

SOMMAIRE

RESUME

ABSTACT

LISTE DES TABLEAUX.....	iii
LISTE DES FIGURES.....	iv
INTRODUCTION GENERALE.....	2

CHAPITRE 1 : BETON IMPRIME

1. Introduction	5
2. Présentation Lafarge.....	5
2.1. Les activités de l'entreprise Lafarge en Algérie	5
3. Le béton imprimé Lafarge.....	6
4. Les applications du béton imprimé à Tlemcen.....	12
5. Conclusion.....	14

CHAPITRE 2 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Introduction.....	16
2. Rappels sur la prise et durcissement des bétons	16
2.1. Théories de l'hydratation du ciment	16
2.1.1. Historique	16
2.1.2. Théories actuelles	17
2.2. Réaction d'hydratation	18
2.2.1. Hydratation des silicates.....	18
2.2.2. Hydratation des aluminates.....	19
2.3. Cinétique d'hydratation	21
2.4. Influence du matériau	22
2.4.1. Nature du liant	22
2.4.2. Nature des autres constituants du béton	22
2.4.3. Influence du milieu	23
2.4.4. Les adjuvants modifiant la prise et le durcissement.....	26
2.4.4.1. Les retardateurs de prise.....	26
2.4.4.2. Les accélérateurs de prise et les accélérateurs de durcissement.....	27
2.5. Fausse prise.....	27
3. Etude comparatif du comportement de bétons et de mortiers	28
3.1. Mortiers de béton équivalent (MBE).....	28
3.2. Mortiers thermiquement équivalent (MT).....	31
3.3. Comparaison des deux mortiers	32
3.4. Mortiers classiques du béton (MB).....	34
4. Procédures d'essais normalisés.....	35
4.1. L'essai de prise.....	35
4.1.1. Essai Vicat	35
4.1.2. Essai sur pate pure	36
4.1.2.1. Détermination de la consistance normalisée.....	36
4.1.2.2. Détermination du temps de début de prise.....	37
4.1.2.3. Détermination du temps de fin de prise.....	37

4.1.3. Essai sur mortier 1/3	37
4.1.3.1. Confection du mortier.....	37
4.1.3.2. Temps de prise.....	38
4.2. Pénétration d'une aiguille (méthode A).....	38
5. Conclusion	39

**CHAPITRE 3 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET PROCEDURES
EXPERIMENTALES**

1. Introduction	41
2. Caractérisation des matériaux utilisés.....	43
2.1. Ciment	43
2.1.1. Composition chimique et minéralogique	43
2.1.2. Caractéristique physico-mécanique	43
2.1.2.1. Masse volumique (absolue et apparente).....	43
2.1.2.2. Essai de consistance.....	44
2.1.2.3. Essai de prise.....	44
2.1.2.4. Essais mécaniques sur mortier normalisé.....	44
2.2. Sable	46
2.2.1. Identification du sable	46
2.2.1.1. Prélèvement en laboratoire	46
2.2.1.2. Analyse granulométrique	48
2.2.1.3. Masse volumique (absolue et apparente).....	48
2.2.2. Propreté du sable	48
2.2.2.1. Equivalent de sable	48
2.2.2.2. Bleu de méthylène	49
2.3. Les durcisseurs et démoulant	49
2.4. Eau de gâchage	49
3. Procédures expérimentales	50
3.1. Formulation de mortier thermiquement équivalent	50
3.2. Préparation du corps d'épreuve.....	50
3.3. Essai de prise.....	51
3.4. Pénétration par une aiguille (méthode A).....	53
4. Interprétation des résultats	54
5. Conclusion.....	61
CONCLUSION GENERALE	63
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	66
ANNEXES	

LISTE DES TABLEAUX

tableau1. 1. Réalisations récentes à Tlemcen utilisant la technique du béton imprimé (photos prises par les auteurs)	13
Tableau 2. 1. Les quantités de chaleur dégagées lors de l'hydratation pour un gramme de ciment (Regourd, 1982).....	21
Tableau 2. 2. Adjuvants normalisés modifiant la prise et le durcissement du ciment (extrait du guide SYNAD : Syndicat National des Adjuvants pour Bétons et Mortiers).....	27
Tableau 2. 3. Comparaison entre MBE, MT et béton associé	32
Tableau 2. 4. Les étapes de malaxage de la pâte.....	36
Tableau 2. 5. Méthodologie pour le malaxage du mortier normal.....	38
Tableau 3. 1. Composition chimique et minéralogique de Matine (Fiche technique de MATINE)	43
Tableau 3. 2. Composition granulométrique du sable normalisé	44
Tableau 3. 3. Caractéristiques physico - mécaniques du ciment	46
Tableau 3. 4. Caractéristiques physico - mécaniques du ciment NA 442(Fiche technique de ciment MATINE)	46
Tableau 3. 5. Caractérisation du sable d'ENG.....	49
Tableau 3. 6. Masses volumique des durcisseurs	49
Tableau 3. 7. Composition de l'eau de gâchage (mg/l) (Boukli, 2009).....	50
Tableau 3. 8. La formulation du béton de référence et du MT pour 1 m ³	50

LISTE DES FIGURES

Figure 1. 1. Positionnement de la société Lafarge en Algérie (fascicule de Lafarge)	6
Figure 1. 2. Liste de nuances et moules applicables chez LAFARGE (fascicule de Lafarge)	7
Figure 1. 3. Matériel utilisé pour la réalisation d'Artevia Empreinte chez LAFARGE (photos prises par les auteurs)	8
Figure 1. 4. Nivelage et lissage de la surface du béton coulé (photos prises par les auteurs) ..	9
Figure 1. 5. Epanchage et lissage du colorant en surface (photos prises par les auteurs)	10
Figure 1. 6. Opération de relissage du colorant en surface (photos prises par les auteurs) ...	10
Figure 1. 7. Saupoudrage du produit de démoulage en surface (photos prises par les auteurs)	11
Figure 1. 8. Impression des motifs en surface à l'aide de moules (photos prises par les auteurs)	11
Figure 1. 9. Lavage à l'eau de la surface (photos prises par les auteurs).....	12
Figure 2. 1. Schématisation de la dissolution superficielle du C ₃ A et du gypse (Alexander et Blandine, 2009).	20
Figure 2. 2. Influence de E/C sur les temps de prise (CPA 400) Venuat M. (1976)	23
Figure 2. 3. Influence de la température sur le flux (a) et la chaleur d'hydratation (b) d'un ciment composé. (B80: ciment composé exposé à des températures de 8°, 20° et 35° C) (Kaszynska, 2002)	24
Figure 2. 4. Influence de la température sur le début et la fin de prise d'un CPA (mortier 1/3, E/C= 0.45, 0.5, 0.55) Venuat M. (1976).....	25
Figure 2. 5. Influence de la température sur le début et la fin de prise par Pinto et Hover (2000) et Turcry et coll. (2002).....	26
Figure 2. 6. Formation d'hydrates à la surface des granulats (Acker, 1988)	29
Figure 2. 7. Passage du béton au MBE (Dierkens, 2005).....	29
Figure 2. 8. Cône d'Abrams et mini cône (Dierkens, 2005)	30
Figure 2. 9. Corrélation linéaire entre affaissement au cône et étalement au mini cône (Dierkens, 2005).	31
Figure 2. 10. Passage du béton au mortier MT (Dierkens, 2005).....	31
Figure 2. 11. Comparaison MBE et MT (Dierkens, 2005)	33
Figure 2. 12. Comparaison massive d'un béton du mortier MT associé et du MBE associé. (Dierkens, 2005)	33
Figure 2. 13. Quelques différences entre béton, MBE et MT (Dierkens, 2005)	34
Figure 2. 14. Passage du béton au mortier classique (Brixi, 2014)	34

Figure 2. 15. Appareil de Vicat	36
Figure 2. 16. Appareil de pénétration (méthode A) (Shotcrete Penetrometer, 2014).....	38
Figure 3. 1. Programme expérimental	42
Figure 3. 2. Appareil à choc (photo prise par les auteurs)	45
Figure 3. 3. Essais mécaniques a) traction par flexion, b) compression (photos prise par les auteurs)	45
Figure 3. 4. Echantillonneur (photo prise par les auteurs)	47
Figure 3. 5. Opération d'échantillonnage des matériaux minéraux (Dupain et coll., 2000)....	47
Figure 3. 6. Courbes granulométriques du sable de l'ENG Sidi Abdelli.	48
Figure 3. 7. Saupoudrage de durcisseur sur la surface du MT (Photo prise par les auteurs) ..	51
Figure 3. 8. Lissage de la surface et saupoudrage du démoulant (Photos prises par les auteurs)	51
Figure 3. 9. Appareil de Vicat dans le bain Marie (Photo prise par les auteurs)	52
Figure 3. 10. Echantillon MT sans durcisseur (E/C= 0,5) (Photo prise par les auteurs)	52
Figure 3. 11. Echantillons de MT réalisés avec un rapport E/C = 0,7(Photo prise par les auteurs)	53
Figure 3. 12. Pénétrromètre à mortier (conception locale)	54
Figure 3. 13. MT de référence à $6\pm 2^{\circ}\text{C}$	55
Figure 3. 14. MT de référence à $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$	55
Figure 3. 15. MT de référence à $35\pm 1^{\circ}\text{C}$	56
Figure 3. 16. MT + ACESCOLOR et PAVILAND à la température de $6\pm 2^{\circ}\text{C}$	58
Figure 3. 17. MT + ACESCOLOR et PAVILAND à la température de $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$	59
Figure 3. 18. MT + ACESCOLOR et PAVILAND à la température de $35\pm 1^{\circ}\text{C}$	60
Figure 3. 19. Influence de la température sur le début et la fin de prise du mortier associé adjuvanté ou non.....	61

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le béton a conquis le marché de la construction de manière hégémoniale au détriment des autres matériaux fortement utilisés ancestralement, à telle enseigne que le produit que l'homme consomme après l'air et l'eau est le béton. Pour garder cette place, le lobby du béton invente de nouveaux matériaux, toujours plus rapide à mettre en œuvre, moins onéreux et esthétique.

On connaît le tissu imprimé, le papier imprimé aux motifs décoratifs les plus harmonieux mais il fallait aller aux Etats-Unis pour s'extasier devant du béton imprimé. Ce procédé américain (**béton imprimé**) éprouvé et amélioré depuis plus d'un siècle a de nombreux avantages ; utilisé couramment aux Etats-Unis, avec 80% des aménagements publics, connaît actuellement un succès grandissant dans le monde. Le béton imprimé et sa surface joliment habillée grâce à un procédé de décoration est maîtrisé dans notre pays par plusieurs entreprises dont la société Lafarge Algérie. Sous son nom commercial Artevia Empreinte, ce dernier consiste à appliquer une empreinte sur un support encore frais (chape béton traditionnelle ou ragréage spécial impression) de manière à imprimer un motif en relief. C'est une alternative intéressante aux enrobés en matière de coût et de diversité. Le choix des dessins des empreintes est très varié et permet tous types de décors.

Ce béton décoratif vient de faire son entrée dans la wilaya de Tlemcen, avec ses applications basiques il en est encore à ses débuts. Nous pouvons le rencontrer surtout dans des aménagements publics tels que : les allées, les trottoirs, etc.

Le savoir-faire lié à la réalisation des empreintes sur une surface horizontale de béton fraîchement coulé dépend du climat et de sa clémence, surtout d'une température ambiante modérée ; ce qui n'est pas toujours le cas par rapport aux différentes saisons et différents territoires. La problématique que nous traitons dans ce projet de fin d'études est celle du laboratoire de recherche de l'entreprise Lafarge Algérie ; elle se résume dans la question suivante :

« Quel impact peut avoir la température du milieu sur le temps de prise du béton imprimé ? »

Afin de tenter de répondre à ce questionnement, l'approche méthodologique que nous avons choisie est de suivre les étapes d'une application du béton imprimé à l'échelle réelle : de la préparation à la mise en œuvre jusqu'à la confection, élaborer ensuite une synthèse bibliographique pour comprendre les phénomènes liés à la prise et le durcissement du béton adjuvanté et les agents qui ont un impact direct la prise particulièrement et in fini porter la réflexion sur un programme expérimental qui répond au laboratoire à la problématique en faisant le bon choix sur les mélanges associés à ce béton ainsi que les outils utilisés pour la mesure des temps de prise.

Nous avons divisé notre mémoire en trois chapitres :

- Le premier est consacré au béton imprimé. Nous commençons par présenter la société Lafarge en se concentrant sur l'un de leur produit qui fait l'objet de notre

INTRODUCTION GENERALE

recherche : le béton imprimé et nous mettons en revue ces applications récentes dans la wilaya de TLEMCEM.

- Le deuxième chapitre est consacré à une étude bibliographique. Nous présentons dans un premier lieu, un rappel sur la prise et le durcissement des bétons et dans un second temps, nous abordons l'étude comparative du comportement de bétons et des mortiers. Enfin, nous mettons en exergue les procédures des essais normalisés.
- Le dernier chapitre est quant à lui consacré à la caractérisation des matériaux utilisés et au programme expérimental préconisé. Après avoir arrêté la formulation de notre mortier associé au béton imprimé, nous discutons les résultats de ce travail où la température est la grande variable.

Ce mémoire sera clôturé par une conclusion générale tout en synthétisant les principaux résultats trouvés et en suggérant des perspectives sur l'emploi du béton imprimé.

CHAPITRE 1

BETON IMPRIME

1. Introduction

L'histoire du béton est étroitement liée à celle du ciment portland. L'évolution du béton a permis d'en faire un matériau de choix qui ouvre autant de possibilités dans le domaine de la construction, qui n'a de limites que la créativité et l'imagination de l'homme. Parmi ces possibilités, le béton imprimé qui fait son entrée vers 1970 ; il est aussi désigné comme « béton empreinte ». Ce dernier est un béton décoratif obtenu, par apposition d'un moule de différents motifs sur la surface du béton frais avant son durcissement, afin de faire apparaître diverses formes en empreinte. Artevia Empreinte, béton conçu par la société Lafarge, est une solution esthétique et économique en béton décoratif qui rappelle l'aspect des matériaux traditionnels.

Au début du béton imprimé, le choix des motifs et couleurs était limité jusqu'à ce que le matériau gagne en popularité. À partir de là, une panoplie de modèles et de couleurs est apparue. Afin de pouvoir utiliser ces bétons décoratifs, il apparaît nécessaire d'avoir une bonne maîtrise du mécanisme de prise en surface en fonction de la température ambiante, surtout si on y ajoute des produits durcisseurs.

2. Présentation de LAFARGE

Lafarge¹ est une entreprise multinationale, qui sous ce nom commercial, produit et vend principalement du ciment, des granulats et du béton prêt à l'emploi dans le monde entier. Ses produits et solutions de construction sont utilisés pour construire ou rénover des logements, bâtiments et infrastructures.

Sur la base de son chiffre d'affaires et d'analyses internes et externes, Lafarge est un leader mondial des matériaux de construction et du marché du ciment. Il est deuxième producteur mondial de granulats et quatrième producteur de béton prêt à l'emploi.

2.1. Les activités de l'entreprise Lafarge en Algérie

En janvier 2008, Lafarge acquiert l'activité cimentière du groupe égyptien Orascom (Orascom Building Materials Holding S.A.E), qui lui apporte une position de leader au Moyen-Orient et en Afrique.

Lafarge Algérie est le 2^{ème} producteur de matériaux de construction à travers ses activités « ciment, granulats, béton et plâtre ». Lafarge Algérie possède 2 cimenteries (M'sila et Oggaz) avec une capacité totale de production de 8,6 MT/an et gère en partenariat avec le GICA, la cimenterie de Meftah 1 MT/an. Une nouvelle cimenterie en partenariat est en cours de construction à Biskra.

¹«Lafarge» désigne l'ensemble du Groupe Lafarge.

CHAPITRE 1 : BETON IMPRIME

L'activité béton compte 25 centres de production de béton pour une capacité totale d'un million de mètre cube. Lafarge Algérie opère en partenariat avec Cosider, une usine de production de plâtre COLPA, une unité de production de sac à BBA, un terminal d'ensachage près de Constantine, un laboratoire applicatif des matériaux de construction à Rouïba et vient de lancer la 1^{ère} enseigne de vente des matériaux de construction BATISTORE.

Pour la partie béton prêt à l'emploi et pour l'année 2014, la production de Lafarge est estimée à environ 950000 m³ représentant moins de 20 % du marché national.

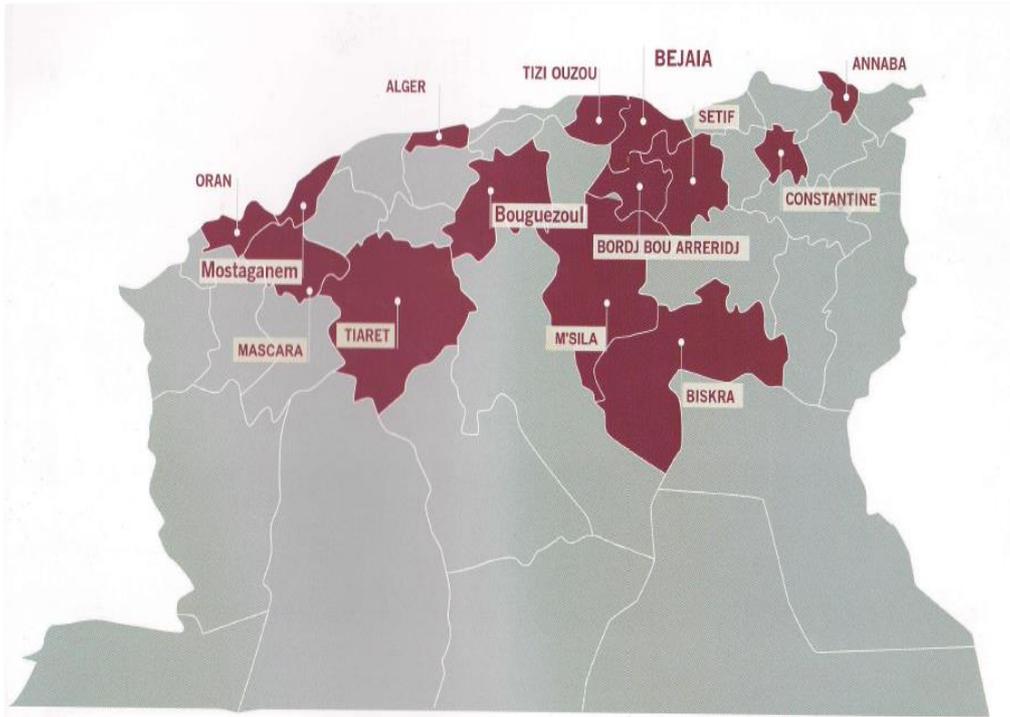


Figure 1. 1. Positionnement de la société Lafarge en Algérie (**fascicule de Lafarge**)

3. Le béton imprimé LAFARGE (Lafarge lexique, 2014)

L'entreprise Lafarge Algérie met à la disposition de ses clients une vingtaine de variété de bétons répondant à des attentes variées. Parmi ces bétons, le béton imprimé est sujet de notre travail de fin d'études et fera donc l'objet, dans ce chapitre, d'une présentation détaillée.

Le béton imprimé désigné sous le nom commercial d'Artevia Empreinte chez Lafarge est une technique consistant à imprimer à l'aide de matrices (moules spéciaux), des dessins ou des motifs à la surface d'un béton frais. Le résultat que l'on obtient dépend du choix des matrices, de la coloration et de la finition de surfaces (**Abdo et Batut, 2011**).

CHAPITRE 1 : BETON IMPRIME

Artevia Empreinte est un béton pouvant être utilisé dans la structuration de surface avec des motifs variés (pavés, dalles, etc.) en vue d'obtenir un aspect visuel choisi au préalable (voir figure 1.2).

Ce type de béton est idéal pour personnaliser des aménagements extérieurs en voirie ou en environnement de bâtiment et cela grâce aux nombreuses teintes et motifs qu'il offre. A ce titre, Artevia Empreinte peut être utilisé pour tous types d'aménagements tels que :

- **Aménagements publics** : allées de circulation, voiries de lotissement, trottoirs, passages piétons, rues piétonnes, parvis, places, parkings, cours d'écoles, etc.
- **Aménagements privés** : accès, descentes de garage, allées de jardins, abords, terrasses, plages de piscine, etc (**Lafarge, 2014**).



Figure 1. 2. Liste de nuances et moules applicables chez LAFARGE (**fascicule de Lafarge**)

Artevia Empreinte allie les avantages du matériau béton en termes de durabilité (classe d'exposition est au minimum : XF1), d'économie et de facilité de mise en œuvre avec

CHAPITRE 1 : BETON IMPRIME

l'esthétique des matériaux traditionnels. Il permet de différencier entre les espaces piétonniers et circulés, de résister à l'usure, de s'adapter aux sols de faible portance, de réduire les épaisseurs des terrassements, d'être posé rapidement ; mais surtout un entretien simple.

La formulation et la fabrication d'Artevia Empreinte répondent donc aux spécifications demandées notamment en termes de classe de résistance à la compression, de classe d'exposition, de classe de consistance (classe d'affaissement), de dimension maximale nominale des granulats (Dmax) et de classe de teneur en chlorures. Artevia Empreinte peut être coulé avec la goulotte du camion-toupie, à la benne, à la pompe ou au tapis. Sa mise en œuvre suit les prescriptions du DTU 21² (NF P 18-201) "Exécution des ouvrages en béton" (Lafarge, 2014).

Suivant le procédé d'exécution adopté, des précautions doivent être prises quant à la mise en œuvre du béton. Elle se fait dans des conditions météorologiques particulières. Les paramètres à considérer sont :

- La température ambiante ;
- L'humidité relative de l'air ;
- la variation de température entre le jour de bétonnage et la première nuit.

Le choix du procédé doit tenir compte du type de chantier à réaliser et de la nature du trafic prévu (Abdo et Batut, 2011).

Le matériel utilisé pour l'exécution d'Artevia Empreinte, est composé de raclette, de pelle, de règle de mise à niveau, d'une truelle, de taloche, de lisseuse, De joints (PVC...), d'une scieuse à disque ou de matériaux prévus au calepinage (voir figure 1.3).



Figure 1. 3. Matériel utilisé pour la réalisation d'Artevia Empreinte chez LAFARGE (photos prises par les auteurs)

²"DTU 21" acronyme désignant : Documents Techniques Unifiés N°21.

CHAPITRE 1 : BETON IMPRIME

Les étapes du coulage du béton seront expliquées en prenant comme exemple l'expérience à laquelle nous avons assisté et qui a été démontrée par l'apporteur de Lafarge lors de sa visite à l'université Abou Bekr Belkaid Tlemcen le 26 février 2015. Toutes les étapes de la fabrication sont illustrées par des photos que nous avons prises durant cette journée.

La formulation utilisée pour le béton est la formulation de référence (**Boukli, 2009**) préconisée par l'équipe matériaux granulaires au laboratoire de recherche Eau et Ouvrages dans leur Environnement (EOLE) de l'université de Tlemcen. Faisant suite à la mise en place du mélange dans le coffrage qui a été préparé à cet effet, au-dessus d'une feuille en polyane, le béton est tiré à la raclette et le niveau réalisé à la règle, ensuite taloché et lissé en insistant sur les bordures et les angles afin de ne laisser aucune sans vague, ni creux apparent sur la surface (voir figure 1.4).



Figure 1. 4. Nivelage et lissage de la surface du béton coulé (photos prises par les auteurs)

Ensuite, vient l'opération d'épandage du colorant et le lissage de la surface (figure 1.5). Il faudra de nouveau insister sur le lissage de la même surface et particulièrement au niveau des contours (figure 1.6).

CHAPITRE 1 : BETON IMPRIME



Figure 1. 5. Epandage et lissage du colorant en surface (photos prises par les auteurs)



Figure 1. 6. Opération de relissage du colorant en surface (photos prises par les auteurs)

CHAPITRE 1 : BETON IMPRIME

Le produit de démoulage est enfin saupoudré sur la surface du béton coulé (cf. figure 1.7) et fini, on imprime la surface lisse et colorée du béton frais à l'aide de moules. Les empreintes sont complétées sur les bords à l'aide de l'outil adapté le cas échéant (figure 1.8). Dans les 48 heures après le coulage, le béton sec est lavé à l'eau et les joints sciés (figure 1.9).



Figure 1. 7. Saupoudrage du produit de démoulage en surface (photos prises par les auteurs)



Figure 1. 8. Impression des motifs en surface à l'aide de moules (photos prises par les auteurs)



Figure 1. 9. Lavage à l'eau de la surface (photos prises par les auteurs)

A la fin du chantier, et pour faciliter l'entretien, une résine de protection de surface y est imprégnée en vue d'empêcher la pénétration de produits nocifs au béton et facilitera l'élimination des salissures superficielles par simple lavage.

4. Les applications du béton imprimé à Tlemcen :

Nous présentons dans le tableau 1.1, un panorama non exhaustif des expériences réalisés à l'aide du béton imprimé dans la wilaya de Tlemcen. Il s'agit de huit opérations récentes, relatives à des aménagements publics extérieurs, particulièrement l'aménagement de trottoirs ou certaines allées.

CHAPITRE 1 : BETON IMPRIME

tableau1. 1. Réalisations récentes à Tlemcen utilisant la technique du béton imprimé
(photos prises par les auteurs)

Photos	Site
	<p>Polyclinique de la cité El Beyada- Abou Tachfine (Grand Tlemcen)</p>
	<p>Mosquée SAYIDA AICHA De la cité El Beyada- Abou Tachfine (Grand Tlemcen)</p>
	<p>PLACETTE IMAMA (Grand Tlemcen)</p>
	<p>BAB EI'HDID (ville de Tlemcen)</p>
	<p>ROUND POINT BAB SIDI BOUMEDIENE (ville de Tlemcen)</p>

CHAPITRE 1 : BETON IMPRIME

	<p>GRAND BASSIN (ville de Tlemcen)</p>
	<p>AIRE DES ZIANIDES (Autoroute Est- Ouest)</p>
	<p>HOPITAL 120 LITS REMCHI (wilaya de Tlemcen)</p>

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressées au béton imprimé et à ses spécificités sachant que ce dernier est déjà usité dans la wilaya de Tlemcen. Les informations que nous avons citées, nous les avons obtenues grâce au site de la société Lafarge.

