Gothard après l'incendie du 21octobre, 2001	32
Figure II.3 : Modèle de structuration des particules de CSH Feldman et Sereda, revu par	3 3
Figure II.4 : Familles des Vides dans le béton et domaine d'utilisation des principal techniques de Caractérisation des milieux poreux	34
Figure II.5 : Aspect normal d'une pâte de ciment n'ayant pas subi d'échauffement (imageobtenue par microscopique électronique avec un grossissement de400)	35
Figure II.6 : Matrice cimentaire Vitreuse présentant une macroporosité très importante	36
Figure II.7 : Évolution de la déformation thermique des pâtes de ciment avec la température	39
Figure II.8 : Perte de masse de deux types de granulats (calcaire et siliceux)	40
Figure II.9: Mécanismes liés aux incompatibilités pâte-granat [19].	41
Figure II.10 : Distribution des pores dans les bétons chauffés obtenus par porosimétrie au mercure.A gauche BO – à droite BHP	42
Figure II.11 : Porosité totale à l'eau en fonction de la température de conditionnement	42
Figure II.12 : Masse volumique de différents bétons en fonction de la température [20].	43
Figure II.13 : Rapport des résistances à chaud et des résistances résiduelles sur larésistance initiale (froid) en fonction de la température	45
Figure II.14 : Rapport de la résistance en compression sur la résistance initiale en fonctionde la température	46
Figure. II. 15 : Evolution du coefficient de dilatation thermique apparent de la pâteDe ciment et des granulats en fonction de la température	48
Figure. II. 16: Pertes de masse des bétons déterminées durant le chauffage de 20°C à 600°C à la Vitessede1°C/min .Les points indiquent la valeur de la teneur en eau obtenu par séchage à 105°C	49
Figure.II.17:Evolution de la porosité de différents béton sen fonction de la température,[23]	50
Figure. II. 18 : Evolution de la résistance à la compression d'un béton en fonction du type d'essai (à chaud ou à froid),[23]	51
Figure. II. 19 : Courbes de la variation de la résistance à la compression selon les textes del' Euro code 2,EUROCODE22004.	52
Figure. II. 20 : Evolution de la résistance résiduelle relative à la compression de bétons de Fibres métalliques ,de polypropylène et de cocktail de fibres métalliques et polypropylène[25]	53

Tableaux des matières

Figure. II. 21 : Evolution de la résistance résiduelle relative à la traction des bétons chauffés, (Vitesse de chauffage est de 1°C/min).	54
Figure. II. 22 : Evolution de modules d'élasticité apparents déterminé "à chaud" en fonction de différentes températures (a), évolution du module d'élasticité apparent obtenu "à chaud" et "résiduelles" sur le béton de fibres de polypropylène(0.9 kg/m ³)(b)[26]	55
Figure.III.1 : La masse volumique absolue d'un matériau [27]	55
Figure.III.2 Essai de détermination de la masse volumique apparente	61
Figure.III.3 Agitateur mécanique	63
Figure.III.4 : Repos de 20 min pour les éprouvettes	64
Figure .III.5 La courbe granulométrique du sable de Boussaâda	68
Figure III.6 : Le ciment utilisé	70
Figure : III.7 Grâce à ses propriétés le MEDAPLAST SP 40 permet: Sur le béton	72
Figure III.8 : Super plastifiant utilisé dans notre étude.	73
Figure .III.9 Déchets des briques utilisés	74
Figure III.10: Roche de kaolin	75
Figure III.11.traitement thermique de metakaoline	75
Figure III.12: Filler Kaolin	76
Figure III.13 : Séquence de malaxage du mortier [29].	77
Figure III .14 composition des différents mortiers auto plaçant	79
Figure III.15 : Préparation des éprouvettes	80
Figure III.16 : Conservation dans l'eau à 20°C	80
Figure III.17 : Disposition des éprouvettes dans les fours	81
Figure III.18: l'étalement au Mini cône de mortier	82
Figure III.19: Essai à l'Entonnoir en V	83
Figure III.20 : dimension du l'entonnoir en V	83
Figure.III.21 Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion	84
Figure.III.22 : L'appareil de résistance à la flexion	84
Figure.III.23 : Dispositif pour l'essai de résistance à la compression	85
Figure.III.24 : L'appareil de compression	86
Figure III. 25. Dispositif expérimental pour l'essai d'absorption d'eau par capillarité	87
Figure III.26. Appareil à ultrasons hautes performances et ses équipements.	88
Figure VI .1 : La variation de la masse volumique en fonctions pour l'ensemble de mortier.	92
Figure.VI. 2 : Variation d'étalement au mini-cône en fonctions pour l'ensemble de mortier	93
Figure.VI. 3 : Temps d'écoulement au mini V Funnel	94
Figure (VI.3.1) : Photos montrant la planéité de la surface libre des différents mélanges	94
Figure VI.4 : La Variation la résistance de comprissions en fonction de la température à 7jour	95
Figure VI.5 : La Variation la résistance de comprissions en fonction de la température à 28jour	95
Figure VI.6 : Variation la résistance de traction en fonction de la température à 7jour	97
Figure VI.7 : Variation la résistance de traction en fonction de la température à 28jour	97
Figure VI.8 : Variation la résistance de flexion en fonction de la température à 7jour	98
Figure VI.9 : Variation la résistance de flexion en fonction de la température à 28jour	99
Figure VI.10 : Variation la Vitesse d'ultrason en fonction de la température à 7jour	100
Figure VI.11 : Variation la Vitesse d'ultrason en fonction de la température à 28jour	100
Figure VI.12 : Variation Perte de masse en fonction de la température à 7jour	101
Figure VI.13: Perte de masse en fonction de la température à 28jour	101
Figure VI.14 : la corrélation (Rc) en fonction de (V) pour M0 à 28 jours.	102
Figure VI.15 : la corrélation (Rc) en fonction de (V) pour M2 à 28 jours	103
Figure VI.16 : la corrélation (Rc) en fonction de (V) pour M4 à 28 jours	104
Figure VI.17 : la corrélation (Pert) en fonction de (V) pour M0 à 28 jours	105

Tableaux des matières

Figure VI.18 : la corrélation (Pert) en fonction de (V) pour M2 à 28 jours	106
Figure VI.19: la corrélation (Pert) en fonction de (V) pour M4 à 28 jours	107
Figure VI.20: la corrélation (Pert) en fonction de (Rc) pour M0 à 28 jours	108
Figure VI.21: : la corrélation (Pert) en fonction de (Rc) pour M2 à 28 jours	109
Figure VI.22: la corrélation (Pert) en fonction de (Rc) pour M4 à 28 jours	110
Figure VI.23: la corrélation (Rf) en fonction de (v) pour M0 à 28 jours	110
Figure VI.24: la corrélation (Rf) en fonction de (v) pour M0 à 28 jours	111
Figure VI.25: la corrélation (Rf) en fonction de (v) pour M0 à 28 jours	112

Tableaux des matières

Tableau des tableaux	
Tableau I.1 : Utilisation des addition minérales dans les cimenteries algériennes	21
Tableau II.1 Principales réactions physico-chimiques dans le béton à haute température	37
Tableau.III.1 Masse volumique absolue du sable de Boussaâda	60
Tableau.III.2 Masse volumique apparente du sable de Boussaâda à l'état lâche	61
Tableau.III.3 Masse volumique apparente du sable de Boussaâda à l'état compact	62
Tableau.III.4 Les résultats d'équivalent du sable de Boussaâda	65
Tableau.III.5 Comparaisons des résultants	65
Tableau.III.6 Teneur en eau du sable de Boussaâda	66
Tableau.III.7 Les résultats d'analyse granulométrique du sable de Boussaâda	68
Tableau.III.9 .Caractéristiques physiques du ciment	69
Tableau.III.10 Caractéristiques chimiques du ciment	70
Tableau.III.11 Caractéristiques Chimique de l'eau de gâchage [27]	71
Tableau.III.12: Caractéristiques de MEDAFLOW 30	73
Tableau III.13: Masse mole claire du super plastifiant	73
Tableau.III.14 Composition chimique des déchets de brique broyés [27]	74
Tableau.III.15 Caractéristiques des déchets de brique broyés [27]	74
Tableau III.16 : Caractéristiques physique du Métakaolin.	75
Tableau III.17 : Analyse chimique du Métakaolin	76
Tableau III.18 : Composition de mortier auto-plaçant pour 1m3.	77
Tableau III.19: Les quantités des constituants des mélanges des mortiers auto plaçant (données pour 1 m3).	78
Tableau VI.1 : les résultats de (la masse volumique, d'étalement au mini-cône et V-funnel)	91

Tableaux des matières

Tableau des matières	
Introduction Générale	1
Chapitre I : Etude bibliographique	3
I.1.Introduction	4
I.2. Mortiers auto-plaçant	4
I.3.Domaine d'applications MAP	6
I.3.1. Données techniques	6
I.3.2. Précautions particulières	7
I.4. Structure de MAP	7
I.4.1.Un volume de pâte important	7
I.4.2. Une quantité de fines (<80 µm) importante	8
I.4.3.L'utilisation des super-plastifiants	8
I.4.4.Une utilisation éventuelle d'agent colloïdal	9
I.5.Méthode de formulation	10
I.5.1.La Méthode Japonaise	10
I.5.2 .La Méthode Suédoise	11
I.5.3.La Méthode Française (LCPC)	11
I.6. Caractérisation de MAP à l'état frais	12
I.6.1. Fluidité et déformabilité de MAP	12
I.6.2.Ouvrabilité	13
I.6.3. Étalement au Mini cône de pâte	14
I.6.4.Essais de déformabilité de l'Entonnoir en V (V-funnel)	14
I.7. Caractérisation de MAP à l'état durci	15
I.7.1•Résistances mécaniques	15
I.7.1.1•La résistance à la compression	16
I.7.1.2.La résistance à la flexion	16
I.7.1.3•Retrait et gonflement	16
1.8. Valorisation des déchets dans le domaine de construction	17
I.8.1.Les ajouts cimentaires	17
I.8.1.1.Les ajouts inertes	17
I.8.1.2.Les ajouts actifs	17
I.8.1.2.1.Les pouzzolanes	17
I.8.1.2.2.Le laitier de haut fourneau	18
I.8.1.2.3.Les Fumées de silice	19
I.8.1.2.4.Les fillers calcaires	19
I.9.Définition des ajouts minéraux	20
I.10.L'utilisation des additions en Algérie	20
I.11.Rôle des ajouts cimentaire	21
I.11.1.Additions mélangées avec le clinker en cimenterie	21
I.11.2.Additions introduites directement dans les bétons	22
I.11.3.Correction granulaire	22
I.12.Le recyclage	22
I.12.1.Les matériaux recyclés	22
I.13 .Les déchets de brique	23
I.13.1.difinition de brique	23
I.13.2.Principaux constituants de la brique	24
I.14.Intérêt de l'utilisation des déchets de brique dans la construction	24

Tableaux des matières

I.14.1.Effet des déchets de brique sur l'ouvrabilité	24
I.14.2.Effets des déchets de brique sur la résistance à la compression	25
I.14.3.Effet des déchets de brique sur le retrait	26
I.14.4.Effet des déchets de brique sur la porosité	27
I.14.5.Effet des déchets de brique sur les diffusions des ions de chlore	27
I.15.Les déchet de métakaolin	27
I.15.1.Définition du méta kaolin	28
I.15.2.Influence du MK sur la maniabilité du mortier	28
I.16.Conclusion	29
Chapitre II : Mortier autoplaçant soumis à haute température	30
II.1. Introduction	31
II.2. Évolution de la microstructure des matériaux à matrice cimentaire en fonction de la Température	32
II.2.1. Rappels sur la microstructure des matériaux à matrice cimentaire	32
II.2.2.Comportement à hautes températures	35
II.2.3.Phénomènes d'éclatements	37
II.2.4.Influence de la température sur la pâte de ciment	38
II.2.5 Influence de la température sur les granulats	39
II.2.6Influence de la température sur la microstructure du béton	40
II.2.6.1 Interface pâte - granulats	40
II.3.Évolution des caractéristiques thermiques du béton avec la température	41
II.3.1 Évolution de la masse volumique	43
II.4. Évolution des caractéristiques mécaniques du béton avec la température	43
II.4.1. Comparaison entre les essais à chaud et après refroidissement	44
II.4.2.Résistance en compression à hautes températures	44
II.4.3.Résistance en traction à hautes températures	46
II.5.Déformation thermo hydrique libre du béton	47
II.6.Evolution des propriétés physiques	48
II.6.1.Perte de masse	48
II.6.2.Porosité	49
II.7.Evolution des propriétés mécaniques du béton:	50
II.7.1.Résistance à la compression	50
II.7.2.Résistance à la traction	53
II.7.3.Module d'élasticité	53
II.8.Conclusion	56
Chapitre III : Caractéristiques des matériaux utilisés	57
III.1.Introduction	58
III.2 .Sable	58
III.2.1.Origine du sable :	58
III.2.2.Caractéristiques physiques du sable utilisé	58
III.2.3.Masse spécifique (absolue) : NF P 18-555	58
III.2.4.Masse volumique apparente : NF P 18-554	60
III.2.5.Masse volumique apparente à l'état lâche	60
III.2.6.Masse volumique apparente à l'état compact	61
III.2.7 Porosité : NF P 18-554	62
III.2.8.La compacité	62
III.2.9.Equivalent de sable : NF P 18-59	63
III.2.10.Teneur en eau : NF P 18-555	66
III.2.11. Analyse granulométrique : NF P 18-304. NF P 18-560	66
III.3.Ciment	69

Tableaux des matières

III.3.1. Caractéristiques physiques du ciment utilisé	69
III.3.2. Caractéristiques chimiques du ciment utilisé	69
III.4. L'eau de gâchage :	71
III.4.1. Caractéristiques chimiques de l'eau utilisée	71
III.5. L'adjuvant	71
III.5.1. Description	71
III.5.2. Propriétés	72
III.5.3. Domaine d'application	72
III.5.4. Caractéristiques	73
III.6. Les ajouts	73
III.6.1. Les déchets de brique	73
III.6.2. Kaolin	74
III.6.2.1. Traitement thermique du kaolin	75
III.6.2.2. Caractéristiques physique, chimique et minéralogique du Métakaolin	75
III.7. Elaboration du différent mortier auto-plaçant	76
III.7.1. Composition de mortier auto plaçant pur 1 m ³	76
III.7.2. Dénomination des différents mélanges	77
III.7.3. Préparation des éprouvettes	79
III.7.4. Cure appliquée	80
III.7.5. Essai de chauffage	81
III.7.6. Les essais sur les mortiers	82
III.7.6.1. Etat frais	82
III.7.6.1.1. Essais d'étalement au mini-cône	81
III.7.6.1.2. Essai d'écoulement à l'entonnoir en V (V-Funnel test)	82
III.7.6.2. Caractérisation des mortiers à l'état durci	83
III.7.6.2.1. Essais de résistances mécaniques	83
III.7.6.2.2. Résistance à la traction par flexion	83
III.7.6.2.3. Résistance à la compression	85
III.7.6.2.4. Estimation de la perte de masse	86
III.7.6.2.5. Essai de Vitesse de propagation d'ondes ultrasonores	87
III.8. Conclusion	89
Chapitre VI : Résultats et analyses	90
IV .1 Introduction	91
IV.2 Résultats des essais à l'état frais	91
IV.2.1 : la masse volumique	92
IV.2.2. L'étalement au mini-cône	92
IV.2. 3. Essai Au Mini V-Funnel	93
IV. 3. Essai Au Bac En Plexiglas	94
IV. 3.1 Résultats des essais à l'état durci	95
IV.3.2 résistance à la compression	96
IV.3.3. Résistance à la traction	98
IV.3.4. la Vitesse d'ultrason	99
IV.3.5. la perte de masse	101
IV.4. Evolution de la surface fissurée des éprouvettes	102
IV.4.1. Étude de corrélation	102
IV.4.1.1. la corrélation (Rc) en fonction de (V) pour M0	102
IV.4.1.2 ; La corrélation (Rc) en fonction de (V) pour M2	103
IV.4.2. Étude de corrélation entre (Perte) et (V)	103

Tableaux des matières

IV.4.2.1. La corrélation (Perte) en fonction de (V) pour M0	104
IV.4.2.2. La corrélation (perte) en fonction de (V) pour M2	104
IV.4.2.3. La corrélation (perte) en fonction de (V) pour M4	105
IV.4.3.1. La corrélation (Pert) en fonction de (Rc) pour M0	106
IV.4.3.2. La corrélation (Pert) en fonction de (Rc) pour M2	108
IV.4.3.3. La corrélation (Pert) en fonction de (Rc) pour M4	109
IV.4.4. Étude de corrélation entre (Rt) et (V)	110
IV.4.4.1. La corrélation (Rf) en fonction de (V) pour M0	110
IV.4.4.2. La corrélation (Rf) en fonction de (V) pour M2	111
IV.4.4.3. La corrélation (Rf) en fonction de (V) pour M4	112
IV.5. Conclusion	113
Conclusion Géniale	115



Introduction générale

Introduction Générale

De nos jours, dans le domaine de la construction et des travaux publics, et devant les besoins croissants en matériaux et les exigences de préservation de l'environnement dans une vision du développement durable, il est devenu nécessaire de prospecter et d'étudier toutes les possibilités d'élaboration de nouveaux matériaux avec la réutilisation et la valorisation des déchets de démolition et les sous-produits industriels. Par conséquent beaucoup d'importance est donnée à la valorisation des déchets et de sous-produits industriels dans la fabrication du ciment et du béton.

Dans ce contexte, dans plusieurs universités au monde entier, les laboratoires de recherche sur les matériaux travaillent sur le développement de nouveaux composites cimentaires à base de déchets, dans le but de réduire le coût de réalisation et éliminer ces déchets de l'environnement d'une part, d'autre part d'améliorer les propriétés mécaniques et physiques des mortiers et des bétons. Dans cet axe, ce travail de recherche a pour objectif d'étudier la possibilité d'élaboration d'un mortier auto plaçant avec la substitution du ciment par 5% ,10% et 15% de poudre de brique, avec la substitution du ciment par 10% de poudre de métakaolin.

Le travail est présenté en quatre chapitres :

Le premier chapitre nous présentons le concept et la formulation des mortiers auto plaçant, ainsi que l'influence des principaux constituants sur les propriétés des MAP. Nous avons abordé les effets des granulats recyclés sur les caractéristiques des matériaux cimentaires. Enfin, nous présentons les effets de la poudre de brique et le poudre de métakaolin sur les caractéristiques des matériaux cimentaire.

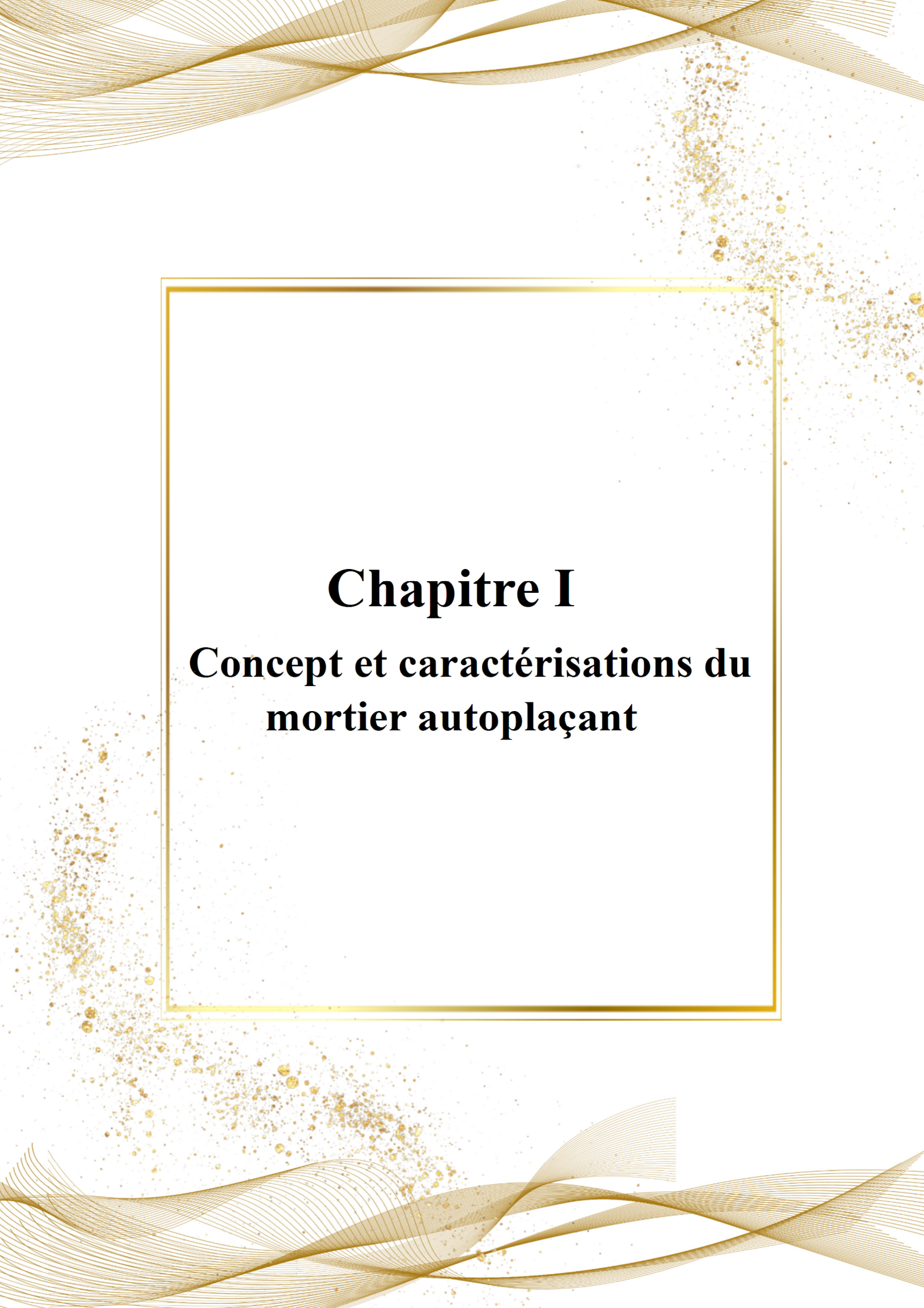
Le deuxième chapitre de la synthèse bibliographique a pour objectif de présenter une synthèse des études réalisées sur les caractéristiques du mortier et les modifications structurelles qui surviennent après son exposition à une haute température L'effet de l'exposition à la haute température sur les caractéristiques mécaniques du béton : résistance en compressions, résistance en traction et le module d'élasticité, Les propriétés physiques, notamment l'évolution de la perte de masse et la porosité du béton .

Le troisième chapitre présente les matériaux utilisés et leurs caractéristiques chimiques et physiques et mécaniques

Le quatrième chapitre présente les résultats obtenus pour la résistance à la compression, résistance à la traction, la Vitesse du son et perte de masse. L'analyse de ces résultats qui nous permettent d'établir des corrélations entre des différents paramètres.

Introduction générale

Enfin, nous présentons une conclusion générale sur notre travail ainsi que d'éventuelles perspectives.



Chapitre I
Concept et caractérisations du
mortier autoplaçant

Chapitre I : Concept et caractérisations du mortier autoplaçant

I.1.Introduction

Dans ce premier chapitre, nous allons essayer de faire une description générale issue de notre recherche bibliographique sur toutes les principales notions à traiter dans notre étude. Nous allons donner une présentation générale sur les propriétés de pâte et mortier auto plaçant des différents types d'addition minérale utilisés dans le domaine de construction en génie ciVil. Notamment leurs origines, leurs classifications. Nous allons également donner un aperçu sur les mortiers auto plaçant. Nous allons surtout basé sur leurs applications dans la construction, les différents types et les principales caractéristiques. Dans ce chapitre nous allons fait aussi une synthèse sur les différents travaux de recherche qui ont été fait sur le thème de notre étude, plus particulièrement en ce qui concerne la valorisation pour type de (brique et Métakaolin) pour la confection des bon mortiers auto plaçant, où nous allons exposer les principaux résultats obtenus.

I.2. Mortiers auto-plaçant

Le mortier auto-plaçant MAP se caractérise par une grande fluidité et une grande capacité de remplissage. Il garantit aussi de bonnes performances mécaniques et de durabilités. D'étélles caractéristiques sont directement liées à leurs compositions. En effet les recherches menées, au cours des dernières années, montrent que les MAP sont formulés différemment des mortiers ordinaires : ils contiennent plus d'éléments fins, ils doivent comporter au moins une addition minérale, et un dosage élevé super plastifiant [1]

Le mortier auto-plaçant est une alternative économique au coulis de ciment en plus d'offrir une stabilité volumétrique supérieure. Il est composé de ciment, d'eau de sable, et d'adjuvant spécialisé. Ce produit peut être pompé pour être mis en place [1]

Les Figure I.2 et Figure I.3 montrent les constituants des mortiers et la différence entre les mortiers ordinaires et les mortiers auto-plaçant.



Figure I.01 : Mortier en état frais

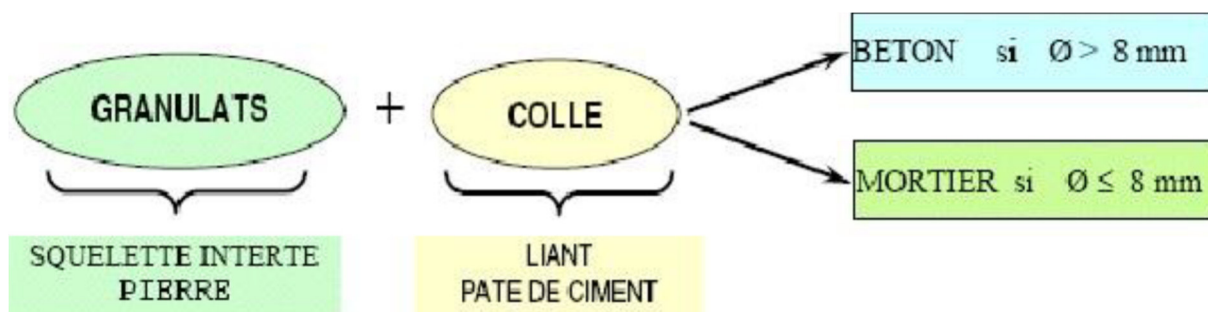


Figure I.02 : Constituants des mortiers. [1]

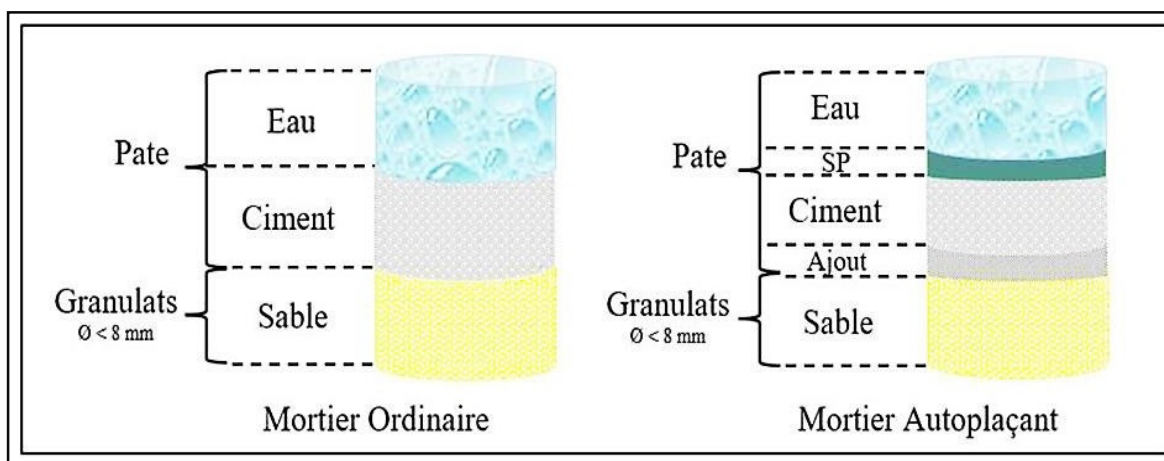


Figure I.3 : La différence entre les constituants des mortiers ordinaires et des mortiers auto plaçant [2].

Les frottements entre les gravillons limitent l'écoulement des bétons. C'est pourquoi, le MAP contient un volume de pâte important dont le rôle est d'écarter les gravillons les uns des autres [2]

Pour leur assurer une maniabilité suffisante tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les MAP contiennent une quantité de fines supérieures à celle des mortiers.

Toutefois, pour éviter des problèmes d'élévation excessive de la température lors de l'hydratation ainsi que pour abaisser leur coût global, le liant est souvent un composé binaire

[2],

Voire ternaire ; ciment portland mélangé avec cendres volantes, laitier, fillers calcaires, pouzzolanes naturelles, ou fumée de silice [2].

L'introduction de dosage relativement important de super-plastifiant dans les BAP permet en premier lieu de réduire la teneur en eau tout en conservant leur grande maniabilité. Toutefois, un dosage trop élevé (proche ou supérieur au dosage dénaturation peut augmenter et la sensibilité du béton à des variations de teneur eau Vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage [2].

I.3. Domaine d'applications MAP

Le mortier auto-plaçant est habituellement utilisé pour remplir des conduites Figure I.4, des réservoirs souterrains, des espaces vides.

Le mortier auto-plaçant peut être injecté pendant 2 heures sur des distances allant jusqu'à 100mètres (maximum 3 heures) [2].



Figure I.4: Utiliser le mortier pour remplir les conduites

I.3.1. Données techniques

Voici quelques données techniques sur ce produit : (code G3501500)

- La masse volumique est d'environ 2100 kg/m³;
- La résistance à la compression à 28 jours visé est de 35MPa ;
- Résistance à la compression à 7 jours est de > 2MPa ;
- Le produit est très fluide ;
- Le produit est pompable stable et fluide.

I.3.2. Précautions particulières

Le mortier autoplaçant très fluide et s'écoulera facilement s'il y a des ouvertures ou des pentes. Considérer les pressions hydrostatiques dans les calculs des coffrages. Le sable contient jusqu'à environ 5% de granulat > 5 mm. Dans le cas où un grand volume est pompé dans une très petite ouverture, une crépine peut être employée [2]

I.4. Structure de MAP

La formulation d'une pâte et mortier cimentaire auto plaçant qui offrira un comportement optimal vis-à-vis de la stabilité et de l'écoulement en utilisant les matériaux de notre région avec les pourcentages adéquats de chaque constituant. Nous mettrons en œuvre un programme expérimental où nous étudierons le rôle de chaque paramètre sur le comportement de la pâte cimentaire et nous délimiterons par la suite un domaine expérimental qui offrira un ensemble de mélanges homogènes et stables, aux propriétés d'écoulement mesurables. Cependant, pour avoir le mélange de constituants possédant les réponses optimales, nous élaborerons un plan de mélanges qui permet d'avoir un nombre important d'informations (rôle des constituants, interactivité) avec un minimum d'essais.

Le rôle de l'expérimentateur ainsi que la démarche expérimentale de l'élaboration de la pâte de ciment sont deux éléments importants, compte tenu de la sensibilité du comportement de cette dernière.

La pâte de ciment est confectionnée à partir des quatre composantes (ciment, fillers, plastifiant, eau).

I.4.1. Un volume de pâte important

Les frottements entre granulats sont source de limitation vis-à-vis de l'étalement et de la capacité au remplissage des bétons. Le rôle de la pâte (ciment + additions + eau efficace + air) étant précisément d'écarter les granulats les uns des autres, son volume dans les BAP est donc élevé (Figure.I.5).

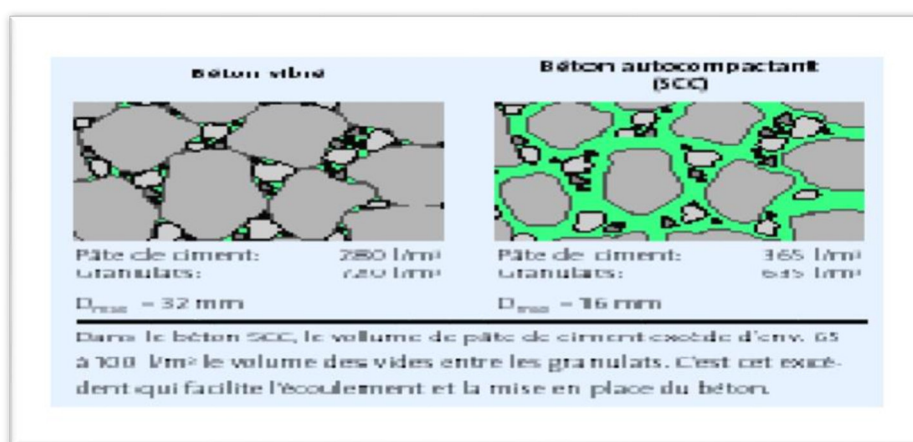


Figure. I. 5 : Dispersion des granulats par excès de pâte [3].

I.4.2. Une quantité de fines (<80 µm) importante

Afin de garantir le compromis entre stabilité et maniabilité tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les BAP contiennent une quantité de fines (de l'ordre de 500 kg/m³) supérieure à celle des bétons conventionnels.

Le choix des additions et de leur teneur respective dans les BAP est déterminé en fonction des exigences de résistance à la compression à 28 jours, des critères de durabilité et des paramètres d'ouvrabilité telles qu'imposées par les normes applicables (DTU 21, norme XP P 18-305, normes produit préfabriqué en usine, etc.).

I.4.3. L'utilisation des super-plastifiants

Les super-plastifiants permettent d'obtenir des bétons très fluides. Ces fluidifiants ont le rôle de défoulant, ainsi les particules solides sont dispersées par combinaison d'effets électrostatiques et stériques et la proportion d'eau libre est plus importante. Toutefois un dosage trop élevé (proche ou supérieur au dosage de saturation) peut augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage

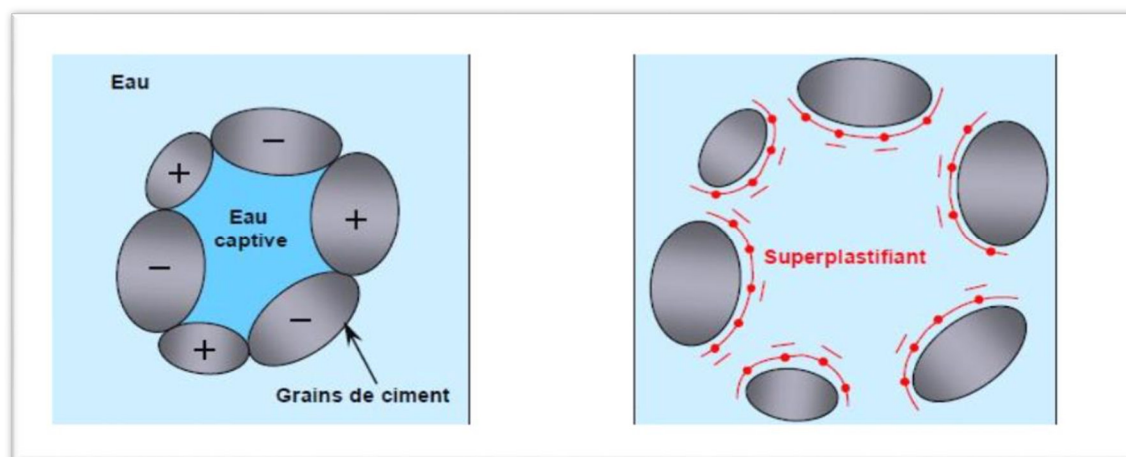


Figure I.6 : Mode d'action des super-plastifiants-Défloculation des grains de ciment [2].

I.4.4. Une utilisation éventuelle d'agent colloïdal

En 1977, des agents colloïdaux améliorant la viscosité et la stabilité du béton ont été développés en Allemagne. Ces adjuvants, se présentant généralement sous forme de poudre, sont fréquemment utilisés pour empêcher le délavement à l'état frais des bétons coulés sous l'eau, comme agent de pompage, et pour améliorer la cohésion de mélange des BAP. Leur utilisation commence à être populaire, mais ils sont actuellement relativement chers comparés aux autres adjuvants.

La plupart des agents colloïdaux sont composés d'éther de cellulose ou de polymères de type acrylique qui sont solubles dans l'eau BENSEBTI S. E. Ils sont classés selon leur origine en trois catégories [2] :

A. Polymères naturels : Ils comprennent des gommages naturelles, des protéines de certaines plantes et l'amidon.

B. Polymères semi-synthétiques : Ils comprennent des dérivés de l'amidon, des dérivés de l'éther de cellulose comme l'hydroxyle de cellulose, l'hydroxyle de méthyle de propylée de cellulose et le méthyle carboxyle de cellulose, ainsi qu'un électrolyte comme de l'alignone de sodium.

C. Polymères synthétiques : Ils comprennent de l'éthylène comme de l'oxyde de polyéthylène et de vinyle comme l'alcool de polyvinyle.

Le mécanisme d'action des agents colloïdaux est fonction du type et de la concentration des polymères. Il peut être décomposé en trois phases [3] :

1. Adsorption : Les longues chaînes de polymères adhèrent à la périphérie des molécules d'eau

par un phénomène d'adsorption et fixation d'une partie de l'eau

La quantité d'eau adsorbée dépend de la longueur des polymères et de leur surface spécifique.

2. Association : Les molécules des chaînes de polymères adjacentes peuvent développer entre elles des forces d'attraction qui bloquent les mouvements de l'eau et provoquent la formation d'un gel qui augmente conséquemment la viscosité.

Entrelacement : Les chaînes de polymère peuvent s'entrelacer et s'emmêler spécialement dans des mélanges à forte concentration d'agent colloïdal. Cet entrelacement augmente la viscosité.

I.5.Méthode de formulation

Les différentes propriétés des bétons auto-plaçant rendent leur formulation relativement compliquée. Même si de nombreuses études ont été effectuées pour comprendre les principes qui régissent le comportement de ces bétons en milieux confinés, aucune Méthodologie pratique de formulation ne semble avoir été établie, permettant à un chercheur ou à un ingénieur de fabriquer un béton auto-plaçant à partir de données de base sur les matériaux locaux et un cahier de charges précis. [2]

La formulation de la composition se fait sur la base des méthodes acquises ces dernières années. Parmi ces dernières on peut citer les suivantes :

I.5.1. La Méthode Japonaise

La formulation des BAP par l'approche développée à l'Université de Kochi se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats. Les bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique. Le surcoût engendré sur le matériau est compensé, au Japon, par les économies sur la main d'œuvre. Les principes de formulation et leur application sont les suivants :

➤ **Dosage des gravillons :**

Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1 m³ de béton est limité à la moitié de sa compacité. Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système grains + vides. Elle dépend bien sûr du mode de compactage.

