République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Universitaire Yahia FARES de Médéa

Faculté De Technique

Département de Génie Civil

Projet de fin d'étude

Pour l'obtention du diplome de Master en Génie Civil

Option: Construction et Matériaux

Thème :

Etude de l'effet des additions minérales sur le comportement d'un mortier autoplaçant traité thermiquement

Etudié par :

M^lle HAMRAOUI Somia

M^lle REBAIA Fatma Zohra

Encadré par :

M^lle BOUKHELKHAL Djamila.

Dr GUENDOUZ Mohamed

Promotion Juin 2017

Dédicace

Je dédie ce travail à ceux qui m'ont donné la vie, qui se sont sacrifiés pour mon bonheur et ma réussite, à ma mèrehadda, à mon pèredif, l'exemple du dévouement. Aucune dédicace, ne saurait exprimer à sa juste valeur le profond respect que je vous porte.

A mes adorables sœurs Wafa, Samira, Akila, Sabrina, Sarah

A mon frère hamza

A mes beaux-frères Youcef, Sofiane

A mes nièces Asma, Khadidja, Maroua, Israa, zaki, Iyad

A mon neveu Mohamed

A mes amis Razika,Meriem et A tous ceux qui me sont chers Je dédie ce travail. Dédicace Assia Aux personnes qui m'ont toujours aidée et encouragée, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagnée durant mon chemin d'études A mes parents.

Somia

Dédicace

Je dédie ce travail à ceux qui m'ont donné la vie, qui se sont sacrifiés pour mon bonheur et ma réussite, à ma mère, à mon père, l'exemple du dévouement. Aucune dédicace, ne saurait exprimer à sa juste valeur le profond respect que je vous porte.

A mes adorables sœurs, Amel, Khadîdja, shahra zed.

Ama chère grand-mère

A Takwa, Oussama,Anes,Radia, Selsabile, kholoud,

A tout la famille : rebaia

A tout la famille : derreg surtout Fatma et Ikrame

A mes amis et A tous ceux qui me sont chers Je dédie ce travail. Dédicace Hmed Aux personnes qui m'ont toujours aidée et encouragée, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagnée durant mon chemin d'études .

f/Zohra

Remerciement

Tout d'abord, nous tenons à remercie ALLAH, le clément et le miséricordieux de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Nos sincères remerciements et notre profonde gratitude s'adressent à notre promotrice, MadameBOUKHELKHAL Djamila pour ce thème précieux, pour sa patience, et surtout ses judicieux conseils.

Nos remerciements vont également à notre co-promoteur Dr GUENDOUZ Mohamed pour l'honneur qu'il nous a fait d'encadrer ce travail, pour son écoute et l'intérêt constant qu'il a bien voulu montrer pour ce travail.

Nous sommes frées aux membres de jury, d'avoir accepté d'examiner ce travail et de présider le jury de notre soutenance. Nous leur exprime nos profondes reconnaissances pour leur lecture critique et éclairante sur ce travail de fin d'étude.

Permettez-nous de vous exprimer notre admiration pour vos qualités humaines et professionnelles.

Nos remerciements s'adressent également au Dr Yerkielyass, responsables au niveau de laboratoire de la Hall pour avoir répondu à nos questions.

Nous remercions également LA SETAM qui a bien voulu répondre à nos besoins.

Nos profonds remerciements vont également à toutes les personnes qui nous ont aidées et soutenues.

ملخص

نظرا لسهولة تموضعها, أظهرت الخرسانة المائعة ذاتيا تزايد كبير في استعمالاتها , كما أنه غالبا ما تدخل في تركيبة هذا النوع من الخرسانة بعض الاضافات المعدنية و ذلك للحد من المخاطر الاقتصادية و التقنية المرتبطة بالنسبة العالية لكمية الاسمنت الموجودة في هذه الخرسانة و من جهة اخرى تعتمد مصانع الخرسانة في أغلب الحالات الى استخدام المعالجة بالحرارة لرفع انتاجيتها.

يهدف هذا العمل الى استبدال نسبة من حجم الاسمنت بأحد الاضافات المعدنية الموجودة بكثرة في الجزائر مثل حجر الكلس و البوزولان الطبيعي من أجل تشكيل خرسانة مائعة ذاتيا و معالجة في الماء تحت درجة حرارة تتراوح بين 20 و 60°م.

أثبتت النتائج التجريبية أنه من الممكن استخدام المضافات المعدنية الموجودة في الجزائر من أجل تشكيل خرسانة مائعة ذاتيا ذات خصائص عالية الجودة في كلتا الحالتين الطرية و الصلبة.

لقد لوحظ كذلك أن الرفع في درجة حرارة المعالجة . أدى الى تحسين خصائص الخرسانة في الأيام الأولى دون التأثير سلبا على هذه الخصائص في الأمد البعيد.

Résumé :

De par leur mise en oeuvre aisée, les bétons fortement fluidifiés, tels que les bétons autoplaçants (BAP), sont de plus en plus employés ces dernières années. Cependant et en raison des enjeux économiques et de performance liés à la teneur élevée en liant dans ces bétons, des additions minérales sont souvent employées. En outre et du fait d'une forte demande de production, l'industrie de construction a souvent recours à l'utilisation d'un traitement thermique afin d'accélérer l'hydratation du béton.

L'objectif de ce travail est donc, d'étudier l'effet de substitution du poids du ciment par des additions minérales disponibles en abondance en Algérie, telle que la pouzzolane naturelle et le filler calcaire sur les propriétés mécaniques et la durabilité d'un mortier autoplaçant muris sous des températures de cure allant de 20 à 60°C.

Les résultats de cette étude, ont montré qu'il est possible de fabriquer du mortier autoplaçant utilisant des additions minérales algériennes avec des propriétés acceptables à l'état frais et durcis. L'augmentation de la température de cure engendre une amélioration dans les performances des MAP au jeune âge sans nuire fortement ses propriétés à long terme.

Abstract :

Due to their easy implementation, fluid concretes such as self-compacting concrete (SCC), are increasing used in recent years. However and because of economic and performance issues due to the high binder content, mineral additives are often used for making this type of concrete. In addition and due to a high demand of production, construction industry often resorts to the use of a heat treatment to accelerate the hydration of the concrete.

The objective of this work is to study the effect of substitution of cement weight, by different mineral admixtures available in abundance in Algeria. Such natural pozzolan and limestone filler in

mechanical properties and durability of self-compacting mortar cured under temperatures rang of 20 to 60° C.

The results of this study showed that it is possible to manufacture self-compacting mortar with acceptable properties in fresh and hardened states by using Algerian mineral admixtures. Increasing the curing temperature causes an improvement in performance at an early age of SCC without penalizingits long-term properties

نظرا لسهولة تموضعها, أظهرت الخرسانة المائعة ذاتيا تزايد كبير في استعمالاتها , كما أنه غالبا ما تدخل في تركيبة هذا النوع من الخرسانة بعض الاضافات المعدنية و ذلك للحد من المخاطر الاقتصادية و التقنية المرتبطة بالنسبة العالية لكمية الاسمنت الموجودة في هذه الخرسانة و من جهة اخرى تعتمد مصانع الخرسانة في أغلب الحالات الى استخدام المعالجة بالحرارة لرفع انتاجيتها.

يهدف هذا العمل الى استبدال نسبة من حجم الاسمنت بأحد الاضافات المعدنية الموجودة بكثرة في الجزائر مثل حجر الكلس و البوزولان الطبيعي من أجل تشكيل خرسانة مائعة ذاتيا و معالجة في الماء تحت درجة حرارة تتراوح بين 20 و 60°م.

أثبتت النتائج التجريبية أنه من الممكن استخدام المضافات المعدنية الموجودة في الجزائر من أجل تشكيل خرسانة مائعة ذاتيا ذات خصائص عالية الجودة في كلتا الحالتين الطرية و الصلبة.

لقد لوحظ كذلك أن الرفع في درجة حرارة المعالجة . أدى الى تحسين خصائص الخرسانة في الأيام الأولى دون التأثير سلبا على هذه الخصائص في الأمد البعيد.

Résumé :

De par leur mise en oeuvre aisée, les bétons fortement fluidifiés, tels que les bétons autoplaçants (BAP), sont de plus en plus employés ces dernières années. Cependant et en raison des enjeux économiques et de performance liés à la teneur élevée en liant dans ces bétons, des additions minérales sont souvent employées. En outre et du fait d'une forte demande de production, l'industrie de construction a souvent recours à l'utilisation d'un traitement thermique afin d'accélérer l'hydratation du béton.

L'objectif de ce travail est donc, d'étudier l'effet de substitution du poids du ciment par des additions minérales disponibles en abondance en Algérie, telle que la pouzzolane naturelle et le filler calcaire sur les propriétés mécaniques et la durabilité d'un mortier autoplaçant muris sous des températures de cure allant de 20 à 60°C.

Les résultats de cette étude, ont montré qu'il est possible de fabriquer du mortier autoplaçant utilisant des additions minérales algériennes avec des propriétés acceptables à l'état frais et durcis. L'augmentation de la température de cure engendre une amélioration dans les performances des MAP au jeune âge sans nuire fortement ses propriétés à long terme.

Résumé

Abstract :

Due to their easy implementation, fluid concretes such as self-compacting concrete (SCC), are increasing used in recent years. However and because of economic and performance issues due to the high binder content, mineral additives are often used for making this type of concrete. In addition and due to a high demand of production, construction industry often resorts to the use of a heat treatment to accelerate the hydration of the concrete.

The objective of this work is to study the effect of substitution of cement weight, by different mineral admixtures available in abundance in Algeria. Such natural pozzolan and limestone filler in mechanical properties and durability of self-compacting mortar cured under temperatures rang of 20 to 60° C.

The results of this study showed that it is possible to manufacture self-compacting mortar with acceptable properties in fresh and hardened states by using Algerian mineral admixtures. Increasing the curing temperature causes an improvement in performance at an early age of SCC without penalizingits long-term properties.

Résumé

Sommaire

Dédicaces
Remerciement
Résumés
Sommaire
Liste des Tableaux
Liste des Figures
Notation et Abréviation
Introduction Générale

CHAPITRE 1 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE PAGE

1.1.INTRODUCTION…….....…..…….….... **3**

1.2. BETON AUTOPLAÇANT…….....…..……..…….. . **4**

1.2.1. Définition……...……..……..…..…..... **4**

1.2.2.PARTICULARITE DE LA COMPOSITION DES BAP…….…… **5**

1.2.3. PROPRIETES DES BAP A L'ETAT FRAIS ……... **8**

1.2.3.1. Fluidité…….. **8**

1.2.3.2. Homogénéité ……..... **10**

1.2.4. PROPRIETES DES BAP A L'ETAT DURCI …….. **10**

1.2.4.1. Résistance mécanique…… **10**

1.2.4.2. Vitesse ultrasonique …….. **13**

1.2.4.3. Absorption d'eau…….. **13**

1.2.4.4. Retrait …… **13**

1.2.5 DOMAINE D'EMPLOI DES BAP…….. **15**

1.3. EFFET DES ADDITIONS MINERALES SUR LES PROPRIETES DES BAP……... 15

1.3.1. DEFINITION …… **15**

1.3.2. ACTION DES ADDITIONS MINERALES ……..... **17**

1.3.3. FILLERS CALCAIRES ……..... **19**

1.3.3.1. Définition……... **19**

1.3.3.2. Effet des fillers calcaires sur les caractéristiques des BAP……..... **20**

1.3.4. POUZZOLANE NATURELLE ……..... **23**

1.3.4.1. Définition……... **23**

1.3.4.2. Effet de la pouzzolane naturelle sur les caractéristiques des BAP……..... **23**

1.3.5. COMBINAISON DES ADDITIONS MINERALES……. **28**

1.4. EFFET DE LA TEMPERATURE DE CURE SUR LES PROPRIETES DES

BAP…… **30**
1.4.1. INTRODUCTION…….. **30**
1.4.2. EFFET DE TEMPERATURE SUR LES RESISTANCES MECANIQUES… **31**
1.4.3.EFFET COMBINÉ DES ADDITIONS MINÉRALES ET DE LA TEMPÉRATURES SUR LES PROPRIÉTÉS DES BÉTONS…….. **32**
1.5. CONCLUSION …… **35**

CHAPITRE 2 : MATÉRIAUX ET ESSAIS

Liste des tableaux

Tableau 2.1. Composition chimique du Ciment utilisé **37**

Tableau 2.2. Composition chimique de la pouzzolane de Beni-Saf utilisée. **38**

Tableau 2.3. Composition chimique du calcaire de Mascara utilisé **39**

Tableau 3.1 : Variation du diamètre d'étalement et temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant des différents mortiers…… . **63**

Tableau 2.2 : Différentes compositions des mortiers autoplaçants..…… **64**

LISTE DES FIGURES

FiguresPAGE

Figure I.1 : Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'unBAP..... **6**

Figure I.2 : Action du superplastifiant dans un mélange de béton **7**

Figure I.3 : Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle …… **8**

Figure I.4 : Dispersions des granulats par excès de pâte ……. **9**

Figure I.5 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF)correspondant …… **11**

Figure I.6 : Résistance mécanique d'un béton vibré et de dix mélanges de BAP avec des additions (fillers calcaires, fine de marbre, poudre de basalte) …… **12**

Figure I.7 : l'évolution de la résistance en fonction de l'âge d'un BAP réalisé avec différentsdosages de laitier …… **12**

Figure I.8 : le retrait endogène et le retrait total des bétons autoplaçants en variant levolume de pâte …… **14**

Figure I.9 : Effet du dosage en superplastifiant sur le retrait total …… **14**

Figure 1.10 : Représentation des principaux ajouts dans un diagramme…… **18**
SiO_2 – Cao- Al_2O_3**[35]**.

Figure I.11 : Effet des fillers calcaires dans une pâte cimentaire …… **19**

Figure I.12 : Evolution de la résistance à la compression relative (f_{cj}/f_{c28}) des bétons Pouzzolaniques en fonction de l'âge ……. **25**

Figure I.13 :Résistance à la compression en fonction de la surface spécifique Blaine de la pouzzolane de Béni-Saf ……. **26**

Figure I.14 : Evolution du retrait total des mortiers pouzzolaniques …… **28**

Figure 2.1 : Ciment portland artificiel utilisé. **37**

Figure 2.2 : Broyeur à disque utilisé **38**

Figure 2.3 : Pouzzolane naturel de Beni-Saf. **38**

Figure 2.4 : Calcaire de Mascara utilisé **39**

Figure 2.5 : Sable d'Oued-Souf utilisé. **40**

Figure 2.6 : La courbe granulométrique du sable d'Oued-Souf utilisé **40**

Figure 2.7 : Le superplastifiant MEDAFLOW 145 utilisé **41**

Figure 2.8 : Protocole de malaxage. . . . . ….. **44**
Figure 2.9 : Séquence de malaxage du mortier autoplaçant . . . . . ……. **45**
Figure 2.10 : Éprouvettes confectionnées . . . . . … **45**
Figure 2.11 : Conservation des éprouvettes à l'air libre du laboratoire ……. **46**
Figure 2.12 : Conservation des éprouvettes dans l'eau à 20°C . . . . . ….. **47**
Figure 2.13 : Enceinte climatique pour le traitement thermique des éprouvettes . . …….. **47**
Figure 2.14 : Cycles adoptés pour le cas du traitement thermique. . . . . …. **48**
Figure 2.15 : Essai d'étalement au mini cône . . . . . ….. **49**
Figure 2.16 : Essai d'écoulement dans l'entonnoir en V (V-funnel test). . . . . ……. **50**
Figure 2.17 : Protocole expérimental à l'état frais. . . . . ….... **51**
Figure 2.18 : Essai de compression simple **52**
Figure 2.20 : Essai d'absorption d'eau par capillarité.. . . . . **55**
Figure 2.21 : Essai de porosité accessible à l'eau . . . . . … **56**
Figure 2.22 : Mesure des variations dimensionnelles (Retrait gonflement) par Rétractomètre. . . . . …. **58**
Figure 2.23 : Mesure des variations massiques dues au retrait et gonflement . . . . ….. **58**
Figure 3.1 : Besoin en adjuvant en % pour les différents mortiers autoplaçants étudiés. **65**
Figure 3.2 : Diamètre d'étalement au mini cône pour les différents mélanges. …… **66**
Figure 3.3 : Temps d'écoulement dans l'entonnoir en V pour les différents mélanges…... **67**
Figure 3.4 : Aspect visuel des différents mortiers autoplaçants étudiés…….. **68**
Figure 3.5 : Résistance à la compression des MAP muris à 20 °C…… **70**
Figure 3.6 : Résistance à la compression des MAP muris à 40 °C…… **72**
Figure 3.7 : Résistance à la compression des MAP muris à 60 °C…… **72**
Figure 3.8 : Résistance à la compression des MAPT en fonction de la température…… **73**
Figure 3.9 : Résistance à la compression des MAPC20 en fonction de la température…… **74**
Figure 3.10 : Résistance à la compression des MAPC40 en fonction de la température….. **74**
Figure 3.11 : Résistance à la compression des MAPZ20 en fonction de la température….. **75**
Figure 3.12 : Résistance à la compression des MAPZ40 en fonction de la température….. **76**
Figure 3.13 : Résistance à la compression des M1 en fonction de la température…… **76**
Figure 3.14 : Résistance à la compression des M2 en fonction de la température…… **77**
Figure 3.15 : Vitesse ultrasonique des différents MAP muris à 20°C…… **78**
Figure 3.16 : Vitesse ultrasonique des différents MAP muris à 40°C……. **79**
Figure 3.17 : Vitesse ultrasonique des différents MAP muris à 60°C…… **79**

Figure 3.18 : Porosité accessible à l'eau des différents MAP en fonction de la température de murissement…….. **80**
Figure 3.19 : Absorption capillaire des mélanges muris à 20°C……**81**
Figure 3.20 : Absorption capillaire des mélanges muris à 40°C……**82**
Figure 3.21 : Absorption capillaire des mélanges muris à 60°C……**83**
Figure 3.2.2 : Retrait des mélanges muri 20°C…… **84**
Figure 3.2.3 : Retrait des mélanges muris à 40°C…… **84**
Figure 3.2.4 : Retrait des mélanges muris à 60°C…… **84**
Figure 3.25 : Gonflement des mélanges muris à 20°C…… **85**
Figure 3.26 : Gonflement des mélanges muris à 40°C…….. **86**
Figure 3.27 : Gonflement des mélanges muris à 60°C……**86**

NOTATIONS ET ABREVIATIONS

BAP	Bétons autoplaçants
MAPT	Mortier autoplaçants témoin
MAPC	Mortier autoplaçants à base de calcaire
MAPZ	Mortier autoplaçants à base de pouzzolane.
M1	Mortier autoplaçants à base 10% calcaire +10 % pouzzolane.
M2	Mortier autoplaçants à base 20% calcaire +20 % pouzzolane.
C	Dosage en ciment
S	Le sable
CL	Filler de calcaire
PZ	Pouzzolane
E1	Eau
HRS1	Haute résistant aux sulfates.
BO	Le béton ordinaire
BHP	Le béton à haute performance
MF	Module de finesse
CPA_CEM1 42.5	Ciment portland artificiel CPA_CEM1 avec résistance 42.5
E	Dosage en eau
E/C	Le rapport eau/ciment
C/S	Le rapport ciment /sable
S_P/C	Le rapport superplastifiant/ciment.
Sp/L	Le rapport Superplastifiant / Liant
S_P	Dosage en superplastifiant
S/M	Le rapport sable/mortier

ES	L'équivalent de sable
MF	Le module de finesse
P	La porosité
Rc	Résistance à la compression
SiO_2	La silice
CaO	la chaux
AL2O3	L'alumine
Si-OH	Silanols
SO3	Sulfates
S_P/C	Le rapport superplastifiant/ciment
T	Le temps d'écoulement
D	Diamètre d'étalement
ΔL	Variation de longueur par apport à la longueur origine
L0	Longueur de base, prise égale à 160mm
L0	Longueur de base, prise égale à 160mm
ΔM	Variation de masse par apport à la masse au moment du démoulage
M	Masse de l'éprouvette au moment du démoulage
M0	Morceaux sèche
M1	Morceaux humide
CA (%)	L'absorption d'eau
V	Vitesse de propagation d'ondes en m/s
L	Distance entre les deux transducteurs en m
t	Temps de propagation d'ondes en s
σ_c	La contrainte de compression
F_C	Résistance souhaitée du béton à 28 jours
f_{c28}	Résistance du ciment

Introduction Générale

Les bétons autoplaçants constituent une nouvelle génération de béton qui s'adapte bien à l'état actuel du développement des structures. Depuis son apparition, l'utilisation de ce type de béton n'a cessé de se généraliser, et ce grâce à ses avantages multiples tant au niveau technologique, économique qu'environnemental.

Le BAP se caractérise par une formulation différente du béton ordinaire qui lui confie une grande fluidité, déformabilité et stabilité tout en développant une bonne compacité. Ces caractéristiques permettent une mise en place facile et rapide sous l'action de la gravité, sans besoin de vibration externe et c'est une amélioration très importante dans les conditions de travail sur chantier qui minimise les nuisances sonores, réduit la pénibilité du travail et les délais de réalisation des ouvrages. Plus l'excellente qualité des parements et l'enrobage parfait des aciers, les caractéristiques mécaniques et la durabilité sont garantis

L'inconvénient majeur du béton autoplaçant est l'utilisation d'une teneur en ciment élevée (450 à 600 kg/m3) donc une augmentation du cout par rapport à un béton ordinaire. Le problème ici réside dans le fait que la production du ciment nécessite une grande énergie et libère en même temps une grande quantité de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, ce qui a pour effet d'une part d'augmenter les dépenses de production du ciment, et d'autre part d'affecter négativement l'environnement et par conséquent la santé de l'homme en polluant l'air.

Pour éviter les mauvaises conséquences liées à l'utilisation du ciment seul comme liant dans les BAP, une solution judicieuse consiste à utiliser des additions minérales telles que la pouzzolane naturelle, la poudre de calcaire et le laitier des hauts fourneaux.L'emploi de ces matériaux comme addition au BAP pourrait constituer une alternative écologique et économique intéressante, en exploitant des matériaux locaux qui se trouvent en abondances avec quantités importantes et permettant aussi la valorisation des sous-produits industriels.

Par ailleurs, les bétons peuvent être exposés à des températures élevées soit dans les conditions climatiques extrêmes ou comme un procédé de cure dans la préfabrication. La connaissance des effets de la température élevée sur les caractéristiques mécaniques et la durabilité des bétons autoplaçants est nécessaire pour valoriser ou limiter son utilisation, ainsi que le choix de l'addition adéquat dans ses conditions.

L’objectif principal de cette étude est d’étudier la possibilité d’exploitation des matériaux locaux, précisément les fillers calcaires et la pouzzolane naturelle dans la production des mortiers autoplaçant muris dans les conditions normales et avec un traitement thermique sous une plage de température varie entre 20 et 60°C .

Le travail est présenté en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à l’étude bibliographique regroupant trois parties : dans la première partie, nous présentons le concept et la formulation des bétons autoplaçants, ainsi que l'influence des principaux constituants sur les propriétés des BAP. Dans la deuxième partie nous avons abordé les effets des additions sur les caractéristiques des BAP. Enfin, dans la troisième partie nous présentons les effets de la température de cure sur les caractéristiques des BAP.

Le deuxième chapitre est destiné en premier lieu à la caractérisation des matériaux entrant dans la composition du MAP, en second lieu à la confection et la conservation des éprouvettes passant par la formulation et le malaxage des mortiers autoplaçants et finalement dans le protocole expérimental une description détaillé des essais de caractérisation du mortier à l’état frais et durci.

Le troisième chapitre est consacré à l’exposition et la discussion des différents résultats obtenus ; Après une fixation de la formulation des MAP avec et sans additions, une vérification des caractéristiques à l’état frais est achevée puis on passe à la discussion des effets des additions et de la température de cure sur les propriétés des mortiers autoplaçants à l’état durci.

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

Chapitre 1 :
Synthèse Bibliographique

1.1. INTRODUCTION

Ce chapitre début par la présentation du béton autoplaçant, sa définition, sa particularité de formulation ainsi ses caractéristiques spécifiques. En secondétape nous présenterons les différentes additions minérales existantes et leurs effets sur le comportement des bétons autoplaçantstout en regroupant en général les travaux de recherche antérieurs dans ce domaine.

En mettant ensuite en évidence l'effet du traitement thermique sur les caractéristiques d'un béton autoplaçants incorporés des additions minérales, et qui permettent de poser laproblématique du travail.L'analyse bibliographique est alors entreprise pour répondre à tout ce qui concerne les points cités dans ce contexte.

1.2. BETON AUTOPLAÇANT

1.2.1. DEFINITION

Au Japon, dans les années 1980, des recherches significatives ont été effectuées afin d'éviter desconditions de compactage du béton frais non conformes aux règles de l'art et d'améliorer ainsi ladurabilité des ouvrages. Ces recherches ont conduit au développement du béton autoplaçant (BAP)ou SCC (de l'anglais Self CompactingConcrete) **[1, 2]**.

Le béton autoplaçant est un béton qui est caractérisé à l'état frais par une fluidité telle qu'il estcapable de remplir complètement le coffrage par le seul effet de son poids propre et sans énergie decompactage supplémentaire, même en présence d'obstacles, tout en ayant une résistance à laségrégation suffisante pour rester homogène lors du transport et de la mise en oeuvre **[3].**

Les bétons autoplaçants (BAP) sont encore à l'heure actuelle qualifiés de « nouveaux bétons » car leur utilisation reste modeste bien qu'ils possèdent un fort potentiel de développement. Ces bétons constituent dans de nombreux domaines une alternative intéressante au béton conventionnel vibré. Ces domaines comprennent le bâtiment, le génie civil, les tunnels, la préfabrication et les travaux d'assainissement et de réhabilitation[**4**].

La spécificité des BAP par rapport aux bétons traditionnels réside dans le fait qu'ils sont extrêmement fluides et qu'ils ne nécessitent pas de vibration pour être mis en œuvre. Se compactant sous l'effet de leur propre poids, ils peuvent être coulés dans des zones très ferraillées ou dans des zones d'architecture complexe et difficilement accessibles. La suppression de la phase de vibration présente également l'intérêt d'améliorer les conditions de

travail sur site, ainsi que le confort acoustique au voisinage du chantier plus particulièrement en zone urbaine**[5]**.En effet, la qualité de matériau autoplaçant confère au béton plusieurs avantages techniques et socio-économiques par rapport au béton ordinaire **[6]**:

- **Avantages techniques**

Avec l'apparition des BAP, les opérations traditionnelles de coulage, d'étalement, de talochage et de surfaçage se réduisent à une étape de coulage suivie d'un débullage dans le cas des applications horizontales. Pour les opérations verticales, les divers déplacements sur les banches, à travers trappes et échelles, sont réduits de manière significative.
On peut résumer ses avantages techniques dans les points suivants:

- Facilité et rapidité dans la mise en œuvre du béton (coulage en un seul point, augmentation du débit de béton pompé) ;
- Bétonnage en milieux fortement ferraillés ;
- Amélioration de la qualité des parements et de l'enrobage des aciers ;
- Réalisation d'éléments de forme plus complexe.

- **Avantages socio-économiques**

Nous avons vu que la fluidité des BAP est telle qu'il n'est plus nécessaire de les vibrer pour les mettre en œuvre. La suppression de la phase de vibration est particulièrement bénéfique pour les personnes chargées de la mise en place, puisque cela implique :

- une diminution du bruit sur site
- une diminution de la pénibilité des tâches
- une réduction des risques d'accident
- Réduction du coût de la main d'œuvre.
- Absence de systèmes de vibration (intérieurs ou extérieurs) réduisant ainsi les coûts et les nuisances sonores dans et au voisinage du chantier.
- Réduction du temps de bétonnage et des besoins de ragréage.
- Toutefois, certains points restent à surveiller dans l'utilisation du béton autoplaçant
- Augmentation du coût des matières premières, par la présence des nouveaux adjuvants, et des différentes additions minérales ;
- Compatibilité des matériaux ;
- Etanchéité des coffrages.

1.2.2. PARTICULARITE DE LA COMPOSITION DES BAP

Les BAP sont des bétons à quatre composants : les granulats, le liant, l'eau et les ajouts. Les granulats et le ciment utilisés pour un BAP sont les mêmes que ceux utilisés pour la fabrication d'un béton ordinaire. Ce qui particularise la composition des BAP, c'est la proportion des différents constituants et non pas leurs propriétés. En plus des granulats, la formulation d'un BAP se distingue par la présence d'un ajout chimique et /ou minéral.

Les BAP se différencient des bétons traditionnels vibrés, notamment par leurs propriétés àl'état frais. Ces propriétés se caractérisent principalement par :

- Une mobilité en milieu confiné ou non ;
- Une stabilité une fois mise en place.

Pour pouvoir assurer ces caractéristiques, la composition d'un BAP diffère de celle des bétons classiques. Elle se caractérise par un volume de pâte (ciment + additions minérale et chimique +eau+air) élevé, et un volume plus faible de granulats, ce qui limite les frottements intergranulaires. Le rapport granulat/sable exprimé en masse est généralement de l'ordre de 1 pour un BAP. De plus, pour limiter le risque de blocage dans un milieu fortement ferraillé, la taille maximale des granulats est comprise entre 10 et 20 mm.

La pâte qui doit répondre à une fluidité suffisante doit en même temps minimiser le risque de ségrégation et de ressuage. Un BAP incorporera alors une quantité élevée de fines et une quantité d'eau relativement faible. La fluidité souhaitée sera atteinte en introduisant des additions chimiques telles que les superplastifiants**[7]**.

La figure 1.1 montre les composantes des deux types de béton, le béton ordinaire et le BAP

A.*Un grand volume de pate*

En considérant le béton comme un mélange de pâte et de granulats, il existe une quantité depâte minimum nécessaire au remplissage des interstices entre les granulats. La quantité depâte supplémentaire provoque une certaine dispersion des granulats, limitant ainsi lesfrottements intergranulaires, et confère au matériau sa fluidité, son volume dans les BAP estdonc élevé (330 à 600l/m^3).

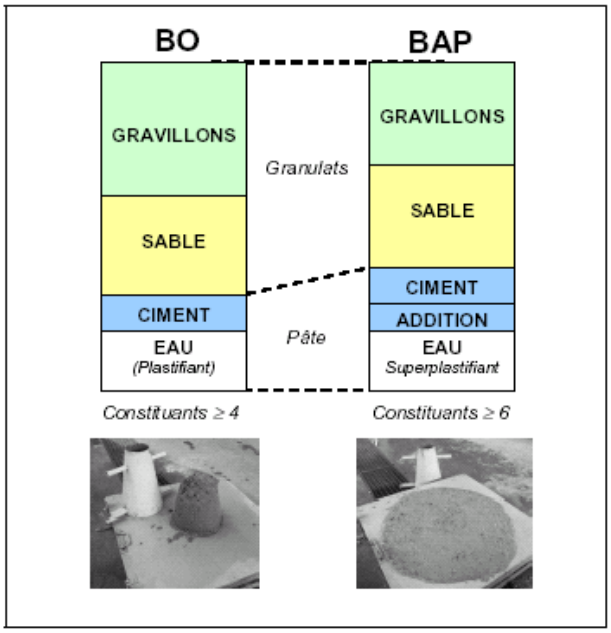


Figure 1.1 : Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'unBAP**[8]**.

B. *Une quantité de fines importante*

Pour augmenter la quantité de pâte d'un BAP, on peut alors envisager d'augmenter la quantitéde ciment. Or ceci conduirait à une augmentation significative du coût du matériau maiségalement à des problèmes de retrait dus à l'élévation de la température lors de l'hydratationdu ciment. Il est donc nécessaire de remplacer une partie du ciment par des additionsminérales.

Les compositions de BAP comportent une grande quantité de fines (environ 500 kg/m^3) pourlimiter les risques de ressuage et de ségrégation. Toutefois, le liant est fréquemment unmélange de deux, voire trois constituants, pour éviter des chaleurs d'hydratation trop grandes(et un coût de formule trop élevé).

Différentes additions sont citées dans la littérature : cendres volantes, laitiers de hautsfourneaux, fumées de silice, pouzzolane naturelle et filler calcaire. L'introduction d'additions minérales entraîneune modification de la porosité de la matrice cimentaire et influence les caractéristiquesmécaniques et autoplaçantes du béton**[9]**

C.*L'emploi de superplastifiants*

Les superplastifiants permettent en effet de défloculer les grains de ciment. Ils agissent par répulsion électrostatique en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des

grains et/ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres, grâce à des chaînes moléculaires très longues. L'eau initialement piégée entre les flocs est de nouveau disponiblepour l'hydratation ou pour fluidifier le mélange (figure 1.2). Il devient donc possible de fabriquer des bétons très fluides, même avec moins d'eau qu'il n'en faut pour hydrater le ciment, donc de fabriquer des bétons à faible rapport E/C, faciles à mettre en place**[10, 11]**.

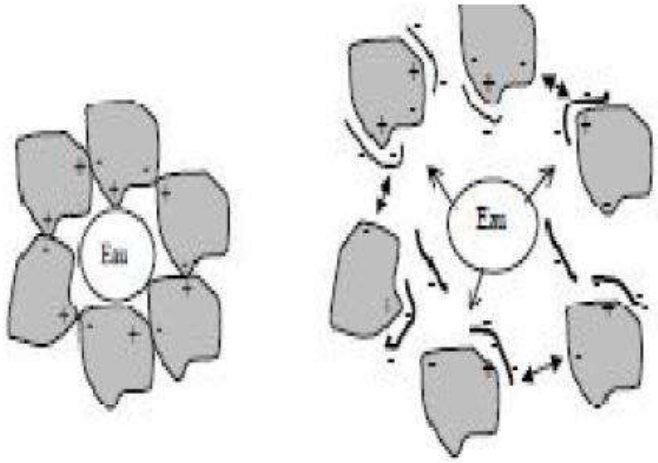


Figure 1.2 : Action du superplastifiant dans un mélange de béton **[11]**.

D. *L'utilisation d'un agent de viscosité*

L'ajout d'un superplastifiant ayant pour effet d'augmenter l'ouvrabilité du béton mais également de réduire sa viscosité, afin de minimiser ce dernier point, les BAP contiennent souvent un agent de viscosité. Ce sont généralement des dérivés cellulosiques, des polysaccharides, des colloïdes naturels ou des suspensions de particules siliceuses, qui interagissent avec l'eau et augmentent la viscosité de celle-ci. Ils ont pour but d'empêcher le ressuage et les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse et en conservant une répartition homogène des différents constituants.

Les agents de viscosité ont aussi la réputation de rendre les BAP moins sensibles à desvariations de la teneur en eau à l'égard des problèmes de ressuage et de ségrégation, mais ilspeuvent conduire à des entraînements d'air excessifs et à une diminution de la fluidité **[12]**.

E. *<u>Un faible volume de gravillon</u>*

Les BAP peuvent être formulés avec des granulats roulés ou concassés. Cependant, il faut enlimiter le volume car les granulats sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée(figure 1.3). Toutefois, comme ils conduisent par ailleurs à une augmentation de la compacitédu squelette granulaire du béton, ils permettent de réduire la quantité de liant nécessaire à unebonne ouvrabilité et une résistance souhaitée**[12]**.

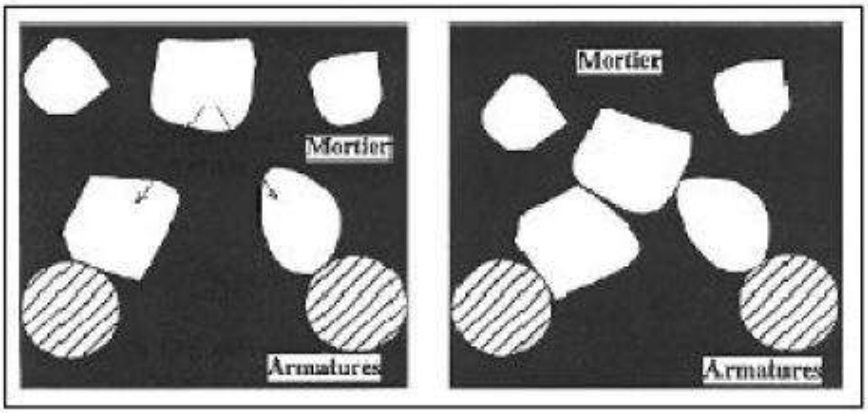


Figure 1.3 : Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle **[12]**.

Ces deux facteurs conduisent à prendre pour les BAP un rapport gravillon/sable (G/S) del'ordre de 1, qui peut être corrigé suivant le confinement de la structure étudiée.Le diamètre maximal des gravillons (D^{MAX}) dans un BAP est compris classiquement entre 10et 20 mm, mais comme les risques de blocage pour un confinement donné augmentent avecD^{MAX}, cela conduit à diminuer le volume de gravillon**[7]**.

1.2.3. PROPRIETES DES BAP A L'ETAT FRAIS

1.2.3.1. Fluidité

La fluidité caractérise la capacité du béton à s'écouler sous son propre poids avec un débitsuffisant. L'essai le plus courant pour caractériser la fluidité des BAP est l'essai d'étalement au côned'Abrams. On mesure le diamètre de la galette obtenue aprèsétalement. Cette mesure permet de déterminer la capacité du matériau à s'écouler en milieunon confiné et sans obstacle.