Le **béton imprimé** offre un aspect d'imitation d'éléments naturels, volontairement assumé. Doté d'un large choix de teintes et de motifs, il répond à tous les projets d'aménagements et une esthétique collant parfaitement avec sa qualité première : la **résistance**, cela s'explique grâce aux **durcisseurs de surface**.

Afin de mieux comprendre le rôle des durcisseurs appliqués au béton imprimé en fonction du climat et pour répondre à la demande de la société Lafarge Algérie, nous allons tenter à travers des essais au laboratoire de trouver une réponse.

CHAPITRE 2
ETUDE
BIBLIOGRAPHIQUE

1. Introduction :

Le matériau béton de ciment hydraulique est constitué d'un squelette inerte dont le volume est supérieur aux deux tiers du volume du mélange et d'une pâte (matrice) dont les propriétés sont évolutives dans le temps et qui participe à l'amélioration de ses caractéristiques mécaniques. Il est clair que la maîtrise du comportement physico-mécanique de la pâte de ciment, a permis d'améliorer de manière significative l'efficacité des procédés et la qualité des réalisations.

La mise en œuvre du béton à l'état frais dans son coffrage dépend fortement de sa période de prise qui précède la phase de son durcissement. Sa préparation, son transport et sa mise en place dans le coffrage doit impérativement se faire avant que la pâte ne cesse d'être déformable et devient rigide.

La mesure de la prise sur des échantillons de béton n'est pas commode à cause de la présence de gros granulats qui empêchent la pénétration et le cisaillement de ce matériau à l'aide d'aiguille en acier. La réflexion menée par les chercheurs est de réaliser cet essai sur des mortiers qui seraient équivalents aux bétons. Il est clair, que la composition de ces matériaux équivalents doit être judicieusement choisie pour représenter les bétons qui y sont associés.

Nous commençons dans ce chapitre, par faire le point sur la prise et le durcissement du béton, ensuite nous mettons en exergue les trois stratégies de calculs de mortiers associés aux bétons. La première concerne l'obtention de « mortiers de béton équivalent » (MBE), la seconde est relative aux mortiers thermiquement équivalents (appelés ici « mortiers MT »), et la dernière est liée aux mortiers classiques (MB). A la fin nous présentons les procédures d'essais que nous avons utilisé pour mener à bien ce travail de fin d'études.

2. Rappels sur la prise et durcissement des bétons

2.1. Théories de l'hydratation du ciment

La prise des liants hydrauliques et le durcissement du béton sont représentés comme deux phénomènes très complexes. Les temps de prise sont variables avec plusieurs paramètres par exemple : la quantité de gypse ajoutée lors du broyage du clinker, la propreté des granulats, la température du milieu, etc.

2.1.1. Historique

Toute évolution est suivie de changements, de ce fait l'évolution du béton dans le temps, s'accompagne elle aussi de transformations chimiques telles que la dissolution de ses hydrates. Ces derniers sont formés pendant la période initiale afin d'obtenir des hydrates

CHAPITRE 2 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

stables. Il est connu que le processus de dissolution ne freine en aucun cas l'augmentation de la résistance mécanique.

L'hydratation du ciment est une réaction exothermique qui se traduit par une évolution de la température, suivie d'un dégagement de la chaleur. Plusieurs chercheurs ont travaillé sur ce sujet ; ils ont proposé différentes théories pour expliquer l'ensemble des phénomènes physico-chimiques et caractériser le mécanisme d'hydratation de ciment.

En 1768, Lavoisier est le premier qui décrit la prise comme un processus de cristallisation dans son mémoire « l'analyse du gypse » ; par la suite Le Chatelier reprend à son compte cette théorie de la cristallisation dans une note en 1883 (**Galtier, 1981**), par la suite en 1887, il dépose sa thèse expliquant quand l'eau de gâchage est au contact du ciment cela donne naissance à une solution sursaturée. Les hydrates se forment après que les composés anhydres se dissolvent, ces hydrates peu solubles, précipitent et forment des microcristaux (début de prise). La dissolution des éléments anhydres se poursuit jusqu'à la mise en solution de la totalité du liant. Le durcissement est alors dû à la multiplication et à l'adhérence des cristaux formés.

Michaelis (1893) est pour la théorie d'hydratation en accord avec la science des colloïdes ; les hydrates proviennent alors d'un gel d'hydrosilicates s'enrichissant progressivement en chaux, ce qui veut dire que le phénomène de dissolution se fait au début en provoquant à la fois un gonflement des grains et l'apparition d'une solution riche en chaux. Cette dernière agit sur les silicates pour produire un gel qui durcit et protège le ciment en le rendant imperméable en même temps que l'hydratation se poursuit à l'intérieur des grains du ciment (**Regourd, 1982**).

Nous voyons que ces deux théories de base, s'accordent sur la dissolution des composés anhydres du ciment. Néanmoins, il n'y a pas de modèle permettant d'avoir une description complète pour la formation de la structure des ciments durant l'hydratation.

2.1.2. Théories actuelles

Ces dernières années ont vu l'introduction de nouvelles techniques physiques :

La microscopie électronique à très haute tension (**Double et coll., 1978, Jenning et coll., 1979, Birchall et coll., 1978**) assure que dès le contact du ciment avec l'eau, une membrane se forme autour des grains de C_3S et au travers de laquelle ne passent que les ions Ca^{2+} en solution. Le C-S-H ne peut apparaître que lors de l'éclatement de la membrane qui libère les ions silicates.

De plus, la spectrométrie de photoélectrons émis par Rayon X, XPS ou ESCA³ (**Thomassin et coll., 1979 ; Ménétrier et coll., 1979**), est parvenue à déterminer la composition de la couche superficielle des grains de C_3S en cours d'hydratation à partir de la cinquième seconde.

³ Electron Spectroscopique for Chemical Analysis

CHAPITRE 2 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

D'après les études XPS de Regourd et coll., 1980 on peut synthétiser les éléments suivants :

- La dissolution de C_3S dès le contact avec l'eau ;
- La précipitation d'un hydrate primaire de rapport C/S presque égale à 1, dans les premières secondes ;
- La formation d'un hydrate secondaire de rapport C/S presque égale à 2 par chimisorption des ions Ca^{2+} de la solution et de C_3S sous-jacent. Cette étape est très longue, elle s'étend de la fin de la première minute jusqu'à la quatrième heure qui correspond à la période dormante ;
- La précipitation d'un hydrate ternaire après réorganisation structurale de l'hydrate secondaire.

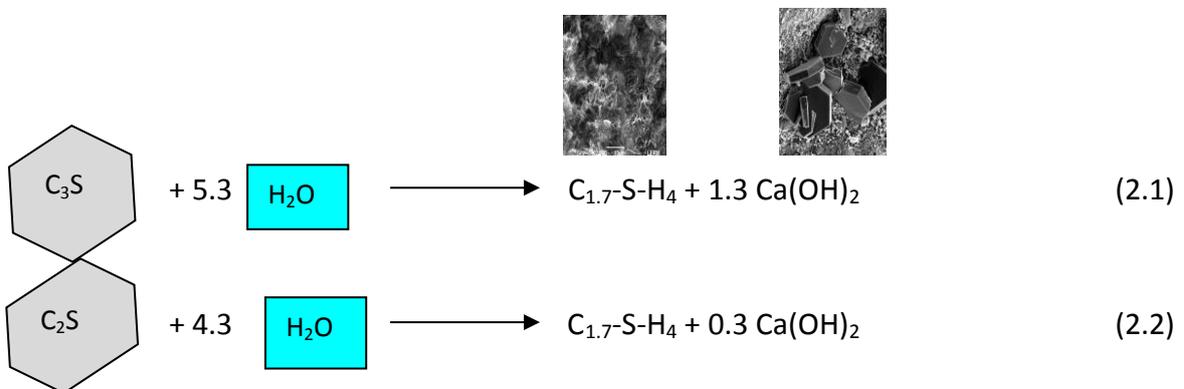
2.2. Réaction d'hydratation

Le ciment peut être séparé en deux grandes familles les silicates (C_3S , C_2S) et les aluminates (C_3A , C_4AF) ; le résultat de leur hydratation donne des hydrates identiques ou presque ; pour cela, nous avons choisi de regrouper ces deux familles et présenter leur réaction d'hydratation.

2.2.1. Hydratation des silicates (C_3S , C_2S)

Au contact de l'eau, les silicates tricalciques C_3S et les silicates bicalciques C_2S se dissolvent sous forme d'ions qui interagissent entre eux et forment des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et de la portlandite ($Ca(OH)_2$).

Les réactions d'hydratation peuvent être écrites à titre indicatif 2.1 et 2.2



Ces réactions sont exothermiques et peuvent servir de catalyseur à la réaction d'hydratation. Dans le cas du C_2S , la cinétique d'hydratation est plus lente et la quantité de Portlandite formée est plus faible (le C_3S produit deux fois plus de $Ca(OH)_2$ que le C_2S lors de son hydratation).

CHAPITRE 2 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

- **Réactions initiales**

Cette période débute dès le contact entre l'eau et le ciment et dure quelques minutes. Le C_3S des grains de ciment réagit immédiatement avec l'eau, formant des C-S-H (métastables): les ions entrent en solution.

- **Période dormante**

Le dégagement de chaleur est faible. Aucune évolution de la pâte ne semble se produire. Les réactions chimiques ont pourtant commencé : des ions passent en solution dans l'eau durant cette phase (ions calcium, silicates, hydroxydes et sulfates). L'augmentation progressive de Ca^{2+} .

- **Période de prise**

Cette période débute lorsque la concentration en ions Ca^{2+} et OH^- de la solution devient critique, la conductivité électrique de la solution étant alors à son maximum. Cette sursaturation induit la précipitation de la portlandite.

Formation d'une couche de C-S-H en surface des grains, tendance des hydrates à précipiter dans les zones de concentration maximum autour des granules de ciment et non dans le volume de la solution où les concentrations ioniques sont inférieures et uniformes.

Cette activité chimique dégage beaucoup de chaleur. Les cristaux de portlandite et les fibres de silicate de calcium s'enchevêtrent et remplissent peu à peu les pores.

- **Période de durcissement**

Les grains anhydres se trouvent recouverts d'une couche d'hydrates qui s'épaissit de plus en plus. Pour que l'hydratation se poursuive, il faut que l'eau diffuse à travers les pores du gel. La chaleur dégagée diminue.

Si le réseau poreux est fermé, une partie du ciment n'est jamais atteinte et donc ne sera jamais hydratée. La porosité des C-S-H se remplit progressivement, les résistances se développent, les dimensions des capillaires contenant l'eau diminuent, ainsi que la vitesse de dissolution. Cette dernière diminue rapidement à cause de la formation des hydrates et de la modification consécutive des gradients de concentration.

L'eau a plus de difficulté à traverser l'épaisseur des produits hydratés pour atteindre les surfaces des composés anhydres du clinker.

2.2.2. Hydratation des aluminates

L'aluminate tricalcique est le composé du ciment le plus réactif avec l'eau. Comme l'hydratation des aluminates est très rapide, les cimentiers ajoutent du gypse au clinker afin de la contrôler (voir la figure 2.1).

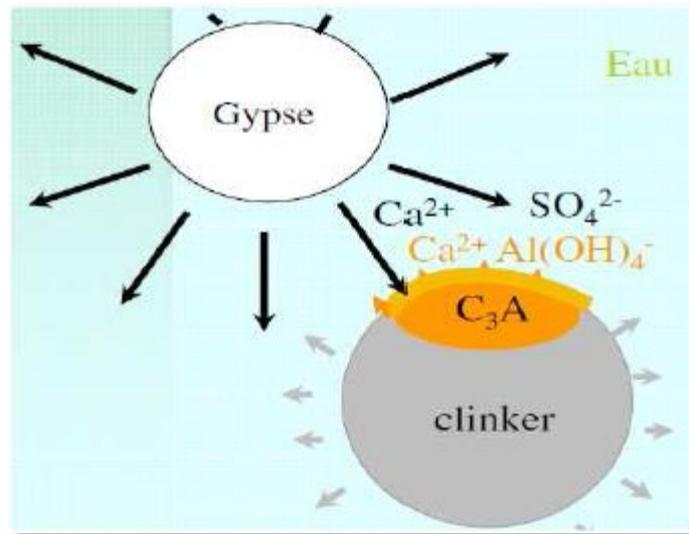
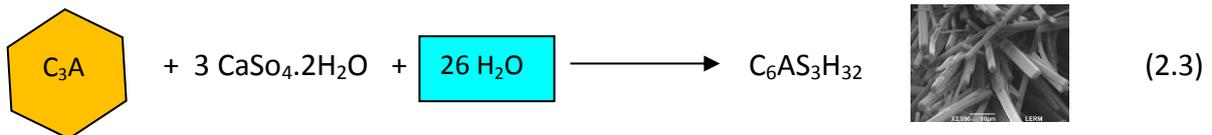


Figure 2. 1. Schématisation de la dissolution superficielle du C₃A et du gypse (Alexander et Blandine, 2009).

- **Phase initiale**

En présence d'eau, on constate instantanément :

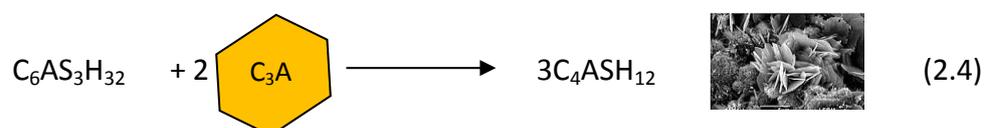
- ✓ Une dissolution superficielle du C₃A et du gypse ;
- ✓ Une précipitation de l'ettringite noté TSA⁴ à la surface des grains du clinker, leur réaction peuvent être écrite selon l'équation 2.3 :



Cette réaction est accompagnée d'un dégagement thermique important, qui correspond à la période de pré-induction, ou période dormante.

- **L'épuisement de gypse**

Lorsque la source de gypse s'épuise, la concentration en sulfates de la solution baisse. L'ettringite devient alors instable et se dissout pour former du monosulfate de calcium hydraté (appelé AFm). Les réactions chimiques s'intensifient (équation 2.4) :



⁴ TSA : Trisulfoaluminates de calcium

CHAPITRE 2 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

- **Hydratation des aluminates résiduels**

Au bout de quelques semaines, en général, l'ettringite se transforme totalement en monosulfo-aluminate.

Au-delà d'un mois, les réactions se poursuivent lentement avec l'aluminate (C_3A) et l'aluminoferrite (C_4AF) pour former de l'aluminoferrite de calcium hydraté. Même si les séquences réactionnelles sont proches du C_3A , l'aluminoferrite tétracalcique (C_4AF) est nettement plus lente à réagir et n'apparaît de manière significative qu'une fois le gypse totalement épuisé.

2.3. Cinétique d'hydratation

La pâte du ciment forme des particules d'un système dispersé, ces particules sont des grains polycristallins constitués de silicates et d'aluminates. La vitesse d'hydratation des minéraux du ciment est différente d'où : C_3A et C_3S s'hydratent plus vite que C_4AF et C_2S . L'état d'avancement de chaque minéral peut être observé de façon discontinue par analyse thermique différentielle et diffraction des rayons X (**Regourd, 1982**).

Comme cité auparavant (paragraphe 2), les réactions d'hydratation des constituants de ciment sont exothermiques. Afin de bien éclaircir ce point, le tableau 2.1 montre la quantité de chaleur dégagée de chaque minéral pour un gramme de ciment. L'hydratation de C_3A et C_3S entraînent un effet thermique important dès les premières échéances, donc nous pouvons dire qu'un ciment riche en C_3A et C_3S peut chauffer un béton de plusieurs dizaines de degrés. Les mesures calorimétriques montrent aussi que C_4AF et C_2S continuent à s'hydrater progressivement entre 28 jours et 6 mois ; en revanche, les C_3A et C_3S n'évoluent pas de façon sensible à long terme.

Tableau 2. 1. Les quantités de chaleur dégagées lors de l'hydratation pour un gramme de ciment (**Regourd, 1982**).

Constituant du ciment portland	Chaleur d'hydratation (joules/g)		
	7 jours	28 jours	6 mois
C_3S	460	502	502
C_2S	84	189	251
C_3A	773	857	865
C_4AF	168	209	293

CHAPITRE 2 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

La température du milieu et les adjuvants influent sur l'étalement de la période dormante. Dans le paragraphe qui suit, nous allons retrouver ces facteurs avec d'autres paramètres associés comme la nature du liant et la nature des constituants du béton.

2.4. Influence du matériau

2.4.1. Nature du liant (Venuat, 1976)

Le temps de prise du ciment portland, change en fonction de ses teneurs en aluminat tricalcique, en sulfates, en alcalis ainsi que par rapport à sa finesse de mouture ; de ce fait :

- La prise sera plus rapide s'il y a plus de C_3A ; mais nous pouvons la régulariser en y ajoutant le sulfate de calcium (gypse).
- Les résistances initiales seront augmentées et la prise accélérée grâce aux alcalis.
- La prise sera aussi accélérée grâce à une finesse de mouture plus élevée. L'hydratation des grains fins sera très rapide pour :

$$(\emptyset \leq 10\mu) \quad (2.5)$$

La courbe granulométrique d'un ciment ne sera donc performante et économique que lorsqu'elle s'échelonne entre 3 et 25μ et complétée par des inertes : fillers calcaires, fumées de silice, etc. A $20^\circ C$, le temps de début de prise sera nettement diminué d'une heure si la surface Blaine du ciment augmente de $1000 \text{ cm}^2/\text{g}$ en moyenne.

2.4.2. Nature des autres constituants du béton (Venuat, 1976)

- Le rôle joué par l'eau excédentaire agira comme retardateur de prise, c'est-à-dire, plus le rapport E/C est élevée plus la prise sera retardée (voir figure 2.2).
- Le temps de prise sera largement allongé s'il y a des impuretés, telles que les matières organiques d'origine animale ou végétale et les argiles. En effet, les fines argileuses empêchent la cristallisation des hydrates en enrobant les grains de ciment sous forme de pellicules minces. Nous pouvons déterminer quantitativement les éléments fins du sable grâce à l'essai de l'équivalent sable (un sable convenable $E_s > 75\%$), quand à la détermination qualitative, elle peut se faire en utilisant un test calorimétrique (bleu de méthylène).
- Le sucre même à faible teneur aura aussi comme conséquence un retard de prise, c'est pour cela une eau accidentellement sucrée, conduira à un retard de prise important.

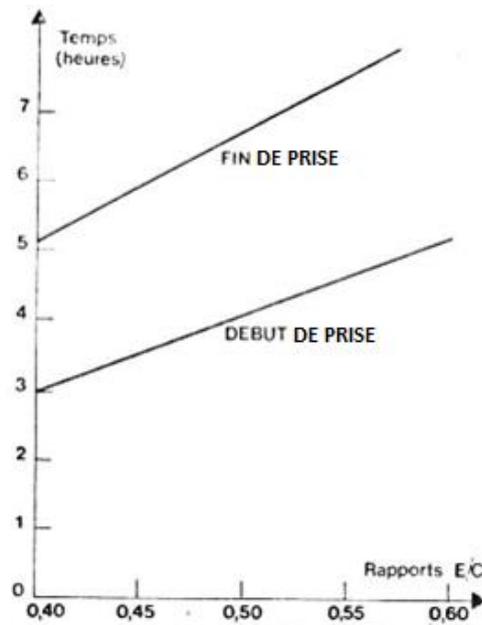


Figure 2. 2. Influence de E/C sur les temps de prise (CPA 400) (Venuat, 1976)

2.4.3. Influence du milieu (Didouche, 2012)

La température de cure a un double effet sur la cinétique d'hydratation. L'augmentation de la température active les réactions d'hydratation, et en parallèle la densité des produits d'hydratation croît en ralentissant la circulation de l'eau libre. Mais, pendant la période qui suit, le taux et le degré d'hydratation diminuent (Lin et Meyer, 2009). D'autres études (Ukrainczyk, 2010) ont révélé qu'une augmentation de la température de 5 à 10° C, augmente le flux maximal de la chaleur d'hydratation ainsi que le degré d'hydratation final. Selon (Xu et coll., 2010) la chaleur générée est accélérée par l'augmentation de la température. Le taux de chaleur dégagée croît lorsque la température augmente ; cependant, le temps pour atteindre ce maximum diminue. Ce résultat, indique qu'une cure sous une température élevée favorise l'accélération de l'hydratation et le développement des résistances mécaniques.

(Kaszyńska, 2002) a obtenu qu'à différentes températures initiales : 8, 20, 35° C, la chaleur totale dégagée n'est pas affectée pour un béton sans adjuvant et sans ajout ; alors que la cinétique du flux dégagé est largement modifiée. Par contre, pour un ciment composé adjuvanté, la cinétique du flux dégagé et la quantité de chaleur sont largement dépendant de la température.

La figure 2.3 montre l'influence de la température sur le flux et la chaleur d'hydratation d'un ciment contenant 9% de fumée de silice et 2% de superplastifiant.

CHAPITRE 2 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

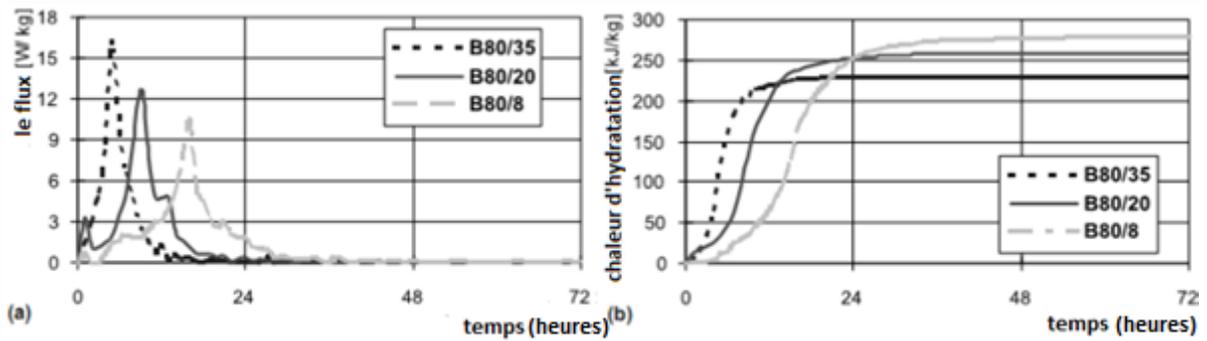


Figure 2.3. Influence de la température sur le flux (a) et la chaleur d'hydratation (b) d'un ciment composé. (B80: ciment composé exposé à des températures de 8°, 20° et 35° C) (Kaszynska, 2002)

Les essais normalisés sont effectués dans l'eau à 20° C. Cela présente les avantages suivants : température plus uniforme et pas de risque d'évaporation ; mais cela présente aussi quelques inconvénients en s'éloignant des conditions de la réalité et dans le cas d'utilisation d'adjuvants ou autre produits très solubles, il y a risque de diffusion d'une partie de ces produits dans l'eau de cure.

Les temps de prise sont plus courts lorsque la cure est réalisée à l'air par rapport à la cure par immersion des échantillons dans l'eau (surtout pour des liants se desséchant rapidement).

Les temps de prise de tous les liants hydrauliques courants sont diminués lorsque la température s'élève et, inversement, sont augmentés lorsque la température s'abaisse.

Les figures 2.4 et 2.5 indiquent que pour le début ou la fin de prise, la température a un effet important pour chacun des mélanges ($E/C = 0,3 ; 0,4 ; 0,45 ; 0,55$): plus la température augmente, plus le temps de prise diminue. Vu que la température a un effet catalyseur sur les réactions d'hydratation d'où **Venuat (1976)** a opté pour l'intervalle : 5 - 100° C par contre, **Pinto et Hover (2000)** et **Turcry et coll. (2002)** ont concentré leurs attentions sur l'intervalle 20° à 60° C.

Pour figure 2.4, les débuts de prise ont lieu à environ : 7h30 à 5° C, 4h à 20° C, 2h à 40° C et 1h à 60° C.

On sait que par temps froid, il est important de suivre la prise et l'évolution du durcissement du béton et que l'on ne tient pas compte, pour les délais de décoffrage, des jours où la température est descendue en dessous de 5° C. On sait aussi que l'on peut accélérer la prise et durcissement en chauffant le béton par temps froid et dans les usines de préfabrication, afin d'accélérer la rotation des moules et de pouvoir rapidement utiliser les pièces fabriquées (**Venuat, 1976**).