➤ **Dosage du sable :**

Le volume du sable est posé forfaitairement à 40 % du volume de mortier du béton. La

fluidité du béton est garantie par la réduction des frictions granulaires.

➤ **Dosage du liant :**

La méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins la quantité de ciment peut être fixée, par exemple, en respectant la donnée des normes (soit ici une masse minimale de ciment de 350 kg/m³). Les rapports massiques eau sur ciment et filler sur ciment peuvent également être choisis sur des critères de résistance.

- **Dosage de l'eau et du super plastifiant :** Les dosages en eau et en super plastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40 %. On réalise des mesures d'étalement avec un cône à mortier et des mesures d'écoulement à l'entonnoir.

I.5.2. La Méthode Suédoise

Proposée par Petersson et al, 1996. La méthode suédoise est basée sur l'étude effectuée par Tangter msirikul et al, 1995. En fait, ils ont repris l'approche d'évaluation du risque de blocage et l'ont intégrée dans le processus de formulation. Le rapport G/S final est celui qui donne le même volume de pâte pour avoir les propriétés recherchées. Les fines, l'eau et le super plastifiant sont ajustés par la suite pour obtenir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement et la résistance à la compression visée. Cette méthode propose une meilleure optimisation du squelette granulaire mais le critère de blocage n'est pas général pour tout type de granulats. [2]

I.5.3. La Méthode Française (LCPC)

Au LCPC, un modèle mathématique a été développé à partir d'un modèle de suspension solide (RENE LCPC). Ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre les différents constituants du mélange. Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire avec une précision inférieure à 1% à partir des constituants ci-après :

- Les distributions granulaires.
- Les proportions du mélange.
- La compacité propre.
- La densité apparente.

La procédure à adopter pour déterminer les proportions des divers constituants est la suivante :

- La proportion de liant est fixée a priori (70% de ciment, 30% d'addition par exemple).

- Le dosage, à saturation, du superplastifiant est déterminé. Selon l'expérience du LCPC, ce dosage pourrait conférer au béton une viscosité élevée, la moitié de ce dosage serait plus pertinente.
- Le besoin en eau de ce mélange (en présence du superplastifiant) est déterminé
- Les calculs sont effectués avec le logiciel en tenant compte du confinement (Effets de paroi).
- La viscosité est fixée de manière arbitraire à 5.104 La teneur en eau est réduite en conséquence et la proportion liant/filler est maintenue constante. [3]

Les proportions granulats/ phase liante sont optimisées

Une formulation de béton auto-plaçant est donc proposée basée sur les prévisions du modèle. La teneur en eau est ajustée pour obtenir la résistance ciblée. Le dosage en superplastifiant est ajusté également afin d'obtenir la valeur d'étalement et le seuil de cisaillement souhaités et par conséquent les propriétés requises pour le béton auto-plaçantsont atteintes. [3]

I.6. Caractérisation de MAP à l'état frais

I.6.1. Fluidité et déformabilité de MAP

La déformabilité du mortier est définie comme étant la capacité de mortier de subir un changement de forme sous son propre poids. La déformabilité élevée est exigée de sorte que le mortier.

Afin d'obtenir une déformabilité adéquate, il est important de réduire au minimum le frottement inter sable du mélange. La réduction de la quantité du gros sable et l'augmentation du volume de pâte sont exigées pour obtenir la déformabilité désirée des MAP. Une autre manière de réduire le frottement inter sable est obtenu avec l'incorporation d'additions minérales telles que les fillers [3].

La déformabilité du béton est directement liée à la déformabilité de la pâte .a Pour augmenter la déformabilité de la pâte et réduire le frottement inter sable, des super-plastifiants haut- réducteur d'eau (SPRE) sont incorporés dans les mélanges MPA. Ces SPRE permettent de maintenir un rapport eau- matières cimentaires relativement bas tandis que la fluidité reste élevée. La déformabilité de la pâte est augmentée aussi en réduisant la viscosité. Un mortier fortement fluide peut être obtenu sans réduction significative de sa cohésion en améliorant sa résistance à la ségrégation. [3]

En général, le critère de fluidité- stabilité est assez difficile à résoudre, mais, au moyen d'agents colloïdaux, de teneurs élevées en ajouts minéraux ou de teneurs appropriées en sable, la stabilité et la déformabilité peuvent être assurées.

I.6.2. Ouvrabilité

L'ouvrabilité d'un mortier se mesure à l'aide de divers appareils. Les plus connus sont :

A. Table à secousses

Après le démoulage du mortier, ce dernier reçoit 15 chocs en 15 secondes. On mesure le diamètre de la galette ainsi obtenue. L'étalement en % est donné par la formule : [4]

D_r = diamètre final

D_i = diamètre initial

$$E\% = 100 \frac{(D_r - D_i)}{D_i}$$

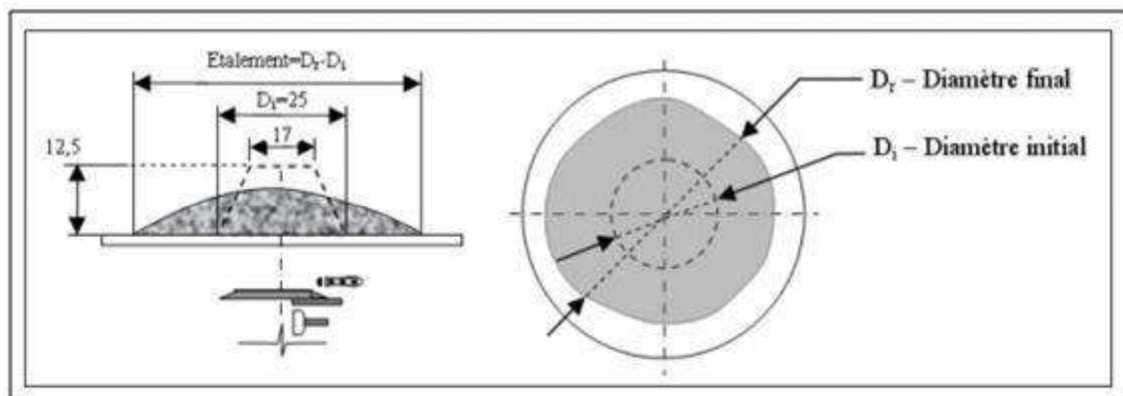


Figure I.7: Table à secousses

Maniabilimètre du LCPC-B

Dans cet essai, la consistance est caractérisée par le temps que met le mortier pour s'écouler sous l'effet d'une vibration pour atteindre un repère gravé sur la face intérieure du moule (figure). Le mortier est d'autant plus fluide que le temps d'écoulement est court.

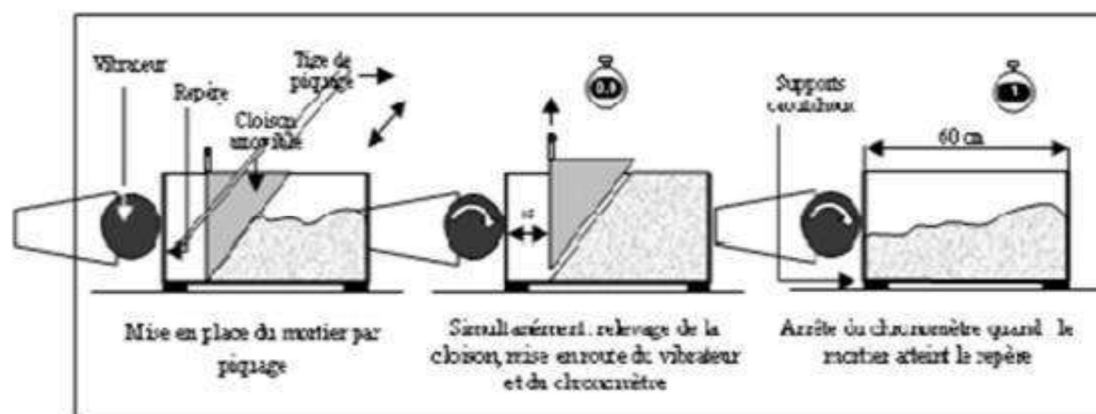


Figure I.8 : Essai au Maniabilimètre LCPC-B

I.6.3. Étalement au Mini cône de pâte

Dans la méthode japonaise et hollandaise la demande en eau passe par des essais d'étalement au mini cône sur pâte en faisant varier le rapport Eau/poudre (Fig.1.2). La poudre étant le ciment ou l'addition minérale (filler...) mesurer l'étalement relatif «équation Rp » (équation détermine les paramètres correspondant aux droites obtenus pour chaque liant (ciment et filler calcaire). [4]

I.6.4. Essais de déformabilité de l'Entonnoir en V (V-funnel)

L'essai d'écoulement à l'entonnoir (ou V-funnel test) est utilisé pour évaluer la fluidité et la viscosité des MAP.

Un entonnoir de dimensions définies est rempli de mortier jusqu'en haut. Le clapet de fermeture situé à sa base est ensuite ouvert, on mesure le temps (T_v) que met le mortier à sortir de l'entonnoir jusqu'à ce que cet entonnoir soit entièrement vide. Ce temps d'écoulement, qui doit être compris entre 8 et 14 secondes, caractérise la viscosité du mortier. Si le mortier s'écoule plus rapidement, c'est que sa viscosité est trop faible. Bien que l'essai soit conçu pour mesurer la fluidité, le résultat est affecté par d'autres propriétés du MAP que celle de l'écoulement. La forme de cône inversée fera bloquer l'écoulement du mortier si, par exemple il y a trop gros granulat. Par contre un temps élevé d'écoulement peut être associé à une faible déformabilité due à une viscosité élevée de la pâte et ou un frottement inter granulaire élevé.

L'EFNARC [EFNARC 2005] définit deux classes de viscosité selon le temps d'écoulement mesuré à l'entonnoir (V-funnel) : $T_v \leq 6$ secondes, pour une bonne capacité de remplissage même avec des renforts denses et $9 \leq T_v \leq 25$ pour les autres cas. [4]



Figure I.9. Déroulement de l'essai d'entonnoir en V

I.7. Caractérisation de MAP à l'état durci

I.7.1. Résistances mécaniques

Les essais sont souvent effectués sur les éprouvettes prismatiques de 4x4x16cm Conservées dans l'eau à 20°C. Les éprouvettes sont rompues en traction par flexion puis en compression. Les résistances, aussi bien en traction par flexion qu'en compression, Progressent à peu près comme logarithme du temps (entre 1 et 28 jours). Les résistances des Mortiers dépendent de très nombreux facteurs :[5]

- Nature et dosage en ciment.
- Rapport E/C.
- Granulométrie et nature du sable.
- Energie de malaxage et mise en œuvre.
- Protection des premiers jours.

I.7.1.1. La résistance à la compression

La résistance à la compression est la capacité d'un matériau ou d'une structure à supporter les charges qui tendent à réduire sa taille par compression (écrasement). [5]

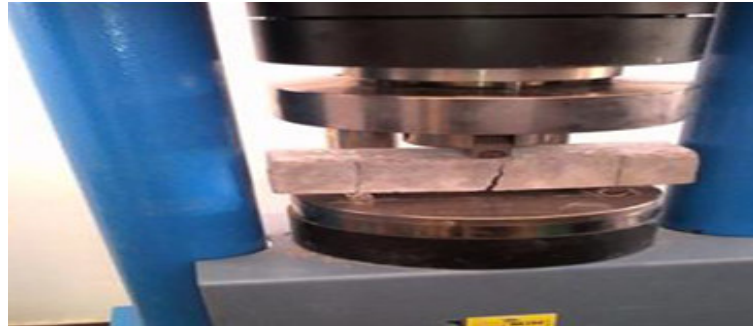


Figure I.10. Appareil de compression.

I.7. 1.2. La résistance à la flexion

La flexion est la déformation d'un objet qui se traduit par une courbure. Dans le cas d'une poutre, elle tend à rapprocher les deux extrémités de la poutre. Dans le cas d'une plaque, elle tend à rapprocher deux points diamétralement opposés sous l'action. [5]

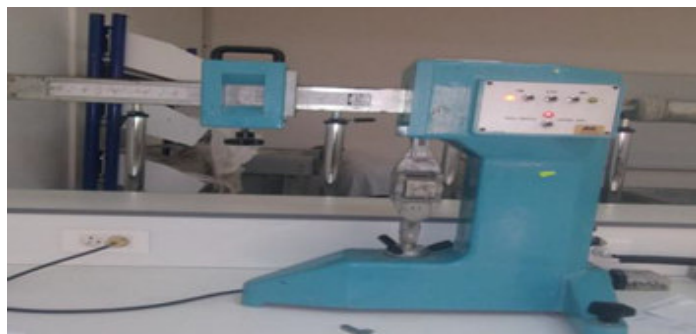


Figure I. 11 : Appareil de flexion

I.7.1.3. Retrait et gonflement

➤ **Le Retrait**

Les retraits se mesurent sur des prismes 4x4x16cm en mortier, munis de plots à leurs extrémités et conservés, après démoulage, dans une enceinte à 20°C et à 50% d'humidité relative.

➤ **Le gonflement**

Le gonflement des mortiers (qui se produisent lorsqu'ils sont conservés dans l'eau) se mesure sur les mêmes éprouvettes de 4x4x16cm conservées dans l'eau à 20°C.

1.8. Valorisation des déchets dans le domaine de construction

Les ajouts cimentaires constituent une solution durable et performante pour les constructeurs et occupants de bâtiments de toutes sortes. L'utilisation croissante de ces matériaux respectueux de l'environnement s'explique par les nombreux avantages, comme une maniabilité accrue et une meilleure consolidation, une amélioration des résistances à la flexion et à la compression, une amélioration de la pompabilité, une meilleure résistance aux chlorures et aux sulfates, des températures inférieures pour le béton de masse, de faibles réactions silico-alcalines, et une diminution de la perméabilité.

I.8.1. Les ajouts cimentaires

I.8.1.1. Les ajouts inertes

Sont des produits qui n'ont aucune influence sur le processus de fabrication d'hydratation et de durcissement du ciment, ces ajouts finement broyés sont ajoutés au clinker avant le broyage.

[5]

I.8.1.2. Les ajouts actifs

On appelle ajouts minéraux actifs les substances naturelles ou artificielles finement broyées et ajoutées au clinker avant ou après le broyage, améliorent la résistance du ciment et son pouvoir hydraulique. [5]

I.8.1.2.1. Les pouzzolanes

Une pouzzolane qui dans cet ouvrage est classée comme étant l'un des constituants du ciment, bien qu'en fait sous une forme latente seulement, est un matériau d'origine naturelle ou artificielle contenant de la silice sous forme réactive. Une définition plus explicite est donnée par la norme ASTM 618-94 qui décrit une pouzzolane comme un matériau siliceux ou silico-alumineux qui, intrinsèquement, possède peu ou pas de valeur hydraulique, mais qui, finement broyée en présence d'humidité a des composés possédant des propriétés hydrauliques. Autrement

dit, une pouzzolane est un matériau capable de fixer la chaux à la température ambiante et de former des composés ayant des propriétés hydrauliques, c'est-à-dire pouvant faire prise et durcir par hydratation. Il est indispensable que la pouzzolane soit sous forme finement broyée,

Car seul cet état permet à la silice de se combiner avec l'hydroxyde de calcium (produit par l'hydratation du ciment portland) en présence d'eau pour former des silicates de calcium stables ayant des propriétés hydrauliques. La silice doit être amorphe, c'est-à-dire vitreuse, étant donné que la silice cristallisée a une très faible réactivité. La teneur en verre peut être déterminée par spectroscopie de diffraction des rayons X ou par dissolution dans l'acide Chlorhydrique et l'hydroxyde de potassium. [6]

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels, capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédants des propriétés liantes :

Nous avons utilisé une pouzzolane naturelle d'origine volcanique extraite du gisement de Bouhamedi situé au sud de Beni-Saf (Algérie). [6]

I.8.1.2.2. Le laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau est un liant hydraulique fabriqué à partir du laitier de fonte et composé essentiellement de silicates et d'aluminosilicates de calcium qui se sont développés dans des conditions de fusion du minerai de fer dans un haut fourneau.

L'hydratation initiale du laitier est très lente car elle doit être activée par les ions hydroxyles présents dans la solution des pores. Elle ne se produit donc pas si la solution interstitielle n'a pas atteint une certaine valeur de pH. Les laitiers de haut-fourneau ne produisent pas de portlandite lors de l'hydratation et ils ont un certain potentiel pouzzolanique (dix fois plus faible que celui de la fumée de silice). Le mûrissement humide prolongé est particulièrement important en raison de la faible vitesse initiale d'hydratation. [6]

Le laitier en fusion, à une température d'environ 1500°C, est refroidi rapidement en le trempant dans l'eau pour former un matériau granuleux ressemblant à un sable vireux.

C'est un résidu de l'industrie sidérurgique. Il présente des caractéristiques hydrauliques latentes. Le laitier broyé s'hydrate en présence de l'eau et d'un activateur, le NaOH ou $\text{Ca}(\text{OH})_2$. [6]

I.8.1.2.3. Les Fumées de silice

La fumée de silice est aussi appelée microsilice ou fumée de silice condensée, mais le terme « fumée de silice » est le plus généralement utilisé. C'est un sous-produit des usines de fabrication d'alliages de silicium et de ferrosilicium obtenu dans un four à arc à partir de quartz de grande pureté et de charbon. Le SiO entraîne par les gaz depuis la zone de combustion des fours s'oxyde et se condense sous forme de particules de silice amorphe (SiO_2) sphériques extrêmement fines ; d'où le nom de fumée de silice. La silice, sous forme de verre (amorphe), est très réactive et la petitesse des particules accélère la réaction avec l'hydroxyde de calcium produit lors de l'hydratation du ciment portland. Les très petites particules de fumée de silice peuvent combler l'espace entre les grains de ciment, ce qui améliore le remplissage des vides. Lorsque le four comprend un système de récupération de chaleur efficace, la majeure partie de carbone est brûlée si bien que la fumée de silice est pratiquement sans carbone et de couleur claire. Toutefois, les fours n'ayant pas de système complet de récupération de chaleur laissent échapper un peu de carbone dans la fumée, qui présente par conséquent une couleur foncée. [6]

Les fumées de silice (FS) sont un sous-produit industriel provenant de la fabrication du silicium métallique ou de divers alliages de ferrosilicium. Les fumées de silice sont produites lors de la réduction du quartz très pur par du charbon dans un four à arc électrique. Les fumées de silice sont recueillies par filtration des gaz qui s'échappent lors de la combustion. Elle s'élève sous forme de vapeur oxydée émise par les fournaies chauffées à 2000°C . Une fois refroidie, elle se condense pour être captée dans des poches de tissu. [20] Ensuite, elles seront traitées pour enlever les impuretés et pour contrôler la taille des particules.

I.8.1.2.4. Les fillers calcaires

L'utilisation des fillers calcaires dans l'industrie du ciment et du béton est assez récente. Les additions calcaires dans les matrices cimentaires ont déjà fait l'objet de plusieurs études, essentiellement en France et aux Etats-Unis d'Amérique. Ils sont soit récupérés lors du concassage des granulats calcaires et peuvent alors contenir des résidus argileux et des matières organiques, soit obtenus par broyage du matériau cru. Leur composition chimique est celle du carbonate de calcium (CaCO_3) mais ils peuvent contenir aussi du magnésium (sous forme $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), s'il réagit de calcaires dolomitique.

Les calcaires peuvent avoir des origines géologiques différentes, métamorphique (il s'agit de marbres) ou sédimentaire. Ils peuvent aussi exister sous plusieurs formes polymorphiques (calcite, aragonite, latérite) [7].

I.9. Définition des ajouts minéraux

Les additions minérales sont connues par leur influence sur les propriétés du béton à l'état frais et à l'état durci. Les additions minérales améliorent considérablement la fluidité dans certains cas d'addition, elles améliorent aussi la granulométrie du squelette dans le béton en remplissant les vides entre les grains grâce à leurs petites tailles. Toutefois, l'influence des additions minérales sur l'écoulement des BAP à l'état frais dépend principalement du dosage, du type et de la finesse des additions minérales [7].

I.10. L'utilisation des additions en Algérie

Bien que l'emploi des l'addition minérales se soit généralisé dans le monde, il reste très limité en Algérie. L'emploi de ces matériaux n'est pas encore répandu dans le domaine du génie civil malgré la disponibilité en grande quantité de ces ajouts tels que le laitier granulé, le calcaire ou la pouzzolane naturelle et leurs couts relativement réduit par rapport au ciment En effet, de nombreuses études ont été réalisées, traitant de l'influence des additions minérales sur plusieurs aspects des bétons. Actuellement, l'emploi de l'addition se limite seulement au secteur de l'industrie Cimentaire pour la production du ciment composé le Tableau I.1 résume l'utilisation des différentes additions dans les cimenteries algériennes.

Tableau I.1 : Utilisation des addition minérales dans les cimenteries algériennes [7]

Cimenterie	Ajouts utilisés
Ain Touta (Batna)	Pouzzolane
Ain El Kebira (Sétif)	
Hamma Bouziane (Constantine)	
Hadjar Soud (Skikda)	Laitier granulé
Tebessa	
Meftah (Alger)	Tuf/Calcaire
Raïs Hamidou (Alger)	-
Sour EL Ghozlane (Bouira)	Calcaire/Tuf
Chlef	Calcaire
M'sila	Laitier granulé Pouzzolane
Beni Saf (Tlemcen)	Pouzzolane
Zahana (Oran)	
Saida	

I.11.Rôle des ajouts cimentaire

Pour présenter les différentes fonctions des additions, il convient de distinguer leurs différents modes d'incorporation.

I.11.1. Additions mélangées avec le clinker en cimenterie

L'addition a pour but de proposer à la clientèle plusieurs types de ciments à partir d'un même clinker qui appartiennent soit à une classe de résistance mécanique inférieure ou égale, soit à énergétique et environnemental (moins de clinker = moins d'énergie et de CO₂). Les ciments ainsi produits sont : NF P 18-506 NF EN 450 'hydratation est faible et dont les ajouts ont des propriétés pouzzolaniques qui confèrent au matériau final une durabilité intéressante. Ils sont utilisés dans les milieux agressifs comme les constructions en bord de mer ou en milieu sulfaté. S CEM II (ex CPJ), est étudié dans plusieurs recherches à titre de comparaison. Ce dernier type de ciment est avant tout d'intérêt économique et écologique ; il permet l'utilisation de cendres volantes et de laitiers, qui sont des sous-produits industriels, mais peut contenir aussi des fillers naturels (calcaires, pouzzolanes). Ce ciment est obtenu dans les cimenteries soit par mélange du clinker, du gypse et de l'addition après broyage du clinker soit par co-broyage. Les fillers calcaires entrent couramment dans la composition des CEM II avec des teneurs de substitution qui n'excèdent pas 30% en poids même si la teneur maximale autorisée est de 35%. Ainsi, à partir d'un CEM I 52.5, on réalise un CEM II/A 52.5 par substitution de 10% environ de ciment par du filler et un CEM II/B 32.5 par substitution de 27 à 30% de ciment par du filler.

I.11.2. Additions introduites directement dans les bétons

Dans le cas où seule la résistance à 28 jours est recherchée « bétons de marque » et dans les bétons où d'autres caractéristiques sont exigées « bétons à la norme » (dosage minimum en liant, rapport E/C maximum), les additions remplacent une partie du ciment. Alors que dans les bétons spéciaux (bétons à hautes performances, bétons autoplaçant, ...), les additions sont utilisées pour augmenter les résistances mécaniques ou rhéologiques, sans changer le dosage en ciment. Dans le cas de bétons spéciaux. [7]

a montré que certaines additions 33 sont indispensables pour la confection de ces bétons. En effet, ces additions contribuent à la diminution de la porosité du matériau durci et donc à l'amélioration de ses résistances et de sa durabilité. D'autre part, l'ensemble de ces additions (laitiers, cendres, fumée de silice, pouzzolanes, calcaires) participent aux réactions d'hydratation. Elles agissent comme correcteur granulaires et améliorent la cohésion inter granulaire. Ces deux fonctions du filler diminuent la porosité du matériau durci et donc améliorent ses résistances et sa durabilité.

I.11.3. Correction granulaire

Les fumées de silice et les fines calcaires sont ajoutées à la composition du béton pour rendre l'empilement granulaire le plus compact dans les bétons à hautes performances. b. Amélioration de la cohésion inter granulaire Les fillers calcaires et les fumées de silice améliorent la cohésion des bétons autoplaçants.

Comme de plus ces bétons sont souvent adjuvantés, le couple addition-adjuvant organique modifie la rhéologie du béton frais dans le sens d'une amélioration de sa maniabilité. Ces deux fonctions du filler diminuent la porosité du matériau durci et donc améliorent ses résistances et sa durabilité.

I.12. Le recyclage

Etant donné que tout ce qui est brûlé est irrémédiablement perdu en tant que matière première, c'est ainsi que le recyclage, qui a pour avantage de réduire la consommation matière première pour la fabrication de nouveau bien, permet de minimiser l'impact environnemental des déchets. Cette opération a pour objectif principal d'éviter un souillage des déchets recyclables par des déchets non recyclables. En effet, ceci pourrait les rendre impropres au recyclage. D'autre part, il permet d'orienter les différents déchets vers la bonne destination.

- Que faire des déchets ménagers et des débris de chantier qui inondent les décharges ?

I.12.1. Les matériaux recyclés

Plutôt que de les brûler – ce qui génère une grande production de CO₂ –, il est aujourd'hui possible de les transformer et de les réutiliser sous forme de matériaux de

construction. En outre, le recyclage réduit l'extraction de matières premières. Des solutions innovantes existent déjà pour une architecture plus écologique. Il suffit juste parfois de changer certaines habitudes...

1. Les tuiles en déchets en plastique recyclé
2. Les panneaux ou carrelage en plastique recyclé
3. Les isolants en jeans recyclés
4. Les briques en déchets recyclés

I.13. Les déchets de brique

Selon la méthode utilisée pour la fabrication et la manipulation des briques, il y a toujours un certain pourcentage de briques cassées, trop cuites ou mal cuites. Les briques concassées et bien cuites conviennent bien à la fabrication des blocs de béton. Le béton contenant de tels granulats est plus perméable et si les briques contiennent des sels solubles, il peut y avoir une corrosion et une efflorescence dans le béton. Le béton contenant de l'argile cuite comporte une résistance au feu beaucoup plus élevée que celle du béton à base de gravier naturel [8]



Figure I.12 : Déchets de brique

I.13.1. Définition de la brique

La brique est un parallélépipède rectangle, de terre argileuse crue et séchée au soleil ou cuite au four, utilisé comme matériau de construction. L'argile est souvent mélangée avec du sable.

I.13.2. Principaux constituants de la brique

Les briques cuites sont fabriquées avec tous types d'argile : les illitiques (couleur marron gris à rouge, après cuisson), les kaoliniques (très claires) et les bravaistiques (couleur orange à rose) [8]

On trouve dans la pâte argileuse essentiellement des éléments métalliques, sous forme d'oxydes plus ou moins hydratés :

Les éléments réfractaires dont le degré de fusion lors de la fabrication est compris entre 800 à 1000° sont la silice (SiO_2) et l'aluminium (Al_2O_3). [8]

Les éléments "colorants" dont la proportion détermine la couleur basique de la brique en plus du degré de cuisson qui est l'autre facteur déterminant de cette couleur. Ce sont l'oxyde de fer et l'oxyde de titane, Pour les fondants on utilise ou bien les oxydes alcalins qui sont principalement les oxydes de sodium et de potassium, ou alors les oxydes alcalino-terreux.

I.14. Intérêt de l'utilisation des déchets de brique dans la construction

L'industrie de la brique et de la tuile produit un grand nombre de rejets en raison de ces unités qui peuvent être cassées, déformées, ou sur cuites. Ce matériau est le plus souvent déversé dans les sites autour des briqueteries. Aux années 2000, La Belgique a produit chaque année environ 1000 kg de déchets de démolition et de construction par habitant. Cette masse de gravats se compose de 41% de maçonnerie. [8]

Les déchets de brique peuvent être utilisés dans la matrice cimentaire comme un substituant partiel au ciment ou dans le squelette granulaire comme remplace partiel des granulats. Dans les deux cas, la surface spécifique Blaine ou le module de finesse doivent être contrôlés avant leur addition dans les différents mélanges. [8]

Bektas et al ont substitué partiellement le sable par des déchets de brique pour la fabrication de mortiers. Le broyage de la brique a été effectué de sorte qu'elle passe à travers un tamis de 4.75 mm. Le module de finesse finale obtenu du sable de rivière et de la brique était respectivement de 3.01 et 3.51. [9]

O'Farrell M ont utilisé les déchets de brique ayant une surface spécifique de 320 ± 350 kg/m² comme substitution partielle de ciment à différents taux de substitution. [9]

I.14.1. Effet des déchets de brique sur l'ouvrabilité

Les matériaux d'origine argileuse possèdent des capacités d'adsorption, qui dépendent plus au moins d'un certain nombre de paramètres. La figure montre que la tendance de perte de fluidité

est presque linéaire pour des taux de remplacement de sable en déchets de brique respectivement de 0%, 10%, 20% et 30%. [9]

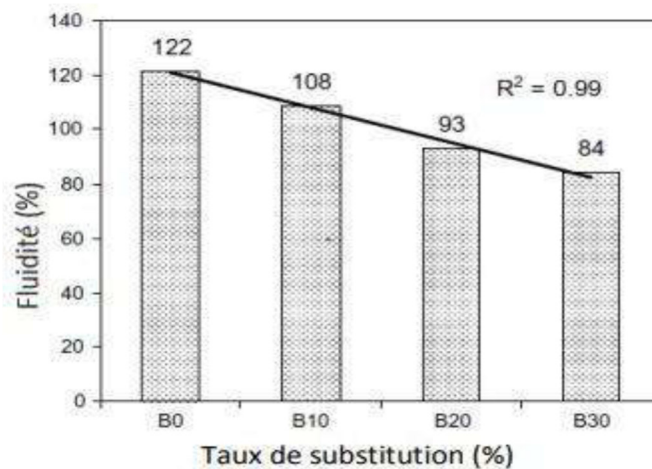


Figure I.13. Fluidité des mortiers à base de différents taux de substitution de sables par les PBR [10]

Il est évident que la grande capacité d'absorption de la brique en eau diminue significativement la fluidité des mortiers. La brique est un matériau qui contient des pores, dont la porosité peut atteindre 40% en fonction de la matière première et des processus de Fabrication. [10]

Debieb et Kenai ont remplacé le sable naturel avec des déchets de brique dans le béton à différents taux de substitution (0%, 25%, 50%, 75% et 100%). Ils ont également trouvé que la consommation en eau augmente avec l'augmentation de la substitution du sable par les déchets de brique pour une ouvrabilité constante. [10]

I.14.2. Effets des déchets de brique sur la résistance à la compression

Bektas et al montrent que les déchets de brique utilisés comme substitution partielle aux granulats jusqu'à 20% ne provoque pas de perte de résistance sur les mortiers (Figure), particulièrement à long terme. [11]

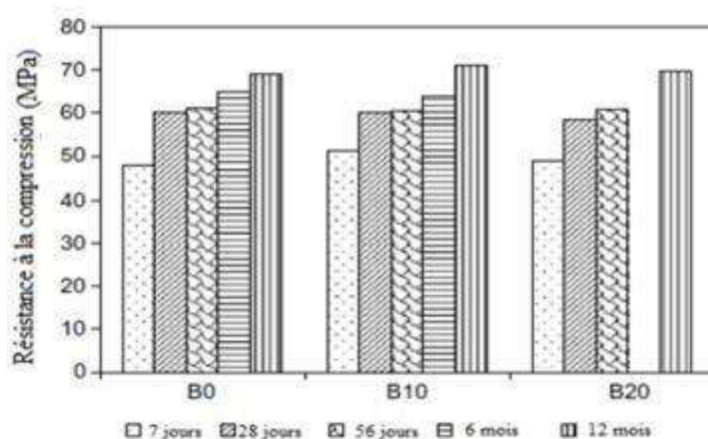


Figure I.14 effet des DB sur la résistance à la compression des mortiers [10]

Khatib J.M.a rapporté que le taux de substitution de 25% des agrégats par la brique produit la même résistance que celle du béton de référence. Le ratio à 28 jours était seulement de 0.84; le gain de résistance entre 28 et 90 jours a été attribué à l'action pouzzolanique fournie par les parties très fines de la brique. [12]

Dans une autre étude, Khatib J.M ont observé qu'il y'a une chute de résistance qui varie de 5% à 10% pour un taux de substitution en déchets de brique de 25%. La chute de résistance est de 30% pour une substitution totale de granulats en déchets de brique. Cette diminution de résistance, a été attribuée à l'existence de Vieux mortier collé sur les granulats de déchets de brique ainsi qu'à la structure poreuse des granulats de brique qui conduit à une grande consommation en eau, provoquant ainsi la chute de la résistance à la compression. [13]

I.14.3. Effet des déchets de brique sur le retrait

Le retrait de dessiccation attire le plus souvent une préoccupation particulière pour le béton fabriqué avec des agrégats recyclés. [13]

[27] trouvent que le mortier contenant 10% de déchets de brique provoque la plus forte contraction, tandis que le mortier contenant 20% de déchets de brique conduit à la plus faible valeur de retrait. Néanmoins l'écart entre les différents résultats est relativement faible. [27] révèle que plus le taux de substitution en déchets de brique augmente et plus le retrait est réduit. Cela a été expliqué par une création d'un gel pouzzolanique qui imbibe de l'eau. Les particules de brique peuvent favoriser le durcissement du béton ou du mortier : il maintient l'eau initialement absorbée du mélange dans les pores de la brique pour des périodes plus longues et par conséquent, l'hydratation continue et le retrait de dessiccation sera retardé en raison de la présence d'humidité interne [13]. Le phénomène de retrait mérite une enquête plus approfondie pour nombre de chercheurs.

I.14.4. Effet des déchets de brique sur la porosité

Gonçalves J.P. et al ont étudié l'effet de l'argile calcinée (déchets de brique et Métakaolin) sur la porosité des mortiers. La brique a été fournie par une entreprise locale au Brésil ainsi que deux types de méta kaolin à différents taux de substitution de ciment qui sont : 0%, 10%, 20%, 30% et 40%. [13]

Il a été montré en premier lieu que les différents taux de substitution du ciment par les déchets de brique ne provoquent aucun changement de densité et de compacité des mortiers. Cela a été expliqué par la similarité des distributions des pores entre les mortiers à base de brique et les mortiers témoins. [13]

La figure I montre que les DB provoquent une augmentation de la porosité totale par rapport aux mortiers témoins. Le DB10 semble donner les meilleurs résultats et la différence par rapport aux mortiers témoins n'est pas importante.

I.14.5. Effet des déchets de brique sur les diffusions des ions de chlore

L'incorporation des déchets de brique a provoqué la réduction de la pénétration des ions de chlore de 1.5 à 6 fois par rapport aux mortiers de référence Gonçalves J. Ceci a été expliqué par le raffinement du système des pores causés par l'incorporation des fines de brique. [13]

I.15. Les déchets de Métakaolin

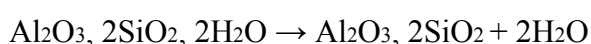
Le méta kaolin est une pouzzolane de synthèse, issue du traitement de la kaolinite, argile assez courante sur la surface du globe.

Le méta kaolin appartient à la famille des ultrafines, particules minérales de dimension inférieure à 10 µm, utilisé dans les bétons pour améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité.

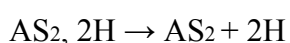
Le méta kaolin (MK) est obtenu par la calcination de la kaolinite à une température entre 500°C et 800°C. Industriellement il existe essentiellement deux modes de calcination, une calcination lente (cinq heures environ dans des unités de production) et une calcination flash (très rapide en comparaison avec la calcination lente). [13]

À une température élevée, la kaolinite perd son eau par des hydroxylations selon l'équation suivante [13] :

Kaolinite → Méta kaolin + eau



(En notation cimentière)



I.15.1. Définition du méta kaolin

Le méta kaolin est considéré comme un matériau pouzzolanique, c'est-à-dire qu'il réagit en présence de la chaux pour former des silicates de calcium hydratés et des silico-aluminates de calcium hydratés [14].

I.15.2. Influence du MK sur la maniabilité du mortier

Les différentes compositions de mortiers à base de MK, testées. La figure montre l'influence du MK sur la demande en super-plastifiant pour un étalement constant et pour différents pourcentages de MK. On remarque que le dosage en super-plastifiant augmente avec l'augmentation de la teneur en MK. Ceci est dû probablement à la plus grande finesse du liant, car le MK utilisé dans cette étude est plus fin que le ciment [14].

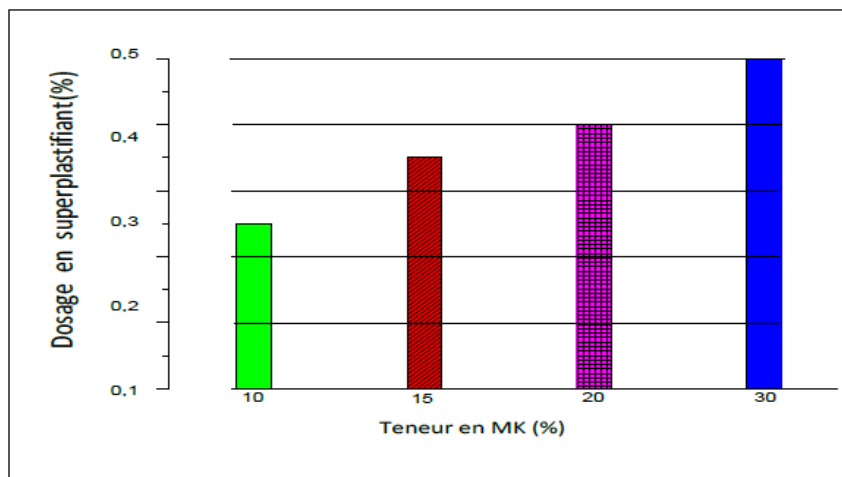


Figure I.15: Influence de la teneur en MK sur la demande en super-plastifiant des mortiers.