Les constituants du BAP ont une grande influence sur sa fluidité (dosage, quantité de la pâte,dimensions des granulats).

La présence d'une quantité de pâte supplémentaire provoque une certaine dispersion desgranulats, limitant ainsi les frottements intergranulaires, et confère au matériau sa fluidité (figure 1.4).

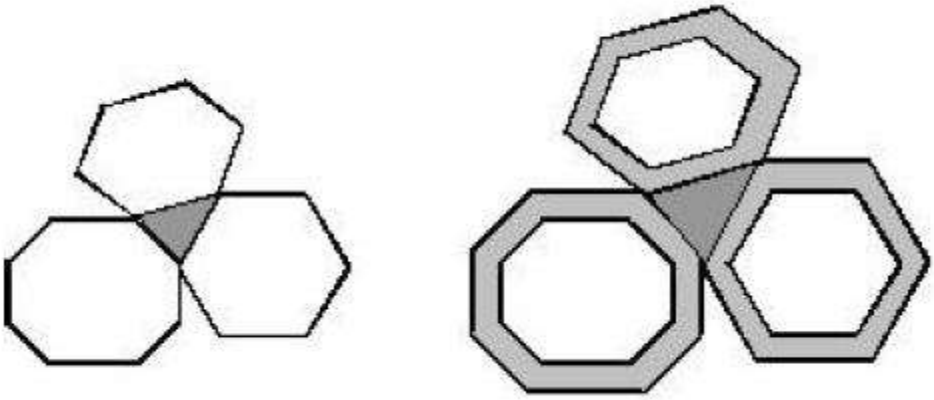


Figure 1.4 : Dispersions des granulats par excès de pâte **[11]**.

L'AFGC **[13]** ne donne pas de recommandations particulières sur ce sujet et déclare que des granulats roulés ou concassés peuvent être utilisés dans les BAP. Il est généralement

Admisque les granulats ronds confèrent au béton une plus grande ouvrabilité.

Ouchiet Edamatsu**[14]** observent que moins il y a de frottements entre les grains de sable, plus le mortiers'écoule facilement et donc plus le béton lui-même s'écoule facilement. D'après eux,larésistance au cisaillement du mortier augmenterait en fonction de l'effort normal engendrépar le rapprochement entre les grains du sable et serait dépendante de la quantité de particulesfines contenues dans le mortier. En d'autres termes,Yen et al.**[15]** mettent en évidence un phénomène similaire. Pour un même dosage en gros granulat(pour un rapport eau sur liant (E/l) et un dosage en superplastifiant constants) plus la quantitéde sable est faible, plus l'étalement du béton est important.

L'ajout d'un superplastifiant permet ainsi d'augmenter significativement la fluidité des BAP.Donc ils permettent d'obtenir des bétons très fluides en réduisant les frottements entre grainsde ciment et en libérant une certaine quantité d'eau. Leur utilisation n'est pas suffisante dansle cas des BAP. Nous avons vu que la fluidité de la pâte avait une certaine influence sur lecomportement du matériau mais que la quantité de pâte jouait également un rôle vis-à-vis

lafluidité du mélange. Les interactions entre les plus gros grains doivent aussi être réduites, ilest donc nécessaire de les remplacer avec des fines pour assurer une bonne fluidité.

1.2.3.2.Homogénéité

Lors de leur mise en œuvre, les BAP sont soumis à différentes sollicitations. Dans un premiertemps, le matériau doit s'écouler et passer à travers des armatures plus ou moinsdenses. Unefois le remplissage effectué, le matériau est soumis à la gravité jusqu'à la prise.Afin de resterhomogène tout au long de ces différentes étapes, le matériau doit répondre à cessollicitationsde différentes manières.

- *Ségrégation dynamique :*

Afin de vérifier la capacité de béton à s'écouler à travers des armatures, l'essai le plusrépandu pour caractériser la ségrégation dynamique des BAP est l'essai de la boite en L.

Pour limiter le risque de blocage, et d'après l'AFGC, le diamètre maximal desgravillons estcompris entre 10 et 20 mm. Moins il y a d'interaction entre les particules, plus le bétons'écoule facilement quelle que soit la configuration d'essai **[11]**.

Pour limiter le risque du blocage, on doit réduire la quantité des gros granulats en prenant enconsidération que l'augmentation de la quantité du sable en détriment des gros granulats nesoit pas trop élevée parce que cela augmente la résistance à l'écoulement et la viscosité. Parailleurs, la viscosité doit être relativement faible pour que leBAP s'écoule avec undébitimportant. Mais nous avons vu qu'elle doit être suffisante pourrésister au cisaillement générépar le déplacement des granulats lors de l'écoulement. L'intérêtd'utiliser une quantité de finesélevée apparaît donc de nouveau puisque la viscosité dumatériau peut être augmentée (enaugmentant la fraction volumique du fluide) tout en limitantle volume de sable.

1.2.4. PROPRIETES DES BAP A L'ETAT DURCI

1.2.4.1. Résistance mécanique

La résistance à la compression est influencée par plusieurs facteurs, un béton Autoplaçant avec un rapport E/P similaire, aura généralement une résistance légèrement plus élevée en comparaison à celle du béton ordinaire à cause du manque de vibration donnant une meilleure interface entre les agrégats et la pâte durcie **[16]**. La structure d'un béton autoplaçant est donc supposée être plus compacte et plus homogène que le béton ordinaire vibré, conférant au béton autoplaçant une amélioration de résistance mécanique **[4]**(figure 1.5).

Pineaud**[18]** montre que l'influence du rapport E/P est comparable à celle obtenue par d'autres auteurs sur des BV, ou l'augmentation de ce dernier mène à une diminution de la résistance à la compression.

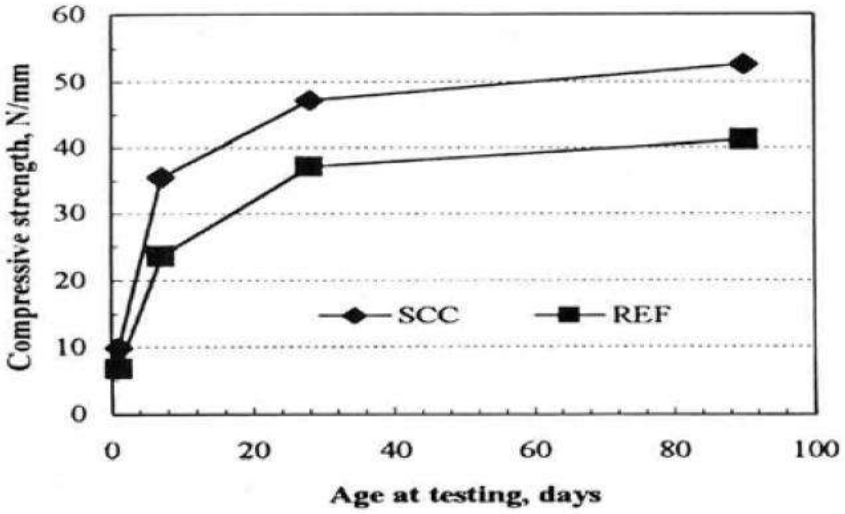


Figure 1.5 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF)correspondant **[17]**.

Un autre élément influençant la résistance à la compression est le volume de la pâte. Turcry et al. **[19]** montre que le volume de pate a un effet réel mais limité sur la résistance en compression. Une diminution de 12% de la résistance est observée pour une augmentation de volume de pâte à 57%. De même, Pineaud**[18]** constate que le volume de pate a une faible influence sur la résistance en compression.

Du moment que le BAP est formulé avec un faible rapport E/P (0,28 à 0,42) et une teneur en poudre élevée (450 à 600 kg/m3), sa résistance à la compression est plus grande que celle du béton vibre **[20]**.

Uysal et al. **[21]** et Zhu et al. **[22]** affirment que cette augmentation de résistance est d'autant plus marquée pour les BAP que la finesse du filler (exprimée en valeur Blaine) est grande (figure 1.6). Cet effet tend lui aussi à s'annuler au-delà de 28 jours. Uysal et al. **[21]** ont montré que les BAP avec des poudres de marbre présente une grande résistance cause de sa finesse réduit par rapport aux autres additions utilisées. De même le pourcentage d'addition comme le laitier diminue la résistance de BAP (figure 1.7) **[23]**.

Le dosage plus ou moins important en adjuvants dans les formulations de BAP peut aussi avoir une influence sur l'évolution de la résistance mécanique du béton. De même, certains superplastifiants utilisés pour contrôler la fluidité des formulations ont pour effets secondaires

de retarder le temps de prise et d'augmenter le développement de la résistance mécanique Shi et al cité par **[20]**. Etant donné la défloculation du liant hydraulique qu'ils engendrent, leur dosage important dans les BAP conduit à considérer que ceux-ci seront plus résistants que des bétons vibrés supposés similaires au départ.

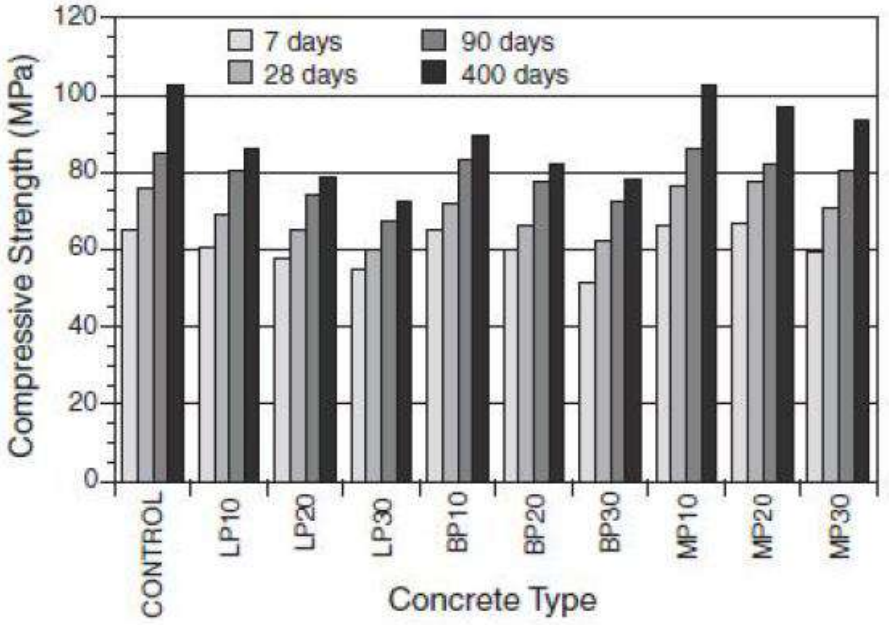


Figure 1.6 : Résistance mécanique d'un béton vibré et de dix mélanges de BAP avec desadditions (fillers calcaires, fine de marbre, poudre de basalte) **[22]**.

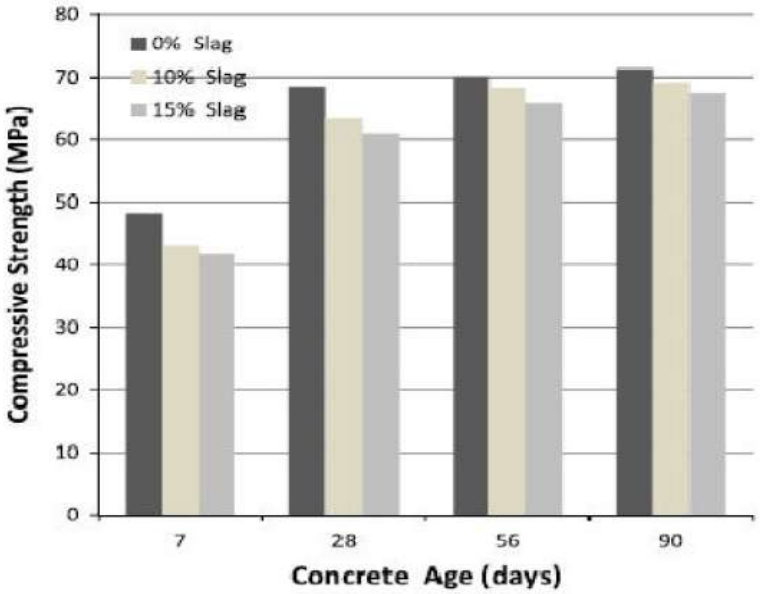


Figure 1.7 : l'évolution de la résistance en fonction de l'âge d'un BAP réalisé avec différentsdosages de laitier **[23]**.

1.2.4.2. Vitesse ultrasonique

La vitesse de propagation d'ondes est une mesure non destructive qui vise à examiner la structure interne du béton, c'est-à-dire la présence des vides et fissures. En effet, la présence des vides et fissures réduit la vitesse ultrasonique et par conséquent la qualité du béton.

En général, les BAP présentent des vitesses ultrasonique élevées allant dans certains cas à 5000m/s, ce qui peut être dû au fait que les BAP sont formulés avec une teneur en fines élevée qui rend leur microstructure plus danse et leurs pores plus petites. C'est pour cette raison que les BAP possèdent d'excellentes qualités **[21, 24]**.

1.2.4.3. Absorption d'eau

La formulation particulière des BAP (volume de pâte plus important, additions minérales) pourrait les entraîner à posséder une absorption d'eau inferieur à celles des bétons vibrés. Selon Kapoor et al.**[25]**, la valeur d'absorption d'eau par immersion des BAP est 1% contre 2% pour les bétons vibres. Et même pour l'absorption capillaire **[26]**, présente des valeurs inferieurs à celles des bétons vibrés et elles sont d'autant plus faibles qu'ils contiennent des fillers calcaires ou des cendres volantes.

Contrairement, Assie**[20]** a cité des résultats donnés par Boel**[27]**qui prouvent que l'absorption par immersion et par capillarité des BAP est analogue à celle des bétons vibrés correspondants (SCC1 et TC1). Ces deux grandeurs augmentent avec le rapport E/C (SCC4 a un rapport E/C de 0,36 et SCC2-SCC7 de 0,55) par suite de l'augmentation du nombre de pores et de leur taille. L'influence du filler calcaire est bénéfique pour l'absorption capillaire et néanmoins néfaste pour l'absorption par immersion (SCC5 et SCC7).

1.2.4.4. Retrait

Persson**[28]** montre aussi que les BAP sont sujets à des déformations libres (retraitsendogène et de dessiccation) équivalentes à celles des bétons vibrés pour un grand domainede résistance. L'augmentation de volume de pâte produit une augmentation de retrait **[29]**(figure 1.8).

Concernant le retrait, les résultats divergent. Pour certains, les entraîneurs d'air n'ont pasd'effet sur le retrait, ce qui est a priori paradoxal. A l'opposé,ces adjuvants semblentaugmenter le retrait, par augmentation de la diffusivité du matériau.

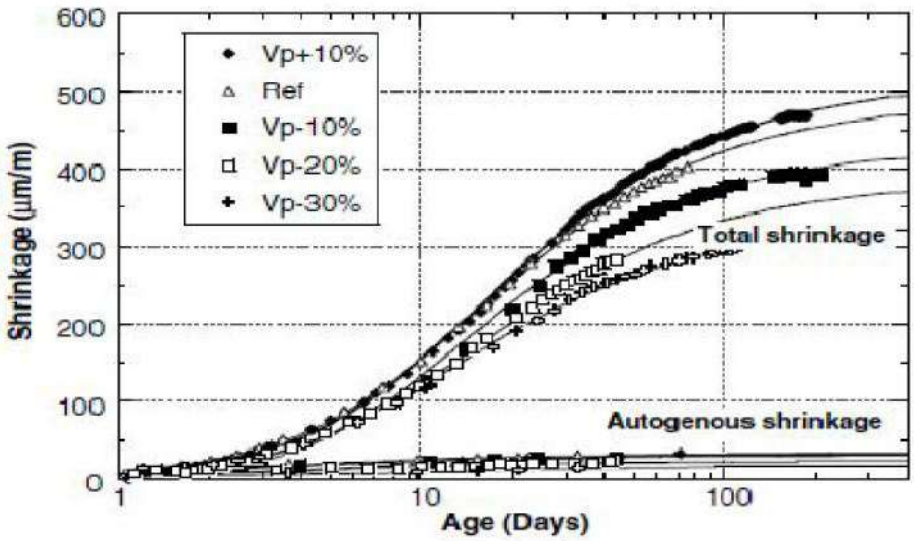


Figure 1.8 : le retrait endogène et le retrait total des bétons autoplaçants en variant levolume de pâte **[29]**.

Le retrait total est sensiblement le même pour les mortiers contenant de l'adjuvant ; il estenviron 10% plus grand pour le mortier sans adjuvant (figure 1.9). On peut d'abord suspecterle superplastifiant d'être un produit tensio-actif et donc de diminuer la pression capillaire.Mais, dans cette hypothèse, son effet ne doit pas être très important, puisqu'entre 0,5 et 1% leretrait n'évolue pas **[30]**.

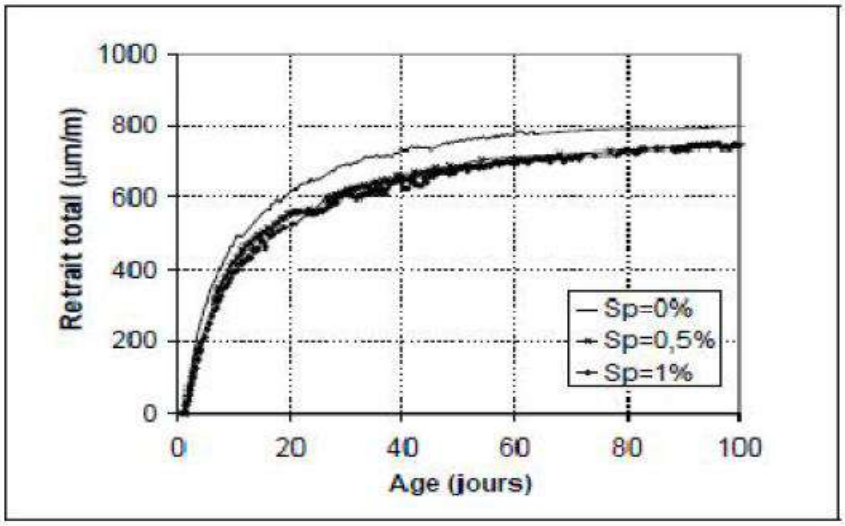


Figure 1.9: Effet du dosage en superplastifiant sur le retrait total **[30]**.

1.2.5. DOMAINE D'EMPLOI DES BAP

Les caractéristiques des BAP laissent entrevoir de nombreuses possibilités techniques du fait de leur grande fluidité :

- Possibilité de coulage de zones fortement ferraillées ;
- Possibilité de coulage de zones d'architecture complexe;
- Obtention de très bonnes qualités de parement.

L'un des avantages majeurs du BAP est de permettre la réalisation de parements de grande qualité. Leur composition, riche en éléments fins, permet d'obtenir une texture de surface plus fine et plus fidèle à la peau coffrante utilisée. Les aspects satinés, lisses ou très structurés recherchés par les architectes sont alors plus facilement réalisables. Des teintes homogènes et régulières peuvent être obtenues si les conditions de mise en œuvre évoquées précédemment sont respectées, notamment du point de vue de la propreté des coffrages.

L'utilisation des BAP présente des intérêts architecturaux importants puisque, sans augmenter les performances mécaniques d'une structure donnée, ils permettent l'optimisation des sections ou la réalisation d'éléments de forme complexe. Les BAP constituent donc une alternative particulièrement intéressante au béton vibré dans les différents domaines de la construction : bâtiment, ouvrages d'art, tunnels, préfabrication, réhabilitation, etc.

Walraven**[31]** précise cependant que les BAP sont souvent adoptés dans le domaine de la préfabrication grâce aux avantages et aux gains directs qu'ils présentent. Globalement, leur utilisation permet de réduire les coûts de production et, parallèlement, d'améliorer les

conditions de travail et la qualité des produits finis. Leur utilisation est plus délicate sur site car les BAP sont particulièrement sensibles aux variations de teneur en eau. Or, bien que la production soit contrôlée, les lots de matériaux peuvent avoir des caractéristiques légèrement différentes.

1.3. EFFET DES ADDITIONS MINERALES SUR LES PROPRIETES DES BAP

1.3.1. DEFINITION

Une addition minérale est définie par la norme européenne comme étant un matériau minéral d'une finesse supérieure à celle du ciment. Elle peut être ajoutée et/ou substituée au ciment lors de sa fabrication (ciment composé), ou ajoutée directement dans le malaxeur lors de la fabrication du béton. Elle permet ainsi d'améliorer certaines propriétés où conférer aux matériaux des propriétés particulières**[32]**.

L'utilisation des additions minérales est devenue une pratique courante depuis de nombreuses années, du fait de leurs disponibilités et de leurs prix modérés, La préoccupation des recherches est de mettre au point un liant dans lequel sont incorporés des déchets industriels (laitiers ou cendre volante) ou des ressources naturelles telles que le calcaire et la pouzzolane qui permettent d'améliorer les caractéristiques du béton et du mortier de ciment.

La plupart des ajouts minéraux sont des sous-produits provenant de l'industrie et leur coût est souvent égal au coût du transport et de manipulation. Ainsi l'incorporation des ajouts minéraux à la formulation de béton comme substituant du ciment qui est le produit le plus cher, contribue à réduire le coût du béton et la quantité de combustible utilisée pour l'industrie du ciment, et par conséquent l'émission du CO_2 de l'industrie cimentière dans la nature. D'autre part leurs utilisations ont pour objectif d'améliorer les caractéristiques du matériau à l'état frais et à l'état durci pour augmenter sa résistance et sa durabilité.

Les ajouts minéraux se substituant au ciment peuvent être classés en fines actives telles que la fumée de silice et la pouzzolane naturelle et en fines inertes telles que le calcaire. Une autre classification est basée sur la source de chaque produit où on trouve:

a) *les produits artificiels*

- les laitiers des hauts fourneaux,
- les cendres volantes,

- la fumée de silice,
- l'argile calcinée (méta kaolin),
- les déchets d'incinération,
- les déchets de briques concassées.

b) *les produits naturels*

- la pouzzolane naturelle (cendres volcaniques, scories)
- le calcaire
- l'argile opaline
- les additions siliceuses (sable)

En Algérie, l'emploi des ajouts dans l'industrie cimentaire est encore dans sa phase préliminaire avec uniquement de faibles proportions utilisées de ces matériaux. On peut citer, l'utilisation des ajouts actifs tels que le laitier d'EL-Hadjar par la cimenterie de Hamma Bouziane et la pouzzolane naturelle de Beni-Saf par l'ERCO. Par contre, d'autres cimenteries utilisent des ajouts inertes tel que le calcaire comme l'ECDE (Chlef). La nouvelle cimenterie de M'sila utilise déjà un ciment ternaire combinant la pouzzolane (7.5%) et le calcaire (7.5%) **[33]**.

1.3.2. ACTION DES ADDITIONS MINERALES

Il est bien connu de nos jours que la réactivité des ajouts minéraux dépend de leurs minéralogies et des caractéristiques de leurs particules. Généralement, ces ajouts peuvent être représentés sur le diagramme ternaire illustré sur la figure 1.10. Selon leur activité avec le ciment ordinaire, les ajouts se divisent en ajouts pouzzolaniques et hydrauliquement latents ; qui réagissent et produisent d'autres hydrates, et les fillers inertes qui ont un rôle physique de comblement des interstices et de diminution de la porosité **[34]**.

Un ajout possédant une hydraulicité latente est composé de silicates amorphes combinés avec des ions de calcium, de magnésium et d'aluminium et qui réagit en présence d'hydroxyde de calcium ($CaOH_2$) ou n'importe quelle solution basique. On peut citer le cas du laitier des hauts fourneaux et des cendres volantes de classe C ayant des teneurs en CaO supérieures à 20% **[34]**.

Lorsque la composition des silicates amorphes est non uniforme et présente un taux élevé d'aluminosilicates amorphes, l'ajout présente en même temps des propriétés pouzzolaniques et hydrauliques latentes, comme le cas des cendres volantes de classe C ayant un taux de CaO compris entre 10 et 20 % **[34]**.

Un ajout composé principalement de silicates amorphes combinés avec des aluminates est considéré pouzzolanique comme le cas des cendres volantes de classe F et des pouzzolanes naturelles. Ces silicates vitreux peuvent se combiner, en présence d'eau, avec la chaux libérée par l'hydratation de C_3S et de C_2S pour former un silicate de calcium hydraté de même type que celui qui est formé durant l'hydratation du ciment Portland. Lorsque la surface spécifique de l'ajout est très fine, l'ajout est considéré très pouzzolanique comme le cas de la fumée de silice.

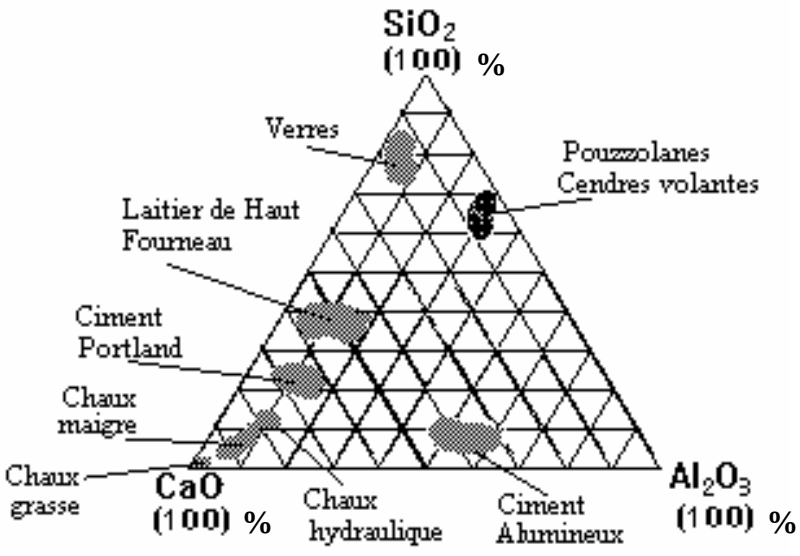


Figure 1.10: Représentation des principaux ajouts dans un diagramme SiO_2 – CaO- Al_2O_3**[35]**.

Lorsque les substances minérales sont composées avec des minéraux cristallins ayant une faible réactivité, elles doivent être bien broyées pour développer des résistances acceptables où leur action est limitée au simple effet physique, comme les calcaires et les sables siliceux. L'effet physique de l'ajout se limite à trois rôles:

a) Effet de dilution : L'effet de dilution apparaît lorsqu'on remplace une partie de ciment actif par un ajout moins actif. Les grains de ciment se trouvent dilués dans une solution ayant un rapport E/C plus élevé.

b) Effet de nucléation : La substitution d'une partie de ciment par une substance minérale crée un milieu hétérogène avec des nouveaux sites de nucléation (germination) ayant une faible énergie de contact favorisant ainsi la précipitation des hydrates.

c) Effet filler : L'introduction d'une substance minérale très fine complète le squelette granulaire du ciment et comble le vide entre les grains en donnant une meilleure compacité de la pâte.

1.3.3. FILLERS CALCAIRES

1.3.3.1. Définition

Les additions calcaires sont majoritairement utilisées. Dans le cadre de la formulation des bétons autoplaçant, un grand volume d'addition est nécessaire de manière à réduire la quantité de ciment induite par l'augmentation du volume de pâte nécessaire pour permettre l'écoulement du béton **[36]**.

Les calcaires peuvent avoir des origines géologiques différentes, métamorphique (ils'agit de marbres) ou sédimentaire. Ils peuvent aussi exister sous plusieurs formes (calcite,aragonite, vatérite).Ils sont soit récupérés lors du concassage des granulats calcaires etpeuvent alors contenir des résidus argileux et des matières organiques, soit obtenus parbroyage du matériau cru. Leurs compositions chimique est celle du carbonate de calcium($CaCO_3$) mais ils peuvent contenir aussi du magnésium (sous forme CaMg $(CO_3)_2$), s'ilréagit de calcaires dolomitique.Les additions calcaires sont des additions de type(I) classées comme quasiment inertes

L'appellation de filler calcaire vient du fait que cette addition, si elle est broyée assez finements'insère dans le squelette granulaire du ciment et permet donc de combler les vides entre lesautres particules de dimensions plus importantes du béton (ciment, granulats). Et va donc avoir des effets sur les propriétés aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci (figure 1.11)**[36]**.

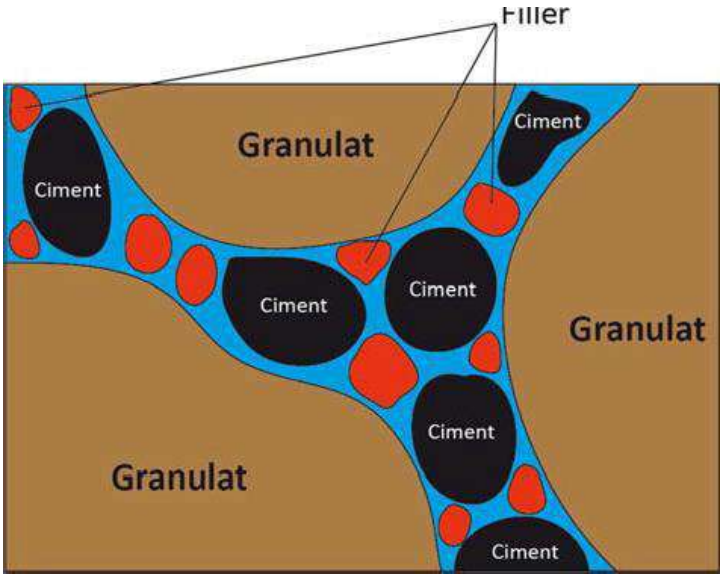


Figure 1.11 : Effet des fillers calcaires dans une pâte cimentaire **[36]**.

1.3.3.2. Effet des fillers calcaires sur les caractéristiques des BAP

A. *Etat frais*

L'utilisation d'un filler permet par définition de combler les vides entre les grains de dimensions plus importantes du ciment. Cela conduit à la réduction de la demande en eau de la pâte de ciment ainsi obtenue **[37]**. Cet effet bénéfique est expliqué par SCHMIDT **[38]** :« Les particules fines déplacent une partie d'eau des vides entre les particules les plus grosses, la rendant disponible comme lubrifiant interne additionnel. Ainsi le béton est moins ferme et la conservation d'eau est améliorée », les fines calcaires contribuent également au maintien de l'homogénéité des bétons en augmentant la cohésion et en s'opposant à la ségrégation **[39]**.

La rhéologie des pâtes, des mortiers et des bétons dépend de la qualité du filler et de safinesse. Si le filler est finement broyé, il y aura une réduction de la quantité d'eau pour unemaniabilité fixe, surtout pour des rapports E/C < 0,40. Il a étérapporté que l'ouvrabilité du béton augmente avec la finesse du filler calcaire jusqu'à 500m^2/kg. Au-delà de cette limite, il peut y avoir des problèmes de maniabilité**[32]**.

En gardant le même pourcentage d'eau, on constate que jusqu'à 20% de taux de remplacement, les fines calcaires, de diamètre médian inférieur à celui du ciment, jouent le rôle d'un fluidifiant **[40]**. Au-delà de ce pourcentage, ces fines ont un effet épaississant

[40]. Pour le même volume de substitution, le besoin en eau est identique à celui d'un ciment ordinaire pour de faibles taux de substitution et ne devient important qu'à partir de 10% **[41]**.

Puisque les fillers calcaires sont composes de particules de dimensions inferieures a 125fÊm, leur surface spécifique va jouer un rôleprépondérant sur l'écoulement en suspension **[42]**. Selon Nehdi M.**[43]**, Neto et Campitelli observent la réduction du seuil de cisaillement avec l'augmentation de la teneur en filler calcaire, et aussi l'augmentation de la viscosité plastique au-delà d'une certaine valeur de la finesse du calcaire.

Les fillers calcaires peuvent également contribuer au contrôle du temps de prise par laformation decarbo aluminate de calcium (structure similaire à celle du monosulfoaluminate).Le temps de début et de fin de prise diminue avec la teneur en calcaire. Les résultats **[40]** montrent que comparativement aux ciments portland ordinaires, les ciments contenants du calcaire ont une prise accélérée. Un ciment contenant 35% de calcaire a une prise accélérée de 40 min et que la finesse du calcaire n'a pas d'influence significative sur la prise **[40]**.

Par contre, Guemadi et al.**[41]** jugent que l'influence du taux de substitution en fines calcaires est relativement faible sur les temps de début et de fin de prise dans l'intervalle de 0% à 20%. Au-delà de ce taux, les fines prolongent les temps de début et fin de prise de 20 à 90 minutes et jouent le rôle d'un retardateur de prise.Brookbans (cité par **[42]**), a étudié l'effet de l'addition de 5 à 28% de poudre calcaire au ciment sur les propriétés du béton frais ,il a observé que le temps de prise est réduit quand on augmente le taux de fillers et que ces derniers réduisent beaucoup la quantité d'eau et probablement n'ont pas un effet d'entraîneur d'air.

B. ***Etat durci***

Plusieurs auteurs ont étudiés l'effet de l'ajout des fillers calcaires sur les performances mécaniques des bétons. Les fillers calcaires contribuent à la formation de la modification de la microstructure. L'addition du $CaCO_3$ accélère l'hydratation au jeune âge par modification de la surface de ce dernier et de son effet de nucléation.

Il est montré que l'utilisation de filler permet l'amélioration des résistances mécaniques des mélanges cimentaires (pate, mortier, béton). Cet effet positif dépend fortement du dosage en filler et le maximum de résistance est généralement atteint avec un taux de substitution de

10% **[44, 45]**. Au-delà, l'effet du filler n'entraine pas de modification des résistances ou alors entraine une diminution. On observe une chute de résistance allant jusqu'à 45% pour 40% de calcaire dans le ciment.

Plusieurs études **[46, 47]** ont observé que cette amélioration est à jeune âge et que les résistances diminuent à 28jours. Kakali et al. **[47]**, ont montré que la teneur en eau liée (non évaporé), déterminée par essai de thermogravimétrie est plus élevée dans les pates de ciment avec ajout calcaire en comparaison au ciment sans ajout calcaire. Ceci indique que le calcaire améliore la réactivité du clinker et exploite son potentiel hydraulique. D'autre part, le contenue de Ca(OH)2 dans la pâte de ciment au calcaire est plus élève que de celle sans calcaire. Cette augmentation indique une accélération d'hydratation de silicates de calcium.

Schmidit**[38]** a observé que la résistance des ciments n'est pas normalement réduite par l'addition de 5-10% de calcaire, mais l'effet de dilution est vu à des dosages plus élevés à moins que le ciment soit plus finement broyé ce qui est prouvé par Notat **[48]**.

En étudiant quelque propriété des mortiers à base d'addition, Amouri C.**[49]** a puobserver que les mortiers avec calcaires à 10% de substitution ne provoquent aucuneaugmentation de la masse volumique des mortiers frais; cette dernière décroissent pour lestaux plus forts (20%), L'étude a démontré également que les mortiers avec calcaires à10% de substitution et de finesse voisine du ciment donnent des résistances à jeune âgelégèrement supérieures aux autres. Mais ils présentent les mêmes résistances que lescendres volantes pour les échéances supérieures (28 et 90 jours).

Certains de ces résultats ont étés confirmés par EZZIANE **[35]** qui a trouvé que l'incorporation des fillers ayant des surfaces spécifiques élevées (3600 et 3100 cm_2/g) améliore sensiblement les résistances à la compression surtout pour des valeurs de substitution de l'ordre de 10%. Au-delà de cette valeur, une chute de résistance a été observée allant jusqu'à 45% pour 40% de calcaire dans le ciment. De même Bouali **[40]** confirme que la résistance à la compression du ciment contenant du calcaire augmente avec l'augmentation de la finesse jusqu'à 5890 cm^2/g, mais reste toujours inférieure à celle du ciment de référence.

Néanmoins avec des proportions de 5 et 15%, la résistance à la compression au jeune âge est meilleure que celle du ciment témoin. La contribution aux gains de résistances apportés par le filler calcaire est due principalement à la réduction de lademande en eau et une meilleure utilisation du potentiel hydraulique du clinker.

Une étude de l'incidence du calcaire finement broyé sur la durabilité des bétons conservés dans l'eau de mer **[50]** affirme que la masse volumique du béton aux fines calcaires est plus élevée que celle du béton de référence. Il est ainsi confirmé que la surface spécifique élevée du calcaire favorise l'accroissement de la compacité de la matrice cimentaire. Cet effet permettrait une réduction de la porosité capillaire (et donc de la perméabilité) et par conséquent une augmentation des résistances chimiques envers le milieu agressif (l'eau de mer).

Bouali R. **[40]** a démontré lors de son étude sur la contribution du calcaire dans un ciment portland artificiel et d'un béton que la présence du filler calcaire augmente le retrait durant les 24 premières heures. Le retrait augmente aussi avec la finesse du filler, sauf dans le cas d'une granulométrie optimisée. Pour une période supérieure à 24 heures, il n'y pas de différence pour le retrait par séchage Un mortier contenant 15% de calcaire possède, à 2, 7 et 28 jours, un retrait de 25, 16 et 7% inférieur à celui d'un mortier sans calcaire.