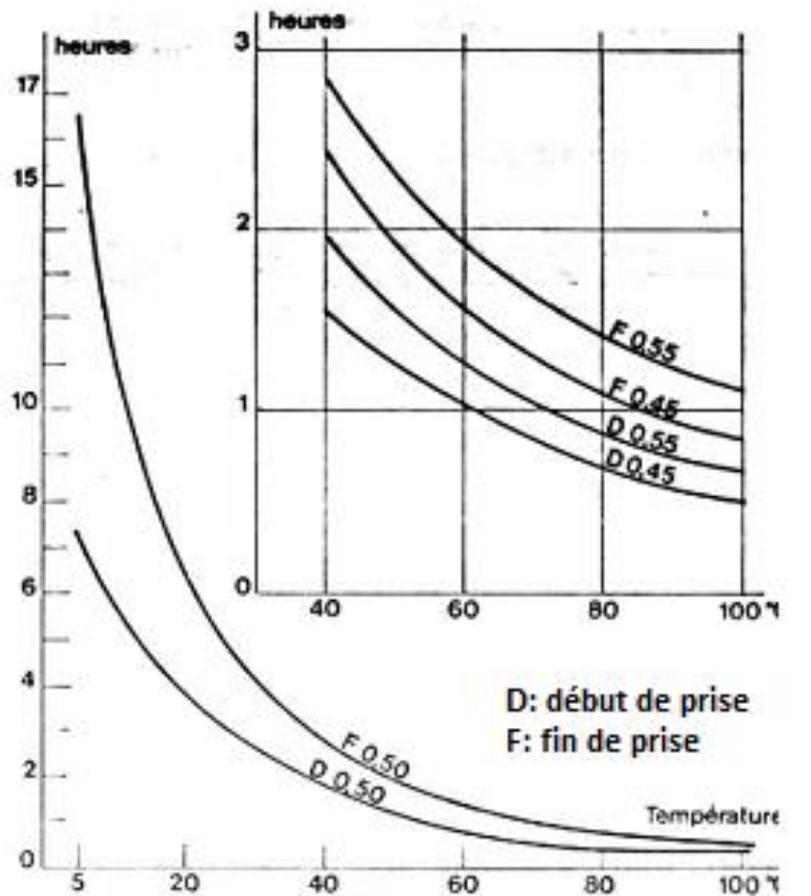


Figure 2. 4. Influence de la température sur le début et la fin de prise d'un CPA (mortier 1/3, E/C= 0.45, 0.5, 0.55) **Venuat M. (1976)**

Pour la recherche de Pinto et Hover (2000) et Turcry et coll. (2002) (voir figure 2.5) sur l'influence de la température des ciments Portland ordinaires ont trouvé que le passage de 20 à 37° C diminue le temps de début de prise de moitié.

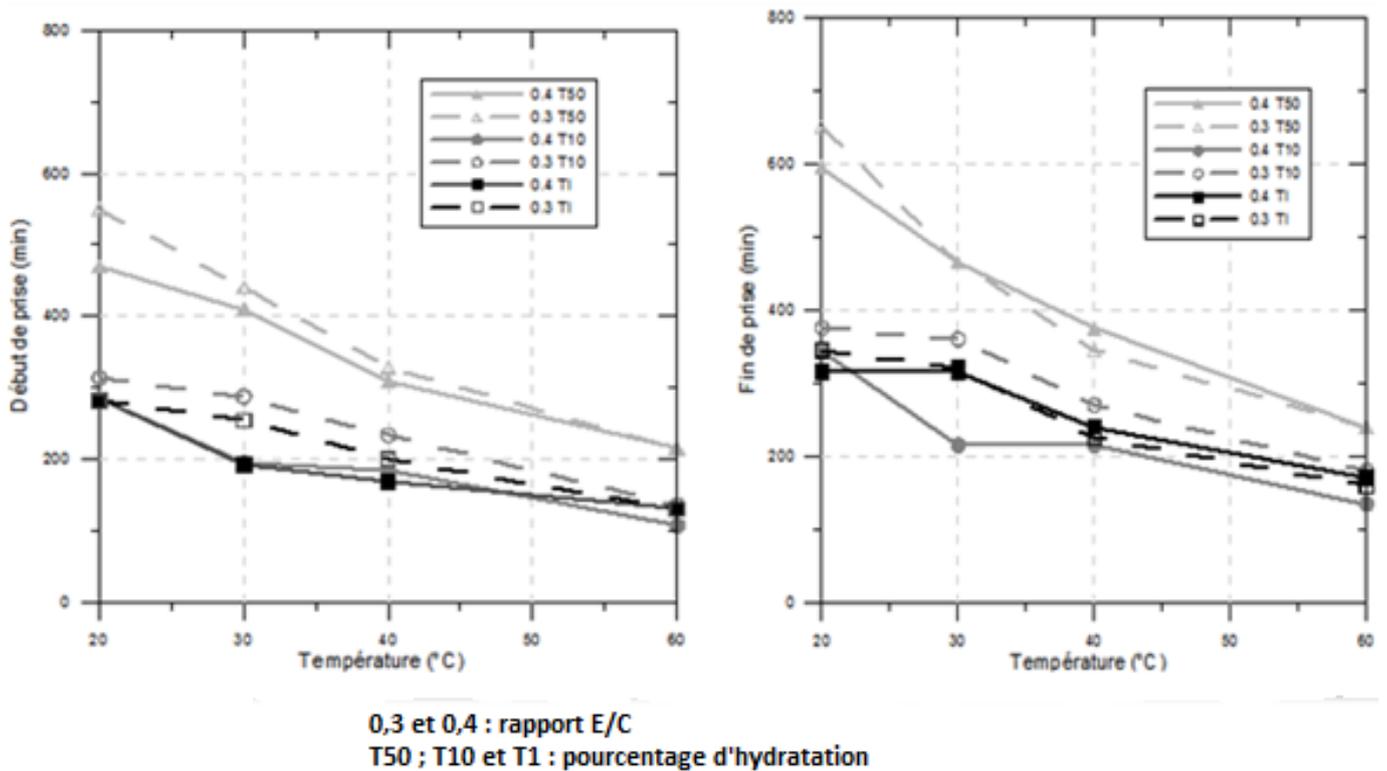


Figure 2. 5. Influence de la température sur le début et la fin de prise par **Pinto et Hover (2000)** et **Turcry et coll. (2002)**

2.4.4. Les adjuvants modifiant la prise et le durcissement (Cimbéton, 2005)

Ces adjuvants sont des produits chimiques, qui modifient les solubilités des différents constituants des ciments et surtout leur vitesse de dissolution. Physiquement, cette action se traduit par l'évolution du seuil de cisaillement dans le temps, en fonction de l'adjuvant utilisé.

Ces adjuvants ne contiennent pas de chlore; les constituants sont généralement des dérivés de la soude, de la potasse ou de l'ammoniaque. Ils sont à recommander pour les bétonnages par temps froid, les décoffrages rapides, les scellements, les travaux en galerie, les travaux sous l'eau, etc. Il est à noter qu'un béton fortement accéléré, au moyen d'adjuvants, risque d'avoir une résistance mécanique finale légèrement diminuée.

2.4.4.1. Les retardateurs de prise (NF EN 934-2)

Introduits dans l'eau de gâchage, ils ont pour fonction principale d'augmenter le temps de début de prise et le temps de fin de prise du ciment dans le béton, le mortier ou le coulis. Ils sont à base de lignosulfonates, d'hydrates de carbone ou d'oxydes de zinc ou de plomb.

CHAPITRE 2 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

En général, les retardateurs freinent la diffusion de la chaux libérée par l'hydratation du ciment et retardent de ce fait la cristallisation. Par rapport au témoin, l'augmentation du temps de début de prise est comprise entre une heure et deux heures. Au-delà de vingt-huit jours et souvent même dans un délai plus court, les résistances mécaniques sont en général augmentées par rapport au témoin. Les retardateurs de prise sont particulièrement recommandés pour les bétonnages par temps chaud et les bétonnages en grande masse. Ils permettent aussi de faciliter les reprises de bétonnage.

2.4.4.2. Les accélérateurs de prise et les accélérateurs de durcissement (NF EN 934-2)

L'accélérateur de prise a pour fonction principale de diminuer les temps de début et de fin de prise du ciment dans les bétons, les mortiers ou les coulis. L'accélérateur du durcissement a pour fonction principale d'accélérer le développement des résistances initiales des bétons, des mortiers ou des coulis. Bien souvent ces deux fonctions sont liées et l'on retrouve l'une d'elle comme effet secondaire de l'autre.

Tableau 2. 2. Adjuvants normalisés modifiant la prise et le durcissement du ciment (**extrait du guide SYNAD : Syndicat National des Adjuvants pour Bétons et Mortiers**)

Adjuvants normalisés modifiant la prise et le durcissement du ciment (extrait du guide SYNAD)					
		Accélérateurs de prise	Accélérateurs de durcissement	retardateurs de prise	
Dosage / masse de ciment		1 à 3 %	0.2 à 3 %	0.1 à 1%	
Introduction		Dans l'eau de gâchage			
Effets sur la prise		Accélération variable suivant les dosages Les types de ciments et les températures.		Retards très variable suivant dosages, ciments, températures	
Effets sur les résistances	Initiales (avant 3 jours)	Augmentées à 1 ou 2 jours	Augmentées	Diminuées à 1 ou 2 jours.	
	Finales (après 28 jours)	Légèrement diminuées (d'autant plus que la prise aura été accélérée)	Inchangées ou légèrement diminuées	Légèrement augmentées	
Effets secondaire favorables		-	-	Avec possibilité de réduction d'eau	
Autres effets		Possibilité d'une légère augmentation de retrait		-	

2.5. Fausse prise (Venuat, 1976)

Il y a risque de fausse prise qui peut survenir après le gâchage de la pâte, du mortier de ciment, ou du béton et cela est dû à une soudaine augmentation de la viscosité et du raidissement du matériau. Pour y remédier, on peut faire un malaxage prolongé afin de redonner la viscosité initiale du matériau permettant ainsi d'obtenir des temps de prise normaux.

CHAPITRE 2 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Ce qui pourrait expliquer ce phénomène serait la déshydratation du gypse que l'on introduit dans la masse de clinker afin de régulariser la prise. Lors du broyage du mélange clinker-gypse, la température peut atteindre 100 à 150° C dans les broyeurs, ce qui correspond à la température de déshydratation du gypse en semi-hydrate :



Cela peut s'expliquer aussi par le fait que le semi-hydrate non combiné aux aluminates est avide d'eau ainsi il y a formation de cristaux de gypse sous forme d'aiguilles, qui rendent la pâte rigide lors du malaxage. Néanmoins avec un malaxage prolongé, on obtient la rupture de ces cristaux.

Nous pouvons en conclure que les ciments ayant plus de gypse sont sujets à la fausse prise. Il est alors important de faire la différence entre une prise rapide (accélérée) et la fausse prise, la première étant accompagnée d'un dégagement de chaleur quant à la seconde elle est dite thixotropique.

Il y a un autre moyen de combattre la fausse prise. Cela nécessite de refroidir l'intérieur du broyeur lorsque la température dépasse 110° C et cela grâce à la pulvérisation de vapeur d'eau ou en utilisant du clinker froid, ou encore en ajoutant des agents de mouture. Il y a toujours un risque de voir la fausse prise apparaître et cela malgré toutes ces précautions, de ce fait, il faudrait augmenter la durée du malaxage.

Il faut savoir que ce phénomène peut être utilisé à profit, dans le cas où il faut :

- Limiter le ressuage.
- Démouler rapidement certaines pièces.
- Faciliter l'accrochage sur le support des enduits projetés.

3. Etude comparatif du comportement de bétons et de mortiers

3.1. Mortiers de béton équivalent (MBE)

La méthode de calcul des MBE a été développée dans le cadre du projet national français « Calibé », afin de résoudre les problèmes liés à l'usage des bétons adjuvantés. Certains d'entre eux présentent des fausses prises, sans raison apparente. Pour ce faire, une recherche de méthodes facilitant les essais sur mortiers était nécessaire.

Cette méthode repose sur le fait qu'il existe une corrélation simple entre les propriétés rhéologiques d'un béton au mortier qui le compose. Cependant, on n'obtient pas le même mortier en le tamisant au tamis de 5mm puisqu'une partie de l'eau et de la pâte sera forcément collée ou absorbée par les granulats, objet de refus à ce tamis.

CHAPITRE 2 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

La méthode MBE se base sur :

- L'identification de la composition granulométrique des sables et des granulats,
- Le calcul de la surface de chaque tranche granulaire,
- La substitution aux fractions les plus grossières, l'ajout d'un matériau de manière à reconstituer un mortier équivalent qui aura la même surface granulaire totale que celle du béton initial.

Le calcul de la composition des MBE s'appuie sur l'idée que ce sont les surfaces de contact des constituants qui importent, plus que leur volume. Deux réflexions s'en dégagent :

- la première découle du fait que l'ouvrabilité d'un béton provient de la façon dont ses constituants arrivent à « glisser » les uns sur les autres pour s'écouler.
- la seconde a pour origine la chimie de la prise ; les hydrates se forment plutôt au niveau des interfaces (figure 2.6) (**Dierkens, 2005**).



Figure 2. 6. Formation d'hydrates à la surface des granulats (**Acker, 1988**)

De ce fait, un MBE est la méthode qui nous permet de remplacer les grains du béton par du sable qui possède une surface de grains du même diamètre que celle du gravier ôté (voir figure 2.7).

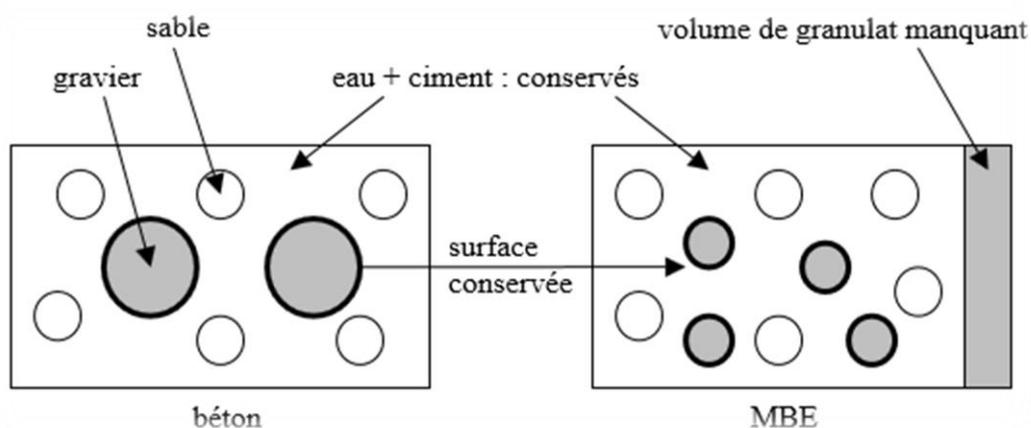


Figure 2. 7. Passage du béton au MBE (**Dierkens, 2005**)

CHAPITRE 2 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Lorsqu'on passe de la formulation d'un béton à celle d'un MBE:

- l'étendue granulométrique est diminuée, ce qui conduit à une augmentation des distances inter granulaires.
- les graviers du béton sont remplacés par du sable de même surface. Le rapport surface/volume des petites particules étant plus élevé que pour les grandes, le gravier est remplacé par une masse moindre de sable. Indépendamment de l'air (non contrôlable), la capacité calorifique du MBE est alors plus faible que celle du béton associé, alors que la chaleur d'hydratation produite est conservée. Les MBE devraient donc atteindre des températures plus élevées que leurs bétons associés. Leurs réactions de prise seront ainsi plus thermo activées que celles des bétons.
- on peut penser qu'il existe un lien entre la fluidité initiale des bétons et celle des MBE associés, le volume d'eau et les surfaces de ciment et de granulats étant conservées. Cet aspect a d'ailleurs été vérifié lors du projet Calibé. Cent bétons (allant du B25 au B40, E/C compris entre 0,44 et 0,64), et 1200 MBE, utilisant 30 adjuvants différents (plastifiants, superplastifiants, hauts réducteurs d'eau), ont été fabriqués. Les essais ont été réalisés au moyen du classique cône d'Abrams pour les bétons. Un mini-cône a par contre été utilisé pour les MBE (figure 2.8), du fait de la diminution du volume de matériau représentatif. Dans le cas des MBE, c'est l'étalement qui a été mesuré et non plus l'affaissement, compte tenu de la grande fluidité de ces matériaux lorsqu'ils sont adjuvés (**Dierkens, 2005**).

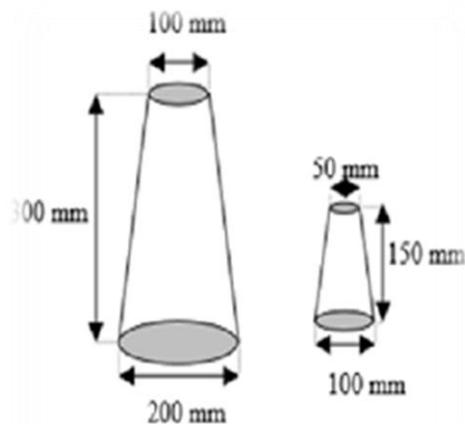


Figure 2. 8. Cône d'Abrams et mini cône (**Dierkens, 2005**)

Une corrélation linéaire a alors été trouvée entre l'affaissement des bétons et l'étalement des MBE, sur une durée de 90 à 120 minutes (1 mesure toutes les 15 min). La droite obtenue varie selon les formulations testées et selon les températures de coulée. Les coefficients de détermination sont compris entre 0,72 (plutôt mauvais) et 0,99 (bonne corrélation) (**Dierkens, 2005**).

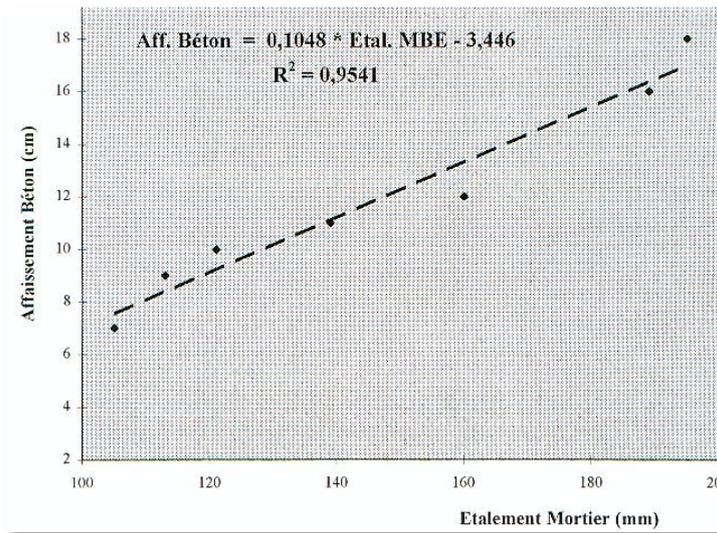


Figure 2. 9. Corrélation linéaire entre affaissement au cône et étalement au mini cône (Dierkens, 2005).

3.2. Mortiers thermiquement équivalents (MT)

Les réactions chimiques intervenant dans la prise des bétons sont de types thermo activées. Afin d'obtenir des mortiers comparables à des bétons donnés, il faut tenter de conserver une même histoire thermique, en fabriquant des mortiers dégageant la même chaleur d'hydratation et ayant la même chaleur spécifique massique. Pour arriver à ce résultat, il suffit de conserver les quantités de ciment et d'eau et de remplacer le gravier par une même masse de sable, celle du mortier est égale à la somme des masses de sable et de gravier du béton (figure 2.10) (Dierkens, 2005).

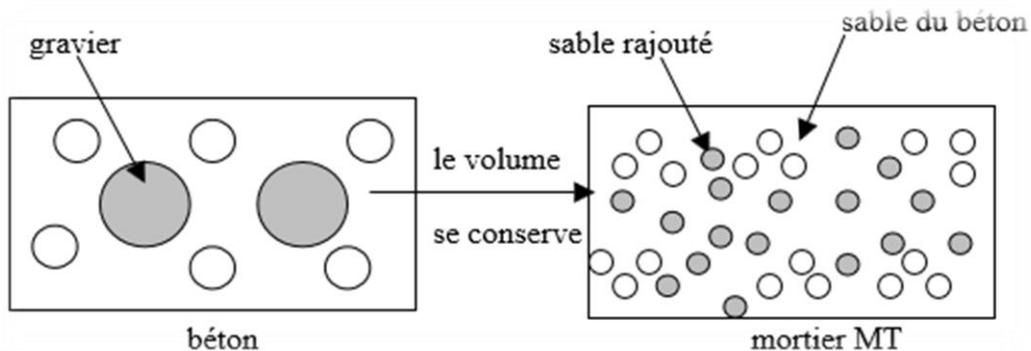


Figure 2. 10. Passage du béton au mortier MT (Dierkens, 2005)

CHAPITRE 2 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Lorsqu'on passe de la formulation d'un béton à celle d'un mortier MT :

- le remplacement du gravier par du sable diminue l'étendue granulométrique (le mortier est réalisé avec une partie du sable du béton) : donc ils ont obtenu une augmentation de la distance inter granulaire.
- le gravier a été remplacé par une même masse de sable. Les grains de sable ayant un volume plus petit que celui des graviers, il en résulte que la surface globale des granulats a augmenté, alors que la surface du ciment et de l'eau est conservée. On peut ainsi penser que les mortiers MT frais sont moins fluides que les bétons associés car il faut plus de pâte pour enrober et écarter les grains de sable de manière comparable.
- la quantité d'air présente dans le mortier MT ne peut pas être contrôlée lors de sa fabrication. Celle-ci peut donc varier d'une formulation à l'autre et avoir une influence (très faible) sur l'inertie thermique du matériau, qui ne sera donc pas rigoureusement conservée lors du passage du béton au mortier MT (**Dierkens, 2005**).

3.3. Comparaison des deux mortiers

Dierkens (2005) compare entre béton associé aux mortiers MT et MBE et cela par rapport au volume de granulats, nous résumons ses remarques dans le tableau 2.3.

Tableau 2. 3. Comparaison entre MBE, MT et béton associé

Volume granulat	Remarques
MT = béton associé	➤ Tous les deux possèdent le même volume
MBE < béton associé	➤ Moins de sable dans le MBE que dans le MT ➤ les propriétés rhéologiques sont corrélables

Nous obtenons par conséquent les résultats suivants :

- La capacité calorifique des MBE est faible par rapport au MT, cela veut dire que les réactions chimiques de leur prise sont plus thermo activées, car ils atteindront une température plus élevées.
- Puisque le sable est utilisé pour le MT et le MBE, la courbe granulométrique des MT est moins complète que celle du MBE. Cela nous amène à penser que les distances inter granulaires vont être plus grandes pour le MT que les MBE. Ces derniers auront une prise plus rapide que les MT associés.

CHAPITRE 2 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

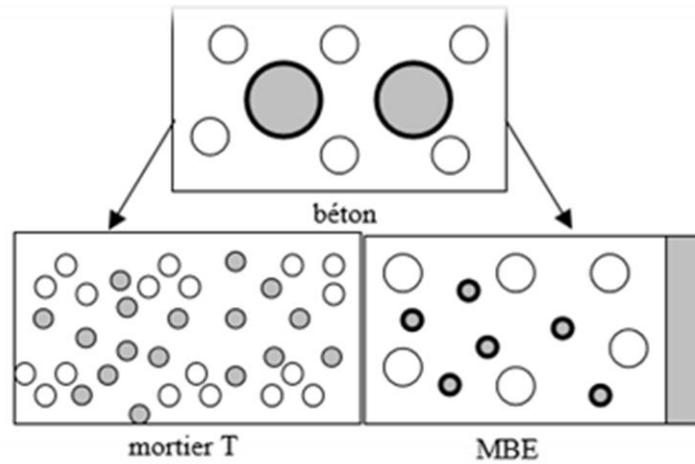


Figure 2. 11. Comparaison MBE et MT (Dierkens, 2005)

La figure 2.11, fait référence à la comparaison de (Dierkens, 2005) pour MBE et MT. Il nous sera possible de faire une comparaison entre MBE et béton associés et cela à condition de ramener la figure 2.12 à 1 m^3 .

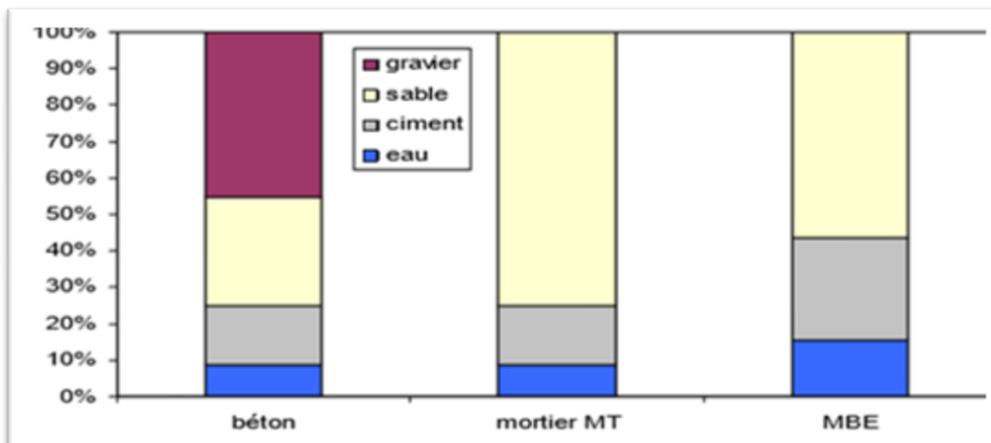


Figure 2. 12. Comparaison massique d'un béton du mortier MT associé et du MBE associé. (Dierkens, 2005)

CHAPITRE 2 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

L'ensemble des considérations citées ont été résumé dans les schémas correspondant à la figure 2.13.

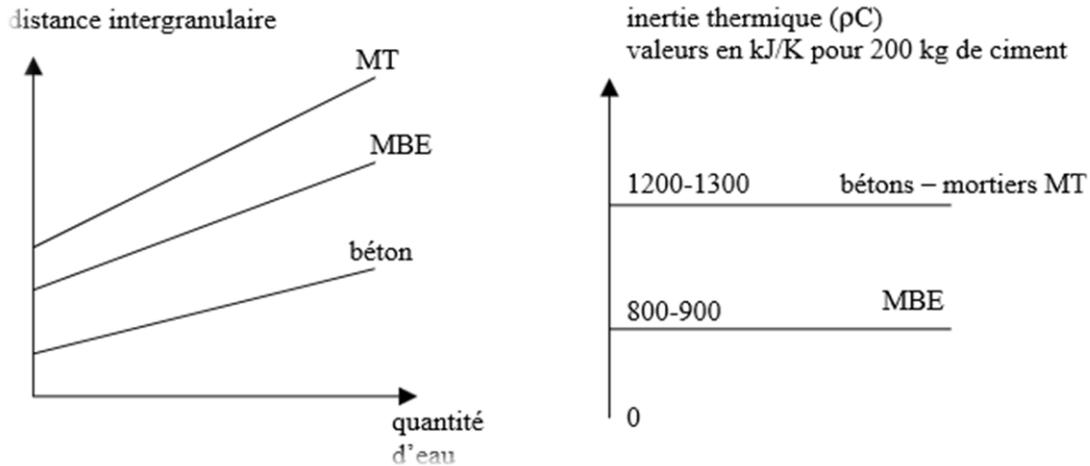


Figure 2. 13. Quelques différences entres béton, MBE et MT (Dierkens, 2005)

3.4. Mortiers classiques du béton (MB)

Ces matériaux comme leur nom l'indique sont issus de mélange d'eau, de ciment et de sable ; les graviers ne font pas partie du mélange. Nous établissons la composition de ces mortiers à partir de la composition initiale du béton de graviers en le tamisant (BRIXI, 2014).

