

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université 8 Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie



جامعة 8 ماي 1945 – قالمة
كلية العلوم والتكنولوجيا

Département de : **Génie Civil & Hydraulique**
Spécialité : **Génie civil**
Option : **Matériaux et Structures**

THÈSE
Présentée en vue de l'obtention du diplôme de
DOCTORAT

Présenté par :

DERABLA Riad

Thème

**INFLUENCE DES ADDITIONS MINÉRALES
SUR LE COMPORTEMENT AU JEUNE ÂGE ET A LONG TERME
DES BETONS AUTOPLAÇANTS TRAITÉS THERMIQUEMENT**

Devant Le Jury

Président	Pr. BENMARCE Abdelaziz	Université 8 Mai 45 – Guelma
Encadreur	Pr. BENMALEK Mohamed Larbi	Université 8 Mai 45 – Guelma
Examinateur	Pr. BENOUIS Abdelhalim	Université 8 Mai 45 – Guelma
Examinateur	Pr. REDJEL Bachir	Université Badji Mokhtar – Annaba
Examinateur	Pr. HOUARI Hacène	Université Mentouri – Constantine
Examinateur	Pr. BOUDAUD Zeineddine	Université d'Oum El Bouaghi

02 Novembre 2015

بسم الله الرحمن الرحيم
الحمد لله رب العالمين، والصلاة والسلام على سيدنا محمد و على آله وصحبه
أجمعين،

شكر و عرفان

أتقدم بخالص شكري إلى الأستاذ بن مالك محمد العربي الذي لم يتوانى لحظة
في تقديمه النصيحة والمعلومة الصحيحة، فكان نِعْمَ المعين،

الشكر الجزيل إلى الأساتذة الأفاضل أعضاء اللجنة لقبولهم مناقشة هذه
المذكرة وتسخير وقتهم لهذا الغرض.

لكل من ساهم من قريب أو من بعيد في انجاز هذا العمل، أسأل الله العظيم
أن يجازيهم عني خير الجزاء.

بسم الله الرحمن الرحيم
يقول ربنا عز وجل: "قل بفضل الله وبرحمته فبذلك فليفرحوا هو خير مما يجمعون"

اهداء

الحمد لله الحنان المنان الذي وفقني لهذا ويسر لي السبيل، والذي لولاه لما بلغت
هذا المقام،

اهدي هذا العمل المتواضع إلى كل من:

وَالِدَيَّ الكَرِيمِينَ الذين لم يدخرا جهدا لتعليمي وتربيتي، فأسال الله أن يحفظهما ويرعاها
كما ربياني صغيرا وان يجعل مقامي وإياهما جنات النعيم،

إلى زوجتي أم أولادي التي كانت دأمة التشجيع لي وكانت سندا قويا لإتمام هذا
العمل،

إلى أولادي نور عيني: نور الهدى، براء صلاح الدين ومنة الله،

إلى إخوتي وأخواتي الأعزاء،

إلى مشايخي وأساتذتي وجميع أحبائي وأصدقائي.

في الأخير، أدعو الله عز وجل أن يهدينا إلى صالح الأعمال وان يحسن خاتمتنا وان
يجمعنا مع حبيبنا محمد في مستقر رحمته، انه ولي ذلك والقادر عليه.

رياض

RESUME

L'accélération de durcissement des bétons est le processus le plus utilisé dans le domaine de la préfabrication du béton. Bien que les résistances finales des bétons préfabriqués traités thermiquement sont inférieures à celles des bétons de référence qui ont durci dans des conditions normales. Le but de ce travail est une contribution à l'amélioration du comportement mécanique de ce genre de bétons traités thermiquement.

Pour atteindre cet objectif on a étudié l'effet de l'incorporation des additions minérales et le processus d'accélération de durcissement par traitement thermique sur le comportement au jeune âge (1 jour) et à long terme (28 et 180 jours) des bétons élaborés. Deux types de bétons ont été étudiés. Il s'agit du béton vibré (BV) et du béton autoplaçant (BAP). Trois additions de deux natures différentes avec des teneurs de 20 et 40 % ont été utilisées. Il s'agit du filler calcaire (FC), du laitier granulé (LG) et laitier cristallisé (LC). Le cycle de traitement thermique adopté qui a été utilisé se caractérise par une température maximale de 60 °C et une durée totale de 24 heures.

Les résultats de cette recherche montrent que le rapport E/C, la finesse, la teneur et la nature réactive de l'addition minérale incorporée aient une importance primordiale tant dans le cas du traitement thermique que dans le cas de traitement normal. Le cycle d'étuvage utilisé est très bénéfique où on a pu avoir au jeune âge (après 24 heures) jusqu'à 60% de la valeur de la résistance à 28 jours. A long terme, des gains de résistances jusqu'à 9% ont été obtenues pour certains bétons et des chutes de résistances minimales (<20%) pour d'autres bétons.

Mots clés

Cycle de traitement thermique, BV, BAP, laitier, filler calcaire, porosité, résistance.

ملخص

تسريع تصلب الخرسانة هو العملية الأكثر انتشارا في مجال الخرسانة مسبقة الصنع. مع العلم أن المقاومة النهائية للخرسانة مسبقة الصنع المعالجة حراريا أقل من مقاومة الخرسانة المرجعية التي تصلبت في الظروف العادية. الهدف من هذا العمل هو مساهمة في تحسين السلوك الميكانيكي لهذا النوع من الخرسانة المعالجة حراريا.

ولتحقيق هذا الهدف قمنا بدراسة تأثير إدراج الإضافات المعدنية وعملية تسريع التصلب بواسطة المعالجة الحرارية على سلوك في سن مبكرة (1 يوم) وعلى المدى البعيد (28 و 180 يوما) للخرسانة المبتكرة. تمت دراسة نوعين من الخرسانة. تتمثل في الخرسانة الموضوعية بواسطة الاهتزاز والخرسانة ذاتية الدمك. ثلاث إضافات من نوعين مختلفين مع كميات 20 و 40% تم استعمالها. تتمثل هذه الإضافات في شوائب الحجر الكلسي، خبث الأفران المحبب وخبث الأفران المبلور. دورة المعالجة الحرارية التي تم استخدامها تتميز بدرجة حرارة قصوى 60 °م ومدتها الكلية 24 ساعة.

النتائج المتحصل عليها تبين أن نسبة الماء \ الاسمنت، النعومة، الكمية والطبيعة التفاعلية للإضافة المعدنية المدرجة لها أهمية بالغة في كل من حالة المعالجة الحرارية و المعالجة الطبيعية. دورة المعالجة الحرارية التي تم استخدامها أظهرت فاعليتها أين تم الحصول في وقت مبكر (24 ساعة) على 60 % من المقاومة الخاصة ليوم 28. على المدى البعيد، تم الحصول على مكسب في المقاومة إلى مستوى 9% بالنسبة لبعض الأنواع من الخرسانة وضياع مقبول في المقاومة بالنسبة للبعض الآخر من الخرسانة (>20%).