1.3.4. POUZZOLANE NATURELLE

1.3.4.1. Définition

La pouzzolane est une roche naturelle correspondant à des projections volcaniques scoriacées. Sa couleur varie généralement du noir au rouge selon le degré d'oxydation du fer; présent respectivement sous forme de magnétite ou d'hématite. Elle est essentiellement composée de silice réactive (dans des proportions supérieures à 25%), d'alumine et d'oxyde de fer **[51]**. Actuellement en Algérie, le gisement de BOUHAMIDI, situé à 2.5 km de Beni-Saf, demeure l'unique gisement exploité. La production est estimée de 1000 à 1400 tonne/jour. La quasi-totalité de cette quantité est destinée aux cimenteries ERCO de l'Est et de L'ouest du pays **[51]**.

Et depuis les recherches se sont multipliées afin de mieux connaître ce produit et ses effets sur la qualité du ciment. Cette pouzzolane possède un indice d'activité de 0,82 pour un taux de substitution de 25%, sachant que pour une poudre inerte, l'indice d'activité est de 0,67 et 1 pour le ciment ; la pouzzolane étudiée est donc réactive **[52]**.

1.3.4.2. Effet de la pouzzolane naturelle sur les caractéristiques des BAP

A. ***Etat frais***

Pour des finesses proches, le besoin en eau est plus important pour les mortiers avec additions de pouzzolanes que pour les mortiers avec additions calcaires quel que soit la nature du ciment utilisé dans le mélange **[53]**.

L'effet de la pouzzolane naturelle de Béni-saf sur les propriétés des pâtes de ciments à l'état frais a été étudié par AICHOUBE et al. **[54]**. Il a été montré que la substitution du ciment par 10% à 30%de pouzzolane, engendre une augmentation de la consistance normale (diminution de l'ouvrabilité) et une diminution du temps de prise de la pâte de ciment. En effet, il a été montré que l'addition de la pouzzolane naturelle en grandes quantités engendre une accélération de la prise de la pâte de ciment générée par une importante consommation d'eau par l'hydratation.

COLAK **[55]** a également montré qu'à maniabilité constante, le besoin en eau des pâtes de ciment Portland augmente lorsque le ciment est substitué par la pouzzolane naturelle. Hammat**[56]** et Allali**[57]** ont confirmé cette réduction d'ouvrabilité traduite par une réduction du diamètre de la galette du béton qui est décrit par l'essai d'étalement. Diamantonis et al. **[58]**, ont aussi observé que la substitution du ciment portland par la PZN (20% à 40%) augmente la valeur de seuil d'écoulement des BAP d'une manière significative.

D'après Turanli et al. **[59]**, cette augmentation de la demande en eau est interprétée par la nature microporeuse et la forme angulaire des particules de la PZN. La forme arrondis des particules de la PZN avec des surfaces rugueuses donne une capacité d'absorption plus importante d'eau dans les pâtes de ciment. En plus, l'existence de la minérale zéolite fait incorporer les molécules d'eau dans leur structure poreuse interne.

B. ***Etat durci***

La lenteur de la réactivité de la pouzzolane engendre un retard de sa prise. Les temps de début et de fin de prise augmentent proportionnellement avec l'augmentation de la quantité substituée au ciment. Cela s'explique par la réaction pouzzolanique retardée et par la faible quantité de CSH formé au très jeune âge. Ce retard devient plus important, notamment pour 40 et 50 % de taux de substitution. Pour 20% de pouzzolane, les temps de début et de fin de prise se sont prolongés respectivement de 35 et 77 minutes **[52]**. De même, le début de prise a diminué d'une heure en allant d'une finesse de 3500 à 5700 g /cm^2 de la pouzzolane **[60]**.

La plus grande partie de l'évolution des résistances se produit à partir de l'âge de 7 jours. Toutefois, à 28 jours les résistances du mortier contenant de la pouzzolane sont comparables à

celles du mortier témoin, et à 45 jours elles deviennent supérieures. Pour 30% de pouzzolane les résistances sont comparables et deviennent supérieures à celles du ciment ordinaire en augmentant sa surface spécifique **[60]**.

BelasBelaribi et al.**[61]** présentent l'évolution relative de la résistance à la compression des différents bétons pouzzolaniques par rapport à la résistance à 28 jours par l'histogramme de la figure 1.12. Il est montré que les performances mécaniques se développent dans les premiers jours de l'hydratation pour le béton témoin et après 28 jours pour les bétons pouzzolaniques ; le béton avec 20% de pouzzolane atteint la même résistance que le béton ordinaire. En plus, à un jour d'hydratation, les résistances des bétons sont identiques dues à une forte activité de la pouzzolane au très jeune âge. D'autre part, Mebrouki et al. **[52]** constatent qu'un taux de substitution de 10% représente l'optimal, et du point de vue gain de résistance, ils observent ceci au-delà de 28 jours pour un taux de substitution de 30%.

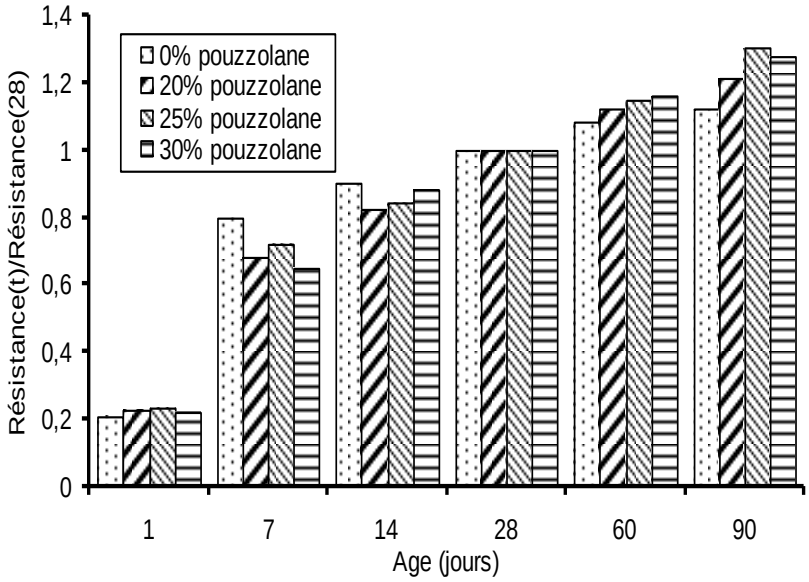


Figure 1.12 : Evolution de la résistance à la compression relative (f_{cj}/f_{c28}) des bétons pouzzolaniques en fonction de l'âge **[61]**.

Selon les résultats d'Ezziane et al.**[62]**, le taux optimal est autour de 15 % pour un mortier durcissant sous une température ordinaire et qui augmente avec l'élévation de la température.

L'analyse des résultats expérimentaux a permis de déduire l'énergie d'activation apportée par la présence de la pouzzolane, qui lui donne une sensibilité à l'élévation de la température ; en réduisant les écarts entre les résistances des différents taux utilisés. L'énergie d'activation s'élève de 25 à 33 kJ/mole lorsqu'on substitue le ciment par 40% de la pouzzolane de Béni-Saf. Cette énergie d'activation rend cette pouzzolane sensible à l'élévation de température et son utilisation très prometteuse en climat chaud.

Dans une autre étude, Belhachemi**[63]** met en évidence une valeur optimale de la surface spécifique de la pouzzolane de Beni-Saf sur l'évolution des résistances mécaniques comme le montre clairement la figure1.13. L'effet de la finesse est beaucoup plus prononcé au jeune âge où les résistances à deux jours s'améliorent considérablement pour la pouzzolane la plus fine par contre à 28 jours la finesse ne semble avoir qu'un faible effet sur les résistances.

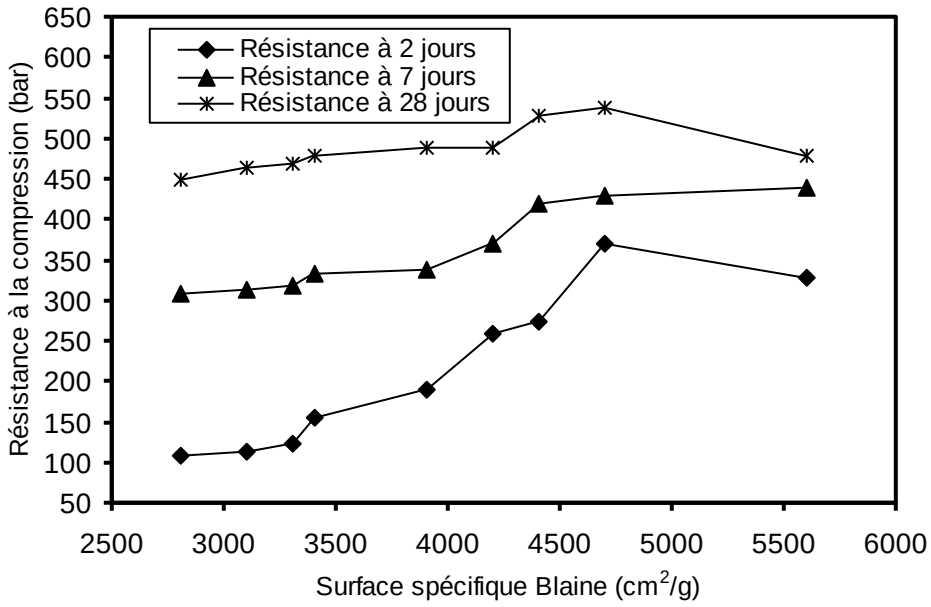


Figure 1.13 :Résistance à la compression en fonction de la surface spécifique Blaine de la pouzzolane de Béni-Saf**[63]**.

Des améliorations dans les performances mécaniques des mortiers ont été constatées**[64]** avec l'ajout de l'addition siliceuse pour les dosages 5 à 10 % de fumée de silice auciment Portland contenant 15 % de pouzzolane naturelle en comparaison avec le mortiertémoin. Ceci donne des résistances mécaniques supérieures à celle du mortier témoin**[65]** Pour le même taux de substitutions par la Pouzzolane naturel de béni-saf (15%) àun ciment (CPJ 32.5), il a été

remarqué une augmentation importante de la résistance à lacompression et à la flexion dès le 28ième jour pour les Béton auto plaçant.

Benkaddour et al. **[66]** dans leur étude ont trouvé que la résistance en compression diminue considérablement avec l'augmentation du pourcentage de la pouzzolane à jeune et à moyen âge (2, 7 et 28 jours). A titre d'exemple, ils ont remarqué qu'une substitution de 30% de pouzzolane naturelle engendre une diminution de la résistance en compression de 36,7% ; 6,2% et 24,5% à 2, 7 et 28 jours respectivement.

D'autre part, Benkaddour**[66]** a montré qu'un taux de substitution de 30% de pouzzolane engendre une diminution de 15% de la résistance à la compression des bétons à long terme (90 jours). Ces résultats sont similaires avec ceux obtenus par Aichoub et al. **[54]** qui ont trouvé une diminution de 11% de la résistance à la compression à l'échéance de 90 jours. Cependant, il a été affirmé par autre chercheur que l'utilisation de la pouzzolane naturelle entraine un accroissement de la résistance des bétons à long terme **[67]**,et une augmentation des résistances mécaniques (compression et flexion) ainsi qu'une cinétique d'hydratation accélérée pendant la période de durcissement initial (à court terme). Ceci est dû à la finesse de la pouzzolane et au pourcentage d'hydroxyde de calcium dans les différents mélanges ciment et pouzzolane, qui accélère le processus d'hydratation, en assurant une prise rapide, ce qui réduit les temps de prise des différents mélanges **[68]**.

Les romains utilisaient déjà la pouzzolane dans leurs ciments pour la confection d'ouvrages qui ont fait leur preuve depuis de nombreux siècles. Nombreux chercheurs ont affirmé que cette durabilité est due à l'incorporation de la pouzzolane qui améliore la cohésion interne ainsi qu'une augmentation de compacité de la pâte de ciment ce qui réduit la porosité qui en découle pour toute la matrice cimentaire se traduit par une réduction de la perméabilité à l'eau jusqu'à des valeurs d'étanchéité ainsi une protection des armatures contre la corrosion et une très nette amélioration de la résistance du béton aux eaux douces **[68]**.

La réaction pouzzolanique conduit à une réduction de la chaux libre dans la pâte de ciment et donc réduire le risque d'attaque des sulfates. Les résultats montrent bien la diminution de l'expansion des mortiers contenants 10%, 30% et 40% de la pouzzolane naturelle et conservés dans solution contenant 1% de Mg SO4 pendant 5 ans **[69]**.

L'introduction de la pouzzolane dans la composition des mortiers par sa substitution au ciment fait augmenter les déformations libres, lorsque ces mortiers sont conservés à l'air et lorsque le taux de remplacement est supérieur ou égal à 50%. Pour des pourcentages

inférieurs, les mortiers pouzzolaniques auront des déformations inférieures à celles du mortier de référence sans pouzzolane comme l'illustre la figure 1.14**[52]**.

Kaid et al **[70]** étudient l'effet de l'incorporation de la pouzzolane naturelle de la région de Beni-Saf, sur l'évolution des déformations différées et concluent que les déformations du mortier contenant 10% et 15% de pouzzolane naturelle, se rapprochent de celle du mortier témoin, par contre celles du mortier contenant 5% d'ajout diminuent d'environ 30%.

De même il a été démontré **[71]** que l'incorporation de la pouzzolane naturelle comme un mélange de minéraux dans le béton auto compactant semble être très bénéfique pour la résistance de ces bétons dans un milieu de sulfate de sodium.

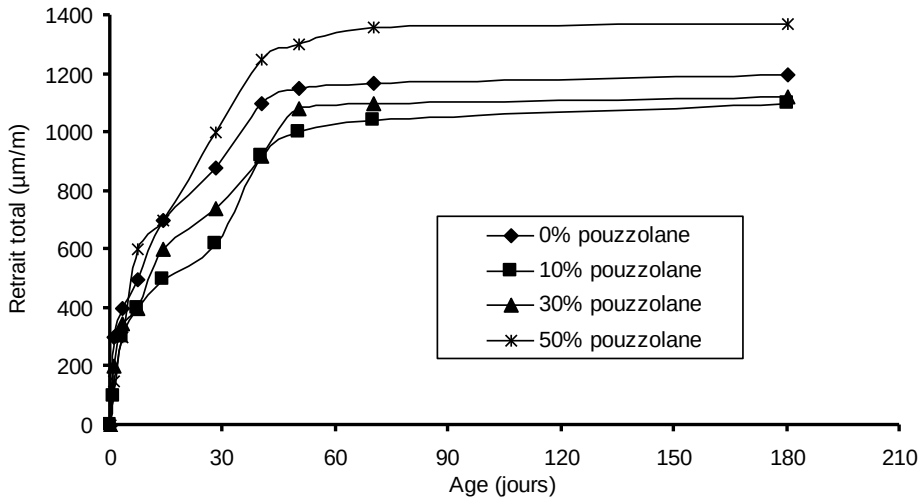


Figure 1.14 : Evolution du retrait total des mortiers pouzzolaniques**[52]**.

ITIM, A **[72]** rapporte que la présence des ajouts minéraux à des taux convenables fait diminuer le retrait de dessiccation, cela est le résultat de leur contribution à l'amélioration de la microstructure. Le calcaire engendre un retrait semblable à celui du ciment ordinaire, par contre le laitier fait diminuer le retrait final proportionnellement aux taux de substitution. De son côté, la pouzzolane naturelle fait augmenter le retrait à 10% de substitution et une fois cetaux dépassé sa valeur est réduite. Les pertes d'eau sont plus significatives au jeune âge pourle calcaire et le laitier. Ceci montre la nécessité d'une cure prolongée pour les éprouvettes

delaitier et de calcaire et un peu moins pour celles à la pouzzolane pour éviter toute perte d'eauqui peut entraîner l'affaiblissement de l'hydratation.

1.3.5. COMBINAISON DES ADDITIONS MINERALES

La substitution de ciment par deux ajouts est devenue très répandue de nos jours, celapeut donner un effet synergique entre les différentes substances et compléter les effets positifsentre les ajouts actifs et inertes.

GHRICI M et al.**[73]** ont menés une étude pour évaluer l'effet de l'interaction entredes additions; le filler calcaire et de pouzzolane naturelle sur les propriétés des mortiers etbétons. Ils ont conclus que ; Le point de forces maximales est d'environ 10% de filler calcaireet un faible niveau de remplacement pouzzolane naturelle dans les premiers âges. Après 28jours, ce point se déplace vers le haut niveau de remplacement de la pouzzolane naturelle etfaible teneur en filler calcaire.

Les résultats menés à travers l'étude de Kerbouche et al. **[74]**, permettent de conclure que lasubstitution d'un ciment Portland par un taux de 10% de fines calcaire améliore lesrésistances mécaniques (flexion et compression) des mortiers binaires au très jeune âge (2jours) par contre ces dernières sont améliorées par des taux de 30% de pouzzolane naturelleet 10% de fumée de silice à long terme (90 jours). Pour les mortiers ternaires combinant à lafois deux ajouts, les substitutions (10% pouzzolane/10% calcaire) et (10% pouzzolane/10%fumée de silice) améliorent nettement leurs résistances mécaniques à long terme (90 jours).

Une étude sur l'effet de l'incorporation de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf, sur lespropriétés physico-mécaniques d'un ciment à base de calcaire a été menée parAICHOUBA.A et al.**[75]**, ils ont confirmés que l'utilisation des ciments ternaires contribued'une façon positive à l'amélioration des résistances mécaniques des ciments, de La durabilitéest une meilleure résistance aux acides.

Le remplacement de 10 à 30 % du ciment au calcaire par la pouzzolane naturelleaugmente la quantité d'eau nécessaire pour l'obtention de la consistance normale du liant**[75]**. Cela est probablement dû à la grande surface spécifique présentée par le mélange etdonc un fort appel aux molécules d'eau, afin de mouiller toute la surface.

En combinant la pouzzolane et le laitier, CHABI et al.**[76]** ont abouti à une quantitéoptimale de 35% qui représente une meilleure résistance et une meilleure économie, de mêmele ciment à la pouzzolane et au laitier montre une meilleure durabilité grâce à sa résistanceaux milieux agressifs. Avec 15% de laitier et 15% de pouzzolane dans une pâte de ciment.

MANSOURS.**[77]** a mené un travail qui consiste à introduire une addition inerte(calcaire) dans un ciment contenant de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf. Le couplecomposé de 70% CPA, 20% pouzzolane et 10% calcaire développe une résistance trèscomparable à celle du mortier témoin. En plus, une amélioration de la durabilité est observéevis-à-vis de l'attaque des mortiers par les sulfates et les acides.

1.4. EFFET DE LA TEMPERATURE DE CURE SUR LES PROPRIETES DES BAP

1.4.1. INTRODUCTION

Les BAP sont utilisables aussi bien pour la réalisation d'ouvrages horizontaux que verticaux, sur tous les types de chantier, de bâtiments ou de génie civil et pour la réalisation de nombreux produits préfabriqués en béton.

La préfabrication d'éléments en béton se présente actuellement comme une branched'activité indispensable au secteur de la construction moderne grâce à une optimisation descoûts, à uneréduction des délais et à une gamme de solutions variées. Ainsi, en 2005, laproduction de béton relative à la préfabrication représente 30 millions de tonnes sur 145millions de tonnes au total soit plus de 20% **[78]**. De plus, les délaislimités de fabrication en usine, la disponibilité et la facilité de mise en oeuvre sont des atoutsqui apportent aux clients une certaine garantie sur la qualité et des performances contrôlées àun coût global compétitif.

Dans des conditions de température élevée, la pâte de ciment subit des changements physiques et chimiques susceptibles d'affecter significativement les propriétés mécaniques et la durabilité des structures en béton. L'interaction entre les conditions atmosphériques ambiantes et la chaleur dégagée lors de l'hydratation du ciment, engendre un gradient de

température et une dessiccation qui peuvent conduire à une chute de résistance, à une fissuration ou à une détérioration de la durabilité **[79]**.

Le ciment est très affecté par l'élévation de température qui joue un rôle fondamental dans la microstructure de la pâte et dans l'évolution des résistances mécaniques. Les qualités du ciment durcissant sous une température élevée sont souvent dépendantes du type de ciment, de sa finesse et du rapport E/C. Les résistances mécaniques au jeune âge sont souvent améliorées tandis que les valeurs ultimes sont réduites par rapport à celles correspond à une température normale **[80]**.

L'élévation de température affecte le système d'hydratation du ciment en altérant la période dormante et le changement de la morphologie des hydrates formés ainsi que la quantité d'ettringite. Cette formation a des conséquences négatives sur la microstructure par une importante porosité et une distribution non uniforme des hydrates. En plus, pour des températures supérieures à 70°C sous une humidité relative élevée, les bétons sont soumis à une expansion causée par la formation retardée d'ettringitte **[81]**.

1.4.2. EFFET DE TEMPERATURE SUR LES RESISTANCES MECANIQUES

Un béton qui durcit sous une température élevée se caractérise par une accélération de son hydratation au jeune âge donnant lieu à des résistances élevées pour tous les types de bétons , vibré, autoplaçant ou de haute performance, avec ou sans ajout. Cet effet bénéfique n'est liée à aucune grandeur que la température, plus elle est élevée, plus la vitesse d'hydratation est rapide plus la résistance au jeune âge est élevée aussi **[82-84]. C**ette augmentation ne durepas pour tous les types de bétons, les résultats des recherches se diffère entre une diminution, stabilisation et même une augmentation de la résistance par rapport à celles d'un béton durci sous une température ambiante de 20°C et cela fonction du type de béton, type et le taux d'additions et l'humidité de cure.

L'amélioration des résistances au jeune âge est due à une formation accélérée des CSH et à une dissolution rapide des cristaux. A long terme, les hydrates formés n'ont pas eu le temps de s'arranger convenablement ce qui engendre une chute des résistances finales. De plus, les recherches actuelles confirment que l'élévation de la température a un effet négatif sur la microstructure du ciment durci par l'augmentation de sa porosité, la diminution de ses résistances ultimes et la détérioration de sa durabilité **[85, 86]**.

Plusieurs chercheurs ont prouvé une diminution de la résistance soit à 7, 28jours ou à long terme. Au fait, ils y'a plusieurs explications de la chute des résistances, Pour certain elle est prévisible en raison de la perte d'humidité dans les pores capillaires par évaporation d'eau due à l'augmentation de la température où l'hydratation dissipée peut entrainer une réduction d'hydratation après les trois premier jours **[87, 88]**.Bakharev et al. **[89]**et Mirza et al. **[90]**attribuent cette chute au nombre important d'hydrates précipités sous une température élevée et qui constituent des barrières contre la diffusion des ions ce qui cause une hétérogénéité dans la pâte et une réduction des résistances.

D'autre explique cette diminution qu'au départ la réaction d'hydratation est thermoactive et le degré d'hydratation évolue rapidement, Ensuite parce que les hydrates formés lorsque la température augmente sont plus faibles mécaniquement et leur distribution est non uniforme, la résistance à long terme devient plus faible **[91-93]**.D'autres parts Dent et al. **[94]** ont trouvé qu'une augmentation de la température n'entraîne pas de modifications significatives de la nature des hydrates formées (pour une température inférieure à 80°C environ), mais surtout une modification de leur arrangement, À un âge plus avancé, le nombre important des hydrates formés n'ont pas le temps d'organiser convenablement, et cela engendre une perte de résistance. **[95, 96]**.

1.4.3. EFFET COMBINÉ DES ADDITIONS MINÉRALES ET DE LA TEMPÉRATURES SUR LES PROPRIÉTÉS DES BÉTONS

Neville **[97]** a précisé que le béton qui est soumis à la haute température affectera la structure de la pâte qui implique la formation de produits avec la structure ouverte, mais ce fait est empêché par la présence des additions.Turkel et al. **[98]** ont rapporté que les ciments composites fonctionnent bien sous traitement thermique.

Les troubles provoqués par l'augmentation de température peuvent être minimisé par l'utilisation des additions minérales tels que la pouzzolane naturelle, de cendres volantes ou de laitier granulé de haut fourneau, en fonction de ces caractéristiques et leurs taux de remplacement, Ils donnent au béton une performance remarquable dans les climats chauds où l'effet négatif de la température est réduit, ces additions peuvent modifier la cinétiqued'hydratation, réduire le dégagement de chaleur et produire des hydrates CSH supplémentaires **[99]**.

Pour un ciment ordinaire, il apparaît que les résistances ultimes décroissent linéairement avec l'élévation de température **[100]**. La présence de certaines substances minérales peut modifier

la cinétique de l'hydratation, réduire le flux de chaleur dégagée et produire des hydrates CSH additionnels **[99]**. A une température élevée, ces substances minérales affectent l'hydratation du ciment et minimisent les désordres causés par la température selon la quantité et la qualité de ces additions.

L'effet bénéfique des additions dans des températures élevé est indiqué par plusieurs chercheurs. En effet, Pratas**[101]** a effectué un essai avec deux mélanges, un avec CPA et l'autre avec un remplacement de 50% du ciment par des laitiers. Les échantillons ont été maintenus dans l'eau aux températures de 5°C, 20°C et 30°c juste après démoulage ; ceci a montré que la résistance des laitiers est plus affectée par la température de 5°c que celle du ciment Portland mais à une température de 30°c la tendance a été renversée. Selon les résultats obtenues, l'augmentation de température a un effet positive sur la résistance des ciments avec 50% de laitier pour tous les âges mais pour les ciments sans additions il y'as une chute de résistances âpres le septième jour.

Videla et al. **[102]** ont étudié le comportement de ciment Portland et de ciment avec additions à diverses températures de durcissement (5, 20 et 30 °C) ont observé que la résistance du ciment mélangé montre des courbes croissantes avec l'augmentation de la température. Mirza et al. **[90]** a révélé que les mortiers avec additions pouzzolaniques tels que la poudre de tuf, le laitier et les fumées de silice permet d'améliorer les performances des mortiers et larésistance du béton à l'exposition à une température plus élevée que la normale, en particulier dans la plage de 35 à 50°C.

Les résultats des essais effectués par Wainwright et al. **[103]**sur un bétonavec un rapport E/C de 0.41incorporé de 0, 50et 70% de laitiers et soumis à une élévation de température, montrent clairement que, tous les bétons dans la condition cyclique ont montré des résistances à jeune âge supérieures que celles du béton dans les conditions ordinaires. À partir du septième jour l'élévation de la température mène à une diminution des résistances des bétons sans additions, mais avec l'incorporation de laitier les bétons gardent des résistances similaires à celles des bétons dans les conditions ordinaires.

Kanstad et al. **[104]** rapportent que l'incorporation d'addition minérale telle que la fumée de silice ou la cendre volante permet de maintenir la résistance lorsque la température de mûrissement augmente de 20°C à 55°C dans des bétons de haute performance (70 à 80 MPa). Les auteurs ne donnent pas d'explication à cette observation. Sur des niveaux de résistance plus faibles, Kim et al. **[105]** montrent également que l'emploi d'un liant ternaire (ciment type

V ASTM (ajout non précisé) + cendre volante) maintien ou améliore les résistances à 28 jours entre 23°C et 50°C (maintien des conditions de cure jusqu'à 28 jours).

L'effet de température élevée est aussi varié selon le type de béton, vibré, autoplaçant ou de haute performance. Dans des travaux sur l'effet d'une température élevée (conditions de temps chaud) à la confection (20et 50°C) et au mûrissement (20 et 35°C) sur un certain nombre de propriétés du BAP (BAP1 avec 50% fillers ; BAP 2 avec 25% Fillers et BAP 3 avec Fillers+Laitier)**[106]**, L'auteur a trouvé que l'élévation de la température initiale du béton de 20°C à 50°C favorise les résistances mécaniques à la compression à toutes les échéances étudiées (1j, 7j et 28j) pour BAP1 et BAP2. C'est un fait qui, dans le même contexte expérimental, n'était pas visible sur éprouvettes de bétons traditionnels vibrés.

Des travaux menés par Tan et Gjorv**[107]** ont montré que l'effet de la température de murissement sur la résistance à la compression exprime en pourcentage de diminution, est plus petit dans le cas de BHP que dans le cas du béton usuel. Les résultats montrent que la résistance à la compression à 28 jours diminue de 11 %, 15 % et 23 % lorsque la température augmente de 20 à 50, 65 et 80 °C respectivement pour le béton usuel. Tandis que, elle est de 2 %, 6 % et 7 % dans le cas de béton léger à haute performance. Les auteurs relient cela, au fait que, les grains de ciment sont tellement proches de façon que la quantité des hydrates formes dans la période initiale de murissement, sera suffisante pour remplir tous les espaces intergranulaires. Par conséquent, la diminution du taux d'hydratation dans la période qui suit, cause par l'augmentation de la température de murissement, n'affecte pas la résistance à long terme.

Sur un large domaine de température de cure de 20, 40, 60 et 80°C **[108]**, il a été démontré que 40°C présente la température de cure optimale des résistances d'un ciment aux cendres volantes. D'autres travaux **[109]** conclurent que 30°C est l'optimum pour le développement des résistances d'un ciment composé au laitier.

KellouchY.**[110]** a étudié l'effet de la température de cure sur une pâterenfermant 50% de laitier en élevant la température de 20°C à 40°C ; elle a déduit que latempérature de 40°C est la température la plus favorable pour l'hydratation des cimentsau laitier (l'élévation de température de cure favorise la production de CH supplémentairedû à l'activation thermique du laitier).

Berkani A. **[32]**a étudier l'effet des additions minérales (laitier granulé, pouzzolane naturelle et fillers calcaires) sur le comportement des mortiers normales sous des températures de cures

allant de 20 à 80°C. Les résultats de ce travail montrent l'effet néfaste des hautes températures sur le comportement du mortier quel que soit la nature de l'addition incorporée. Par ailleurs les résultats démontrent que le laitiers s'avère le matériaux qui supporte le mieux les températures élevés notamment 60°C où il développe les meilleurs résistances.

D'autres travaux ont été réalisés par Bachène S. **[111]** sur l'effet du traitement thermique dans le comportement d'un béton autoplaçant incorporé des additions minérales de nature différente (laitier granulé, pouzzolane naturelle et fillers calcaires).Les résultats de cette étude montrent que la température de murissement de 40°C, est considérée comme optimale dans le cas des BAP, en effet la cure à cette température engendre une amélioration dans les propriétés mécaniques et celles du transport de tous les BAP et dans tous les âges mais au-delà de cette température, ces caractéristiques commencent à s'affaiblir à long terme.Et que le laitier granulé est l'addition la plus convenable dans le cas des BAP subissent un murissement à des températures élevées.

1.5. CONCLUSION

Cette synthèse bibliographique a été menée pour faire le point sur les connaissances relatives aux caractéristiques des bétons autoplaçant à l'état frais et durci ainsi que l'effet des additions minérales et la cure à des températures élevés sur ces propriétés.

Ce béton extrêmement fluide présente plusieurs avantages qui font de lui une révolution très importante dans le monde de la construction et celui du génie civil pondant les deux dernières décennies. La particularité de formulation de ce béton nécessite un faible rapport Eau/poudre et un volume de fines élève, et par souci technique, économique et écologique, on a souvent recours à des additions minérales, qui peuvent être moins réactives que le clinker, mais à faible coût.

La température de cure est parmi les facteurs les plus importants qui peuvent influé la qualité finale des BAP, une augmentation de la température de cure mène à une accélération d'hydratation à jeune âge, ce qui fait l'unanimité des auteurs, mais avec une diversité quantitative, à long terme les effets de cette augmentation sont différents selon le type d'addition utilisé et la valeur de température. Plusieurs travaux dans la littérature ont montré

que l'incorporation des éléments d'additions a des effets bénéfiques sur les propriétés des BAP tant à l'état frais, qu'à l'état durci (résistance et durabilité) et notamment pour le cas des BAP traités thermiquement.

C'est dans cette optique que notre travail a été orienté, pour cela, nous avons lancé une étude expérimentale afin de quantifier les modifications apportées, sur les propriétés d'un mortier autoplaçant incorporant des additions minérales (Fillers Calcaires et Pouzzolane naturelle) durcissant sous différentes températures de cure. Pour ce faire le chapitre qui suit est consacré à la caractérisation des matériaux d'étude et à l'exposé des méthodes expérimentales que nous avons utilisées pour faire aboutir notre travail.

Chapitre 2 :
Caractérisation des matériaux et Méthodes d'essais

2.1. INTRODUCTION

Ce chapitre a pour objectif de présenter les différents matériaux utilisés et les techniques expérimentales réalisées dans notre étude. On présente en première partie les caractéristiques et les propriétés des matériaux utilisés dans la composition de nos mortiers autoplaçants, à savoir : le ciment, les ajouts minéraux (pouzzolane naturelle et fillers calcaires), lesable, l'adjuvant et l'eau de gâchage. Dans une seconde partie, on exposera la méthode de formulation adoptée dans les différentes compositions des mortiers autoplaçants ainsi la technique suivie pour le traitement thermique. Nous présenterons par la suite les différents essais réalisésau cours de notre étudeet leurs modes opératoires (état frais et durci).

Les différents essais effectués au laboratoire de Génie Civil de l'université de Médéa et celui de la SETAMde Médéa au cours de cette étude sont les suivants :

- **A l'état frais**

- Essais d'étalement au mini cône,
- Essai d'écoulement à l'entonnoir (V-Funnel test).

- **A l'état durci**

- Essai de compression sur demi prisme d'éprouvettes 4×4×16 cm^3 à l'âge de 1, 3, 7 et 28 jours ;
- Essai ultrasonique sur des éprouvettes prismatiques 4×4×16 cm^3à l'âge de 7 et 28 jours ;
- Essai de variation dimensionnel (retrait et gonflement) ; sur des éprouvettes prismatiques 4×4×16 cm^3 à l'âge de 1, 2, 3, 7, 14, 21, 28 et 56 jours ;
- Essai d'absorption d'eau par capillarité sur demi prisme d'éprouvette4×4×16 cm^3 à l'âge de 28 jours ;
- Essai de porosité accessible à l'eau sur demi prisme d'éprouvette 4×4×16 cm^3 à l'âge de 28 jours ;

2.2. MATERIAUX UTILISÉES

2.2.1. LE CIMENT

Un seul type de ciment est utilisé au cours de cette étude expérimentale, Il s'agit d'un ciment portland artificiel résistant aux sulfates CEM1 42.5 produit par la cimenterie de ElKharouba à Tunisie (figure 2.1). La masse volumique absolue et la finesse de ce ciment sont 3.15 g/cm^3 et 3450 cm^2/g respectivement et sa composition chimique est présentée au tableau 2.1 suivant.

Tableau 2.1. Composition chimiquedu Ciment utilisé.

Composition chimique (%)						
SiO_2	**CaO**	**Al_2O_3**	**Fe_2O_3**	**MgO**	**SO_3**	**PF**
20.14	63.47	3.71	4.74	2.12	2.67	1.72



Figure 2.1 : Ciment portland artificiel utilisé.

2.2.2. LES ADDITION MINERALES

Nous avons utilisé dans notre étude deux (02) types d'additions pour la substitution du ciment, la pouzzolane naturelle et le calcaire.

Afin de pouvoir utiliser les additions dans les différentes formulations du mortier autoplaçant (MAP), nous avons procédé à leur étuvage à 50C° jusqu'à obtenir une masse constante et ceci dans le but de faciliter leur broyage. Les additions ont été ensuite broyées à une finesse comparable à celle du ciment (3500 cm^2/g).Le broyage des additions minérales a été réalisé avec un broyeur à disque au niveau du Hall de Technologie de l'Université YAHIA Farés de Médéa (figure 2.2).



Figure 2.2 : Broyeur à disque utilisé.

2.2.2.1. La Pouzzolane naturelle

La pouzzolane utilisée est fournie par la cimenterie de LAFARGE. Cette pouzzolanede couleur grise rougeâtre (figure 2.3) est fournie sous forme de pierres concassées et est ensuite broyée à une finesse de 3500 cm^2 /g. Le temps de broyage par un broyage à disque a été fixé à 30 min. Sa masse volumique absolueest de 2.43 g/cm^3. Sa composition chimique est donnée dans le tableau II.2.

Tableau 2.2. Composition chimique de la pouzzolane de Beni-Safutilisée.

Composition chimique (%)								
$Si O_2$	**$Al_2 O_3$**	**$Fe_2 O_3$**	**Ca O**	**Mg O**	**$Na_2 O$**	**$K_2 O$**	**$S O_3$**	**PAF**
46.40	17.50	10.50	10.50	3.80	3.40	1.50	0.40	4.31



Figure 2.3 : Pouzzolane naturel de Beni-Saf.

2.2.2.2. Les fillers calcaires

Le calcaire utilisé dans cette étude, est extrait de la carrière de la région de Mascara, Algérie et fourni aussi par la cimenterie de LAFARGE (figure 2.4) Cette addition de couleur blanc jaunâtre (figure 2.4) est fournie sous forme de pierres concassées et ensuite broyée à une finesse de 3500 cm^2 /g. Le temps de broyage par un broyage à disque a été fixé à 20 min. Sa masse volumique absolue est de l'ordre de 2.47g/cm^3. Sa composition chimique est reportée sur le tableau II.5, sa teneur en $CaCO_3$ est 95,80 %.

Tableau 2.3. Composition chimique du calcairede Mascara utilisé.