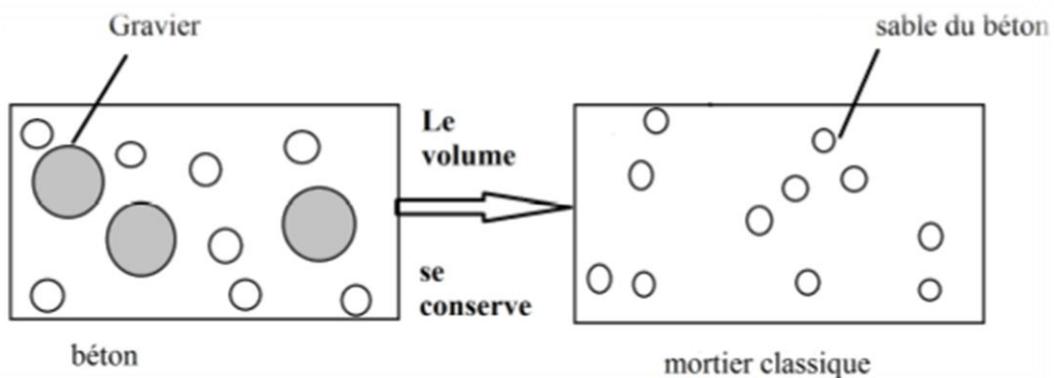


Figure 2. 14. Passage du béton au mortier classique (Brixi, 2014)

CHAPITRE 2 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Au regard de ce qui précède et des éléments de comparaison entre les deux matériaux MBE et MT, quel type de mortier va-t-on choisir afin de définir le temps de prise d'un béton imprimé ?

Notre choix se porte vers le MT pour l'élaboration au laboratoire de notre travail de recherche, puisque nous n'aurons rien à changer dans la composition de la pâte. Nous mélangerons le même dosage de ciment et d'eau que le béton qui lui est associé (figure 2.12). Nous nous accommoderons ainsi des inconvénients que cela induit, particulièrement ceux relatifs à la distance granulaire entre les grains de sable qui serait plus élevée.

4. Procédures d'essais normalisés

De nombreux dispositifs et méthodes ont été développés jusqu'à maintenant dans le but de caractériser les étapes de la prise et de la définir. Lors de notre étude, nous utiliserons l'essai de Vicat et la pénétration de la méthode A, afin de réaliser nos essais de prise sur le Mortier Thermiquement équivalent (MT). Sachant que la température est un facteur essentiel à la variation du temps de prise, nous nous sommes arrangées pour faire des essais à différentes températures.

4.1. L'essai de prise

4.1.1. Essai Vicat

Cet essai porte le nom de son inventeur français Vicat mis en point en 1820 afin d'étudier le temps de prise des chaux hydrauliques. Cet essai est effectué à l'aide d'un appareil constitué d'aiguilles chargées d'un poids de 300 g (voir figure 2.15).

L'essai de Vicat est standardisé par la norme NF P15-431 où le matériau utilisé, une pâte pure ou un mortier 1/3, remplit un anneau tronconique de 4 cm de hauteur, 7 cm de diamètre supérieur et 8 cm de diamètre inférieur. L'essai consiste à cisailer ce matériau à l'aide d'une aiguille de section 1 mm² qui y tombe avec une énergie potentielle, due à la pesanteur, dans le corps d'épreuve qui développe des forces de frottement au cours de son évolution dans le temps, jusqu'à son arrêt.



Figure 2. 15. Appareil de Vicat

4.1.2. Essai sur pâte pure NA 230

4.1.2.1. Détermination de la consistance normale

Avant la détermination du temps de prise pour la pâte de ciment, il faut passer par la détermination de la consistance normale. Afin de déterminer cette dernière, nous avons utilisé l'appareil de Vicat avec une sonde d'un diamètre (10 ± 0.05) mm et d'une longueur effective d'au moins 45 mm.

➤ Préparation de la pâte de ciment

À l'aide d'une balance électronique, nous avons pesé 500 g de ciment avec une certaine quantité d'eau par exemple nous avons débuté notre essai par un dosage de 127.5 g.

Au moyen d'un malaxeur mécanique, nous avons malaxé chaque gâchée de pâte de ciment, en considérant les différentes étapes, présentées dans le tableau 2.4.

Tableau 2. 4. Les étapes de malaxage de la pâte

opérations	Introduction de l'eau et le ciment	Vitesse 1	Raclage de la cuve	Vitesse 1
Durée des opérations	10 s au maximum	90 s	30 s	90 s
État du malaxeur	Arrêt	Vitesse lente	Arrêt	Vitesse lente

CHAPITRE 2 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Après ces opérations, la pâte est rapidement introduite dans le moule tronconique posée sur une plaque de verre d'épaisseur de 2.5 mm, sans tassement ni vibration excessifs. Il suffit d'enlever l'excès de la pâte par un mouvement va-et-vient grâce à une truelle maintenue perpendiculaire à la surface du moule. On place le moule et la plaque de base dans l'appareil de Vicat en le centrant sous la sonde, on abaisse cette dernière doucement jusqu'à ce qu'elle soit en contact avec la pâte. Quand la sonde s'immobilise (une pause de 1 à 2s) pour éviter de donner une vitesse initiale ou une accélération forcée aux parties mobiles, puis on lâche rapidement les parties mobiles en laissant la sonde pénétrer verticalement au centre de la pâte. On mesure la distance entre l'extrémité de la sonde et la plaque de la base. Cette distance caractérise la consistance.

Si la distance est égale à (6 ± 1) mm, on a la consistance normale, sinon on doit refaire l'essai avec différents dosages d'eau jusqu'à atteindre la valeur recherchée de la consistance.

4.1.2.2. Détermination du temps de début de prise

On malaxe la pâte et on remplit le moule tronconique suivant le paragraphe 4.1.2.1. On place l'appareil de Vicat dans un bain Marie pour contrôler la température $(20 \pm 1)^\circ \text{C}$; le moule étant plongé dans l'eau. On baisse l'aiguille doucement jusqu'à ce qu'elle soit en contact avec la pâte. Quand l'aiguille s'immobilise (une pause de 1 à 2 s) on évite de donner une vitesse initiale ou une accélération forcée aux parties mobiles. Puis on lâche rapidement les parties mobiles (tige + aiguille amovible = 300 g) et on laisse l'aiguille pénétrer verticalement dans la pâte. On répète l'opération de pénétration sur la même éprouvette en des points régulièrement espacés, jusqu'à ce que l'aiguille s'arrête à une distance de (4 ± 1) mm, on aura atteint donc le temps de début de prise.

4.1.2.3. Détermination de temps de fin de prise

On retourne le moule utilisé dans le paragraphe 4.1.2.2, pour effectuer l'essai de fin de prise sur la face de l'éprouvette qui était à l'origine en contact avec la plaque de base. On Immerge le moule et la plaque de base dans le bain Marie. On répète les mêmes étapes du paragraphe 4.1.2.2 jusqu'au ce que l'aiguille ne pénètre pour la première fois que de 0.5 mm dans l'éprouvette, c'est la fin de prise.

4.1.3. Essai sur Mortier 1/3 NA 234

4.1.3.1. Confection du mortier

Les différents constituants du mélange (ciment, sable, eau) ont été pesés en utilisant une balance numérique. Le mortier de référence est préparé avec une partie de ciment, trois parties de sable normal et une demi-partie d'eau. On procède au mélange dans un malaxeur automatique muni d'un système de réglage de vitesse. La méthodologie est récapitulée dans le tableau 2.5 :

CHAPITRE 2 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau 2. 5. Méthodologie pour le malaxage du mortier normal.

Opérations	Introduction de l'eau et de ciment	malaxage	Introduire le sable	malaxage	Raclage da la cuve		malaxage
Durée des opérations		30 s	30 s	30 s	30 s	60 s	60 s
Etat du malaxeur	Arrêt	Petite Vitesse	Petite vitesse	Grande vitesse	Arrêt		Grand Vitesse

4.1.3.2. Temps de prise

Suivant la norme NA 230, la détermination du temps de prise suit les étapes qui sont expliquées dans les paragraphes 4.1.2.2 et 4.1.2.3, en prenant compte que la pénétration sur un mortier doit être de 2.5 mm pour l'obtention du temps de début de prise.

4.2. Pénétration d'une aiguille (méthode A)

L'essai « A » utilise la mesure de la force nécessaire pour faire pénétrer une aiguille dans le béton jeune dont la plage de résistance est entre 0,2 et 1,2 MPa. La mesure est faite à l'aide d'un pénétromètre avec ressort étalonné comportant une aiguille de 3 ± 0.1 mm de diamètre, et de pointe conique dont l'angle est de $60\pm 5^\circ$. L'extrémité de cette aiguille doit être enfoncée jusqu'à une profondeur de 15 ± 2 mm dans le béton projeté où la couche du béton a une épaisseur ≥ 100 mm. L'essai est réalisable en tout point, sans préparation (Voir figure 2.16) (ASQUAPRO, 2007).



Figure 2. 16. Appareil de pénétration (méthode A) (Shotcrete Penetrometer, 2014)

CHAPITRE 2 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Vu la non disponibilité de cet appareil, on a fabriqué un appareil qui s'inspire du même principe où on mesure le déplacement au millimètre par la pénétration d'une aiguille de Vicat à une profondeur de 20 mm dans le cône tronconique. Ce dernier est utilisé dans l'essai de prise sur un mortier thermiquement équivalent (MT).

5. Conclusion :

Les réactions d'hydratation du ciment portland sont complexes et leur étude est encore d'actualité. Les deux théories principales de LeChatelier (dissolution-précipitation) et Michaelis (réaction topo-chimique) de la fin du 19^{ème} siècle sont revisitées avec l'utilisation d'équipements sophistiqués : microscopie électronique et spectrométrie de photoélectrons. On suit maintenant en temps réel et dès le jeune âge les phénomènes synergiques relatifs à l'hydratation des constituants du ciment.

Cependant, les méthodes de caractérisation de la prise des matériaux cimentaires plastiques n'ont pas connu d'avancée significative depuis les travaux de Vicat au milieu du 19^{ème} siècle à cause de la simplicité de cette norme qui permet la mesure du temps de prise en considérant le frottement d'un matériau cimentaire sur la surface latérale d'une aiguille rigide qui le cisaille.

La mise en revue des mortiers équivalents au béton ainsi que leurs caractéristiques différentes, nous a conduites à choisir le mortier thermiquement équivalent qui permet de garder les mêmes proportions de ciment et d'eau que le béton qu'il simule.

CHAPITRE 3
CARACTERISATION DES
MATERIAUX ET
PROCEDURES
EXPERIMENTALES

CHAPITRE 3 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

Introduction

Dans cette partie du mémoire, on va présenter les matériaux utilisés et les méthodes préconisées pour réaliser notre programme expérimental.

Ce programme consiste à identifier l'influence de la température sur la prise du béton imprimé. On rappelle qu'on a choisi de travailler au laboratoire sur un mortier thermiquement équivalent (voir chapitre 2) au béton de ciment et on fait varier les températures dans l'intervalle : 6 - 35° C, en utilisant deux durcisseurs de surface différents. La mesure des temps de prise de ces mortiers se fait à la fois avec la méthode classique (appareil de Vicat) et aussi à l'aide d'une méthode pouvant facilement être utilisée in situ.

La figure 3.1 représente l'organigramme des principales étapes du programme expérimental où l'on caractérise d'abord les constituants des mortiers et on aborde après l'identification des propriétés des différents mélanges, évoluant dans divers conditions de température.

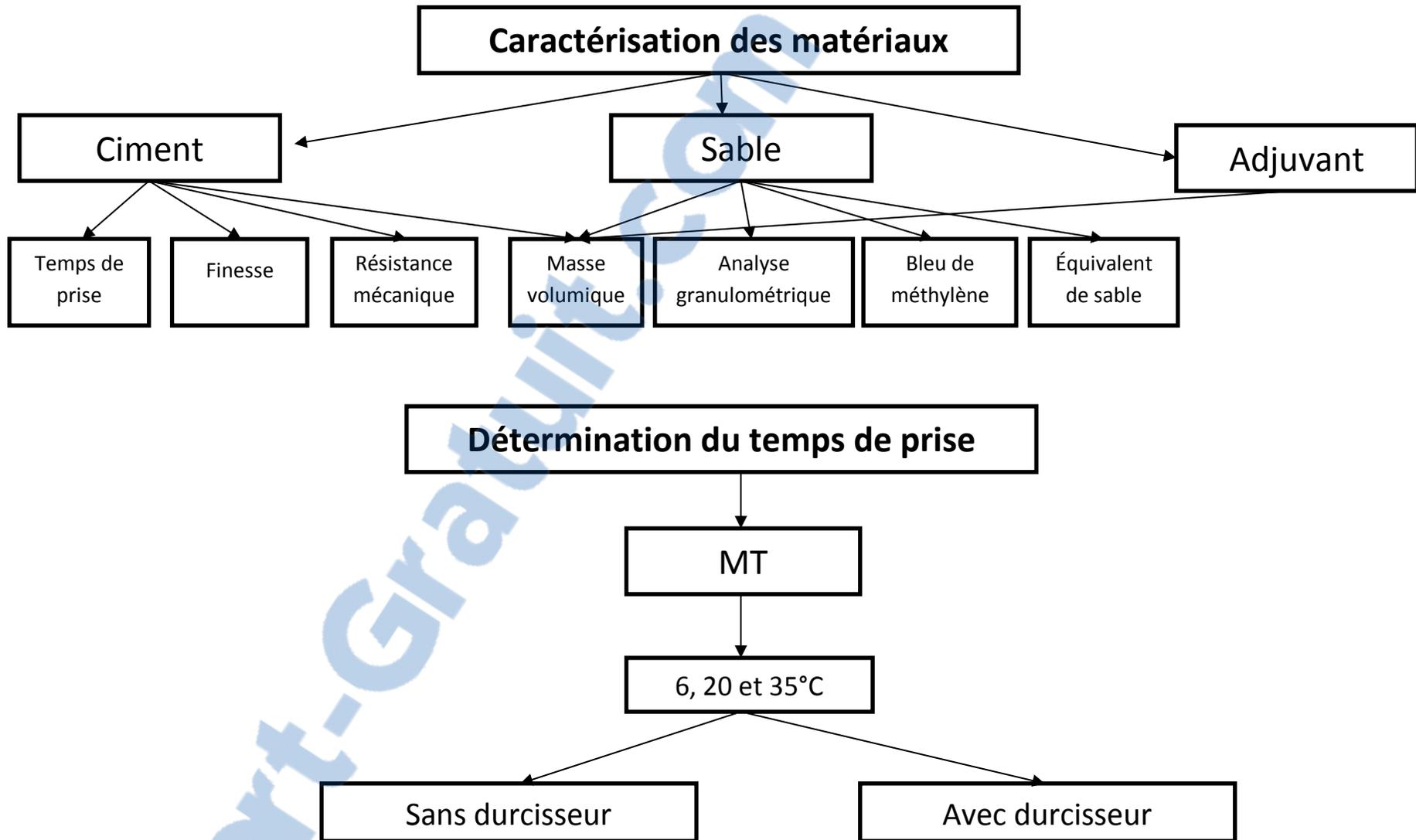


Figure 3. 1. Programme expérimental

CHAPITRE 3 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

2. Caractérisation des matériaux utilisés

2.1. Ciment

Le ciment utilisé dans le cadre de ce travail est désigné sous le nom de **MATINE**. Ce dernier est un ciment composé, de classe 42.5 et de sous classe B. Il contient donc environ un tiers d'ajouts minéraux.

Les principales applications de ce ciment sont :

- Secteur habitat (logements et d'autres constructions civiles) ;
- Secteur travaux publics (tunnels, ponts, port, aéroport, etc.) ;
- Secteur hydraulique (barrages, châteaux d'eau, station d'épuration, station de dessalement, etc.) ;
- Secteur industriel.

2.1.1. Composition chimique et minéralogique

Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO₂) à caractère acide. On trouve également l'alumine (Al₂O₃) et le fer (Fe₂O₃). Sa composition chimique et minéralogique est résumée dans le tableau 3.1.

Tableau 3. 1. Composition chimique et minéralogique de Matine (**Fiche technique de MATINE**)

Analyse chimique						
Désignation	Perte au feu %	Résidus insolubles %	Teneur en sulfates SO ₃ %	Teneur en oxyde de magnésium MgO %	Teneur en chlorures %	Teneur équivalent en alcalis %
%	7.50 – 12	0.7 – 2	2 – 2.7	1 – 2.2	0.01 – 0.05	0.3 – 0.75
Désignation	Composition hypothétique du clinker					
%	C ₃ S %	C ₂ S %	C ₃ A %	C ₄ AF %		
	58 – 64	12 – 18	6 – 8	10 – 12		

2.1.2. Caractéristique physico-mécanique

2.1.2.1. Masses volumiques (apparente et absolue)

Pour le calcul de la masse volumique absolue et apparente, nous avons utilisé la méthode du pycnomètre pour la première et la méthode par pesées pour la deuxième. Nous avons répété les essais 3 fois pour déterminer une moyenne. Les résultats des masses volumiques sont récapitulés dans le tableau 3.3.

CHAPITRE 3 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

2.1.2.2. Essai de consistance

Le but de cet essai est de déterminer la quantité d'eau nécessaire pour obtenir la consistance normale. Cette dernière a été mesurée à l'aide de l'appareil Vicat conformément à la norme NA 230. Les résultats relatifs à la consistance sont consignés dans le tableau 3.3.

2.1.2.3. Essai de prise

A l'aide de l'aiguille de Vicat, nous avons réalisé cet essai suivant la norme NA 230. Les étapes de ce dernier sont bien détaillées dans le paragraphe 4.1.2 du chapitre 2. Les temps de début et fin de prise sont récapitulés dans le tableau 3.3.

2.1.2.4. Essais mécaniques sur mortier normalisé

- **Sable normalisé NA 234**

Nous avons utilisé un sable normalisé conformément à la composition granulométrique présentée dans le tableau 3.2 :

Tableau 3. 2. Composition granulométrique du sable normalisé

Dimensions des mailles carrées (mm)	Refus cumulés sur les tamis (%)
2	0
1.6	7 ± 5
1	33 ± 5
0.5	67 ± 5
0.16	87 ± 5
0.08	99 ± 1

La courbe granulométrique est déterminée par une analyse granulométrique réalisée sur un échantillon représentatif de sable, d'une masse totale au moins égale à 1 345 g. Le tamisage doit être poursuivi jusqu'à ce que la quantité de sable passant à travers chaque tamis soit inférieure à 0,5 g/min.

- **Conservation des éprouvettes**

Après le malaxage du mortier (paragraphe 4.1.3.1 du chapitre 2) destiné à l'essai de compression, nous avons versé la première des deux couches dans chacun des compartiments du moule métalliques huilés de forme prismatique de dimensions 4x4x16 cm. Ensuite, nous avons procédé au serrage des deux couches de mortier par 60 chocs chacune grâce à l'appareil à chocs (figure 3.2). Après 24h, nous avons démoulé en prenant

CHAPITRE 3 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

soin de ne pas détériorer les éprouvettes, ensuite nous les avons marquées, immerger dans un bac contenant de l'eau à $(20,0 \pm 1,0)^\circ\text{C}$ et conserver jusqu'au jour de l'écrasement.



Figure 3. 2. Appareil à choc (photo prise par les auteurs)

- **Description de l'essai**

Un appareil de flexion a été utilisé pour déterminer la résistance à la traction par flexion 3 points (figure 3.3a). Après rupture, les deux morceaux de l'éprouvette prismatique servent à l'essai de la résistance à la compression axiale (figure 3.3b). La mise en charge doit se faire d'une manière continue jusqu'à la rupture de prisme. L'objectif est de suivre l'évolution de la résistance à la compression.



Figure 3. 3. Essais mécaniques a) traction par flexion, b) compression (photos prise par les auteurs)

CHAPITRE 3 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

Les résultats des essais sont rassemblés dans le tableau 3.3.

Tableau 3. 3. Caractéristiques physico - mécaniques du ciment

Masse volumique apparente (kg/m ³)		894,47
Masse volumique absolue (kg/m ³)		2924
Consistance normale (%)		w = 26,32 (131.6 g)
Temps de début de prise (min)		145
Temps de fin de prise (min)		235
Résistance à la compression (MPa)	28 jours	42,52

Les résultats montrent que le ciment est conforme aux exigences de sa classe CEM II/B 42,5. Ces valeurs s'insèrent dans les intervalles indiqués par le tableau 3.4.

Tableau 3. 4. Caractéristiques physico - mécaniques du ciment NA 442(**Fiche technique de ciment MATINE**)

Propriétés physiques	Consistance normale (%)	25 – 28,5
	Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g) (NA 231)	3750 – 5250
	Retrait à 28 jours en µm/m	< 1000
	Expansion en mm	0,3 – 2,5
Temps de prise à 20 °C (NA 230)	Temps de début de prise (min)	140 – 195
	Temps de fin de prise (min)	195 – 290
Résistance à la compression (NA 234)	2 jours (MPa)	≥ 10
	28 jours (MPa)	≥ 42,5

2.2. Sable

Pour nos essais, nous avons utilisé un sable normalisé obtenu par tamisage de sable 0/4 provenant de la carrière de l'ENG⁵ à Sidi Abdelli. L'échantillonnage s'est fait à l'aide de la norme **NA 5082**, et l'analyse granulométrie est contrôlée par la norme **NA 2607**.

2.2.1. Identification du sable

2.2.1.1. Prélèvement au laboratoire (échantillonnage) NA 5082

Le passage de l'échantillon total prélevé sur le tas à l'échantillon réduit, nécessaire à l'essai, peut se faire par quartage ou à l'aide d'un échantillonneur. L'échantillon doit être séché à

⁵Entreprise Nationale Algérienne des Granulats

CHAPITRE 3 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

l'étuve à 105°C s'il est exempt de minéraux argileux, ce qui est rare, ou à 60°C dans le cas contraire.

- **Échantillonneur :**

Nous avons utilisé cet appareil (figure 3.4) en vue de diviser facilement en deux parties représentatives la totalité d'un échantillon initial. Chaque moitié étant recueillie dans un bac de manière séparée. La répétition en cascade de cette opération, en retenant à chaque opération le contenu de l'un des bacs, permet d'obtenir l'échantillon représentatif, après trois ou quatre opérations identiques.



Figure 3. 4. Echantillonneur (photo prise par les auteurs)

Le procédé est résumé dans la figure 3.5. Celle-ci permet de sélectionner une masse (m) à partir d'un prélèvement de masse $3m$.

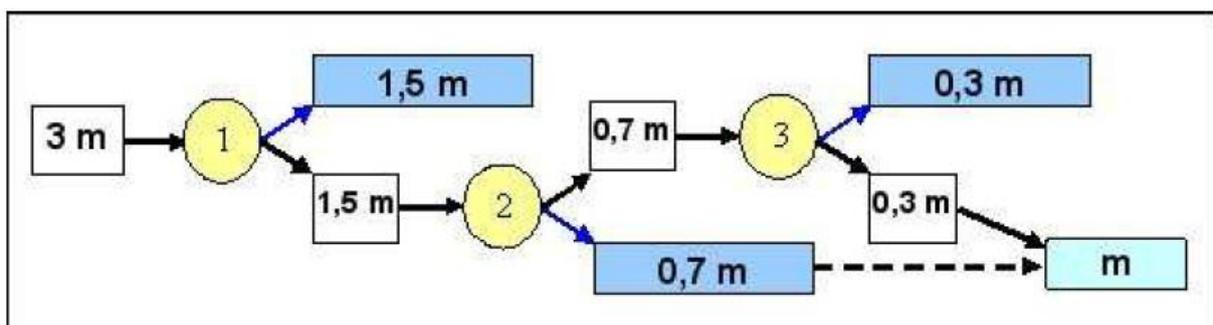


Figure 3. 5. Opération d'échantillonnage des matériaux minéraux (Dupain et coll., 2000)

CHAPITRE 3 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

2.2.1.2. Analyse granulométrique NA 2607

Nous avons effectué cet essai selon la norme NA 2607. Il permet de déterminer la proportion massique du passant cumulé d'un échantillon de matériau divisé (sable ou gravillon) selon la taille de l'ouverture des tamis (voir annexe A). Les résultats sont reportés sur un diagramme semi-logarithmique (figure 3.6).

Nous avons procédé au tamisage de ce sable par : un tamisage humide et un tamisage à sec sur des échantillons de sable de 1 kg. Au de ces deux courbes, on ne peut pas dire qu'il y a une différence sensible de granulométrie.