الكلمات المفتاحية

دورة المعالجة الحرارية، الخرسانة ، خبث الأفران، شوائب الحجر الجيري، المسامية ، المقاومة.

ABSTRACT

The acceleration of the hardening of concrete is the process which is most widely used in the field of precast concrete. Although the final strength of the heat-treated concrete is less than that of reference samples that have been cured in normal conditions. The aim of this work is to contribute to the improvement of the mechanical behaviour of this kind of heat-treated concretes.

To achieve this objective we have studied the effect of the incorporation of local mineral admixtures and the process of heat treatment on the behaviour at an early age (1 day) and in the long term (28 and 180 days) of elaborated concretes. Two types of concrete were studied, they are the vibrated concrete (VC) and self-compacting concrete (SCC). Three additions of two different types with two levels of 20 and 40% have been used. They are the limestone filler (LF), granulated slag (GS) and crystallized slag (CS). The adopted heat-treatment cycle used attained a maximum temperature of 60 °C and a total duration of 24 hours.

The results of this research shown that the W/C ratio, the fineness, the content and the reactive nature of the incorporated mineral addition is very important so much for heat treatment as for normal treatment. The adequate content needs an extend study. The cycle used is very beneficial where we have obtained at early age (after 24 hours) up to 60% of the value of 28-day strength. In the long term, a gain of strength up to 9% has been obtained for some concretes and a minimal loss in strength for other concretes (<20%).

Keywords

Heat-treatment cycle, SCC, VC, slag, limestone filler, porosity, resistance.

SOMMAIRE

RESUME	i
ملخص	ii
ABSTRACT	iii
SOMMAIRE	iv
LISTE DES TABLEAUX	v
LISTE DES FIGURES	vi
INTRODUCTION GENERALE	vii

Chapitre I BETON AUTOPLAÇANT ET ADDITIONS MINÉRALES

1. GENERALITES SUR LES BAP	1
2. BAP A L'ETAT FRAIS	1
2.1. Caractérisation des BAP à l'état frais.....	1
2.1.1. Essai d'étalement (Slump flow)	2
2.1.2. Essai de la boîte en L (L-box)	2
2.1.3. Essai de stabilité au tamis.....	3
2.1.4. Essai d'entonnoir V-Funnel.....	3
2.2. Influence des paramètres de formulation	4
2.2.1. Adjuvants.....	4
2.2.1.1. Superplastifiants.....	4
2.2.1.2. Agent de viscosité.....	4
2.2.2. Fines et volume de pâte élevé.....	5
2.2.3. Volume de gravillons faible.....	5
3. BAP A L'ETAT DURCI	6
3.1. Propriétés mécaniques.....	6
3.1.1. Résistance à la compression.....	6
3.1.2. Module d'élasticité.....	6
4. ADDITIONS MINÉRALES	7
4.1. Définition.....	7
4.2. Utilisation des additions minérales en Algérie.....	7
4.3. Différents types d'additions minérales.....	8
4.3.1. Fillers calcaire.....	8
4.3.2. Laitier granulé	9
4.3.3. Laitier cristallisé.....	10
4.4. Effets des additions minérales.....	11
4.4.1. Effets sur l'écoulement.....	11
4.4.1.1. Effet du filler calcaire.....	11
4.4.1.2. Effet du laitier granulé	12
4.4.2. Effets sur les propriétés physico-chimiques.....	13
4.4.2.1. Effet filler ou effet de remplissage.....	13
4.4.2.2. Effet chimique ou pouzzolanique.....	13
4.4.2.3. Effet physique ou de surface.....	14
4.4.3. Effets sur la résistance mécanique et la durabilité des BAP.....	15
4.4.3.1. Résistance mécanique.....	15
4.4.3.2. Porosité.....	18
4.4.3.3. Absorption capillaire.....	20
5. PRINCIPALES METHODES D'EVALUATION DU BETON	21
5.1. Méthodes destructives.....	21

5.2. Mesures semi destructives.....	21
5.3. Mesures non destructives.....	21
5.3.1. Potentialité des méthodes ultrasonores “UPV“.....	22
5.3.1.1. Influence de la porosité.....	23
5.3.1.2. Influence du rapport E/C.....	23
5.3.1.3. Influence des microfissures.....	24
5.3.1.4. Influence du taux de saturation.....	24
5.3.2. Corrélation R_C - UPV.....	24
6. CONCLUSION.....	26

Chapitre II

TRAITEMENT THERMIQUE DU BETON

1. INTRODUCTION.....	27
2. TRAITEMENT THERMIQUE PAR ETUVAGE.....	27
2.1. CYCLE DE TRAITEMENT THERMIQUE.....	28
2.1.1. Phase de prétraitement ($t_0=0$ à t_1).....	29
2.1.2. Phase de chauffage (t_1 à t_2).....	29
2.1.3. Phase de maintien à la température de traitement (t_2 à t_3).....	30
2.1.4. Phase de refroidissement (t_3 à t_4).....	30
2.2. Principales recommandations.....	30
2.2.1. Exigences relatives à l'accélération de l'hydratation par traitement thermique et protection contre la dessiccation (cure).....	31
2.3. Différentes techniques et conditions de chauffage.....	33
3. INFLUENCE DU TRAITEMENT THERMIQUE SUR L'HYDRATATION DES CIMENTS.....	34
3.1. Effets sur la cinétique d'hydratation.....	34
3.2. Effets sur la résistance mécanique.....	35
3.3. Effets sur la microstructure.....	35
3.4. Effets sur les produits d'hydratation.....	35
3.4.1. C-S-H.....	35
3.4.2. Portlandite.....	36
3.4.3. Formation d'ettringite différé.....	37
4. INFLUENCE DES PARAMETRES DE TRAITEMENT THERMIQUE.....	38
4.1. Effet de la phase de prétraitement.....	39
4.2. Effet de la vitesse de chauffage et du refroidissement.....	40
4.3. Effet de la température maximale et la durée d'exposition.....	41
5. INFLUENCE DE LA COMPOSITION DU BETON.....	45
5.1. Ciment.....	45
5.2. Rapport E/C.....	47
5.3. Additions minérales.....	47
5.4. Granulats.....	47
5.5. Adjuvants.....	48
5.5.1. Plastifiants-réducteurs d'eau.....	48
5.5.2. Accélérateurs de prise.....	48
5.5.3. Accélérateurs de durcissement.....	48
5.5.4. Entraîneurs d'air.....	49
5.5.5. Produits de cure.....	49
5.5.6. Retardateurs de prise.....	49
6. TRAITEMENT THERMIQUE DU BAP.....	49
6.1. Résistance mécanique.....	50
6.2. Durabilité.....	53
6.2.1. Porosité.....	53
6.2.2. Autres indicateurs.....	55