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	RI	PF
0,85	0,93	0,56	53,08	0.23	0,60	0.08	0,53	0,52	42,55



Figure 2.4 : Calcaire de Mascara utilisé.

2.2.3. Le sable

Lesable utilisé est un sable de dune provient de la région de Oued-Souf.Il est propre, les grains sont de forme généralement isométrique et arrondie (figure 2.5). Il est séchépondant 24h à température de 120 °C.Les caractéristiques physiques de ce sable son données ci-après et sa courbe granulométrique est présentée dans la figure 2.6.



Figure 2.5 : Sable d'Oued-Souf utilisé.

- ***Caractéristiques du sable :***
  - Masse volumique absolue **:** 2 .63 g/cm^3.
  - Equivalent de sable : 74.5 %
  - Module de finesse MF : 2.1
  - Taux d'absorption : 1.2 %

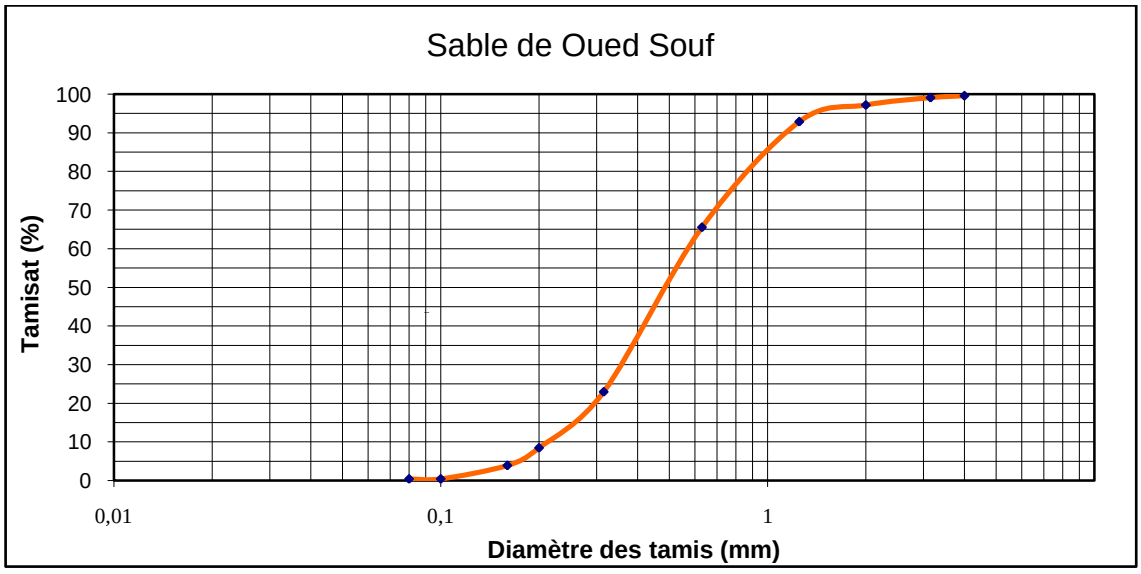


Figure 2.6 : La courbe granulométrique du sable d'Oued-Souf utilisé.

2.2.4. L'eau de Gâchage

L'eau utilisée pour la fabrication du béton est celle de la distribution générale considérée comme potable, exempte de toute impureté nuisible au béton et conforme à la norme NF EN 1008 **[112]**.

2.2.5. Adjuvant

Le superplastifiant utilisé dans cette étude est un haut réducteur d'eau de la troisième génération fournie par la société Granitexe-NP et commercialisé sous le nom « MEDAFLOW 145 »(figure 2.7), de type polycarboxylate est formulé à base de polymère de synthèse combinée. Il ne présente pas d'effet retardataire. Sa plage normale d'utilisation est fixée par la fiche technique de 0,3 à 2 % du poids de ciment. Toutefois, le dosage optimal doit être recherché selon le type de mortier et les propriétés recherchées par la réalisation des gâchés au laboratoire. Ses caractéristiques sont présentées dans la fiche technique en Annexe B.

- ***Caractéristiques du superplastifiant MEDAFLOW 145 :***
  - Aspect ……. Liquide.
  - Couleur ……... brai clair.
  - pH …… 5 – 6.
  - Densité …… 1.06 ± 0.02.
  - Teneur en chlore …… < 0.1 g/l



Figure 2.7 : Le superplastifiant MEDAFLOW 145 utilisé.

2.3. FORMULATION DES MORTIERS AUTOPLACANTS

2.3.1. INTRODUCTION

La formulation du béton est une étape très importante dans le but d'obtenir un béton ouvrable, résistant et durable. En général, la formulation du béton dépend des caractéristiques souhaitées à l'état frais et à l'état durci. Pour les BAP, la formulation semble plus complexe, puisque les BAP possèdent des propriétés spécifiques et contradictoires à l'état frais : une grande déformabilité, une grande capacité de passage et une grande résistance à la ségrégation. Ces propriétés doivent être en balance pour obtenir un bon BAP.

Du moment que le mortier occupe un volume important dans les BAP (presque 70%), et que la rhéologie du BAP est fortement liée à celle du mortier autoplaçant(MAP), les résultats d'essais sur le MAP seront concluants et peuvent donner une grande idée sur le comportement rhéologique du BAP.

Selon Jin et Domone**[113]**, des tests sur les mortiers sont indispensables car :

- Le BAP a un volume en gros granulats moins important que le béton ordinaire, et donc les propriétés du mortier sont dominants.
- L'évaluation des propriétés du mortier est une partie intégrale de la formulation des BAP, et donc la connaissance des propriétés du mortier est utile.
- Tester un mortier est beaucoup plus commode et simple que tester un béton.

2.3.2. FORMULATION DU MORTIER AUTOPLAÇANT DE REFERENCE (MAPT)

Afin de déterminer les quantités des matériaux : ciment, granulats, eau et adjuvant, nous sommes basés sur la méthode Japonaise (méthode générale) proposée par OKAMURA**[2]**, avec quelques modifications sont apportées au niveau de la teneur en sable dans le mortier (S/M), le rapport eau/ciment (E/C) ainsi que le rapport Superplastifiant / Liant (Sp/L) et ceci dans le but de s'adapter avec les exigences des matériaux locaux et d'obtenir de bonnes caractéristiques du mortier autoplaçant (MAP) à l'état frais.

Boukendakdji O. **[8]**, dans ses travaux de recherche a ajusté le rapport S/M (S/M=0.5) et SP/C de manière à avoir un diamètre d'étalement de la galette du mortier compris entre 270 et 330 mm et un temps d'écoulement à l'entonnoir en V compris entre 2 et 10 s.

Afin de minimiser le nombre de variables pour le mortier autoplaçant de référence, nous avons jugé judicieux de maintenir fixe les deux rapports S/M et E/C. Dans notre étude, nous nous sommes basés sur les travaux de Boukendakdji**[8]**. Le rapport S/M a été fixé à 0,5 avec

une modification apportée au niveau du rapport E/C et la détermination de la teneur en adjuvant.

En ce qui concerne l'optimisation du dosage eau (E/C) et en superplastifiant (Sp/C) avec la nature du ciment et sable utilisés, nous avons étudié la variation du diamètre d'étalement de la galette doit être compris entre 270 mm ≤ d ≤330 mmet le temps d'écoulement du mortier au à l'entonnoir en V (V-funnel), dont le temps d'écoulement obtenu doit être compris entre 2 sec ≤ t ≤ 10 sec[99bachene]. Ces rapports sont déterminés comme suit : pour chaque rapport E/C, on fait varier le dosage en SP de 0,3 à 2%. Les rapports optimaux E/C et Sp/C sont ceux qui peuvent donner simultanément un bon MAP. Il faut noter ici que le mélange de mortier ne comportera aucune addition minérale.

2.3.3. FORMULATION DU MORTIER AUTOPLAÇANT A BASE D'ADDITIONS MINERALES

Notre étude est focalisée sur l'influence de type d'addition minérale sur les caractéristiques d'un mortier autoplaçants traité thermiquement. Pour cela, le ciment du MAP de référence est substitué partiellement par l'une ou les deux additions employées dans cette étude (pouzzolane naturelle et la poudre de calcaire).

Dans ce travail expérimental six (06) mélanges ont été préparés en remplaçant une partie de ciment avec l'une ou les deux (02) additions minérales employées à savoir : pouzzolane naturelle (MAPZ) et calcaire (MAPC)et mélange de pouzzolane naturel et calcaire en même temps avec des taux de substitution de ciment de 20 et 40%. Les différents mélanges préparés ainsi leurs nomenclatures sont les suivants :

- **MAPT :** mortier autoplaçant de référence sans additions minérales ;
- **MAPC20 :** mortier autoplaçant avec 20% de calcaire ;
- **MAPC40 :** mortier autoplaçant avec 40% de calcaire ;
- **MAPZ20 :** mortier autoplaçant avec 20% de pouzzolane ;
- **MAPZ40 :** mortier autoplaçant avec 40% de pouzzolane ;
- **M1 :**mortier autoplaçant avec 10% calcaire et 10% pouzzolane ;
- **M2 :**mortier autoplaçant avec 20% calcaire et 20% pouzzolane.

2.4. CONFECTION ET CONSERVATION DES EPROUVETTES

2.4.1. PROCEDURE DE MALAXAGE

Pour la confection des mortiers autoplaçants, nous avons utilisé un malaxeur à mortier de 5 litres de capacité(figure 2.8). En ce qui concerne la durée de malaxage, les MAP et BAP ont une durée de malaxage plus longue, ce qui a pour effet d'assurer une meilleure dispersion des particules de la poudre par le superplastifiant. Certains auteurs **[114,115]** ont proposé des durées de malaxage variant entre 3 et 4 min. Pedersen et al. **[116]** ont rapporté qu'une durée de malaxage excédant 5 min est préférée.



Figure 2.8 : Protocole de malaxage.

Boukendakdji et al. **[23]**ont rapporté que l'efficacité du SP est d'autant plus grande lorsqu'il est ajouté (avec 30% de l'eau) après l'humidification du béton (70% de l'eau de gâchage ajouté au début de malaxage).En se basant sur ces recommandations et sur les travaux cites **[8,105]**, on adopte la procédure de malaxage suivantes :

Apres avoir calculé la quantité de chaque élément entrant dans la composition du MAP (voir exemple de calcul dans l'annexe C), on procède à un malaxage suivant la séquence présentée à la figure 2.9 et résumée comme suit :

- Malaxer à sec le ciment, sable et addition afin d'homogénéiser le mélange pendant 30 seconde ;
- Ajouter pendant 1 minute la première quantité d'eau (w1 = 60% Eau) ;
- Ajouter pendant 1 minute le restant de l'eau de gâchage (w2 = 40% Eau) mélangé avec le superplastifiant ;
- Malaxer le mélange pendant 3 minutes ;
- En laisse le mélange reposé 3 minutes ;
- Malaxer le mélange pendant 1minutes et 30secondes.

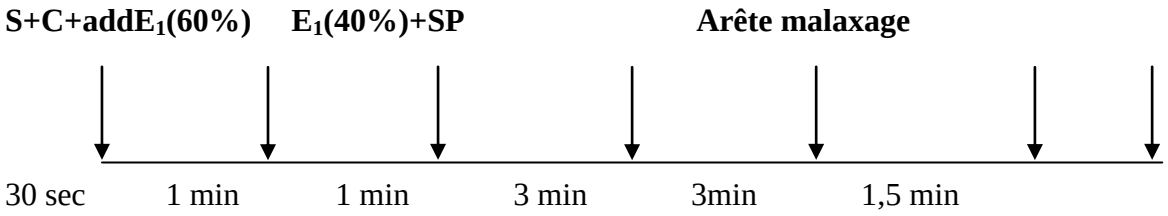


Figure 2.9 :Séquence de malaxage du mortier autoplaçant.

2.4.2. PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES

Les différents types de mortiers autoplaçantssont tous fabriqués dans l'environnement de laboratoire.Le coulage des éprouvettes est réalisé sans vibration ni compactagedans des moules métalliques de formeprismatique 4x4x16 cmdestinés aux différents essais programmés à l'état durci. Les éprouvettes confectionnées sont au nombre total de 420 éprouvettes divisées pour différents modes de cure (figure 2.10).



Figure 2.10 :Éprouvettes confectionnées.

2.4.3. CONSERVATION DES EPROUVETTES

Juste après la confection, toutes les éprouvettes ont été couvertes afin d'éviter le risqued'évaporation excessive et le retrait plastique. Après 4 heures de la confection, les éprouvettessont subit 4 mode de cure pour chaque mélange :

- Des éprouvettes sont conservées 24h dans l'environnement de laboratoire à 20°C puis décoffrées et continues leur conservation soit à l'air du laboratoire (figure 2.11) pour la mesure du retrait soit dans un milieu standard (T = 20°C et HR = 100%) destinées aux différents essais à l'état durci et la mesure du gonflement (figure 2.12);

- Des éprouvettes sont subit un traitement thermique pondant 24h suivant 2 cycles différents (T^{max} = 40°C et T^{max} = 60°C). après les éprouvettes sans décoffrées et conservées soit à l'aire libre d'un climat moyen du laboratoire pour la mesure du retrait, soit elles continuent leur conservation dans le milieu standard jusqu'à l'âge d'essai.



Figure 2.11 : Conservation des éprouvettes à l'air libre du laboratoire (climat moyen).



Figure 2.12 : Conservation des éprouvettes dans l'eau à 20°C.

2.4.4. CYCLES DU TRAITEMENT THERMIQUE

Après une profonde recherche sur l'effet de la durée et le degré de la température du traitement thermique sur les performances du béton on a choisi une durée de 16h à la température élevée basant sur les résultats de la recherche de Ferhat Bingol et al. **[117]**.



Figure 2.13 : Enceinte climatique pour le traitement thermique des éprouvettes.

Deux températures de cure ont été choisies pour le cas du traitement thermique : 40 et 60 °C. Pour chaque cycle les moules sont conservés à l'air du laboratoire pondant 4h puis entrés dans l'enceinte climatique afin d'accélérer leur hydratation et prise par l'élévation de la température de murissement (figure 2.13). L'augmentation de température dans la chambre doit être régulières et de façon graduelle de raison de 10°C/h afin d'éviter le choc thermique sur le matériau. Les deux cycles adoptés pour le cas du traitement thermique sont présentés à la figure 2.14 suivante. Les échantillons conservés dans l'eau ont été séchés à l'atmosphère de laboratoire pendant environ 24 heures avant l'âge d'essai.

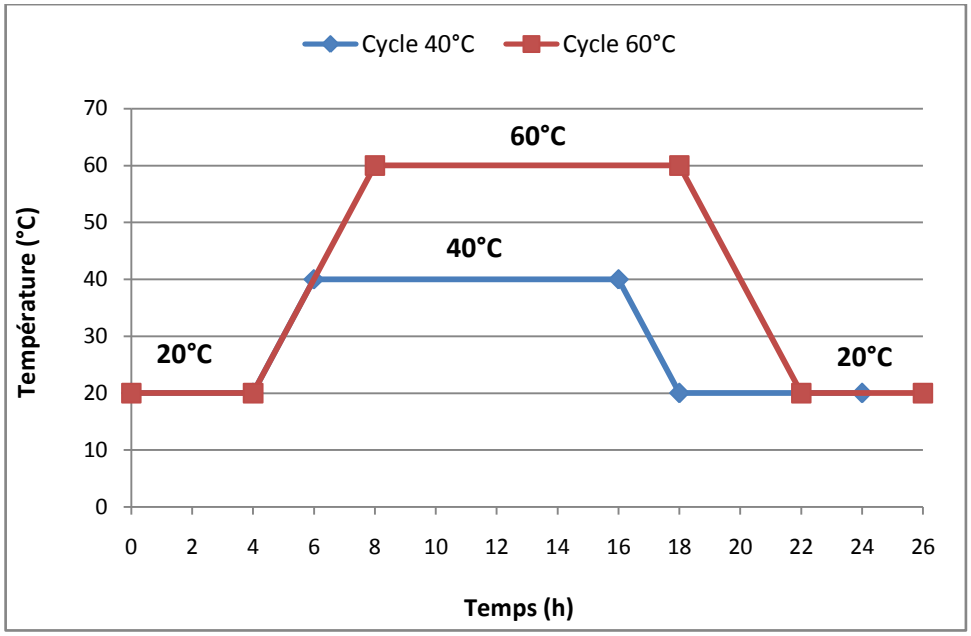


Figure 2.14 : Cycles adoptés pour le cas du traitement thermique.

2.5. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

2.5.1. ESSAIS EFFECTUES SUR LES MAP A L'ETAT FRAIS

Les essais sur mortier frais ont pour but en premier temps de fixer les deux rapports E/L etSP/L. L'essai d'étalement vise à qualifier la déformabilité du mortier en mesurant sonétalement, et à contrôler la stabilité du mortier en observant sa galette après l'arrêt del'écoulement. La viscosité du mortier est évaluée en comptant le temps d'écoulement à travers

L'essai au mini-entonnoir en V.

2.5.1.1. Essai d'étalement au mini cône

L'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique placé sur une surface horizontale lisse, une fois le moule soulevé, le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaires, la moyenne est retenue. La figure 2.15 montre le dispositif de l'essai d'étalement pour les mortiers.

- ***Mode opératoire***

- Humidifier la surface de la plaque (éliminer l'eau en excès avec un chiffon) ;
- Placer et centrer le mini cône sur la plaque ;
- Remplir le cône en déversant de manière continue, jusqu'à l'arase supérieure du cône;
- Soulever le cône verticalement à l'aide des deux poignées ;
- Une fois que le mortier s'est étalé sur la plaque, mesurer le diamètre final sur deux côtés perpendiculaires, Le résultat est exprimé en moyenne des deux valeurs obtenues.
- Détecter visuellement s'il y a des signes de ségrégation de mortier (comme présence d'une épaisseur de laitance en périphérie de la galette et accumulation de gravier au centre d'une galette de mortier).



Figure 2.15 : Essai d'étalement au mini cône.

2.5.1.2. Essai de l'écoulement dans l'entonnoir en V (V-funnel)

L'entonnoir est destiné à imposer un écoulement du même type que celui imposé entre deux armatures parallèles. L'entonnoir est rempli de mortier et le temps pour lequel le mortier prend pour couler à travers le dispositif est mesuré. Ce temps mesuré indique la fluidité et

caractérise la capacité du mortier à se déformer à travers des zones confinées par son passage par l'ouverture du col du dispositif (figure 2.16).

- ***Mode opératoire***

- Placer l'entonnoir en V dans un endroit stable et s'assurer que le clapet est bien fermé ;
- Prélever dans un seau un échantillon de mortier représentatif d'environ de 12 litres ;
- Remplir l'entonnoir avec le mortier ;
- Mettre le seau au-dessous de l'orifice de l'entonnoir et ouvrir le clapet ;
- Remplir l'entonnoir une deuxième fois de béton ;
- Mettre le seau au-dessous de l'orifice de l'entonnoir ;
- Après une attente de 10 secondes, ouvrir le clapet en déclenchant le chronomètre ;
- Arrêter le chronomètre quand la première lumière est apparue à travers l'orifice de l'entonnoir, cette mesure est le temps d'écoulement $T_{V\text{-}F}$;
- Refaire l'essai 3 fois et Le résultat est la moyenne des trois valeurs du temps d'écoulement obtenues.



Figure 2.16 : Essai d'écoulement dans l'entonnoir en V (V-funnel test).

2.5.1.3. Essais réalisé sur mortier autoplaçant à l'état frais

Les différents essais réalisés sur les mélanges du mortier autoplaçant, sont résumés dans l'organigramme représenté par la figure 2.17 suivantes :

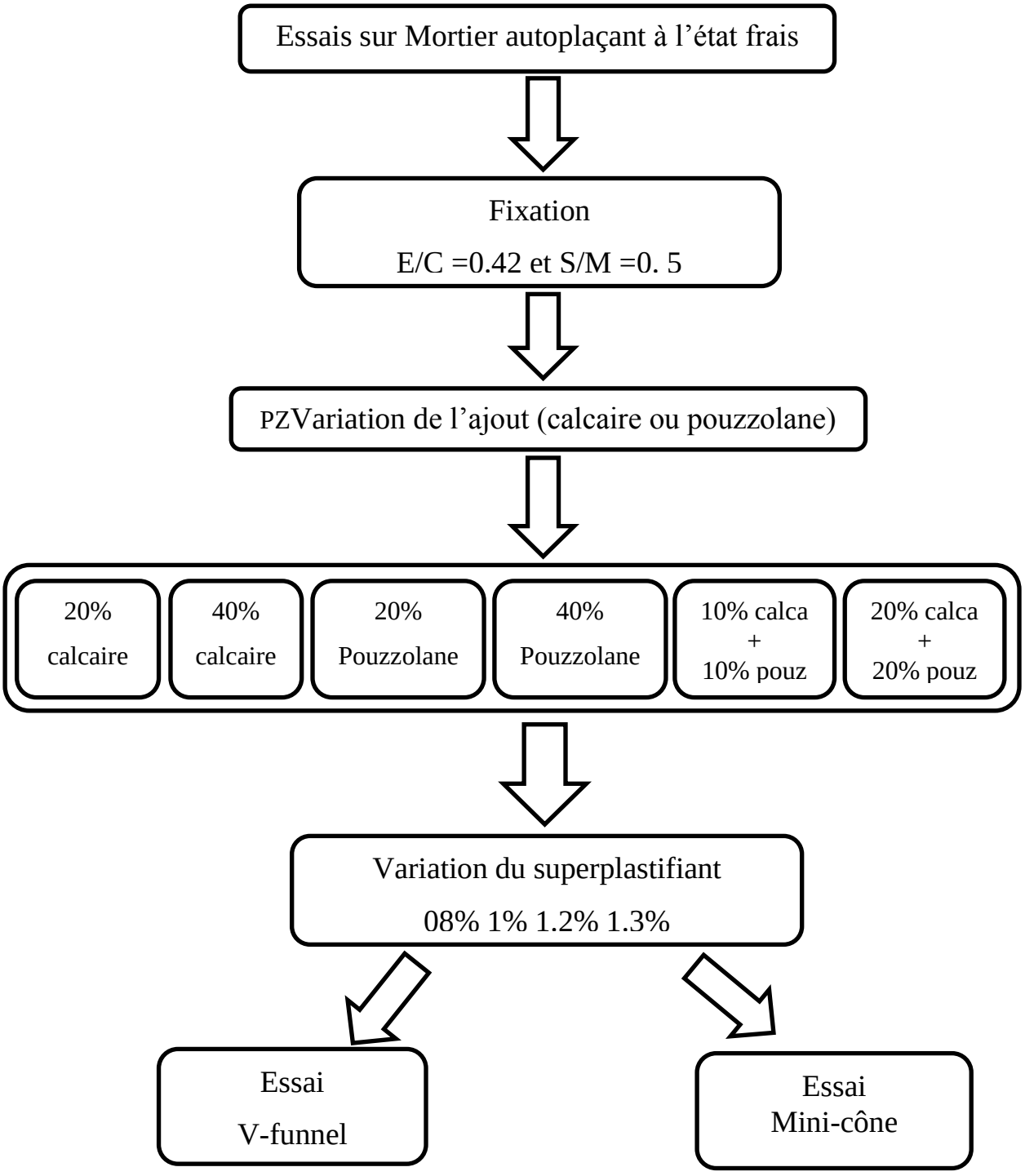


Figure 2.17 : Protocole expérimental à l'état frais.

2.5.2. ESSAIS EFFECTUÉS SUR LES MAP A L'ETAT DURCI

2.5.2.1. Résistance à la compression

Les essais de résistance mécanique de tous les mortiers autoplaçantsétudiés ont été effectués sur des éprouvettes de forme prismatique de dimensions (4x4x16) cm^3. Pour chaque gâchée trois éprouvettes ont été confectionnés. Après démoulage. Les éprouvettes après chaque modes cure, ont été conservées dans un bac remplit d'eau à une température de 20 C° jusqu'au moment des essais, les résistances mécaniques ont été déterminées à l'âge de 1,3,7 et 28 jours.

La résistance en compression a été mesurée par compression axiale suivant la norme en vigueur **[118]**sur demis prismes de 4×4×16 cm, à l'age de 1, 3, 7, et 28 jours, à l'aide d'une presse decapacité de 2000 kN (figure 2.18). La résistance à la compression correspond à lacontrainte moyenne d'écrasement sur les éprouvettes à chaque âge d'essai.



Figure 2.18 : Essai de compression simple.

La résistance à la compression est déterminée donc par la formule suivante :

$$\sigma_c = \frac{F_c}{a^2} \qquad (2.1)$$

Cette contrainte est appelée résistance à la compression et, si F_c est exprimée en newtons, cette résistance exprimée en méga pascals vaut :

$$f_{c28}\,(\text{MPa}) = \frac{F_c(\text{N})}{1600}\,\text{m}^2 \qquad (2.2)$$

2.5.2.2. Vitesse ultrasonique

La mesure de la vitesse de propagation d'ondes se fait moyennant un appareil d'auscultation sonique (Ultrason), et conformément à la norme **[119].** Cet appareil est constitué d'un générateur d'impulsions électriques, de plusieurs transducteurs (un émetteur et un ou plusieurs récepteurs), et d'un dispositif de chronométrage.

L'appareil génère des impulsions électriques traversant l'échantillon du béton à partir d'un transducteur émetteur applique sur une surface plane. L'impulsion est captée par un transducteur récepteur également appliqué sur une surface plane en opposition et parallèle au premier. Notons ici que ces surfaces doivent être préalablement lubrifiées par la vaseline pour assurer une meilleure transmission des impulsions. Lorsque l'impulsion est captée par le récepteur, l'instrument affiche le temps de propagation (figure 2.19).

Connaissant la distance entre les deux transducteurs, la vitesse ultrasonique est donnée par la formulesuivante :

$$\boldsymbol{V = \frac{L}{t}}. \qquad (2.3)$$

Ou :

V: vitesse de propagation d'ondes en m/s ;

L: distance entre les deux transducteurs en m ;

t: temps de propagation d'ondes en s.

Il faut appuyer fermement les faces des transducteurs contre les surfaces d'epprouvette jusqu'à la stabilité du temps affiché. Il est egalement important que les lectures soit répétées jusqu'à l'obtention d'une valeur minimale du temps mesuré qui est donne la vitesse ultra sonique .

Il est possible de déterminer, à l'aide des ultrasons, la variation de la densité du béton selon la hauteur. En effet, le mortier, les granulats, eau et le vide ne transmettent pas le son à la même vitesse, du moins dans les premiers jours du béton. A titre indicatif, le mortier d'un béton de un (01) jour permet une vitesse de son d'environ 3,2 km/s, alors qu'à 5-7 jours, cette vitesse est de 4,2 km/s. Dans les granulats, le son voyage habituellement à environ 5 km/s. ces différences peuvent donc servir à évaluer la quantité de granulats en fonction de la hauteur.

2.5.2.3. Absorption d'eau par capillarité

Conformément à la norme NF EN 1015-18 **[120]**, l'essai consiste à mesurer la masse d'eau absorbée par une éprouvette de mortier autoplaçant préalablement conditionnée par un étuvage à 80°C jusqu'à poids constatant.

A l'issue du sortir en étuvage, la surface latérale des éprouvette est alors enduite de résine (ou de papier aluminium autocollant) pour éviter l'évaporation latérale de l'eau absorbée durant l'essai, puis conservée environ 12 heures dans un dessiccateur à 20 ± 2°C pour permettre le durcissement complet de la résine.

L'essai d'absorption capillaire est réalisé à la suite et consiste à suivre l'évolution de masse des éprouvettes plongées de 5 mm dans de l'eau (figure 2.20). L'augmentation de la masse de l'échantillon a été mesurée à intervalles de temps (0 min,12 min,30 min,1h,2h,4h et 24h) on procède à la pesée des morceaux (m_x). La différence de poids entre (m_x) et (m_0) est le poids de l'eau absorbée (m_x- m_0).

Le coefficient d'absorption capillaire Ca est alors calculé par l'équation suivante :

$$Ca = \frac{Mx - M0}{M0} \times 100 \quad (2.4)$$

Où

Mx : masse de l'éprouvette à une échéance donnée (kg),

M_0 : masse initiale de l'éprouvette (kg),

A : section de l'éprouvette (m²).



Figure 2.20 : Essai d'absorption d'eau par capillarité.

2.5.2.4. Porosité accessible à l'eau

C'est le rapport du volume total des pores ouverts dans un corps poreux à son volume apparent suivant les recommandations en vigueur **[121, 122]**. Elle s'exprime en pourcentage du volume apparent :

$$P\ \% = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100 (2.4)$$

Pour ce faire, trois échantillons de BAP ont été testés pour chaque formulation et après 28 jours de maturation. Il s'agit en réalité de peser les échantillons sous différents états. Dans un premier temps il faut s'assurer que les échantillons sont saturés en eau. Pour cela, ont les places dans un dessiccateur à vide, sous une dépression de 25 mbar pendant 4 heures, puis on immerge les échantillons dans l'eau, toujours sous vide, pendant 20heures ± 1heures. Après quoi les éprouvettes subissent une pesée hydrostatique.

Pour déterminer M_{eau}un échantillon est suspendu à l'aide d'un fil du système de suspension de la balance hydrostatique (figure 2.21)et il est pesé complètement immergé dans l'eau. La pesée doit être effectuée à 0.001g prés. Déterminer la température de l'eau d'immersion

Pour déterminer M_{air}il faut extraire l'échantillon de l'eau et l'essuyer rapidement et soigneusement, à l'aide d'une éponge ou d'un linge humide, afin de le débarrasser des goulettes et du film superficiel d'eau, sans toutefois retirer l'eau des pores et le peser immédiatement le corps d'épreuve dans l'air à l'aide d'une balance précise à 0.001g prés, Il faut s'assurer que l'évaporation de l'eau d'imbibition ne provoque pas de perte de masse appréciable pendant les opérations de pesées.

Msec est obtenue après séchage de l'échantillon en l'exposant à 105±5°C jusqu'à l'obtention d'une masse constante.



Figure 2.21 : Essai de porosité accessible à l'eau.

2.5.2.5. Variation dimensionnelle (Retrait et gonflement)

En l'absence de toute charge, le mortier se déforme instantanément. Ces déformations sont dues essentiellement à une perte d'eau de gâchage par évaporation, qui se traduit par un rétrécissement des éléments en mortier. Le retrait dépend non seulement des conditions de conservation (humidité, température) mais dépend aussi des constituants du mortier [8].

Il s'agit d'évaluer le retrait ; ou le gonflement que provoque le ciment ,l'ajout utilisés ou les condition de conservation des éprouvettes 4x4x16cm3 ;ces dernières sont placées dans un bâti de mesure des déformations équipé d'un comparateur d'une précision de 1µm. Les mesures obéissent à la Norme NF 15-433 [9] où les résultats visent à caractériser chaque ajout et sa contribution à modifier les déformations différées ainsi que son aptitude à lutter contre la dessiccation.

Avant chaque sérié de mesures, l'appareil est étalonné avec une tige de métal e 160 mm de longueur et dont les extrémités reproduisent la forme des plots de l'éprouvette (la tige est réalisée en métal Invar et protégée contre les variations de température qu'elle est appelée à subir au cours des manipulations).

A. Mesure des variations de longueurs :

La mesure a lieu, l'axe longitudinal de l'éprouvette étant vertical. Si, d'une mesure à l'autre, la variation de longueur d'une des 3éprouvettes dépasse de plus de 0.03mmcelle de l'éprouvette ayant la variation la plus voisine, il y a lieu d'en rechercher la cause (poussière, mauvais contact de scellement des plots,…etc.).Et si elle ne peut être éliminée, l'éprouvette doit être rebutée.

Avant chaque sérié de mesures, l'appareil est étalonné avec une tige de métal de 160 mm de longueur et dont les extrémités reproduisent la forme des plots de l'éprouvette (la tige est réalisée en métal Invar et protégée contre les variations de température qu'elle est appelée à subi au cours des manipulations) (figure 2.22).

Pour chaque éprouvette on calcul les rapports suivants:

ΔL : Variation de longueur par apport à la longueur origine,

L0: Longueur de base, prise égale à 160mm.

Au moment de la mesure, le comparateur est mis au zéro sur la tige étalon en Invar de longueur L = 160 mm. Soit dl(t) la valeur lue sur le comparateur au l'éprouvette a une longueur au temps considéré:

$$\mathbf{l = L + dl\ (t)} \quad (2.5)$$

Soit l (t0) la longueur de l'éprouvette au temps t cette origine est prise au moment du démoulage, 24 h après la confection des éprouvettes. La variation de longueur au temps t sera:

$$\mathbf{\Delta l(t) = l(t) - l(t_0) = dl(t) _ dl(t_0)} \quad (2.6)$$

La variation relative de longueur est généralement désignée par ε et a pour expression:

$$\boldsymbol{\varepsilon(t)} = \frac{\Delta \boldsymbol{l(t)}}{\mathbf{l}} = \frac{\mathbf{dl(t) _ dl(t0)}}{\mathbf{l}} \quad (2.7)$$

Δl (t) est obtenu en faisant la moyenne sur les éprouvettes. Lorsque les éprouvettes sont conservées dans l'air, Δl(t) est généralement négatif et l'on parle alors du retrait de l'éprouvette. Lorsque l'éprouvette est conservée dans l'eau ou à froid, Δl(t) peut être positif: il y a alors gonflement.



Figure 2.22 : Mesure des variations dimensionnelles (Retrait gonflement) par réfractomètre.

B. Mesure des variations de longueurs :

La variation de masse est déduite après avoir, pesé à 0.1g chaque éprouvette à chaque moment de mesure du retrait ou gonflement (figure 2.23).

Pour chaque éprouvette on calcul les rapports suivants: ΔL : Variation de longueur par apport à la longueur origine,

L_0 : Longueur de base, prise égale à 160mm.

ΔM : Variation de masse par apport à la masse au moment du démoulage,

M : Masse de l'éprouvette au moment du démoulage.



Figure 2.23 : Mesure des variations massiques dues au retrait et gonflement.

2.6. VARIABLES D'ÉTUDE

L'organigramme présenté sur la figure 2.24 suivante résume les variables d'étude expérimentale réalisée au laboratoire. Les différents matériaux utilisés, les essais réalisés et les différents composites obtenus sont présentés.

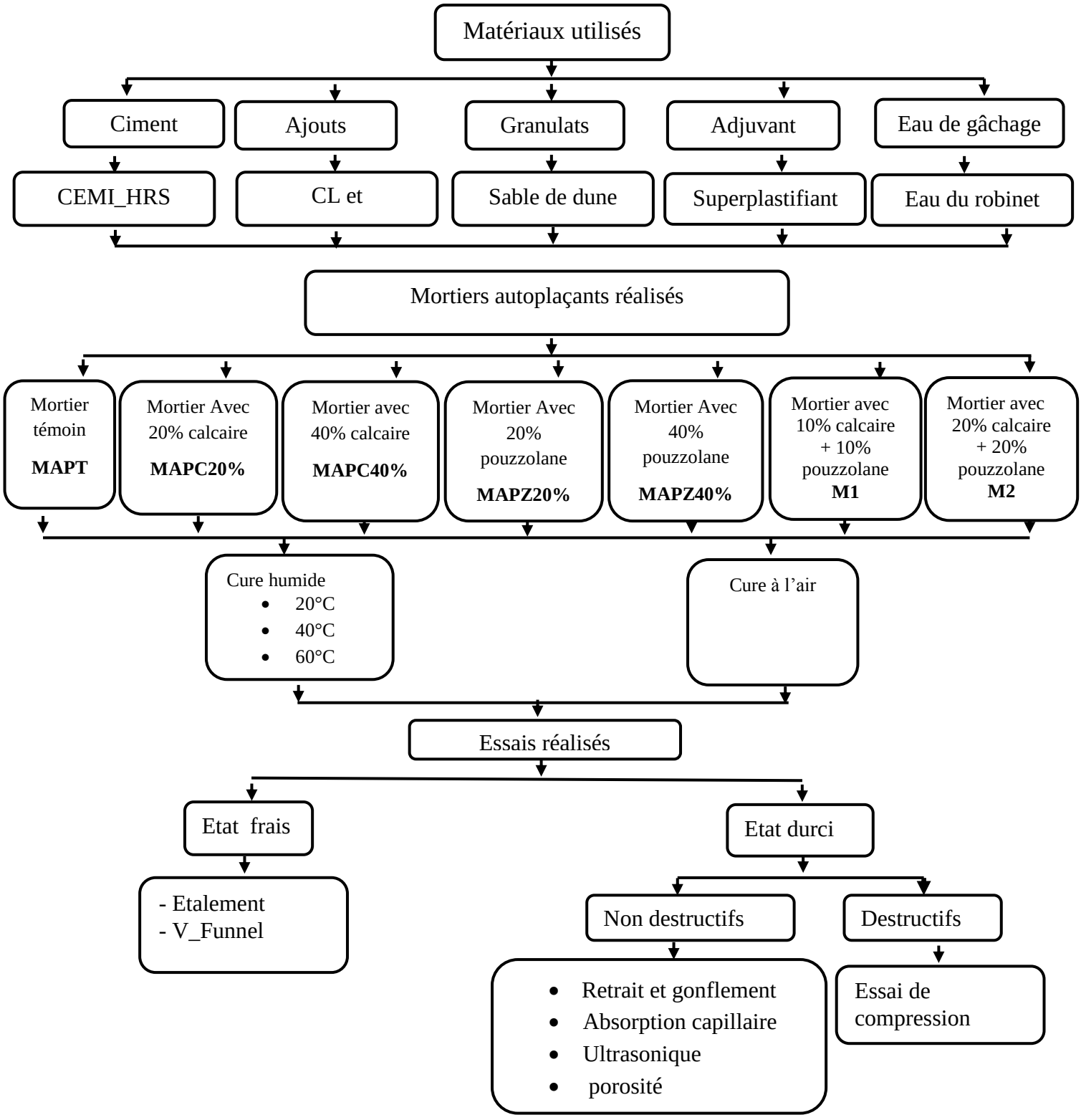


Figure 2.24 : Protocol expérimental.