I.16. Conclusion

Cette synthèse bibliographique a été menée pour faire le point sur les connaissances relatives aux mortiers auto-plaçant, granulats recyclés de mortier de brique et méta kaolin, ainsi que les résultats des autres chercheurs sur les paramètres étudiés. Pour les mortiers on a présenté sa composition particulière ainsi que ses différents types et emplois.

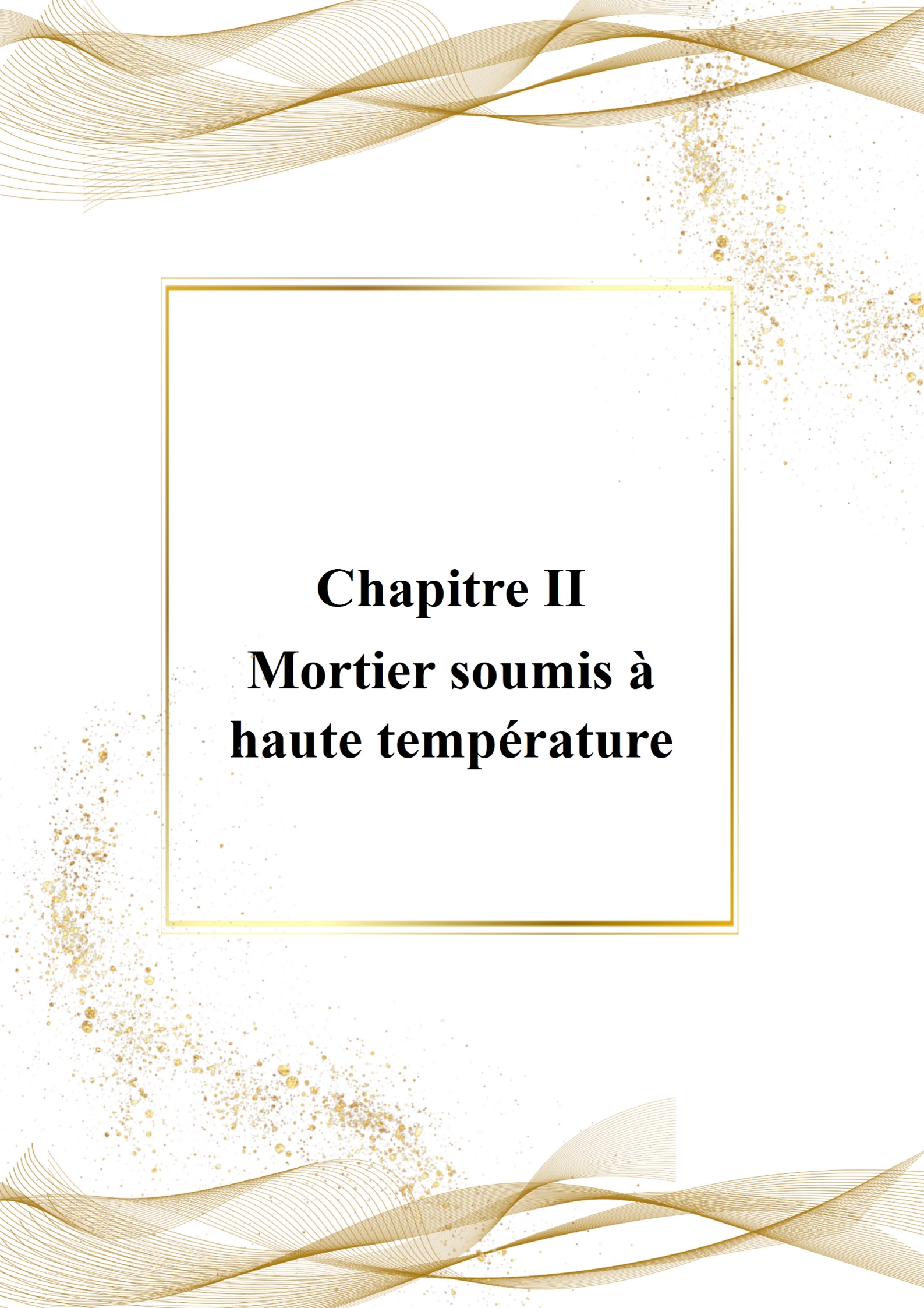
Les MAP, est une nouvelle génération de béton venant du Japon est apparue ces dernières années. Ce sont des bétons très fluides et se mettent en œuvre sous le seul effet de la gravité, donc sans apport de vibration, même dans des coffrages complexes et très encombrés, tout en donnant un produit final homogène.

Grâce à leur formulation, les MAP possèdent généralement de bonnes résistances mécaniques et de durabilité, et dépendent bien sûr de la teneur en eau et de la nature du liant. En revanche, il faut prévoir un module élastique plus fiable que pour des BO de même résistance à la compression. À l'opposé, les déformations différées, retrait et fluage sont susceptibles d'être augmentées.

L'optimisation de la formulation des MAP nécessite un réglage minutieux de plusieurs paramètres. En effet, la nature et le dosage d'additions minérales et la concentration en super-plastifiant et en agent colloïdal sont des paramètres clés pouvant avoir une influence significative sur les performances des MAP.

Les déchets de brique peuvent être recyclés, cela peut être aussi une solution avec démultipliés intérêts, à savoir :

- ✓ Réduire les déchets industriels.
- ✓ La préservation de l'environnement et des ressources naturelles.
- ✓ Réduire l'émission du CO₂



Chapitre II
Mortier soumis à
haute température

Chapitre II : Mortier autoplaçant soumis à haute température

II.1. Introduction

Ce chapitre présente une analyse des recherches bibliographiques sur l'influence de la température sur les propriétés physiques et mécaniques du béton auto plaçant.

Les incendies majeurs surviennent ces vingt dernières années ont démontré la difficulté d'appréhender le feu. L'incendie en tunnel est le phénomène le plus redouté, les constructions de tunnels sont complexes et nécessitent des coûts d'investissement parfois très importants. Ces dernières années, le risque lié à l'incendie dans les tunnels a augmenté, du fait du trafic routier, qui s'est densifié, notamment par rapport au nombre de poids lourds transportant des produits inflammables.



1) Incendie du Tunnel du Mont Blanc, en France 2) Incendie de l'Hôtel Mandarin Oriental.

Figure. II. 1 : Illustrations de dégradations d'ouvrages en béton suite à un incendie[15].

Les sévères sollicitations non seulement mettent en danger la Vie des utilisateurs, mais aboutissent souvent à la perte totale des véhicules impliqués et créent des dommages aux aménagements des tunnels. Cela est principalement dû au rayonnement thermique, à l'augmentation de la température et à la dispersion des fumées [15].

Le dégagement de gaz toxiques présente d'une part un risque de santé pour les usagers, d'autre part, la fumée contient des suies qui peuvent provoquer la baisse de visibilité. Selon la durée de l'incendie, les dégâts apparents sur un élément en béton peuvent se présenter sous forme d'écaillage superficiel, d'une décohésion généralisée du béton (la ruine totale de l'ouvrage), ou bien d'une chute de caractéristiques mécaniques des armatures de surface (perte d'adhérence, éclatement de l'enrobage).



Figure. II. 2 : Section effondrée du faux plafond dans le tunnel du Gothard après l'incendie du 21 octobre, 2001

II.2. Évolution de la microstructure des matériaux à matrice cimentaire en fonction de la Température

II.2.1. Rappels sur la microstructure des matériaux à matrice cimentaire

Les bétons et les mortiers sont des matériaux hétérogènes multiphasiques constitués d'un mélange de granulats et d'une pâte de ciment durcie. La pâte de ciment représente 25 à 40% du volume total du béton. Chaque constituant joue un rôle bien défini, celui de liant hydraulique pour la pâte de ciment, et celui de remplissage atténuateur de variations volumiques (retrait) et source de résistance pour les granulats.

Les granulats occupent 60 à 75% du volume de béton. On distingue trois types de granulats dans les bétons ; le sable : particules de diamètre inférieur à 5 mm, les gravillons 5 et 10mm et enfin, les cailloux dont le diamètre est compris entre 10 et 40 mm. La prise et le durcissement de la pâte de ciment ou béton sont le résultat d'un certain nombre de réactions chimiques dont le principal est l'hydratation des silicates du clinker accompagné d'un fort dégagement de chaleur. Les silicates de calcium tricalciques $3\text{CaO}, \text{SiO}_2$ (C3S), et bi calciques $2\text{CaO}, \text{SiO}_2$ (C2S) sont les constituants les plus importants du ciment portland pour les propriétés mécaniques de la pâte durcie.

L'hydratation de C3S et de C2S forme des produits hydratés composés de gel CSH

(Silicates de calcium hydratés) et de portlandite (hydroxyde de calcium) $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Le CSH est un pseudo cristal de forme spongieux, plus ou moins lamellaire. La liaison entre les particules de CSH (responsable de la résistance mécanique de la pâte de ciment durcie) repose sur des forces superficielles ioniques ou covalentes (force de Van Der Waals, forces électrostatiques ou interactions stériques). Le modèle de, revu ensuite par [15], montre la structuration des particules de CSH (Figure II.3).

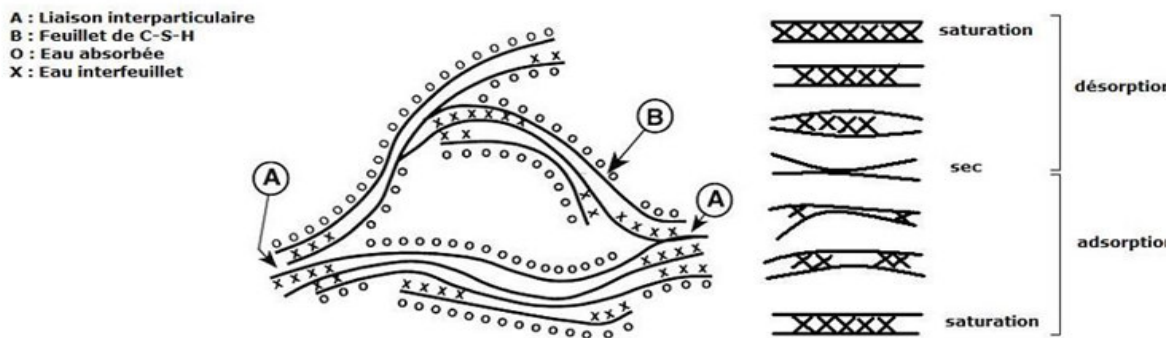


Figure II.3 : Modèle de structuration des particules de CSH Feldman et Sereda, revu par [15].

La pâte de ciment durcie est un matériau poreux. Les pores qui la composent sont de dimensions et d'origines différentes (voir pour illustration Figure II.4) :

- Pores capillaires : ils sont formés durant la structuration de la pâte de ciment. Pour un rapport eau/ciment (E/C) donné, leur volume décroît au cours de l'hydratation. Leur diamètre s'échelonne entre 10 nm et 1 μm . Plus E/C est faible, plus les dimensions et le nombre des pores capillaires sont faibles. Pores des hydrates : ces pores sont généralement des caractéristiques intrinsèques aux hydrates et leur dimension et leur nombre ne dépendent pas du rapport E/C. Concernant le gel CSH, l'espace poreux est constitué des pores interlamellaires (diamètre d'une dizaine d'Angströms) et les pores inter-feuillets qui sont extrêmement fins (diamètre de quelques Angströms).

Le réseau poreux du béton est également constitué :

Chapitre II

Mortier soumis à haute température

Des vides d'air emprisonnés : d'un diamètre de l'ordre du micromètre, leur présence peut être due au malaxage du béton frais ou intentionnellement recherchée par l'ajout d'entraîneur d'air (pour la conception de bétons résistants aux cycles gel/dégel par exemple).

Des fissures : de quelques dizaines de micromètres (microfissures) jusqu'au millimètre (macrofissures), qui peuvent avoir des origines très différentes (plusieurs types de retraits, réactions chimiques internes, dilatations différentielles internes, sollicitations mécaniques, etc.).

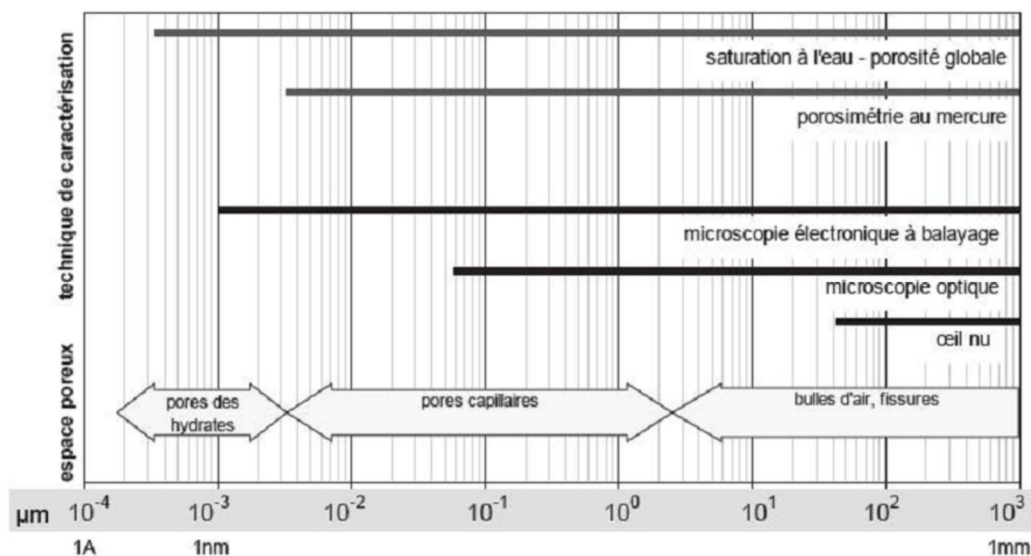


Figure II.4 : Familles des vides dans le béton et domaine d'utilisation des principales techniques de Caractérisation des milieux poreux [16].

Il est intéressant de préciser les différentes catégories d'eau qui se trouve dans la pâte de ciment durcie car elle représente le moteur initial des réactions d'hydratation du ciment mais elle aussi garante de la bonne maniabilité du mortier ou béton frais :

- ◆ L'eau chimiquement liée : cette eau s'est combinée avec d'autres espèces durant l'hydratation des grains de ciment pour former les hydrates.
- ◆ L'eau adsorbée : cette forme d'eau est liée à la surface des pores solides sous l'action de forces intermoléculaires de Van Der Waals et de forces électrostatiques, on parle alors d'adsorption. Les forces d'adsorption décroissent à mesure que l'on s'éloigne du solide.
- ◆ L'eau libre (ou capillaire) : il s'agit de la forme condensée d'eau qui remplit le volume poreux dans les zones qui ne sont pas sous l'influence des forces d'adsorption. Cette forme d'eau peut être en équilibre avec la phase gazeuse par l'intermédiaire de surfaces planes ou de ménisques.

II.2.2. Comportement à hautes températures

L'élévation de température entraîne des phénomènes très complexes dans le béton, dont la prévision s'avère plutôt difficile, notamment à cause de son hétérogénéité et des changements de phases. Ces changements de phases sont dus, en particulier au départ de l'eau chimiquement liée, se traduisant par une augmentation considérable de la porosité du béton (Figure II.5 et Figure II.6) qui entraîne alors de forts changements de la microstructure du béton et donc un changement des propriétés mécaniques, thermiques, hydriques du celui-ci.

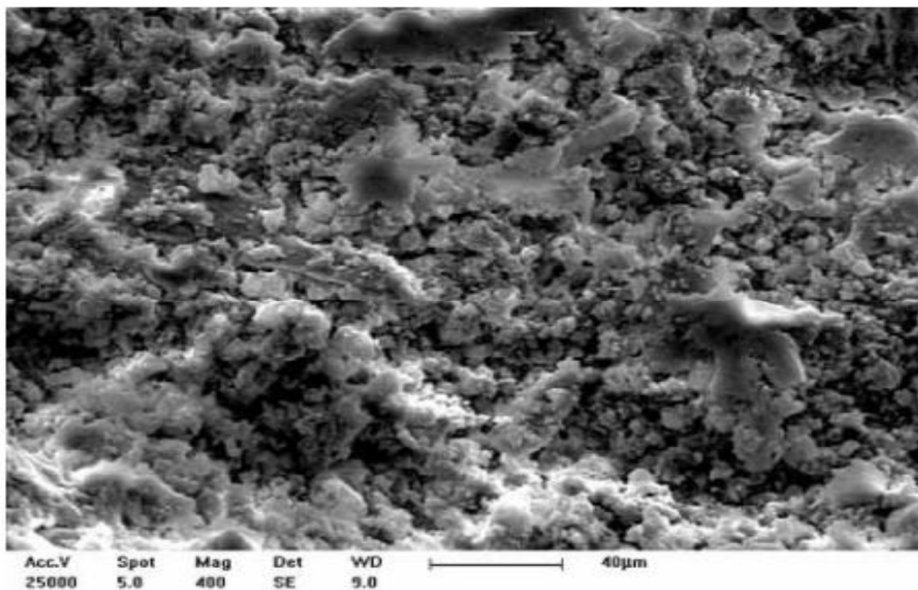


Figure II.5 : Aspect normal d'une pâte de ciment n'ayant pas subi d'échauffement (image obtenue par microscopie électronique avec un grossissement de 400) [16].

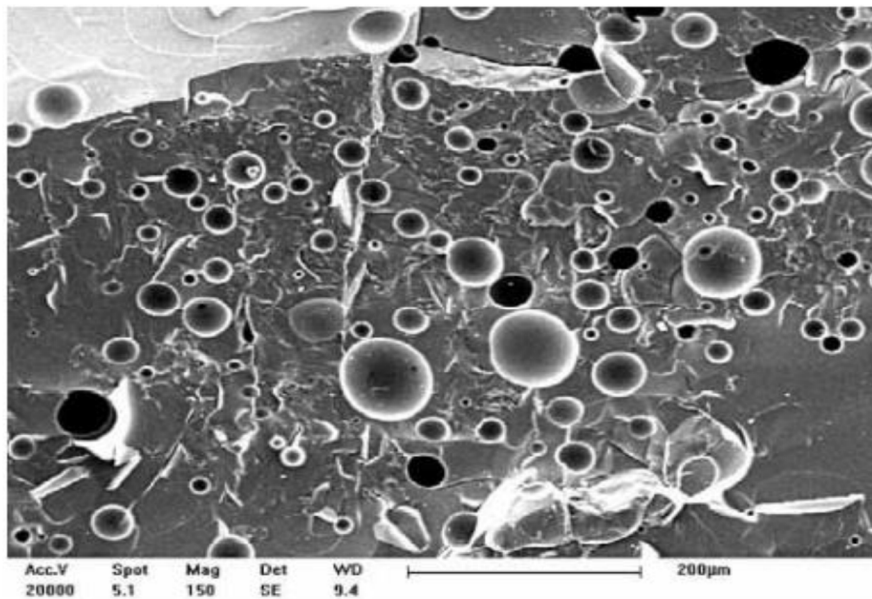


Figure II.6 : Matrice cimentaire vitreuse présentant une macroporosité très importante [16].

Ce phénomène se produit au-delà de 1000°C et provient de la fusion puis du refroidissement de la pâte du ciment (image obtenue par microscopie électronique avec un grossissement de 150).

Les principales réactions physico-chimiques dans le béton au cours de son échauffement sont regroupées dans le Tableau II.1 [17].

Après refroidissement du béton, certaines phases minérales de la pâte de ciment, telles que la chaux vive (CaO) ou l'anhydrite (CaSO_4) peuvent se réhydrater lors d'un apport d'eau et produire éventuellement un gonflement.

Tableau II.1 Principales réactions physico-chimiques dans le béton à haute température [17].

Entre 30°C et 105°C	L'eau libre et une partie de l'eau adsorbée la moins liée s'échappent du béton. Elle est complètement éliminée à 105°C.
Entre 130°C et 170°C	Une double réaction endothermique peut avoir lieu correspondant à la décomposition du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.
Autour de 180°C et jusqu'à environ 300°C	On a la première étape de la déshydratation. La chaleur brise le gel de ciment et arrache des molécules d'eau aux silicates hydratés. L'eau liée chimiquement commence à s'échapper du béton.
A environ 250°C et 370°C	On peut avoir de petits pics endothermiques indiquant des effets de décomposition et d'oxydation d'éléments métalliques (ferriques).
Entre 450°C et 550°C	Il y a décomposition de la portlandite en chaux libre : $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$
Autour de 575°C	Il y a transformation de structures du quartz α en quartz β , accompagnée d'un gonflement pour les granulats quartziques.
Entre 600°C et 700°C	Il y a décomposition des phases de CSH et formation de $\beta\text{-C}_2\text{S}$. C'est la seconde étape de la déshydratation des silicates de calcium hydratés qui produit une nouvelle forme de silicates bi-calciques.
Entre 700°C et 900°C	Il y a décomposition du carbonate de calcium. Le calcaire se décompose autour de 800°C en $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$, réaction fortement endothermique qui libère du gaz carbonique.
A partir de 1100°C-1200°C	Formation de wollastonite β (CaO, SiO_2). Début de la fusion de certains agrégats et de la pâte de ciment. Remplacement au cours de l'échauffement des liaisons hydrauliques par des liaisons céramiques (phénomène de frittage).

II.2.3. Phénomènes d'éclatements

Le comportement au feu des éléments de structure en béton est caractérisé par un risque d'éclatement et d'écaillage. Les premières mentions concernant cette dégradation datent des années soixante. Les observations du comportement des bétons à haute température menées par Harmathy ont montré que les matériaux chauffés pouvaient présenter, dans certains cas, un comportement explosif. [17]

Deux principales raisons de l'éclatement ont été attribuées premièrement aux effets du gradient thermique et la formation de pressions de vapeur d'eau dans le matériau. Il faut noter que ces observations et la théorie développée par Harmathy concernent les bétons ordinaires. Ce n'est qu'en 1984 qu'Hertz, en étudiant les propriétés de bétons à haute performance (120 MPa et 170

MPa) soumis aux températures élevées, a observé une forte sensibilité de ces bétons à l'éclatement. L'éclatement des bétons entre 300°C et 350°C a été observé et attribué aux pressions de vapeur d'eau dans ces bétons denses, de porosité limitée.

II.2.4. Influence de la température sur la pâte de ciment

Les principales modifications physico-chimiques se passent dans la pâte de ciment, en raison de la présence de l'eau sous différentes formes dans la structure. Dans la pâte de ciment chauffée, tous les changements commencent par l'évaporation de l'eau libre et de l'eau adsorbée entre 30°C et 120°C et, au-delà de 105°C, on observe les premiers signes de la décomposition des hydrates selon. Cependant d'autres travaux, notamment ceux de Harmathy, montrent que la déshydratation de la pâte de ciment débute dès l'évacuation de l'eau évaporable. [17]

La pâte de ciment hydratée subit une expansion jusqu'à environ 150°C, puis une contraction due à un fort retrait de dessiccation qui mène à la perte d'eau (Figure II.7)[47]. Ensuite à partir de 180°C et jusqu'au-delà de 800°C, le gel de CSH se décompose essentiellement en silicate de calcium β C2S, β CS et en eau Bazant Z.P et la portlandite donne CaO. [17]

A l'aide de la diffraction X, Piasta et al. ont observé un phénomène d'hydratation additionnelle entre 200°C et 300°C. Cette réaction se traduit par une diminution des phases β C2S et C3S ainsi qu'une faible augmentation de la quantité de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

La porosité de la pâte de ciment à haute température augmente d'une manière parabolique en fonction de la température. Cette augmentation est confirmée par les travaux de Bazant et al. elle est accompagnée d'une évolution de la taille moyenne des pores et du volume poreux total. Ceci est dû en partie à la rupture interne de la structure du gel CSH lors du processus de déshydratation. [18],

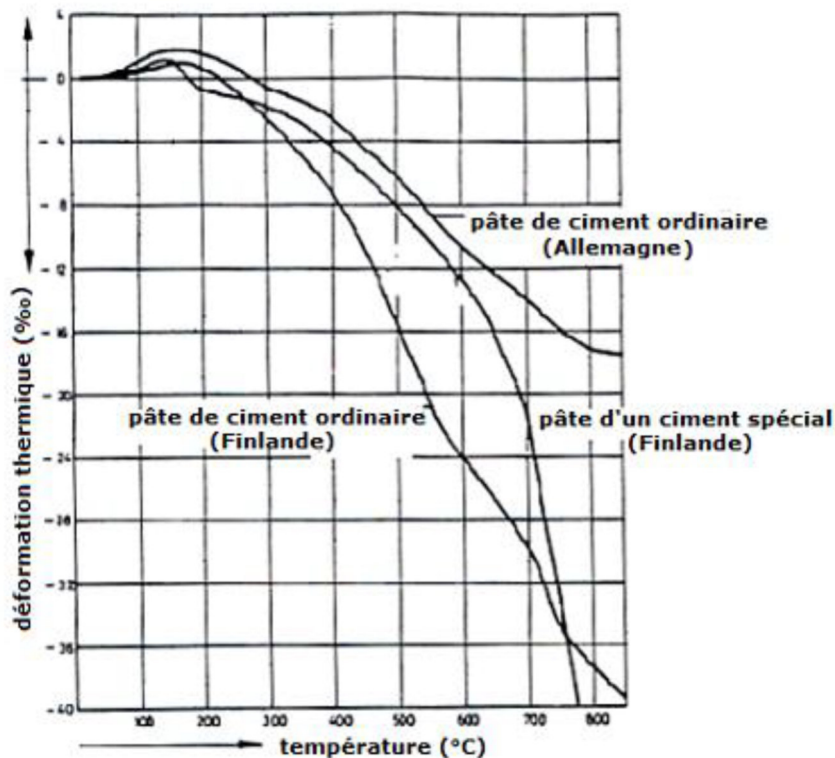


Figure II.7 : Évolution de la déformation thermique des pâtes de ciment avec la température [18].

II.2 .5 Influence de la température sur les granulats

Les granulats constituent, en principe, le squelette inerte du béton aux températures ambiantes (sauf cas pathologique, comme d'une réaction alcali-granulat) mais aux températures élevées, leur comportement est totalement différent. Sous haute température, les granulats se décomposent et subissent des transformations chimiques et minéralogiques importantes qui modifient les caractéristiques micro structurales du matériau. La majorité des granulats est généralement stable jusqu' à 600°C. [18]

Par contre, les granulats non siliceux peuvent subir des transformations chimiques et des réactions de décomposition à des températures inférieures à 600°C. Une analyse thermique différentielle (ATD) permet de déterminer, par des pics endothermiques et exothermiques, les températures auxquelles une instabilité peut survenir dans les granulats. Les analyses thermogravimétriques (ATG) donnent des indicateurs de la progression des réactions de décomposition en mesurant les variations de masse des granulats au cours du chauffage. La (Figure II.9) montre les résultats de perte de masse de deux types de granulats (calcaire et siliceux).

Les résultats d'analyses montrent que les granulats calcaires et siliceux sont relativement stables jusqu'à 500°C. Une autre transformation cristalline est présente entre 500°C et 650°C (Figure II.8). A ces températures, le quartz- α se transforme en quartz- β sans changement de masse,

en revanche cette transformation s'accompagne d'un gonflement significatif de l'ordre de 1 à 1,4% [18].

Pour les granulats calcaires, le comportement thermique est plus stable jusqu'à 700°C. Au-delà de cette température, on assiste à la décarbonatation ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$). En phase de refroidissement, la chaux libre (CaO) formée lors de la réaction de décarbonatation, se combine avec l'humidité atmosphérique sous forme de Ca(OH)_2 avec une augmentation de volume de 44%. Ceci cause la fissuration et l'endommagement de la structure en béton [18].

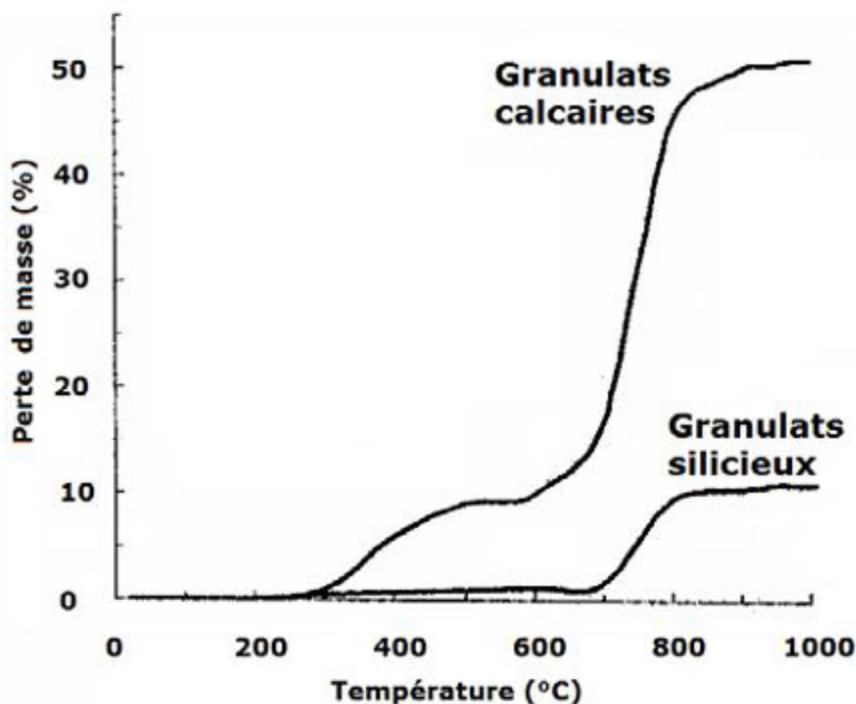


Figure II.8 : Perte de masse de deux types de granulats (calcaire et siliceux) [19].

II.2.6. Influence de la température sur la microstructure du béton

I.2.6.1 Interface pâte - granulats

Dans les bétons ordinaires, l'interface pâte-granulats, appelée aussi l'auréole de transition, est la partie la plus fragile, la plus poreuse et mieux cristallisée que la matrice cimentaire. A haute température, cette partie se dégrade progressivement. Ceci est dû au départ de l'eau (libre, liée, adsorbée) contenue dans les pores et dans les hydrates. Le retrait de dessiccation favorise le développement des fissures et au-delà de 120°C, les phénomènes de déshydratation engendrent une détérioration rapide au niveau de cette zone à cause de la dilatation différentielle entre la pâte de ciment (retrait) et les granulats (expansion). Ces deux évolutions créent à l'interface pâte-

granulats des incompatibilités de déformations induisant des contraintes de traction au sein de la pâte de ciment et de la compression au sein des granulats (Figure II.9).

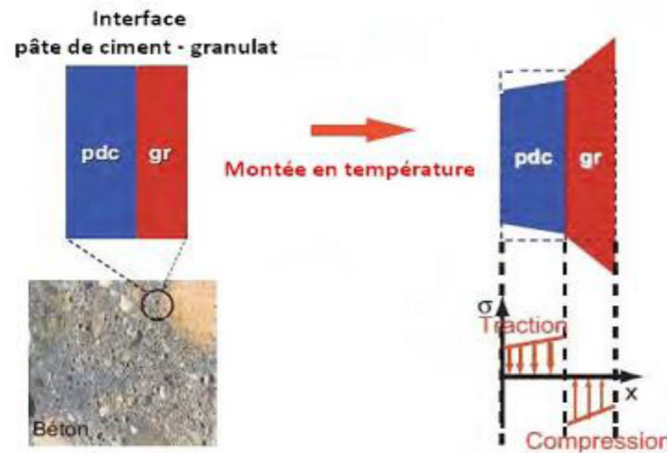


Figure II.9: Mécanismes liés aux incompatibilités pâte-granulat [19].

II.2.6.2. Variation de la porosité

Pour étudier la porosité d'un matériau cimentaire, deux méthodes sont fréquemment utilisées :

A. Porosité au mercure

Cette technique met en évidence la distribution de la porosité en fonction de la taille des pores, elle permet de détecter les pores capillaires, dont la taille varie entre 4 nanomètres et quelques microns (7500 nm). L'étude de la variation de la porosité en fonction de la température a été menée par plusieurs chercheurs. La (Figure II.10) présente les distributions des pores au sein d'un béton ordinaire chauffé jusqu'à 600°C par la technique de prosimètre au mercure. La synthèse des résultats obtenus par différents auteurs indique que dans le cas du béton ordinaire,

La température engendre une augmentation du volume total ainsi que la dimension des pores. Elle peut être due à la rupture des cloisons capillaires sous l'effet de la vaporisation de l'eau durant le chauffage, ainsi qu'à la microfissuration engendrée par les dilatations différentielles de la matrice cimentaire et des granulats. [19]

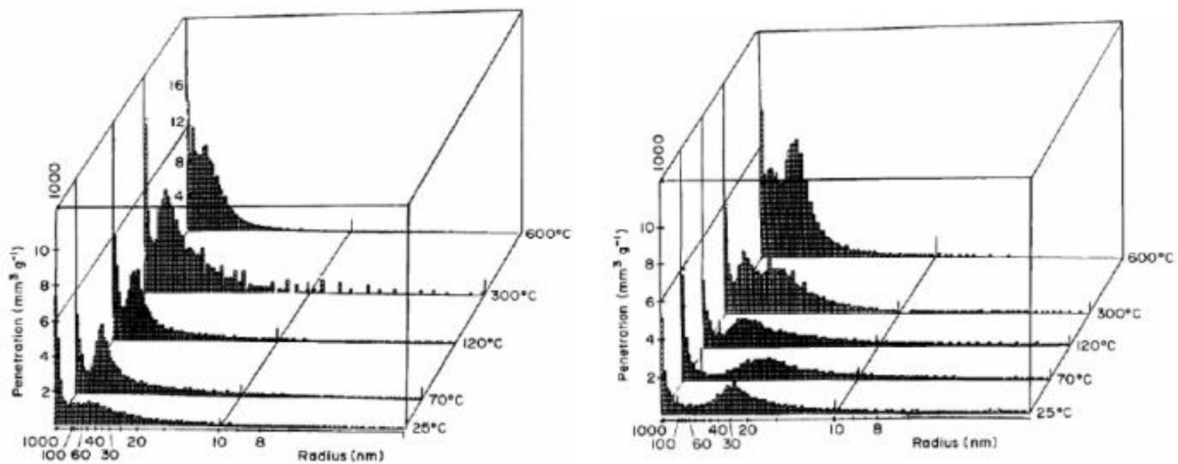
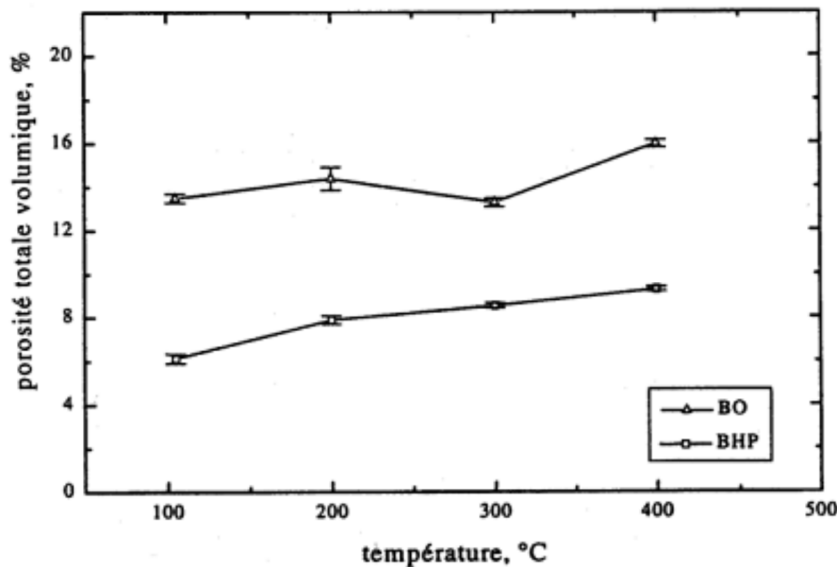


Figure II.10 : Distribution des pores dans les bétons chauffés obtenus par porosimétrie au mercure. A gauche BO – à droite BHP [19].

A. **Porosité à l'eau** : cette technique permet de déterminer le volume de la porosité accessible à l'eau, donc la porosité capillaire. La méthode consiste en la réalisation d'une série des pesés du matériau saturé d'eau, à sec et par pesée hydrostatique. Les résultats des mesures de l'évolution de la porosité totale en fonction de la température réalisée par Kalifa et al. [20] par la méthode de saturation d'eau sur un béton ordinaire et un béton à haute performance sont représentés sur la (Figure II.11)



B. Figure II.11 : Porosité totale à l'eau en fonction de la température de conditionnement [19].

Entre 105°C et 400°C, la porosité de BHP augmente de 3%. Cette croissance est associée au départ d'eau, qu'elle soit présente dans le réseau ou chimiquement explique que la diminution de porosité du BO entre 200°C et 300°C est associée à la densification due à l'hydratation

complémentaire et à une carbonatation de la portlandite en condition d'autoclavage interne, c'est-à-dire sous une pression supérieure à la pression atmosphérique. Par contre, cette densification n'est pas observable dans le BHP qui contient très peu de portlandite grâce à la présence de fumée de silice. La comparaison des valeurs de la porosité totale déterminée par les techniques d'intrusion de mercure et porosité à l'eau, montre que cette dernière technique conduit aux valeurs de porosité les plus élevées.

II.3. Évolution des caractéristiques thermiques du béton avec la température

I.3.1 Évolution de la masse volumique

La Figure II.12 montre l'évolution de la masse volumique pour un béton ordinaire et trois bétons BHP. Sur cette figure, on remarque globalement une baisse légère de la masse volumique entre 100°C et 400°C pour le BO et le BHP. Kalifa et Tsimbrovska [57] expliquent que cette diminution est liée aux phénomènes d'hydratation complémentaire des anhydres et décarbonatation.

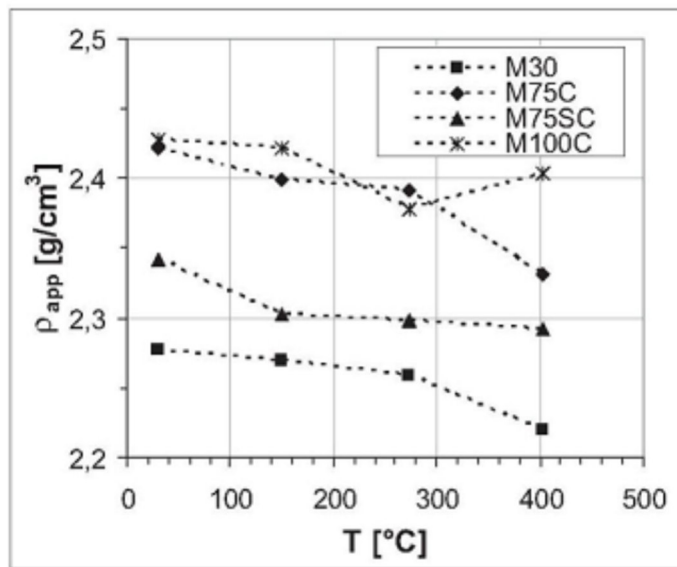


Figure II.12 : Masse volumique de différents bétons en fonction de la température [20].