7. AVANTAGES DES ADDITIONS MINERALES DANS LE TRAITEMENT THERMIQUE	56
8. FORMULATION DES BETONS TRAITES THERMIQUEMENT	58
9. CARACTERISTIQUES D'ETUVAGE EN USINES	59
9.1. Cycles d'étuvage théoriques	59
9.2. Cycle d'étuvage adopté	61
10. CONCLUSION	63

Chapitre III

MATERIAUX ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

1. ESSAIS DE CARACTERISATION	64
1.1. Caractérisation des constituants.....	64
1.1.1. Ciment et additions minérales.....	64
1.1.1.1. Granulométrie.....	64
1.1.1.2. Surface spécifique.....	64
1.1.2. Granulats.....	65
1.1.2.1. Masse volumique.....	65
1.1.2.2. Granulométrie.....	65
1.1.2.3. Module de finesse.....	65
1.1.3. Adjuvant.....	65
1.2. Caractérisation du béton à l'état frais.....	66
1.2.1. Masse volumique et la teneur en air occlus.....	66
1.3. Traitement thermique : Etuvage.....	66
1.4. Essais de caractérisation des bétons à l'état durci.....	66
1.4.1. Indicateurs de durabilité.....	66
1.4.1.1. Porosité.....	67
1.4.1.2. Capacité d'Absorption d'eau.....	67
1.4.2. Essai d'ultrasons.....	67
1.4.3. Performances mécaniques.....	68
2. CARACTERISTIQUES DES MATIERES PREMIERES	69
2.1. Ciment.....	69
2.2. Additions minérales	69
2.3. Granulats.....	71
2.4. Adjuvant.....	73
3. CONFECTION, TRAITEMENT ET CONSERVATION DES MELANGES	73
3.1. Introduction.....	73
3.2. Traitement thermique et programme des essais	73
3.3. Béton Vibré.....	75
3.3.1. Formulation du béton vibré.....	75
3.3.2. Confection et programme d'essais.....	76
3.4. Béton autoplaçant.....	77
3.4.1. Formulation du béton autoplaçant	77
3.4.2. Confection et programme d'essais.....	77
4. CONCLUSION	80

Chapitre IV

RESULTATS DES ESSAIS ET DISCUSSIONS

INTRODUCTION	81
1. BETON VIBRE	81
1.1. Etat frais.....	83

1.2. Etat durci.....	83
1.2.1. Porosité et capacité d'absorption d'eau.....	83
1.2.2. Résistance à la compression.....	87
1.2.2.1. Effet du rapport E/C.....	87
1.2.2.2. Effet du traitement thermique.....	89
1.2.2.3. Effet de la teneur et de la nature l'addition.....	90
1.2.3. Corrélation P - R _{C28}	94
1.2.4. Essai d'auscultation sonique.....	95
1.2.5. Correlation R _C –UPV.....	96
1.3. Conclusion.....	97
2. BETON AUTOPLAÇANT	100
2.1. Etat frais.....	102
2.2. Etat durci.....	105
2.2.1. Porosité et capacité d'absorption d'eau.....	105
2.2.2. Résistance à la compression.....	108
2.2.2.1. Effet du rapport E/C	110
2.2.2.2. Effet du traitement thermique.....	110
2.2.2.3. Effet de la teneur et de la nature de l'addition.....	113
2.2.3. Corrélation R _{C28} – P.....	115
2.2.4. Essai d'auscultation sonique	116
2.3. Conclusion.....	118
3. BETON VIBRE et BETON AUTOPLAÇANT : COMPARAISON	122
3.1. Etat frais.....	122
3.2. Etat durci.....	122
3.2.1. Porosité et capacité d'absorption d'eau.....	122
3.2.2. Résistance à la compression.....	123
3.2.2.1. Bétons de références.....	126
3.2.2.1.1. Effet du rapport E/C.....	126
3.2.2.1.2. Effet du mode de traitement.....	126
3.2.2.2. Bétons élaborés (additionnés).....	127
3.2.2.2.1. Effet du traitement thermique.....	127
3.2.2.2.2. Effet de la nature de l'addition.....	128
3.2.2.2.3. Effet de la teneur de l'addition.....	129
3.2.3. Corrélation R _{C28} – P.....	131
3.2.4. Essai d'auscultation sonique	131
3.2.5.. Corrélation R _{C28} – UPV.....	131
3.3. Conclusion.....	133
CONCLUSION GENERALE	136
PERSPECTIVES	136
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	137
Annexe	150

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1. Utilisation des additions minérales dans les cimenteries algériennes [28].....	8
Tableau I.2. Les relations entre R_C et UPV des bétons [105].....	25
Tableau II.1. Recommandations pour la réalisation des traitements thermiques [112]	31
Tableau II.2.Principales recommandations [110]	32
Tableau II.3. Conditions pour les traitements thermiques [113]	32
Tableau II.4 Valeurs limites applicables en France pour la composition et les propriétés du béton en fonction de la classe d'exposition (Tableau NA.F.1) [113]	33
Tableau II.5. Valeurs limites applicables en France pour la composition et les propriétés du béton des produits en béton préfabriqués en usine en fonction de la classe d'exposition (Tableau NA.F.2) [113]	34
Tableau II.6. Résultats de l'essai de la résistance à la compression (MPa) – les échantillons durcis adiabatiquement à température élevée [172].	57
Tableau II.7. Récapitulatif des cycles d'étuvages et des caractéristiques des BV et BAP.....	61
Tableau II.8. synthèse des différentes conditions de traitement thermiques d'autres études.....	62
Tableau III.1. Corrélation entre la vitesse du son et la qualité du béton.....	68
Tableau III.2. Propriétés du ciment utilisé.....	69
Tableau III.3. Compositions chimiques du ciment et des additions minérales.....	71
Tableau III.4. Caractéristiques physiques des additions minérales.....	71
Tableau III.5. Propriétés générales des granulats.....	73
Tableau III.6. Composition des BV (kg/m^3)	76
Tableau III.7. Composition des BAP (kg/m^3)	77
Tableau IV.1. Résultats des essais réalisés sur BVs.....	82
Tableau IV.2. Rapports des résistances des BVs avec prise en compte du mode de traitement....	82
Tableau IV.3. Rapports des porosités et des résistances des BVs avec prise en compte de la nature et la teneur de l'addition.....	83
Tableau IV.4. Résultats des essais sur BAPs à l'état frais	100
Tableau IV.5. Résultats des essais sur BAPs à l'état durci.....	100
Tableau IV.6. Rapports des résistances des BAPs avec prise en compte du mode de traitement...	101
Tableau IV.7. Rapports des porosités et des résistances des BAPs avec prise en compte de la nature et la teneur de l'addition.....	101