2.6. CONCLUSION

Afin de mettre en évidence les effets des additions minérales et la température de murissement sur les propriétés des mortiers autoplaçants, des matériaux locaux disponibles dans les marchés Algérien ont été utilisés pour la préparation de ces mortiers. Après une caractérisation complète des matériaux, une mise en place de procédures expérimentales s'est avérée nécessaire. La première partie de ce chapitre a été consacré à cet effet, dans lequel, nous avons exposé les différents matériaux utilisés pour la formulation des mortiers autoplaçant ainsi que leurs propriétés physico-chimiques. Il a été en même exposé la méthode de fabrication et des séquences de malaxage des différents mélanges de mortiers autoplaçantsutilisés, ainsi qu'une présentation des essais nécessaires pour la vérification et la caractérisation de ces mortiers autoplaçant à l'état frais (Diamètre d'étalement au mini cône et temps d'écoulement dans l'entonnoir en V) et durci (Résistance à la compression, vitesse ultrasonique, absorption d'eau par capillarité, porosité accessible à l'eau et variation dimensionnelle et massique).

Chapitre 3 :
Résultats et Disscutions

3.1. INTRODUCTION

L'étude expérimentale a pour objet, d'étudier l'effet des additions minérales sur le comportement des mortiers autoplaçant traités thermiquement. A cet effet, nous visons à tester les différents mélanges réalisés par l'essai d'étalement au mini cône et l'essai d'écoulement à l'entonnoir en V (V – Funnel) à l'état frais afin de vérifier leur autoplacance. Ainsi nous étudions la caractérisation des différents mortiers à l'état durci afin de savoir l'effet du traitement thermique (sans et avec traitement thermique) à travers l'essai de compression, de vitesse ultrasonique, d'absorption d'eau par capillarité, de porosité accessible à l'eau et de variation dimensionnelle (retraitet gonflement).

Les résultats expérimentaux obtenus dans cette étude sont présentés et discutés ci-après. Les valeurs données sont les moyennes arithmétiques des trois résultats d'essais.

3.2. FORMULATION DES MÉLANGES

Formuler un mortier, c'est de trouver un arrangement des divers constituants qui répond à un cahier de charge donné, pour un mortier autoplaçant c'est complexe vue le nombre de constituants et sa particularité à l'état frais dont assurer une grande fluidité et bonne homogénéité et de grande résistance à la ségrégation est nécessaire.

3.2.1. Détermination des rapports E/L et Sp/L

L'optimisation de ces deux rapports a été faite à partir des deux essais sur mortier, la mesure d'étalement au mini-cône et la mesure du temps d'écoulement à l'entonnoir en V pour mortiers.

Le principe de la méthode consiste à rechercher la composition optimale pour des rapports E/L de 0.4 et 0.42 tout en faisant varier le rapport Sp/L entre 0.8 et 1.4 ; La formulation adoptée doit présenter un étalement entre 270 et330mm et un temps d'écoulement inferieur à 10s **[113]**. Pour notre étude on a fixé un étalement de 28 cm pour tous les mélanges.

D'après les résultats préliminaires pour la formulation du mortier autoplaçant témoin, on a remarqué qu'un rapport E/L de 0.4 n'est pas efficace, malgré l'augmentation du dosage de superplastifant le mortier est sec, l'étalement reste faible et le temps de V-funnel est toujours long, donc pour améliorer la fluidité et la viscosité il faut augmenter le rapport E/L à 0,42. Dès l'augmentation de la quantité d'eau, le mortier a présenté un aspect homogène pour un dosage

de superplastifiant inférieur à 1,4 mais la fluidité n'est pas dans la fourchette exigée que pour un dosage de superplastifiant supérieur à 1 %.

A la fin de cette phase, nous pouvons conclure que les rapports E/L de 0,42 et SP/L de 1,2 sont optimaux pour assurer les meilleurs caractéristiques à l'état frais avec un minimum possible du dosage en superplastifiant pour le mortier autoplaçant témoin.

Les différentes compositions obtenues pour des mortiers autoplaçants ainsi que les résultats des essais d'étalement au mini-cône et du temps d'écoulement à l'entonnoir en V (V-Funnel), sont présentées dans le tableau 3.1 suivant.

Tableau 3.1 : Variation du diamètre d'étalement et temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant des différents mortiers.

Essai		MAPT	MAPC20%	MAPC40%	MAPZ20%	MAPZ40%	M1	M2
1	S_p(%)	0.8	1.2	0.8	0.8	1 .2	1	1 .2
	D (cm)	19,2	31	23	24	25.25	25.2	27.1
	T (sec)	10,2	2.1	6	7.23	6.4	6.1	4.3
	Remarque	sec	Ressuage	sec	sec	sec	sec	sec
2	S_p(%)	1	0,9	1.3	1.2	1.4	1,1	1.3
	D_{moy}	24,8	29,1	29,2	28	28.15	27	28.05
	T (sec)	8.11	2.85	3.2	3.4	3.5	4.4	3.4
	Remarque	sec	Ressuage	Ressuage	Homogène Pas de ressuage	Homogène Pas de ressuage	sec	Homogène Pas de ressuage
3	S_P(%)	1.2	0.8	1.2			1.2	
	D (cm)	28.1	28	28.1			28	
	T (s)	3.6	3.5	3.5			3.4	
	Remarque	Homogène Pas de ressuage	Homogène Pas de ressuage	Homogène Pas de ressuage			Homogène Pas de ressuage	

3.2.2. Compositions des différents mortiers autoplaçant

Les bétons utilisés dans cette recherche sont formulé selon la méthode Japonaise (méthode générale) proposée par OKAMURA avec quelques modifications concernant la sélection de

la quantité de sable dans le mortier, le rapport eau/liant ainsi que le rapport superplastifiant/liant.

- Le rapport sable sur mortier (S/M) est fixé par 0,5 pour s'adapter avec les exigences des matériaux locaux basant sur les recherches de Boukendakdji [17].
- Les rapports eau/liant (E/L) ainsi que le rapport superplastifiant/liant (SP/L) ont été évalués expérimentalement de manière à avoir des valeurs d'étalement au mini cône et du temps d'écoulement au V-Funnel acceptables (voir 3.2.1).

Les mortiers autoplaçantsavec additions sont formulés par la même manière que le mortier de référence avec différentes substitutions de volume du ciment par les additions minéralesat ajustement du dosage en superplastifiant.

Tableau 2.2 : Différentes compositions des mortiers autoplaçants.

Mortier		**MT**	**MAPC 20%**	**MAPC 40%**	MAPZ 20%	MAPZ 40%	**M1 (10%C + 10%PZ)**	**M2 (20%C + (20%PZ)**
Sp (%)		1.2%	0.8%	1.2%	1.2%	1.4%	1.2%	1.3%
Ciment(g)		678	556,04	427,79	558,75	432,00	557,37	429,87
Sable (g)		1315	1315	1315	1315	1315	1315	1315
Eau(g)		294.85	291,40	283,96	288,48	280,87	289,02	282,427
Ajout (g)	Cal*	0	109,09	223,81	0	0	54,67	112,45
	Pz*	0	0	0	103,85	214,12	51,8	106,53
Sp(g)		8.13	5,32	7,819	7,95	9,04	7,96	8,43
D (cm)		28.1	28	28.25	27.9	28.1	28	28.2
t (s)		3.5	3.5	3.7	3.6	3.8	3.6	3.7

Cal : calcaire ; Pz : pouzzolane

3.3. VERIFICATIONS DES MELANGES A L'ETAT FRAIS

Lors de la formulation, la caractérisation des mortiers à l'état frais est nécessaire. Cela consiste à connaître son comportement à l'état frais à partir des tests empiriques conçus spécifiquement pour évaluer le caractère autoplaçant. Évidemment, un béton est qualifié d'autoplaçant, non pas par rapport à sa composition, mais parce qu'il possède certaines

propriétés à l'état frais, la capacité de remplissage, la capacité de passage et la résistance à la ségrégation.

Pour ce qui s'en suit, et pouvoir comparer les résultats obtenus à l'état durci, on a varié la quantité d'adjuvant (figure 3.1) pour obtenir un étalement constant de 28 cm et un temps d'écoulement entre 3 et 4 sec pour tous les mortiers autoplaçantscomme indiquent les figures 3.2. et 3.3.

Les différents pourcentages du besoin en adjuvant pour les différents mortiers autoplaçants réalisés dans cette étude sont présentés sur la figure 3.1 suivante.

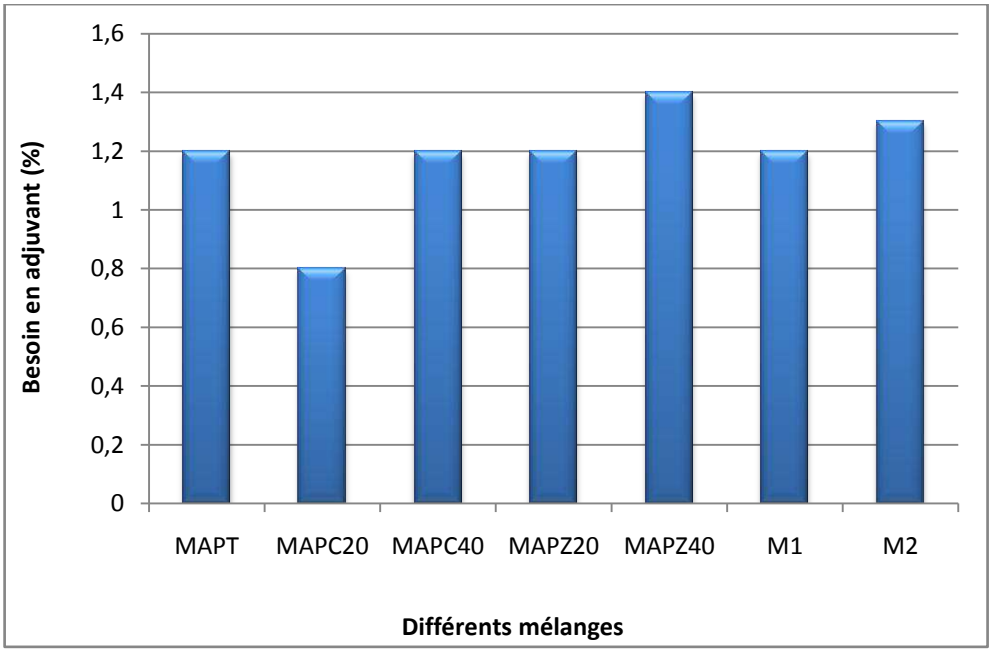


Figure 3.1 : Besoin en adjuvant en % pour les différents mortiers autoplaçants étudiés.

D'après les résultats présentés sur la figure 3.1, on remarque que les fillers calcaires améliorent la fluidité des mortiers autoplaçants. Par conséquent le mortier renfermant 20% de calcaire demande moins d'adjuvant. Mais au-delà de ce %, on obtient la même fluidité que celle du mortier témoin. En ce qui concerne la pouzzolane naturel, on remarque que les mortiers à base de 20% ont le même dosage en superplastifiant que celui du MAPT. Par contre, plus en augmente la quantité de cette matière on constate une perte d'ouvrabilité du mélange ce qui traduit par une forte demande en superplastifiant. Mélangeant les deux additions à raison de 10% pour chacune, on remarque une même fluidité du mélange que celle du MAPT. Par contre pour un mélange de 20% en chaque addition, une demande plus importante en adjuvant a été remarquée pour ce mortier.

D'âpres les résultats d'étalement des différents MAP, qui sont présenté sur la figure 3.2, et ceux du temps d'écoulement présentés sur la figure 3.3, on remarque que tous les mortiers ont des valeurs d'étalement et temps d'écoulement qui s'inscrivent dans le domaine des mortiersautoplaçants (D ≈ 28 cm et 3 < t < 4sec). Nous pouvons conclure que les compositions choisies assurent une bonne fluidité des bétons quel que soit l'addition incorporée. Sur la figure 3.4., nous présentons l'aspect visuel des différents mortiers autoplacants proposés pour l'étude.

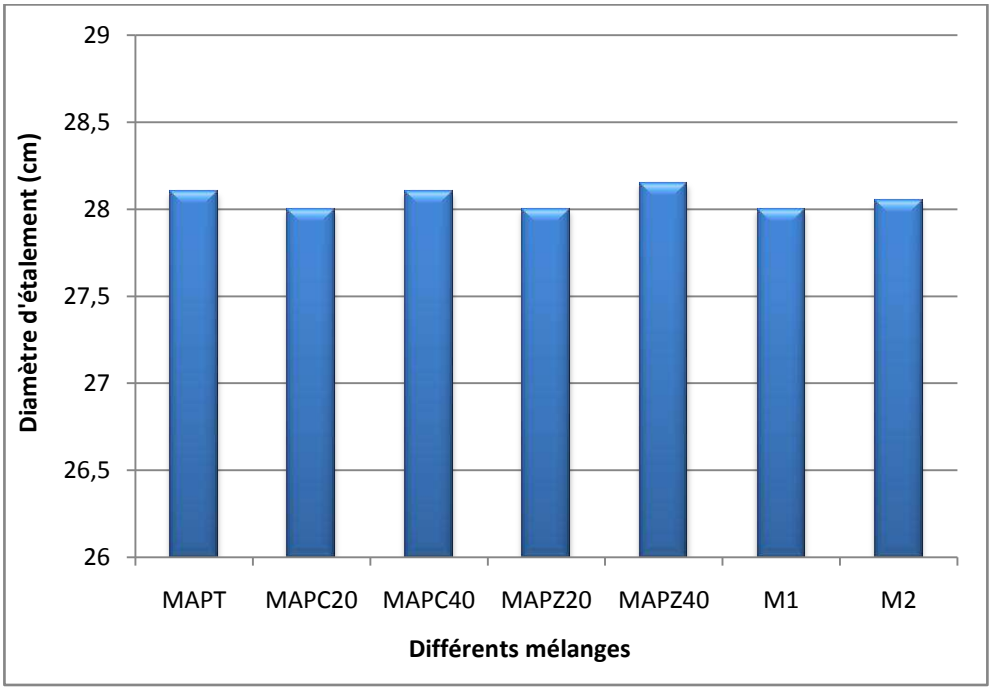


Figure 3.2 : Diamètre d'étalement au mini cône pour les différents mélanges.

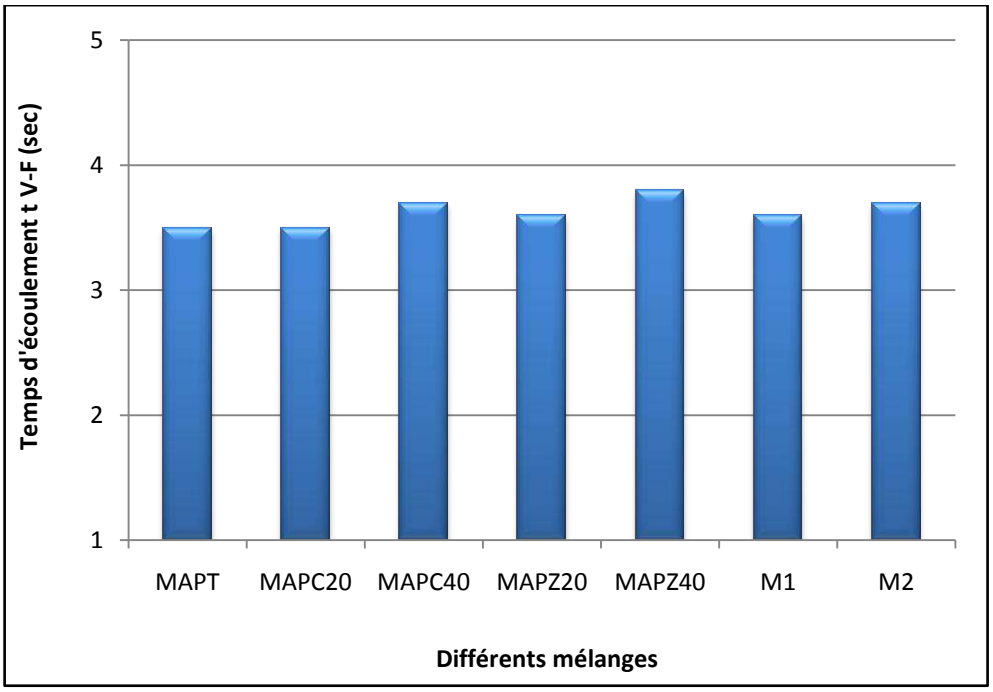


Figure 3.3 : Temps d'écoulement dans l'entonnoir en V pour les différents mélanges.

MAPT



MAPC 20%



MAPC 40%

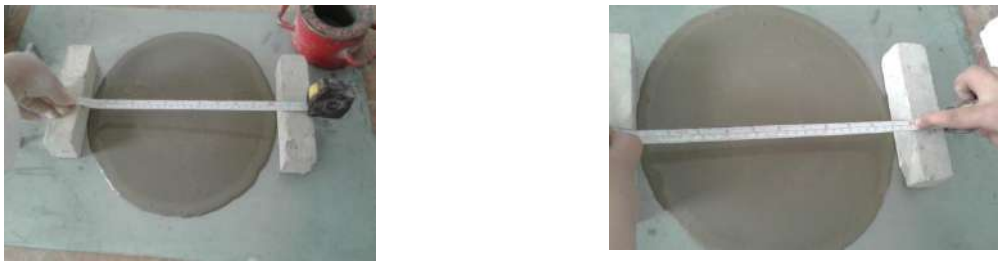


MAPZ20%



MAPZ40%

M_1



M_2



Figure 3.4 : Aspect visuel des différents mortiers autoplaçants étudiés.

3.4. CARACTERISATION DES MELANGES A L'ETAT DURCI

3.4.1. RESISTANCE A LA COMPRESSION

On propose dans cette partie d'étudier les résistances à la compression des mortiers autoplaçant sans et avec additions conservés à différentes températures de cure. Pour bien éclaircir les résultats obtenus, deux parties sont proposés pour chaque essai.

La première partie (effet des additions) est dans le but de mettre en évidence la contribution des additions minérales à l'amélioration où la dégradation des résistances mécaniques, une comparaison a été réalisée pour une même température de cure entre les propriétés des mortiers avec additions et celles du mortier sans additions (MAPT). Une deuxième partie (effet de la température de cure) est consacrée à la comparaison entre l'effet de l'augmentation de la température pour chaque mortier autoplaçant.

Un jour après le moulage, les éprouvettes de forme prismatiques 4*4*16 cm sont démoulées et remises en conservation jusqu'au moment de l'essai où elles subiront un essai de compression. Les trois éprouvettes de chaque mélange sont testés en compression afin de déterminer la résistance du mortier pour différents âges de 1, 3, 7, 28 jours subissant une cureà température variable.

3.4.1.1. Effet des additions minérales

L'effet des additions sur la résistance à la compression en fonction de l'âge pour les différentes températures de murissement est présenté par les figures 3.5 – 3.7 suivantes. On remarque de ces trois figures que les résistances mécaniques progressent avec l'âge pour tous les MAP quel que soit la température de cure, cette augmentation est due au développement de l'hydratation en fonction du temps.On remarque aussi que quel que soit la température de cure, tous les mortiers autoplaçants incorporant des additions minérales présentent des faibles résistances par rapport au mortier autoplaçant témoin (MAPT). Tout en restant dans le domaine des bétons courant (R_c> 25 MPa).

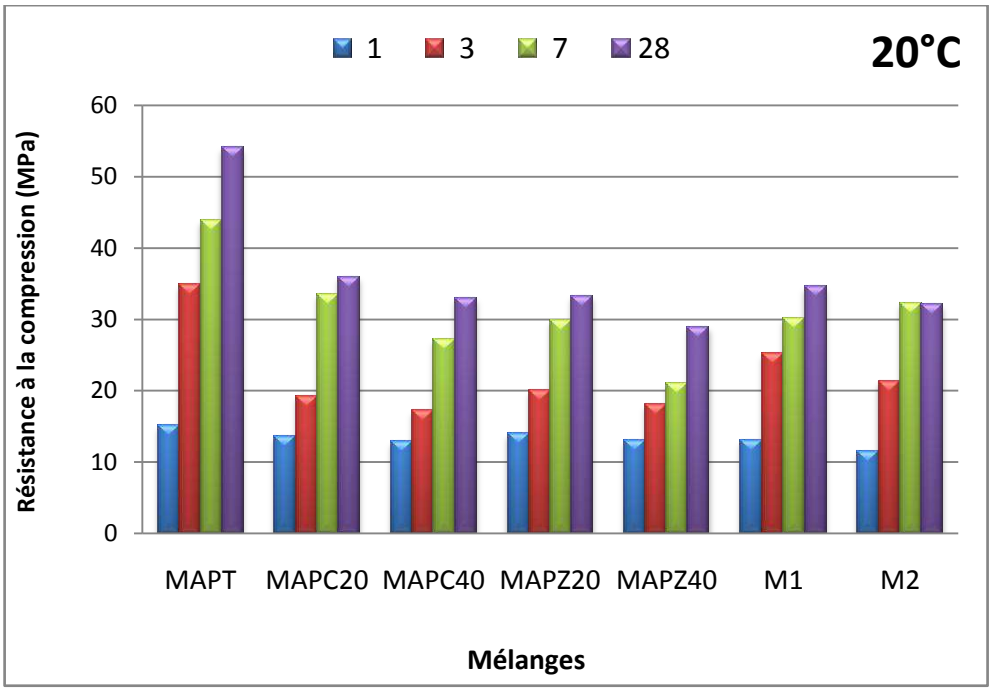


Figure 3.5 : Résistance à la compression des MAP muris à 20 °C

Dans les conditions normales (20°C), les résultats de la figure 3.5 montrent l'effet négatif des deux (02) addition sur la résistance à la compression pour tous les âges d'essai. Pour le cas des MAP à base de calcaire une diminution de l'ordre de 10, 44, 23 et 33% et observée pour les mélanges de 20% de calcaire à l'âge de 1, 3, 7 et 28 jours respectivement. Et de 15, 50, 38 et 39% pour les mélanges de 40% de calcaire à l'âge de 1, 3, 7 et 28 jour respectivement. Ces résultats confirment celles trouvées par Ezziane**[35] et** Bouali **[40],** qui ont trouvé que le mortier à base de calcaire présente des résistances inférieuresà celles du mortier témoin au quelle que soit la proportion du calcaire utilisée mais elle reste acceptable > a 25 MPA.

Des diminutions de la résistance par rapport au mortier autoplaçant témoin est observées aussi pour les mélanges contenant de la pouzzolane naturelle tel que une diminution de l'ordre de 7, 42, 32 et 38% est observée pour les MAPZ20 à l'âge de 1, 3, 7 et 28 jours respectivement. Et de l'ordre de 13, 48, 52 et 46 % aux mêmes âges respectivement pour les mélanges incorporés 40% de pouzzolane. Ces résultats ne coïncident pas avec ceux trouvés par d'autres chercheurs**[52, 61-64]**, qui ont trouvé des améliorations des résistances à long termes des bétons à base de pouzzolane de Beni-Saf. Ceci peut être expliqué soit par une faible activité de cette addition, soit que l'effet pouzzolanique de cette addition ne pourra s'observé que après 28 jour. Ce qui est confirmé par Mebrouki et al. **[52]** qui ont constatent qu'un taux de

substitution de 10% représente l'optimal, et du point de vue gain de résistance, ils observent ceci au-delà de 28 jours pour un taux de substitution de 30%.

Benkaddour**[66]** a montré aussi qu'un taux de substitution de 30% de pouzzolane engendre une diminution de 15% de la résistance à la compression des bétons à long terme (90 jours). Ces résultats sont similaires avec ceux obtenus par Aichoub et al. **[54]** qui ont trouvé une diminution de 11% de la résistance à la compression à l'échéance de 90 jours. Cependant, il a été affirmé par autre chercheur que l'utilisation de la pouzzolane naturelle entraine un accroissement de la résistance des bétons à long terme **[67]**.

Pour le cas du liant ternaire, on observe toujours une diminution dans les résistances mécaniques par rapport à celles du MAPT. Mais le risque est moins important pour le cas du mélange de 10% pour chaque addition que celui du mélange de 20%. Le taux de diminution à l'âge de 28 jour est de l'ordre de 35% pour le premier cas comparativement au 42% trouvé pour le cas des mélanges comportant 20% calcaire plus 20% pouzzolane.
Kerbouche et al. **[74]**, dans ces travaux a montré que pour les mortiers ternaires combinant à lafois deux ajouts, les substitutions (10% pouzzolane/10% calcaire) et (10% pouzzolane/10%fumée de silice) améliorent nettement leurs résistances mécaniques à long terme (90 jours).

MANSOURS.**[77]** a trouvé dans son travail qui consiste à introduire une addition inerte(calcaire) dans un ciment contenant de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf, que le couplecomposé de 70% CPA, 20% pouzzolane et 10% calcaire développe une résistance trèscomparable à celle du mortier témoin.

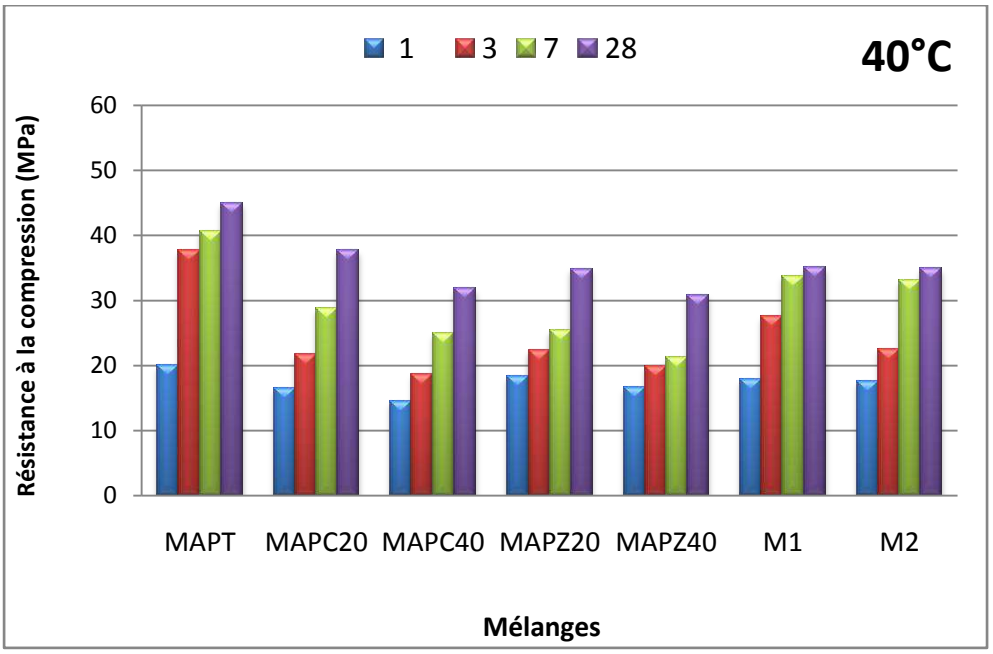


Figure 3.6 : Résistance à la compression des MAP muris à 40 °C

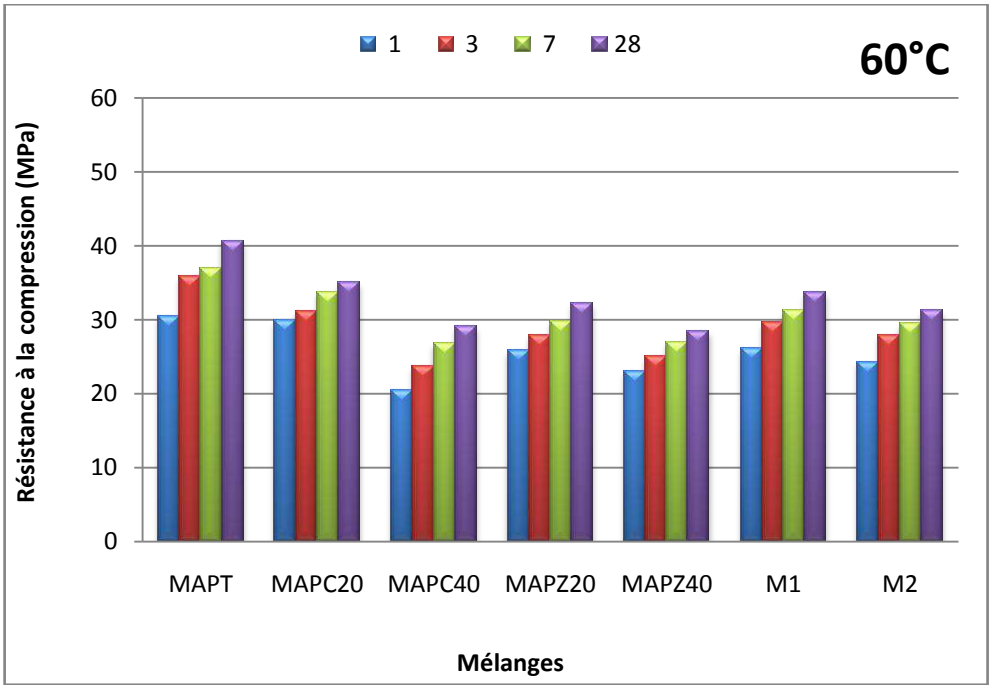


Figure 3.7 : Résistance à la compression des MAP muris à 60 °C

En augmentant la température de cure, on observe des améliorations des résistances pour tous les mélanges avant les premiers septe (07) jours pour les deux températures (40 et 60°C). Mais ces résistances restent toujours inférieures à celles du mortier témoin (MAPT). Au-delà de 7 jour et à 28 jour d'âge et pour les deux températures de cure (40 et 60°C) on remarque que plus en augmente le taux de substitution des additions plus la résistance est diminuée dans le cas des deux additions.

Des résistances comparables sont observées à 28 jours pour le MPZ20, M1 et M2 à 40 et 60°C. Les meilleures résistances observées pour les deux températures (40 et 60°C) à 28 jours, sont celles du mortier comportant 20% de calcaire.

3.4.1.2. Effet de la température de murissement

L'effet de la température de cure sur la résistance à la compression des différents mélanges en fonction de l'âge est présenté par les figures 3.8 – 3.14 suivantes.

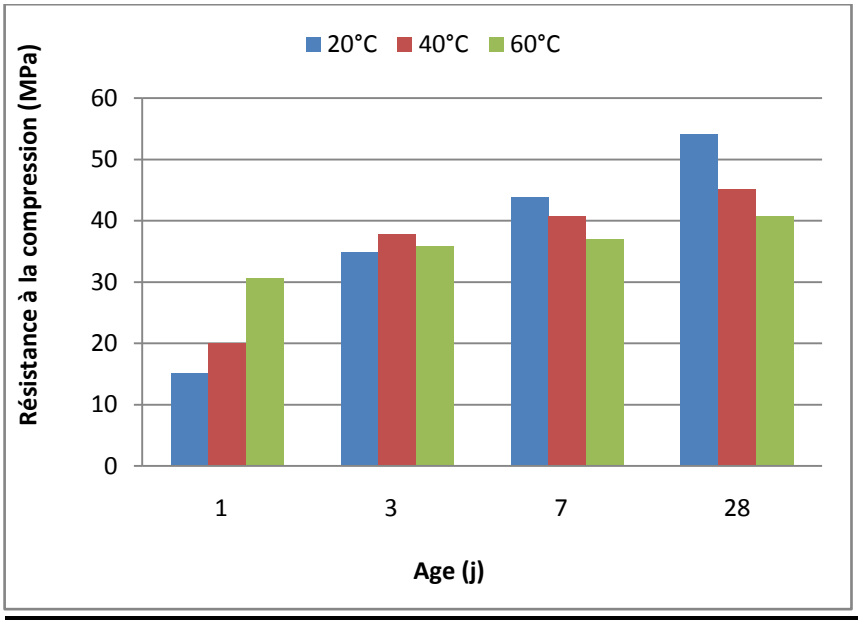


Figure 3.8 : Résistance à la compression des MAPT en fonction de la température.

Pour le cas de MAPT, on remarque d'après la figure 3.8, que pour les trois (03) différentes températures de cure on a une augmentation de la résistance en fonction d'âges. A très jeune âge (1 jour), une croissance de la résistance au fur et à mesure que la température s'accroit.Au-delà de 7 jours, on constate une diminution des résistances plus en augmentant la température. Et que les meilleures valeurs sont trouvés par un murissement à 20°C.

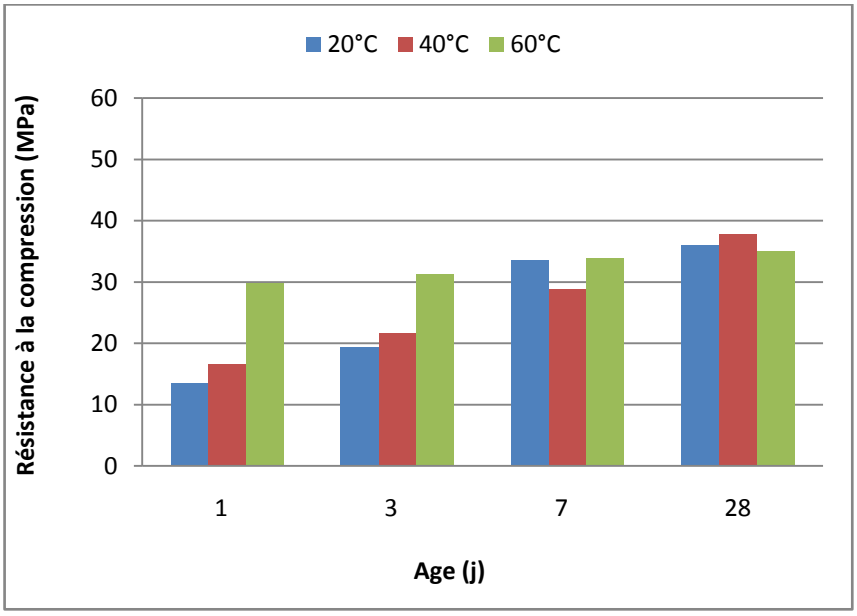


Figure 3.9 : Résistance à la compression des MAPC20 en fonction de la température.

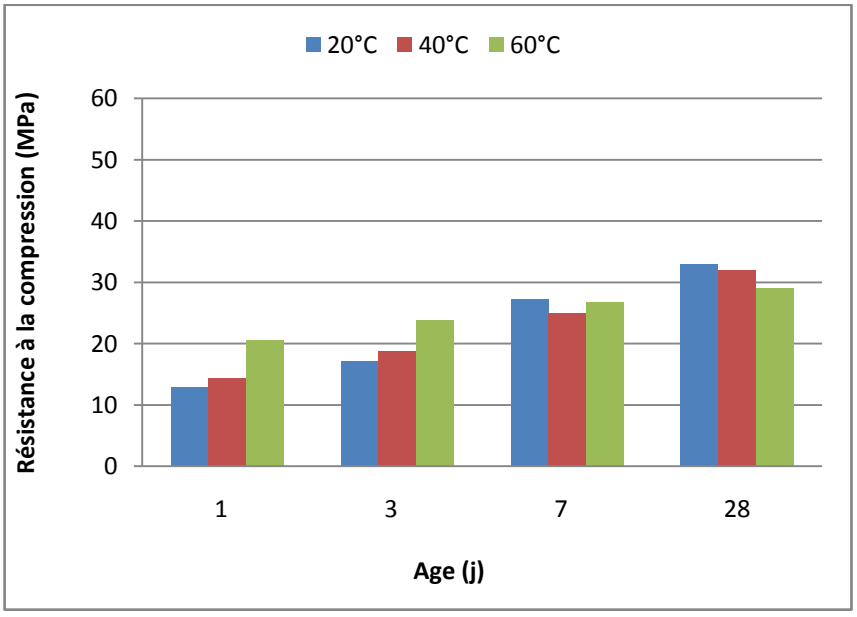


Figure 3.10 : Résistance à la compression des MAPC40 en fonction de la température.

De la figure 3.9 et 3.10, on peut remarquer l'effet bénéfique d'élévation de température sur les résistances initiales des mortiers comportant des fillers calcaires. Toutefois, un gain de l'ordre de 100% a été observé à 1 jour d'âge des mortiers avec 20% de calcaire à 60°C, comparativement à celui de 50%observé pour le cas du taux de substitution de 40% dans la

même température de murissement(60°C). Donc on peut avoir des résistances de l'ordre de 30MPa à un MAP avec 20% de calcaire et traité à 60°C.