I.4. Évolution des caractéristiques mécaniques du béton avec la température

En absence de sollicitations thermiques, le béton se caractérise pour la partie mécanique par la résistance à la compression, la résistance à la traction, le module d'élasticité et son énergie de fissuration.

II.4.1. Comparaison entre les essais à chaud et après refroidissement

On peut réaliser des essais à chaud en charge, à chaud non chargé, pendant ou après refroidissement (essais résiduels). Il est nécessaire donc de considérer le régime d'échauffement et de refroidissement, la présence de la charge et son application ainsi que l'état des éprouvettes au moment de la réalisation des essais.

A. Les essais à chaud

Contribuent à obtenir la résistance à une température donnée de l'état du béton. Mais, cet essai nécessite un dispositif expérimental complexe, car il requiert à la fois une presse et un dispositif de chauffage.

B. Les essais durant la phase de refroidissement

Permettent de suivre l'évolution de la propriété étudiée durant la phase de refroidissement. Ainsi l'influence des conditions de refroidissement, la vitesse de refroidissement ou l'effet d'un choc thermique peuvent être analysés.

A. Les essais après refroidissement

Sont aussi appelés «essais résiduels». Ce sont les essais les plus faciles à réaliser. Ils sont effectués après le cycle d'échauffement jusqu'à la température d'essai et refroidissement jusqu'à la température ambiante.

Le fait de refroidir le matériau, peut entraîner l'apparition d'une fissuration supplémentaire et une humidification provoquant la réhydratation du gel CSH mais aussi la réaction de la portlandite avec l'eau présente dans l'environnement endommageant d'avantage la structure du béton. Mais, il existe une variante des essais après refroidissement : il s'agit des essais réalisés après un certain temps après le refroidissement.

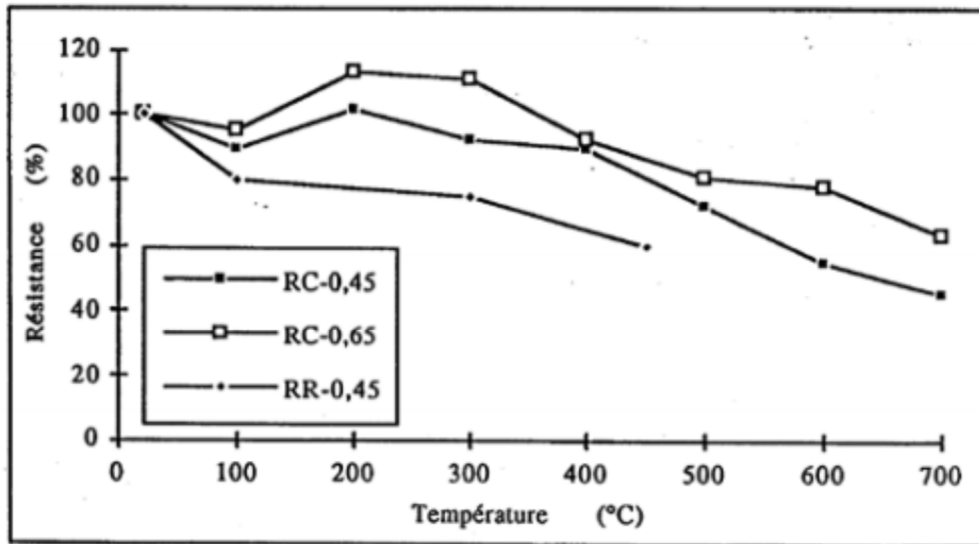
Ces essais sont menés après un temps défini qui suit le cycle de chauffe. Il a été rapporté que le béton est capable de récupérer une partie de sa résistance. Ce phénomène d'autoréparation peut s'expliquer par la réhydratation des grains de ciment non hydratés présents dans les bétons de rapport E/C très faible. [20]

II.4.2. Résistance en compression à hautes températures

L'évolution de la résistance en compression du béton avec la température est affectée par de nombreux paramètres (nature du liant et des granulats, rapport E/C, vitesse du chauffage, ...). Plusieurs recherches ont été menées sur l'influence de la température sur la résistance à la compression. [20]

On peut noter, lors des essais réalisés à chaud, pour des températures variant entre 100°C et 200°C, qu'une augmentation de résistance est observée. Ceci peut être expliqué par la

rigidification de la microstructure de la pâte de ciment due au départ d'eau adsorbée. Signalons que lorsque le rapport E/C est faible, la résistance à chaud reste aussi faible et diminue avec la température [51] (Figure II.13).



RC-0,45 ==> Résistance à chaud d'un béton avec E/C= 0,45
 RC-0,65 ==> Résistance à chaud d'un béton avec E/C= 0,65
 RR-0,45 ==> Résistance résiduelle du béton avec E/C= 0,45

Figure II.13 : Rapport des résistances à chaud et des résistances résiduelles sur la résistance initiale (froid) en fonction de la température [21].

Au-delà de 350°C, le béton est complètement sec, la résistance en compression diminue progressivement en fonction de la température. Cela est expliqué par la décomposition des hydrates de ciment comme la portlandite, les CSH et enfin la transformation allotropique du quartz qui fragilise les granulats, mais également, l'apparition des fissures permet d'expliquer cette diminution. [20]

D'autres recherches ont montré les mêmes variations de la résistance résiduelle à la compression en fonction de la température (Figure II.14).

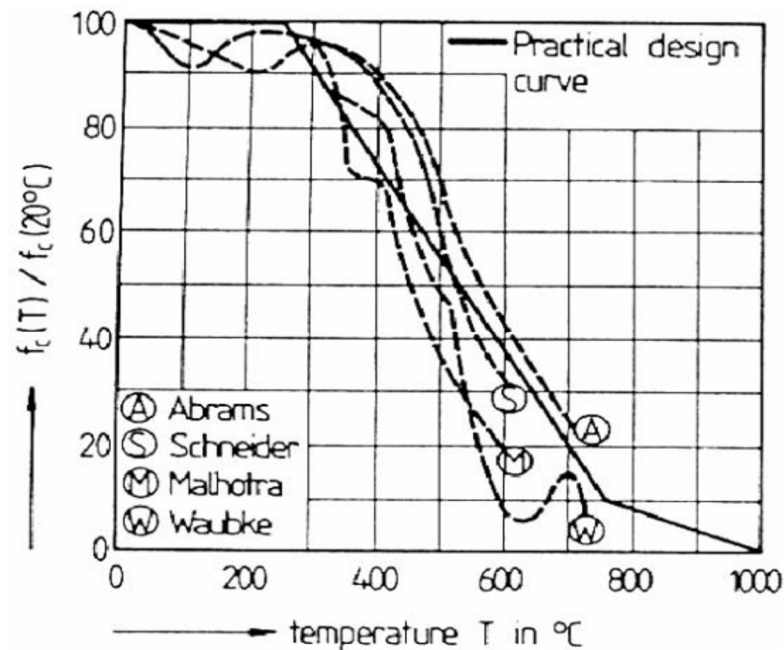


Figure II.14 : Rapport de la résistance en compression sur la résistance initiale en fonction de la température [20].

II.4.3. Résistance en traction à hautes températures

Dans la littérature, peu de recherches traitent de l'évolution de la résistance en traction en fonction de la température. Pourtant cette donnée est primordiale, la résistance en traction conditionne en partie la stabilité thermique des bétons (éclatements) [21].

La réalisation de l'essai de traction directe ou de flexion s'avère toujours difficile, compte tenu de la localisation de l'endommagement et du développement d'une microfissure généralement instable, qui mène par la suite à la rupture brutale du matériau. Selon Bamonte et al. [21]

la meilleure méthode de mesurer la résistance en traction est d'utiliser la traction directe avec encastremets des bords, pour éviter la rotation libre de l'éprouvette pour ne pas sous-estimer la résistance. L'essai par fendage (essai brésilien) présente une bonne alternative aux essais de traction. Par contre, la résistance à la traction par flexion est trop affectée par l'augmentation de la ductilité d'éprouvettes prismatiques d'épaisseur faible.

II.5. Déformation thermo hydrique libre du béton

La déformation thermique libre du béton dépend de sa composition, de la nature des granulats et de différentes transformations physico-chimique, qui ont lieu durant le chauffage. Lors du chauffage, la pâte de ciment subit deux phases : la phase d'expansion et ensuite la phase de retrait. Les travaux de menu montrent une dilatation de la pâte de ciment entre 20°C et 150°C. Cette phase de dilatation initiale de la pâte de ciment est attribuée aux mouvements cinétique moléculaires qui s'ajoutent à la pression développée par une diminution de la tension superficielle de l'eau lors de la sollicitation thermique. De là de cette plage de température, la pâte de ciment présente un retrait très important lié au départ de l'eau contenue dans le matériau. [21]

Les granulats ont un comportement différent. La nature minéralogique influence significativement l'expansion thermique des granulats. La comparaison des déformations thermique de bétons formulés avec différents granulats, menée par Pista [64], montre que le coefficient de dilatation thermique du béton dépend de celui des granulats. La déformation du béton est caractérisée par une expansion volumique non linéaire dépendante de la température. À près 150°C, la pâte de ciment se rétracte.

L'évolution opposée des granulats et de la pâte de ciment provoque à l'interface pâte-granulats des incompatibilités de déformation qui génèrent des contraintes de traction au sein de la pâte de ciment et des contraintes de compression au niveau des tractions au niveau des granulats. La (Figure. II. 15) présente l'évolution de dilatation thermique apparente de la pâte de ciment et des granulats en fonction de la température. [22]

Les travaux de Kodur sur le béton ordinaire montrent une augmentation de la déformation thermique de 1,3 % à 700°C. L'auteur explique cette augmentation par l'expansion thermique des granulats et le retrait de la pâte de ciment au sein du béton.

Il est intéressant de noter que la déformation thermique libre du béton reste constante de 700°C à 1000°C. [22]

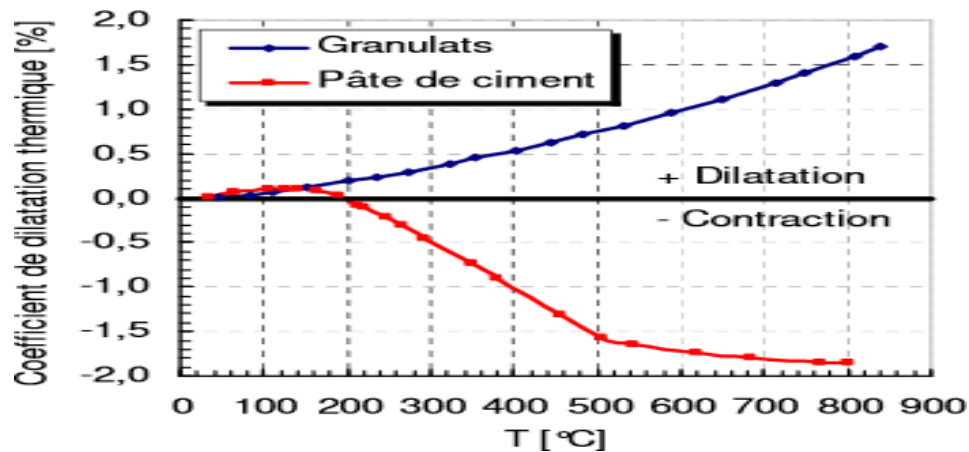


Figure .II. 15 : Evolution du coefficient de dilatation thermique apparent de la pâte De ciment et des granulats en fonction de la température [22]

II.6. Evolution des propriétés physiques

Les phénomènes entraînés par la variation de température ont des conséquences sur les propriétés de transfert du béton. La perméabilité et la porosité évoluent sous l'effet de la température. Multiple travaux ont démontré l'augmentation de ces deux paramètres après l'exposition du béton à hautes températures [22], (Kalifa, Chéné, and Gallé 2001, Menou Hager 2004, Zeiml et al., Choinska, Mindeguia). Les interactions entre les propriétés physiques et mécaniques sont évidentes, par exemple, la croissance de la porosité et de la perméabilité induit, dans la majorité des cas, une diminution de résistance mécanique du matériau.. [22]

II.6.1. Perte de masse

Lors du chauffage, le béton perd de la masse essentiellement à cause du départ de l'eau libre et liée contenue dans les pores et les hydrates et à la décarbonatation. (Figure II.16) présente l'évolution de la perte de masse de différentes compositions de béton avec et sans fibres de polypropylène au cours du chauffage [22]. Il est important de noter quelles limites de température varient suivant les auteurs.

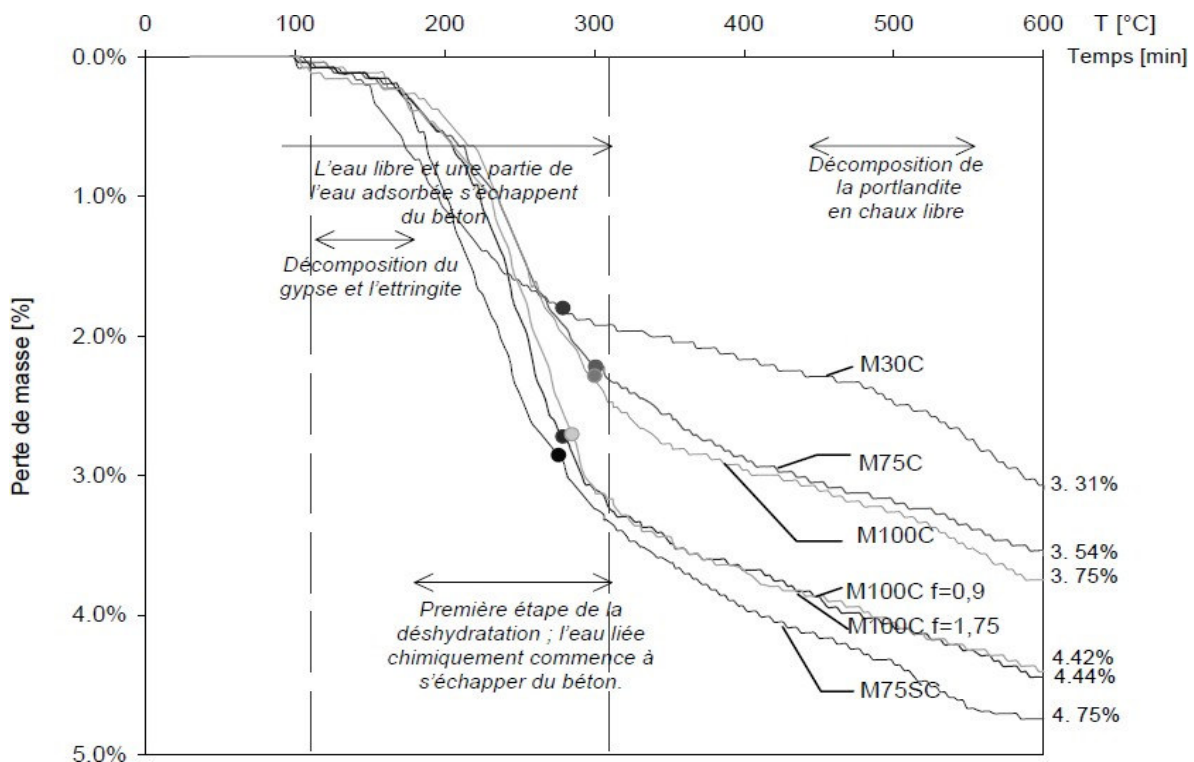


Figure. II. 16 : Pertes de masse des bétons déterminées durant le chauffage de 20°C à 600°C à la vitesse de 1°C/min. Les points indiquent la valeur de la teneur en eau obtenu par séchage à 105°C [22]

II.6.2. Porosité

Différentes études ont été réalisées sur la variation de la porosité de béton en fonction de la température. Les travaux sur les bétons ordinaires, les bétons à hautes performances, les bétons auto-plaçant ont montré une augmentation progressive de la porosité de ces bétons en cours de l'élévation de la température, (Figure. II.17) regroupe les études réalisées par Tsimbrovska et Faressur l'évolution de la porosité à l'eau en fonction de la température. Les travaux de Tsimbrovska [22] portent sur un BO (36 MPa) et un BHP (110 MPa) soumis à un chauffage à 0,2 °C/min. A la température de 200°C, l'auteur observe une augmentation de 0,9 % et 1,8 % de porosité pour le BO et le BHP respectivement. Fares a testé les bétons auto plaçant (BAP) (54 MPa), les bétons vibrés (41 MPa) à un chauffage à 1°C/min jusqu'à 600°C. L'auteur a constaté que la porosité augmente, quel que soit le béton (BO, BHP ou BAP). La décomposition des hydrates induit une faible évolution de la perméabilité qui augmente surtout au-delà de 400°C lorsque l'interface pâte-granulat fissure sous l'action des déformations thermiques différentielles. [22]

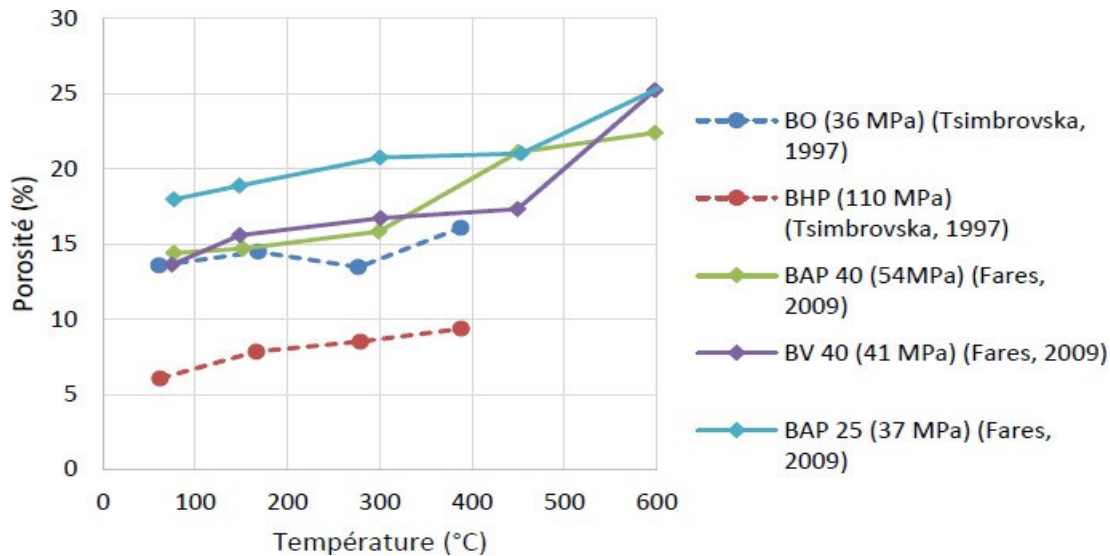


Figure.II.17 : Evolution de la porosité de différents bétons en fonction de la température, [23]

II.7. Evolution des propriétés mécaniques du béton :

La sollicitation thermique sur le béton provoque une diminution graduelle des propriétés mécaniques, qu'elles soient mesurées à chaud ou à froid. Les pertes de résistance varient en fonction de la température, de la vitesse de montée en température et du type de béton.

Les principales caractéristiques mécaniques présentées sont la résistance à la compression, la résistance à la traction et le module d'élasticité. [23]

II.7.1. Résistance à la compression

Pour caractériser un béton, il est nécessaire de connaître sa résistance à la compression. Généralement, une baisse de la résistance à la compression est observée au cours du chauffage. De nombreux essais montrent une diminution de la résistance à la compression du béton entre 20 et 80°C. [23] suppose que cette baisse de résistance résulte de la réduction des forces de cohésion Vander Walls entre les feuillets de CSH qui conduirait à la formation de groupes si la nos (Si-OH--HO-Si). Ces groupes présentent des forces de liaison plus faibles que les groupements siloxane (Si-O-Si). Ensuite, à partir de 80°C, le processus de séchage induit la réaction suivante : $\text{Si-OH--HO-Si} \rightarrow \text{Si-O-Si} + \text{H}_2\text{O}$ et provoque un accroissement des forces de surface entre les particules de gel de CSH quais sur ente la résistance de la pâte de ciment. En dépassant le seuil de 300°C, le béton ne contient plus d'eau et la résistance bais se progressivement sous l'effet de la température. [23]

Plusieurs études regroupent en deux zones le comportement résiduel du béton à la compression

- ❖ De la température ambiante à 250°C (400°C) : une légère baisse, un maintien ou une augmentation de résistance est observée Bilodeau, Kodur, and Hoff 2004, Kanema2007, Phan 2008. [23]
- ❖ De 250°C (400°C) à 600°C : une chute de la résistance à la compression est notée [65],[69]. La variation des propriétés mécaniques des bétons évolue différemment selon que l’essai soit réalisé à chaud ou à froid (essai résiduel). (Figure. II.18) présente une évolution de la résistance à la compression relative du même béton à chaud et à froid. Nous constatons que la résistance à chaud est supérieure à la résistance résiduelle pour toutes les températures après 150°C. Ceci peut être expliqué par un endommagement supplémentaire du béton au cours du refroidissement (réhydratation de la chaux, décomposition des granulats, changement du signe de gradient thermique).[23]

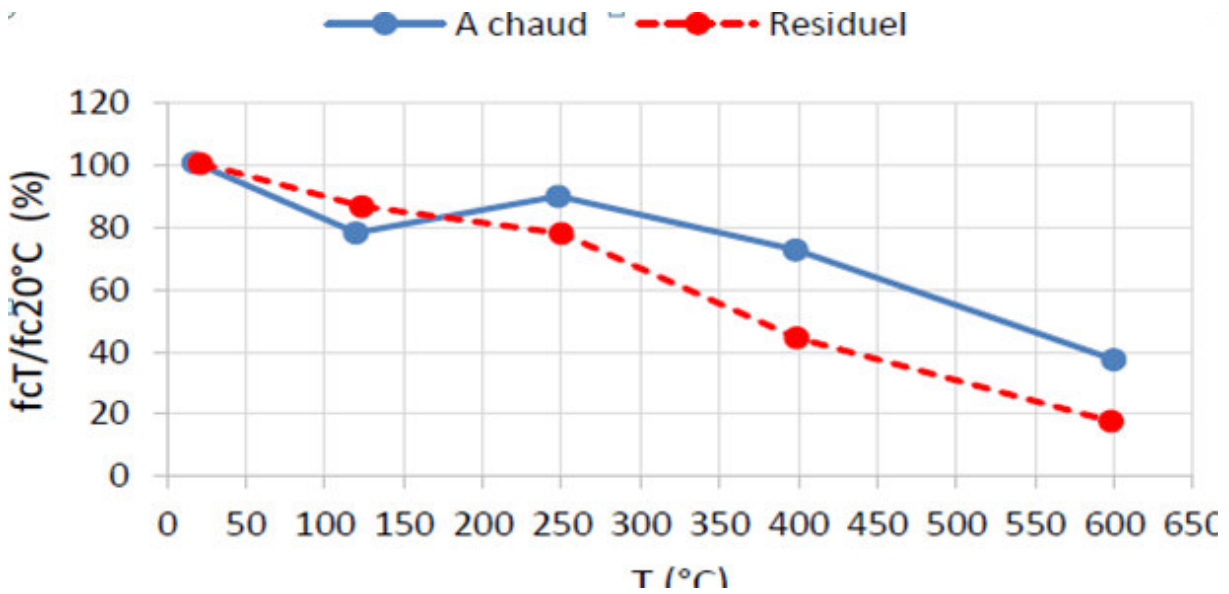


Figure. II. 18 : Evolution de la résistance à la compression d'un béton en fonction du type d'essai (à chaud ou à froid),[23]

Les courbes d’évolution de résistance à la compression en fonction de la température, proposées par l’Euro code2(EUROCODE22004), sont présentées sur la Figure. II.19. Les courbes de l’Euro code 2 se basent sur deux types de granulats : calcaires et siliceux et concernent les bétons ordinaires (BO) et les bétons à hautes performances (BHP). Les BO (calcaires) se comportent mieux au feu que les BHP(C80/95).

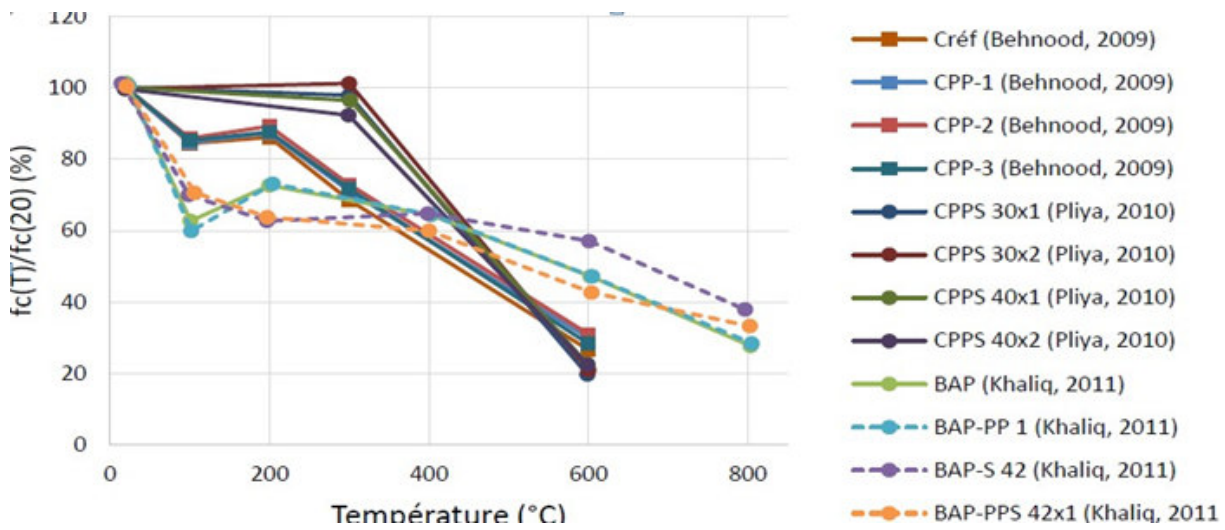


Figure. II. 19 : Courbes de la variation de la résistance à la compression selon les textes de l'Eurocode 2, EUROCODE22004. [24]

Behnood and Ghandehari 2009 a testé les bétons de fibres de polypropylène avec des dosages de 1 kg/m^3 ; 2 kg/m^3 ; 3 kg/m^3 (Figure. II.20). Les résultats ont montré une légère amélioration de la résistance à la compression des bétons fibrés par rapport aux bétons de référence. Le dosage de 2 kg/m^3 présente les meilleures performances mécaniques de 200 à 600°C . L'auteur préconise le dosage de 2 kg/m^3 comme un optimum parmi les trois dosages testés. Les résultats de Khaliqand Kodur 2011 et de Behnoodand Ghandehari 2009] sur les bétons de fibres de polypropylène (1 kg/m^3) n'ont pas montré d'amélioration significative de la résistance à la compression avec l'évolution de température.

Il est possible que l'incorporation de fibres de polypropylène génère des porosités supplémentaires lors du traitement thermique du béton et réduit la résistance à la compression.

De plus, les fibres métalliques (42 kg/m^3) et le cocktail de fibres ($42 \times 1 \text{ kg/m}^3$) n'ont pas donné d'effet favorable vis-à-vis de la résistance à la compression [Khaliqand Kodur 2011. [24]

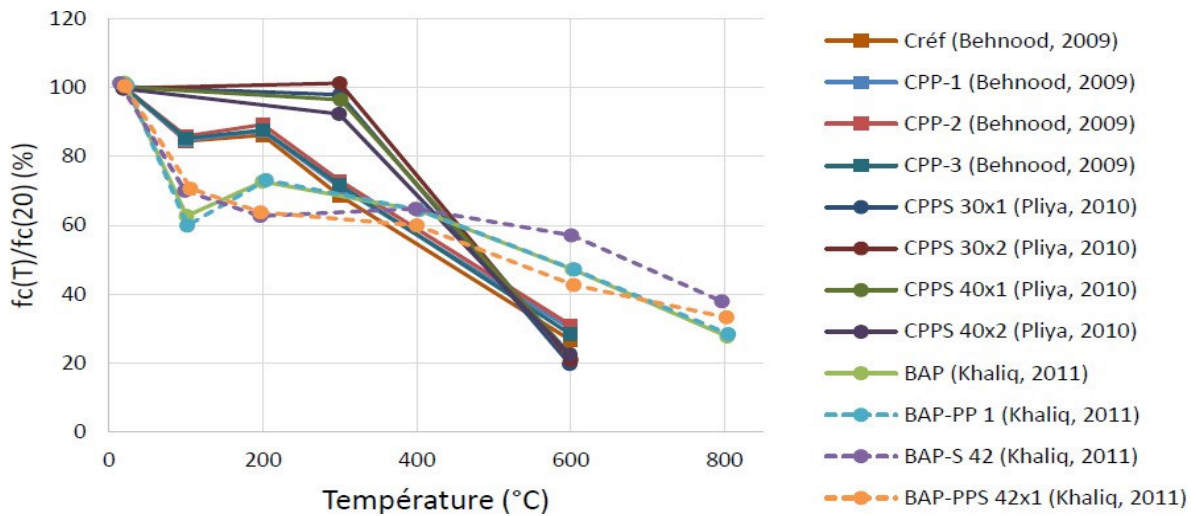


Figure. II. 20 : Evolution de la résistance résiduelle relative à la compression de bétons de fibres métalliques, de polypropylène et de cocktail de fibres métalliques et polypropylène [25]

Les différents teneurs en fibres de polypropylène et métalliques ne changent pas la cinétique de la perte de résistance à la compression (Fig. II.21). Il est important de souligner, qu'il ne suffit pas d'additionner le comportement des bétons de fibres de polypropylène et celui des bétons de fibres métalliques aux mêmes dosages afin d'obtenir le comportement à hautes températures des bétons de cocktail de fibres. [25]

II.7.2. Résistance à la traction

Lors des incendies, des microfissurations apparaissent sur les parties sous tension de la structure. Une résistance élevée à la traction permet de limiter les dommages structurels de l'élément en limitant la propagation des fissurations notamment lorsque le processus d'écaillage est entamé.

Comme dans le cas de la résistance à la compression, les résultats de la littérature affirment que la résistance à la traction résiduelle des bétons diminue sous le traitement thermique. Kanema (Kanema 2007) a étudié l'évolution de la résistance à la traction résiduelle sur des bétons de différents dosages en ciment (B325 ($f_c = 39$ MPa), [61]. B350 ($f_c = 45$ MPa), B400 ($f_c = 53$ MPa), B450 ($f_c = 60$ MPa) et B500 ($f_c = 72$ MPa) (Figure II.21). Les bétons à faible rapport E/C (B450 et B500) présentent une réduction plus importante de leur résistance à la traction comparativement au béton à fort rapport E/C (B325).

La diminution de la résistance résulte d'une déstructuration de la matrice cimentaire et plus particulièrement de la déshydratation de l'aurole de transition avec l'augmentation de la température. L'auteur conclut que la baisse de la résistance à la traction résiduelle des bétons dépend du rapport E/C initial et de la sollicitation thermique imposée. [25]

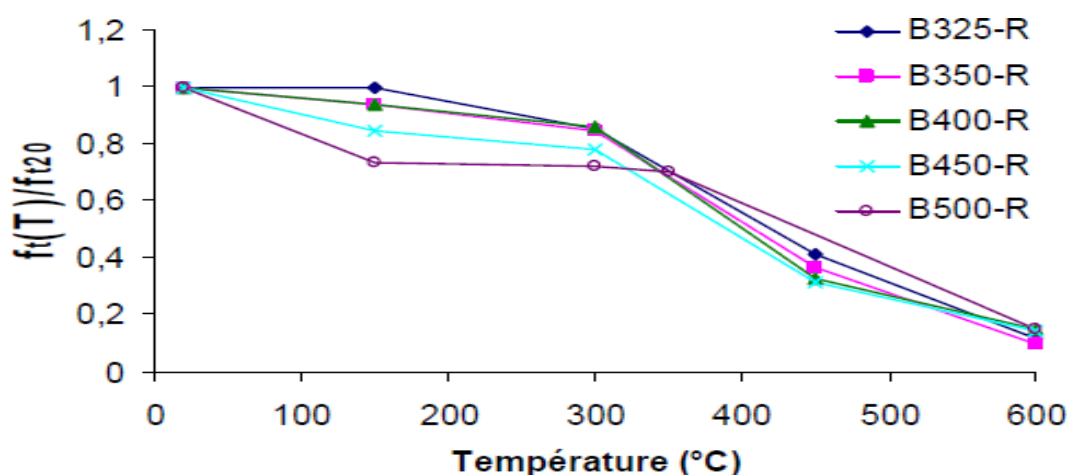


Figure. II. 21 : Evolution de la résistance résiduelle relative à la traction des bétons chauffés, (vitesse de chauffage est de 1°C/min). [26]

II.7.3. Module d'élasticité

Le module d'élasticité d'un béton dépend de la proportion de granulats et de la matrice cimentaire ainsi que du module d'élasticité de chaque constituant.

Noumowé a présenté l'évolution des modules d'élasticité résiduels par rapport au module initial de BO et BHP. Une baisse de module est remarquée pour les deux bétons (BO et BHP). A 500°C, le BO garde seulement 48% de son module initial, tandis que le BHP est à 54%. Il est intéressant de noter que pour la température de 150°C, la valeur relative du BO (90%) est supérieure à celle du BHP (83%). [26]

Les résultats de modules d'élasticité mesurés à chaud sont peu nombreux. Hager a réalisé des essais à chaud avec des bétons de différents rapports E/C (0,3 ; 0,4 ; 0,5) (Figure. II.21)(a)). Une diminution progressive et monotone de module d'élasticité est observée, ainsi l'auteur a constaté que le départ d'eau n'influence pas le module, contrairement aux résultats de la résistance à la compression. A 120°C la perte de résistance est de 20%, tandis qu'à 600°C la baisse est déjà d'environ 80%. [26]

En comparant l'évolution de module d'élasticité à chaud et à froid (Figure. II.21 (b)), nous constatons que le module décroît dans les deux cas et présente une plus forte diminution dans le

cas de module résiduel.

D'après Hager [26], cette différence peut être expliquée par différents processus au cours de refroidissement : le gradient thermique inversé, l'absence de la déformation thermique transitoire (relaxation des contraintes entre la pâte et les granulats) et l'augmentation de volume consécutive à la réhydratation de la chaux.

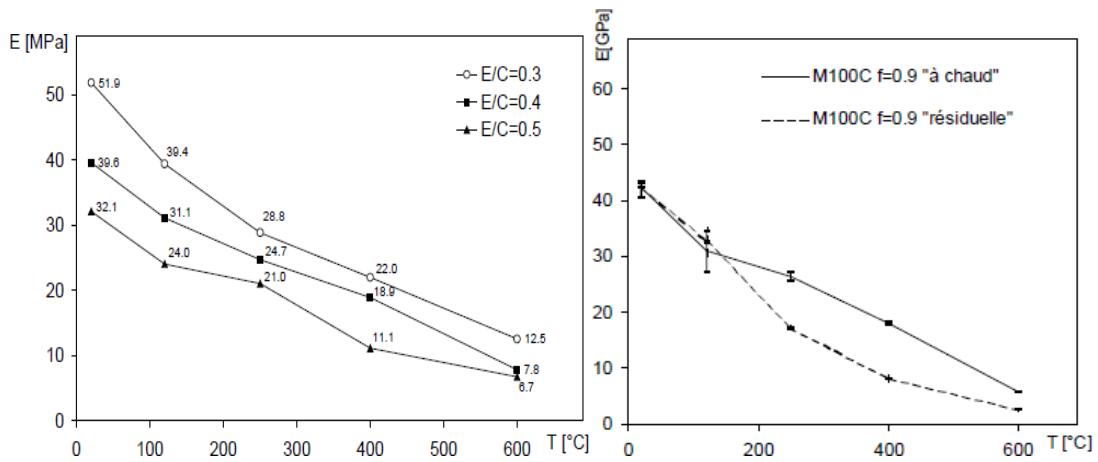


Fig. II. 22: Evolution de modules d'élasticité apparents déterminé "à chaud" en fonction de différentes températures (a), évolution du module d'élasticité apparent obtenu "à chaud" et "résiduelles" sur le béton de fibres de polypropylène (0.9 kg/m3)(b)[26]

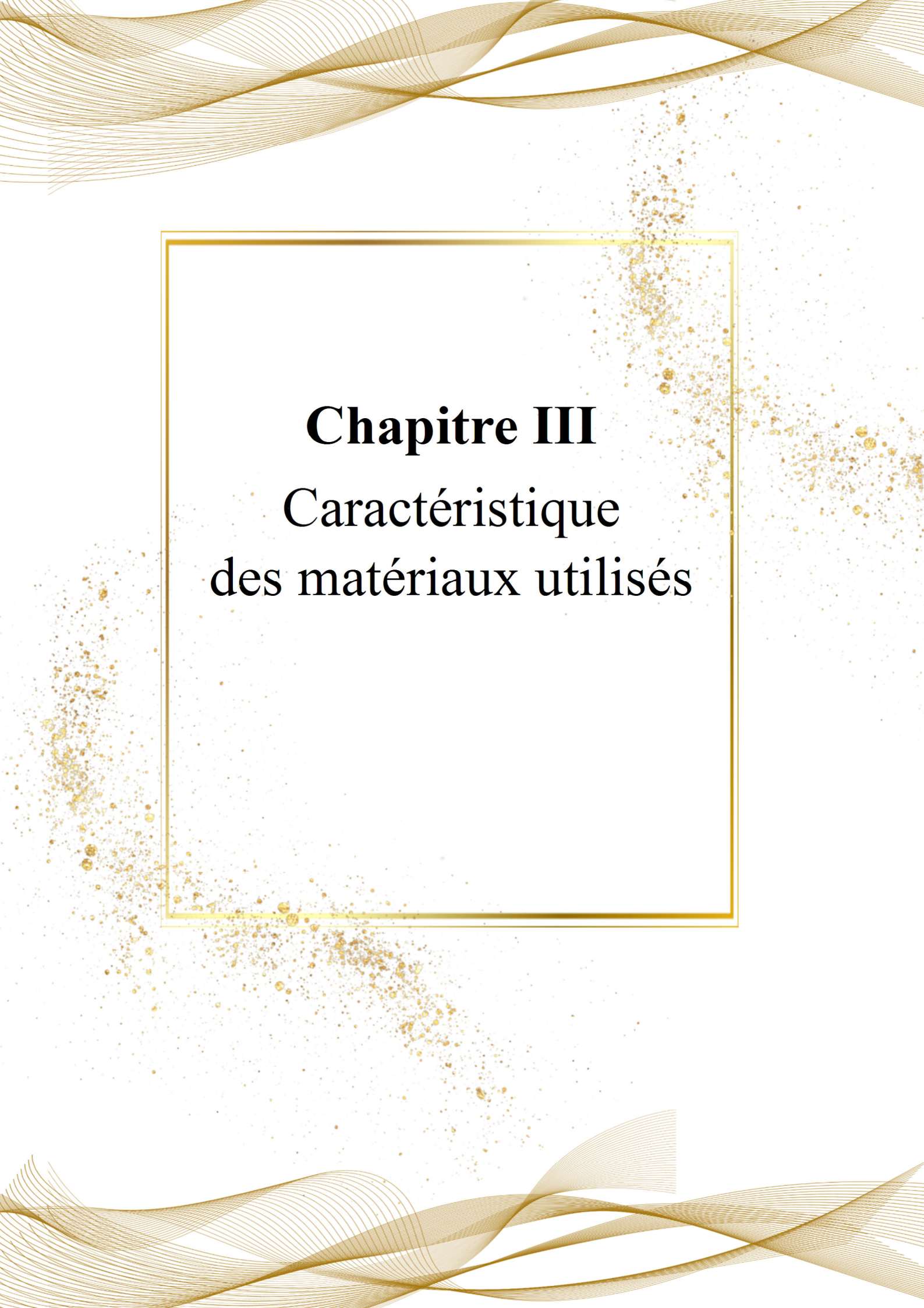
Conclusion

Lorsque le béton est soumis à une température élevée, il subit diverses transformations physico-chimiques conduisant à la modification de la microstructure et de ses propriétés mécaniques.