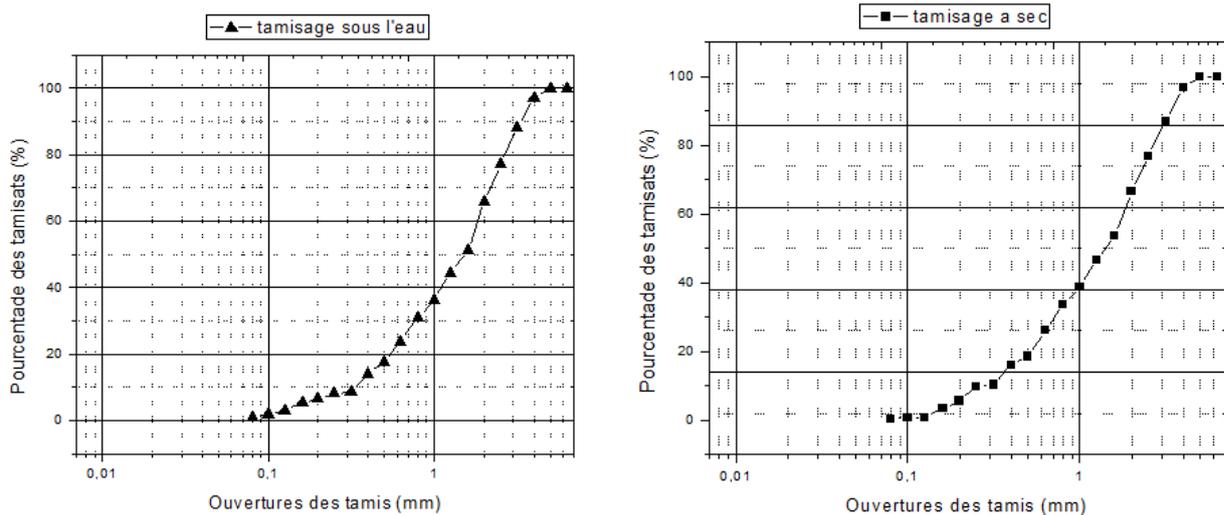


Figure 3. 6. Courbes granulométriques du sable de l'ENG Sidi Abdelli.

2.2.1.3. Masse volumique (absolue et apparente)

En utilisant la méthode de l'éprouvette graduée, nous avons déterminé la masse volumique absolue. Les résultats sont récapitulés dans le tableau 3.5.

2.2.2. Propreté du sable

2.2.2.1. Équivalent de sable NA 455

Selon la norme NA 455, nous avons utilisé 120 g de sable de fraction 0/2mm. La valeur de ES doit selon les cas être supérieure à 60 ou 65%. L'essai dit "équivalent de sable piston" permet de mesurer le degré de propreté du sable. Le résultat est indiqué dans le tableau 3.5. La valeur de l'équivalent de sable montre que ce matériau est propre et contient environ 30% de fines.

CHAPITRE 3 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

2.2.2.2. Bleu de méthylène NA 1948

Le présent essai permet de déterminer la valeur de bleu de méthylène adsorbé de la fraction 0/0,125 mm. Pour cet essai qualitative nous avons suivi le mode opératoire conformément à la norme NA 1948.

Le résultat est présenté dans le tableau 3.5.

Tableau 3. 5. Caractérisation du sable d'ENG

Masse volumique apparente (kg/m ³)		1402.67
Masse volumique absolue (kg/m ³)		2652
Module de finesse	Tamisage sous l'eau	3.4
	Tamisage à sec	3.36
Équivalent de sable (%)		72.87
Bleu de méthylène		10

L'analyse granulométrique dans les 2 cas, nous a donné un module de finesse > 3.3, ce qui implique que le sable étudié est grossier. De plus, nous remarquons que $70 < ES = 72.87 < 80$; ce qui signifie que ce sable est propre à faible pourcentage de fines. L'essai au bleu de méthylène montre que les fines ne sont pas de nature argileuse. On conclue que, ce sable convient parfaitement pour la fabrication de bétons ou mortiers de haute qualité.

2.3. Les durcisseurs et démoulant

Nous avons utilisé deux types de durcisseur (PAVILLAND et ACESCOLOR) avec un démoulant (ACESCOLOR) fournis par l'entreprise LAFARGE ALGERIE. Les fiches techniques de ces matériaux sont versées à l'annexe B.

Nous avons déterminé leurs masses volumiques en utilisant les mêmes principes que pour le ciment. Les résultats sont présentés dans le tableau 3.6.

Tableau 3. 6. Masses volumique des durcisseurs

Echantillon	Durcisseur		Démoulant
	PAVILLAND	ACESCOLORS	ACESCOLORS
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2577.3	2673.7	1547.9
Masse volumique apparente (kg/m ³)	1344	1224	506

2.4. Eau de gâchage

Pour la confection des différentes pâtes, nous avons utilisé l'eau distribuée par le réseau du service public de la Daïra de Chetouane appartenant à la ville de Tlemcen (Algérie). Les résultats de l'analyse chimique de cette eau sont présentés dans le tableau 3.7.

CHAPITRE 3 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

Tableau 3. 7. Composition de l'eau de gâchage (mg/l) (Boukli, 2009)

Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	CO ₃	NO ₃	pH	T (° C)
74.4	49	40	5	95	170	300	42.3	7.5	17.1

3. Procédures expérimentales

Dans notre projet de recherche, nous nous interrogeons sur le temps de début et de fin de prise d'un béton imprimé en prenant en compte l'utilisation d'un mortier thermiquement équivalent (MT). La comparaison citée dans le deuxième chapitre au paragraphe 3.3, montre les raisons qui nous ont poussées à choisir le MT.

3.1. Formulation du mortier thermiquement équivalent

La formulation du mortier thermiquement équivalent consiste à garder les mêmes quantités de ciment et d'eau, et de remplacer la masse des graviers par une masse identique de sable. Nous avons utilisé comme béton de référence, la formulation utilisée par l'équipe de recherche Matériaux granulaires du laboratoire EOLE (Boukli, 2009). Les formulations sont consignées dans le tableau 3.8. Le rapport E/C du béton de référence est de 0,5 et le rapport S/C = 1,9. En revanche, le MT associé présente un S/C de l'ordre de 5.

Tableau 3. 8. La formulation du béton de référence et du MT pour 1 m³

Constituants	Quantités de béton (kg/m ³) (Boukli, 2009)	Quantité de MT (kg/m ³)	
Ciment	350	350	
Gravier calcaire 16/25	533	Sable	1769
Gravier calcaire 8/16	432		
Gravier calcaire 4/8	144		
Sable calcaire 0/4	660		
Eau de robinet	175	175	
Rapport E/C	0.5	0.5	
Rapport C/S	1/1.9	1/5	

3.2. Préparation du corps d'épreuve

La préparation des échantillons a nécessité la reproduction des mêmes étapes citées dans le paragraphe 3 du premier chapitre ; à savoir la mise en œuvre d'abord d'un MT mis dans le cône servant à l'essai de prise Vicat suivi du saupoudrage successif du durcisseur et démoulant. Les figures 3.7 et 3.8 montrent bien la succession de ces étapes.

CHAPITRE 3 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES



Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Figure 3. 7. Saupoudrage de durcisseur sur la surface du MT (Photo prise par les auteurs)



Figure 3. 8. Lissage de la surface et saupoudrage du démoulant (Photos prises par les auteurs)

3.3. Essai de prise NA 234

Les essais de prise réalisés à l'aide de l'appareil Vicat (figure3.9), aux températures de 20 et 35°C, ont été effectués dans un bain Marie afin de contrôler la température ; quant à l'essai de 6°C , les échantillons sont placés dans un réfrigérateur.

CHAPITRE 3 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES



Figure 3. 9. Appareil de Vicat dans le bain Marie (Photo prise par les auteurs)

Nous avons débuté nos essais avec deux mortiers de référence, formulés avec un rapport $E/C = 0.5$; néanmoins ce mélange ne prenait pas même après un temps d'attente de 6H. Le mélange était trop sec (voir figure 3.10).



Figure 3. 10. Echantillon MT sans durcisseur ($E/C = 0,5$) (Photo prise par les auteurs)

Le même essai a été répété une seconde fois, et nous avons rencontré le même problème.

A la lumière de ces résultats, nous avons augmenté le rapport E/C de 0,5 à 0,6 voir 0,7 (voir figure 3.11). La consistance obtenue pour ces trois rapports nous amené à choisir le rapport égal à 0,7 à cause de la quantité importante de sable qui néanmoins était grossier. De plus,

CHAPITRE 3 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

nous avons modifié l'ordre de l'introduction des matériaux dans le malaxeur par rapport à la norme. Nous avons préconisé le mélange du sable et du ciment au lieu du ciment et l'eau dans les premières 30 secondes.



Figure 3. 11. Echantillons de MT réalisés avec un rapport E/C = 0,7 (Photo prise par les auteurs)

3.4. Pénétration par une aiguille (méthode A)

La figure 3.12 représente l'appareil que nous avons conçu localement et qui est inspiré de la méthode A. Il est possible de l'utiliser au laboratoire et in situ sur des matériaux fraîchement coulés.

Le dispositif est muni d'un porte comparateur en PVC dur qui se termine par deux bras, servant à maintenir l'appareil perpendiculaire pour la mesure de la pénétration. Le comparateur se termine par l'aiguille de Vicat (diamètre de 1,13 mm) que l'on fait pénétrer dans le corps de l'éprouve sur une profondeur de 20 mm et on mesure le déplacement, au 0,01 millimètre près, occasionné par la force de pénétration induite. Afin de s'assurer de la répétabilité de l'opération, l'aiguille est munie d'une butée en plastique à 20 mm de son extrémité.

L'objectif recherché est de suivre l'évolution de la force de cisaillement du mortier en fonction du développement dans le temps, de la matrice cimentaire.

CHAPITRE 3 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

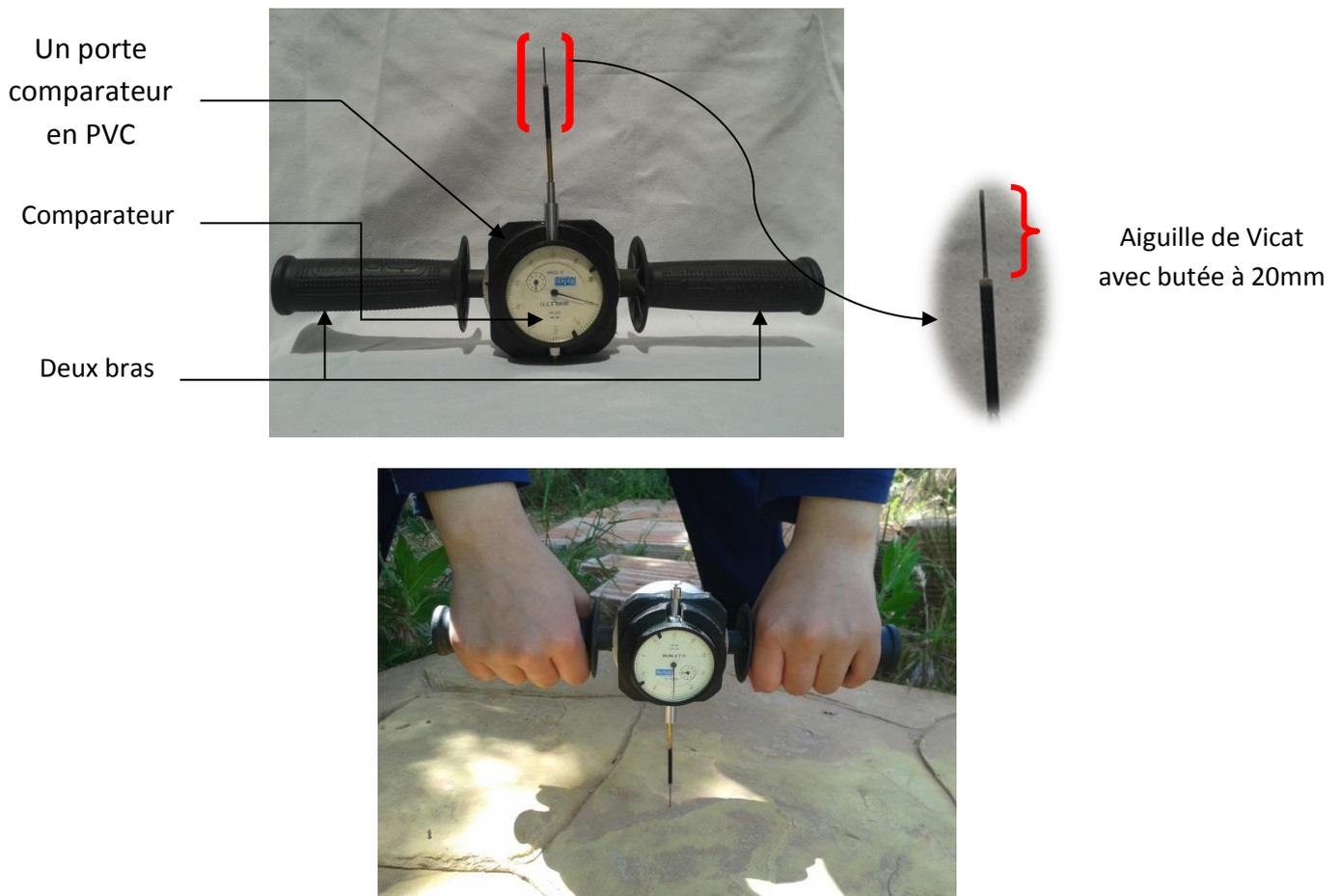


Figure 3. 12. Pénétrömètre à mortier (**conception locale**)

4. Interprétations des résultats

Les résultats expérimentaux représentent le temps de prise et la force de pénétration de divers mortiers (avec ou sans durcisseur) en fonction de la température.

Les mesures des temps de début et de fin de prise, réalisées à l'aide de l'appareil de Vicat sont consignées dans l'annexe C. En revanche, les valeurs des déplacements lus sur le comparateur du pénétrömètre, sont renvoyées vers l'annexe D. La valeur de la force de pénétration en est déduite à partir d'une droite de corrélation (voir Annexe E).

Les figures 3.13, 3.14 et 3.15 présentent l'effet de la température sur le temps de prise ainsi que l'évolution de la force de pénétration pour un mortier thermiquement équivalent de référence.

CHAPITRE 3 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

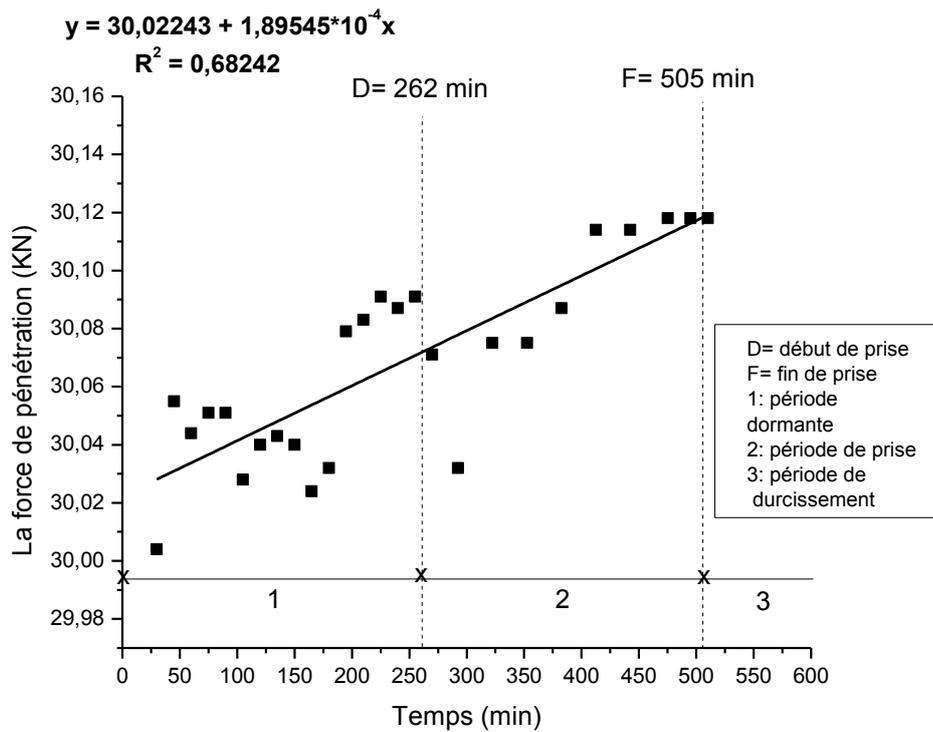


Figure 3. 13. MT de référence à $6 \pm 2^\circ\text{C}$.

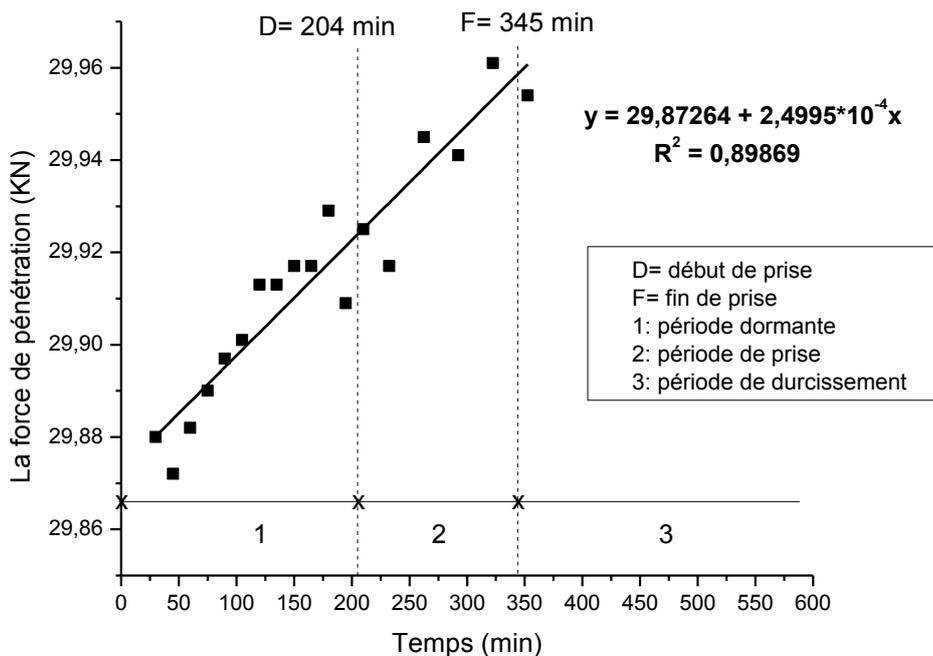


Figure 3. 14. MT de référence à $20 \pm 1^\circ\text{C}$.

CHAPITRE 3 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

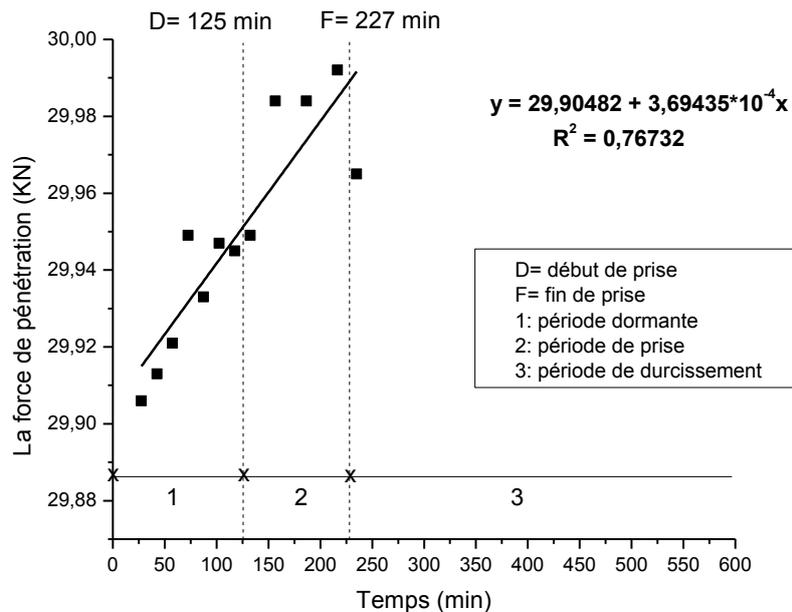


Figure 3. 15. MT de référence à 35± 1° C.

Nous constatons de prime à bord que les tendances relatives à l'évolution de la force de pénétration en fonction du temps sont plus ou moins linéaires à partir du gâchage du mortier jusqu'au début de son durcissement (voir les coef. de détermination proches de 0,8) à l'exception de la température de 6° C où la dispersion des résultats est plus prononcée à cause de la fluctuation plus ou moins grande des températures autour de cette température. Avec l'hydratation du mortier, la force de pénétration gagne quelques dizaines de Newtons. Ce gain en résistance au cisaillement durant la prise, n'est pas similaire pour les trois températures choisies. Il passe en effet, de 12 daN à 6° C à 9 daN à 20° C et puis 8 daN à 35° C. Les faibles températures rendent-elles les mortiers plus résistants à la pénétration ?

L'effet de la température sur la prise du mortier de référence (sans ajout de durcisseur) est bien visible. La température joue donc le rôle de catalyseur des réactions d'hydratation de la matrice cimentaire en engendrant de plus en plus la réduction de la phase dormante dans l'intervalle de variation des températures (6 à 35° C) ; mais aussi de la phase prise. En effet, la prise (différence entre les temps de fin et de début de prise) a connu une diminution notable au passage de la température 6 à 20°C (plus d'1h30) et seulement (40 min) pour le passage de 20 à 35° C. On voit bien que la cinétique des réactions d'hydratation est fortement atténuée par les températures basses.

Le début de prise du mortier de référence est passé de plus de 4h à 6° C à environ 3h30 à 20° C et à seulement 2h à 35° C. Cette accélération de la prise, du simple au double dans

CHAPITRE 3 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

l'intervalle des températures étudiées se répète aussi pour le durcissement car il passe de plus de 8h pour 6° C à moins de 4h pour 35° C. Ces résultats étaient prévisibles au regard des travaux de la littérature mentionnés dans le chapitre 2 paragraphe 2.4.3.

L'effet du durcisseur est donc attendu pour les basses températures, c'est-à-dire quand le mercure est à la baisse. L'ajout des durcisseurs utilisés par Lafarge Algérie, vont-ils avoir un effet similaire à celui de l'augmentation de la température ? C'est ce que nous nous proposons de vérifier avec les mortiers adjuvantés.

Lorsqu'on ajoute les durcisseurs (ACESCOLR et PAVILAND) au mortier MT, on remarque que l'allure des courbes présente aussi une tendance linéaire (figures 3.16, 3.17 et 3.18). De plus, nous remarquons à partir de la figure 3.19, que les courbes représentant l'évolution du début et de fin de prise en fonction des trois températures étudiées : 6, 20, 35° C, pour le MT sans et avec durcisseurs, suivent la même allure au début de la prise sans présenter des différences sensibles et se superposent en fin de prise. A l'exception peut-être de la température à 20° C où Paviland a offert une plus grande résistance à la pénétration que le témoin (figure 3.17). Ce qui nous amène à la conclusion que l'usage des durcisseurs se résume à la coloration du MT.

CHAPITRE 3 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

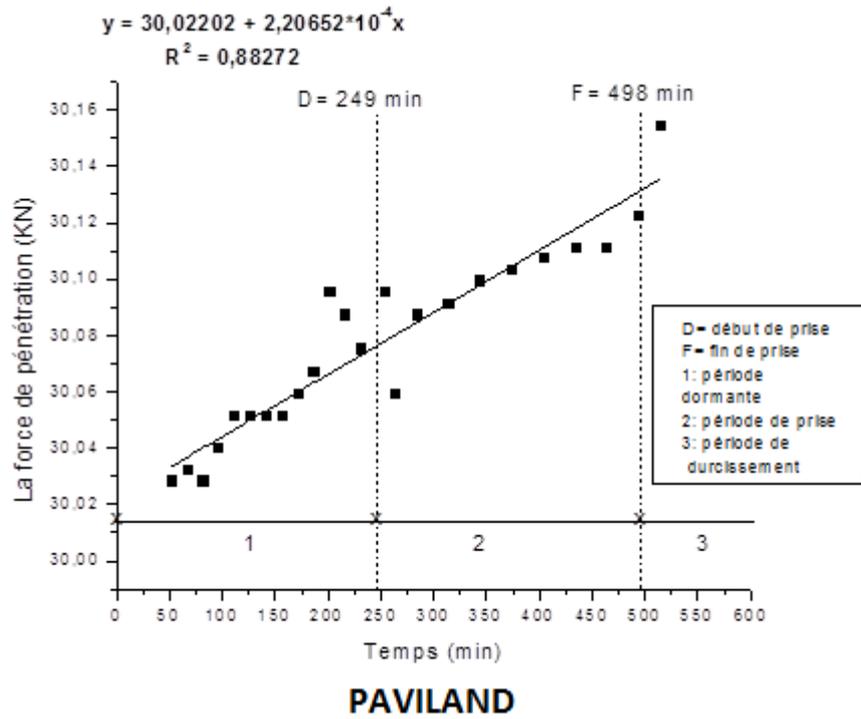
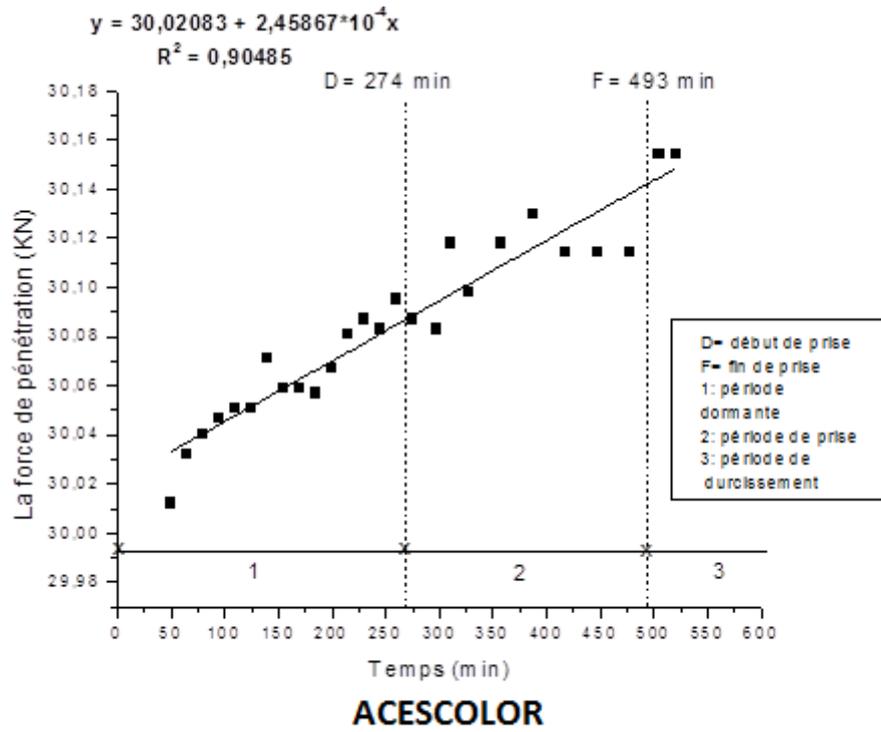


Figure 3. 16. MT + ACESCOLOR et PAVILAND à la température de 6 ± 2 °C.