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 Schéma de principe de l'essai d'étalement.....	2
Figure I.2. Schéma de principe l'essai de la boîte en L [1]	2
Figure I.3. Description de l'entonnoir V funnel [7]	3
Figure I.4. Domaines de classification des bétons étendus au cas des BAP [2]	3
Figure I.5. Action des superplastifiants - Défloculation des grains de ciment [5]	4
Figure I.6. Evolution de la résistance mécanique d'un BAP et d'un BV correspondant [74].....	17
Figure I.7. Résistance mécanique d'un béton vibré et de 2 BAP [75]	17
Figure I.8. Module d'élasticité de divers bétons en fonction de leur résistance mécanique [76].....	17
<hr/>	
Figure II.1. Forme générale d'un cycle thermique.	28
Figure II.2. Exemple de quelques cycles d'étuvage [110]	29
Figure II.3. Schéma synthétique des prescriptions de la norme [113 et 114].....	31
Figures II.4. Evolution de la chaleur d'hydratation d'un ciment Portland en fonction de la température extérieure [116].....	34
Figure II.5. Evolution des résistances mécaniques d'un béton (E/C = 0,5) pour différentes températures de traitement thermique (rapport = résistance du béton traité thermiquement pour différentes températures /résistance à 28 jours du béton mis en cure à 21 °C).....	36
Figure II.6. Effet de la température sur la résistance mécanique d'un béton à base de ciment portland [119].....	36
Figure II.7. Effets de la température sur la perméabilité des pâtes de ciment [122].....	37
Figure II.8. Distributions de tailles de pores cumulées pour une pâte de ciment Portland hydratée à 5, 20 et 50 °C [118].....	37
Figure II.9. Courbe schématique du temps de prise des ciments en fonction de la température [110].....	39
Figure II.10. Influence de la préprise sur les résistances à la compression à l'âge de 28jours d'un béton [139].....	40
Figure II.11: Influence de la vitesse d'élévation de la température d'un traitement thermique sur les résistances en compression à long terme, [141].....	41
Figure II.12. Effet de la vitesse de montée en température sur la résistance à la compression à 18 heures (période de préprise de 5 heures) [131].....	41
Figure II.13; Influence de la vitesse d'élévation de la T ^{te} sur la résistance d'un béton chauffé à 70 et à 90°C (E/C =0,50) [110].....	43
Figure II.14. évolution de la résistance à la compression du béton en fonction de la T ^{te} de chauffage [110].....	43
Figure II.15. Influence de la température et de la durée de Traitement sur la résistance en compression à 350 Kg/m ³ (chauffage dans l'eau .Ciment CPAL E/C=0,50) [68]	44
Figure II.16. schémas de l'évolution des résistances des bétons suivant la nature du ciment et le traitement [110]	46
Figure II.17. Influence du rapport E/C sur la résistance en compression d'un béton traité thermiquement [139]	47

Figure II.18. Cycles de traitement avec différentes périodes de préprises et températures maximales [159]	52
Figure II.19. Effet de l'histoire de la température sur la résistance à la compression [159].....	52
Figure II.20. Cycles d'étuvage théoriques [173]	60
Figure II.21. Cycle de traitement thermique adopté.....	61
<hr/>	
Figure III.1. Malaxeur de béton utilisé.....	66
Figure III.2. Aéromètre à béton.....	66
Figure III.3. Etuve utilisé pour le traitement thermique.....	68
Figure III.4. Appareil utilisé pour l'essai d'ultrasons.....	68
Figure III.5. DRX du laitier granulé d'El-Hadjar [222]	71
Figure III.6. DRX du laitier cristallisé [42]	72
Figure III.7. Courbes granulométriques du ciment et des additions.....	72
Figure III.8. Courbes granulométriques des granulats utilisés.....	72
Figure III.9. Cycle de traitement thermique adopté.....	74
Figure III.10. Essai d'affaissement au cône d'Abrams.....	76
Figure III.11. Essai d'étalement.....	79
Figure III.12. Entonnoir V-funnel	79
Figure III.13. Boîte en L utilisée.....	79
Figure III.14. Essai de stabilité au tamis.....	79
<hr/>	
Figure IV.1. Affaissement des différents bétons en fonction du rapport E/C.	85
Figure IV.2. La porosité des bétons vibrés.....	86
Figure IV.3. La capacité d'absorption d'eau des bétons vibrés.	86
Figure IV.4. P et CAE des bétons vibrés traité thermiquement en fonction d'EE.	86
Figure IV.5. Résistances à la compression à l'âge de 1 jour des différents bétons vibrés.....	88
Figure IV.6. Résistances à la compression à l'âge de 28 j des différents bétons vibrés.....	88
Figure IV.7. Résistances à la compression à l'âge de 180 j des différents bétons vibrés.....	88
Figure IV.8. Résistances à la compression des bétons vibrés de références (effet du rapport E/C)	89
Figure IV.9. Influence du traitement thermique sur la résistance des BV(FC)	91
Figure IV.10. Influence du traitement thermique sur la résistance des BV(LG)	92
Figure IV.11. Influence du traitement thermique sur la résistance des BV(LC)	92
Figure IV.12. Influence de la nature de l'addition sur la résistance des BV(NT)	93
Figure IV.13. Influence de la nature de l'addition sur la résistance des BV(T)	93
Figure IV.14. Corrélation entre P - R_{C28} des bétons vibrés.....	95
Figure IV.15. UPV des bétons vibrés.....	95
Figure IV.16. Corrélation entre R_{C28} - UPV des bétons vibrés.	96
Figure IV.17. Essai d'étalement au cône d'Abrams et essai de la stabilité au tamis.....	104