L'eau, présente dans le béton sous forme libre, liée ou adsorbée, s'échappe progressivement et représente la principale cause de perte de masse du béton. L'évolution de la perte de masse est regroupée en trois domaines : de 20 – 150°C, on observe une faible perte de l'ordre de 3% ; entre 150 - 300°C une perte rapide puis au de la de 300°C, un ralentissement de perte de masse.

Les diverses transformations physico-chimiques que subit le béton chauffé sont : la déshydratation des C-S-H (une première entre 150 – 300°C et une seconde au-delà de la température 600°C), la des hydroxylations de la portlandien (vers 570°C) qui conduit à la formation de la chaux qui, durant la phase de refroidissement, réagit avec l'eau contenue dans l'air occasionnant ainsi un volume important de portlandien. Au-delà de 600°C, on note une décarbonatation des calcaires.

La mesure des déformations thermiques montre l'incompatibilité de déformation entre la pâte de ciment et les granulats. La déformation thermique du béton est fortement liée à la nature des granulats qui constituent son squelette. Ces différentes transformations ainsi que l'incompatibilité de déformations génèrent une augmentation du volume poreux et une perméabilité supplémentaire du matériau. La modification de la structure du matériau entraîne donc une baisse de ses propriétés de transfert telle que la conductivité thermique et la chaleur spécifique.



Chapitre III
Caractéristique
des matériaux utilisés

Chapitre III Caractéristique des matériaux utilisés

III.1. Introduction

Nous présentons dans ce chapitre, les caractéristiques des matériaux utilisés pour la confection du mortier auto-plaçant et la méthode de formulation expérimentale à base d'ajouts de déchets de briques et de céramiques, nous permet de suivre l'évolution des différentes propriétés des mélanges et sélectionner les mélanges qui donnent des performances comparables à celles développées par le mélange témoin. Les matériaux utilisés sont :

- Le sable de la région de Boussaâda (OUED MAITAR).
- Le ciment CEM II/A-L 42.5 N de GICA
- L'eau potable du Laboratoire de département de génie civil de l'Université Mohamed Boudiaf de M'sila.
- Les adjuvants : MEDAFLOW 30 de Granitex. (Super-plastifiant).
- Poudre de brique (0/0.08).
- Métakaolin (0/0.08).

III.2. Sable

III.2.1. Origine du sable :

Le sable de base de notre recherche provient des abords de l'OUED MAITER. Cet oued est situé entre les collines de BOUSAADA, dont le vent provient du sud est chargé de grains fins.

III.2.2. Caractéristiques physiques du sable utilisé

Le sable a été soumis à plusieurs essais au laboratoire de Génie civil de l'université de M'sila, suivant les normes françaises AFNOR

III.2.3. Masse spécifique (absolue) : NF P 18-555

C'est la masse de l'unité de volume de la substance, c'est-à-dire le rapport entre sa masse et son volume absolu.

a. But de l'essai

Cet essai a pour but de permettre de connaître la masse d'une fraction granulaire lorsque par exemple on élabore une composition de bétons. Ce paramètre permet, en particulier, de déterminer la masse ou le volume des différentes classes granulaires malaxées pour l'obtention d'un béton dont les caractéristiques sont imposées.

B. Mode opératoire

On détermine la masse volumique absolue du sable à l'aide du récipient de capacité **1000 ml**.

On prend **03** échantillons de masse **300g**.

On place l'échantillon dans le récipient de capacité **1000 ml** et on y verse **300 ml** d'eau préparé préalablement dans **2^{ème}** récipient gradué, puis on malaxe soigneusement le contenu pour chasser l'air qui y existe. Après cette opération, on détermine le volume final occupé par le mélange sable-eau. Soit (V_2) ce volume Sachant que le volume (V) d'eau versé est 300 ml, il serait facile de déterminer le volume occupé par le sable seul.

La masse volumique absolue du sable est déterminée par la formule :

$$\rho_{\text{abs}} = \frac{M}{V_2 - V}$$

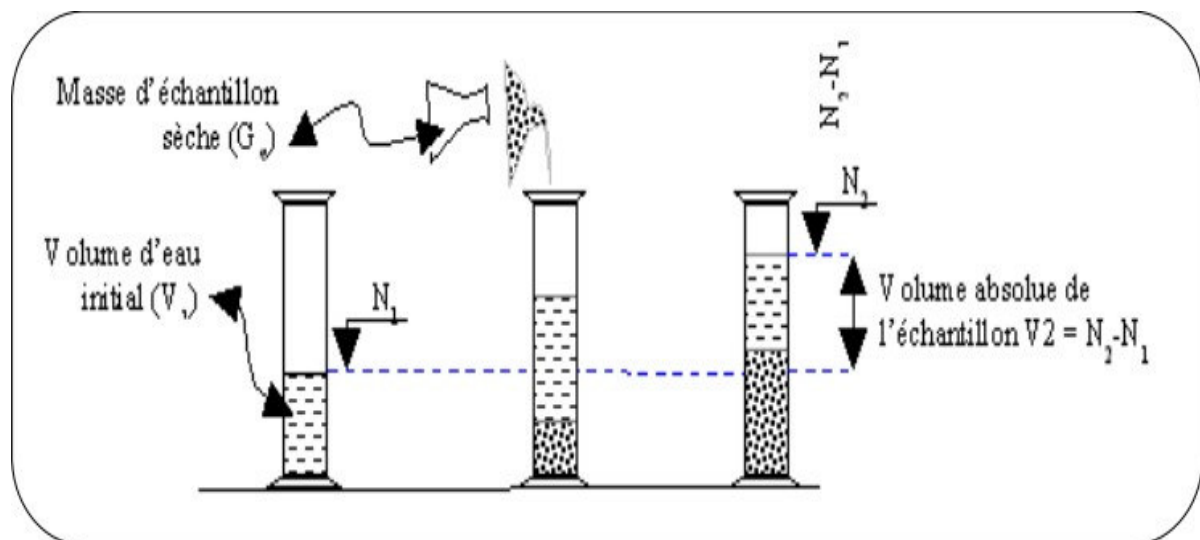


Figure.III.1 : La masse volumique absolue d'un matériau [27]

Les résultats obtenus sont présentés au tableau suivant

Tableau.III.1 Masse volumique absolue du sable de Boussaâda

N° d'essai	M(g)	V (cm ³)	V ₂ (cm ³)	ρ _{abs} (g/cm ³)	ρ _{abs moy} (g/cm ³)
1	120	150	195	2.66	2.555
2	120	150	198	2.55	
3	120	150	198	2.5	

- ✓ M : masse du sable
- ✓ V₂ : volume d'eau + sable.
- ✓ V : volume d'eau.

III.2.4. Masse volumique apparente : NF P 18-554

A. But de l'essai :

Déterminer les masses volumiques apparentes du matériau, c'est - à - dire sa densité à l'état naturel (en présence des pores).

III.2.5. Masse volumique apparente à l'état lâche

C'est la masse du matériau par unité de volume y compris des Vides existant entre les grains.

A. Mode opératoire

- On détermine la masse volumique apparente du sable à l'aide d'un entonnoir standardisé de capacité 2 à 2,5 litres.
- On remplit l'entonnoir avec du sable sec.
- On pèse le récipient vide M_1 .
- On place le récipient sous l'entonnoir à une distance de 10 à 15 cm et on le remplit avec du sable.

Une fois le récipient est rempli, on nivelle la surface du sable et on pèse le tout. Soit M_2 ce poids.

Volume de récipient $V_r = 900 \text{ cm}^3$.

La masse volumique apparente du sable est donnée par la formule suivante :

$$\rho_{\text{app}} = \frac{(M_2 - M_1)}{V}$$

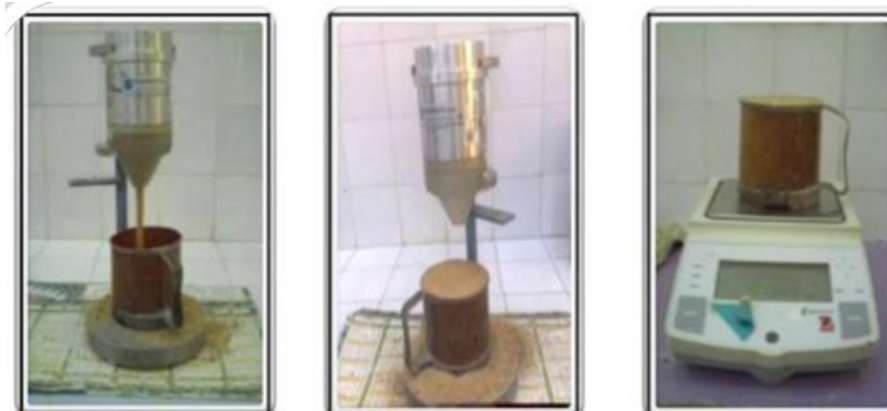


Fig.III.2 Essai de détermination de la masse volumique apparente

Les résultats obtenus sont classés dans le tableau suivant :

Tableau.III.2 Masse volumique apparente du sable de Boussaâda à l'état lâche

N° d'essai	M ₁ (g)	M ₂ (g)	ρ_{app} (g/cm ³)	$\rho_{app\ moy}$ (g/cm ³)
01	115	1296	1.312	1.318
02	115	1309.3	1.327	
03	115	1300.9	1.317	

III.2.6. Masse volumique apparente à l'état compact

C'est la masse du matériau par unité de volume après compactage compris les vides restant entre les grains. Généralement elle est supérieure à la masse volumique à l'état lâche.

A. Mode opératoire

Même méthode que celle de l'état lâche, après remplissage du récipient « aprèstassement » on soumet ce dernier à 30 secousses manuelles.

On complète le remplissage du récipient après le tassement du sable, puis on nivelle ce dernier et on le pèse. Soit M₂ le poids de l'ensemble (sable + récipient), la masse.

Les résultats obtenus sont classés dans le tableau suivant :

Tableau.III.3 Masse volumique apparente du sable de Boussaâda à l'état compact

N° d'essai	M ₁ (g)	M ₂ (g)	ρ_{app} (g/cm ³)	$\rho_{app\ moy}$ (g/cm ³)
01	117	1544.5	1.59	1.56
02	117	1539.8	1.50	
03	117	1549.9	1.59	

III.2.7 Porosité : NF P 18-554

C'est le volume des vides entre les grains du sable, elle représente donc le degré de remplissage de son volume occupé par les vides.

La porosité est exprimée en pourcentage (%) et définie par la relation :

$$P (\%) = [1 - (\text{Masse volumique apparente} / \text{masse volumique absolue})] \times 100$$

On distingue deux cas pour le sable Boussaâda :

- Etat lâche : $P_L = 48,31\%$
- Etat compact : $P_C = 38,82\%$

III.2.8 la Compacité

La compacité d'un matériau est une proportion de son volume réellement occupé par la matière solide qui le constitue, c'est -à-dire le rapport du volume absolu des grains au Volume apparent du matériau.

La compacité donnée par la formule :

$$C = (\rho_{app} / \rho_{abs}) = 100 - P$$

On distingue deux cas pour le sable Boussaâda :

- Etat lâche : $C_L = 51,69\%$
- Etat compact : $C_c = 61,18\%$

III.2.9. Equivalent de sable : NF P 18-59

A. Le but d'essai :

Ce test Visse à isoler les fines particules présentes dans le sol des éléments sableux Rugueux.

La procédure standard permet de spécifier un coefficient équivalent de sable qui en détermine la propreté.

B. Mode opératoire :

- Tamiser une quantité de sable (masse supérieure à **500 g**).
Prendre une pesée de **120 g**.
- Remplir l'éprouvette de solution la vente jusqu'au premier repère (**10cm**).
A l'aide de l'entonnoir verser la prise d'essai (**120g**) dans
- L'éprouvette et taper fortement à plusieurs reprises avec la paume de la main afin de chassertoutes les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon.
- Laisser reposer pendant **10** minutes.
- Fermer l'éprouvette à l'aide du bouchon en caoutchouc et lui imprimer **90** cycles de **20cm** de cours horizontale en **30** secondes à la main à l'aide d'un agitateur mécanique.
- Retirer ensuite le bouchon, le rincer avec la solution la vante au-dessus de l'éprouvette, Rincer ensuite les parois de celle-ci.



Fig.III.3 Agitateur mécanique

Faire descendre le tube laveur dans l'éprouvette, le rouler entre le pouce et l'index en

faisant tourner lentement le tube, l'éprouvette et en imprimant en même temps au tube un léger piquage. Cette opération a pour but de laver le sable et de faire monter les éléments fins et argileux. Effectuer cette opération jusqu'à ce que la solution la vante atteigne le 2^{ème} repère. Laisser ensuite reposer pendant 20 minutes.



Figure.III.4 : Repos de 20 min pour les éprouvettes

C. Equivalent de sable visuels (ESV)

- Après 20 minutes de dépôt de sable, lire la hauteur h_1 du niveau supérieur du flocculant jusqu'au fond de l'éprouvette à l'aide d'une règlette. Mesurer également avec la règle la hauteur h_2 comprise entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire et le fond de l'éprouvette

$$ESV = \frac{H_2}{H_1} \times 100$$

D. Equivalent de sable piston (ESP) :

- Introduire le piston dans l'éprouvette et laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment. A cet instant bloquer le manchon du piston et sortir celui-ci de l'éprouvette.
- Introduire le règlet dans l'encoche du piston jusqu'à ce que le zéro vienne buter contre la face intérieure de la tête du piston. Soit $h/2$ la hauteur lue et correspondant à la hauteur de la partie sédimentée.

$$ESP = \frac{H'2}{H_1} \times 100$$

Les résultats sont regroupés sur (le tableau III.4) suivant :

Tableau.III.4 Les résultats d'équivalent du sable de Boussaâda

L'éprouvette	H ₁ (cm)	H ₂ (cm)	ESV%	ESV _{moy} %	H' ₂ (cm)	ESP%	ESP _{moy} %
01	11.5	8.2	73.91		8.1	70.43	
02	12.5	8.9	71.2	71.99	7.8	62.4	66.06
03	12.7	9	71.99		8.3	65.35	

ESV_{moy} = 71.99%

ESP_{moy} = 66.06%

Donc :

Tableau.III.5 Comparaisons des résultants [27]

E.S.V	E.S.P	Nature et qualité du sable
ES < 65	ES < 60	Sable argileux: Risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité.
65 ≤ ES ≤ 75	65 ≤ ES ≤ 70	Sable légèrement argileux de propriété admissible pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
75 ≤ ES ≤ 85	70 ≤ ES ≤ 80	Sable propre à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de hautes qualité.

85\geqES	80$>$ES	Sable très propre : L'absence totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau
------------------------------	------------------------------	--

D'après le tableau on constate que: $65 \leq ES \leq 75$ et $65 \leq ES \leq 70$

Pour le sable du Boussaâda : Sable légèrement argileux de propriété admissible pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.

III.2.10. Teneur en eau : NF P 18-555

L'essai de teneur en eau permet de déterminer quel est le pourcentage massique (W%) d'eau dans le sable étudié, c'est-à-dire quelle est la masse d'eau présente par rapport à 300 grammes de sable sec.

La teneur en eau donnée par la formule :

$$W = ((M_h - M_s) / M_s) * 100 (\%)$$

Où :

- ✓ M_h : Masse des granulats humides.
- ✓ M_s : Masse des granulats secs.

Les résultats obtenus en (Tableau. III.6)

Tableau.III.6 Teneur en eau du sable de Boussaâda

Essais	M_h (g)	M_s (g)	W(%)	W_{moy} (%)
1	300	297.2	0.942	0.593
2	300	299	0.334	
3	300	298.5	0.502	

III.2.11. Analyse granulométrique : NF P 18-304. NF P 18-560

L'analyse granulométrique par tamisage c'est un ensemble des opérations aboutissant à la séparation selon leur grosseur des éléments constituant échantillon, en employant des tamis Afin d'obtenir une représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension.

L'analyse granulométrique permet de déterminer les dimensions des grains et les proportions de grains de même dimension (% pondéral).

Elle comprend deux opérations :

- Tamisage
- Sédimentation

La granularité est exprimée par une courbe granulométrique qui donne la répartition de la dimension moyenne des grains, exprimée sous forme de pourcentage du poids total du matériau.

A. Mode opératoire :

- ◆ Prélever (1 kg) de matériau (sable sec).
- ◆ Peser chaque tamis à vide à 1 g près, soit m_i la masse du tamis.

Constituer une colonne de tamis propres et secs dont l'ouverture des mailles est respectivement de haut en bas : 5-2,5-1,25-0,63-0,315-0,125 et éventuellement 0,08 mm.

La colonne est coiffée par un fond pour recueillir les éléments passant au dernier tamis et un couvercle pour éviter la dispersion des poussières. On commence par peser les tamis ainsi que le fond.

- ◆ Verser le matériau (sable sec) sur la colonne et la fixer soigneusement sur la machine d'agitation mécanique. Agiter pendant 5 minutes. Arrêter l'agitateur, puis séparer avec soin différents tamis.

- ◆ Peser chaque tamis séparément à 1 g près. Soit M_i la masse du tamis (m_i) + le sable.

La différence entre M_i et m_i (tamis de plus grandes mailles) correspond au refus partiel R_1 du tamis 1.

- ◆ Reprendre l'opération pour le tamis immédiatement inférieur.

Ajouter le refus obtenu sur le sixième tamis à R_1 , soit R_2 la masse du refus cumulé du tamis 2 ($R_2 = R_1 + \text{Refus partiel sur tamis 2}$)

◆ Poursuivre l'opération avec le reste des tamis pour obtenir les masses des différents refus cumulés R_3, R_4, \dots

- ◆ Le tamisât cumulé est donné par la relation suivante : $T = 100 - RC$

Où :

T : Tamisât en %

RC : Refus cumulés en %

Les résultats obtenus sont présentés au tableau suivant :

Tableau.III.7 Les résultats d'analyse granulométrique du sable de Boussaâda

N°	Tamis (mm)	Refus(g)	Refus Cumulés (g)	Refus (%)	Tamisats(%)
3	5	0	0	0,0	100,0
4	2,50	36	36	3,6	96,4
5	1,25	63	99	9,9	90,1
6	0,630	52	151	15,1	84,9
7	0,315	247	398	39,8	60,2
8	0,160	536	934	93,4	6,6
9	0,080	53	987	98,7	1,3
13	fond	9	996	99,6	0,4

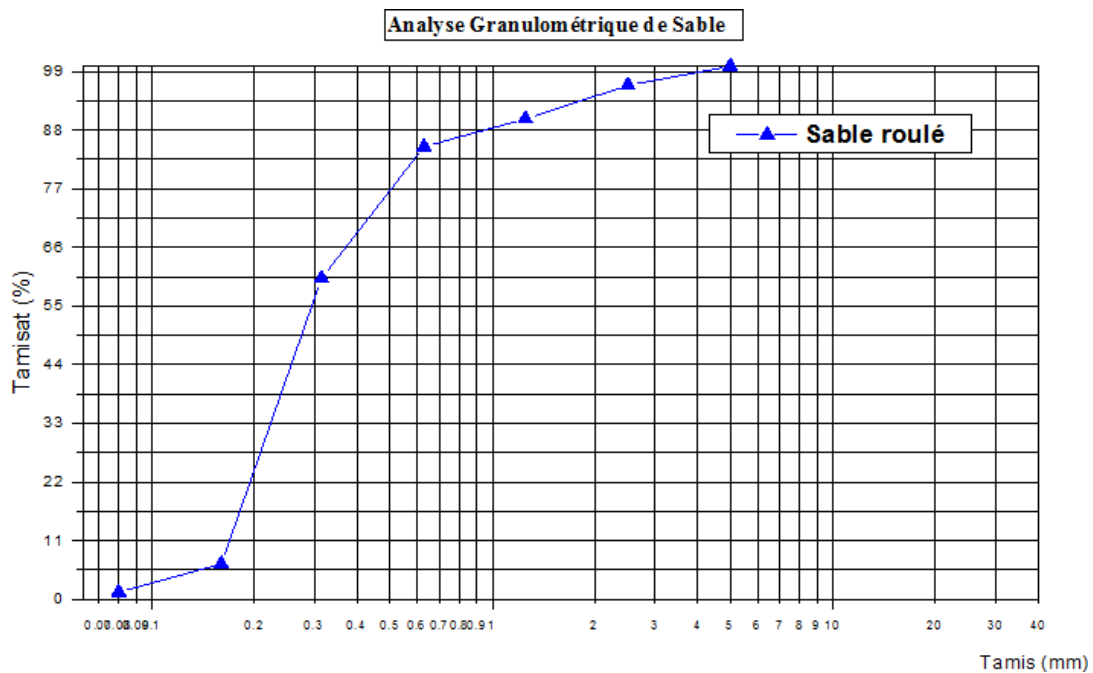


Figure. III.5 La courbe granulométrique du sable de Boussaâda

C. Module de finesse

Le module de finesse (M_f) est un facteur très important, qui nous permet de juger la grosseur du sable (qualité du sable), il est exprimé par le rapport de la somme des refus cumulés des tamis demailles : [0.16-0.315-0.63-1.25-2.5 et 5 (mm)] / 100

Il est donné par la relation suivante

$$MF = \frac{\sum RC}{100}$$

III.3. Ciment

Un ciment portland, contenant 95% clinker et 5% de gypse en tant que régulateur de prise. (Fiche Tech ciment Gica).

III.3.1. Caractéristiques physiques du ciment utilisé

Les caractéristiques physiques du ciment utilisé sont classées dans le tableau suivant :

Tableau.III.9 . Caractéristiques physiques du ciment

Essai physico-mécanique	Min	Max	Norme
Ss Blaine cm/g	2960	4200	-
Consistance %	25.5	26.8	-
Début de prise	80		160≥60 mn
Compression 02j	12.5	23	>10.0
Compression 07j	25	36	-
Compression 28j	43	52	≥42.5
Expansion a	0	8.5	>10mn
Les Constituants de Ciment en %			
Clinker		80-88	
Pouzzolane + Calcaire		12-20	
Régulateur de prise (Gypse)		00-05	

Constituants		Tanner en (%)
Elément	Symbole	
Silice	SiO ₂	86.95
Chaux	CaO	6.33
Oxyde de ferrique	Fe ₂ O ₃	0.90

Alumine	Al_2O_3	1.92
Oxyde de magnésium	MgO	0.53
Sulfate	SO_3	0.44
Pente au fer	P.A.F	2.81



Figure III.6 : Le ciment utilisé

III.3.2. Caractéristiques chimiques du ciment utilisé

L'analyse chimique du ciment utilisé est établie au laboratoire de l'ACC. Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau.III.10 Caractéristiques chimiques du ciment

Analyse chimique	Min	Max
SiO₂	22.80	32.00
AL₂O₃	5.20	6.20
Fe₂O₃	3.20	3.60
CaO	52.00	62.00
MgO	1.02	1.20
K₂O	0.35	0.45
Na₂O	0.40	0.50
SO₃	1.80	2.20
PF	2.00	2.80
CL	0.03	0.45
Ri	6.00	12.00
Caol	0.40	1.54

III.4. L'eau de gâchage :

Généralement dans l'utilisation du béton ou du mortier, nous pouvons utiliser tous les types d'eau (l'eau de rivière, l'eau de barrage, l'eau potable etc....), mais certains peuvent contenir des impuretés, ce qui conduit à la détérioration des propriétés du béton ou du mortier, et pour cette raison nous avons recours à l'analyse de l'eau.

III.4.1. Caractéristiques chimiques de l'eau utilisée

La composition chimique d'eau du laboratoire de département du génie civil est établie au laboratoire de département de chimie (M'sila). Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau.III.11 Caractéristiques Chimique de l'eau de gâchage [27]

Les caractéristiques	La valeur
PH	7.71
Conductibilité	1745
Chlore Cl ⁻	236.30 mg/l
Sulfate SO ₄ ⁻	349.60 mg/l
Magnésium Mg ²⁺	115.30 mg/l
Sodium Na ²⁺	néant
Calcium Ca ²⁺	269.50 mg/l

III.5. L'adjuvant

Dans notre travail, l'adjuvant qui nous avons utilisé s'appelle : Le super plastifiant (MEDAFLOW 30).

III.5.1. Description

D'après la fiche technique (Annexe), Le **MEDAFLOW 30** est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de poly carboxylates d'Ether qui améliorent considérablement les propriétés des bétons. Plage de dosage recommandée : 0,5 à 2,0 % du poids de ciment soit 0.46 à 1.85 litre pour 100 Kg de ciment. Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés. Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait déjà

été introduite.

III.5.2. Propriétés

Grâce à ses propriétés le MEDAFLOW 30 permet :

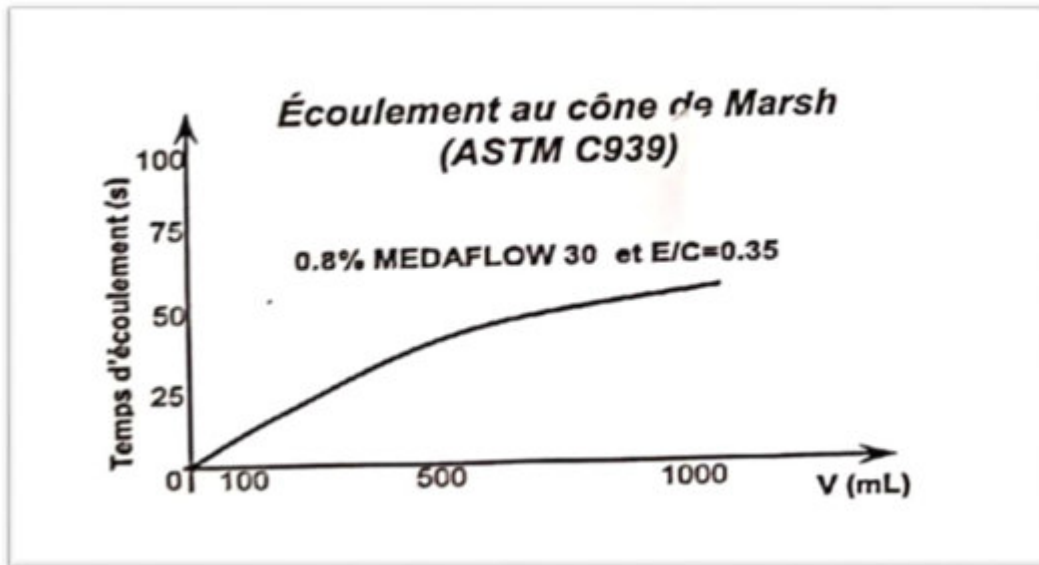


Figure : III.7 Grâce à ses propriétés le MEDAPLAST SP 40 permet : Sur le béton

Frais il permet

- ❖ L'obtention d'un E/C très faible
- ❖ L'amélioration considérable de la fluidité
- ❖ Une très bonne maniabilité
- ❖ Un long maintien d'ouvrabilité
- ❖ D'éviter la ségrégation
- ❖ De faciliter la mise en œuvre du béton.

Sur béton durci

- Augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme (voir tableau)
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait et le risque de fissuration

III.5.3. Domaine d'application

- ✓ Béton à haute performance.
- ✓ Béton auto plaçant.
- ✓ Béton pompé.
- ✓ Béton précontraint.

- ✓ Béton architecturant



Figure III.8 : Super plastifiant utilisé dans notre étude.

III.5.4 Caractéristiques

Tableau.III.12: Caractéristiques de MEDAFLOW 30

Forme	Couleur	P-H	Densité	Teneur en chlore.	Extrait sec
Liquide	Jaunâtre	6 – 6,5	1,07 ± 0,01	< 1g/l	30%

Tableau III.13: Masse mole claire du super plastifiant

Super plastifiant	Masse moléculaire Moyenne en nombre	Masse moléculaire Moyenne en masse	Indice de polydispersité
MEDAFLOW 30	44700	58714	1,31

III.6. Les ajouts

Les deux types d'additions récupérées de déchets de construction au cours de cette étude sont :

III.6.1. Les déchets de brique

Ces déchets proviennent de la briqueterie de M'sila. Ils ont été concassés manuellement au niveau du laboratoire de génie civil Université de M'sila , puis broyés jusqu'à la fraction granulaire inférieure à 80µm.



Figure. III.9 Déchets des briques utilisés

Les caractéristiques des déchets de brique sont indiquées dans les tableaux suivants:

Tableau.III.14 Composition chimique des déchets de brique broyés [27]

Composant	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	NaO ₂	SO ₃
Teneur (%)	53.78	16.61	12.88	6.22	2.20	2.13	0.87	0.65

Tableau.III.15 Caractéristiques des déchets de brique broyés [27]

Caractéristiques	Forme	Couleur	Finesse	Dosage recommandé
Résultats	Poudre	Rouge brique	4000cm ² /g	10% à 50%

III.6.2. Kaolin

Le terme kaolin a été utilisé, pour longtemps, pour désigner l'argile chinoise extraite du Village «Kauling ».

Actuellement, le terme kaolin désigne les minéraux ayant une composition en kaolinite (Al₂Si₂O₅(OH)₄) supérieure à 50%, peuvent être différents selon les conditions géologiques de leur formation. Leurs compositions minéralogiques moyennes et leurs propriétés physiques et chimiques. [28]



Figure III.10: Roche de kaolin

III.6.2.1. Traitement thermique du kaolin

Les métakaolins sont obtenus par calcination d'argile kaolinique (silicate d'alumine hydraté) à des températures comprises entre 600 et 900°C. La température de calcination dépend du degré de pureté en kaolin (autrement dénommé kaolinite) de l'argile kaolinique utilisée. La calcination entraîne la des hydroxylations et une destruction de la structure cristalline initiale de la kaolinite (kaolinite calcinée). La durée de traitement thermique

Utilisée est de cinq heures. Durant cette cuisson, il y a formation de métakaolin (Figure III.10) et dégagement de molécules d'eau sous forme gazeuse selon la réaction suivante [28], (Figure III .11)

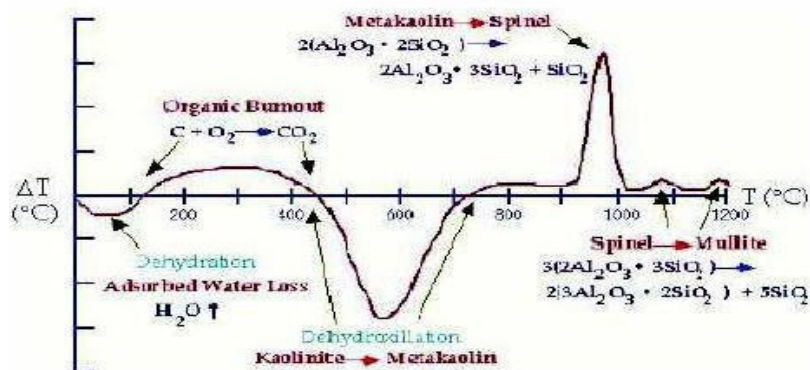


Figure III.11. Traitement thermique de metakaoline

III.6.2.2. Caractéristiques physique, chimique et minéralogique du Métakaolin

La masse volumique ainsi que la surface spécifique sont présentées dans le Tableau III.16.

Tableau III.16 : Caractéristiques physique du Métakaolin.

Masse volumique (g/cm ³)	2.7
Surface spécifique (m ² /g)	16

Les résultats d'analyse chimique sont présentés dans le Tableau [28].

Tableau III.17 : Analyse chimique du Métakaolin

Composition (%)	Sio ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	TiO ₂	PF	Cl
kaolin	49.49	35.74	7.01	0.49	2.07	0.19	0.38	0.94	1.20	0.01



Figure III.12: Filler Kaolin

III.7. Elaboration du différent mortier auto-plaçant

Dans la littérature existe plusieurs approches de formulation. Pour répondre aux exigences d'ouvrabilité des BAP. La méthode que nous avons choisie dans notre étude c'est la méthode japonaise d'Okamora qui vise l'optimisation du mortier [29]. L'objectif de la formulation est de déterminer la quantité nécessaire pour chaque matériau de la gâchée, afin d'obtenir le mortier qui aura les propriétés souhaitées.

Le paramètre important considéré dans la formulation est le rapport Eau/Liant, qui est fixé dans cette étude à 0.40. Le dosage en super plastifiant a été optimisé par des essais sur mortier afin d'obtenir un mortier auto plaçant homogène et stable qui nous permet de formuler notre BAP.

III.7.1. Composition de mortier auto plaçant pur 1 m³

Le but de ce travail de formulation du mortier auto plaçant a pour but d'optimiser le dosage en super plastifiant. Le rapport E/L est constant et la seule variable étant le dosage en super plastifiant. Le dosage en super plastifiant est déterminé de manière expérimentale à partir d'essais sur mortier frais afin d'obtenir un étalement de 270 à 330 mm pour tous les MAP et un temps d'écoulement V-funnel entre 2 et 6 sec [29].

Pour la confection du mortier, les proportions du mélange (ciment, sable, eau et

super plastifiant) ont été calculées. La séquence de malaxage est la même pour tous les mélanges du mortier dont la procédure est comme suit (Figure III.13) :

- Malaxer à sec le ciment et le sable pendant environ une (1) minute afin d'homogénéiser le mélange (on a utilisé un malaxeur à mortier de 5 litres de capacité),
- Malaxer pendant une minute avec la première quantité d'eau (Eau1 = 70% Eau),
- Malaxer pendant une minute avec le restant de l'eau de gâchage (Eau2 = 30% Eau) mélangé avec le super plastifiant,
- Malaxer le mélange pendant 3 minutes.

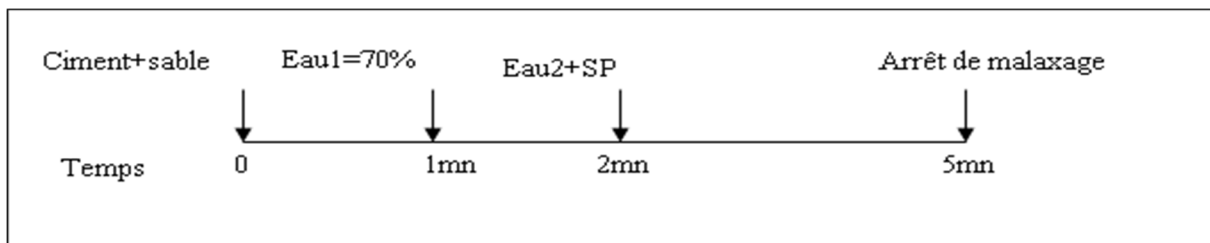


Figure III.13 : Séquence de malaxage du mortier [29].

III.7.2-Dénomination des différents mélanges

Dans ce travail expérimental, (5) Cinq mélanges : mélange témoin et mélange ont été préparés en ajoutant de la poudre de brique et poudre de Métakaolin de certaines proportions

- ✓ une partie (1) de ciment (ciment 42.5 fixé à un dosage).
- ✓ Poudre de Métakaolin (10% du poids de ciment).
- ✓ Poudre de brique (0%,5%, 10%,15%, en substitution au poids du ciment).
- ✓ E/L = 0.82.

Notre mortier a été formulé d'après la méthode de japonaise d'Okamora. Les constituants et leurs quantités sont présentés au tableau suivant (tableau III.18).

Tableau (III.18) : Composition de mortier auto-plaçant pour 1m³.

Constituants	Quantité kg/m ³
Ciment	623.76
Sable	1185
Eau	152.48
Adjuvant	1.8

Nous avons réalisé des essais sur des mortiers confectionnés avec de superplastifiant et

des mortiers à base de ciment Portland substitué en poids par différents pourcentages de :

- ✓ **M0** : mortier auto-plaçant témoin.
- ✓ **M1** : mortier auto-plaçant avec **5%** de poudre de brique.
- ✓ **M2**: mortier auto-plaçant avec **10%** de poudre de brique.
- ✓ **M3**: mortier auto-plaçant avec **15%** de poudre de brique
- ✓ **M4** : mortier auto-plaçant avec **10%** de poudre de Métakaolin

Ces mortiers auto-plaçant ont été conservés pendant 28 jours dans une eau de robinet, de mortier auto-plaçant ont subis différents essais physiques, et mécaniques. Le (tableau III.19) donne la composition des différents mortiers auto-plaçant étudiés. Les quantités de granulats sont données en masse de matériaux imbibés et les dosages en adjuvants sont présentés.

Tableau III.19: Les quantités des constituants des mélanges des mortiers auto plaçant (Données pour 1 m³).