CHAPITRE 3 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

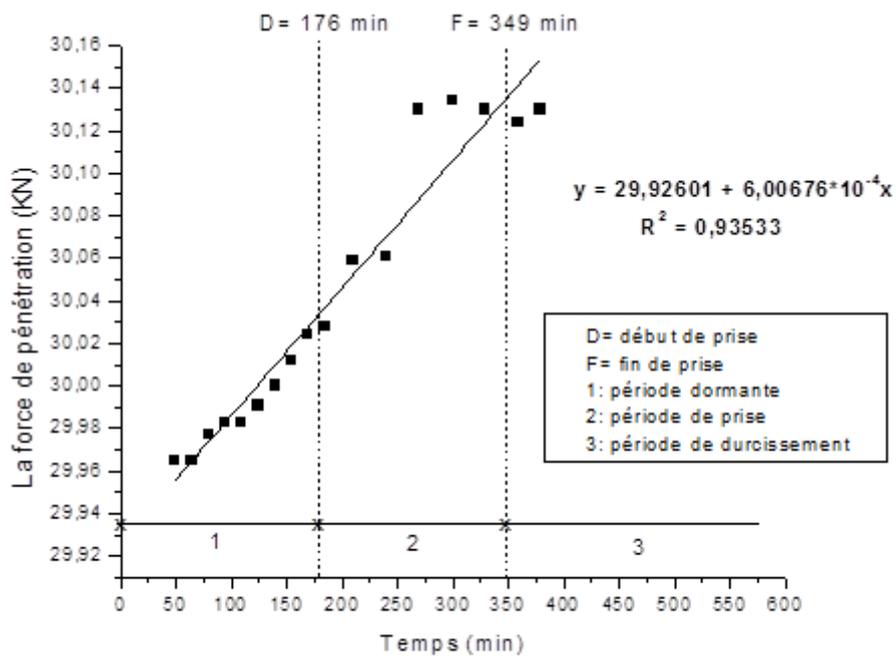
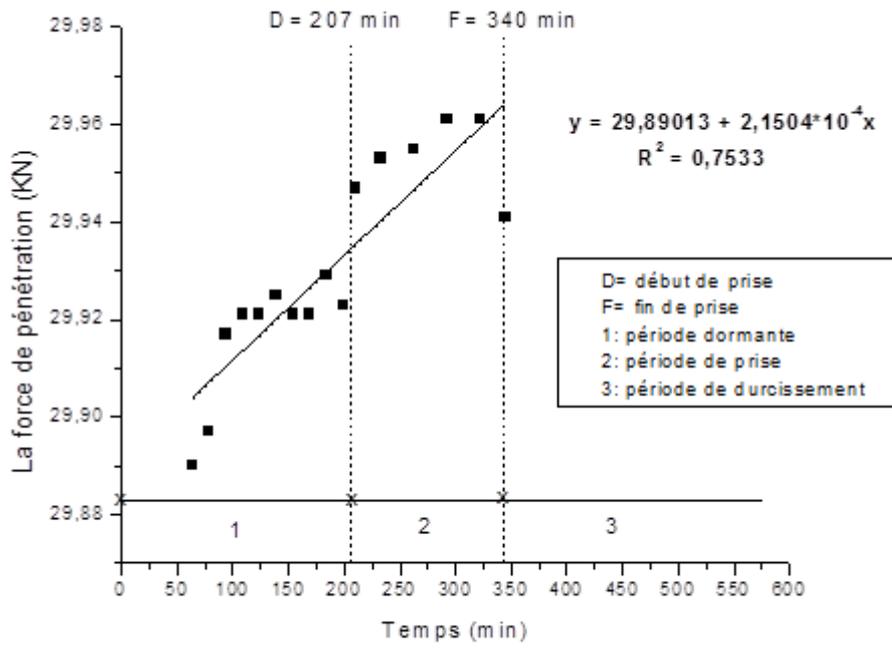


Figure 3. 17. MT + ACESCOLOR et PAVILAND à la température de $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

CHAPITRE 3 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

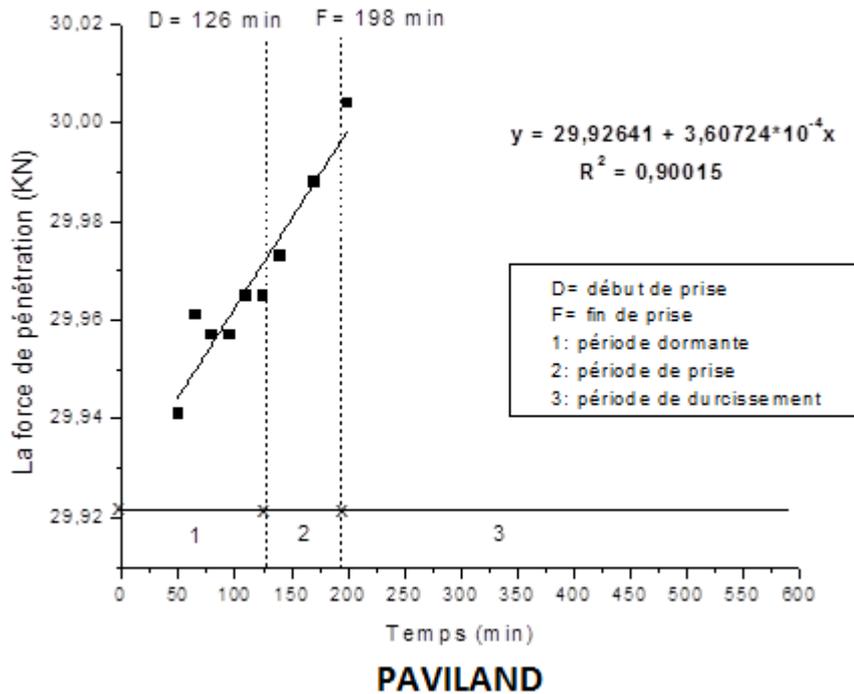
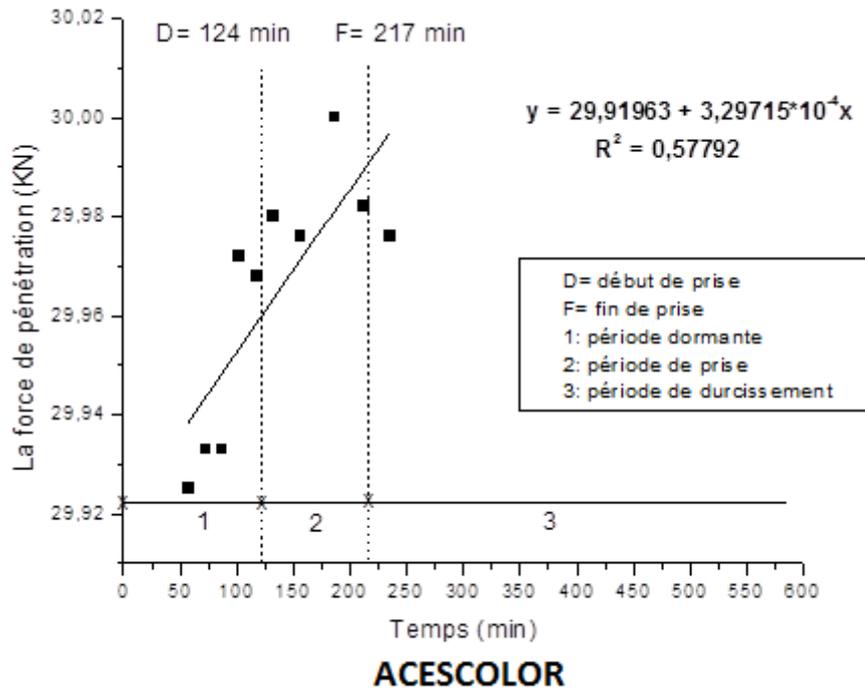


Figure 3. 18. MT + ACESCOLOR et PAVILAND à la température de 35 ± 1 °C.

CHAPITRE 3 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

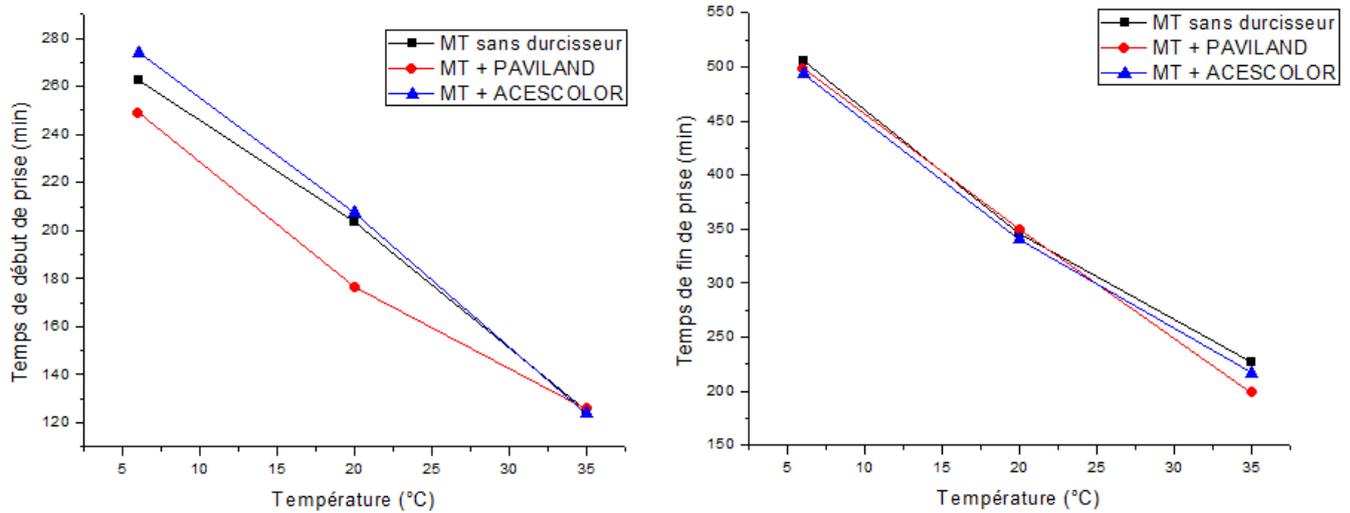


Figure 3. 19. Influence de la température sur le début et la fin de prise du mortier associé adjuvanté ou non.

5. Conclusion

Cette campagne d'essais a permis de confirmer un certain nombre de résultats relevés dans la bibliographie concernant l'influence de la température sur le temps de prise, donc on peut dire que la température joue un rôle de catalyseur ; plus la température augmente et plus le temps de prise diminue. Cela peut être dû à la variation de la cinétique d'hydratation du C_3S (silicate tricalcique) et du C_3A (aluminat tricalcique) car ces derniers sont les deux principaux minéraux qui assurent la prise de façon rapide.

Au sujet des durcisseurs utilisés, on s'attendait à observer une certaine efficacité particulièrement pour les basses températures. Ça été légèrement constaté pour Le Paviland, sans impact sensible sur les temps de prise et de durcissement du MT adjuvanté par rapport au témoin. Ces adjuvants se sont surtout comportés comme des colorants.

CONCLUSION GENERALE

Rapport-Gratuit.com

CONCLUSION GENERALE

Dans notre travail de fin d'études, nous tentons de répondre à un questionnement qui a une relation directe avec l'application in situ d'un nouveau béton : le béton imprimé. Il s'agit de chercher l'influence de la température de l'ambiance environnante sur la prise de ce béton spécial dont l'utilisation est encore timide dans la région de Tlemcen.

Nous avons commencé par identifier la manière dont ce béton est appliqué in situ afin de connaître les étapes de sa confection et les matériaux nécessaires pour ce faire. Ensuite, nous avons élaboré une synthèse bibliographique sur l'hydratation du béton et les paramètres qui ont un impact direct sur son évolution. Parmi les agents externes influents, la température prend une place de choix et joue un rôle de catalyseur en fonction du temps.

Le programme expérimental que nous avons préconisé porte essentiellement sur la mesure des temps de prise grâce à l'essai classique de Vicat qui consiste à déterminer l'évolution de la résistance au cisaillement d'une pâte ou d'un mortier dont les forces de frottements intrinsèques permettent l'arrêt de la pénétration d'une aiguille rigide de faible section. Cet essai ne peut être réalisé au laboratoire sur un béton à cause de la présence de gros granulats qui empêchent sa réalisation dans de bonnes conditions. Nous avons par conséquent cherché le mortier équivalent à ce béton en vue de procéder à cette expérimentation. Le mortier thermiquement équivalent (MT) s'avère un remplaçant idéal puisqu'il permet de garder les mêmes proportions de ciment et d'eau que le béton simulé tout en substituant le sable aux différentes classes de graviers.

Notre programme s'est basé sur la formulation du béton de référence utilisée par l'équipe de recherche où nous avons évolué et dont la formulation a été déterminée par les travaux de thèse de doctorat de **(BOUKLI, 2009)**. Il fallait en revanche trouver le rapport E/C, qui permet une plasticité adéquate pour le MT.

La prise en considération de l'effet de la température au laboratoire nous a conduites à choisir trois valeurs 6° C simulant une température moyenne basse (saison hivernale), 20° C comme température témoin et 35° C pour simuler la température moyenne d'une saison estivale. Cet intervalle de températures relatif à un climat modéré et tempéré, concorde bien avec le vécu dans les territoires de la bande Nord Algérienne où vit la majeure partie de la population.

L'ensemble des essais effectués lors de notre projet de recherche, nous ont conduits aux résultats suivants :

La diminution de la température dans la limite de l'intervalle sujet de notre travail (6 – 35° C), a pour conséquence un ralentissement sensible de la prise et du durcissement ainsi qu'une rigidification de la surface du matériau cimentaire adjuvanté ou non, à l'inverse d'une forte température. Les durcisseurs sont par conséquent nécessaires à un climat froid.

CONCLUSION GENERALE

Nous avons aussi constaté que les durcisseurs utilisés au laboratoire, n'ont pas produit l'effet escompté. Leur usage se résume à la coloration du matériau cimentaire (MT).

Perspectives :

Notre thème de recherche ouvre la voie à de nouvelles perspectives, sachant que le sujet traité lors de notre travail est de l'ordre du nouveau. Comme complément à notre travail, nous recommandons de refaire notre programme expérimental sur du béton, en réalisant la mesure à l'aide du pénétromètre. Ce qui permettra de sortir avec de nouveaux enseignements et notamment avec des recommandations d'utilisation du béton dans des climats chaud ou froid.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

Abdo J., Batut X., (2011), Voiries et aménagements urbains : béton imprimé. Ciments. Septembre 2001, N°798. Ed : RGRA, pp. 28 – 31.

Acker P., Les principaux mécanismes physico-chimiques. In : comportement mécanique du béton : apports de l'approche physico-chimique. Rapport de recherche LPC N° 152. Paris : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1988, pp. 1-34.

AFNOR. Travaux de bâtiment - Exécution des ouvrages en béton - Cahier des clauses techniques. NF P 18-201, 2004, 21 p .

AFNOR. Adjuvants pour bétons, mortier et coulis. Partie 2 : adjuvants pour béton. NF EN 934-2

Alexander P., Blandine A., Formation « ciment », Lafarge, 2009, 63 p.

Asquapro. Contrôles partie A: Fascicule proposé par le comité technique, 2007, 42 p. Association pour la qualité de projection des matières et bétons

Birchall J.D., Howard A.J., et Bailey J.E., On the hydration of Portland Cement. Proc. Roy. Soc. London Ser A 360, 445.

Boukli Hacène S.M.A., Contribution à l'étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de Tlemcen. Thèse de doctorat. Faculté de Technologie, Université de Tlemcen, Algérie, 2009, 176 p.

Bresson A., Influence de la minéralogie sur le comportement des mortiers de ciment au jeune âge, Thèse, Université Laval, 2006, Disponible sur : <http://theses.ulaval.ca/archimede/fichiers/23642/23642.html>

Brixi N.K. Etude du retrait des bétons autoplaçants, Mémoire de Master, Université Abou Bakr Belkaïd, Tlemcen, Algérie, 2014, 108 p .

Collection technique Cimbéton, Les constituants des bétons et des mortiers. Tome 1, 2005, 71 p.

Ciment MATINE, Fiche Technique, Lafarge Algérie, Réf : DC/FT MT.v03.

Didouche Z., Effet du dosage et du type de superplastifiant sur le comportement calorimétrique des ciments composés, Mémoire de Magister, Université Hassiba Benbouali, Chlef, 2012, 118 p.

Dierkens M., Mesures rhéologiques et modélisation de matériaux en cours de prise, Thèse, L'Ecole Nationale des Travaux Publics, Alger, 2005, 278 p.

Double D.D., An examination of the hydration of Portland Cement by electron microscopy. Silicates industriels, 1978, 233-246.

Dupain R., Lanchon R., Arroman J.C., Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire, Granulats, Sols, Ciments et Bétons, 2000, 235 p., ISBN : 2-7135-2064-9

Fascicule de Lafarge, Document de Référence, 2014, 332 p.

Galtier P., Hydratation et réactivité des liants calciques : sulfate de calcium, aluminat monocalcique, Thèse, Ecole Nationale Supérieure des Mines, Saint-Etienne, France, 1981, 156 p.

IANOR, Méthodes d'essais des ciments. NA 230, 2010, 9 p.

IANOR, Méthodes d'essais des ciments – détermination des résistances mécaniques, NA 234, 2007, 35 p.

IANOR, Essais pour déterminer les propriétés générales des granulats – méthodes d'échantillonnage, NA 5082, 2006, 26 p.

IANOR, Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats- évaluation des fines- équivalent de sable. NA 455, 2013, 12 p.

IANOR, Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats- qualification des fines- essai au bleu de méthylène, NA 1948, 2006, 13 p.

IANOR, Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats, détermination de la granularité – analyse, NA 2607, 2009, 10 p.

Jennings H., Pratt P., (1979), on the hydration of Portland Cement. Proc. Brit. Ceram.Doc. in press.

Kaszyńska M., Early age properties of high-strength/high-performance concrete, Cement & concrete composites, Vol. 24, N° 2, 2002, pp. 253-261

Lafarge, Les nouvelles solutions pour l'aménagement urbain et l'embellissement de la ville, Construire des villes meilleures, 2015, Annaba, Algérie.

LE Chatelier H., Recherches expérimentales sur la constitution des mortiers hydrauliques. Thèse, 1887, Paris.

Lin F., Meyer C., Hydration kinetics modeling of Portland cement considering the effects of curing temperature and applied pressure. In : Cement and concrete research, Vol. 39, 2009, pp. 255–265

Ménétrier D., Jawed I., Sun T.S., et Skalny J., ESCA and STEM studies on early C₃S hydration Cem. Concr. Res. 9, 1979, pp. 473-482.

Pinto R.C.A., Hover K.C. Combined effects of silica fume, superplasticizer and temperature on setting behaviour. In : Magazine of Concrete Research, Vol. 52, 2000, pp. 345-352.

Regourd M., Thomassin J.H., Baillif P., et Touray J.C., Study of the early hydration of Ca₃SiO₅ by X-ray photoelectron spectrometry to appear in Cem. Concr. Res. Vol.10, 1980, pp. 223-230.

Regourd M., L'hydratation du ciment Portland. In : Baron J. et Souterey R. Le béton hydraulique. Paris, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1982, pp. 209-214. ISBN 2-85978-033-5.

Thomassin J.H., Regourd M., Baillif P., et Touray J.C., Etude de l'hydratation initiale du silicate tricalcique par spectrométrie de photoelectrons. 1979, CR Acad. Sci. Paris t 288, Série C, 93 p.

Turcry P., Loukili A., Barcelo L., Casabonne J.M., Can the maturity concept be used to separate the autogenous shrinkage and thermal deformation of a cement paste at early age, *Cement and concrete research*, Vol. **32**, 2002, pp.1443-1450.

Touzouti K., Introduction aux nanociments et nanobétons. Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou, Algérie, 2012, 139 p.

Ukrainczyk N., Kinetic modeling of calcium aluminate cement hydration. In : *Chemical Engineering Science*, Vol. 65, 2010, pp. 5605-5614.

Venuat M., La pratique des ciments et des bétons, Ed. Moniteur des travaux publics et du bâtiment, 1976, pp. 117-131.

Xu Q., Hu J., Ruiz J.M., Wang K., Ge Z., Isothermal calorimetry tests and modeling of cement hydration parameters, *Thermochimica Acta*, Vol. 499, 2010, pp. 91–99

Sites Web :

[Gillmore apparatus](#), Testing equipment for the construction industry [en ligne], Disponible à l'adresse :

<http://www.controls-group.com/eng/scheda-print.php?id_cat=cement&id_prod=gillmore-apparatus>. [Consulté le 22/01/2015].

Lafarge Artivia empreinte, le béton tout un art, [Consulté le 22/10/2014], Disponible à l'adresse :

http://www.google.dz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=7&cad=rja&uact=8&ved=0CD8QFjAG&url=http%3A%2F%2Fwww.lafarge-france.fr%2FArtevia-Empreinte.pdf&ei=hJ6BVLO9C4PcarD_gZgJ&usg=AFQjCNGhkK8vCTdROOEj8azSRt_Ae6GJGw

Lafarge. Lexique. [Consulté le 22/10/2014], Disponible à l'adresse :

<http://www.google.dz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CCYQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.lafarge-france.fr%2Ftest%2FLexique-lafarge-betons.pdf&ei=4Z6BVL51Cc7ZavTVgMgO&usg=AFQjCNFbS7uwTIDL6A8y9iC7JS6Ji3n5EA>

Shotcrete Penetrometer. Part of Mecmesin – testing to perfection- . [Consulté le 19/12/2014], Disponible à l'adresse : <http://www.shotcretepenetrometer.com/>

ANNEXES

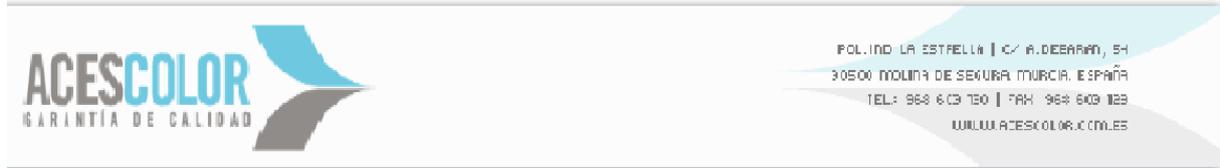
ANNEXE A

Annexe A.1 : analyse granulométrie de sable 0/4

Tamisage sous l'eau					Tamisage à sec				
Ouverture des tamis (mm)	Mass e des refus (g)	Mass e des refus cumu lés (g)	Pourcent age des refus cumulés	Pourcent age des tamisats cumulés	Ouverture des tamis (mm)	Mass e des refus (g)	Mass e des refus cumu lés (g)	Pourcent age des refus cumulés	Pourcent age des tamisats cumulés
6.3	0	0	0	100	6.3	0	0	0	100
5	0	0	0	100	5	0	0	0	100
4	25.6	26.5	2.83	97.17	4	31.4	31.4	3.14	96.86
3.15	81	106.6	11.79	88.21	3.15	97.2	128.6	12.86	87.14
2.5	100	206.6	22.87	77.13	2.5	102.6	231.2	23.12	76.88
2	101.2	307.8	34.07	65.93	2	103.4	334.6	33.46	66.54
1.6	133.2	441	48.82	51.18	1.6	127.2	461.8	46.18	53.82
1.25	60.4	501.4	55.5	44.5	1.25	71	532.8	53.28	46.72
1	73.2	574.6	63.6	36.4	1	79	611.8	61.18	38.82
0.8	48	622.6	68.92	31.08	0.8	51.6	663.4	66.34	33.66
0.63	65.8	688.4	76.2	23.8	0.63	75.4	738.8	73.88	26.12
0.5	56.4	744.8	82.44	17.56	0.5	75.4	814.2	81.42	18.58
0.4	32.2	777	86	14	0.4	24.2	838.4	83.84	16.16
0.315	49.4	826.4	91.48	8.52	0.315	58	896.4	89.64	10.36
0.25	4.2	830.6	91.94	8.06	0.25	5.2	901.6	90.16	9.84
0.2	13.6	844.2	93.45	6.55	0.2	42.6	944.2	94.42	5.58
0.16	11	855.2	94.66	5.34	0.16	20.8	965	96.5	3.5
0.125	21	876.2	96.99	3.01	0.125	27.2	992.2	99.22	0.78
0.1	9.8	886	98.07	1.93	0.1	1.2	993.4	99.34	0.66
0.08	8.6	894.6	99.03	0.97	0.08	2.2	995.6	99.56	0.44
Fond	6.4	901	99.73	0.27	fond	1.6	997.2	99.72	0.28

ANNEXE B

Annexe B.1 : fiche technique de démoulant



DE-CROME

Description

Aditif démoulant en poudre pour Marquer, réalisé sur la base de minérales sélectionnés qu'avec une proportion déterminée, empêche que le mortier de base s'adhère au moule de marquage.

Etant la qualité principale d'empêcher que le mortier se colle au moule, le démoulant sert aussi comme produit d'étanchéité pour la surface et empêche l'excessive évaporation de l'eau contenue dans le pavé en obtenant ainsi une courbe de séchage plus plane. Les composants minéraux tapent aussi les microfissures qui se produisent sur le pavé.