Figure IV.18. Viscosité plastique et temps mesurés aux différents essais.....	104
Figure IV.19. Porosité totale des BAP.....	106
Figure IV.20. Capacité d'absorption d'eau des BAP.....	106
Figure IV.21. P et CAE des BAP traité thermiquement en fonction d'EE.	108
Figure IV.22. Résistances à la compression à l'âge de 1 jour des différents BAP étudiés.....	109
Figure IV.23. Résistances à la compression à l'âge de 28 jours des différents BAP étudiés.....	109
Figure IV.24. Résistances à la compression à l'âge de 801 jours des différents BAP étudiés.....	109
Figure IV.25. Résistances à la compression des BAP de références (effet du rapport E/C)	110
Figure IV.26. Influence du traitement thermique sur la résistance des BAP(FC)	112
Figure IV.27. Influence du traitement thermique sur la résistance des BAP(LG)	112
Figure IV.28. Influence du traitement thermique sur la résistance des BAP(LC)	113
Figure IV.29. Influence de la nature de l'addition sur la résistance des BAP(NT)	115
Figure IV.30. Influence de la nature de l'addition sur la résistance des BAP(T)	115
Figure IV.31. Corrélation entre R_{C28} - P des bétons autoplaçants.....	116
Figure IV.32. UPV des bétons autoplaçants.....	117
Figure IV.33. Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse de propagation d'ultrason des BAP.....	117
Figure IV.34. La porosité : BV et BAP. (a) Traitement normal (b) Traitement thermique.....	124
Figure IV.35. La capacité d'absorption d'eau BV et BAP.	124
Figure IV.36. Corrélation P-EE : BV et BAP. (a) Traitement normal (b) Traitement thermique.....	124
Figure IV.37. Résistance à la compression à l'âge de 1 jour : BV et BAP.	125
Figure IV.38. Résistance à la compression à l'âge de 28 jours : BV et BAP.	125
Figure IV.39. Résistance à la compression à l'âge de 180 jours : BV et BAP.....	125
Figure IV.40. Effet du rapport E/C sur les résistances à la compression : BV(R) et BAP(R)	126
Figure IV.41. Effet du traitement thermique sur les résistances à la compression: BV(R) et BAP(R)...	127
Figure IV.42. Effet du traitement thermique et de la teneur de l'addition sur les résistances à la compression: BV et BAP.....	128
Figure IV.43. Effet de la nature de l'addition sur les résistances à la compression :BV et BAP.....	130
Figure IV.44. Corrélation P- R_{C28} : BV et BAP.....	131
Figure IV.45. Vitesse de propagation d'ultrason (UPV) : BV et BAP.	132
Figure IV.46. Corrélation UPV- R_{C28} : BV et BAP.	132

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le problème principal au niveau des chantiers est la lenteur avec laquelle le ciment s'hydrate et développe ses résistances mécaniques. Les temps d'attente pour le durcissement naturel des bétons deviennent de plus en plus incompatibles avec la productivité des chantiers de construction et des usines de préfabrication. Le manque d'uniformité, et compromettre la qualité de surface, ainsi que la nécessité de techniques de vibration sont considérés comme des problèmes graves lorsque le béton classique est utilisé dans la géométrie tridimensionnelle complexe. Le développement de la résistance à jeune âge et la durée de vie sont de plus en plus des facteurs souhaitables pour les éléments en béton et surtout sur le marché de la préfabrication. Par conséquent, le développement de nouvelles méthodes de production sont de plus important pour améliorer l'environnement de travail global avec un minimum de dépenses.

La première solution consiste à accélérer la prise et le durcissement du béton, pour obtenir rapidement des résistances à la compression nécessaires et suffisantes pour le décoffrage rapide, la manutention, le transport ou la mise en contrainte. Une deuxième solution consiste à minimiser le temps de mise en place du béton tout en gardant une qualité finale appropriée. Il est possible de le faire avec du béton autoplaçant (BAP). Le BAP améliore la productivité étant donné sa capacité à assurer un remplissage rapide des éléments préfabriqués à ferrailage condensé. Ces caractéristiques avantageuses du BAP sont le résultat de la quantité de fines qui est supérieure à celle des bétons conventionnels. Ces fines, provenant du ciment, des additions minérales et des granulats, augmentent la quantité de la pâte qui joue un rôle important dans la fluidité car elle peut réduire les interactions entre les plus gros grains en écartant les granulats les uns des autres.

La fabrication des éléments préfabriqués en utilisant le BAP s'appuie sur différents systèmes de traitement. En général, l'accélération de durcissement permet d'avoir un gain de résistance à la compression, réduisant ainsi les temps de durcissement et, par conséquent, le coût de la production. Actuellement, le traitement thermique par étuvage est probablement la méthode la plus largement utilisée. C'est principalement en raison de sa grande capacité à assurer des qualités optimales qui répondent aux diverses exigences techniques et économiques des éléments fabriqués.

Notre travail de recherche s'inscrit pleinement dans ces objectifs. L'utilisation des additions minérales, est d'une grande importance dans ce cas de traitement. Elles peuvent supporter des températures d'étuvages et améliorer la structure des bétons élaborés. Pour cela, le but est

d'étudier l'effet de la nature et de la teneur de l'incorporation des additions minérales sur les caractéristiques physico-mécaniques au jeune âge (1 jour) et à long terme (28 et 180 jours) des bétons traités thermiquement et de faire une comparaison entre le BAP et le BV.

Le premier chapitre présente des généralités sur les BAP, leurs principales caractéristiques à l'état frais et à l'état durci et l'influence de quelques paramètres de formulation sur ces caractéristiques. Ensuite une synthèse bibliographique sur les additions minérales, leurs types et leurs utilisations ainsi que leurs effets sur le comportement des bétons et spécialement le BAP. En fin une bref indication sur les principales méthodes d'évaluation des caractéristiques du béton qui s'agissent des méthodes destructives, semi-destructives et non-destructives notamment celle de l'ultrason avec une exposition de la corrélation $R_C - UPV$.

Le deuxième chapitre est consacré à la technique la plus utilisée pour l'accélération de durcissement. Il s'agit du traitement thermique du béton par étuvage. On a exposé les caractéristiques du cycle de traitement thermique et leurs phases, l'influence des caractéristiques de ces phases sur l'hydratation du ciment et sur les propriétés physico-mécaniques des bétons traités et bien sur les recommandations à suivre pour avoir une meilleure qualité. Ensuite, une partie concerne l'influence de la composition du béton dans le cas de traitement thermique et notamment le BAP. L'influence des additions minérales et leurs avantages dans ces conditions de traitement sont aussi exprimées et des recommandations concernant la formulation des bétons traités thermiquement ont été présentées. Ainsi, il est très important de déterminer un cycle approprié de traitement thermique pour chaque type de du béton tout en prenant en compte les caractéristiques chimiques et physiques du ciment, y compris les matériaux supplémentaires utilisés. A cet effet, Un cycle d'étuvage a été adopté sur la base des recommandations et des cycles théoriques utilisés dans des usines de préfabrication et ainsi des cycles étudiés par les chercheurs.

Le troisième chapitre présente les techniques expérimentales utilisées, les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des matériaux utilisés ainsi que les compositions des BVs et des BAPs obtenues par formulations.

Le dernier chapitre rassemble les résultats des essais réalisés et les interprétions de ces résultats en trois parties : la première concerne les BVs, la deuxième concerne les BAPs et la troisième concerne une comparaison entre les caractéristiques de ces deux types de bétons. Une conclusion est notée à la fin de chaque partie.

A la fin de ce document une conclusion générale a été tirée et exposée.