Composition (kg)	Désignation de mortier auto plaçant				
	M0	M1	M2	M3	M4
E/C	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
E/L	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82
Eau (L)	0.384	0.384	0.414	0.484	0.464
Ciment	0.958	0.9101	0.8622	0.8143	0.8622
S (0/5)	1.820	1.820	1.820	1.820	1.820
Adjuvant	0.01724	0.01724	0.01724	0.01724	0.01724
Poudre debrique	0	0.0479	0.0958	0.1437	0
Poudre de Métakaolin	0	0	0	0	0.0958

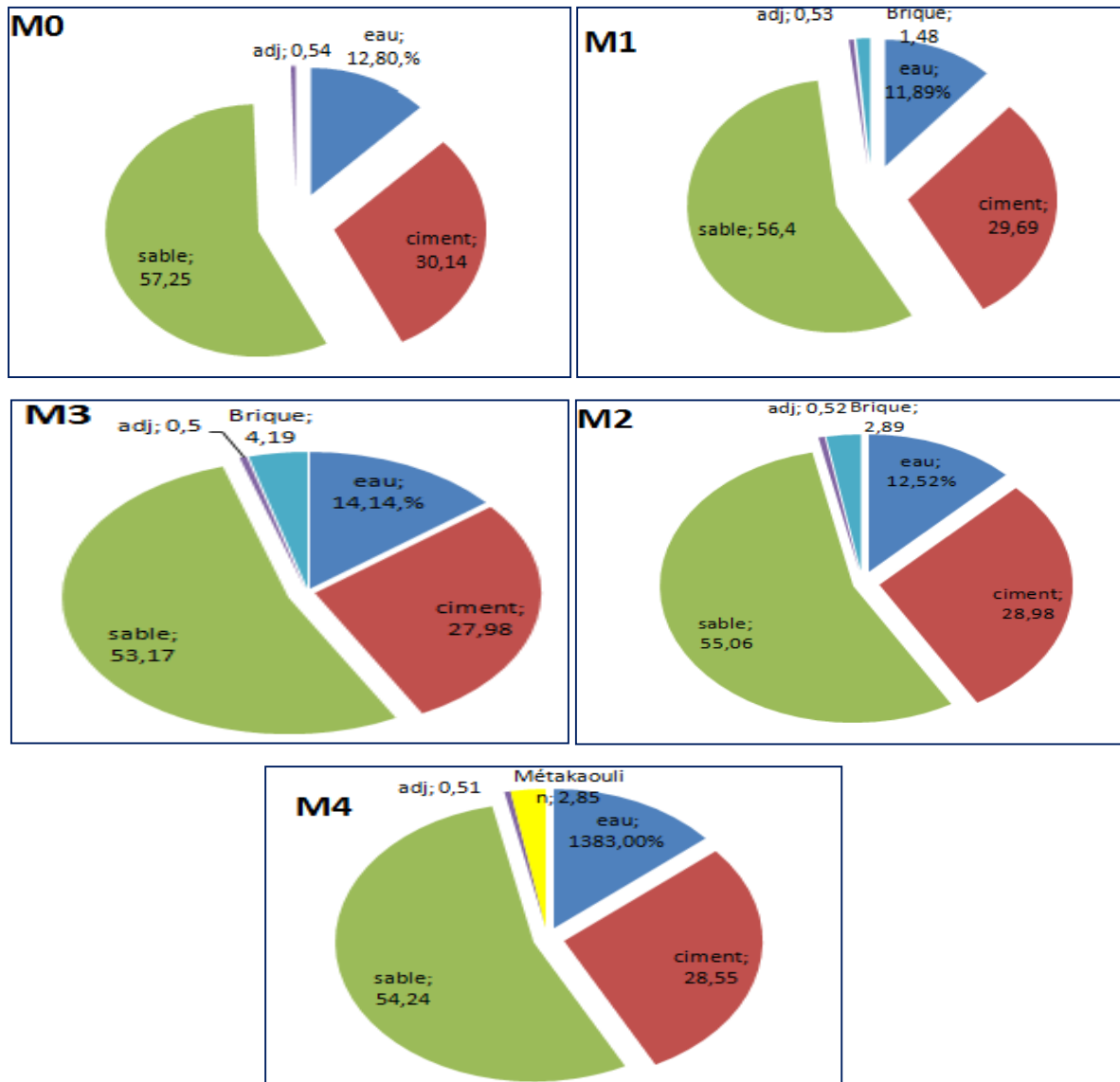


Figure III .14 composition des différents mortiers auto plaçant

III.7.3. Préparation des éprouvettes

Les différents types de mortiers auto plaçant sont tous fabriqués dans l'environnement de laboratoire.

Le coulage des éprouvettes est réalisé sans vibration ni compactage dans des moules métalliques de forme prismatique 4x4x16 cm destinés aux différents essais programmés à l'état durci. Les éprouvettes confectionnées sont au nombre total de **100 éprouvettes** (Figure III .14).



Figure III.15: Préparation des éprouvettes

III.7.4. Cure appliquée

Toutes les éprouvettes utilisées dans cette campagne expérimentale ont suivi la même cure et le même conditionnement conformément à la norme NF P 18-404. Après démoulage, les éprouvettes ont été conservées pendant 24 heures dans leur moule à température ambiante (20 ± 2)

°C. A l'issue de ce temps de conservation initiale, elles ont été démoulées, puis plongées dans l'eau à 20 °C pendant 28 jours. Ce mode de conservation permet d'assurer l'hydratation du mortier et d'éviter toute fissuration due à la dessiccation.

Il permet également de maintenir les mortiers saturés et de se rapprocher ainsi des conditions réelles qu'on peut rencontrer dans certains ouvrages souterrains



Figure III.16 : Conservation dans l'eau à 20°C

III.7.5. Essai de chauffage

Pour étudier le comportement à haute température du mortier, il est nécessaire de lui faire subir différents cycles thermiques. Toutes les éprouvettes retenues pour cette étude sont testées après leur refroidissement. Nous appliquons trois cycles de chauffage-refroidissement de 20 °C à différentes températures de palier : 300 °C, 500 °C, 700 °C. Chaque cycle de chauffage- refroidissement se compose de trois phases, une phase de montée en température, une phase de stabilisation à température constante et une troisième phase de descente de la température du palier à la température ambiante.

Finalement des éprouvettes ont été exposées à une température élevée variant de 300 °C et 500 °C et 700 °C avec une vitesse de la montée en température de 10°C/ min et un maintien de température dans le four à moufle pendant 1 heure.

Le procédé expérimental appliqué repose sur Chargement thermique puis mécanique (écrasement directe)



Figure III.17 : Disposition des éprouvettes dans les fours

III.7.6. Les essais sur les mortiers

III.7.6.1. Etat frais

Dans cette étude, deux essais ont été effectués pour valider le caractère des mortiers Auto plaçant formulés

Selon les recommandations de l'AFGC.

III.7.6.1.1. Essais d'étalement au mini-cône

L'appareil se compose d'un moule tronconique de 40 mm de hauteur, un diamètre du

haut de 70 mm et du bas de 80 mm [29]. L'essai d'étalement s'agit de remplir le moule tronconique placé au centre d'une plaque en acier horizontale lisse, une fois le moule est soulevé et le mortier s'écoule sur la plaque.

Le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaires pour retenir la moyenne. (D_{moyen}). Le (D_{moyen}) est calculé comme suit :

$$D = \frac{D1 + D2}{2}$$

La figure III.17 montre le dispositif de l'essai d'étalement pour les mortiers

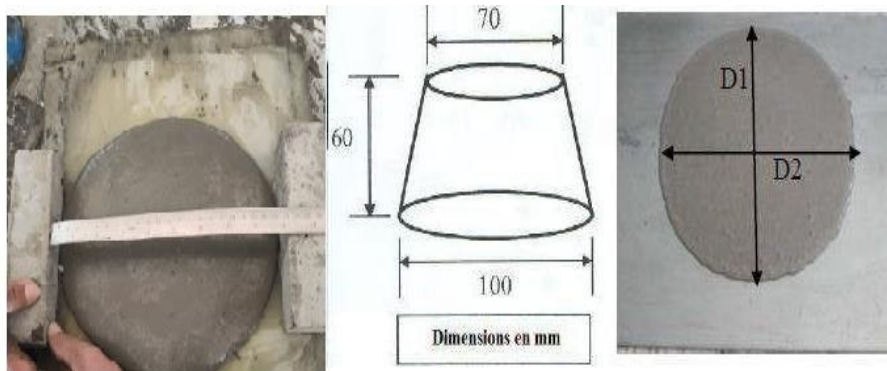


Figure III.18: l'étalement au Mini cône de mortier

III.7.6.1.2. Essai d'écoulement à l'entonnoir en V (V-Funnel test)

L'essai de l'entonnoir en V (V-funnel) permet d'évaluer la vitesse d'écoulement d'un échantillon de béton passant à travers l'ouverture d'un entonnoir, consiste à remplir l'entonnoir de 1.1 litre de mortier, et un temps d'écoulement est calculé entre l'instant de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir (Figure III.18).

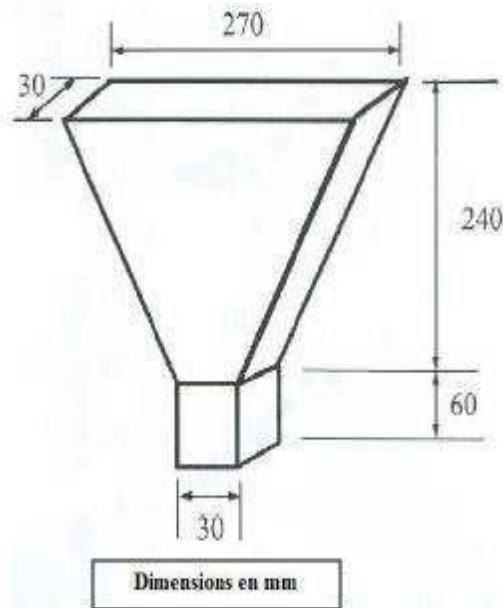


Figure III.19: Essai à l'Entonnoir en V

Figure III.20 : dimension du l'entonnoir en V

Plusieurs travaux montrent que lorsque la valeur d'étalement comprise entre 250 et 280 mm et le temps d'écoulement compris entre 2 et 6 s produisent un MAP réussi [30].

A. Masse volumique

La masse volumique des mortiers, mis en place à la table à chocs, est mesurée par différence de pesées du moule selon la norme NF EN 196-1. Les mortiers sont préparés dans des moules. Les moules vides et pleins sont pesés. La masse volumique est déduite. Chaque résultat est la moyenne de 3 mesures. La masse volumique sur mortier frais est toujours réalisée. Cela permet de vérifier le rendement de la composition en comparant la masse volumique déterminée expérimentalement avec la masse volumique théorique [30]

III.7.6.2. Caractérisation des mortiers à l'état durci

III.7.6.2.1 Essais de résistances mécaniques

Pour la détermination de la résistance à la flexion, on utilise la méthode de la charge, nous plaçons l'éprouvette dans le dispositif de flexion où il est concentré à mi portée au moyen du dispositif de flexion normalisé. Nous utilisons les demi-prismes obtenus dans l'essai de flexion dans l'essai de compression sur les faces latérales de moulage sous une section de 4 cm x 4 cm.

III.7.6.2.2. Résistance à la traction par flexion

Cet essai est basé sur le placement des prismes dans le dispositif de flexion avec une face latérale de moulage sur les rouleaux d'appui et son axe longitudinal perpendiculaire à ceux-ci, une charge verticalement est appliquée sur la face latérale du prisme et l'augmenter de 50 N/s \pm 10 N/s, jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

Les demi-prismes doit être conservée jusqu'à moment des essais en compression, la résistance en flexion R_f en(MPa).

La résistance en flexion est calculée au moyen de la formule :

$$R_f = \frac{1.5pl}{b^3}$$

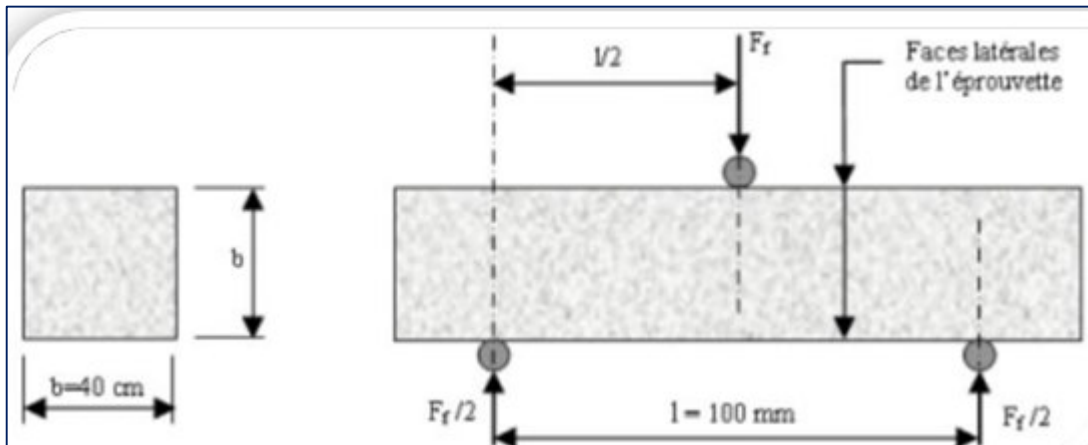


Figure.III.21. Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion

Avec :

R_f : est la résistance en flexion, en newtons par millimètres carrés ou en Mpa ;

P : est la charge appliquée au milieu du prisme à la rupture, en N ;

l : est la distance entre les appuis, en mm ;

b : est la côté de la section carrée du prisme en mm.



Fig.III.22 : L'appareil de résistance à la flexion

III.7.6.2.3. Résistance à la compression

Nous centrons chaque demi-prisme latéralement par rapport aux plateaux de la presse à ± 0.5 mm près et longitudinalement de façon que le bout du prisme soit en porte-à-faux par rapport aux plateaux d'environ 10 mm.

Ensuite, nous augmentons la charge avec une vitesse providence durant toute l'application de la charge jusqu'à la rupture (compenser la décroissance de vitesse de la charge à l'approche de la rupture).

La résistance en compression R_c (MPa) est calculée au moyen de la formule :

$$R_c = \frac{F_c}{b^2}$$

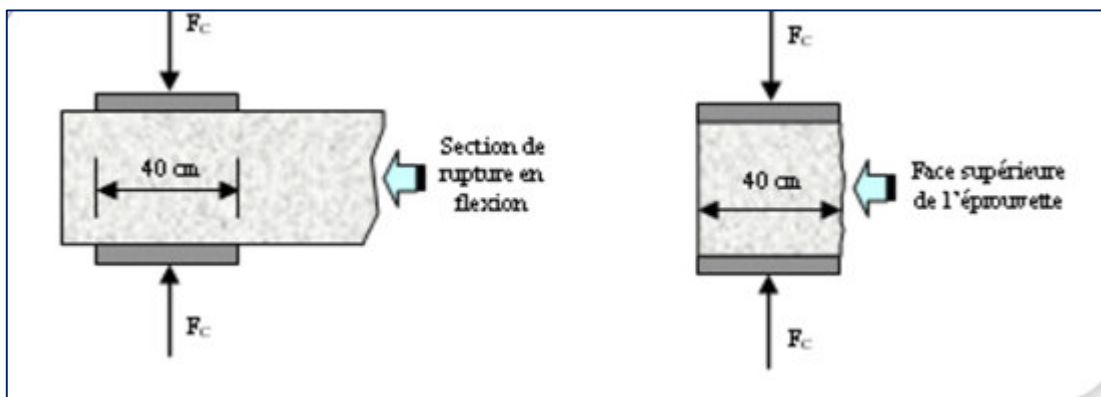


Fig.III.23 : Dispositif pour l'essai de résistance à la compression

Avec :

R_c : Résistance à la compression en (MPa) ;

F_c : charge de rupture en (N) ;

b^2 : cote de l'éprouvette est égale à 40 mm.



Fig.III.24 : L'appareil de compression

III.7.6.2.4. Estimation de la perte de masse

La perte de masse est un indicateur important des dégradations au sein du matériau, et notamment de la perte en eau. Elle permet, en complément des essais mécaniques réalisés après application des cycles thermiques, de suivre l'évolution du poids des matériaux ayant subi un cycle de chauffage. Pour la quantification de l'eau perdue, la masse des éprouvettes est mesurée avant et après chaque cycle de chauffage-refroidissement.

De la fabrication au traitement thermique, les éprouvettes subissent des variations de masse dues au ressuage, à la dessiccation ou absorption d'eau. Pour rendre compte de ces variations, les éprouvettes sont pesées à différents temps : après leur démoulage, les éprouvettes de béton sont pesées et placées dans les bacs remplis d'eau pour limiter une longue durée d'exposition à l'air libre qui entrainerait une dessiccation. A la fin de la période de cure, les éprouvettes sont essuyées avec un chiffon sec et pesées. Elles sont ensuite placées dans le four pour subir un cycle de chauffage-refroidissement.

Après le traitement thermique, chacune des éprouvettes est pesée une dernière fois pour quantifier la quantité de l'eau évaporée au cours du chauffage. Ces mesures sont effectuées sur l'ensemble des éprouvettes placées dans le four et pour tous les cycles de chauffage et pour chacune des compositions.



Figure III. 25. Dispositif expérimental pour l'essai d'absorption d'eau par capillarité

Les éprouvettes conservées dans l'eau ont été pesées d'abord, ensuite elles sont exposées aux fortes températures 20 °C, 300 °C, 500 °C, 700 °C. Les taux de diminution de la masse des éprouvettes est déterminé à partir :

$$T (\%) = (\Delta m \cdot 100) / m_1$$

$$\Delta m = m_1 - m_2$$

T : taux de perte de masse.

m_1 : poids avant expositions à la température. m_2 : poids après expositions à la température.

III.7.6.2.5. Essai de vitesse de propagation d'ondes ultrasonores

Cet essai non destructif permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression). La mesure de la vitesse de propagation des ondes sonores présente l'énorme avantage de donner des informations sur l'intérieure d'un élément de béton. L'essai est donc utilisé pour évaluer l'homogénéité du matériau et détecter la fissuration, les vides et les détériorations dues au feu. Donc, l'objectif principal de cette méthode est d'obtenir le maximum d'informations sur la qualité des bétons soumis à une élévation de température.

Dans le cas d'un béton soumis au feu, l'élévation de température provoque une modification physico-chimique du matériau. L'auscultation sonore, basée sur des mesures de temps de parcours, est une méthode particulièrement bien adaptée à ce type d'investigation, [30].

Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde, dont le nom de la méthode, à parcourir une distance connue. L'appareil comprend des capteurs mis en contact avec le béton, un générateur d'ondes, un circuit de mesure du temps et un affichage digital du temps mis par les ondes longitudinales pour traverser le mortier entre les transducteurs. La norme P 18-418 décrit la méthode d'essais [30].

La vitesse des ondes, V , est calculée par la formule :

$$V = \frac{L}{T}$$

Où :

L : est la distance entre les transducteurs (m).

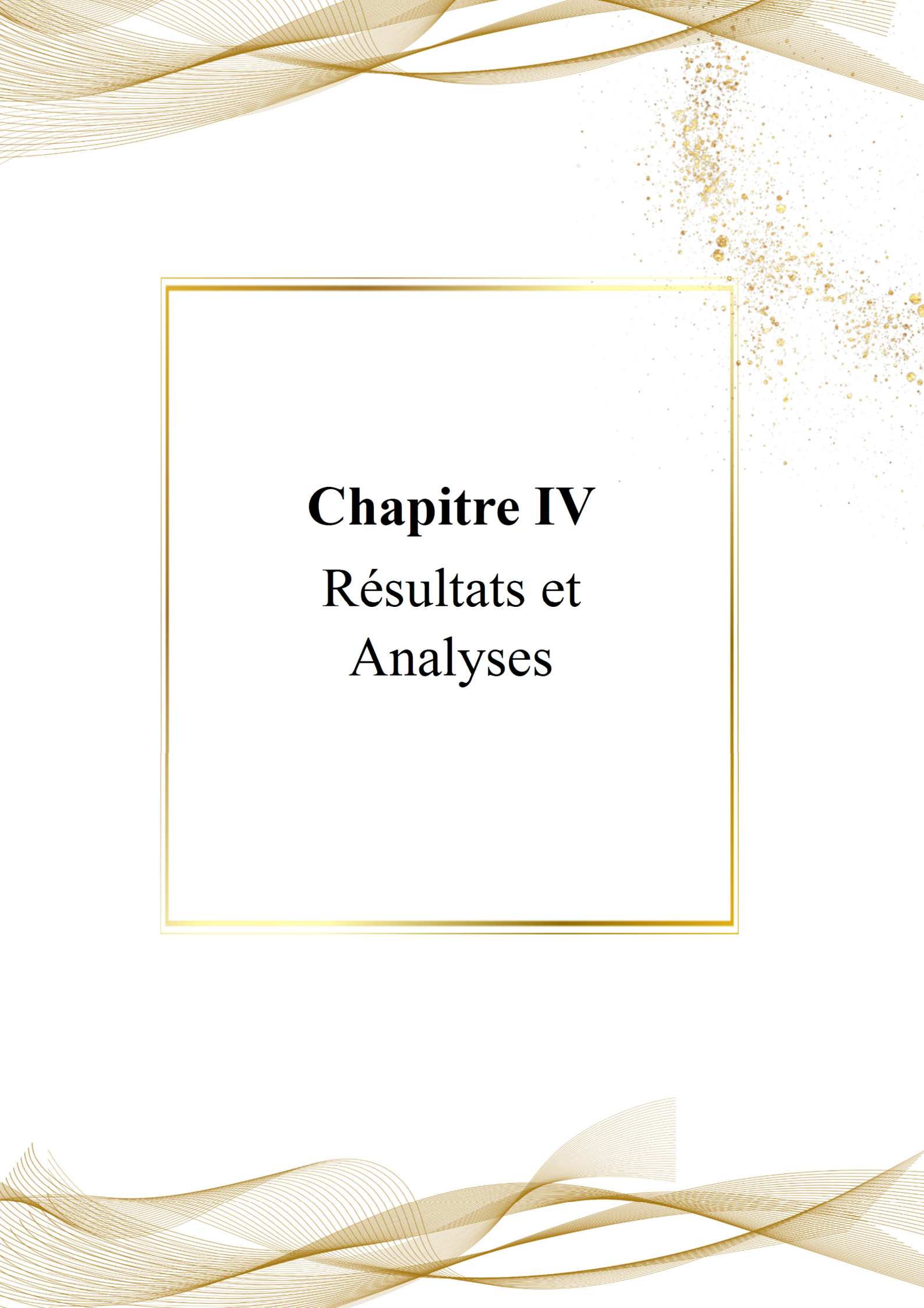
T : est le temps de propagation (s).



Figure III.26. Appareil à ultrasons hautes performances et ses équipements.

II.8. Conclusion

Afin de mettre en évidence la formulation des mortiers fluides à base des déchets de brique et de poudre de Métakaolin, une caractérisation complète des matériaux et une mise en place des procédures expérimentales s'est avérée nécessaire. La première partie de ce chapitre a été consacrée à cet effet, dans lequel, nous avons exposé les différents matériaux utilisés pour la formulation des mortiers ainsi que leurs propriétés physico-chimiques. Après on a passé à la méthode de fabrication et les séquences de malaxage des différents mélanges de mortiers utilisés, ainsi qu'une présentation des essais nécessaires pour la vérification et la caractérisation des mortiers autoplaçant à l'état frais et durci.



Chapitre IV
Résultats et
Analyses

Chapitre IV : Résultats et analyses

IV .1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre les résultats des différents essais effectués sur les mortiers autoplaçants qui sont exposés à des niveaux de températures élevées (20,100, 300, 500et 700) °C avec une vitesse de montée en température de 10°C/min. Des mesures des propriétés physico- mécaniques ont été effectuées

Trois types du mortier autoplaçant sont étudiés :

- ❖ Un mortier Métakaolin (témoin) ;
- ❖ Un mortier autoplaçant à base de la poudre de brique comme addition de :5%,10% et 15%,
- ❖ Un mortier autoplaçant à base de la poudre de Métakaolin comme addition de : 10%,

IV.2 Résultats des essais à l'état frais

Trois paramètres jugés principal pour vérifier l'effet d'addition minérale à l'état frais.

Tableau IV.1 : les résultats de (la masse volumique, d'étalement au mini-cône et V-funnel)

mélange	ρ (kg /cm ³)	T (cm)	Temps d'écoulement «S»
M0	1,36	18	31,9
M1	1,25	20,75	31
M2	1,27	19,75	25,5
M3	1,33	21,25	20
M4	1,21	23	19

IV.2.1 : la masse volumique

D'après les résultats de la masse volumique des différents MAP, qui sont présentés sur la figure IV.1.

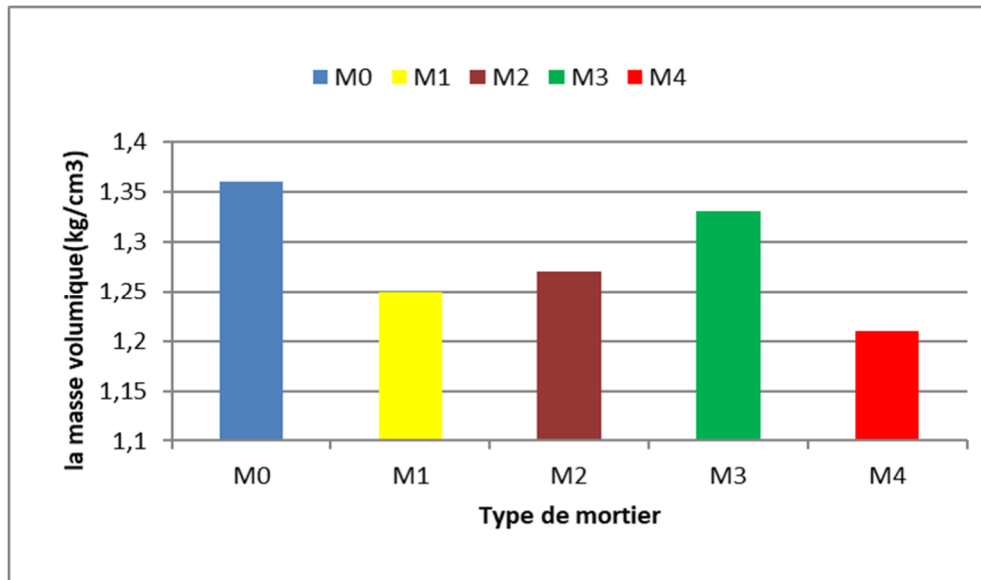


Figure IV .1 : La variation de la masse volumique en fonctions pour l'ensemble de mortier.

A partir des résultats obtenus on constate que la masse volumique des mortiers auto plaçant avec addition minérale est inférieure à la masse volumique du mortier auto plaçant témoin ceci est dû à la présence des poudres de brique et poudre de métakoiline. de chaque addition qui a été remarquée avant l'utilisation dans la formulation de mortier auto plaçant. Aussi le rôle de l'adjuvant qui réduire la quantité de l'eau. En remarque aussi que la masse volumique varie selon le type du déchet utilisé, plus on augmente la quantité du déchet de brique plus la masse volumique est importante notamment pour le mortier M3 par contre la masse volumique obtenues lors de l'utilisation du déchet de Métakaolin sont moins importantes

IV.2.2. L'étalement au mini-cône

Représenté sur la figure (IV.2), l'étalement décroît en fonction du pourcentage de substitution du ciment par de la poudre de brique et Métakaolin.

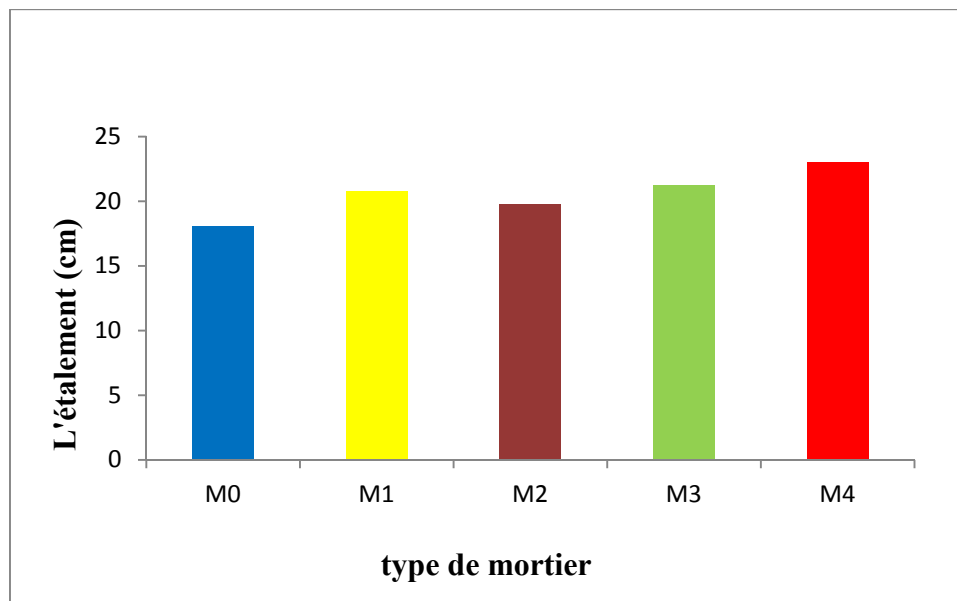


Figure. IV. 2 : Variation d'étalement au mini-cône en fonctions pour l'ensemble de mortier

Dans la figure (IV.2), l'ouvrabilité de tous les mortiers M0 à M3 ne respectent pas les spécifications d'EFNARC 2005 (étalement entre 22 et 25cm). Ainsi on constate que toutes les compositions présentes un étalement supérieure à celle de témoin M0, c'est-à-dire la substitution de ciment par poudre de brique et poudre de Métakaolin augmente l'ouvrabilité de MAP quel que soit le pourcentage de remplacement.

En remarque aussi sur la figure (IV.2), que la présence de Métakaolin en quantité importantes (10%) conduite à une perte aiguë de l'ouvrabilité (des pertes entre 10 à 30%). Elle est due à la finesse et à la capacité d'absorption d'eau de Métakaolin qui cause la réduction de l'eau dans la matrice cimentaire.

La Figure (IV-2) montre que l'étalement du mortier auto-plaçant M0 avec 0% de fines, et on remarque que l'étalement augmente avec l'augmentation du pourcentage de fillers. Les fillers Métakaolin et brique absorbe l'eau de gâchage et influe sur l'étalement.

IV.2. 3. Essai Au Mini V-Funnel

La figure (IV. 3) montre la variation de La longueur de boit L en fonction de la température pour les différents types des mortiers.

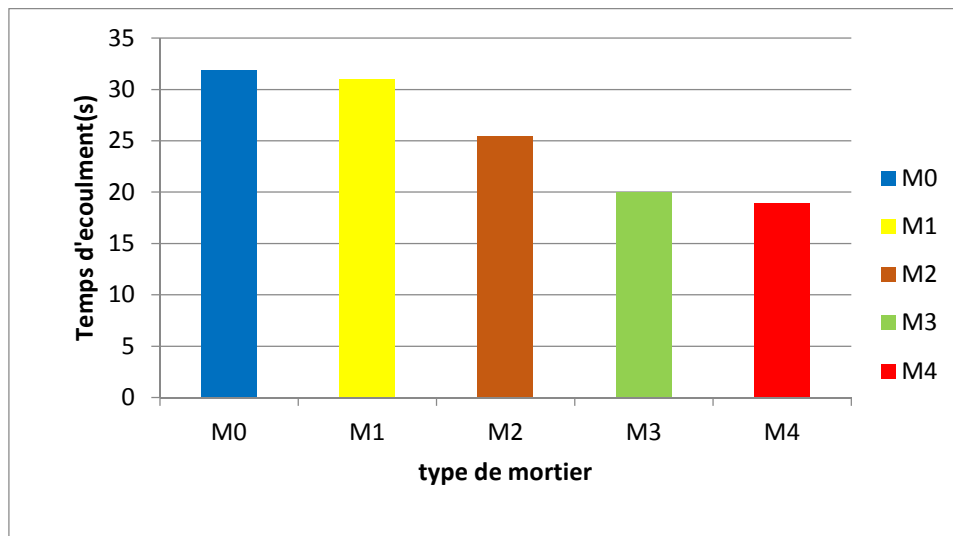


Fig.IV.3 : Temps d'écoulement au mini V Funnel

En remarque Le temps d'écoulement est inférieur dans le mélange M3, M4 par rapport au mélange M0, M1, ce qui signifie que plus l'ajout est important, plus le débit est élevé

IV. 3. Essai au bac en plexiglas



Figure (IV.3 .1) : Photos montrant la planéité de la surface libre des différents mélanges

L'importance de cet essai est de visualiser la surface libre du mortier auto plaçant et auto nivelant, on remarque que les MAP avec 0% et 10% de poudre de brique, donne est une surface libre horizontal pour le mortier. Donc on constate que les MAP avec 0% et 10% de poudre de brique présentent une surface libre auto nivelant

IV. 3. Résultats des essais à l'état durci

IV.3.1 résistance à la compression

La résistance à la compression de tous les mélanges de mortiers à température ambiante et après chauffage à 100 °C, 300 °C, 500 °C et 700 °C sont illustrée sur les figures (IV.4) et (IV.5).

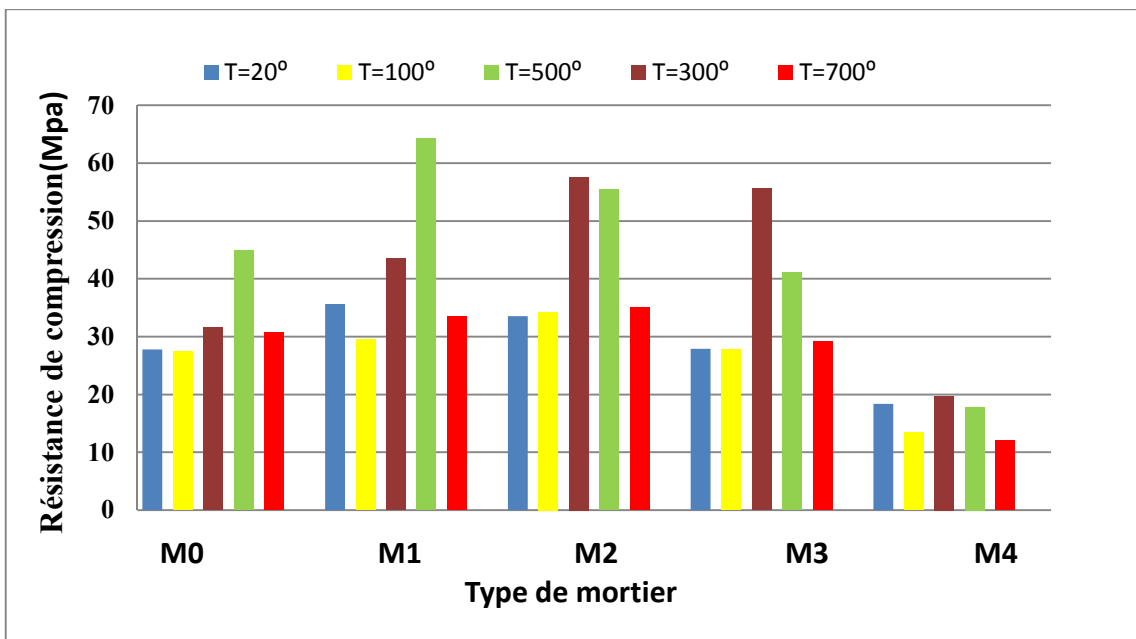


Figure IV.4 : La Variation la résistance de comprissions en fonction de la température a 7jour

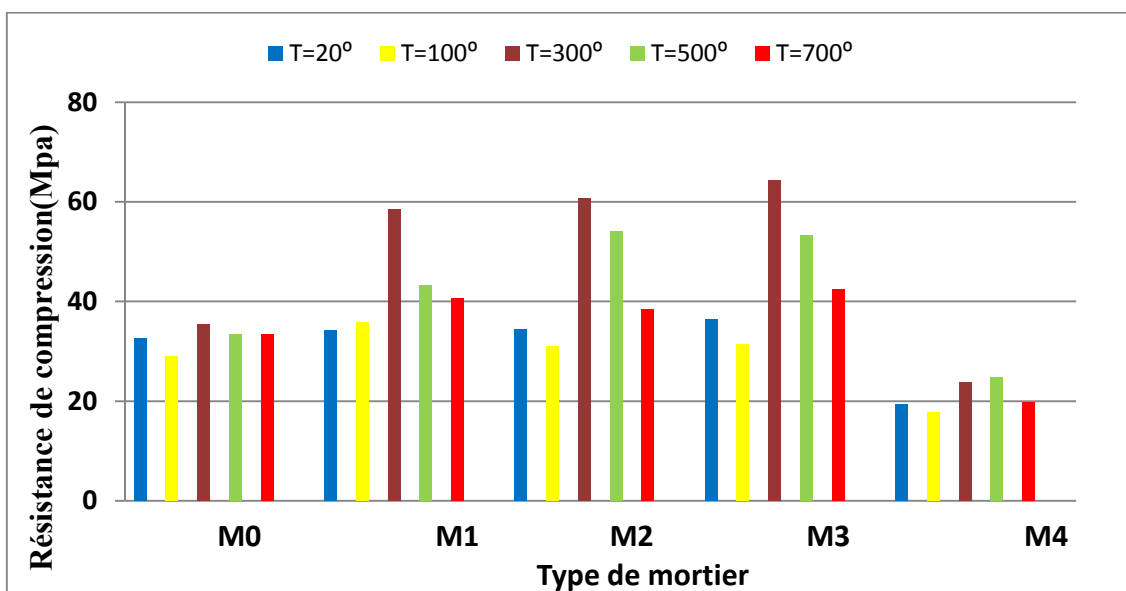


Figure IV.5 : La Variation la résistance de comprissions en fonction de la température a 28jour

D'après les résultats des figures (IV.6) et (IV.5), on remarque que le remplacement du ciment par 5%, 10% et 15% de poudre de brique a augmenté la résistance à la compression d'environ 33% à 28 jours. On observe que les résistances à la compression des mortiers autoplaçants contenant de la PM sont inférieures à la résistance du mortier autoplaçant de référence (M0) à tout âge. La résistance à la compression du mortier(M3) après 28 jours a atteint 64.36 MPa. Tandis qu'à 28 jours, les résistances à la compression des mortiers autoplaçants avec PB sont supérieures aux valeurs du mortier autoplaçant de référence (M0) de 5% et de 20% respectivement. Différents auteurs ont observé des augmentations de la résistance à la compression similaires et cela avec un même taux de substitution du ciment par la PB [Belouadah, 2019] [Rahmouni, 2018]. En général, on peut conclure que les mortiers contenant des MB avaient une résistance significativement plus élevée que ceux des mortiers M0 à température ambiante. Après une exposition à 100 ° C, la résistance à la compression des mortiers sans filler a été réduite. Les résultats ont montré une récupération de force de 20% pour les mortiers M3 après chauffage à 500 ° C par rapport à 300 ° C. Ces gains à 500 ° C sont attribués à l'augmentation des forces entre les particules de gel (forces de Van der Waals) due à l'élimination de la teneur en eau [M. Belouadah, 2019].