A partir de 28 jours les meilleures résistances sont observées pour le cas de 20% de calcaire sous une température de 40°C (37 MPa). Ces mélanges développent presque les mêmes résistances pour le cas du traitement à 60°C que celles trouvées à 20°C. Pour le cas des mélanges avec 40% de calcaire, des légères diminutions dans la résistance de l'ordre de 1 et 3 MPa sont observées pour ces mélanges à 40 et 60°C respectivement par rapport à celles trouvées à 20°C.

On peut conclure que le meilleur taux de remplacement du ciment par le calcaire pour les trois températures de cure est 20%. Ainsi que la température de 40°C s'avère la plus convenable pour les mortiers comportant des calcaires.

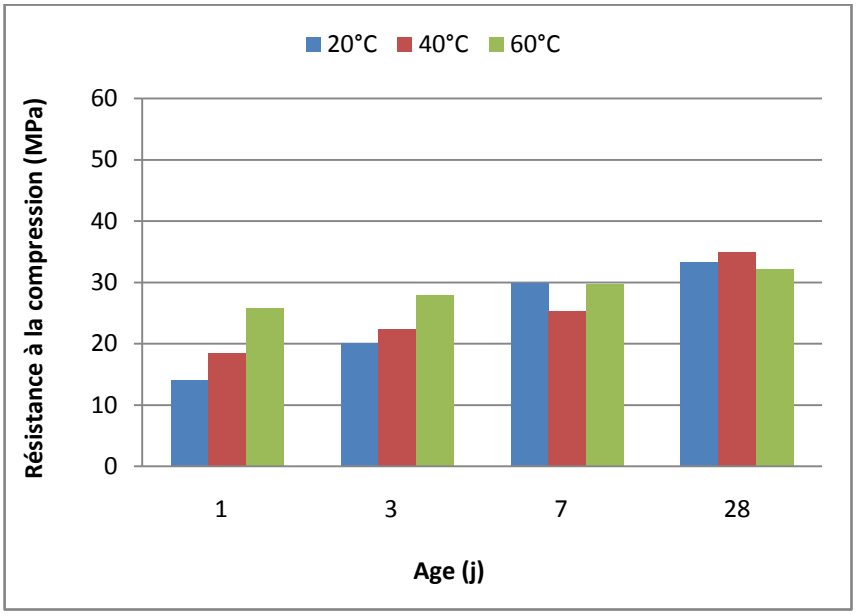


Figure 3.11 : Résistance à la compression des MAPZ20 en fonction de la température.

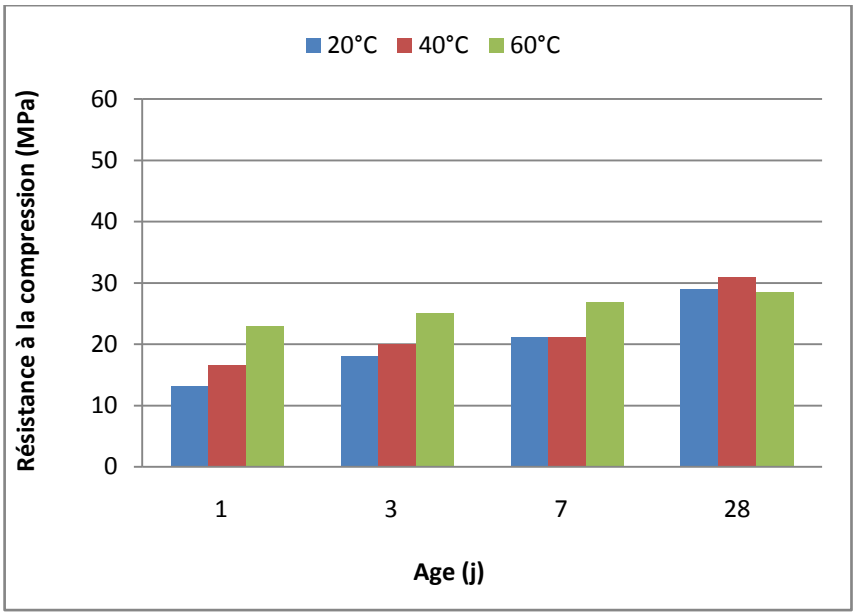


Figure 3.12 : Résistance à la compression des MAPZ40 en fonction de la température.

Pour le cas des mélanges comportant de la pouzzolane naturelle, les figures 3.11 et 3.12 montrent que plus en augmente la température, plus la résistance est élevée à jeune âge. A partir de 28 jours on remarque des résistances comparables pour les trois températures (20, 40 et 60°C) dans le mélange qui contient 20 et 40% de pouzzolane naturelle. Toutefois, on observe que les meilleures résistance à 28 jours sont obtenues pour le cas des mélages avec 20% de pouzzolane et muris à 40°C.

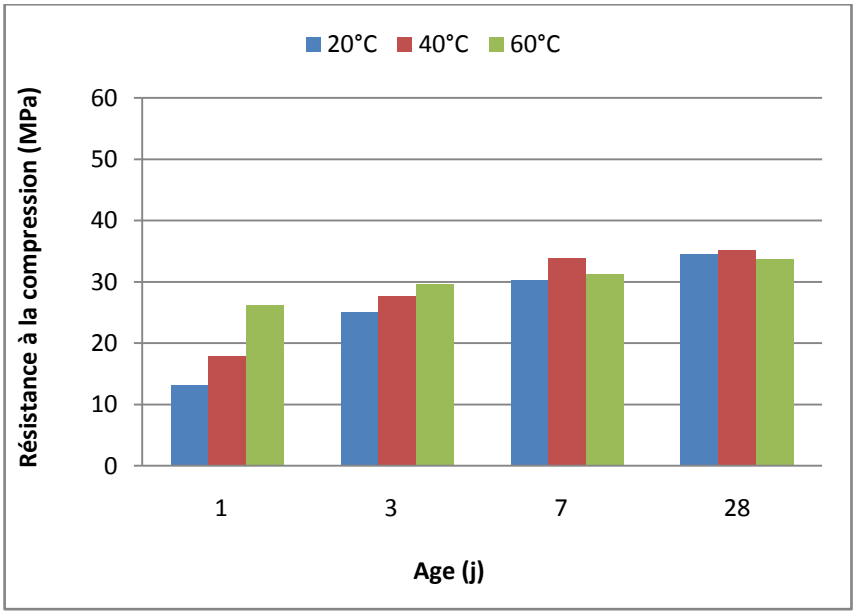


Figure 3.13 : Résistance à la compression des M1 en fonction de la température.

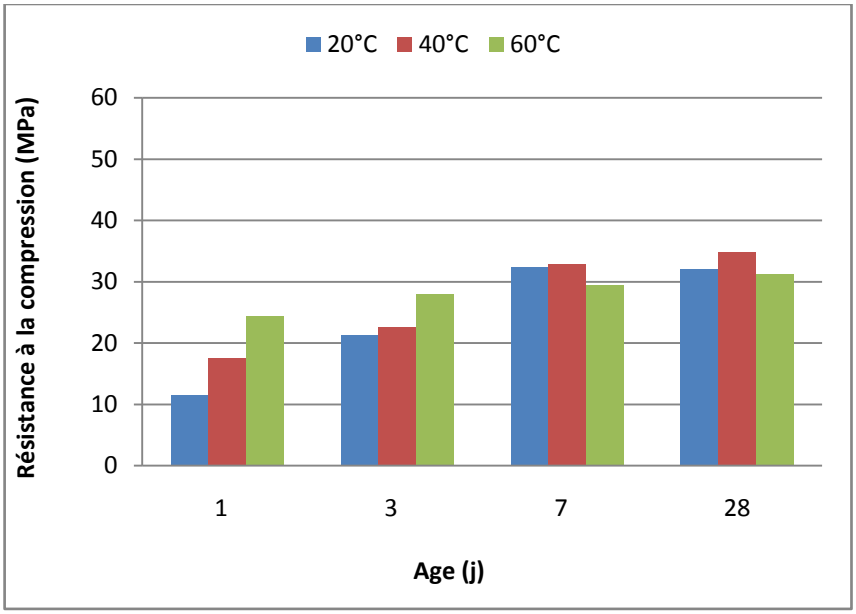


Figure 3.14 : Résistance à la compression des M2 en fonction de la température.

En ce qui concerne les mélange comportant d'un liant ternaire, on remarque aussi que plus on augmente la température plus la résistance augmente. Toutefois, presque les mêmes valeurs de la résistance. A partir de 7 jours et pour les deux mélanges, on remarque que la température de 40°C engendre les meilleures résistances à 28 jours. Là où on observe presque la même résistance à 40°C pour les deux mélanges (M1 et M2) qui est de l'ordre de 35 MPa.

3.4.2. VITESSE ULTRASONIQUE

Les résultats de la vitesse ultrasonique de tous les mélanges pour les trois (03) températures de murissement (20, 40 et 60°C), sont sur les figures 3.15 – 3.17 suivantes.

3.4.2.1. Effet des additions minérales

A l'observation de la figure 3.15. On a enregistré une augmentation de la vitesse ultrasonique de tous les mélanges en fonction d'âges ce qui suit la même allure que l'augmentation de la résistance.Nous remarquons aussi que les meilleures vitesses ultrasoniques sont celles du MAPT à tous jours (7 et 28 jour) par rapport les autres mélanges.

Nous observons également des vitesses ultrasoniques comparables à 7 et 28jours pour le MPAC20, MAPZ20. On remarque aussi que plus en augmente le taux de substitution des

additions dans le mélange, plus la vitesse diminuée. Les plus faibles valeurs de la vitesse sont observées pour le mortier renfermant 20% calcaire plus 20% pouzzolane (M2).

Mucteba**[123]** a montré également une diminution des vitesses ultrasoniques à jeune âge et à long terme pour des mélanges comportant un taux de remplacement de 20% du ciment par le calcaire.

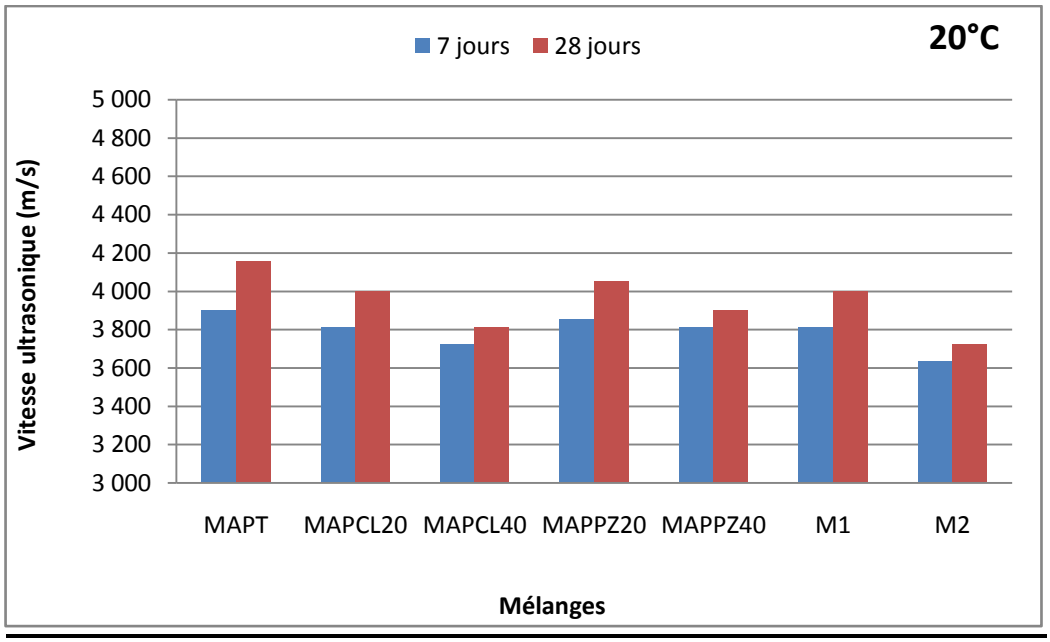


Figure 3.15 : Vitesse ultrasonique des différents MAP muris à 20°C.

Bachene Sara **[111]** a également trouvé des vitesses inferieurs à celles bu BAPT sont pour les BAPC (à base de 15 % calcaire) et BAPP (à base de 15 % pouzzolane) à toutes les échéances, en effet le même comportement est observé pour les résistances à la compression.

3.4.2.2. Effet de la température

A 40°C et comme le cas de 20°C, la figure 3.16 montre une amélioration des vitesses ultrasoniques est enregistrée pour tous les mélange en fonction de l'âge. Les meilleures vitesses à l'âge de 28 jours sont observées pour le MAPT et MAPZ20.

Nous constatons également qu'à 28 jours d'âge le MAPC20 (20% CL), MAPZ40 (40% PZ) et le M1 prend la même vitesse ultrasonique. Signalant aussi que plus on augmente le taux des additions dans les mélanges (40%), plus que la vitesse ultrasoniquediminue. On remarque aussi que le mortier M2 possède la vitesse ultrasonique la plus faible par rapport tous mélanges. Ce qui traduit par une faible compacité de ce dernier.

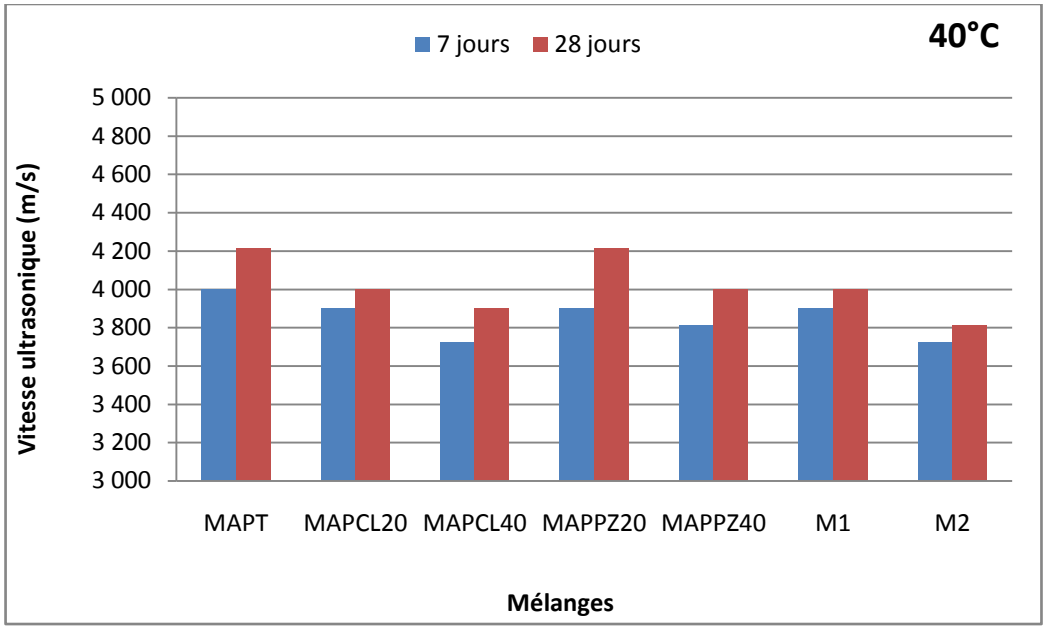


Figure 3.16 : Vitesse ultrasonique des différents MAP muris à 40°C.

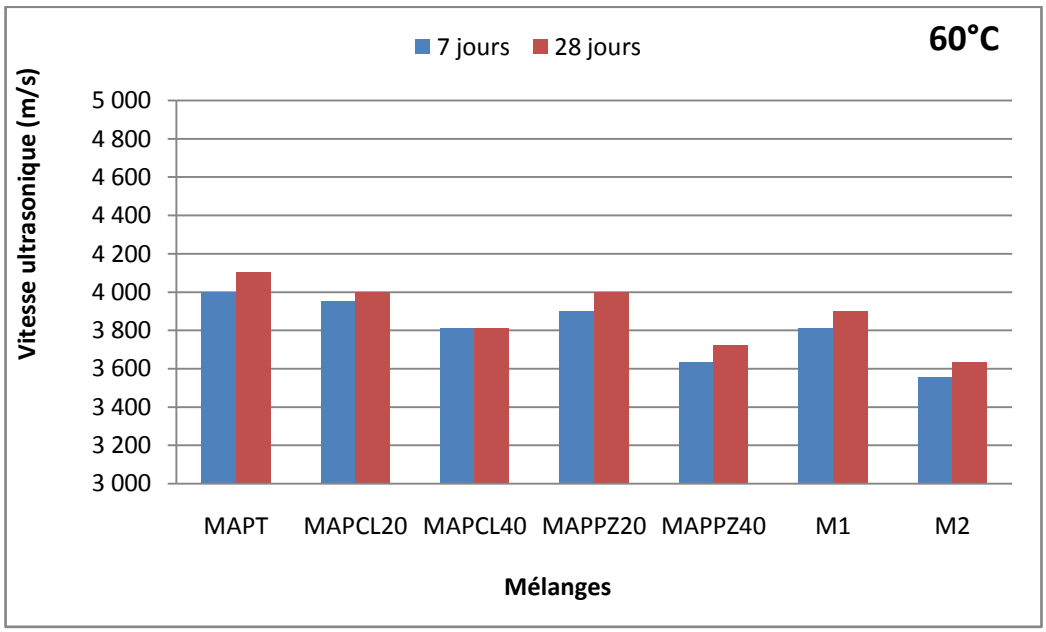


Figure 3.17 : Vitesse ultrasonique des différents MAP muris à 60°C.

A l'issu de la figure 3.17, une augmentation de la vitesse est enregistrée pour tous les mélange en fonction d'âges. De la même façon que pour 40°C, on remarque toujours que les meilleures vitesses sont observées pour le MAPT. Le MAPC20 et MAPZ20 prend la même vitesse ultrasonique et plus le taux d'addition (calcaire et pouzzolane) augmente, plus que la vitesse ultrasonique diminue. Le mélange M2 possède toujours la vitesse la plus faible par rapport aux autres mélanges.

Comparant les résultats des trois figures précédentes (3.15, 3.16 et 3.17), on peut remarquer aussi pour tous les mélanges, que la vitesse ultrasonique augmente à 7 jours en fonction d'augmentation de la température de murissement. Au-delà de 7 jours et à l'âge de 28 jours on constate que la meilleure vitesse et obtenue pour le cas de murissement à 40°C, et ceci pour tous les mélanges étudiés. Ce qui traduit par une meilleure compacité des mélanges à cette température (40°C). En effet le même comportement est observé pour les résistances à la compression.

De même Bachene Sara **[111]** à sur labase de ses travaux que les plus grandes vitesses de propagation des ondes sont mesurées sur les échantillons conservé à 40°C pour les quatre types du béton à tous les âges d'essai.Contrairement au béton autoplaçant, pour les bétons ordinaires, Abbasi**[124]** a signalé une diminution de la vitesse avec l'augmentation de la température, et cela indique l'effet nuisible de la cure chaude sur la qualité de ces bétons.

3.4.3. POROSITE ACCESSIBLE A L'EAU

Les résultats de la porosité accessible pour tous les mélanges en fonction de la température de murissement, sont présentés à la figure 3.18 suivante.

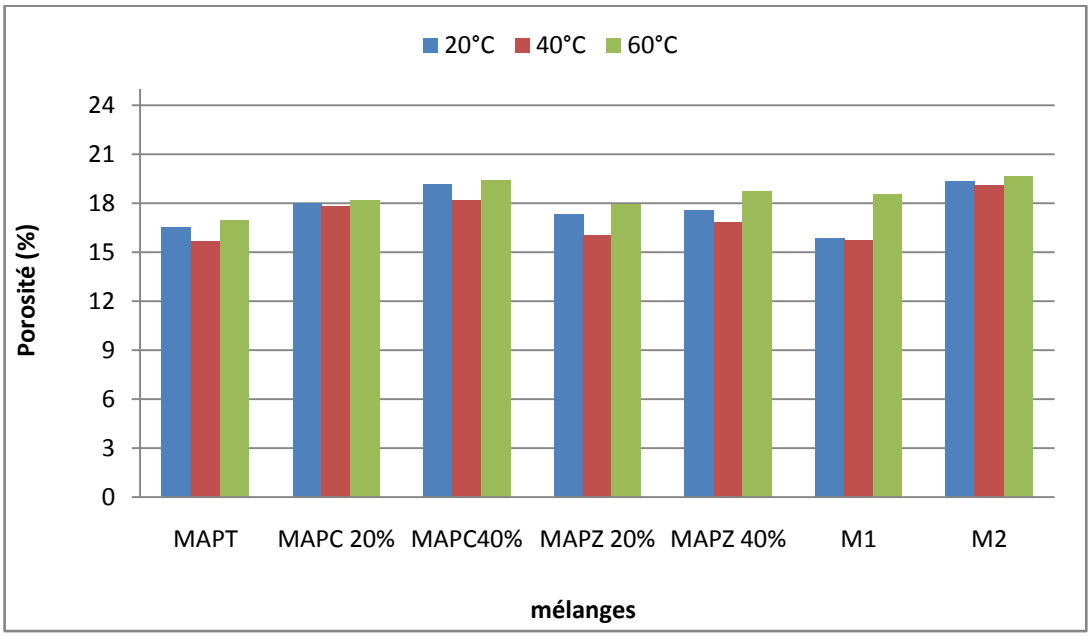


Figure 3.18 : Porosité accessible à l'eau des différents MAP en fonction de la température de murissement.

Dans les conditions standard, et si on compare les différents mélanges, on peut remarquer de la figure 3.18 et à 20°C, l'effet négatif des additions minérales sur la compacité des mortiers autoplaçants. Et par conséquent, plus en augmente le taux de substitution plus cette dernière diminue. On peut observer de cette figure aussi que les mélanges les plus poreux sont MAPC40 et M2. Par contre le mélange le plus compact et celui qui contient 10% calcaire et 10% pouzzolane (M1) Ce qui est en corrélation avec la vitesse ultrasonique. Ce résultat montre bien l'effet bénéfique de combiner deux additions de natures différentes.

En ce qui concerne l'effet du traitement thermique sur la porosité des différents mélanges, la figure 3.18 montre que les valeurs de la porosité les plus élevées pour tous les mélanges, sont enregistrées dans le cas de murissement à 60°C, et que le mortier de référence (MAPT) présente la moindre valeur de la porosité à 60°C.

En outre les mélanges les plus compactes sont ceux traité à 40°C. Ce qui concorde bien aux résultats de la vitesse ultrasonique.

3.4.4. ABSORPTION D'EAU PAR CAPILLARITE

La masse d'eau absorbée par unité de surface a été tracée en fonction de la racine carrée dutemps, les résultats de l'essai d'absorption d'eau des différents mélanges réalisés sont représentés dans les figures 3.9 – 3.21 suivantes.

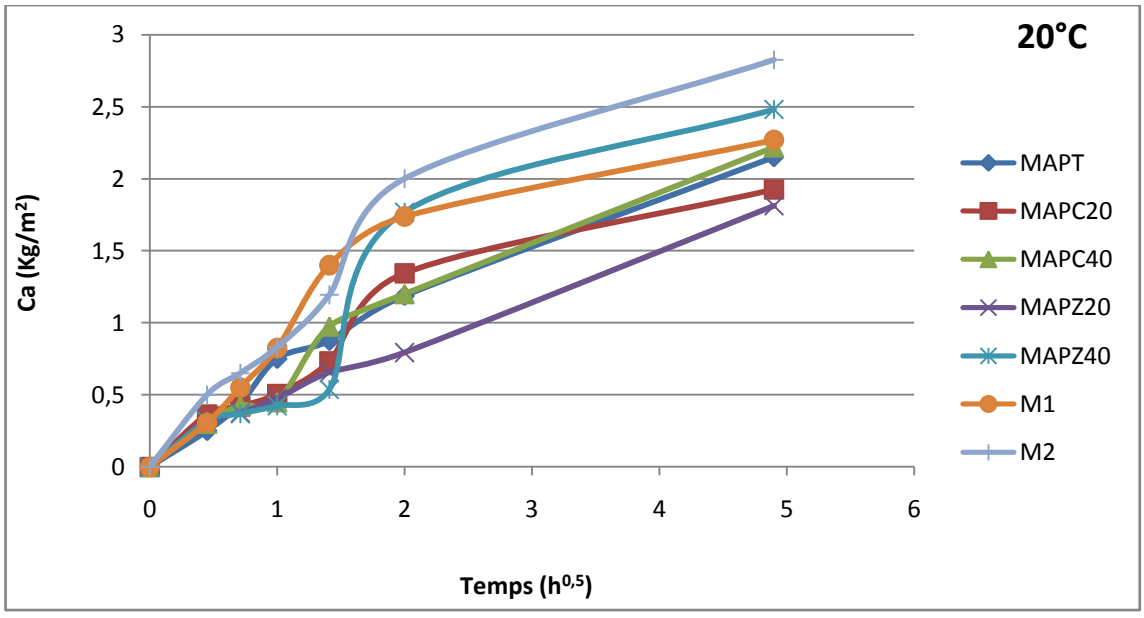


Figure 3.19 : Absorption capillaire des mélanges muris à 20°C.

A l'issu de la figure 3.19, on remarque pour les mélanges muris à 20°C que les mortiers à base de 20% calcaire (MAPC20) et ceux à base de 20% de pouzzolane (MAPZ20), ont présenté un taux d'absorption moins élevé que celui du mortier témoin (MAPT). Tandis que presque le même taux d'absorption que celui du mortier témoin, est observé pour le cas des mélanges à base de 40% de calcaire et M1. Alors que le mélange M2 et celui comportant 40% de pouzzolane sont les mélanges les plus absorbant. Ceci montre l'effet bénéfique d'employer des additions minérales dans la fabrication des mortiers autoplaçant. Tout en restant en dessous du dosage de 20% pour chaque addition.

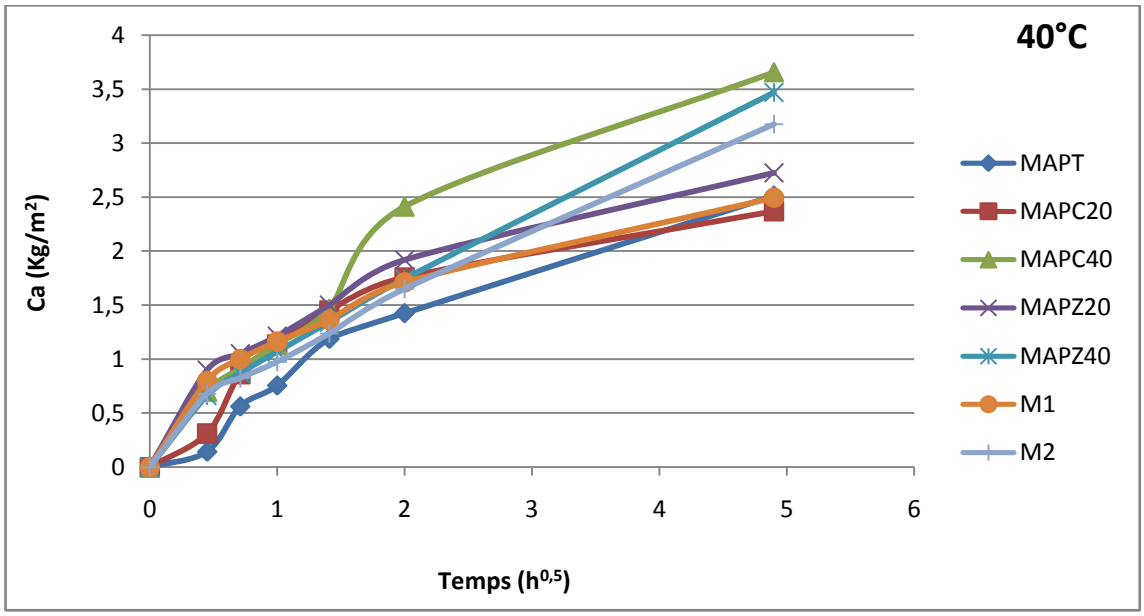


Figure 3.20 : Absorption capillaire des mélanges muris à 40°C.

Dans le cas des mélanges traités thermiquement et à l'issu des figures 3.20 et 3.21, et comparativement au figure 3.19, on peut remarquer clairement que plus on augmente la température de murissement, plus la capacité d'absorption est augmentée, et ceci pour tous les mélanges étudiés. Ceci et sans doute due l'effet de l'élévation de la température qui engendre des structures plus ouvertes et moins compactantes favorisant la pénétration des eaux par capillarité à travers le matériau.

On peut remarquer aussi à partir de ces figures et pour les trois températures de cure, que plus on augmente le pourcentage de substitution des additions, plus la capacité d'absorption augmente

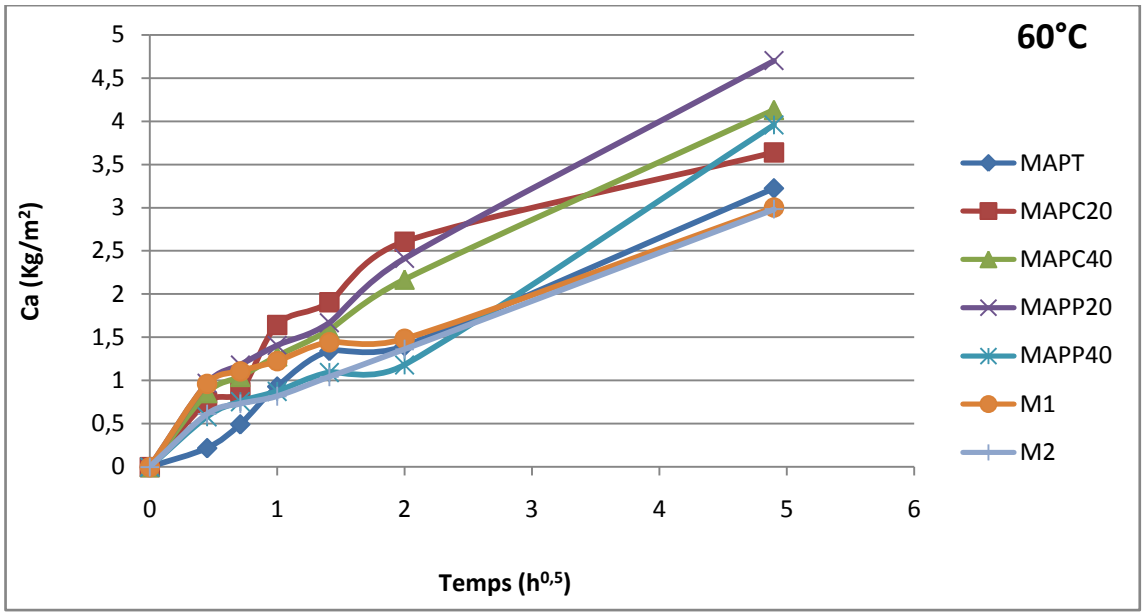


Figure 3.21 : Absorption capillaire des mélanges muris à 60°C.

3.4.5. VARIATIONS DIMENSIONNELLES (RETRAIT ET GONFLEMENT)

3.4.5.1. RETRAIT

Les résultats de variation dimensionnelle des mélanges conservés à l'air libre du laboratoire (retrait) sont résumés dans les figures 3.22 – 3.24 suivantes.

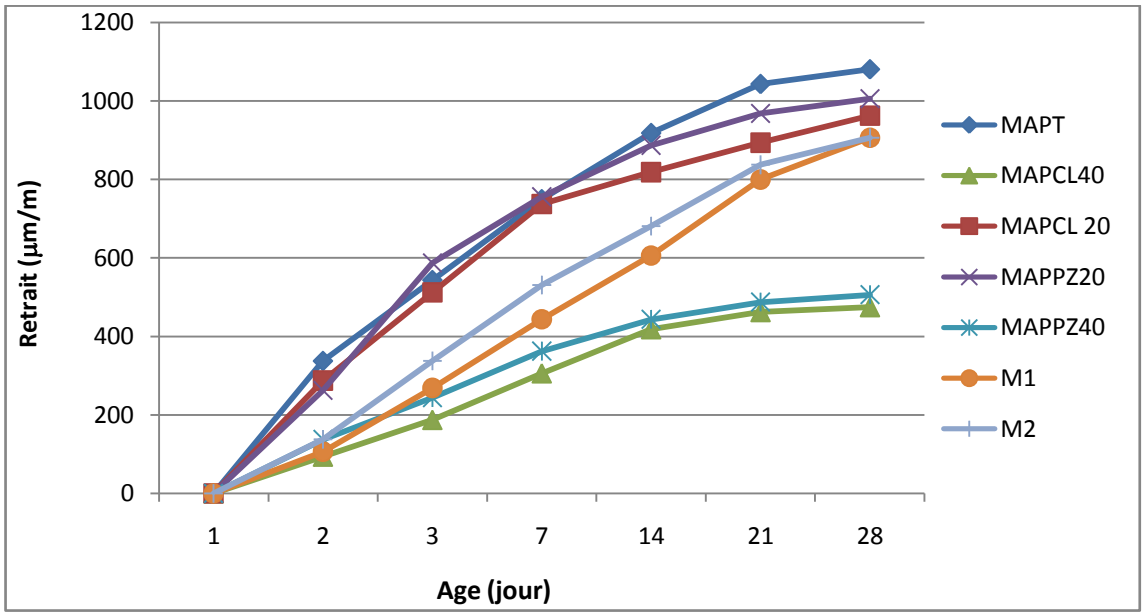


Figure 3.22 : Retrait des mélanges muris à 20°C.

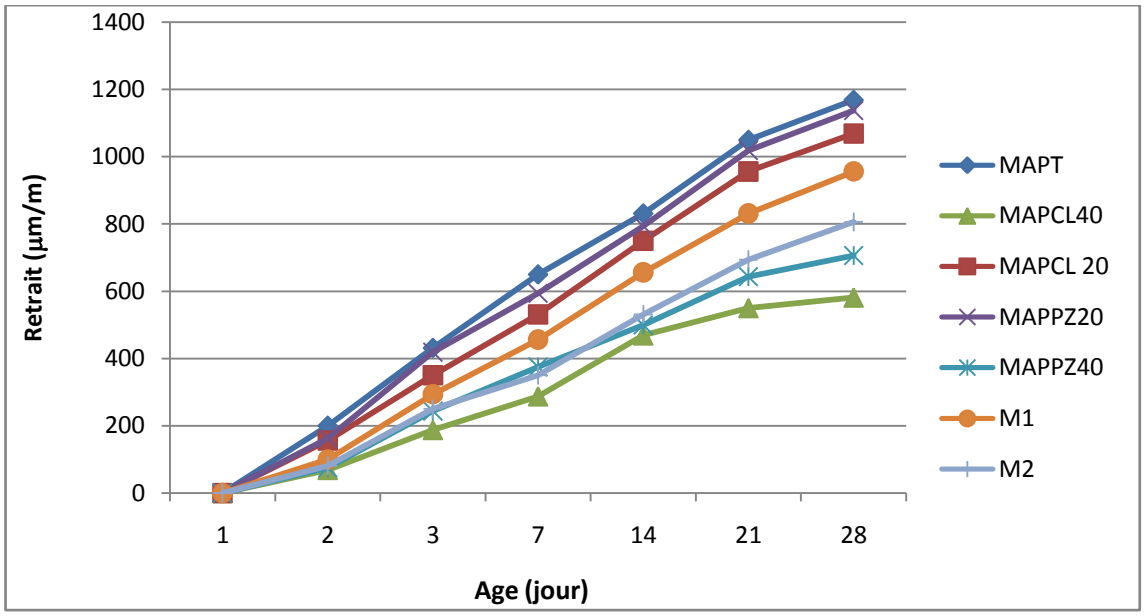


Figure 3.23 : Retrait des mélanges muris à 40°C.

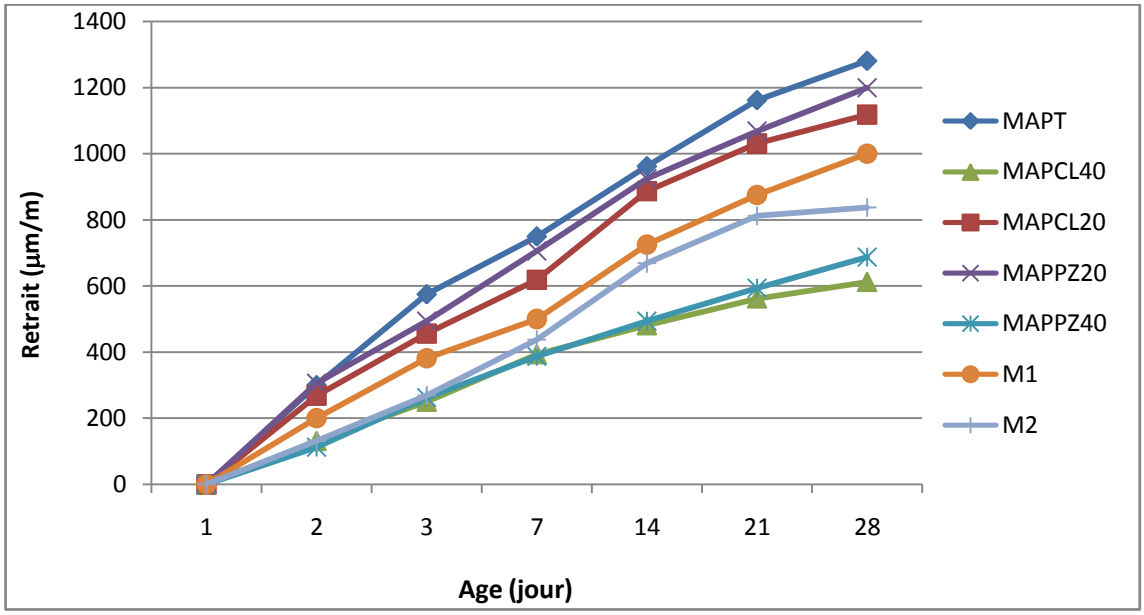


Figure 3.24 : Retrait des mélanges muris à 60°C.