Chapitre I

BETON AUTOPLAÇANT

ET

ADDITIONS MINÉRALES

CHAPITRE I

BETON AUTOPLAÇANT ET ADDITIONS MINÉRALES

1. GENERALITES SUR LES BAP

Les BAP se distinguent des bétons traditionnels principalement par leurs propriétés à l'état frais. La mise en œuvre d'un béton traditionnel nécessite une phase de vibration afin de remplir correctement les coffrages. Cette étape conditionne la qualité de la structure finale, mais c'est également un travail pénible qui demande un savoir-faire particulier. Pour un BAP, la mise en place peut être réalisée sous le seul effet de la gravité sans apport de vibration ce qui nécessite une grande fluidité du matériau. Mais cela exige que le mélange du BAP doit conserver une stabilité satisfaisante et une parfaite homogénéité pour ne pas avoir lieu de la ségrégation. L'Association Française de Génie-Civil [1] définit dans ses recommandations provisoires les BAP comme des bétons très fluides, homogènes et stables. Ces propriétés contradictoires peuvent être obtenues par une formulation spécifique tout en ajoutant un dosage adéquat de superplastifiants et de fines et/ou l'emploi d'agents de viscosité.

2. BAP A L'ETAT FRAIS

2.1. Caractérisation des BAP à l'état frais

Il n'existe pas d'essai standard, ni de critère bien défini pour s'assurer qu'un béton est effectivement autoplaçant. En effet, le comportement spécifique des BAP à l'état frais rend quasi inadaptés la plupart des essais classiques sur les bétons traditionnels.

Dans ce document nous avons suivi les recommandations de l'AFGC qui permettent de garantir l'autoplaçabilité du béton. Les résultats de ces essais permettent de donner une vision qualitative pour les BAP. Pour assurer une mise en place sans vibration, l'ouvrabilité du mélange joue un rôle prépondérant. L'ouvrabilité des BAP se décompose en trois caractéristiques ;

- La mobilité en milieu non confiné (décrit par l'essai d'étalement) ;
- La mobilité en milieu confiné (décrit par la boîte en L) ;
- La stabilité (résistance à la ségrégation et au ressuage).

2.1.1. Essai d'étalement (Slump flow)

L'essai d'étalement est utilisé pour caractériser la fluidité du béton. C'est une variante de l'essai d'affaissement sur cône d'Abrams qui consiste à mesurer (en utilisant le même matériel) le diamètre d'étalement de la galette de béton sur deux côtés perpendiculaires (Figure I.1). Les valeurs d'étalement au cône d'Abrams acceptables pour un BAP sont généralement fixées dans la fourchette de 600 à 750 mm (pas de ségrégation visible en fin d'essai c'est-à-dire pas d'amoncellement de gros granulats ni d'auréole de laitance).

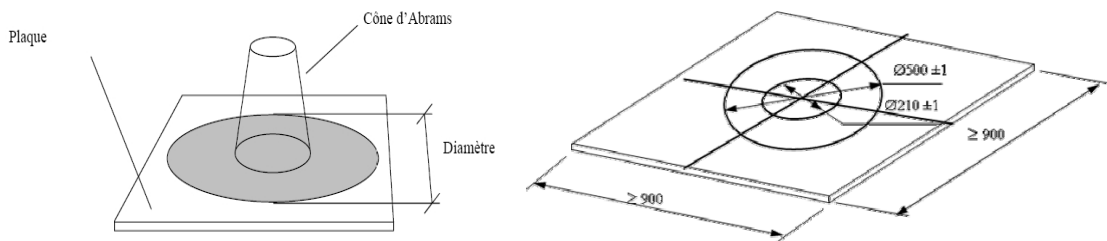


Figure I.1. Schéma de principe de l'essai d'étalement

2.1.2. Essai de la boîte en L (Lbox)

Cet essai permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage au droit des armatures. Le schéma de la boîte ainsi que le principe de l'essai sont décrits sur la Figure I.2.

La partie verticale de la boîte est remplie de béton qu'on laisse reposer une minute. On lève la trappe et on laisse le béton s'écouler à travers le ferrailage. Une fois l'écoulement terminé, on mesure les deux hauteurs H_1 et H_2 et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage H_2/H_1 . Le taux de remplissage pour un BAP doit être supérieur à 0.8. Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage ou qu'il y a blocage des granulats, c'est le signe de l'apparition de la ségrégation.

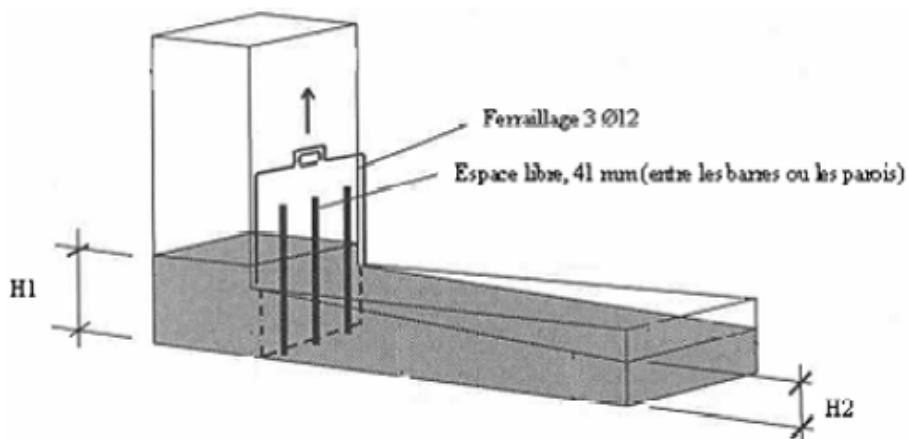


Figure I.2. Schéma de principe de l'essai de la boîte en L [1]

2.1.3. Essai de stabilité au tamis

Cet essai vise à quantifier le risque de ségrégation des BAP. Il permet de compléter l'essai de la boîte en L. On prélève un échantillon de 10 litres de béton, après 15 minutes d'attente, on verse sur un tamis d'ouverture 5 mm, une masse de 4.8 kg de béton et on relève la masse de l'échantillon ainsi que celle du fond avec la laitance.

Calculer le pourcentage en masse de laitance par rapport à la masse de l'échantillon, en arrondissant au pour cent près :

$$\%Laitance = \frac{P_{laitance}}{P_{échantillon}} \cdot 100 \quad (I.1)$$

La mesure de ce pourcentage permet de classer les formules de BAP :

- 0% < % Laitance < 15% : Stabilité satisfaisante ;
- 15% < % Laitance < 30% : Stabilité critique ;
- % Laitance > 30% : Stabilité très mauvaise.