Le comportement du mortier exposé aux hautes températures est similaire de celui du mortier témoin. Pour tout le mortier, on observe après une augmentation importante de la résistance en compression entre 100°C et 300°C. Au-delà de 300°C, on observe une diminution importante de la résistance en compression relative pour tout le mortier. Dans la plage de 500 à 700 ° C, des pertes sévères de résistance se sont produites dans tous les mortiers M0, M2 et M3. Dans cette gamme, la pâte de ciment se contracte, tandis que les granulats se dilatent. Ainsi, la zone de transition et la liaison entre les agrégats et la pâte sont affaiblies. A 700 °C, on constate que les pertes rapides de résistance à la compression de mortiers.

IV.3.2. Résistance à la traction

La figure (IV.6, 7) montre la variation de la résistance à la traction en fonction de la température pour les différents types des mortiers après 7 et 28 jours.

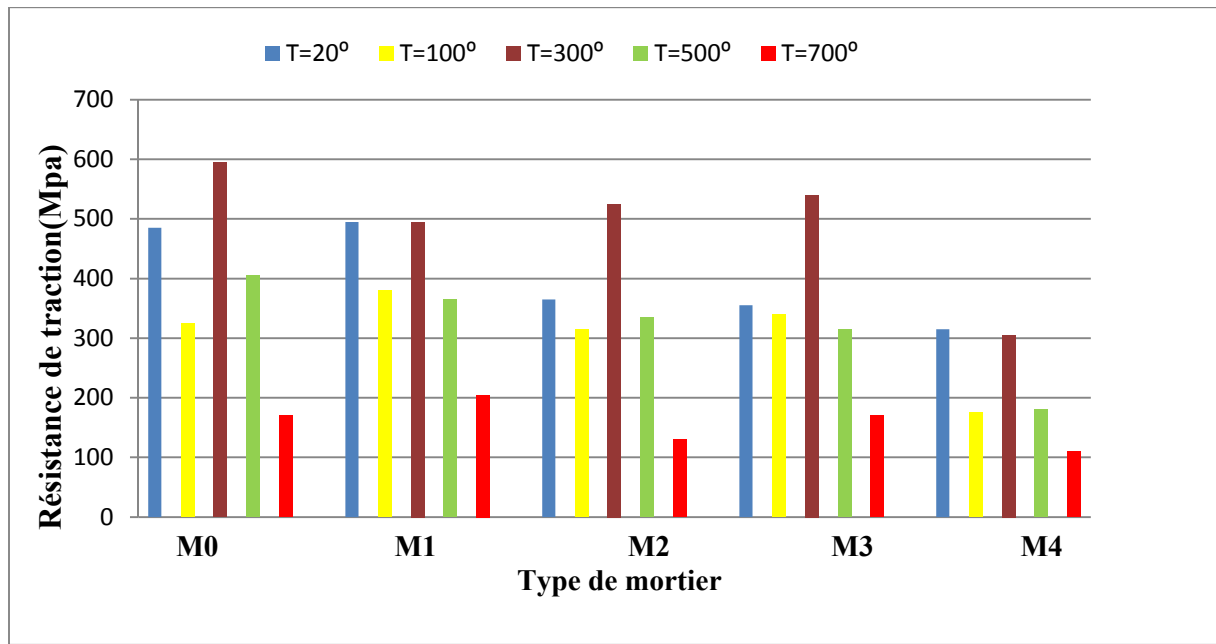


Figure IV.6 : Variation la résistance de traction en fonction de la température a 7jour

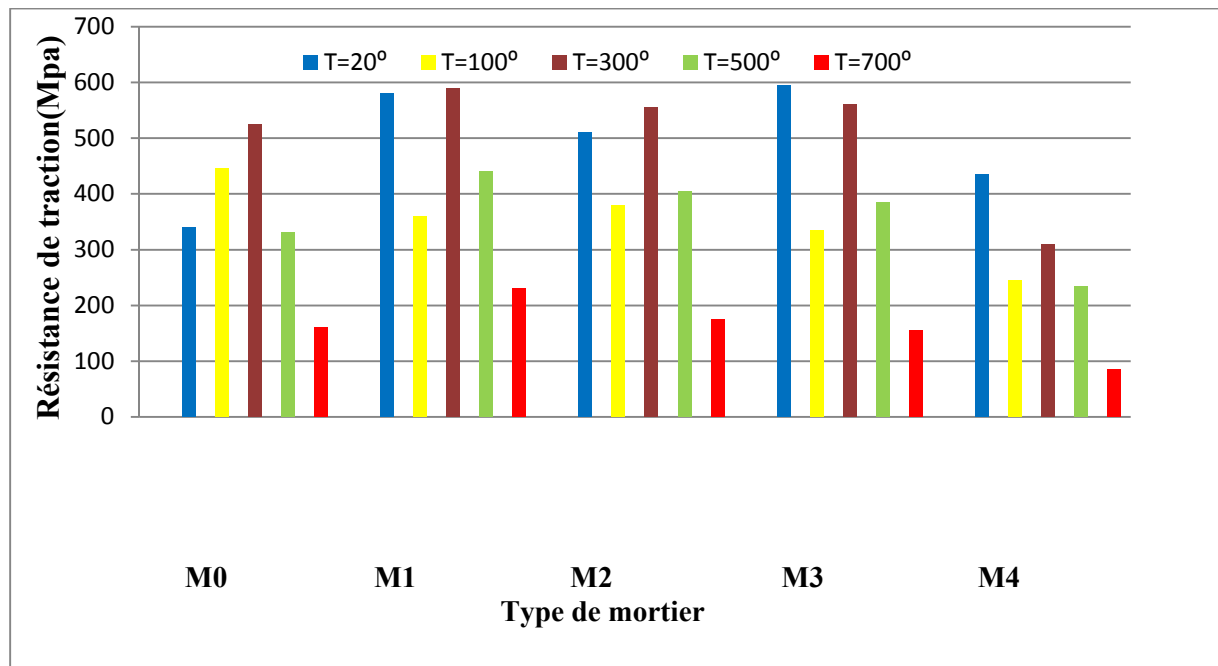


Figure IV.7 : Variation la résistance de traction en fonction de la température a 28jour

Les figures montrent et assurent que l'ajout de brique et de Métakaolin engendre une augmentation de la résistance en traction par flexion des mortiers autoplaçants en fonction du temps. Cette amélioration est importante et implique que les fillers sont en mesure de modifier le comportement de la structure du matériau.

Première phase, entre 100°C et 300°C : la résistance à la traction résiduelle est plus importante pour le mortier avec filler que pour le mortier de référence après traitement à 100°C.

Ceci correspond à l'augmentation de la résistance à la compression due à l'hydratation des particules de PB et PM par de la vapeur d'eau lors de la montée de température. □ **Deuxième phase, entre 300 °C à 700°C.** Le mortier avec filler montre une diminution de la résistance à la traction plus forte que celle du mortier autoplaçant de référence.

Comme la montre les figures le comportement des mortiers autoplaçants avec filler exposé aux hautes températures diffère de celui du mortier témoin. Pour ce dernier, on observe une décroissance monotone de la résistance à la traction. On observe une augmentation importante de la résistance à la traction entre 20°C et 300°C. Au-delà de 500°C, on observe une diminution importante de la résistance à la traction relative pour tous les mortiers. À 700°C, les valeurs de résistance à la traction sont très faibles. En augmentant la température, la résistance à la traction des différents types de mortier étudié diminue. A 700°C, on constate une diminution assez importante des résistances

IV.3.3. La résistance à la flexion

La figure (IV.8, 9) montre la variation de la résistance à la traction en fonction de la température pour les différents types du mortier autoplaçant

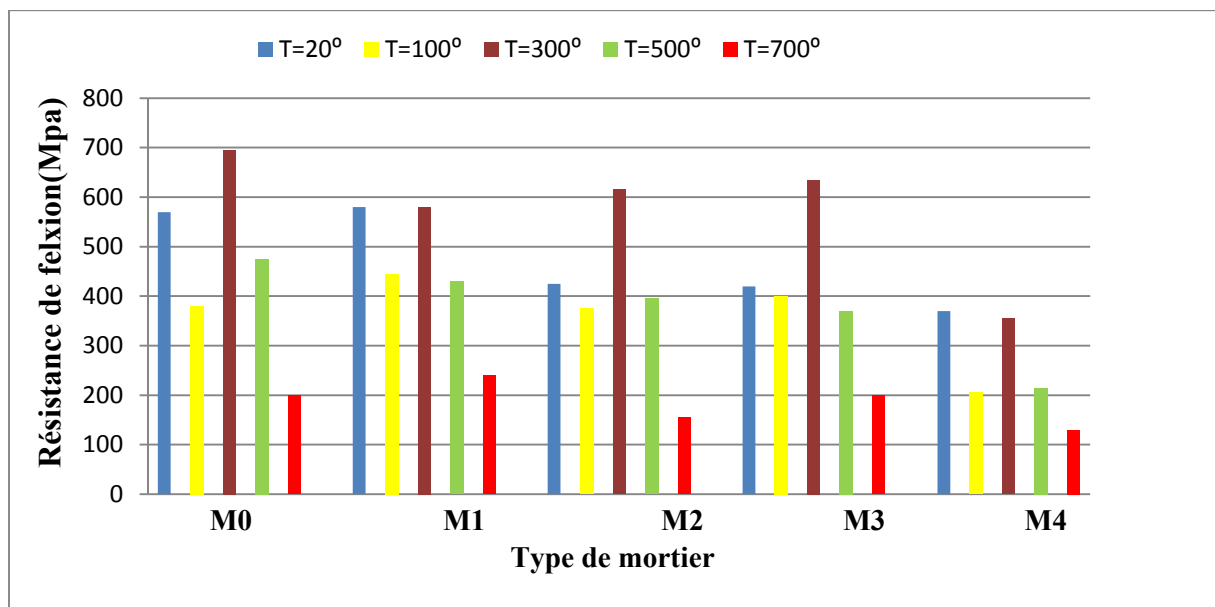


Figure IV.8 : Variation la résistance de flexion en fonction de la température a 7jour

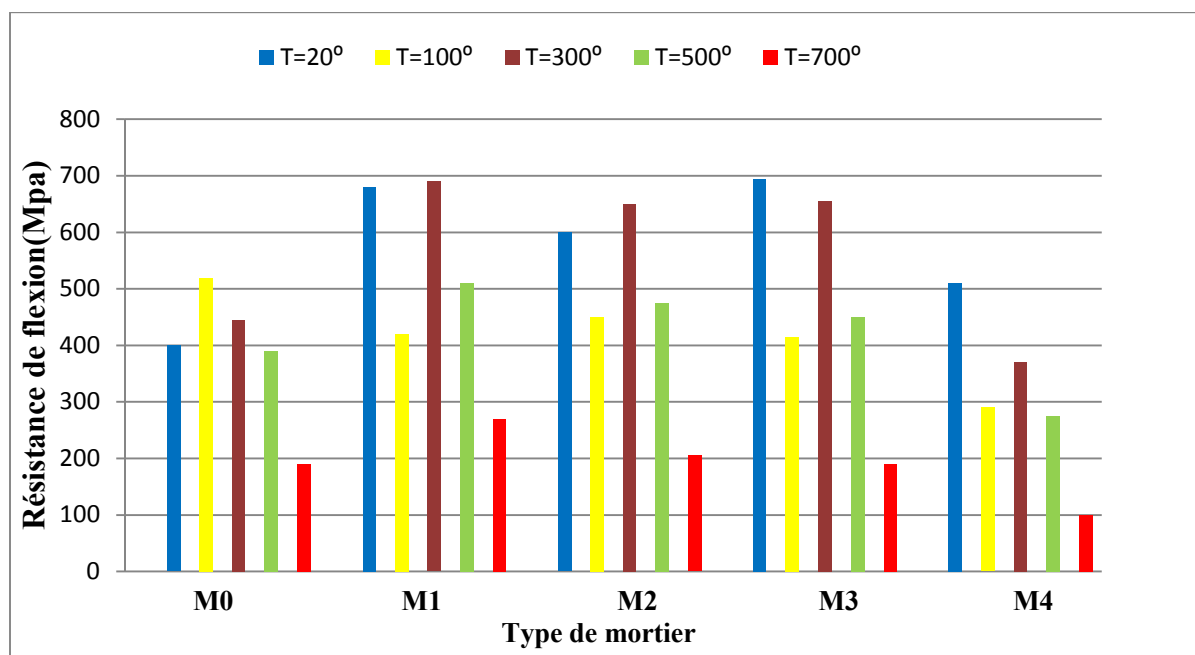


Figure IV.9 : Variation la résistance de flexion en fonction de la température à 28jour

On remarque sur les figures (IV.8), (IV, 9) le développement de la résistance R_f avec le temps et que toutes les compositions ayant des résistances à la flexion R_f comprises entre 400 MPa et 680 MPa à 7j et à 28 jours. Les compositions M1, M2 et M8 ont donné les meilleures résistances R_f comprises entre 510 et 680MPa. et dans cette période la résistance R_f 7j est plus de 75% de la résistance à 28 jours due au traitement à 20°C et à l'accélération du processus d'hydratation de ciment ce qui augmente la résistance à jeune âge.

La première phase, entre 100 °C et 300 °C nous notons une augmentation des résistances d'environ 13 à 17%. Cela est dû à la réaction de la poudre de brique avec de l'hydroxyde de calcium s'est formée pendant l'hydratation du ciment qui a provoqué la formation d'hydrate de silicate de calcium (CSH) ainsi que le rôle de charge de très fines particules de brique.

Puis, en deuxième phase entre 300°C et 700°C, nous observons une diminution des valeurs de la résistance par rapport à la valeur plus faible à 100°C. Ceci peut être expliqué par l'augmentation du processus de séchage.

IV.3.4. La Vitesse d'ultrason

La figure (IV.10, 11) montre la variation de la résistance à la traction en fonction de la température pour les différents types des mortiers

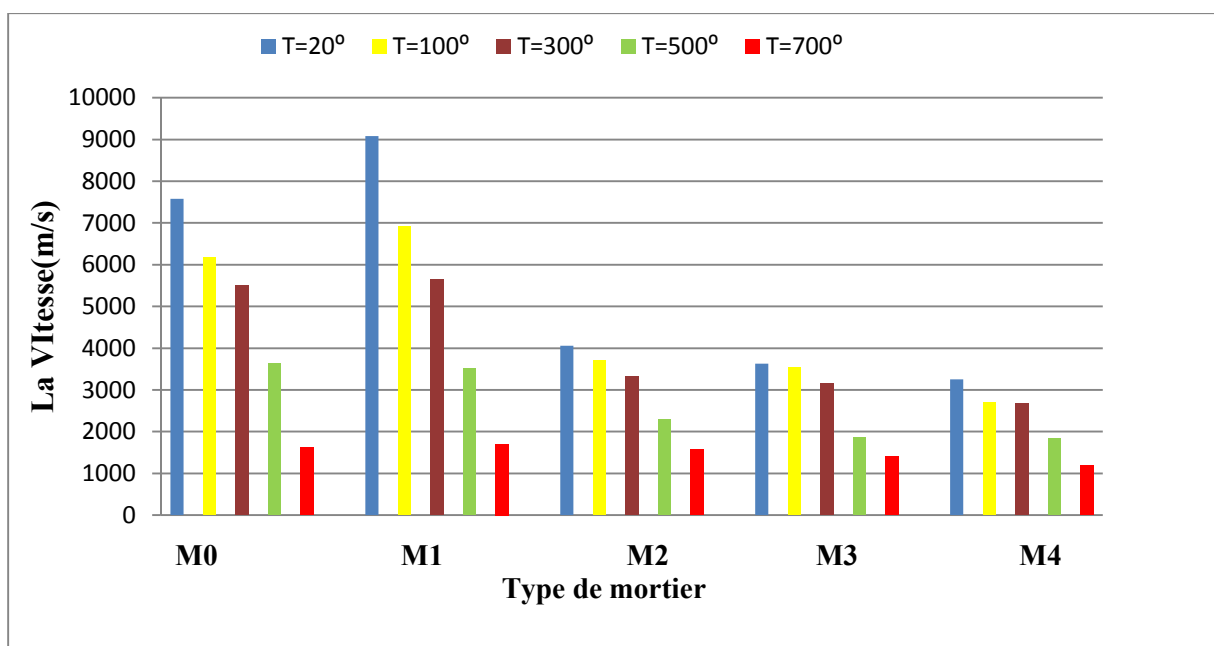


Figure IV.10 : Variation la Vitesse d’ultrason en fonction de la température a 7jour

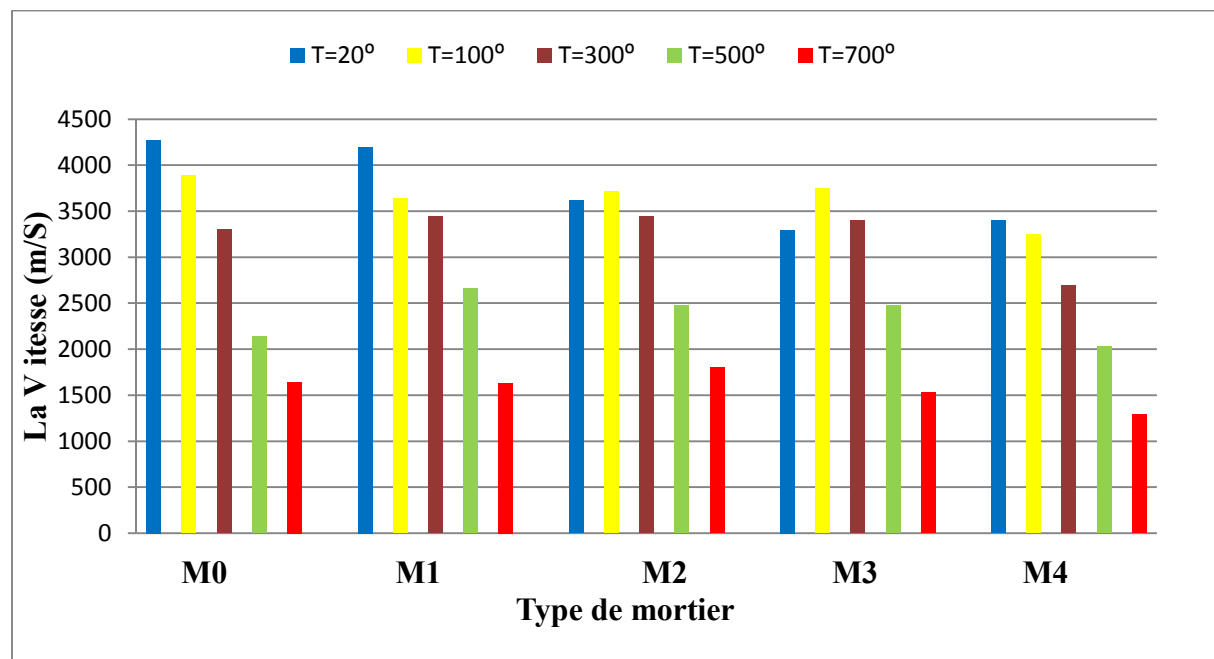


Figure IV.11 : Variation la Vitesse d’ultrason en fonction de la température a 28jour

A partir de la figure IV.10 et IV 11. Nous pouvons observer une diminution de la Vitesse des ondes ultrason avec l'augmentation de la température. Cette baisse de la Vitesse résulte de l'endommagement produit par le chauffage du mortier, ce qui est en accord avec les résultats de la littérature [35], [37].

IV.3.5. La perte de masse

La valeur de la perte de masse est une moyenne des mesures effectuées sur trois éprouvettes pour chaque type de mortier autoplaçant. Les courbes de la perte de masse en fonction de la température sont présentées sur les figures (V.12), (V.13).

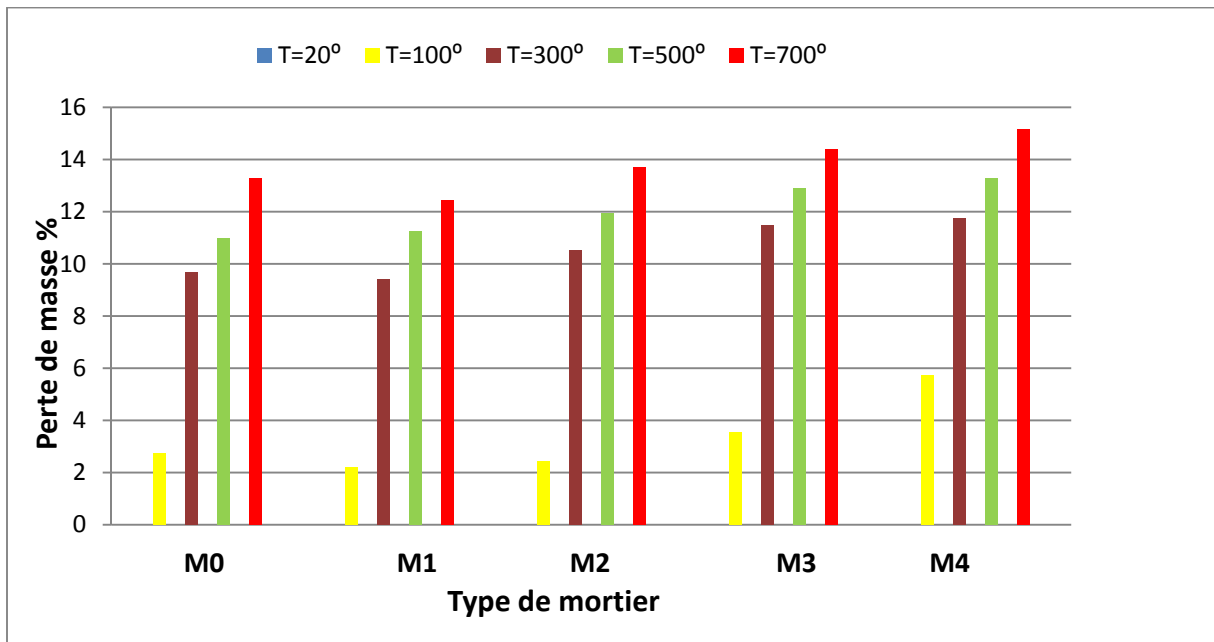


Figure IV.12 : Variation Perte de masse en fonction de la température a 7jour

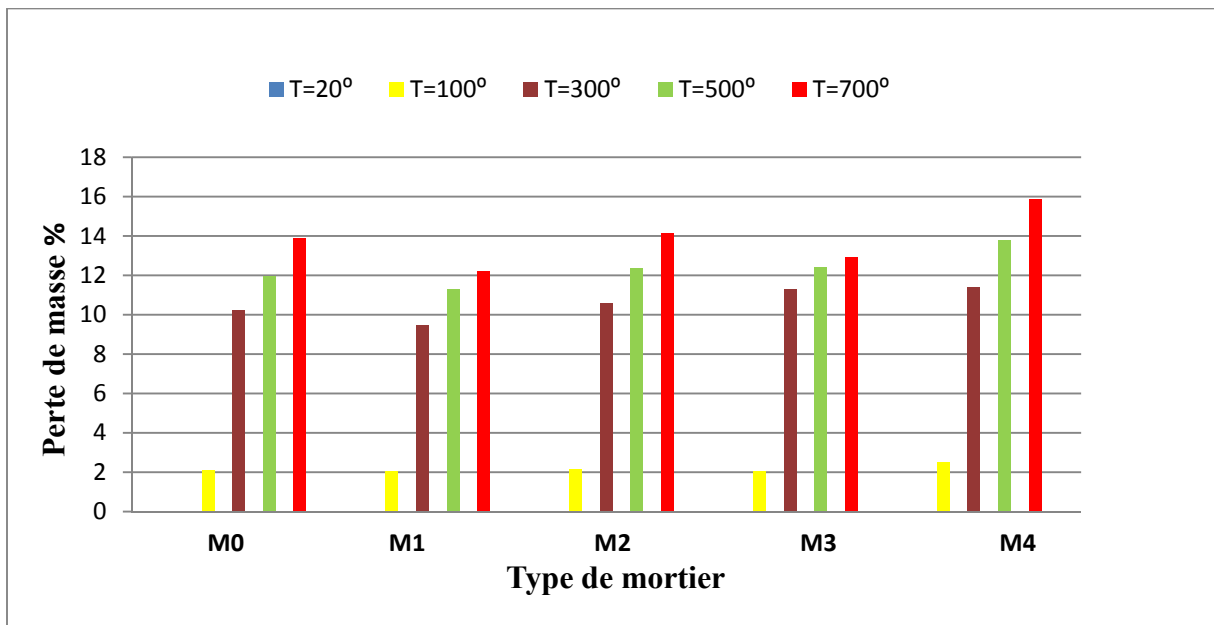


Figure IV.13: Perte de masse en fonction de la température à 28jour

D'après les figures, on constate que la perte de masse augmente progressivement avec l'augmentation de la température jusqu'à 700°C. A 500°C, les différents mortiers filler ont

présenté une perte de masse presque de même grandeur. Alors que pour une température de 700°C, c'est le mortier de filler qui a présenté une perte de masse assez importante.

Pour la composition M4 on remarque une augmentation de perte de masse avec l'augmentation de la température jusqu'à 15,86% à 700°C.

Pour la composition M1 on remarque une faible perte de masse jusqu'à 700°C par rapport aux autres compositions.

Entre 20 et 100°C, la perte de masse faible, par contre entre 100 et 700°C, il y a une perte de masse augmentée rapidement.

IV.4. Evolution de la surface fissurée des éprouvettes

IV.4.1 Étude de corrélation

IV.4.1.1. la corrélation (Rc) en fonction de (V) pour M0

A partir de cette figure (IV.14), nous concluons à une corrélation entre les mesures de la Vitesse ultrason et la Résistance à la compression Par une formule de forme linéaire, présentée par l'équation (IV.1) ayant un coefficient de corrélation R.

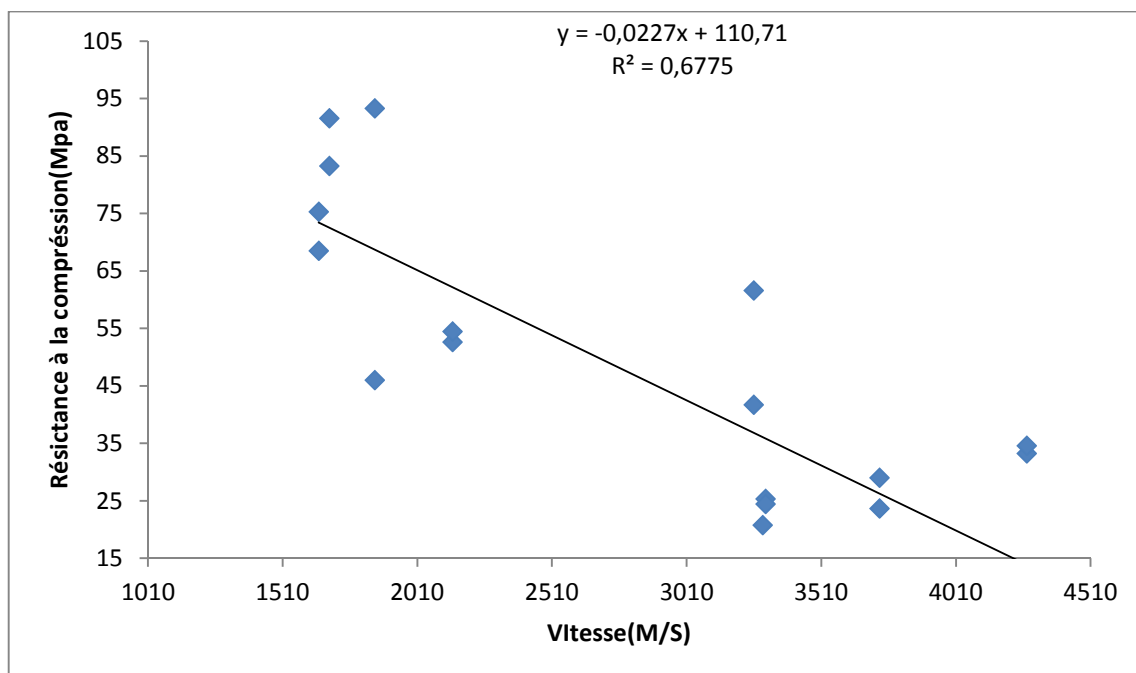


Figure IV.14 : la corrélation (Rc) en fonction de (V) pour M0 à 28 jours.

$$R_c = -0,022V + 110,7 \quad (\text{IV.1})$$

$$R^2 = 0,677$$

De cette figure on conclut que si les mesures de la Vitesse ultrason et la Résistance à la compression on obtient un bon coefficient de corrélation ($R^2 = 0,677$).

IV.4.1.2. La corrélation (R_c) en fonction de (V) pour M2

A partir de cette figure (IV.15), nous concluons à une corrélation entre les mesures de la Vitesse ultrason et la Résistance à la compression Par une formule de forme linéaire, présentée par l'équation (IV.2) ayant un coefficient de corrélation R .

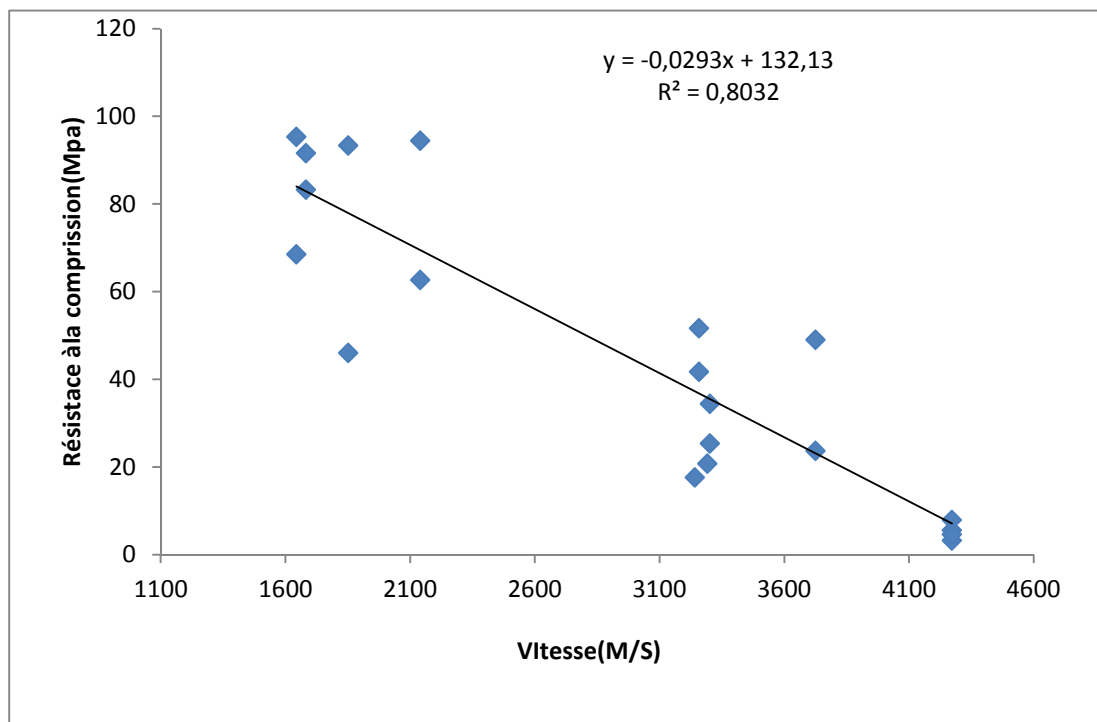


Figure IV.15 : la corrélation (R_c) en fonction de (V) pour M2 à 28 jours

$$R = -0,029V + 132,1 \quad (\text{IV.2})$$

$$R^2 = 0,803$$

Aussi, de cette figure on conclut que si les mesures de la Vitesse ultrason et la Résistance à la compression on obtient un très bon coefficient de corrélation ($R^2 = 0,803$).

IV.4.1.3. La corrélation (R_c) en fonction de (V) pour M4

A partir de cette figure (IV.16), nous concluons à une corrélation entre les mesures de la

Vitesse ultrason et la Résistance à la compression Par une formule de forme linéaire, présentée par l'équation (IV.3) ayant un coefficient de corrélation R.

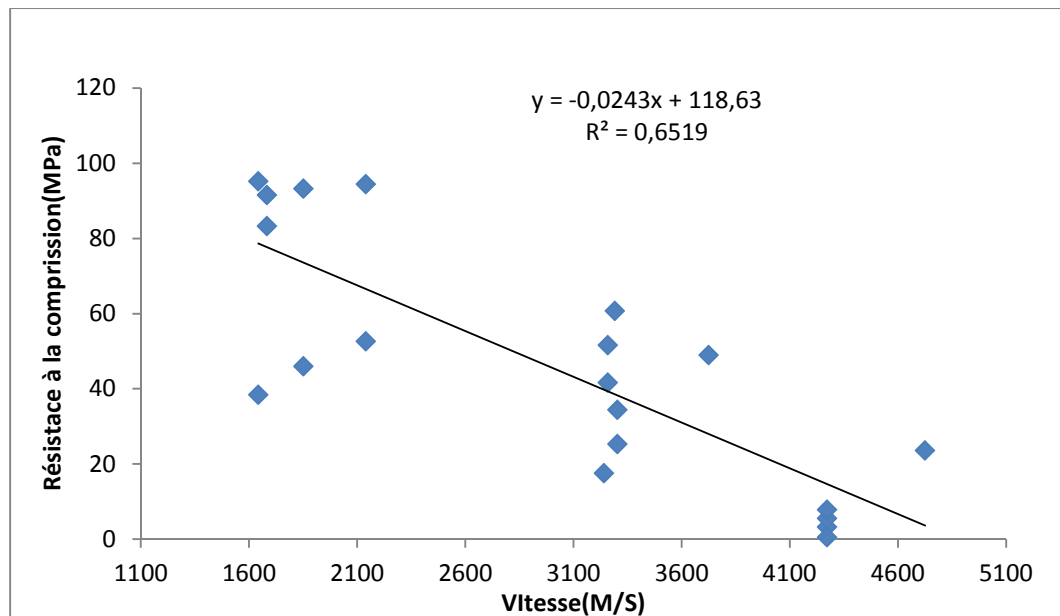


Figure IV.16 : la corrélation (Rc) en fonction de (V) pour M4 à 28 jours

$$R = -0,024V + 118,6 \quad (IV.3)$$

$$R^2 = 0,803$$

IV.4.2. Étude de corrélation entre (Perte) et (V)

IV.4.2.1. La corrélation (Perte) en fonction de (V) pour M0

A partir de cette figure (IV.17), nous concluons à une corrélation entre les mesures de la Vitesse ultrason et la perte de masse Par une formule de forme linéaire, présentée par l'équation (IV.4) ayant un coefficient de corrélation R.

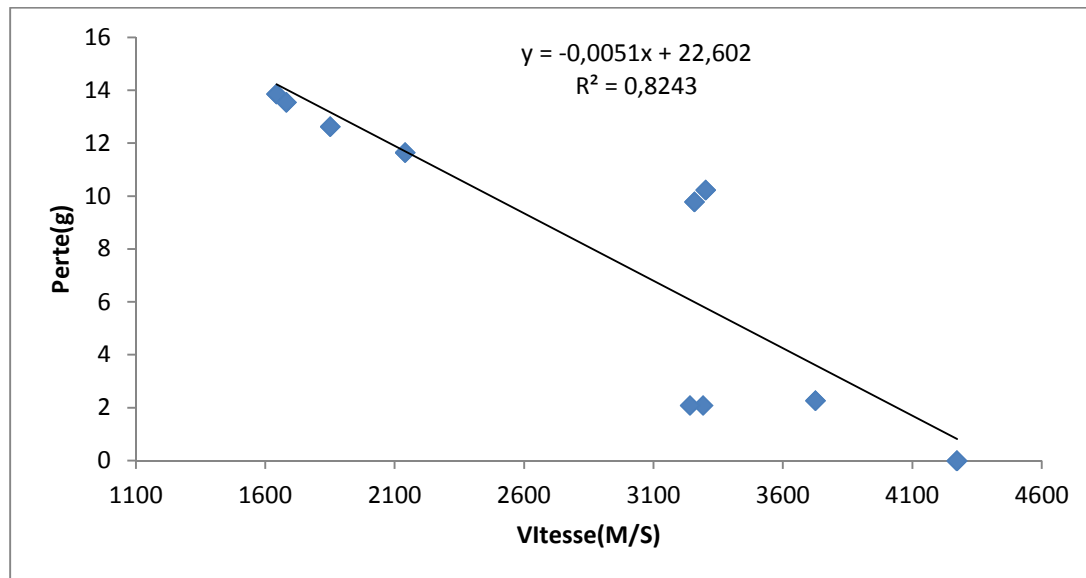


Figure IV.17 : la corrélation (Pert) en fonction de (V) pour M0 à 28 jours

$$R = -0,005V + 22,60 \quad (\text{IV.4})$$

$$R^2 = 0,824$$

Aussi, de cette figure on conclut que si les mesures de la Vitesse ultrason et la Résistance à la compression on obtient un très bon coefficient de corrélation ($R^2 = 0,824$).

IV.4.2.2. La corrélation (perte) en fonction de (V) pour M2

A partir de cette figure (IV.18), nous concluons à une corrélation entre les mesures de la Vitesse ultrason et la perte de masse Par une formule de forme linéaire, présentée par l'équation (IV.5) ayant un coefficient de corrélation R.