L'aspect donné au mortier base est une texture pareille aux différentes pierres naturelles.

Caractéristiques :

Présentations : Poudre micronisée

Aspect : Couleur selon référence

Densité apparente : 0,47 gr/cm³

Solubilité dans l'eau : Les composants séparés, sont solubles dans l'eau par précipitation, étant nulle une fois formulés.

Composition chimique :

CaCO₃

MgCO₃

FeCO₃

1- IDENTIFICATION DE LA SUBSTANCE / MELANGE ET ENTREPRISE

1-1 Identification de la substance : De Crome

1-2 Identificación de l'entreprise: Aces Color S.L 30500 – Molina de Segura (Murcia)

Tel.968 603.130Fax. 968 603.129

2- COMPOSITION / INFORMATION D'INGREDIENTS

2-1 Composition : Minéraux Sélectionnés, Talc et Calcium

2-2 Ingrédients dangereux : Aucun

2-3 Classification de danger : Non toxique, non dangereux.

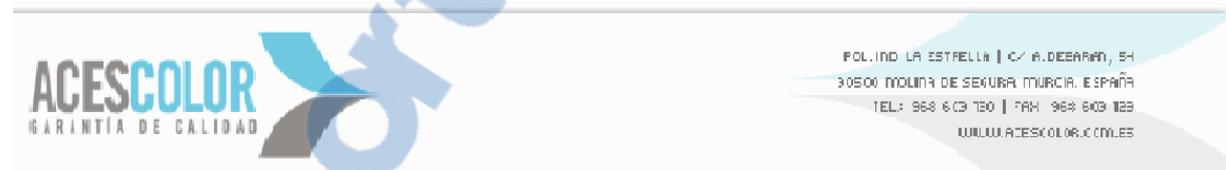
3- IDENTIFICATION DE DANGER

Ne demande pas d'avertissement de danger.

4-MESURES DE PREMIERS SECOURS

4-1- Contacte aux yeux : Laver avec eau abondante.

4-2- Contacte avec la peau : Laver avec eau et savon.



4-3- Inhalation : S'éloigner d'atmosphères à haut niveau de poussière. Ne demande pas de traitement spécial.

4-4- Ingestion : Substance inoffensive et assimilable par l'appareil digestif.

5- MESURES DE LUTE CONTRE INCENDIES

Produits d'extinctions habituelles : Eau, CO₂, Mousse, produits en poudre.

6- MESURES EN CAS DE DÉCHET ACCIDENTEL

Ramasser en évitant la formation de poussière.

7- MANIPULATION ET STOCKAGE

7-1- Manipulation : appareils habituels pour la manipulation de poudres.

7-2- Stockage : Stocker en lieu frais et sec.

8- CONTROL D'EXPOSITION / PROTECTION PERSONNELLE

8-1- Protection voix respiratoires : Il est recommandé des masques anti-poussière.

8-2- Protection des mains : Il est recommandé l'usage de gants.

8-2- Protection des yeux : Il est recommandé l'usage de lunettes protectrices.

8-4- Protection de la peau : Il est recommandé vestiaire adéquat contre poussière.

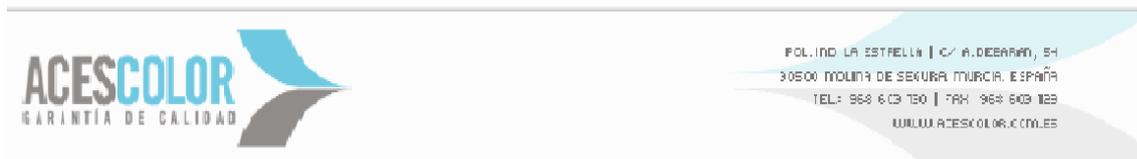
9- PROPRIETES PHYSIQUES ET CHIMIQUES

9-1- Etat : Pulvérulent.

9-2- Couleur : Selon référence.

9-3- Odeur : Inodore.

Annexe B.2 : fiche technique de durcisseur ACESCOLR



FICHE TECHNIQUE DURCISSEUR

STAMPAC

STAMPAC (MORTIER DURCISSEURS COLORE/PIGMENTES)

Stampac est un produit composé de ciments, additifs, de sable sélectionnés et d'oxydes de fer synthétique.

Fonction: Il est indiqué pour colorer superficiellement le béton frais, tout en améliorant la résistance superficielle du sol, et moyennant l'application de moules obtenir une parfaite imitation de Pierre naturelle, dalles, pavés, ardoise, etc..

Avec Stampac nous allons aussi obtenir un produit dont les caractéristiques sont inégalées, adapté aux besoins de nos clients qui souhaitent un résultat de haute résistance, noble, décoratif, et écologique, approprié aux applications tant extérieures qu'intérieures, offrant aux professionnels du bâtiment ou de la décoration le design et l'incorporation d'un

nouveau concept du paysage urbain, aussi bien rustique que moderne, pour lotissements, rue piétonnières, espace récréatifs, zones de circulation routière, centre commerciaux, etc.

Application et mode d'emploi:

Un fois le béton frais étalé et nivelé saupoudrer à raison de 4 kg/ M2 le Stampac selon la couleur choisie, puis talocher en lisant la surface en laissant une couleur homogène et assez humidifiée, pour saupoudrer à la suite le DEMOULANT DECROME.

Présentation: Sac papier de 25 Kilo

Stockage: Maintenir dans un endroit sec (très secs) pour éviter le grumeau et perdre la volatilité de la poudre.

STAMPAC est durcisseur qui permet une prise contrôlée du béton frais et donc apporte aussi une résistance au support sur la dernière couche du béton.

A continuation nous annexons le test de résistance qu'apporte le durcisseur STAMPAC

MORTIER SEC POUR PAVAGE IMPRIMÉ. AGGLUTINANT selon couleurs

RESISTANCE A COMPRESSION S/UNE 83-821-92

CONDITIONS AMBIANTES DE MOULAGE. TEMP : 22C°	HUMIDITE RELATIVE : 58%
CONDITIONS AMBIANTES DE SECHAGE 7 JOURS. TEMP : 20C°	HUMIDITE RELATIVE : 99%
CONDITIONS AMBIANTES DE SECHAGE 21 JOURS. TEMP : 21C°	HUMIDITE RELATIVE : 58%

Stampac ont testé par les laboratoires de COMETSA (Espagne) et L'université de Valencia d'ingénieur civil et accomplissent les normes exigées de la C.E. Les résultats des tests sont indiqués à la suite :

TEST A LA COMPRESSION (N/mm²)

TEST A 7 JOURS			
REF	RESISTANCE A COMPRESSION (N/mm ²)		
2	21.25	MEDIA	20.8
5	20.30		
8	20.85		

TEST A 28 JOURS			
REF	RESISTANCE A COMPRESSION (N/mm ²)		
3	25.80	MEDIA	27.30
6	28.80		
9	27.30		

Conditions de pétrissage: 12.8% d'eau en poids par rapport au matériel sec.

Annexe B.3 : fiche technique de durcisseur PAVILAN

GAMME REVÊTEMENTS DE SOLS



PAVILAND[®] IMPRESO

PAVILAND[®] IMPRIMÉ

Mortier pour pavement imprimé



DESCRIPCIÓN

Produit en poudre, qui employé sur le béton frais, forme une couche monolithique de haute résistance à l'usure, de texture et impression fines, susceptible de remplacer les revêtements traditionnels (paves, plâtre naturel, ardoise, etc.).

COMPOSITION

Produit à base de ciment Portland de haute résistance, de granulats tamisés, de pigments et d'adjuvants de grande pureté.

CARACTERISTIQUES ET APPLICATIONS

- Rues, trottoirs, zones extérieures et accès à centres commerciaux, voies urbaines avec passage de piétons et véhicules, accès et zones périphériques de maisons individuelles, piscines, quartiers résidentiels, etc.
- Zones de parking.
- Chemins d'accès dans les parcs et jardins.
- Second œuvres dans places publiques
- Hautes résistances mécaniques
- Haute résistance à l'usure.
- Diversité de textures et couleurs.
- Possibilité de combiner différents types d'impressions.
- Il est possible d'obtenir des dessins et des variations de couleurs, en changeant simplement la couleur et le moule.
- Résistant à l'intempérie.

MODE D'EMPLOI

- Préparer le support avec le treillis qui convient pour armer le béton.
- Protéger les zones devant rester propres.
- Verser le béton et niveler avec une règle. Ne jamais vibrer.
- Saupoudrer PAVILAND IMPRIMÉ sur le béton frais.
- Niveler avec une lisseuse télescopique à fin que le béton absorbe la couche d'enduit fait de PAVILAND IMPRIMÉ.
- Saupoudrer à nouveau PAVILAND IMPRIMÉ pour boucher les possibles vides et repasser la lisseuse télescopique.
- Après un temps prudentiel, (lorsque le béton commence à durcir) saupoudrer PAVILAND DÉMOULANT pour éviter que les moules ne s'adhèrent.
- Poser les moules et faire pression de manière uniforme pour que les motifs restent imprimés de la même façon.
- Après 72 heures, nettoyer le démolant du revêtement par à l'eau sous pression.



1 / 2



Doc. 0207 Es la edición más actualizada de este producto. Consulte siempre la información en la página web: www.grupopuma.com 008 11 00 02



GAMME REVÊTEMENTS DE SOLS

PAVILAND IMPRESO

PRECAUTIONS ET RECOMMANDATIONS

- Achever le revêtement en employant la résine durcissante (il est recommandé d'utiliser une bombe).
- Ne pas employer au dessous de 5°C ni au dessus de 30°C.
- Ne pas employer en cas de risque de gels, pluies, vents forts ou ensoleillement direct.
- Utiliser des gants pour son emploi.

DONNEES TECHNIQUES

(Résultats statistiques obtenus dans des conditions standard)

Aspect	Poudre TEINTEE
Eau de gachage	13,5 ± 2%
Densité apparente de poussières	1,8 ± 0,2 g/cm ³
Rendement approximatif	4-6 kg/m ²

PRESENTATION

Sac de 25 Kg en papier plastifié.
Stockage jusqu'à 1 an à l'intérieur de l'emballage original, à l'abri de l'interséjour et de l'humidité.

NOTE

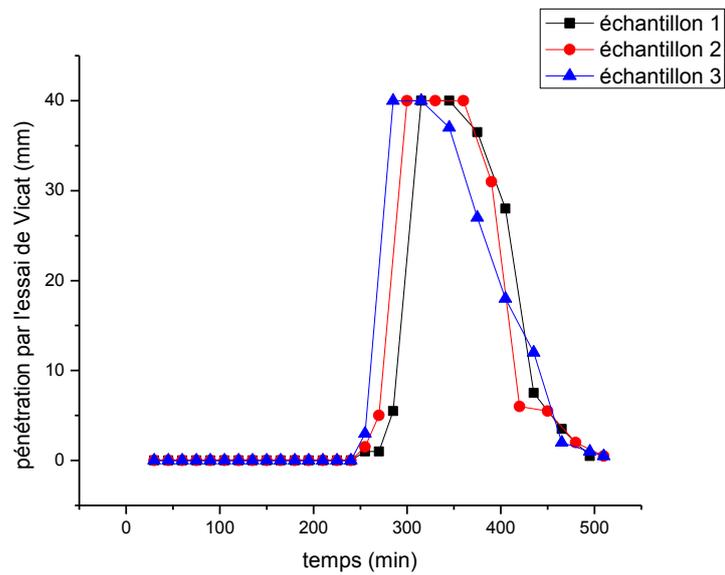
Les indications de mode d'emploi ont été rédigées en fonction de nos tests et essais, ne représentant aucun engagement ou obligation de notre part. Ces indications ne dispensent pas l'acheteur de l'examen et vérification des produits pour leur utilisation correcte.
La responsabilité de l'entreprise ne va pas au-delà de la valeur du produit utilisé.

Doc. 0272-Es la versión en la todos los idiomas. Consulte el manual de instrucciones en la página web: www.grupopuma.com 001 11 00 12

ANNEXE C

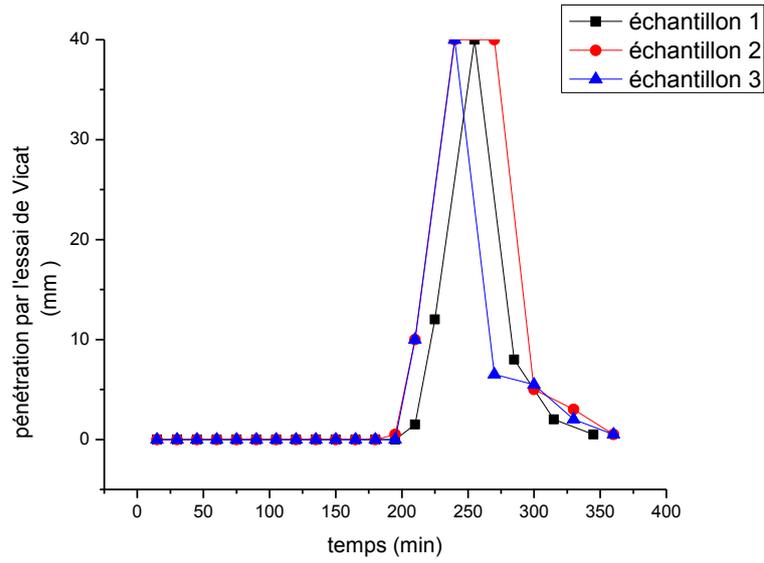
Annexe C.1 : pénétration par l'appareil de Vicat sur un mortier thermiquement équivalent sans durcisseur à $T = 6 \pm 2^\circ\text{C}$

	Échantillon 1	Échantillon 2	Échantillon 3
Temps de début de prise	274.76	259.78	252.8
Temps de fin de prise	495	510	510



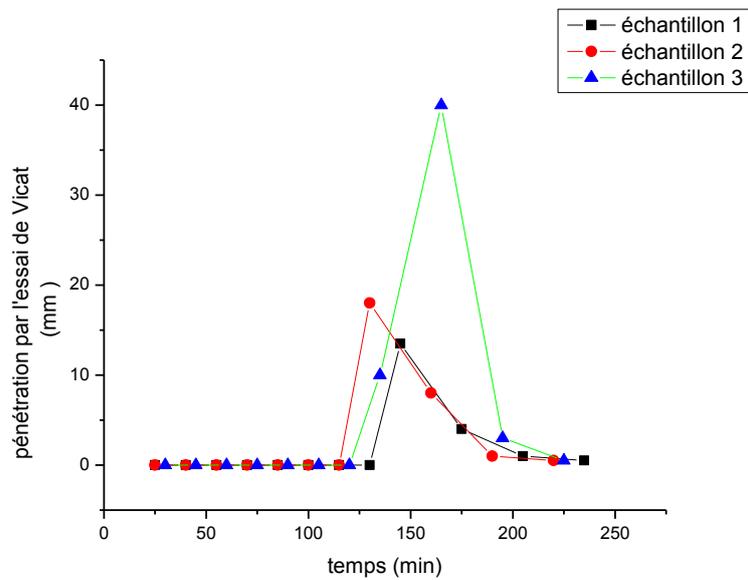
Annexe C.2 : pénétration par l'appareil de Vicat sur un mortier thermiquement équivalent sans durcisseur à $T = 20 \pm 1^\circ\text{C}$

	Échantillon 1	Échantillon 2	Échantillon 3
Temps de début de prise	211,62	199	199,88
Temps de fin de prise	345	360	330



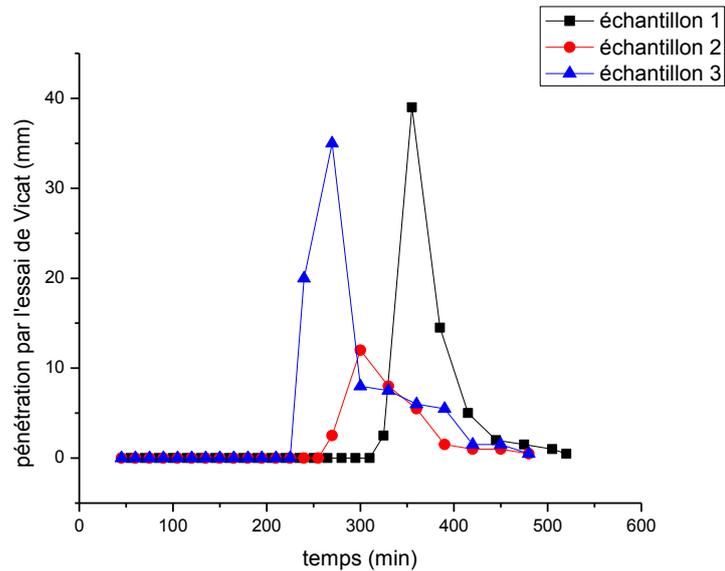
**Annexe C.3 : pénétration par l'appareil de Vicat sur un mortier
thermiquement équivalent sans durcisseur à T = 35±1 °C**

	Échantillon 1	Échantillon 2	Échantillon 3
Temps de début de prise	133.25	117.46	124.29
Temps de fin de prise	335	220	225



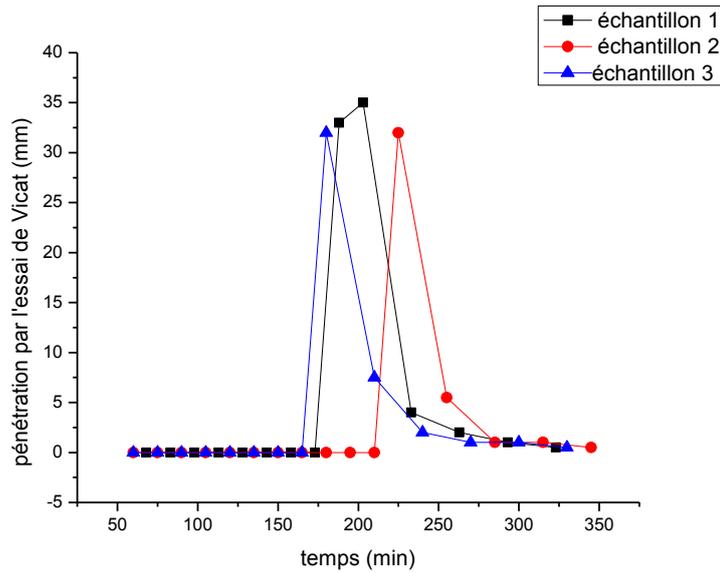
**Annexe C.4 : pénétration par l'appareil de Vicat sur un mortier
thermiquement équivalent avec durcisseur ACESCOLOR à T = 6±2 °C**

	Échantillon 1	Échantillon 2	Échantillon 3
Temps de début de prise	325	270	226.73
Temps de fin de prise	520	480	480



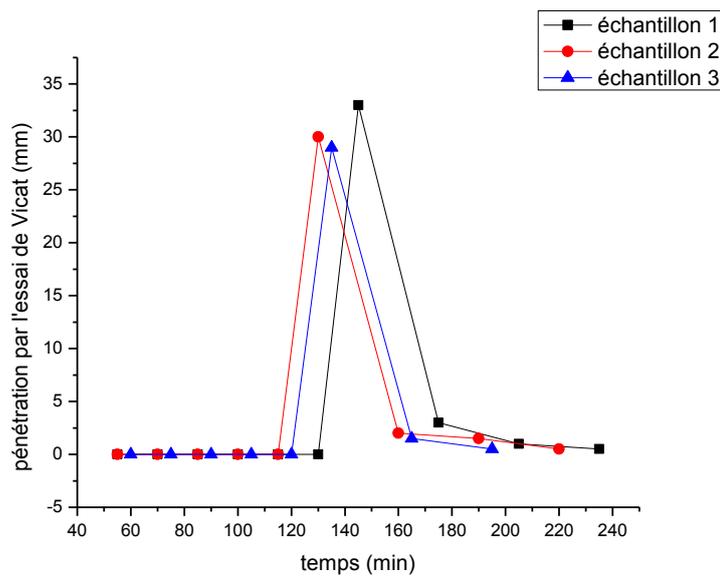
**Annexe C.5 : pénétration par l'appareil de Vicat sur un mortier
thermiquement équivalent avec durcisseur ACESCOLOR à T =20±1°C**

	Échantillon 1	Échantillon 2	Échantillon 3
Temps de début de prise	211,6	227	183,38
Temps de fin de prise	345	345	330



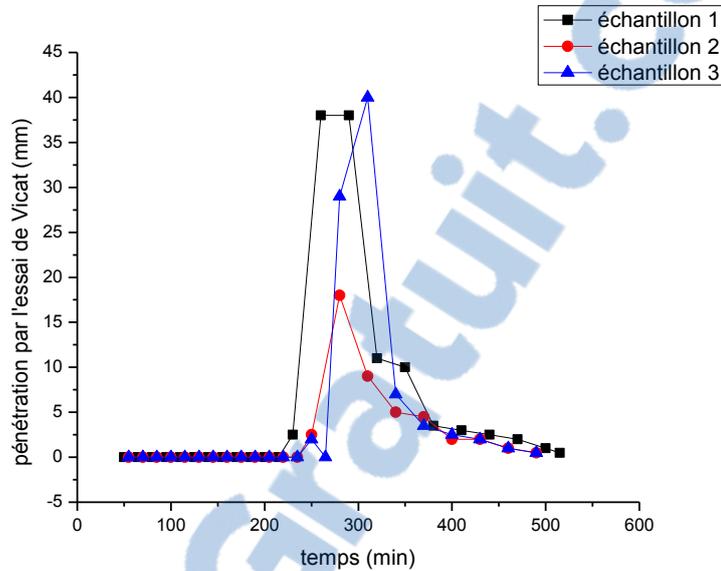
Annexe C.6: pénétration par l'appareil de Vicat sur un mortier thermiquement équivalent avec durcisseur ACESCOLOR à T =35±1°C

	Échantillon 1	Échantillon 2	Échantillon 3
Temps de début de prise	132.17	117.3	122.4
Temps de fin de prise	335	220	195



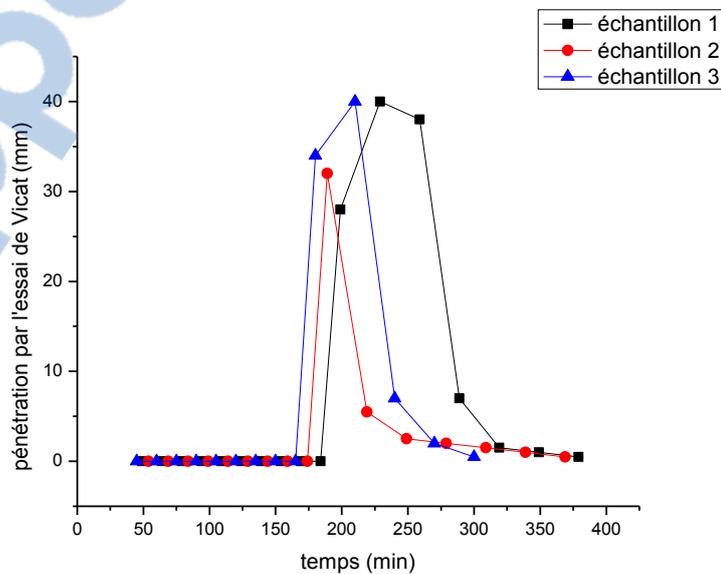
Annexe C.7: pénétration par l'appareil de Vicat sur un mortier thermiquement équivalent avec durcisseur PAVILAND à T = 6±2°C

	Échantillon 1	Échantillon 2	Échantillon 3
Temps de début de prise	230	250	266.77
Temps de fin de prise	515	490	490



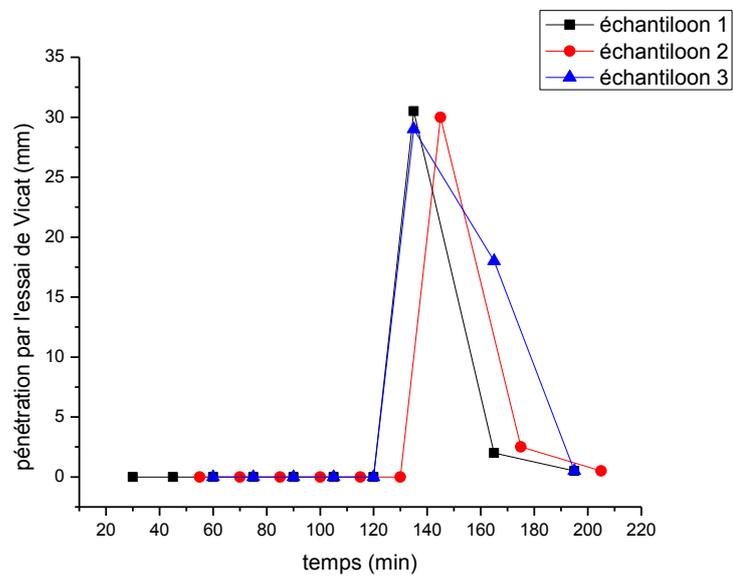
Annexe C.8: pénétration par l'appareil de Vicat sur un mortier thermiquement équivalent avec durcisseur PAVILAND à T = 20±1 °C

	Échantillon 1	Échantillon 2	Échantillon 3
Temps de début de prise	185.84	175.93	166.83
Temps de fin de prise	379	369	300



**Annexe C.9: pénétration par l'appareil de Vicat sur un mortier
thermiquement équivalent avec durcisseur PAVILAND à T = 35±1 °C**

	Échantillon 1	Échantillon 2	Échantillon 3
Temps de début de prise	122	132.17	122.4
Temps de fin de prise	195	205	195