2.1.4 Essai d'entonnoir V-Funnel

L'essai a été développé au Japon et utilisé par Ozawa et al [2]. L'équipement se compose d'un entonnoir en forme de V, montré dans Figure I.3. L'essai de V-Funnel décrit est utilisé pour déterminer les capacités de remplissage (fluidité) du béton avec une taille maximale des granulats de 20 mm selon la norme NF EN 12350-9 [3]. L'entonnoir est rempli d'environ 12 litres de béton et le temps pris pour qu'il passe à travers l'appareil mesuré. L'essai est relié à la viscosité. Plus le temps d'écoulement est court, plus la fluidité du béton est importante. Le temps d'écoulement augmente quand le rapport addition/ciment diminue au contraire de l'étalement qui diminue avec la diminution de ce rapport [4]. Les temps d'écoulement au V-funnel dépendent également du type d'application comme le montre la Figure I.4 [5]. Ensuite l'entonnoir peut être rempli de béton et laissé pendant 5 minutes pour s'arranger. Si le béton montre la ségrégation alors le temps d'écoulement augmentera de manière significative [6].

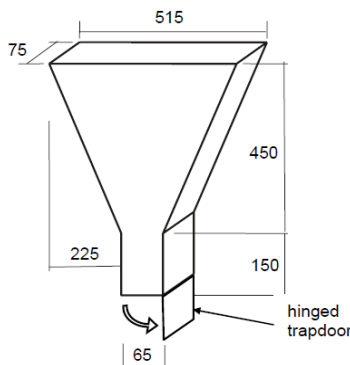


Figure I.3. Description de l'entonnoir V funnel [7]

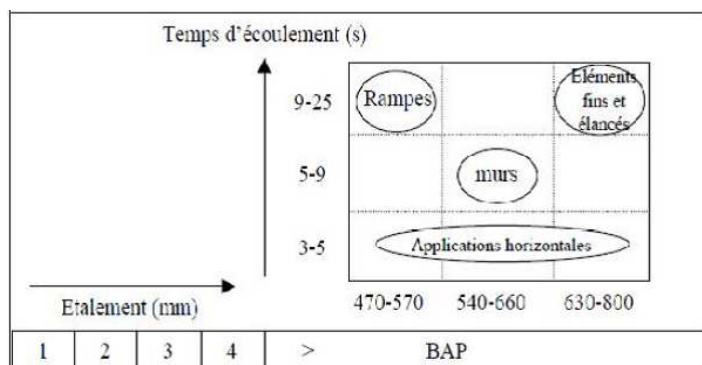


Figure I.4. Domaines de classification des bétons étendus au cas des BAP [2]

2.2. Influence des paramètres de formulation

2.2.1. Adjuvants

2.2.1.1. Superplastifiants

L'apparition des BAP et des bétons à hautes performances (BHP) est fortement liée aux progrès réalisés dans le domaine des adjuvants et plus particulièrement celui des superplastifiants (SP). Les superplastifiants réagissent avec les particules du ciment et les additions minérales. L'action principale des superplastifiants est de défloculer les grains de ciment. Une action de répulsion électrostatique agit en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains et/ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres, grâce à des chaînes moléculaires très longues. L'eau piégée par les floccs est de nouveau disponible pour la maniabilité du béton (Figure I.5). Il est alors possible de mettre en œuvre des bétons très fluides, avec des rapports E/C faibles.

Sugamata et al [8] (cité dans [9]) ont montré que l'augmentation du dosage de superplastifiants n'a plus d'influence sur la fluidité du mortier à partir d'une certaine valeur. Cette valeur est maintenant bien connue. Il s'agit du dosage à saturation, c'est-à-dire le dosage au-dessus duquel l'adjuvant ne permet plus de modifier de façon significative la fluidité du mélange. Actuellement, les superplastifiants sont donc utilisés à un dosage proche du dosage à saturation. Elhilali [10] a constaté que le dosage en superplastifiant de saturation est beaucoup plus affecté par la finesse des particules des poudres que par leur composition chimique.

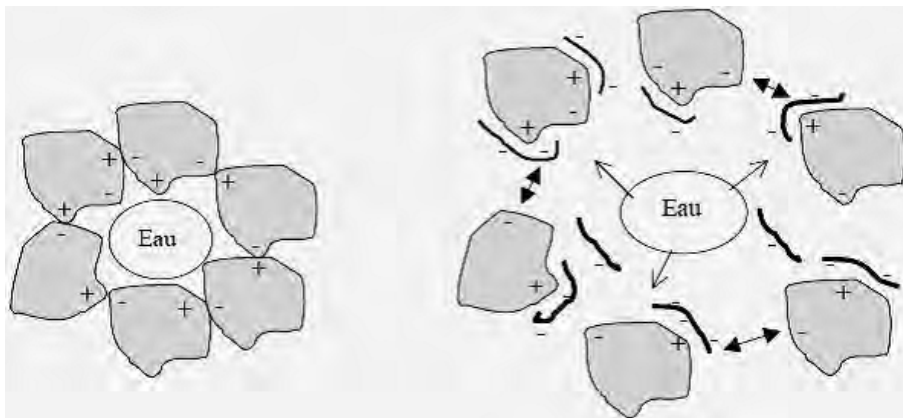


Figure I.5. Action des superplastifiants-Défloculation des grains de ciment [5]

2.2.1.2. Agent de viscosité

Ce sont généralement des dérivés celluloseux, des polysaccharides ou des suspensions colloïdales. Ces produits, comme les fines, ont pour rôle d'empêcher le ressuage et de limiter les risques de ségrégation des granulats en rendant la pâte plus épaisse.

2.2.2. Fines et volume de pâte élevé

Les BAP contiennent une quantité de fines (de l'ordre de 500 kg/m³ [11]) supérieure à celle des bétons conventionnels. Cette quantité de fines est nécessaire pour assurer une maniabilité suffisante tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage. Ces fines proviennent du ciment, des additions et des granulats.

L'ajout de fines augmente la quantité de la pâte (ciment + additions + adjuvants + eau efficace + air) qui joue un rôle important dans la fluidité car elle peut réduire les interactions entre les plus gros grains en écartant les granulats les uns des autres. Les frottements entre les granulats limitent l'étalement et l'aptitude au remplissage des bétons. C'est pourquoi, les BAP contiennent un volume de pâte important, typiquement de 330 à 400 l/m³. Le volume de pâte dans un BAP représente 35 à 45 % du volume total, alors que dans un béton traditionnel il est de 20 à 35 % [1], et qu'un superplastifiant est employé pour fluidifier la pâte.

Il est donc nécessaire dans le cas des BAP de remplacer une partie du ciment par des additions minérales. Le liant peut être un composé binaire ternaire voire quaternaire: ciment portland mélangé avec une ou plusieurs additions minérales pour éviter des chaleurs d'hydratation trop grandes et pour éviter bien sûr un coût de formule trop élevé.