A partir des résultats exposés dans ces figures, on remarque pour les trois températures de murissement, les mélanges comportant des additions minérales présentent des valeurs de retrait plus faible que celles du mortier autoplaçant témoin (MAPT). Et plus en augmente le taux de substitution du ciment par les additions, plus le retrait est diminué. Ceci est dû à

lafaible activité des additions employées dans cette étude, par conséquent à la faible chaleur d'hydratation qui est la cause principale du phénomène de retrait.

Ces résultats coïncide avec ceux trouvés par Bouali R. **[40]**, qui a démontré lors de son étude sur la contribution du calcaire dans un ciment portland artificiel et d'un béton que un mortier contenant 15% de calcaire possède, à 2, 7 et 28 jours, un retrait de 25, 16 et 7% inférieur à celui d'un mortier sans calcaire.

ITIM, A **[72]** a démontré également que la présence des ajouts minéraux à des taux convenables fait diminuer le retrait de dessiccation, cela est le résultat de leur contribution à l'amélioration de la microstructure.

On peut remarquer également à travers ces résultats que plus en augmente la température de murissement, plus les valeurs du retrait augmente. Ceci est valable pour tous les mélanges avec et sans additions minérales. Et peut-être expliquer par la structure plus au moins poreuse des mélanges soumis à l'élévation de température de murissement.

3.4.5.2. Gonflement

Les résultats de variation dimensionnelle des mélanges conservés dans l'eau à 20°C (gonflement) sont résumés dans les figures 3.25 – 3.27 suivantes

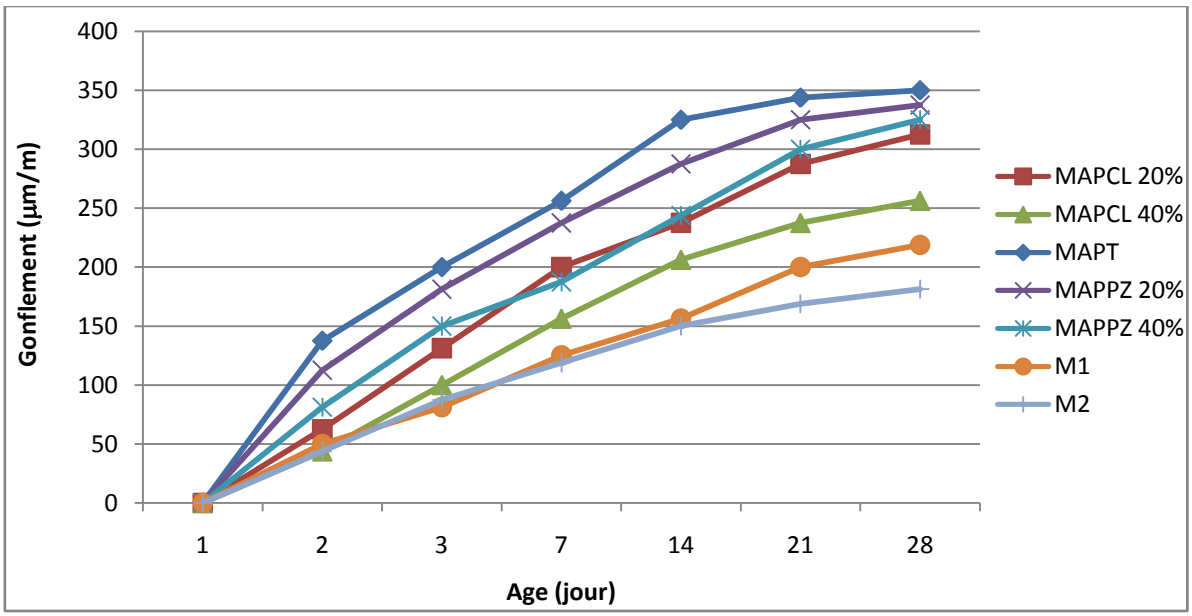


Figure 3.25 : Gonflement des mélanges muris à 20°C.

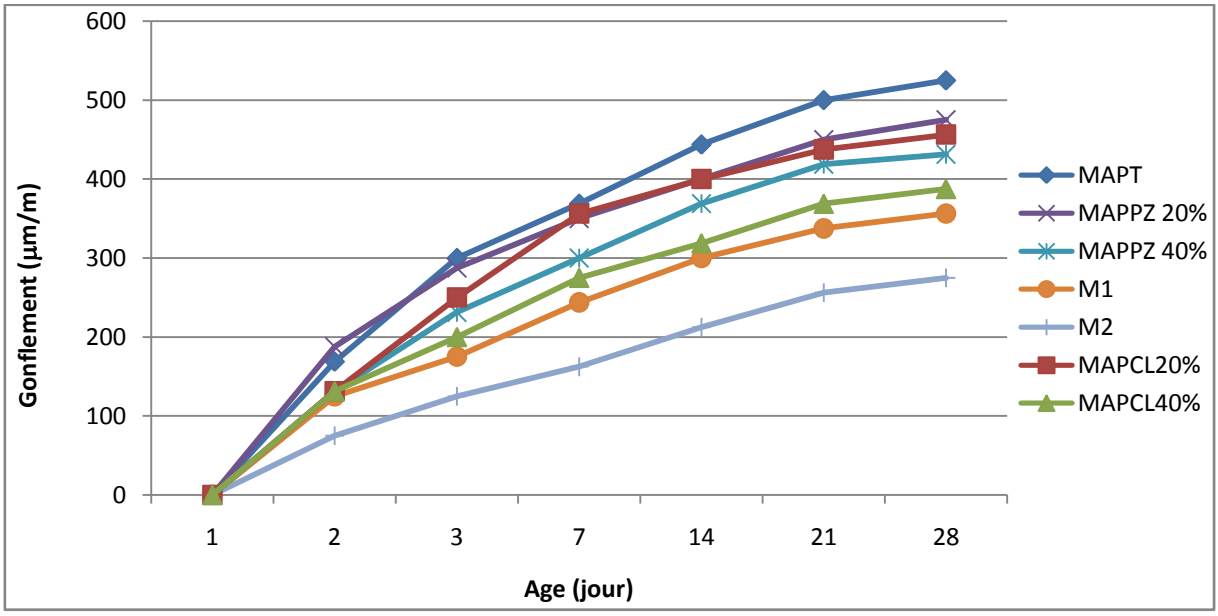


Figure 3.26 : Gonflement des mélanges muris à 40°C.

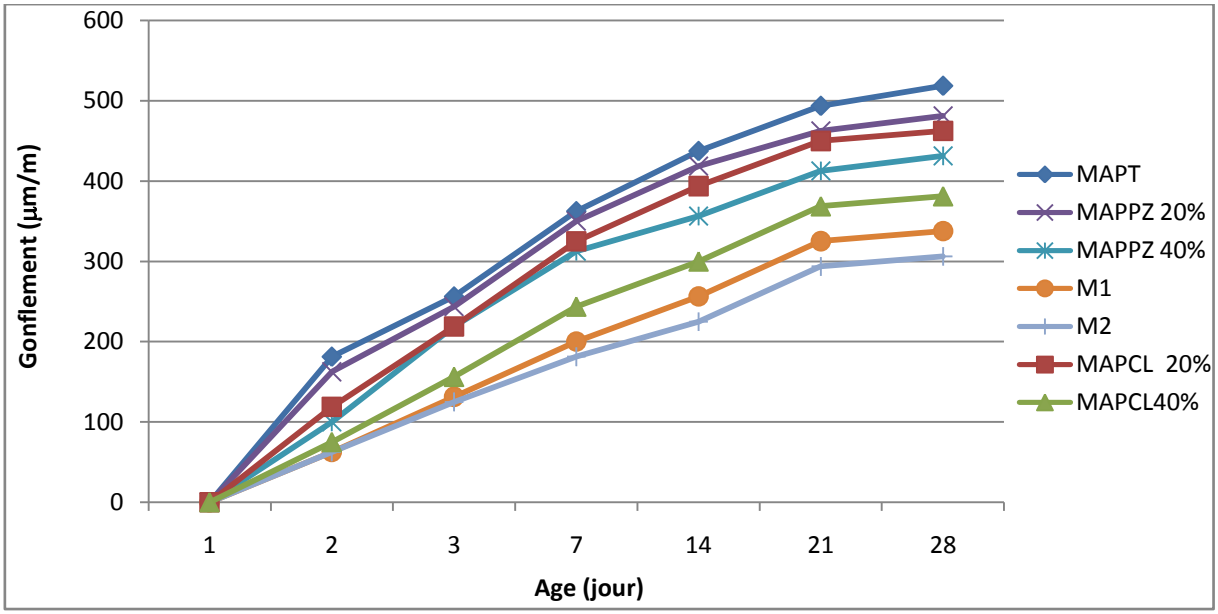


Figure 3.27 : Gonflement des mélanges muris à 60°C.

A l'issu des figures précédentes, on remarque que tous les mélanges avec des additions minérales présentent des valeurs de gonflement plus faible que celle du mortier autoplaçant témoin (MAP). Et que plus on augmente le taux de substitution, plus le gonflement devient

plus faible. Ceci est pour les trois températures de murissement. Et plus on augmente la température, plus les valeurs du gonflement augmentent pour tous les mélanges étudiés.

3.5. CONCLUSIONS

Les résultats de l'étude expérimentale ont montré que l'incorporation des additions minérales dans les mortiers autoplaçant a un effet dissemblable sur les caractéristiques de ces mortiers soit à l'état frais ou durci, et cela dépond du type d'addition et la température de murissement employée. En effet chaque addition et chaque température de cure à des avantages et des inconvenants :

Le calcaire a amélioré d'une façon remarquable les caractéristiques à l'état frais mais sans aucune participation à la résistance et même un affaiblissement des paramètres de transfère est révélé pour les mortiers à base de cette addition, et cela pour toutes les températures de cure.

La pouzzolane naturelle a montré des effets négatifs sur le comportement mécanique des mortiers autoplaçant pour toutes les températures. Ce qui montre une faible activité de cette addition.

Le taux de substitution de 20% est s'avère le plus efficace pour le cas du mortier autoplacant pour les trois températures de murissement.

L'augmentation de la température à 40°C fait améliorer la plus part des caractéristiques des mortiers autoplaçant à l'état durci. Mais au-delà de cette température et pour le cas de 60°C on a constaté des diminutions dans les performances de ces derniers.

Conclusions et Recommandations

Conclusion générale

L'utilisation du béton autoplaçant (BAP) a eu récemment une forte progression dans de nombreux pays du monde. Bien que ces avantages soient concrets et que l'intérêt qu'il suscite chez les industriels soit grandissant, les BAP demeurent en dessous de l'utilisation qui pourrait en être faite en raison de questions sans réponses posées par de nombreux maîtres d'ouvrage et maîtres d'oeuvre. Certaines des inconnues qui les concernent telle que le comportement des BAP vis-à-vis des températures élevées. Ce qui nécessite donc d'apporter des résultats des recherches qui répondent à ces questions.

L'objet de cette étude était donc, d'étudier l'effet de substitution du volume de ciment par deux additions minérales disponibles en Algérie tel que le calcaire et la pouzzolane naturelle sur les performances d'un mortier autoplaçant soumis à un traitement thermique dans les ses premiers 24 heure à différentes températures de murissement (20, 40 et 60°C), suivi par un murissement humide à 20°C jusque l'échéance des essais.

En se basant sur les résultats obtenus à travers cette étude, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- Il est possible d'avoir des propriétés autoplaçantes pour tous les mortiers autoplaçant lorsque le ciment est substitué par l'un des additions employées dans cette étude. Toute fois un gain dans les mesures de fluidité et de déformabilité a été observé par l'emploi du calcaire, contrairement à la pouzzolane qui a développé un MAP moins ouvrable ;
- Quel que soit la température de cure, tous les MAP sont considérés comme satisfaisants pour l'application dans les éléments structuraux et cela sur la base des résultats trouvés sur les résistances mécaniques, les propriétés de transfert (porosité et absorption).
- La pouzzolane naturelle utilisée dans cette étude, n'a pas prouvé son activité pouzzolanique latente mentionnée dans la littérature à cause de la durée courte de réalisation de cette étude (28 jours) ;

- Dans les conditions normales (20°C), l'effet bénéfique des additions est prouvé par les résultats trouvés dans cette étude. A savoir la résistance, les variations dimensionnelles et les propriétés de transfert, tout en restant dans un taux limite de 20% pour chaque addition a part ou par un mélange des deux additions de raison de 10% de chacune ;
- La combinaison des deux additions (calcaire et pouzzolane) pour avoir un liant ternaire, n'a pas donné des bénéfiques importantes pour le cas des mortiers autoplaçant traités thermiquement comme prévue
- , par conséquent presque les même valeurs des caractéristiques étudiées sont trouvés par apport les mélange a base d'un liant binaire ;
- Au jeune âge, la résistance est augmentée considérablement avec l'augmentation de la température, l'activation d'hydratation s'arrête à 40°C pour tous les mélanges sans et avec additions.
- La température de murissement de 40°C, est considérée comme optimale dans le cas des mortiers autoplaçant, en effet la cure à cette température engendre une amélioration dans les propriétés mécaniques et celles du transport de tous les mélanges et dans tous les âges mais au-delà de cette température, ces caractéristiques commencent à s'affaiblir à long terme.

Recommandations

Les observations et les analyses que nous avons effectuées dans le cadre de cette étude pourraient mener à des développements futurs dans le domaine du traitement thermiques des bétons à base d'additions minérales. Pour cela on recommande d'approfondir notre recherche par les points suivants :

- Etudier les effets des températures élevées sur d'autres propriétés des Bétons autoplaçants telles que les propriétés de transport (perméabilité à l'oxygène et à l'eau, migration des ions chlores, etc.) et la durabilité (carbonatation, gel dégel, lixiviation, etc.) ;

- Etude de l'effet de température sur des mélanges à d'un liant ternaire comportant du laitier granulé de hautes fournaux;

Référence Bibliographiques

Références bibliographiques

[1] Okamura, Ouchi, Self-compacting concrete, Journal of advanced Concrete Technology, 2003, vol1, n°1, pp 5-15.

[2] H. Okamura, K. Ozawa, and M. Ouchi. «*Self-compacting concrete*». Structural Concrete, 17, March 2000.

[3] Jean-christopheBraquenier, «*Le Béton Autoplaçant ou Autocompactant* », Recherche et Etude, pp14-22, Automne 2000.

[4] EL BARRAK M., 2005« Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais » Thèse de Doctorat de l'Université Toulouse III – Paul Sabatier, France, 228 pages.

[5] Antoine Vavel, « *Bétons Autoplaçants : la haute technologie au quotidien* », Solution Béton, Constructions Modernes n°114, pp16.

[6] Okamura H., Ouchi M., "Self-Compacting Concrete. Development, present use and future", Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 1999, Stockholm, Suède pp. 3-14.

[7] « *Bétons Auto-plaçants* », Recommandations Provisoires, Document Scientifiques et Techniques, ISSNencours, Juillet 2000.

[8] BoukendakdjiOthmane, *Etude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplaçant : optimisation des conditions opératoires*, Thèse de Doctorat d'état, Université de Blida, Algérie, 2010.

[9] BILLBERG P., "Influence of filler characteristics on SCC rheology andgearlyhydration", Proceedings of 2nd International Symposium on Self-CompactingConcrete,Tokyo, Japon, pp. 285-294, 23-25 octobre 2001.

[10] R.Pleau, D.Beaupré, K.Khayat, B.Bona and P.Lacombe, « *Entrainment de la résistance au gel des bétons autonivelants* », Colloque sur les Bétons Autonivelants, Kamal Khayat, Sherbrooke, Quebec, 1^{èr}Nouvembre 1996.

[11] Sandrine Bethmont, « Mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçcnts(BAP) », Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2005.

[12] Sedran T., « Les Bétons Autonivelants », bulletin LCPC 196, réf. 3889, pp. 53-60, mars-avril 1995.

[13] Association Française de Génie Civil, « Bétons autoplaçants - Recommandationsprovisoires », Annales du bâtiment et des travaux publics, juin 2000.

[14] M. Ouchi, Y. Edamatsu. “A simple evaluation method for interaction betweencoarse aggregate and mortar particles in self-compacting concrete”.In Proceedings of the FirstInternational RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete.RILEM, 1999.

[15] Yen et al., Flow behaviour of high strength high-performance concrete, cement andconcrete composites, 1999, vol 21, pp 413-424.

[16] KLUG Y., HOLSCHEMACHER K., 2003« Comparison of the hardened properties of Self-Compacting and Normal Vibrated Concrete » 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik,Iceland, pp. 596-605.

[17] GIBBS J.C. and ZHU W., “ Strength of hardened self-compacting concrete ”,Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO7), Stockholm, Suède, pp. 199-209, 13-15 septembre 1999.

[18] PINEAUDA., 2007« Contribution à l'étude des caractéristiques mécaniques des bétons Autoplaçants et application à l'industrie de la préfabrication ». Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise,France, page 271.

[19] TURCRY P., ROZIERE E.,LOUKILI A.,2005« Influence du volume de pâte et des additions sur le retrait des bretons autoplaçants ». XXIIIème RencontresUniversitaires de Génie-Civil, Grenoble.

[20] ASSIÉ S., 2004 « Durabilité des bétons autoplaçants» thèse de doctorat,Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions INSA-UPS Génie Civil, Toulouse, France.

[21] UYSAL M.,YILMAZ K., 2011« Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete »,Cement and Concrete Composites J., Vol. 33,pp.771-6.

[22] Wenzhong Zhu, John C. Gibbs, “Use of different limestone and chalk powders inself-compacting concrete”, Cement and Concrete Research 35 (2005) 1457– 1462.

[23] OthmaneBoukendakdji, El-HadjKadri , Said Kenai “Effects of granulatedblast furnace slag and superplasticizer type on the fresh properties and compressive strengthof self-compacting concrete”.

[24] GUNEYISI E., GESOGLU M.,2008 « A study on durability properties of high-performance concretes incorporating high replacement levels of slag » Materials and Structures J., Vol. 41, pp. 479–493.

[25] KAPOOR Y., MUNN C., CHARIF K., 2003« Self-Compacting concrete – an economic approach » Proceedings of Seventh International Conference on Concrete in Hot and Aggressive Environments,Manama, Kingdom of Bahrain, pp.509–19.

[26] KHELIFA R.,2002 «L'impact des cimenteries sur l'environnement, Cas de la cimenterie de Ain-Touta», Mémoire de DEA en Aménagement, Développement et Environnement, Université d'Orléans.

[27] BOEL V., AUDENAERT K., DE SCHUTTER G.,2002, « Pore structure of self-compacting concrete », First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, ACBM center, pp. 837-843.

[28] Persson B. "Creep, Shrinkage and Elastic Modulus of Self-Compacting Concrete" Proceedings of the first International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete 1999 in Sweden, pp. 239-250.

[29] ROZIERE E., GRANGER S., TURCRY P., LOUKILI A., 2007« Influence of paste volume on shrinkage cracking and fracture properties of self-compacting concrete », Cement and Concrete Composites J., Vol. 29, pp. 626–636.

[30] Philippe Turcry, « Retrait et Fissuration des BetonsAutoplaçants », Influence dela Formulation. Thèse de l'Ecole Centrale de Nantes et l'Université de Nantes 2004.

[31] Walraven J., Structural aspect of self-compacting concrete, proceedings of the third International RILEM conference on SCC, Editors: Wallevik O., Nielsson I, Reykjavik, Iceland, August 2003, pp. 15 – 22.

[32] BERKANI Akila, Etude de l'activation thermique des additions minérales sur les caractéristiques mécaniques d'un mortier de ciment normalisé, Mémoire de Master, Université de Médéa, Algérie, 2015.

[33] SGPIC, Société de gestion et de participations, industrie de ciment.

[34] Mehta P.K., *"Pozzolanic and cementitious by-produts in concrete : Another look"*, Proceedings of the 3th CANMET/ACI International Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, Trondheim, Norway, 1989, pp.1-43.

[35] EZZIANE K., 2006, « Etude des Modifications Physico-Mécaniques apportées par les Ajouts Minéraux aux Bétons ». Thèse de Doctorat, **U**niversité de **S**cienceset de la **T**echnologie d**'O**ran, Algérie.

[36] DIEDERICH P,2010,Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillerscalcaires sur le comportement autoplaçant du béton,Thèse doctorat ,Toulouse.

[37] JONES M. R., ZHENG L., NEWLANDS MD.,2003« Estimation of the filler content required to minimize voids ratio in concrete », Magazine of Concrete Research, Vol.55, N° 2, pp.193- 202.

[38] SCHMIDT M.,1992 «Cement with interground additives capabilities and environmental relief, Part 1 » Zement-Kalk-Gips, Vol. 45, N° 2, pp. 64-69.

[39] HABBOUCHE A.,2002 « Propriété mécaniques et durabilité du béton a base de sable de concassage » Mémoire de Magistère, Département de Génie Civil, Université de SAAD DAHLEB Blida, Algérie.

[40] Bouali R., *"Contribution à l'étude d'un ciment Portland artificiel et d'un béton avec ajout calcaire"*, Mémoire de fin d'étude, INFSB, Alger, 1993, 81p.

[41] Guemadi Z., Escadeillas G., Toumi B., Houari H., Clastres P., *"Influence des fillers calcaires sur les performances mécaniques des pâtes de ciment"*, CITDUB 1, BabEzzouar, 24-26 mai 2004, 8p.

[42] LEGRAND C., 1971 « Contribution à l'étude de la rhéologie du béton frais », Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, France.

[43] NEHDI M., 2000 « Why some carbonate fillers cause rapid increases of viscosity in dispersed cement-based materials », Cement and Concrete Research J., Vol. 30, pp. 1603-1669.

[44] FELEKOGLU B., 2007 « Utilization of high volumes of limestone quarry wastes in concreteindustry (self-compacting concrete case) », Resources, Conservation and Recycling, Volume 51, Issue 4, p770-791.

[45] MICHEL F., PIERARD J., COURARD L., POLLET V., 2007 « Influence of physic-chemical characteristics of limestone fillers on fresh and hardened mortar performances », Proceedings of 5th International RILEM Symposium on SCC, Ghent, Belgium, pp. 205-210.

[46] BORGHOLM H., DUNCAN H., RASMUSSEN S., 1995 « A new blended cement based on mineralised ». World Cement Research and Development, pp. 27-33.

[47] KAKALIG., 2000 « Hydration products of C3A, C3S and Portland cement in the presence of CaCO3 » Cement and Concrete Research j., Vol. 30, pp. 1073-1077.

[48] NONAT A., 1994 « Interaction between chemical evolution and physical evolution, in the case of tricalcium silicate ». Materials and Structures j., pp. 187-195.

[49] AMOURI Chahinez ,2009, Contribution à l'étude de l'influence des différents ajoutssur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, Performance, durabilité,Université de Constantine.

[50] CHAIDR., JAUBERTHIEETR., BOUKHALED A.,2010 « Effet de l'ajout calcaire sur la durabilité des bétons », Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique, INSA - Rennes, France., pp. 91-103.

[51] STITIS., 1999 « Le pari des ciments Algérien » Habitat et construction, Alger, N°05, pp.32-39.

[52] Mebrouki A., Belaribi N.B., Bouhamou N., Cyr M., *"Contribution à l'étude de la pouzzolane de Beni-Saf sur les caractéristiques mécaniques des mortiers"*, CITDUB 1, BabEzzouar, 24-26 mai 2004, 9p.

[53] BOUDCHICHA A., 2007, « Utilisation des additions minérales et des adjuvants fluidifiants pour l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons », Thèse de Doctorat, Département de Génie Civil, Université Mentouri Constantine, Algérie.

[54] AICHOUBE A., GHRICI M., BENAISSA A., 2005« Effet de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf sur les propriétés d'un ciment à base de calcaire », Colloque Méditerranéen sur les Matériaux CMEDIMAT, Oran, Algérie, pp. 6-7.

[55] COLAK A.,2003 « Characteristics of pastes from from a Portland cement containing different amounts of natural pouzzolana », Cement and Concrete Research J., Vol. 33, pp. 585-593.

[56] HAMMAT S.,2012« Influence du laitier et de la pouzzolane sur retrait des mortiers autoplaçants ». Mémoire de Magister,Université Saad Dahleb de Blida, Algérie.

[57] ALLALI M., 2012« Formulation et propriétés rhéologiques des bétons autoplaçants à base d'un ciment à la pouzzolane naturelle », Mémoire de Magister de l'Université Saad Dahleb de Blida, Algérie.

[58] DIAMANTONIS N., MARINOS I., KATSIOTIS M.S., SAKELLARIOU A., PAPATHANASIOU A., KALOIDAS V., KATSIOTI M., 2010, « Investigations about the influence of fine additives on the viscosity of cement paste for self-compacting concrete », Construction and Building Materials J., Vol. 24, N° 8, pp. 1518-1522.

[59] TURANLI L., UZAL B., BEKTAS F.,2005« Effect of large amounts of natural pozzolana addition on properties of blended cements »,Cement and Concrete Research J., Vol. 35, N°6, pp. 1106-1111.

[60] Khelafi H., Kerdal D., *"Etude expérimentale sur le comportement mécanique des mortiers contenant des fillers pouzzolaniques"*, Proceedings du Séminaire International sur la qualité du béton en climat chaud, Ghardaia, 22-24 Mars 1994, pp.313-321.

[61] BelasBelaribi N., Semcha M., Laoufi L., *"Influence de la pouzzolane de Beni-Saf sur les caractéristiques mécaniques des betons"*, Canadian journal of civil engineering, Vol 30, 2003, pp.580-584.

[62] Ezziane K.,Bougara A., Kassoul A., Djezzar M., *"Activation de la pouzzolane de Béni-Saf sous différentes température de cure"*, Séminaire national de génie civil, Sidi Belabas, 16-17 Avril, 2003, 7p.

[63] Belhachemi B., *"Influence de la surface spécifique Blaine sur les résistances d'un ciment pouzzolanique"*, Colloque CMEDIMAT 2005, 6-7 Décembre 2005, 8p.

[64] KAZI A., B., SEMCHA A., KERDALD.,Influence des additions minérales sur larésistance mécanique des mortiers, Université d'Oran, Algérie.

[65] KRACHAÏ M, BOUABDALLAHA,ABDELHADI H., HAMOUK.,Influence de lapouzzolane de beni –saf sur les performances mécaniques des bétons autoplacant.

[66] BENKADDOUR M., KAZI AOUAL F., SEMCHA A.,2009« Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle », Revue Nature et Technologie, pp. 63-73.

[67] BOUGLADA M. S.,2008« Effet de l'activation du ciment avec ajout minéral par la chaux fine sur le comportement mécanique du mortier », Mémoire de Magister de l'université de Msila, Algérie, 148 pages.

[68] BOUALLA N., KERROUZI I., SOUFARI A., 2012 « Influence de l'ajout pouzzolanique sur les caractéristiques physico-chimiques des ciments au jeune âge », Science Lib Editions Mersenne, Vol 4, N ° 121003ISSN, pp. 2111-4706.

[69] HADJ SADOK A., KENAI S., MENADI B., 2008 "Résistances aux sulfates des mortiers à base de ciment au laitier", Colloque International - Caractérisation et Modélisation des Matériaux etStructures, Université M. Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie.

[70] Kaid N., Khelafi H., Cyr M., Zinai S.S., Ayed K., *"Etude de l'influence de l'utilisation d'un ajout pouzzolanique local sur les caractéristiques d'un mortier par analyse micro structurelle"*,Colloque CMEDIMAT 2005, 6-7 Décembre 2005, 8p**.**

[71] SIADH., KAMALIS., BERNARD M., ESCADEILLAS G., MOULIM. , KHELAFIC.H.2013, Characterization of the degradation of self-Compacting concretes in sodiumsulfate Environment : Influence of different mineral admixtures, Construction andBuilding Materials, Vol. 47, pp. 1189-1200.

[72] ITIM .A, EZZIANE .K KADRI.H , 2010, Etude des déformations de retrait d'unmortier contenant différentes additions minérales ,Université de Chlef .

[73] GHRICI M., KENAI S, SAID-MANSOUR M., 2004, Efficiency of Beni-Saf's naturalpozzolana in durability of mortars and concrete,CITDUB 1, BabEzzouar, 24-26 mai ,7p.

[74] KERBOUCHE.A,MOULI .M,LAOUFI .L,Y.SENHADJI,BENOSMANE .S.,2009,influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques des mortiers ,

InternationalConference on sustainableBuiltEnvironment Infrastructures in Developing CountriesENSET Oran (Algeria) – October 12-14.

[75] AICHOUBA A., GHRICI M., BENAISSA A. 2005 , Effets de la pouzzolane naturelledeBeni-Safsur les propriétés d'un ciment à base de calcaire , Colloque CMEDIMAT, 06et 07 décembre, 8p.

[76] CHABI S, MEZGHICHE B .,2004 , Etude de l'influence des additions minérales activessur les caractéristiques physico-mécaniques des ciments pour les fondations immergées,(Cas du sud Algérien) BabEzzouar.

[77] SAID MANSOUR .M, 2003, Etude des propriétés des mortiers et bétons à base deciments ternaire, Mémoire de Magister, Université de Blida, Décembre.

[78] « http://www.fib.org » Site internet de la Fédération Internationale du Béton, 2007.

[79] Wojcik G.S., *"The influence of the atmosphere on curing concrte temperature and maturity, Advances in Cement and Concrete"*, Proceedings of the Engineering Conferences International, Copper Mountain, CO, August 10-14, 2003, pp.491-500.

[80] Erdogdu S., Kurbetci S., *"Influence of cement composition on the early age flexural strength of heat-treated mortar prisms"*, Cement and Concrete Composites, Vol 27, N°7-8, 2005, pp.818–822.

[81] Ramlochan T., Zacarias P., Thomas M.D.A., Hooton R.D., *"The effect of pozzolans and slag on the expansion of mortars cured at elevated temperature Part I: Expansive behaviour"*, Cement and Concrete Research, Vol 33, N°6, 2003, pp.807-814.

[82] BINGOL A. F., TOHUMCUI.,2013« Effects of different curing regimes on the compressive strengthproperties of self-compacting concrete incorporating fly ashand silica fume », Materials and Design J., Vol. 5, pp.12–18.

[83] VINH-AN Le, 2014, « Comportement des bétons autoplaçant par temps chaud », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France.

[84] MARTINEZ et al [48] a mis en évidence que la température de cure joue un rôle fondamental sur l'évolution de l'hydratation du ciment, tel qu'après 9 jours sous 60°C il a pu obtenir le même degré d'hydratation à 90 jours sous 20°C.

[85] Ma W., Sample D., Martin R., Brown P.W., *"Calorimetric Study Of Cement Blends Containing Fly Ash, Silica Fume And Slag At Elevated Temperatures"*, Cement And Concrete And Aggregates, CCAGPD, Vol 16, N°2, Dec 1994, pp.93-99.

[86] Escalante-Garcia J.I.; Sharp J.H., "*The microstructure and mechanical properties of blended cements hydrated at various temperatures*", Cement Concrete Research, Vol 31, N°5, 2001,pp.695-702.

[87] FERHAT BINGOL A., TOHUMCU I., 2013 « Effects of different curing regimes on the compressive strength properties of self-compacting concrete incorporating fly ash and silica fume », Material and Design J., Vol. 51, pp.12–8.

[88] MANNAN M. A., BASRI H. B., ZAIN M. F. M., ISLAM M. N., 2002« Effect of curing conditions on the properties of OPS-concrete ». Build Environ j., Vol.37, pp1167–71.

[89] Bakharev T., Sanjayan J.G., Cheng Y.B., *"Effect of elevated temperature curing on properties of alkali activated slag concrete"*, Cement and Concrete Research, Vol 29, N°10, 1999, pp.1619-1625.

[90] MIRZA WH, NOURY SI, BEDAWI WH., 1991 « Temperature on strength of mortars and concrete containing blended cements ». Cement and Concrete Comp J., Vol. 13, pp.197–202.

[91] HANSEN W.C.,« Studies relating to the mechanism by which alkali- aggregate reaction produces expansion in concrete », Proc. Amer. Concr. Inst. Vol.40, 1944, pp. 213-227.

[92] PROC, Seventh international congress on the chemistry of cement, Paris, 1980.

[93] Specification for Portland blast furnace cement, British Standards Institution, London, Part 2, 1973, pp. 7.

[94] DENT GLASSER I.S., KATAOKA, 1981 « The Chemistry of Alkali- Aggregate Reaction », Cement and concrete Research J., Vol.11, pp. 1-9.

[95] ESCALANTE-GARCIA J. I., SHARP J. H., 2001 « The microstructure and mechanical properties of blended cements hydrated at various temperatures ». Cement and ConcreteResearch J.,Vol. 31, pp.695–702.

[96] BROOKS J. J., KAISI A. F., 1990 « Early strength development of Portland and slag cement concretes cured at elevated temperature ». ACI Mater J., Vol.87, N°5, pp.503–7.

[97] NEVILLE D.M. «Properties of concrete», 3rd Edt. Pitman, London, 1981.

[98] TURKEL S., ALABS V.,2005«The effect of excessive steam curing on Portland composite cement concrete», Cement and CconcreteRresearch J., Vol.35, N°2, pp.405-411.

[99] MA W., SAMPLE D., MARTIN R., BROWN PW., 1994 « Calorimetric study of cement blends containing fly ash, silica fume and slag at elevatedtemperatures , cement and concrete and aggregates ». CCAGPD, Vol. 16, N°2, pp.93–9.

[100] Carino N.J.; Lew H.S., "*Temperature effect on strength-maturity relations of mortars*", ACI Journal, Vol 80, N°3, May 1983,pp.177-182.

[101] PRATAS J.D., 1978 « Early age strength development of slag cement concretes », Msc. Dissertation, university of Leeds, England.

[102] VIDELA C. C., COVARRUNBIAS J. P. T., PASCAL J. M. D., 1996 « Behavior in extreme climates of concrete made with different types of cement » In: DhiRK, McCarty MJ, editors. Appropriate concrete technology, pp. 213–241.

[103] WAINWRIGHT P.J., TOLLOCZKO J.J.A., 1986 « The early and later age properties of temperature cycled OPC concrete », 2nd Int. Conf. on the Use of Fly Ash, Silica Fume Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Madrid, Ottawa, Vol.2, pp. 1293-1321.

[104] KANSTAD T., HAMMER T.A., BJONTEGAARD O., SELLEVOLD E.J., 2013 « Mechanical properties of young concrete: Part I: Experimental results related to test methods and temperature effects », Materials and Structures J., Vol. 36, N°4, pp. 218-225.

[105] KIM K. J., SANG H. H., YOUNG C. S.,2002« Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete. Part I. Experimental results », Cement and Concrete Research J., Vol.32, pp.1087-1094.

[106] PARRA C., VALCUENDE M., GOMEZ F., 2011«Splitting tensile strength and modulus of elasticity of self-compacting concrete», Construction and Building Materials J., Vol.25, pp. 201–207.

[107] TAN O.E., GJORV, 1996 « Performance of concrete under different curing conditions », Cement and Concrete Research J.,Vol.26, N°3,pp.355-361.

[108] Monzo J.; Borrachero M.V., "*Mechanical treatment of fly ashes: strength development and workability of mortars containing ground fly ashes*", Proceedings of the 5th CANMET/ACI International Conference on fly Ash, silica fume, slag, and natural pozzolans in Concrete, Milwaukee, Wisconsin, USA, 1995, pp.339-353.

[109] Escalante-Garcia J.I.; Sharp J.H., "*The microstructure and mechanical properties of blended cements hydrated at various temperatures*", Cement Concrete Research, Vol 31, N°5, 2001,pp.695-702.

[110] KELLOUCHE Yasmina , Abdelkader Bougara ,2014 , Effet de la température de cure sur la réactivité d'un ciment au Laitier , 1st international conférence on pouzzolanic construction materials .

[111] Bachène Sara, 2015, Effet couplé de la température et des additions minérales sur les caractéristiques mécaniques et la durabilité des bétons autoplaçants, Mémoire de magister, Université Yahia Farèse de Médéa, Algérie.

[112] NF EN 1008, 2003, « Eau de gâchage pour bétons: spécification d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton », AFNOR.

[113] DOMONE P.L.J., JIN J., 1999 « Properties of mortar for Self-Compacting Concrete »Proceedings of RILEM International Symposium on Self-Compacting Concrete,Stockholm, RILEM Proceedings PRO 7, Paris, pp. 109–120.

[114] KHAYATK.H., PAVATET., ASSAD J., 2003 « Analysis of Variations in Electrical Conductivity to Assess Stability of plastic Cement-Based Materials », ACI Materials Jr.,vol. 4, N°100,pp.342-350.