ANNEXE D

Annexe D.1 : la force de pénétration sur un mortier thermiquement équivalent sans durcisseur à $T = 6 \pm 2^\circ\text{C}$

temps	La force de pénétration KN					
	Echantillon 1		Echantillon 2		Echantillon 3	
	dep	force	dep	force	dep	force
30min	1,269	30,012	1,268	29,988	1,269	30,012
45 min	1,2715	30,071	1,270	30,036	1,271	30,059
60 min	1,2715	30,071	1,270	30,036	1,2695	30,024
75 min	1,270	30,036	1,271	30,059	1,271	30,059
90 min	1,2715	30,071	1,271	30,059	1,2695	30,024
105 min	1,2695	30,024	1,271	30,059	1,2685	30
120 min	1,2705	30,047	1,270	30,036	1,270	30,036
135 min	1,271	30,059	1,271	30,059	1,269	30,012
150 min	1,2705	30,047	1,270	30,036	1,270	30,036
165 min	1,269	30,012	1,270	30,036	1,2695	30,024
180 min	1,270	30,036	1,270	30,036	1,2695	30,024
195 min	1,272	30,083	1,272	30,083	1,2715	30,071
210 min	1,2725	30,095	1,272	30,083	1,2715	30,071
225 min	1,2725	30,095	1,2715	30,071	1,273	30,106
240 min	1,273	30,106	1,272	30,083	1,2715	30,071
255 min	1,273	30,106	1,272	30,083	1,272	30,083
270 min	1,271	30,059	1,272	30,083		
285 min	1,271	30,059			1,269	30,012
300 min			1,2695	30,024		
315 min	1,271	30,059			1,271	30,059
330 min			1,273	30,106		
345 min	1,271	30,059			1,271	30,059
360 min			1,273	30,106		
375 min	1,271	30,059			1,272	30,083
390 min			1,2735	30,118		
405 min	1,2725	30,095			1,2735	30,118
420 min			1,274	30,13		
435 min	1,273	30,106			1,274	30,13
450 min			1,273	30,106		
465 min	1,273	30,106			1,275	30,153
480 min			1,2725	30,095		
495 min	1,2735	30,118	1,273	30,106	1,274	30,13
510 min			1,273	30,106	1,274	30,13

Annexe D.2 : la force de pénétration sur un mortier thermiquement équivalent sans durcisseur à $T = 20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$

temps	La force de pénétration KN					
	Échantillon 1		Échantillon 2		Échantillon 3	
	dep	force	dep	force	dep	force
30 min	1,2625	29,858	1,2638	29,888	1,264	29,894
45 min	1,2625	29,858	1,2638	29,888	1,263	29,870
60 min	1,2625	29,858	1,264	29,894	1,264	29,894
75 min	1,2672	29,970	1,2645	29,905	1,264	29,894
90 min	1,2635	29,882	1,2645	29,905	1,2645	29,905
105 min	1,2635	29,882	1,2645	29,905	1,265	29,917
120 min	1,265	29,917	1,2645	29,905	1,265	29,917
135 min	1,265	29,917	1,2645	29,905	1,265	29,917
150 min	1,265	29,917	1,2645	29,905	1,2655	29,929
165 min	1,265	29,917	1,264	29,894	1,266	29,941
180 min	1,265	29,917	1,265	29,917	1,2665	29,953
195 min	1,265	29,917	1,264	29,894	1,265	29,917
210 min	1,265	29,917	1,265	29,917	1,266	29,941
225 min	1,265	29,917				
240 min			1,264	29,894	1,266	29,941
255 min	1,266	29,941				
270 min			1,266	29,941	1,2665	29,953
285 min	1,266	29,941				
300 min			1,266	29,941	1,266	29,941
315 min	1,267	29,965				
330 min			1,2665	29,953	1,267	29,965
345 min	1,266	29,941				
360 min			1,2667	29,957	1,267	29,965

Annexe D.3 : la force de pénétration sur un mortier thermiquement équivalent sans durcisseur à $T = 35 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$

temps	La force de pénétration KN					
	Échantillon 1		Échantillon 2		Échantillon 3	
	dep	force	dep	force	dep	force
25 min	1,2635	29,882	1,266	29,941		
30 min					1,264	29,894
40 min	1,264	29,894	1,2655	29,929		
45 min					1,265	29,917
55 min	1,265	29,917	1,2655	29,929		
60 min					1,265	29,917
70 min	1,266	29,941	1,266	29,941		
75 min					1,267	29,965
85 min	1,2655	29,929	1,2665	29,953		
90 min					1,265	29,917
100 min	1,2655	29,929	1,2665	29,953		
105 min					1,2668	29,960
115 min	1,2653	29,924	1,266	29,941		
120 min					1,2672	29,969
130 min	1,2655	29,924	1,266	29,941		
135 min					1,2675	29,976
145 min	1,267	29,965				
160 min			1,268	29,988		
165 min					1,2685	30
175 min	1,267	29,965				
190 min			1,268	29,988		
195 min					1,2685	30
205 min	1,267	29,965				
220 min			1,2685	30		
225 min					1,269	30,012
235 min	1,267	29,965				

Annexe D.4: la force de pénétration sur un mortier thermiquement équivalent avec durcisseur ACESCOLORS à T = 6±2 °C

temps	La force de pénétration KN					
	Echantillon 1		Echantillon 2		Echantillon 3	
	dep	force	dep	force	dep	force
45min			1,269	30,012	1,268	29,988
55 min	1,270	30,036				
60 min			1,270	30,036	1,2705	30,047
70 min	1,269	30,012				
75 min			1,2715	30,071	1,270	30,036
85 min	1,269	30,012				
90 min			1,271	30,059	1,2715	30,071
100 min	1,269	30,012				
105 min			1,271	30,059	1,271	30,059
115 min	1,270	30,036				
120 h			1,272	30,083	1,271	30,059
130 min	1,269	30,012				
135 min			1,272	30,083	1,272	30,083
145 min	1,2705	30,047				
150 min			1,271	30,059	1,272	30,083
160 min	1,270	30,036				
165 min			1,272	30,083	1,271	30,059
175 min	1,270	30,036				
180 min			1,272	30,083	1,272	30,083
190 min	1,271	30,059				
195 min			1,271	30,059	1,272	30,083
205 min	1,271	30,059				
210 min			1,2728	30,102	1,271	30,059
220 min	1,272	30,083				
225 min			1,2725	30,095	1,271	30,059
235 min	1,273	30,106				
240 min			1,272	30,083	1,271	30,059
250 min	1,273	30,106				
255 min			1,272	30,083		
265 min	1,273	30,106				
270 min			1,2725	30,095	1,271	30,059
280 min	1,273	30,106				
295 min	1,273	30,106				
300 min			1,272	30,083	1,271	30,059
310 min	1,2735	30,118				
325 min	1,274	30,13				
330 min			1,273	30,106	1,271	30,059

355 min	1,2745	30,142				
360 min			1,273	30,106	1,273	30,106
385 min	1,276	30,177				
390 min			1,273	30,106	1,273	30,106
415 min	1,275	30,154				
420 min			1,272	30,083	1,273	30,106
445 min	1,275	30,154				
450 min			1,272	30,083	1,273	30,106
475 min	1,274	30,13				
480 min			1,273	30,106	1,273	30,106
505 min	1,275	30,154				
520 min	1,275	30,154				

Annexe D.5: la force de pénétration sur un mortier thermiquement équivalent avec durcisseur ACESCOLORS à T =20±1°C

temps	La force de pénétration KN					
	Echantillon 1		Echantillon 2		Echantillon 3	
	dep	force	dep	force	dep	force
60 min			1,264	29,894	1,2645	29,905
68 min	1,263	29,870				
75 min			1,2645	29,905	1,2645	29,905
83min	1,2635	29,882				
90 min			1,2645	29,905	1,2655	29,929
98 min	1,265	29,917				
105 min			1,265	29,917	1,2655	29,929
113 min	1,265	29,917				
120 min			1,265	29,917	1,2655	29,929
128 min	1,265	29,917				
135min			1,265	29,917	1,266	29,941
143 min	1,265	29,917				
150 min			1,265	29,917	1,266	29,941
158 min	1,2645	29,905				
165 min			1,264	29,894	1,2665	29,953
173 min	1,265	29,917				
180 min			1,264	29,894	1,2665	29,953
188 min	1,266	29,941				
195 min			1,265	29,917		
203 min	1,2655	29,929				
210 min			1,2655	29,929	1,267	29,965
225 min			1,266	29,941		
233 min	1,267	29,965				

240 min					1,2665	29,953
255 min			1,266	29,941		
263 min	1,267	29,965				
270 min					1,2668	29,960
285 min			1,266	29,941		
293 min	1,267	29,965				
300 min					1,2675	29,976
315 min			1,2665	29,953		
323 min	1,267	29,965				
330 min					1,267	29,965
345 min			1,266	29,941		

Annexe D.6: la force de pénétration sur un mortier thermiquement équivalent avec durcisseur ACESCOLORS à T =35±1°C

temps	La force de pénétration KN					
	Échantillon 1		Échantillon 2		Échantillon 3	
	dep	force	dep	force	dep	force
55 min	1,2655	29,929	1,2655	29,929		
60 min					1,265	29,917
70 min	1,265	29,917	1,266	29,941		
75 min					1,266	29,941
85min	1,265	29,917	1,267	29,965		
90 min					1,265	29,917
100 min	1,266	29,941	1,268	29,988		
105 min					1,268	29,988
115 min	1,266	29,941	1,268	29,988		
120 min					1,2675	29,976
130 min	1,266	29,941	1,268	29,988		
135 min					1,269	30,012
145 min	1,267	29,965				
160 min			1,268	29,988		
165 min					1,2675	29,976
175 min	1,2675	29,976				
190 min			1,269	30,012		
195 min					1,269	30,012
205 min	1,2675	29,976				
220 min			1,268	29,988		
235 min	1,2675	29,976				

Annexe D.7: la force de pénétration sur un mortier thermiquement équivalent avec durcisseur PAVILAND à T = 6±2°C

temps	La force de pénétration KN					
	Echantillon 1		Echantillon 2		Echantillon 3	
	dep	force	dep	force	dep	force
50 min	1,269	30,012				
55 min			1,269	30,012	1,271	30,059
65 min	1,2695	30,024				
70 min			1,270	30,036	1,270	30,036
80 min	1,269	30,012				
85 min			1,270	30,036	1,270	30,036
95 min	1,269	30,012				
100 min			1,2715	30,071	1,270	30,036
110 min	1,269	30,012				
115 min			1,271	30,059	1,272	30,083
125 min	1,270	30,036				
130 min			1,271	30,059	1,271	30,059
140 min	1,270	30,036				
145 min			1,271	30,059	1,271	30,059
155 min	1,270	30,036				
160 min			1,271	30,059	1,271	30,059
170 min	1,271	30,059				
175 min			1,271	30,059	1,271	30,059
185 min	1,272	30,083				
190 min			1,271	30,059	1,271	30,059
200 min	1,273	30,106				
205 min			1,2725	30,095	1,272	30,083
215 min	1,273	30,106				
220 min			1,2725	30,095	1,271	30,059
230 min	1,273	30,106				
235 min			1,271	30,059	1,271	30,059
250 min			1,2725	30,095	1,272	30,083
260 min	1,273	30,106				
265 min					1,271	30,059
280 min			1,2725	30,095	1,271	30,059
290 min	1,273	30,106				
310 min			1,271	30,059	1,272	30,083
320 min	1,274	30,13				
340 min			1,2715	30,071	1,2715	30,071
350 min	1,275	30,154				
370 min			1,272	30,083	1,2715	30,071
380 min	1,275	30,154				
400 min			1,272	30,083	1,272	30,083
410 min	1,275	30,154				

430 min			1,272	30,083	1,2725	30,095
440 min	1,275	30,154				
460 min			1,2725	30,095	1,272	30,083
470 min	1,275	30,154				
490 min			1,2725	30,095	1,2735	30,118
500 min	1,275	30,154				
515 min	1,275	30,154				

Annexe D.8: la force de pénétration sur un mortier thermiquement équivalent avec durcisseur PAVILAND à T = 20±1 °C

Temps	La force de pénétration KN					
	Échantillon 1		Échantillon 2		Échantillon 3	
	dep	force	dep	force	dep	force
45 min					1,270	30,036
49 min	1,265	29,917				
54 min			1,266	29,941		
,60 min					1,270	30,036
64 min	1,265	29,917				
69 min			1,266	29,941		
75 min					1,2695	30,024
79 min	1,266	29,941				
84 min			1,267	29,965		
90 min					1,2705	30,047
94 min	1,266	29,941				
99 min			1,2668	29,96		
105 min					1,2705	30,036
109 min	1,2665	29,953				
114 min			1,2668	29,96		
120 min					1,2705	30,047
124 min	1,2668	29,96				
129 min			1,267	29,965		
135 min					1,270	30,036
139 min	1,2675	29,976				
144min			1,268	29,988		
150 min					1,270	30,036
154 min	1,268	29,988				
159 min			1,269	30,012		
165 min					1,271	30,059
169 min	1,2685	30				
174 min			1,269	30,012		
180 min					1,271	30,059
184 min	1,269	30,012				
189 min			1,269	30,012		

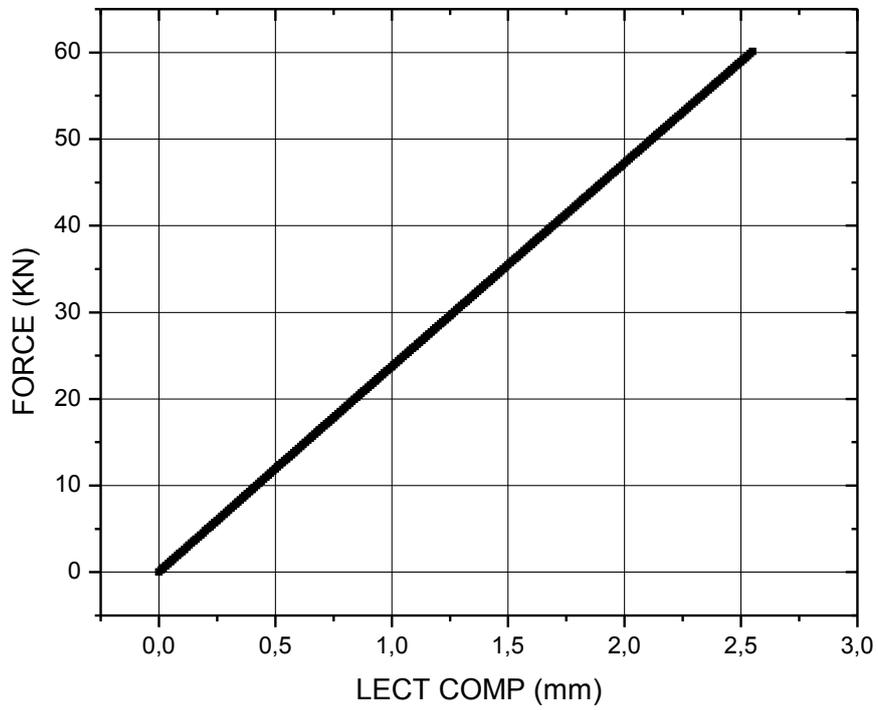
199 min	1,269	30,012				
210 min					1,271	30,059
219 min			1,273	30,106		
229 min	1,2688	30,007				
240 min					1,2715	30,071
249 min			1,273	30,106		
259 min	1,274	30,13				
270 min					1,274	30,13
279 min			1,274	30,13		
289 min	1,2745	30,142				
300 min					1,274	30,13
309 min			1,274	30,13		
319 min	1,274	30,13				
339 min			1,274	30,13		
349 min	1,2735	30,118				
369 min			1,274	30,13		
379 min	1,274	30,13				

Annexe D.9: la force de pénétration sur un mortier thermiquement équivalent avec durcisseur PAVILAND à T = 35±1 °C

temps	La force de pénétration Kn					
	Échantillon 1		Échantillon 2		Échantillon 3	
	dep	force	dep	force	dep	force
45 min	1,265	29,917				
55 min			1,267	29,965		
60 min	1,2665	29,953			1,267	29,965
70 min			1,267	29,965		
75 min	1,2665	29,953			1,267	29,965
85 min			1,2665	29,953		
90 min	1,266	29,941			1,267	29,965
100 min			1,267	29,965		
105 min	1,266	29,941			1,267	29,965
115 min			1,268	29,988		
120 min	1,266	29,941			1,267	29,965
130 min			1,268	29,988		
135 min	1,267	29,965			1,2665	29,953
145 min			1,2685	30		
165 min	1,268	29,988			1,267	29,965
175 min			1,269	30,012		
195 min	1,268	29,988			1,269	30,012
205 min			1,269	30,012		

ANNEXE E

Annexe E.1 : courbe de calibrage (force de pénétration en fonction de déplacement)



$$\text{FORCE} = 23.65 \times \text{LECT.COMP.}$$

Annexe E .2 : valeurs de calibration

VALEURS DE CALIBRATION DE L'ANNEAU DYNAMOMETRIQUE

ANNEAU N°	FORCE MAXI	DEFORMATION MAXI	DATE	TEMP	PAGE						
01542	60 kN	2,55	02/07/99	20	1/2						
LECT COMP	FORCE	LECT COMP	FORCE	LECT COMP	FORCE	LECT COMP	FORCE	LECT COMP	FORCE	LECT COMP	FORCE
0,00	0,00	0,01	0,24	0,02	0,48	0,03	0,72	0,04	0,96	0,05	1,19
0,06	1,43	0,07	1,67	0,08	1,91	0,09	2,15	0,10	2,38	0,11	2,62
0,12	2,86	0,13	3,10	0,14	3,34	0,15	3,58	0,16	3,81	0,17	4,05
0,18	4,29	0,19	4,53	0,20	4,77	0,21	5,01	0,22	5,24	0,23	5,48
0,24	5,72	0,25	5,96	0,26	6,20	0,27	6,44	0,28	6,67	0,29	6,91
0,30	7,15	0,31	7,39	0,32	7,63	0,33	7,87	0,34	8,10	0,35	8,34
0,36	8,58	0,37	8,82	0,38	9,06	0,39	9,30	0,40	9,53	0,41	9,77
0,42	10,01	0,43	10,25	0,44	10,48	0,45	10,72	0,46	10,96	0,47	11,19
0,48	11,43	0,49	11,67	0,50	11,90	0,51	12,14	0,52	12,38	0,53	12,61
0,54	12,85	0,55	13,08	0,56	13,32	0,57	13,56	0,58	13,79	0,59	14,03
0,60	14,27	0,61	14,50	0,62	14,74	0,63	14,98	0,64	15,21	0,65	15,45
0,66	15,69	0,67	15,92	0,68	16,16	0,69	16,40	0,70	16,63	0,71	16,87
0,72	17,11	0,73	17,34	0,74	17,58	0,75	17,81	0,76	18,05	0,77	18,29
0,78	18,52	0,79	18,76	0,80	19,00	0,81	19,23	0,82	19,47	0,83	19,71
0,84	19,94	0,85	20,18	0,86	20,42	0,87	20,65	0,88	20,89	0,89	21,12
0,90	21,36	0,91	21,59	0,92	21,83	0,93	22,06	0,94	22,30	0,95	22,53
0,96	22,77	0,97	23,00	0,98	23,24	0,99	23,47	1,00	23,71	1,01	23,94
1,02	24,18	1,03	24,41	1,04	24,65	1,05	24,88	1,06	25,12	1,07	25,36
1,08	25,59	1,09	25,83	1,10	26,06	1,11	26,30	1,12	26,53	1,13	26,77
1,14	27,00	1,15	27,24	1,16	27,47	1,17	27,71	1,18	27,94	1,19	28,18
1,20	28,41	1,21	28,65	1,22	28,88	1,23	29,12	1,24	29,35	1,25	29,59
1,26	29,82	1,27	30,06	1,28	30,29	1,29	30,53	1,30	30,76	1,31	31,00
1,32	31,23	1,33	31,47	1,34	31,70	1,35	31,94	1,36	32,17	1,37	32,41
1,38	32,64	1,39	32,88	1,40	33,11	1,41	33,35	1,42	33,58	1,43	33,82
1,44	34,05	1,45	34,29	1,46	34,52	1,47	34,76	1,48	34,99	1,49	35,23



VALEURS DE CALIBRATION DE L'ANNEAU DYNAMOMETRIQUE

ANNEAU N°	FORCE MAXI	DEFORMATION MAXI	DATE	TEMP	PAGE
01542	60 KN	2.55	02/07/99	20	2/2

LECT COMP	FORCE												
1.50	35,46	1.51	35,70	1.52	35,93	1.53	36,17	1.54	36,40	1.55	36,64		
1.56	36,87	1.57	37,11	1.58	37,34	1.59	37,58	1.60	37,81	1.61	38,05		
1.62	38,28	1.63	38,52	1.64	38,75	1.65	38,99	1.66	39,22	1.67	39,46		
1.68	39,69	1.69	39,93	1.70	40,16	1.71	40,40	1.72	40,63	1.73	40,87		
1.74	41,10	1.75	41,34	1.76	41,57	1.77	41,81	1.78	42,04	1.79	42,28		
1.80	42,51	1.81	42,75	1.82	42,98	1.83	43,22	1.84	43,45	1.85	43,69		
1.86	43,92	1.87	44,16	1.88	44,39	1.89	44,63	1.90	44,86	1.91	45,10		
1.92	45,33	1.93	45,57	1.94	45,80	1.95	46,04	1.96	46,27	1.97	46,51		
1.98	46,74	1.99	46,98	2.00	47,21	2.01	47,45	2.02	47,68	2.03	47,92		
2.04	48,15	2.05	48,39	2.06	48,62	2.07	48,86	2.08	49,09	2.09	49,33		
2.10	49,56	2.11	49,80	2.12	50,03	2.13	50,27	2.14	50,50	2.15	50,74		
2.16	50,97	2.17	51,21	2.18	51,44	2.19	51,67	2.20	51,91	2.21	52,14		
2.22	52,38	2.23	52,61	2.24	52,84	2.25	53,08	2.26	53,31	2.27	53,55		
2.28	53,78	2.29	54,01	2.30	54,25	2.31	54,48	2.32	54,72	2.33	54,95		
2.34	55,19	2.35	55,42	2.36	55,65	2.37	55,89	2.38	56,12	2.39	56,36		
2.40	56,59	2.41	56,82	2.42	57,06	2.43	57,29	2.44	57,53	2.45	57,76		
2.46	57,99	2.47	58,23	2.48	58,46	2.49	58,70	2.50	58,93	2.51	59,16		
2.52	59,40	2.53	59,63	2.54	59,87	2.55	60,10						

Résumé

Le béton imprimé est un béton nouveau qui consiste à réaliser sur sa surface fraîchement coulée divers motifs et reliefs de toutes formes. A Tlemcen, on trouve quelques applications récentes aux abords de structures publiques. L'entreprise Lafarge Algérie, qui commercialise l'Artevia empreinte, a pris contact avec notre équipe de recherche afin d'étudier dans le cadre de ce travail de fin d'études, l'effet de la température sur le durcissement de ce béton imprimé. Notre travail de fin d'études répond à cette attente en réalisant une campagne d'essais au laboratoire sur la prise d'un mortier thermiquement équivalent (MT) à ce béton dont la température varie de 6, 20 et 35° C pour simuler les différentes saisons d'un climat tempéré. Les résultats des essais de prise, élaborés à l'aide de l'essai Vicat et du pénétromètre, nous a permis de mettre en exergue l'évolution de la prise en fonction des températures choisies. La température basse entraîne un ralentissement sensible de la prise et du durcissement ainsi qu'une rigidification de la surface du matériau cimentaire à l'inverse de la forte température. Les adjuvants durcisseurs, saupoudrés en surface, n'offre pas au MT l'effet escompté.

Mots clés : béton imprimé, ciment, prise, température, Vicat, pénétration.

Abstract

The imprinted concrete is a new concrete which is realized on freshly cast surface with various styles and patterns of all shapes. In Tlemcen, there are some recent applications on the outskirts of public structures. The company Lafarge Algeria, which markets the Artevia imprint, made contact with our research team to study as part of our theses of end of studies, the effect of temperature on the hardening of the imprinted concrete. Our thesis meets this need by conducting a series of laboratory tests on taking an equivalent thermal mortar (TM) to concrete which temperature ranges from 6, 20 and 35°C to simulate different seasons of temperate climate. The tests results developed using Vicat and penetrometer, has allowed us to highlight the evolution of the integrated function of selected temperature. A low temperature results a significant slowdown of the setting and hardening as well as a stiffening of the surface of the cementitious material in contrast to a high temperature. Adjuvants hardeners, sprinkled on the surface, does not offer the TM desired effect.

Keywords: imprinted concrete, cement, take, temperature, Vicat, penetration.

المخلص

الخرسانة المطبوعة هي خرسانة حديثة تتمثل في التحقيق على سطحها الحديث التدفق مختلف الأنماط والنقوش من جميع الأشكال. في تلمسان نجد لها بعض التطبيقات الحديثة في ضواحي الهياكل العمومية.

شركة لافارج الجزائر، التي تسوق "Artevia البصمة"، اتصلت مع فريق البحث لدينا لإجراء دراسة في إطار عملنا هذا لنهاية الدراسة، على تأثير درجة الحرارة على تصلب الخرسانة المطبوعة. عملنا هذا في مجال نهاية دراستنا، يلبي هذه الحاجة و ذلك عن طريق إجراء حملة الفحص المخبري على الأخذ للمونة المعادلة حراريا (MT) للخرسانة والتي تتراوح درجة حرارتها ما بين 6 و 20 و 35 درجة مئوية و ذلك لمحاكاة مختلف المواسم لمناخ معتدل.

نتائج الاختبارات للأخذ، تم تطويرها باستخدام جهاز فيكا "Vicat" و جهاز الاختراق "pénétrromètre"، سمحت لنا بتسليط الضوء على تطور الأخذ وفقا لدرجة الحرارة المحددة. درجة الحرارة المنخفضة تؤدي إلى تباطؤ كبير في الأخذ والتصلب و كذلك تشنج سطح المواد الأسمنتية على عكس درجة الحرارة المرتفعة. المواد المساعدة للتصلب، التي تم رشها على السطح، لا تقدم لـ "MT" التأثير المطلوب.

كلمات البحث: الخرسانة المطبوعة، الاسمنت، الأخذ ، درجة الحرارة، اختراق، فيكا.