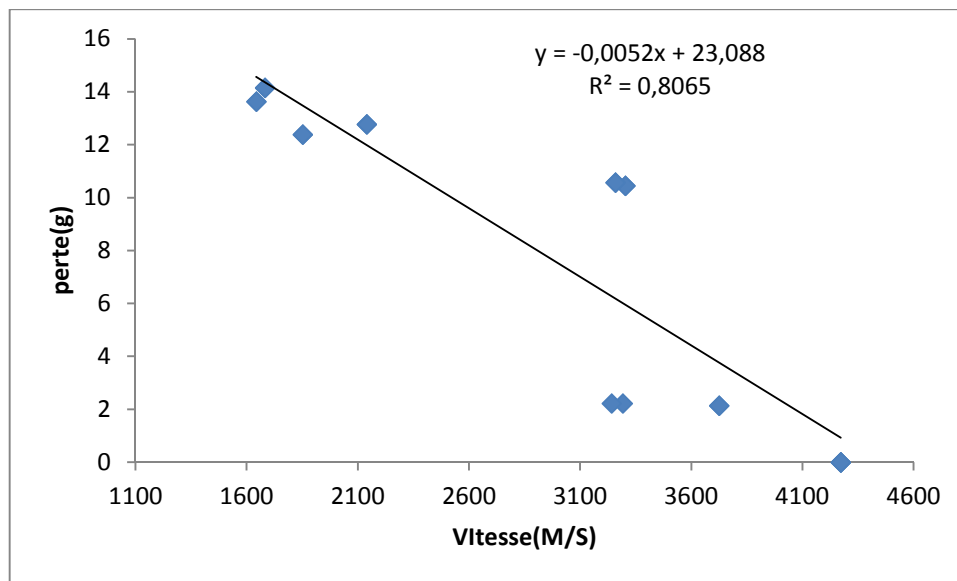


Figure IV.18 : la corrélation (Pert) en fonction de (V) pour M2 à 28 jours

$$R = -0,005V + 23,08 \quad (\text{IV.5})$$

$$R^2 = 0,806$$

Aussi, de cette figure on conclut que si les mesures de la Vitesse ultrason et la Résistance à la compression on obtient un très bon coefficient de corrélation ($R^2 = 0,806$).

IV.4.2.3. La corrélation (perte) en fonction de (V) pour M4

A partir de cette figure (IV.19), nous concluons à une corrélation entre les mesures de la Vitesse ultrason et la perte de masse Par une formule de forme linéaire, présentée par l'équation (IV.6) ayant un coefficient de corrélation R.

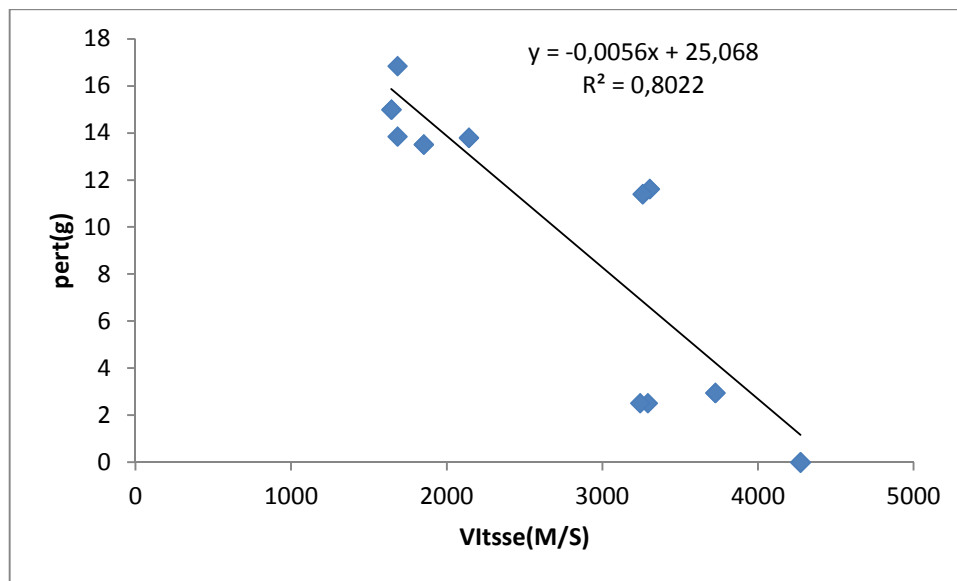


Figure IV.19: la corrélation (Pert) en fonction de (V) pour M4 à 28 jours

$$R = -0,005V + 25,06 \quad (\text{IV.6})$$

$$R^2 = 0,802$$

Aussi, de cette figure on conclut que si les mesures de la Vitesse ultrason et la Résistance à la compression on obtient un très bon coefficient de corrélation ($R^2 = 0,802$).

IV.4.3.1. La corrélation (Pert) en fonction de (Rc) pour M0

A partir de cette figure (IV.20), nous concluons à une corrélation entre les mesures de la Résistance à la compression et la Perte de masse Par une formule de forme linéaire, présentée par l'équation (IV.7) ayant un coefficient de corrélation R.

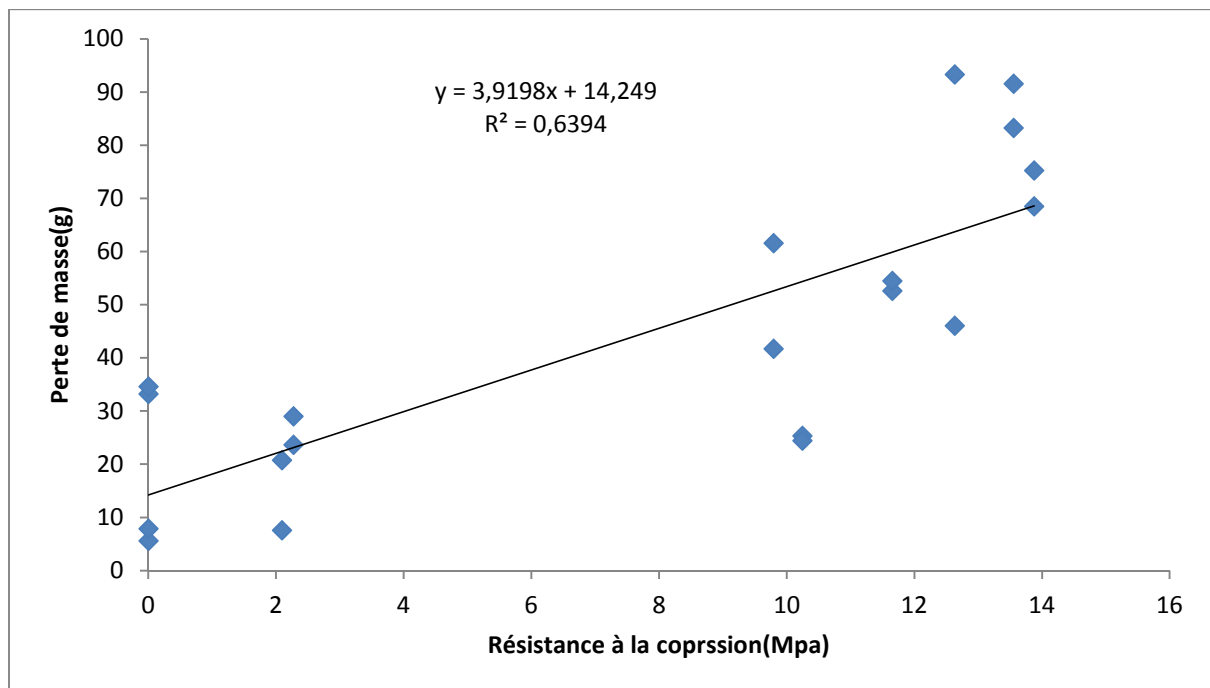


Figure IV.20: la corrélation (Pert) en fonction de (Rc) pour M0 à 28 jours

$$R = -3,919V + 14,24 \quad (\text{IV.7})$$

$$R^2 = 0,639$$

Aussi, de cette figure on conclut que si les mesures de la Vitesse ultrason et la Résistance à la compression on obtient un bon coefficient de corrélation ($R^2 = 0,639$).

IV.4.3.2. La corrélation (Pert) en fonction de (Rc) pour M2

A partir de cette figure (IV.21), nous concluons à une corrélation entre les mesures de la Résistance à la compression et la Perte de masse Par une formule de forme linéaire, présentée par l'équation (IV.8) ayant un coefficient de corrélation R.

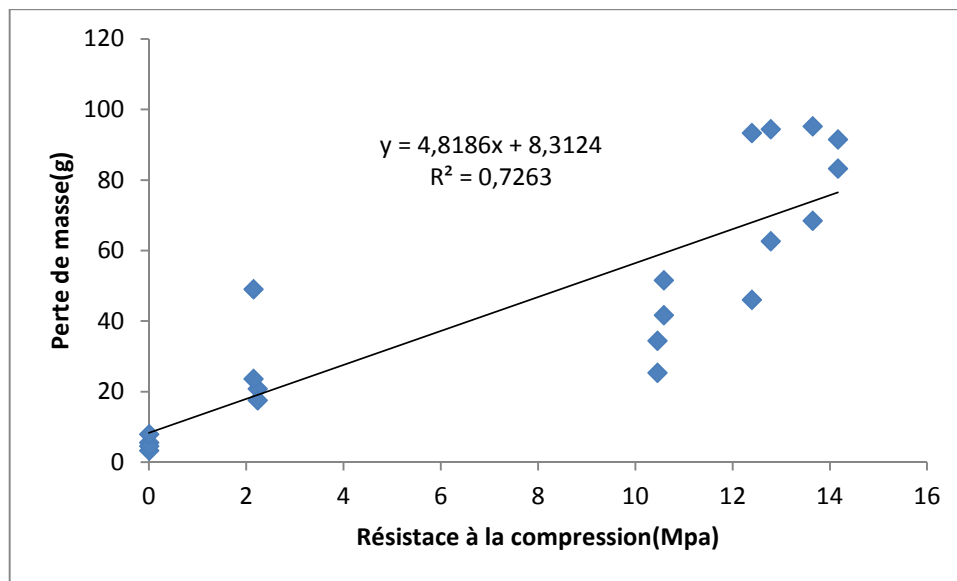


Figure IV.21: : la corrélation (Pert) en fonction de (Rc) pour M2 à 28 jours

$$R = -3,919V + 14,24 \quad (\text{IV.8})$$

$$R^2 = 0,639$$

Aussi, de cette figure on conclut que si les mesures de la Vitesse ultrason et la Résistance à la compression on obtient un bon coefficient de corrélation ($R^2 = 0,639$).

IV.4.3.3. La corrélation (Pert) en fonction de (Rc) pour M4

A partir de cette figure (IV.22), nous concluons à une corrélation entre les mesures de la Résistance à la compression et la Perte de masse Par une formule de forme linéaire, présentée par l'équation (IV.9) ayant un coefficient de corrélation R.

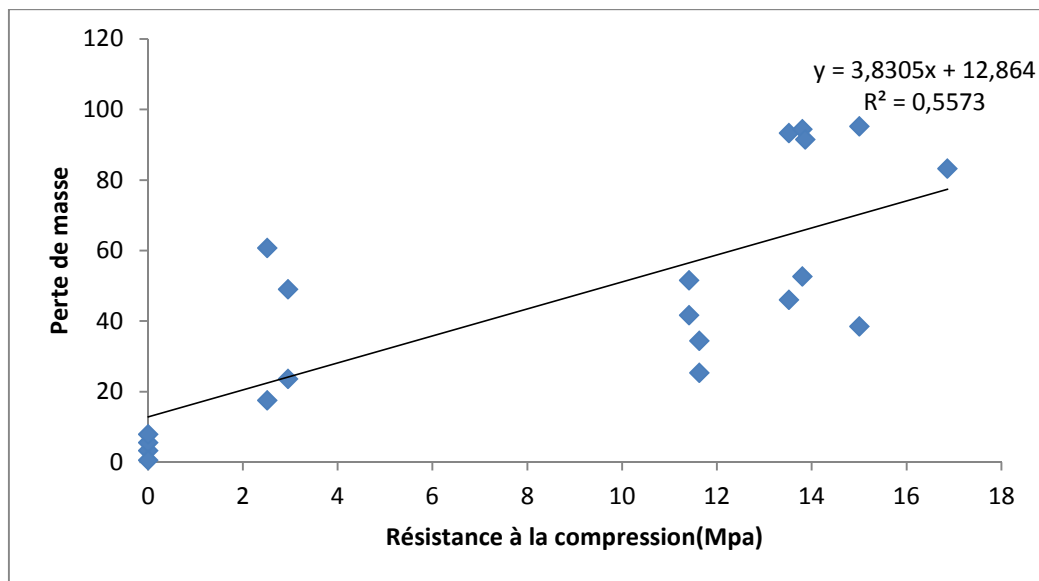


Figure IV.22: la corrélation (Pert) en fonction de (Rc) pour M4 à 28 jours

$$R = -3,919V + 14,24 \quad (IV.9)$$

$$R^2 = 0,557$$

Aussi, de cette figure on conclut que si les mesures de la Vitesse ultrason et la Résistance à la compression on obtient un faible coefficient de corrélation ($R^2 = 0,557$).

IV.4.4. Étude de corrélation entre (Rt) et (V)

IV.4.4.1. La corrélation (Rf) en fonction de (V) pour M0

A partir de cette figure (IV.23), nous concluons à une corrélation entre les mesures de la Résistance à la flexion et la Vitesse ultrason Par une formule de forme linéaire, présentée par l'équation (IV.10) ayant un coefficient de corrélation R.

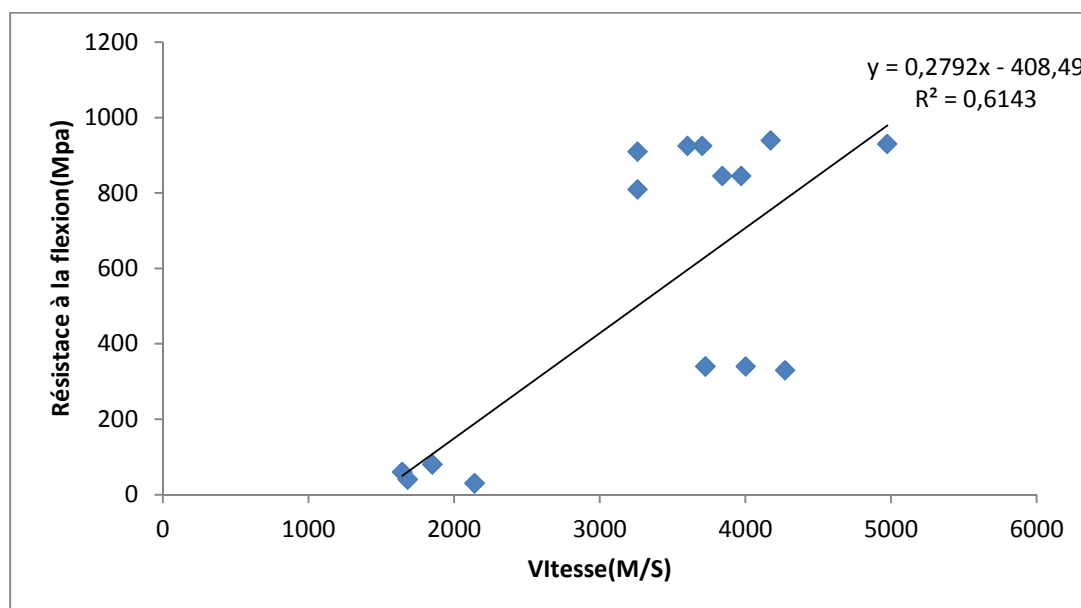


Figure IV.23: la corrélation (Rf) en fonction de (v) pour M0 à 28 jours

$$R = -0,279V - 408,4 \quad (\text{IV.10})$$

$$R^2 = 0,614$$

Aussi, de cette figure on conclut que si les mesures de la Vitesse ultrason et la Résistance à la compression on obtient un bon coefficient de corrélation ($R^2 = 0,614$).

IV.4.4.2. La corrélation (Rf) en fonction de (V) pour M2

A partir de cette figure (IV.24), nous concluons à une corrélation entre les mesures de la Résistance à la flexion et la Vitesse ultrason Par une formule de forme linéaire, présentée par l'équation (IV.11) ayant un coefficient de corrélation R.

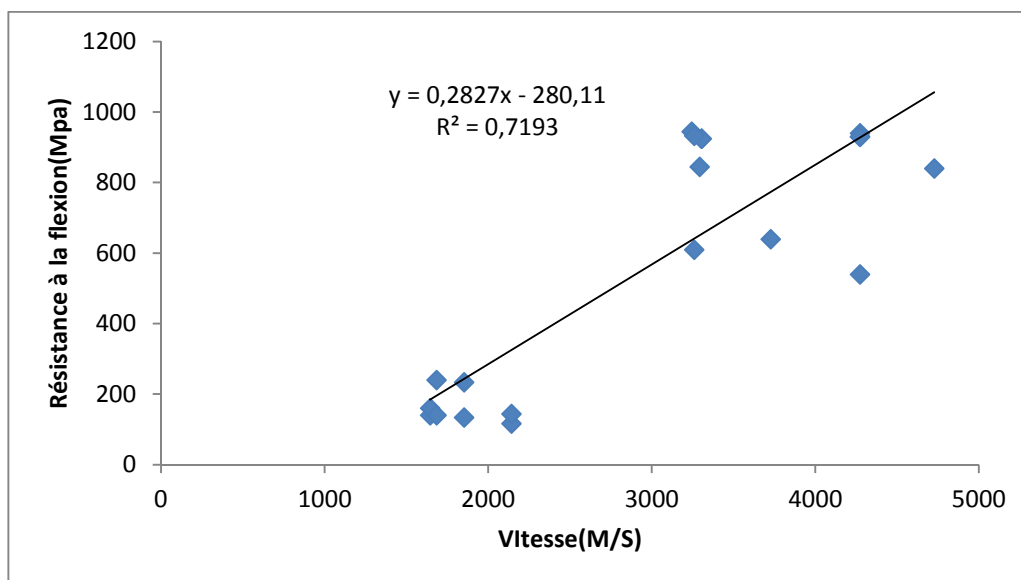


Figure IV.24: la corrélation (Rf) en fonction de (v) pour M0 à 28 jours

$$R = -0,282V - 208,1 \quad (\text{IV.11})$$

$$R^2 = 0,719$$

Aussi, de cette figure on conclut que si les mesures de la Vitesse ultrason et la Résistance à la compression on obtient un très bon coefficient de corrélation ($R^2 = 0,719$).

IV.4.4.3. La corrélation (Rf) en fonction de (V) pour M4

A partir de cette figure (IV.25), nous concluons à une corrélation entre les mesures de la Résistance à la flexion et la Vitesse ultrason Par une formule de forme linéaire, présentée par l'équation (IV.12) ayant un coefficient de corrélation R.

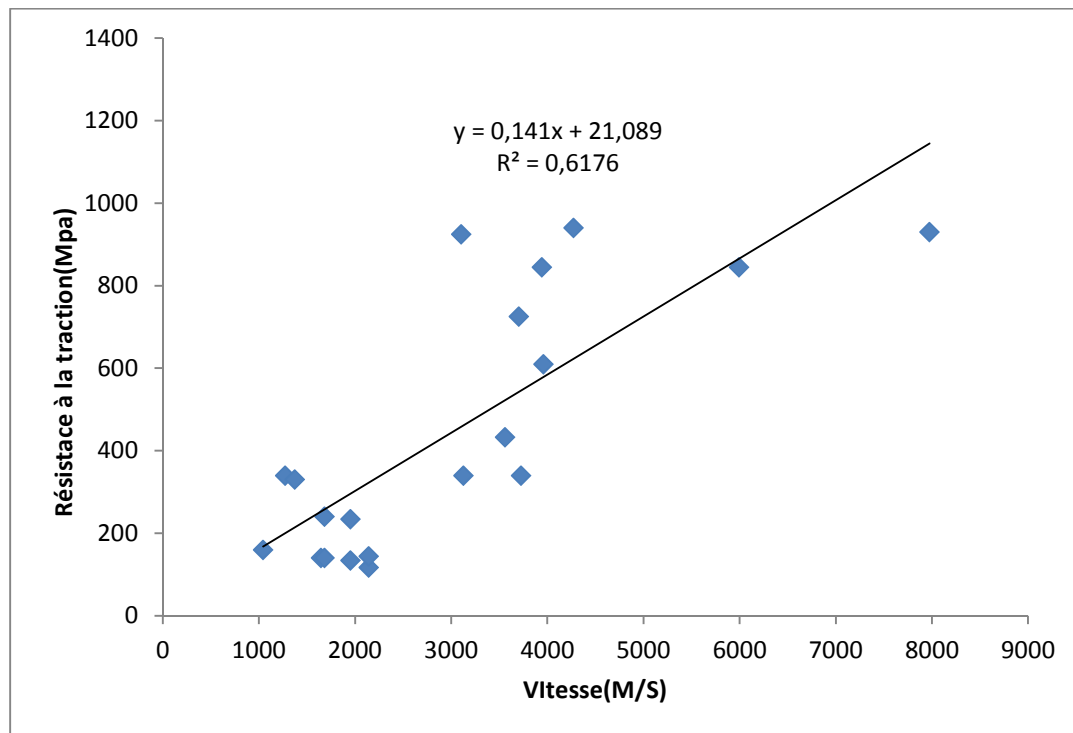


Figure IV.25: la corrélation (Rf) en fonction de (v) pour M0 à 28 jours

$$R = -0,141V + 21,08 \quad (\text{IV.12})$$

$$R^2 = 0,617$$

Aussi, de cette figure ont conclu que si les mesures de la Vitesse ultrason et la Résistance à la compression on obtient un bon coefficient de corrélation ($R^2 = 0,617$).

Conclusions

Dans ce chapitre, on a présenté les résultats des travaux expérimentaux sur l'effet de la température sur les mortiers autoplçant formulés du point de vue :

- ❖ L'augmentation de dosage de poudre de brique augmente la résistance à compression et flexion qui reste toujours supérieure à la résistance de mortier autoplçant témoin à 28jours quel que soit la température ;
- ❖ La résistance à la flexion et la compression du mortier autoplçant augmente en fonction de l'âge, et l'ajout de brique proposé engendre une amélioration acceptable ;
- ❖ Le filler utilisé a un effet positif sur l'amélioration des propriétés mécaniques du Mortier exposée de haute température ;
- ❖ D'après les résultats on constate une diminution de la densité des différents mortiers avec l'augmentation de la température. La perte de masse des mortiers autoplçants références est inférieure à celle du mortier à base de poudre de brique mais supérieure légèrement à celle du mortier autoplçant contenant des poudres de Métakaolin.

Conclusion Générale

L'objectif principal de cette étude a été la valorisation de déchets de brique sous forme de poudre fine comme substitution au ciment et d'analyser son effet sur les propriétés physiques, mécaniques sur le mortier auto plaçant.

Les pourcentages de substitution du ciment par les fines de déchets de brique sont : 0%, 5%, 10%, 15% et 10% et les fines de poudre de Métakaolin. Les résultats obtenus lors de cette étude, nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

Le comportement du mortier exposé aux hautes températures est similaire de celui du mortier témoin. Pour tout le mortier, on observe après une augmentation importante de la résistance en compression entre 100°C et 300°C. Au-delà de 300°C, on observe une diminution importante de la résistance en compression relative pour tout le mortier. Dans la plage de 500 à 700 °C, des pertes sévères de résistance se sont produites dans tous les mortiers M0, M2 et M3. Dans cette gamme, la pâte de ciment se contracte, tandis que les granulats se dilatent. Ainsi, la zone de transition et la liaison entre les agrégats et la pâte sont affaiblies. A 700 °C, On constate que les pertes de résistance à la compression de mortiers autoplaçants avec filler exposé aux hautes températures diffère de celui du mortier témoin.

D'après les figures, on constate que la perte de masse augmente progressivement avec l'augmentation de la température jusqu'à 700°C. A 500°C, les différents mortiers filler ont présenté une perte de masse presque de même grandeur. Alors que pour une température de 700°C, c'est le mortier de filler qui a présenté une perte de masse assez importante.

L'augmentation de dosage de poudre de brique augmente la résistance à compression et flexion qui reste toujours supérieure à la résistance de mortier autoplaçant témoin à 28 jours quel que soit la température ;

La résistance à la flexion et la compression du mortier autoplaçant augmente en fonction de l'âge, et l'ajout de brique proposés engendre une amélioration acceptable ;

Le filler utilisé a un effet positif sur l'amélioration des propriétés mécaniques du Mortier exposé à haute température ;

D'après les résultats on constate une diminution de la densité des différents mortiers avec l'augmentation de la température. La perte de masse des mortiers autoplaçants références est inférieure à celle du mortier à base de poudre de brique mais supérieure légèrement à celle du mortier autoplaçant contenant des poudres de Métakaolin.



Référence

Références bibliographiques

- [1] **Mounir Bellem** « Valorisation des déchets plastiques pour l'amélioration des performances mécaniques des mortiers » mémoire de master, université de M'sila, juin 2013.
- [2] **TURCRY PH**, "Retrait et Fissuration des Bétons Autoplaçants : Influence de la formulation", Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, Février 2004
- [3] **Boukni.B**, "Tenue au feu des bétons autoplaçants", thèse de magister UMC, 2007.
- [4] **BENSEBTI S.E**, "Formulation et propriétés des bétons autoplaçants à base de matériaux locaux", Thèse de Doctorat, Université de Constantine 2008.
- [5] **K.H. KHAYAT, A. GHEZAL & M. HADRICHE 1999**: Factorial design models for proportioning self-consolidating concrete. RILEM Materials and Structures. 1999
- [6] **Philippe Turcry** de l'université de Nantes, Retrait et Fissuration des Bétons autoplaçants influence de la Formulation. Thèse de doctorat lieu et année
- [7] **De Larrard F.**, "Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances", Rapport de recherche des laboratoires des Ponts et Chaussées, N0 149, France, 1987.
- [8] **Didier LOOTENS** L'université Pierre et Marie Curie, Ciments et suspensions concentrées modèles. Écoulement, encombrement et floculation. Thèse de Doctorat
- [9] **Khayat, 2004** : Khayat, K.H., Assaad, J., Daczko J., (2004). "Comparison of Field-oriented Test Methods to Assess Dynamic Stability of Self-Consolidated Concrete", ACI Materials Journal, V. 101, No. 2, March –April 2004, pp. 168-176.
- [10] **J.BARON, J.P. OLLIVER**, Les bétons , bases et données pour leur formulation, Edition Eyrolles, 1999
- [11] **AbdelHamid R'MILI** : Étude de formulation et de comportement des Bétons Auto-Plaçants : Incorporation du sable de concassage et du sable du désert 13 janvier 2010.
- [12] **NEIVLLE ADAM M. (2000)** « Propriétés des bétons », Centre de Recherche Interuniversitaire (CRIB), Edition Eyrolles, 806 pages.
- [13] **CHERAITY.NAFAZ.**, Eléments de matériaux de construction et essais, Direction de la publication universitaire de Guelma, 2007
- [14] **T.W. DaIVes**, (Equipment for the study of flash heating of particules suspension). High Temperature Technology. Vol. 3, 1984, p141-147.

- [15] **Feldman R.F., Sereda P.J.** (1968) ; A model of hydrated Portland cement paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties *Revue des Matériaux de Construction, RILEM*, vol.6, pp.509-519.
- [16] **Sierra R.** (1974) ; Contribution à l'étude de l'hydratation des silicates calciques hydrauliques, Rapport de recherche n°39, Laboratoire des Ponts et Chaussées.
- [17] **Baroghel-Bouny V.** (1994) ; Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons. Méthodes, analyses, interprétations. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- [18] **Ezziane Mohammed**; Formulation et tenue au feu des matériaux cimentaires renforcés de fibres de différentes natures, thèse de doctorat, cotutelle entre L'Université Abdelhamid Ibn Badis–Mostaganem et L'Institut National des Sciences Appliquées de Rennes. 2012.
- [19] **Noumowé N.A.**, (1995) ; Effet de hautes températures (20°C-600°C) sur le béton. Cas particulier du béton à hautes performances. Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon.
- [20] **Harmathy T.Z.**, (1965) ; Effect of moisture on the fire endurance of building elements. Canada.
- [21] **Hertz K.**, (1984) ; Heat-induced explosion of dense concrete. Technical University of Denmark, Institute of Building Design, Report n°166.
- [22] **Hilsdorf H.K.**, (1967) ;
A method to estimate the water content of concrete shields. *Nuclear Engineering and Design*, vol. 6, pp. 251–263.
- [23] **Harmathy T.Z.**, (1970) ; The mechanical properties of concrete at elevated temperatures. *ASTM Journal of Materials*, vol.5, pp.47-74
- [24] **Diederichs U, Jumpanen U.M. et Penttala V.** (1992); Behaviour of high temperatures. Espoo 1989, Helsinki University of technology, Department of Structural Engineering, Report 92, pp. 723.
. John Wiley & Sons.
- [25] **Harada T, Takeda J, Yamane S, Furumura F** (1973); Strength, elasticity and thermal properties of concrete subjected to elevated temperatures *Concrete for nuclear reactors* Detroit American Concrete Institute, SP-39, pp.179-203.
- [26] **Dias W.P.S., Khoury G.A., Sullivan P.J.E.**, (1990), Mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperatures up to 700°C (1292°F). *ACI Material Journal*, vol. 87, Issue 2, pp. 160-165. Thermal properties of selected masonry unit concretes. *Journal of American*

- [27] **BEN FETTACHA ET Mohamed Abdou**: de compacité des bétons Autoplaçants aux différents types de sables Soutenue le : 04/06/2016
- [28] **V. Bastone, A. Rey, J. Druon** (2012) – Guide d'utilisation des déchets recyclés pour le BTP à la Réunion (974). Rapport final. Rapport BRGM/RP-60806-FR, 56 p., 20 fig., 10 tab
- [29] **H. H. Murray**, (Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite : a general overview), Applied Clay Science, Vol. 17, 2000, p207-221
- [30] **Okamura et al. 1999** : Okamura H. and Ouchi. M., "Self-compacting concrete, development, present use and future", In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self Compacting Concrete; RILEM,1999
- [31] **Zine El Abidine Rahmouni, Nadia Tebbal, and Imen Yamina Omri** , Effect of Curing Temperature in the Alkali-Activated Brick Waste and Glass Powder mortar and Their Influence of Mechanical resistances Geomaterials Development Laboratory, University of M'sila, M'sila (28000), Algeria
- [32] **DJEBRI, Noura**. Formulation et caractérisation d'un béton autoplaçant fibré à base de matériaux locaux exposé aux hautes températures. 2018. Thèse de doctorat. Université de M'sila.
- [33] **NABIL, GUERBAS** 2017, Etude de l'effet des températures élevées sur les propriétés mécaniques d'un béton autoplaçant renforcé par des fibres métalliques
- [34] **Tebbal Nadia, Rahmouni Zine El Abidine, Maza Mekki, Djendi Zoubir**, 2022, Combined effect of high temperatures and crystalline slag on the mechanical behavior of geopolymers mortars Author links open overlay panel
- [35] **M Belouadah, ZE Rahmouni, N Tebbal, MEH Hicham**, Evaluation of concretes made with marble waste using destructive and non-destructive testing, Annales de Chimie - Science des Matériaux 45 (5), 361-368
- [36] **Messaouda Belouadah, Zine El Abidine Rahmouni and Nadia Tebbal**. 2018.6.3, Effects of glass powder on the characteristics of concrete subjected to high temperatures.
- [37] **Refice, Sara ; Zerrouki, Imane; Enca/ Rahmouni, Zine El Abidine** 2021-07-17 L'influence de sable substitué par du briques sur l'évolution des propriétés physiques et mécaniques des mortiers soumis à de hautes températures
- [38] **M Belouadah, ZEA Rahmouni, N Tebbal**, Effects of glass powder on the characteristics of concrete subjected to high temperatures, Advances in concrete construction 6 (3), 311

[39] **Djablahi, El Khnsa; Dehimene, Chaima; Enca/ RAHMOUNI, Zine El Abidine** 2022-07-25 Effet des températures élevées sur les mortiers renforcés de fibre métallique contenant les déchets de brique

[40] **M Belouadah, ZEA Rahmouni, N Tebbal**, Influence of the addition of glass powder and marble powder on the physical and mechanical behavior of composite cement, *Procedia Computer Science* 158, 366-375

ANNEXE A : Fiche technique du MEDAFLOW 30

NOTICE TECHNIQUE

2 1 1 9

MEDAFLOW 30

Conforme à la norme EN 834-2/TAB 1, TAB 3.1
ET TAB 3.2/NA 774.

Super plastifiant

Haut réducteur d'eau

DESCRIPTION

Le MEDAFLOW 30 est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates d'Ether qui améliorent considérablement les propriétés des bétons.

Le MEDAFLOW 30 permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet sans modifier la consistance, de réduire fortement la teneur en eau du béton.

Le MEDAFLOW 30 ne présente pas d'effet de retard de prise.

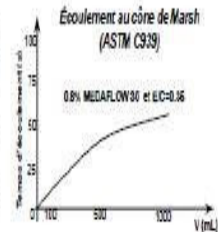
DOMAINES D'APPLICATION

- Les bétons de préfabrication.
- Les bétons prêts à l'emploi.
- Les bétons lourds et légers.
- Les bétons d'ouvrages d'art.
- Les bétons de installations industrielles.
- Les bétons de bâtiment.
- Les bétons précontraints.
- Les bétons pompés.
- Les bétons pour fondations profondes.
- Les bétons pour ouvrages fortement ferrillés.
- Les bétons soumis à des milieux agressifs.
- Les BHP, BTHP et BUHP.
- Les bétons autonivelants - bétons autoplaçants.
- Les bétons architectoniques.

PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le MEDAFLOW 30 permet :

- Sur béton frais :
- Obtention d'un rapport E/C très faible
 - Amélioration considérable de la fluidité
 - Une très bonne maniabilité
 - Éviter la ségrégation
 - Faciliter la mise en oeuvre du béton



Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme (voir tableau).
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait et le risque de fissuration

Désignation	Rc (MPa)		
	3J	7J	28J
MEDAFLOW 30 (1.4%)	39.2	54.7	62.2

CARACTÉRISTIQUES

- Aspect Liquide
- Couleur Brun clair
- pH 6 - 8,5
- Densité 1,07 ± 0,01
- Teneur en chlore < 0,1 g/l
- Extrait sec 30%

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de conformance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Zone Industrielle Oued Smar - BP85 Oued Smar - 16270 Alger
Tél : (213) 021 51 66 81 & 82
Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 13
www.granitez.dz - E-mail: granitez@granitez.dz



82

NOTICE TECHNIQUE

2 1 1 9

MEDAFLOW 30

MODE D'EMPLOI

Le MEDAFLOW 30 ne doit pas être ajouté directement dans l'eau de gâchage, mais après un temps préalable de malaxage et après que 60 à 70% de l'eau de gâchage ait été ajoutée.

Le MEDAFLOW 30 peut être aussi ajouté directement dans le camion malaxeur (toupie), et après introduction de la dose convenable, le malaxeur devra tourner à grande vitesse pendant 2 à 3 minutes après l'introduction du superplastifiant.

Il est conseillé d'ajouter le MEDAFLOW 30 à un béton qui ne soit pas trop ferme.

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :
0,5 à 2,0 % au poids de ciment soit 0,46 à 1,66 litre pour 100 Kg de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le MEDAFLOW 30 est conditionné en bidons de 10Kg, fûts de 210 Kg et 240 Kg, cubitainers 1100kg.

Délai de conservation :
Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur (°C < 1 < 38°C).
Lors d'une exposition du produit au soleil, sa couleur est sujette à changer de ton.

PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.
Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : www.granitez-dz.com

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de conformance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Zone Industrielle Oued Smar - BP85 Oued Smar - 16270 Alger
Tél : (213) 021 51 66 81 & 82
Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 13
www.granitez.dz - E-mail: granitez@granitez.dz



83

FICHE TECHNIQUE : CIMENT CEM II /A-M(P-L) 42.5 N



المصنع المصنوع لاستعت اجرار
شركة الاسمنت بني صاف
Société des ciments de BeniSaf





جিকা بيطون
GICA BÉTON

CEM II/A-M(P-L) 42.5 N

Norme algérienne NA 442

+213 43 74 92 35
info@scibs.dz
www.scibs.dz

FICHE TECHNIQUE CIMENT CEM II /A-M(P-L) 42.5 N

Analyse chimique CIMENT:

ANALYSE CHIMIQUE	MIN	MAX
SiO ₂	22,80	32,00
Al ₂ O ₃	5,20	6,20
Fe ₂ O ₃	3,20	3,60
CaO	52,00	62,00
MgO	1,02	1,20
K ₂ O	0,35	0,45
Na ₂ O	0,40	0,50
SO ₃	1,80	2,20
PF	2,00	2,80
CL	0,03	0,45
RI	6,00	12,00
CaOL	0,40	1,54

CARACTERISTIQUES PHYSICO-MECANQUES

ESSAIS PHYSICO-MECANIQUE	MIN	MAX	NORME
SS Blaine cm ² /g	2960	4200	-
Consistance %	25,5	26,8	-
Début de prise	80	160	≥ 60 mn
Compression 02	12,5	23	> 10,0
Compression 07	25	36	-
Compression 28	43	52	≥ 42,5
Expansion à	0	8,5	< 10 mn

Les constituants de ciment en % *

CLINKER	80-88
POUZZOLANE + CALCAIRE	12-20
GYPSE(Régulateur de prise)	00-05

* Ces valeurs font référence au noyau du ciment à l'exclusion du sulfate de calcium (gypse) et de tout autre aditifs.

Domaine d'utilisation

C'est un ciment gris avec un mélange d'ajouts pouzzolane et calcaire pour bétons de haute performance destiné à la construction des ouvrages d'art, infrastructure et superstructure pour bâtiments.

Ce ciment est plus couramment utilisé dans :

- Travaux nécessitant une résistance initiale élevée (Décoffrage rapide).
- Béton en élévation, armé ou d'ouvrage courant.
- Béton de haute performance.
- Fondations ou travaux souterrains en milieux non agressifs.
- Dallages, sols industriels.
- Maçonneries
- Stabilisation des sols

NB: Les données que comporte cette fiche sont fournies à titre indicatif. La présente fiche se veut un outil d'information à portée générale, seulement et ne doit pas être considérée comme la fiche technique du mois en cours ni du stock existant. Vous êtes prié de demander conseil auprès de la direction commerciale qui prendrait en compte les données techniques nouvelles et de ne pas vous fier uniquement aux données de la présente fiche d'information*. * certaines changements peuvent éventuellement se produire dans les limites autorisées par les normes.