[115] EDAMATSU Y., NISHIDA N.,OUCHI M., 1999« A rational mix-design method for self-compacting concrete considering interaction between coarse aggregate and mortar particles », Proceedings of the FirstInternational RILEM Symposium on Self-compacting Concrete, Stockholm, Sweden, pp. 309-20.

[116] PEDERSEN B., SMEPLASS S., 2003« The relationship between the rheological properties of SCC and the corresponding matrix phase », Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Island, pp106-16.

[117] A. FerhatBingöl⇑, _IlhanTohumcu, Effects of different curing regimes on the compressive strength properties of self-compacting concrete incorporating fly ash and silica fume, Materials and Design 51 (2013) 12–18.

[118] NF EN 196-1, 1995, « Méthodes d'essais des ciments. Partie 1: Détermination des résistances mécaniques », AFNOR.

[119] NF EN 12504-4, 2005, « Essais pour béton dans les structures. Partie 4 : Détermination de la vitesse de propagation du son », AFNOR.

[120] NF EN 1015-18, 2003, « Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - partie 18 : détermination du coefficient d'absorption d'eau par capillarite du mortier durci -», AFNOR.

[121] Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité, Compte-rendu des journées techniques AFPC-AFREM « Durabilité des bétons », Toulouse, France.

[122] Ginette A. & Hugues H., 2007, « Grandubé : Grandeurs associées à la durabilité des bétons », Association française de génie civil, Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France.

[123] MUCTEBA U., MANSUR S., 2011 « Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures », Construction and Building Materials J., Vol.25, pp. 4112–4120.

[124] ABBASI A. F., 1990 « Effect of hot weather on pulse velocity and modulus of elasticityof concrete », Materials and StructuresJ., Vol. 23, pp.334-340.

Annexes A

CEM I 42,5 HRS1

Ciment Portland à haute résistance aux sulfates



DESCRIPTIONS DU PRODUIT

Ciment Portland à haute résistance au sulfates conforme à NT 47.01 et NT 47.26, appartenant à la Classe de résistance 42,5 et présentant une résistance à court terme ordinaire

Constituants principaux:

Clinker: 95 – 100%
Calcaire (L): 0 – 5%

EMPLOI

Travaux en eaux de mer et eaux séléniteuses
Ouvrages à taux de travail élevé n'exigeant pas des caractéristiques
Initiales Particulièrement fortes
Préfabrication et béton manufacturé
Béton précontraint et coulis d'injection de gaine précontraint
Béton étuvé avec un excellent comportement en cycle long
Sans réduction sensible des résistances terminales

EXIGENCE NORMATIVES NT 47.01 ET NT 47.26

Exigences Chimiques	Exigences Physiques	Exigences Mécaniques
Perte au feu ≤ 3,0%	Temps de début de prise ≥ 60 min	Résistance à court terme (2 jours) ≥ 10,0 MPa
Sulfate (SO3) ≤ 3,5%	Stabilité (expansion) ≤ 5 mm	Résistance courante (28 jours) ≥ 42,5 MPa et ≤ 62,5 MPa
Résidu insoluble ≤ 0,75%		
Oxyde de magnésium (MgO) ≤ 4,0%		
Tri calcium aluminate (C3A) ≤ 3%		
C4AF + 2*C3A ≤ 20%		
Chlorure ≤ 0,10%		

CONTACT
Assistan
commer
com
Tél. +21
ENVOY
IMPRI



Pont Rades - la Goulette



Barrage Moula, Tabarka

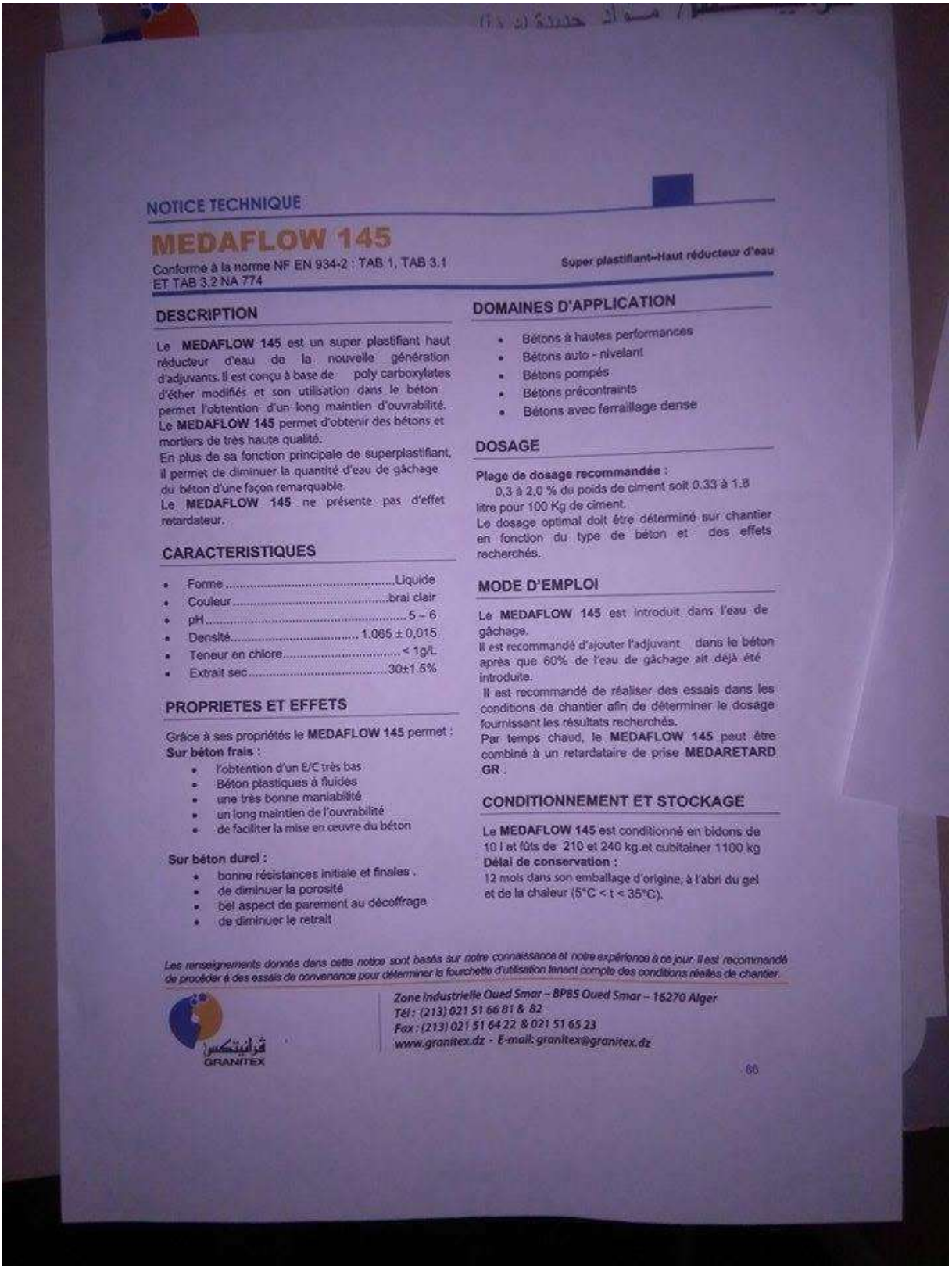


Ministère de l’ Enseignement Supérieur, Centre de formation à distance, El Manar Tunis

© Les Ciments Artificiels Tunisiens S.A.
Siege Sociale: Route Z4 Km 2 - 1009 El Ouardia Tunis (TN)
Siège: Tél +216 71 135 311 - Fax +216 71 135 374
Commercial: Tél +216 71 135 345 - Fax: +216 71 135 372
Capitale Sociale versée: TND 81.230.175,000
Code Fiscal: 000263Y/A/M/000 R.C: B19541998

politique du

Annexes B



NOTICE TECHNIQUE

MEDAFLOW 145

Conforme à la norme NF EN 934-2 : TAB 1, TAB 3.1 ET TAB 3.2 NA 774

Super plastifiant-Haut réducteur d'eau

DESCRIPTION

Le **MEDAFLOW 145** est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la nouvelle génération d'adjuvants. Il est conçu à base de poly carboxylates d'éther modifiés et son utilisation dans le béton permet l'obtention d'un long maintien d'ouvrabilité.
Le **MEDAFLOW 145** permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.
En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la quantité d'eau de gâchage du béton d'une façon remarquable.
Le **MEDAFLOW 145** ne présente pas d'effet retardateur.

CARACTERISTIQUES

- Forme ..... Liquide
- Couleur ..... brai clair
- pH ..... 5 – 6
- Densité ..... 1.065 ± 0,015
- Teneur en chlore ..... < 1g/L
- Extrait sec ..... 30±1.5%

PROPRIETES ET EFFETS

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 145** permet :
Sur béton frais :

- l'obtention d'un E/C très bas
- Béton plastiques à fluides
- une très bonne maniabilité
- un long maintien de l'ouvrabilité
- de faciliter la mise en œuvre du béton

Sur béton durci :

- bonne résistances initiale et finales .
- de diminuer la porosité
- bel aspect de parement au décoffrage
- de diminuer le retrait

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons auto - nivelant
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons avec ferraillage dense

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :
0,3 à 2,0 % du poids de ciment soit 0.33 à 1.8 litre pour 100 Kg de ciment.
Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAFLOW 145** est introduit dans l'eau de gâchage.
Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 60% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.
Il est recommandé de réaliser des essais dans les conditions de chantier afin de déterminer le dosage fournissant les résultats recherchés.
Par temps chaud, le **MEDAFLOW 145** peut être combiné à un retardataire de prise **MEDARETARD GR** .

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le **MEDAFLOW 145** est conditionné en bidons de 10 l et fûts de 210 et 240 kg.et cubitainer 1100 kg
Délai de conservation :
12 mois dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur (5°C < t < 35°C).

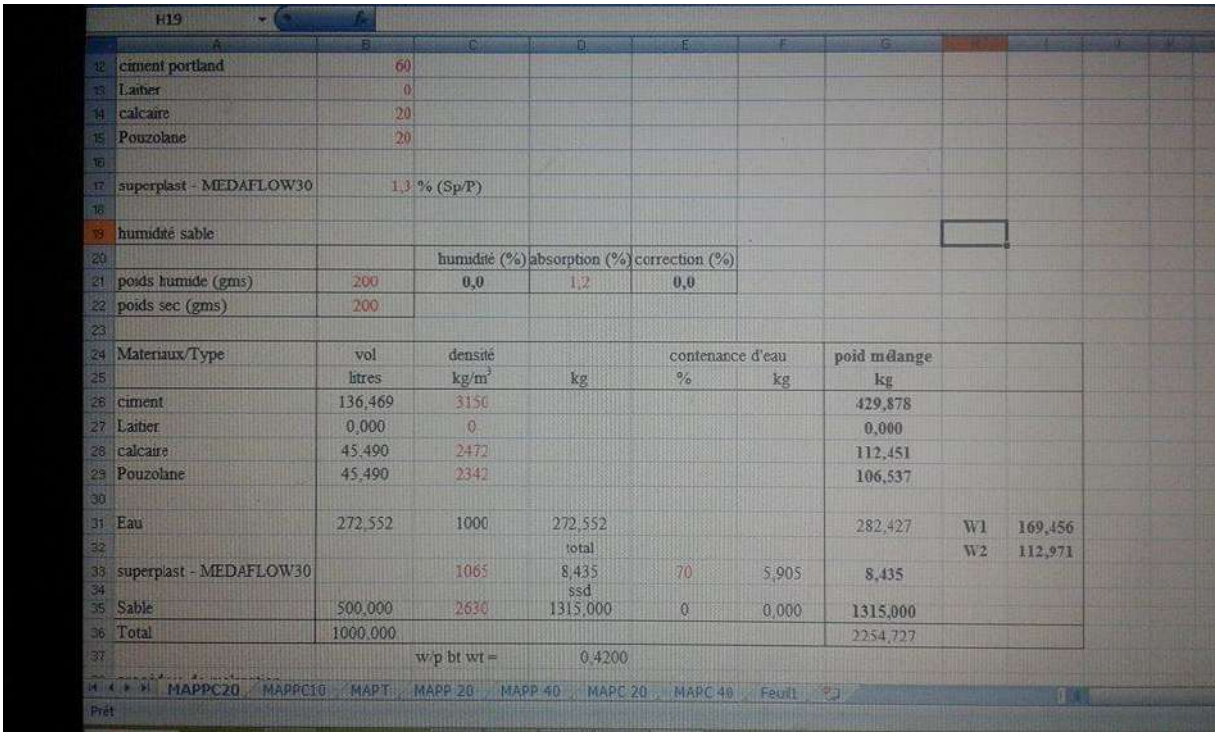
Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.

GRANITEX

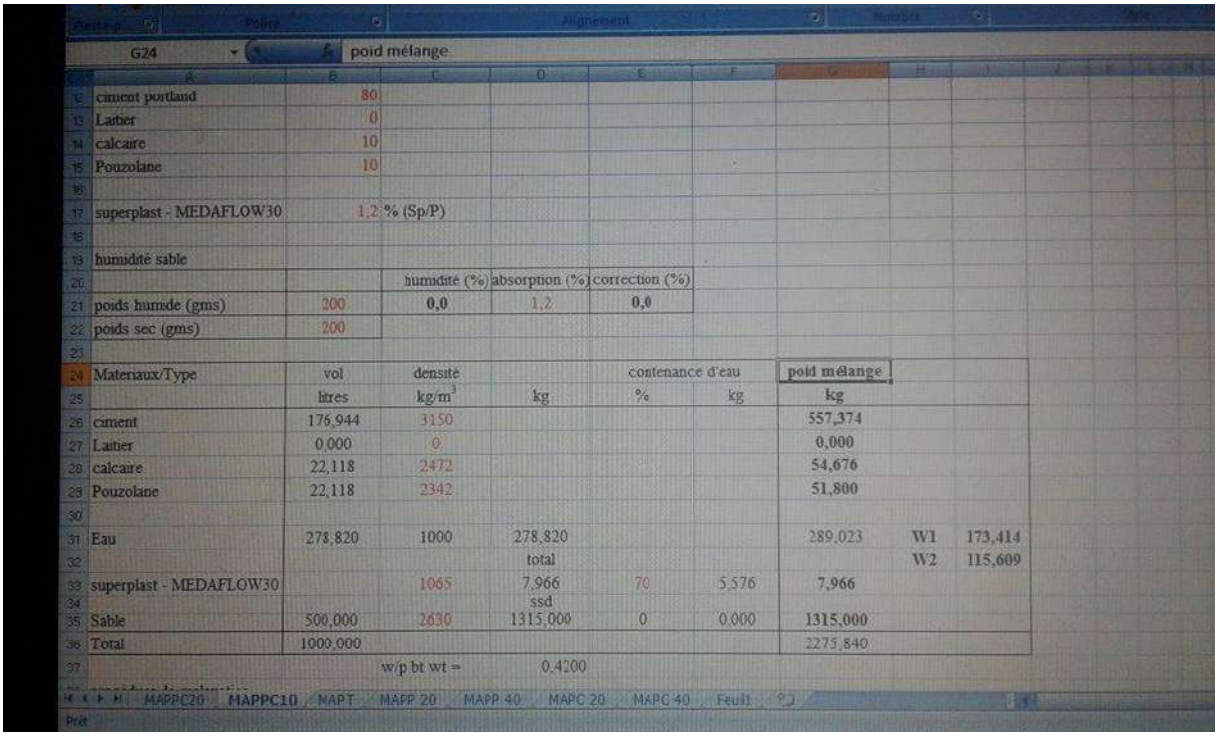
Zone Industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger
Tél : (213) 021 51 66 81 & 82
Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23
www.granitex.dz - E-mail: granitex@granitex.dz

86

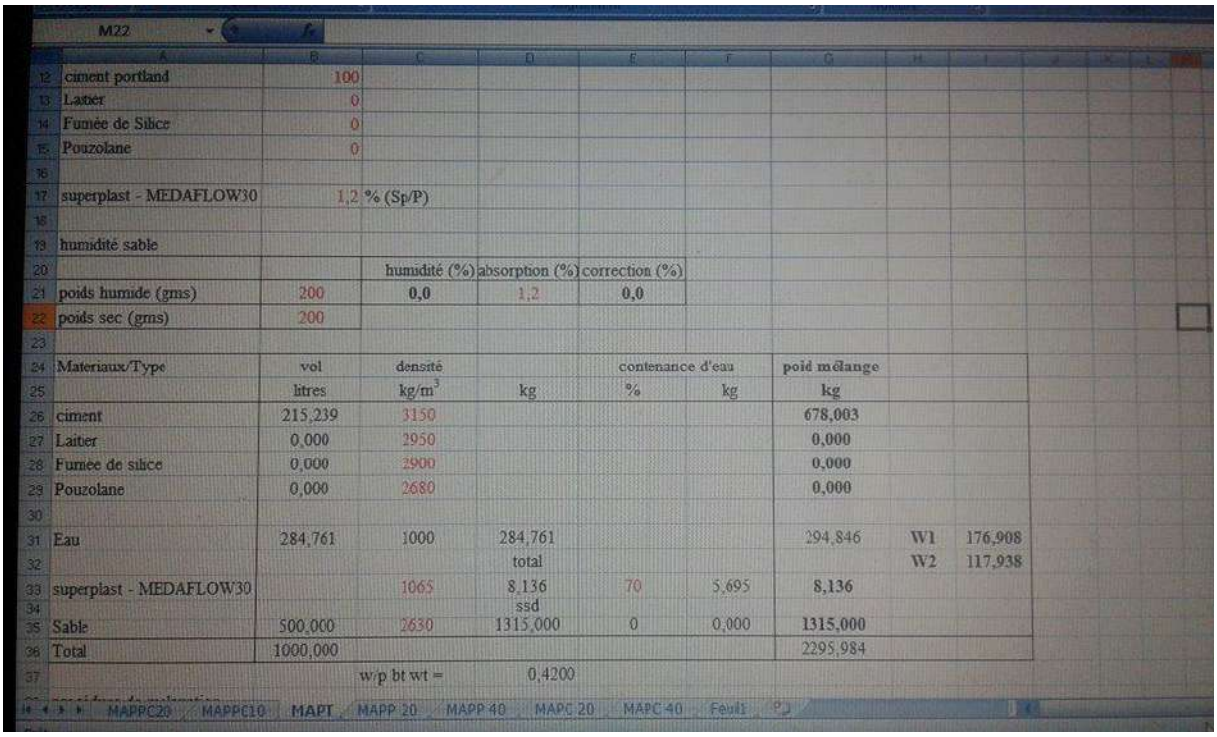
Annexes C



ciment portland		60							
Laitier		0							
calcaire		20							
Pouzolane		20							
superplast - MEDAFLOW30		1,3	% (Sp/P)						
humidité sable									
			humidité (%)	absorption (%)	correction (%)				
poids humide (gms)		200	0,0	1,2	0,0				
poids sec (gms)		200							
Materiaux/Type	vol	densité		contenance d'eau		poid mélange			
	litres	kg/m³	kg	%	kg	kg			
ciment	136,469	3150				429,878			
Laitier	0,000	0				0,000			
calcaire	45,490	2472				112,451			
Pouzolane	45,490	2342				106,537			
Eau	272,552	1000	272,552			282,427	W1	169,456	
			total				W2	112,971	
superplast - MEDAFLOW30		1065	8,435	70	5,905	8,435			
			ssd						
Sable	500,000	2630	1315,000	0	0,000	1315,000			
Total	1000,000					2254,727			
		w/p bt wt =	0,4200						

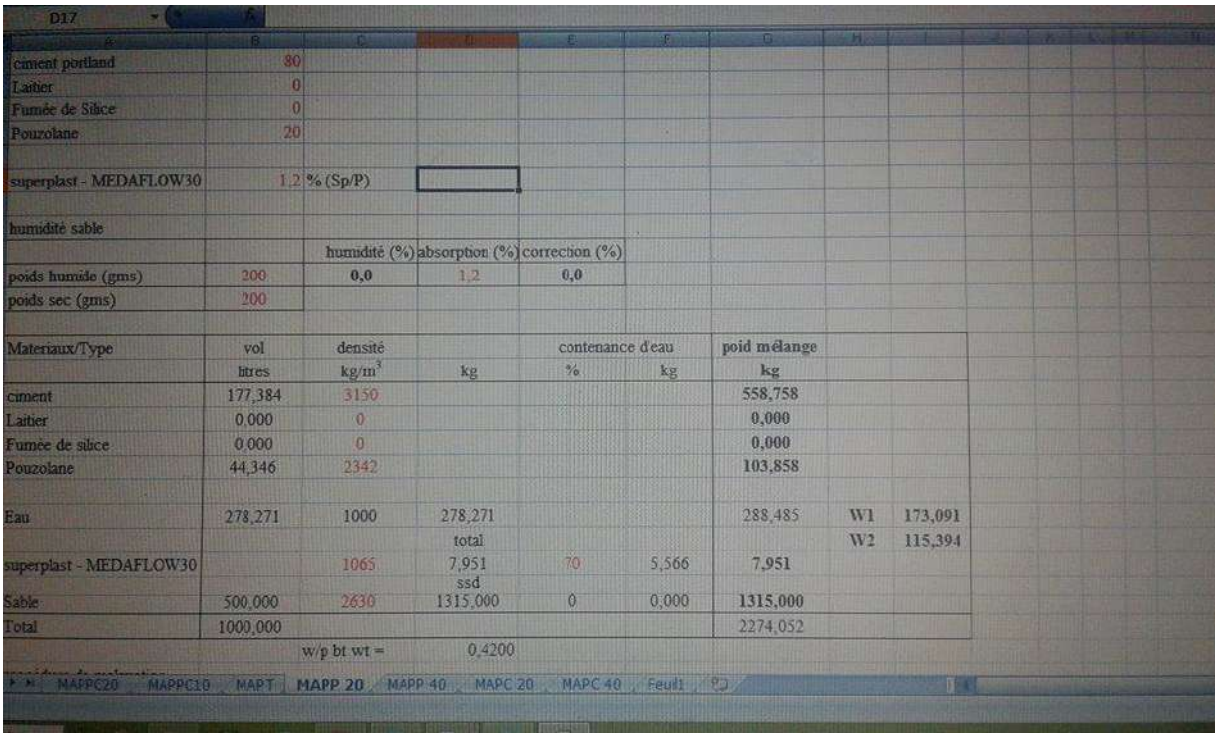


ciment portland		80							
Laitier		0							
calcaire		10							
Pouzolane		10							
superplast - MEDAFLOW30		1,2	% (Sp/P)						
humidité sable									
			humidité (%)	absorption (%)	correction (%)				
poids humide (gms)		200	0,0	1,2	0,0				
poids sec (gms)		200							
Materiaux/Type	vol	densité		contenance d'eau		poid mélange			
	litres	kg/m³	kg	%	kg	kg			
ciment	176,944	3150				557,374			
Laitier	0,000	0				0,000			
calcaire	22,118	2472				54,676			
Pouzolane	22,118	2342				51,800			
Eau	278,820	1000	278,820			289,023	W1	173,414	
			total				W2	115,609	
superplast - MEDAFLOW30		1065	7,966	70	5,576	7,966			
			ssd						
Sable	500,000	2630	1315,000	0	0,000	1315,000			
Total	1000,000					2275,840			
		w/p bt wt =	0,4200						



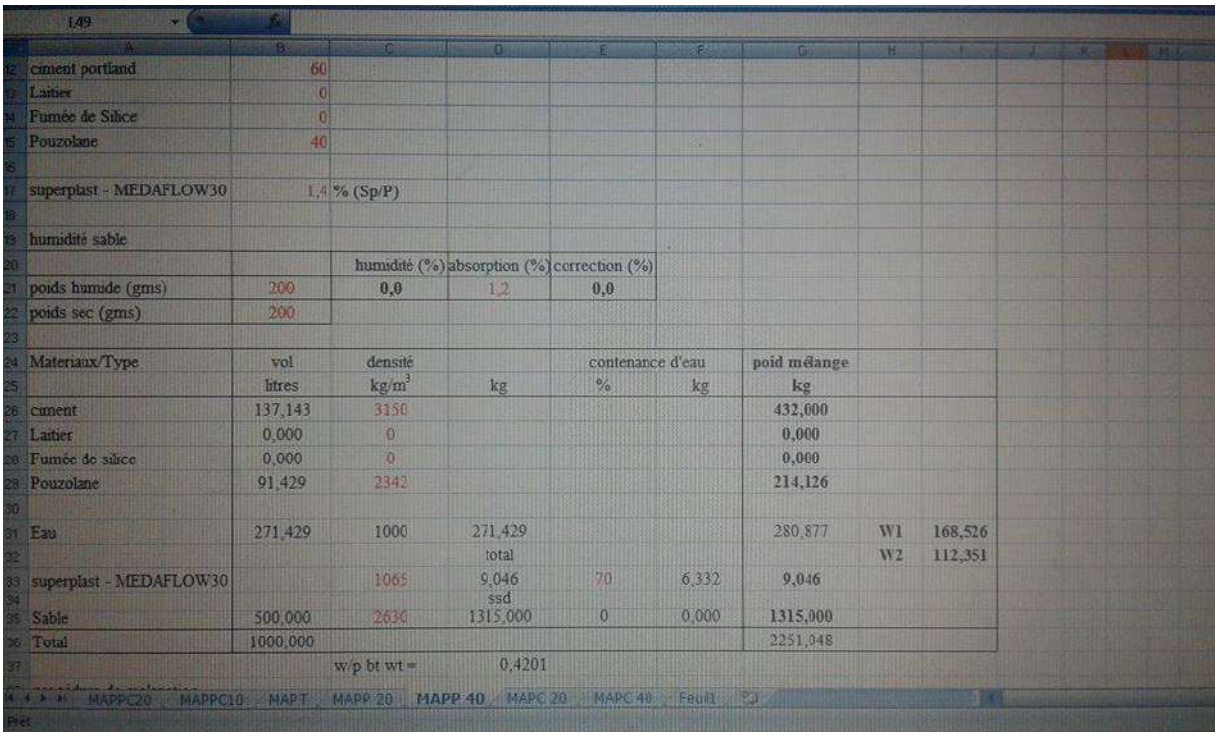
ciment portland	100								
Laitier	0								
Fumée de Silice	0								
Pouzolane	0								
superplast - MEDAFLOW30	1,2	% (Sp/P)							
humidité sable									
		humidité (%)	absorption (%)	correction (%)					
poids humide (gms)	200	0,0	1,2	0,0					
poids sec (gms)	200								
Materiaux/Type	vol	densité		contenance d'eau		poid mélange			
	litres	kg/m^3	kg	%	kg	kg			
ciment	215,239	3150				678,003			
Laitier	0,000	2950				0,000			
Fumée de silice	0,000	2900				0,000			
Pouzolane	0,000	2680				0,000			
Eau	284,761	1000	284,761			294,846	W1	176,908	
			total				W2	117,938	
superplast - MEDAFLOW30		1065	8,136	70	5,695	8,136			
			ssd						
Sable	500,000	2630	1315,000	0	0,000	1315,000			
Total	1000,000					2295,984			
		w/p bt wt =	0,4200						

MAPPC20 MAPPC10 MAPT MAPP 20 MAPP 40 MAPC 20 MAPC 40 Feuil1



ciment portland	80								
Laitier	0								
Fumée de Silice	0								
Pouzolane	20								
superplast - MEDAFLOW30	1,2	% (Sp/P)							
humidité sable									
		humidité (%)	absorption (%)	correction (%)					
poids humide (gms)	200	0,0	1,2	0,0					
poids sec (gms)	200								
Materiaux/Type	vol	densité		contenance d'eau		poid mélange			
	litres	kg/m^3	kg	%	kg	kg			
ciment	177,384	3150				558,758			
Laitier	0,000	0				0,000			
Fumée de silice	0,000	0				0,000			
Pouzolane	44,346	2342				103,858			
Eau	278,271	1000	278,271			288,485	W1	173,091	
			total				W2	115,394	
superplast - MEDAFLOW30		1065	7,951	70	5,566	7,951			
			ssd						
Sable	500,000	2630	1315,000	0	0,000	1315,000			
Total	1000,000					2274,052			
		w/p bt wt =	0,4200						

MAPPC20 MAPPC10 MAPT MAPP 20 MAPP 40 MAPC 20 MAPC 40 Feuil1

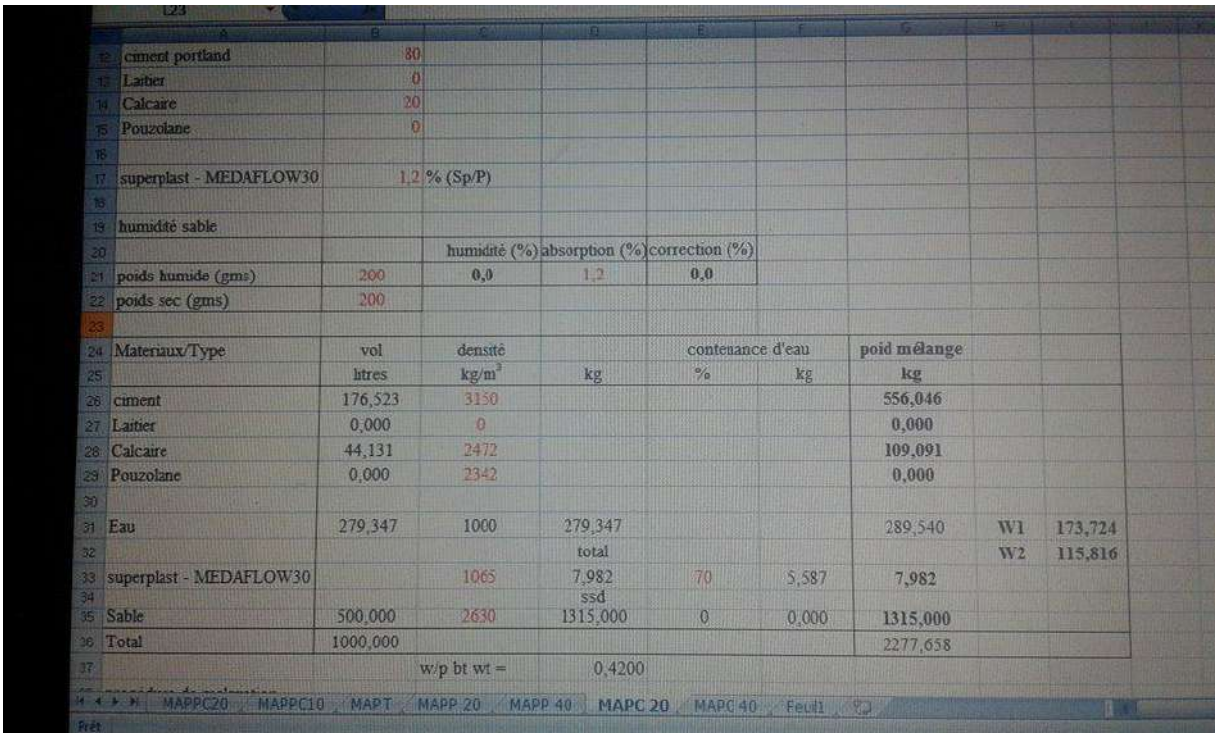


ciment portland	60								
Laitier	0								
Fumée de Silice	0								
Pouzolane	40								
superplast - MEDAFLOW30	1,4	% (Sp/P)							
humidité sable									
		humidité (%)	absorption (%)	correction (%)					
poids humide (gms)	200	0,0	1,2	0,0					
poids sec (gms)	200								

Materiaux/Type	vol litres	densité kg/m³	kg	contenance d'eau %	kg	poid mélange kg		
ciment	137,143	3150				432,000		
Laitier	0,000	0				0,000		
Fumée de silice	0,000	0				0,000		
Pouzolane	91,429	2342				214,126		
Eau	271,429	1000	271,429			280,877	W1	168,526
			total				W2	112,351
superplast - MEDAFLOW30		1065	9,046	70	6,332	9,046		
			ssd					
Sable	500,000	2630	1315,000	0	0,000	1315,000		
Total	1000,000					2251,048		
		w/p bt wt =	0,4201					

MAPPC20 | MAPPC10 | MAPT | MAPP 20 | **MAPP 40** | MAPC 20 | MAPC 40 | Feuil1

Prêt

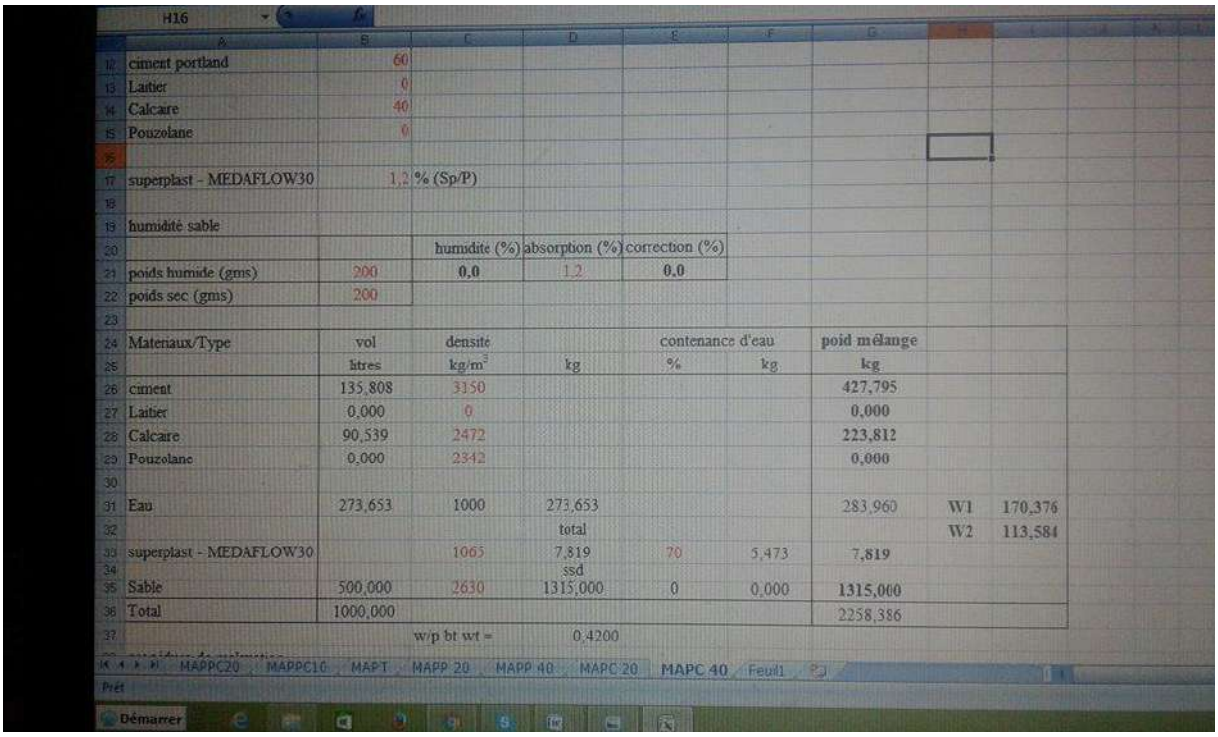


ciment portland	80								
Laitier	0								
Calcaire	20								
Pouzolane	0								
superplast - MEDAFLOW30	1,2	% (Sp/P)							
humidité sable									
		humidité (%)	absorption (%)	correction (%)					
poids humide (gms)	200	0,0	1,2	0,0					
poids sec (gms)	200								

Materiaux/Type	vol litres	densité kg/m³	kg	contenance d'eau %	kg	poid mélange kg		
ciment	176,523	3150				556,046		
Laitier	0,000	0				0,000		
Calcaire	44,131	2472				109,091		
Pouzolane	0,000	2342				0,000		
Eau	279,347	1000	279,347			289,540	W1	173,724
			total				W2	115,816
superplast - MEDAFLOW30		1065	7,982	70	5,587	7,982		
			ssd					
Sable	500,000	2630	1315,000	0	0,000	1315,000		
Total	1000,000					2277,658		
		w/p bt wt =	0,4200					

MAPPC20 | MAPPC10 | MAPT | MAPP 20 | MAPP 40 | **MAPC 20** | MAPC 40 | Feuil1

Prêt



ciment portland	60								
Laitier	0								
Calcaire	40								
Pouzolane	0								
superplast - MEDAFLOW30	1,2	% (Sp/P)							
humidité sable									
		humidité (%)	absorption (%)	correction (%)					
poids humide (gms)	200	0,0	1,2	0,0					
poids sec (gms)	200								
Materiaux/Type	vol	densité		contenance d'eau		poid mélange			
	litres	kg/m^3	kg	%	kg	kg			
ciment	135,808	3150				427,795			
Laitier	0,000	0				0,000			
Calcaire	90,539	2472				223,812			
Pouzolane	0,000	2342				0,000			
Eau	273,653	1000	273,653			283,960	W1	170,376	
			total				W2	113,584	
superplast - MEDAFLOW30		1065	7,819	70	5,473	7,819			
			ssd						
Sable	500,000	2630	1315,000	0	0,000	1315,000			
Total	1000,000					2258,386			
		w/p bt wt =	0,4200						

Annexes D

MAPT	MAPCL 40%
	
MAPPZ 20%	MAPCL 20%