Différentes additions peuvent être utilisées : fillers calcaires (FC), laitiers granulés de hauts fourneaux (LG), fumées de silice (FC) et cendres volantes (CV). Le choix des additions et leur teneur respective dans les BAP est réalisé pour répondre aux exigences de résistance à la compression à 28 jours et aux exigences de durabilité telles qu'imposées par les normes applicables (NF EN 206-1 [12], etc. . .).

Ces matériaux peuvent avoir une influence chimique et/ou un rôle physique selon leur nature. Ils peuvent accélérer voire participer à la formation des hydrates [13 et 14]. Ils peuvent aussi entraîner à une modification de la porosité de la matrice cimentaire et influence les caractéristiques mécaniques et autoplaçantes du béton [15] (cité dans [4]). En général, une matière pouzzolanique tel que la CV améliore la déformabilité du béton (particules sphériques et lisses), le LG est supposé d'améliorer la résistance et la maniabilité (particules vitreuses), la FC augmente la résistance à la séparation des constituants du béton et réduit significativement les phénomènes de ressuage et de ségrégation.

2.2.3. Volume de gravillons faible

Il est possible d'utiliser des granulats concassés ou roulés pour la formulation des BAP. Toutefois, comme les gravillons sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée, il faut

en limiter le volume. D'un autre côté, la présence de gravillons permet d'augmenter la compacité du squelette granulaire du béton et donc de limiter la quantité de liant nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité et la résistance souhaitées. En général, ces considérations conduisent à adopter un rapport gravillon/sable d'environ $G/S \approx 1$ dans les BAP.

3. BAP A L'ETAT DURCI

3.1. Propriétés mécaniques

3.1.1. Résistance à la compression

Les superplastifiants et les agents de viscosité ont des répercussions sur la résistance mécanique des bétons autoplaçants. Selon Felekoglu et al [16], l'agent de viscosité diminue la résistance aux jeunes âges. Par contre, certains superplastifiants entraînent des effets secondaires comme le retard de la prise qui aboutit à l'augmentation du développement de la résistance mécanique au jeune âge [17] (cité dans [9]).

Mais, à long terme, la résistance en compression des BAP est, soit inférieure à celle des BVs [18], ce qui est attribué aux quantités importantes de fluidifiant et à la présence du filler calcaire, soit égale à celle des BVs [19], alors que la tendance est évident que le BAP montre des résistances supérieures avec même rapport E/C [20]. Les résultats expérimentaux de Hanna [9] montrent des comportements significatifs entre les BAPs et les BVs. Les essais de résistance à la compression ont permis de distinguer un gain de résistance. Ce gain est expliqué par une réhydratation de la matrice cimentaire due à la migration de l'eau à travers les pores pour les BAP, mais aussi à de meilleures propriétés liantes des hydrates formés. La réhydratation concerne les éléments anhydres de la pâte de ciment.

Un autre élément influençant la résistance à la compression est le volume de la pâte. Turcry et al [21] (cité dans [9]) montrent que le volume de la pâte a un effet réel mais limité sur la résistance en compression. Il est observé une diminution de 12% de la résistance pour une augmentation de 57% du volume de pâte. De même, Pineaud [22] (cité dans [9]) constate que le volume de la pâte a une faible influence sur la résistance en compression. Parallèlement au volume de pâte, le rapport E/L est un des facteurs les plus influents sur la résistance en compression. Pineaud [22] montre que l'influence du rapport E/L est comparable à celle obtenue par d'autres auteurs sur des BV [23 et 24].

3.1.2. Module d'élasticité

Le module d'élasticité dépend à la fois des proportions et des modules des différentes phases constituant un béton.

Or, un BAP est composé d'un volume de pâte important et de rapport G/S plus faible qu'un BV.

D'après différents codes (Eurocode ou DTU), le module d'élasticité est fonction de la résistance en compression des bétons. Donc, à résistance égale, un BAP devrait avoir le même module qu'un béton vibré. Or, Persson [19] a montré que le module est similaire pour les BAP et les BV. De même, König et al [25] (cité dans [9]) constatent que les modules des BAP sont très proches de ceux des BV. D'autres auteurs indiquent un module plus faible que ceux des bétons vibrés [1, 20 et 22].

4. ADDITIONS MINÉRALES

4.1. Définition

Une addition minérale est une poudre d'une finesse supérieure à celle du ciment. Elle peut être ajoutée et/ou substituée au ciment lors de sa fabrication (ciment composé) ou ajoutée directement dans le malaxeur lors de la fabrication du béton. Elle permet ainsi d'améliorer certaines propriétés ou conférer aux matériaux des propriétés particulières. On distingue deux types d'additions : les additions inertes et les additions réactives. L'AFGC [1] recommande l'emploi de quantités importantes de fines dans un BAP pour assurer sa stabilité à l'état frais et éliminer les risques de ségrégation. Quand ce volume est occupé intégralement par du ciment Portland, il fournit au matériau durci, un niveau de performance excessif par rapport aux spécifications demandées. Cependant, il ne faut pas perdre de vue que le dégagement de chaleur engendré par les réactions exothermiques produites lors de l'hydratation du ciment peuvent provoquer des fissurations de l'élément et il est donc naturel de remplacer une partie de ce volume par des additions minérales, qui sont moins réactives que le clinker et d'un coût inférieur sur le plan énergétique et environnemental ce qui réduit largement le prix final du BAP [26]. Cette réduction est dans l'ordre de 0,05 – 0,2 \$/MPa/m³ d'après [27].

Ainsi, l'utilisation des additions minérales est intéressante car la combinaison de plusieurs matériaux cimentaires ayant des granulométries différentes permet d'améliorer la granulométrie totale des particules fines ainsi que celle du mélange de béton. Ceci favorise l'augmentation de la stabilité et l'accroissement de la déformabilité du béton.

4.2. Utilisation des additions minérales en Algérie

Bien que l'emploi des additions minérales se soit généralisé dans le monde, il reste très limité en Algérie. L'emploi de ces matériaux n'est pas encore répandu dans le domaine du génie civil malgré la disponibilité en grande quantité de ces ajouts tels que le laitier granulé, le

calcaire ou la pouzzolane naturelle et leurs coûts relativement réduit par rapport au ciment. En effet, de nombreuses études ont été réalisées, traitant de l'influence des additions minérales sur plusieurs aspects des bétons. Actuellement, l'emploi des additions se limite seulement au secteur de l'industrie cimentaire pour la production du ciment composé. Le Tableau I.1 résume l'utilisation des différentes additions dans les cimenteries algériennes.

Tableau I.1. Utilisation des additions minérales dans les cimenteries algériennes [28]

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

4.3. Différents types d'additions minérales

4.3.1. Fillers calcaires

Les fillers calcaires sont des poudres de roche secs finement divisés obtenus par broyage et/ou sélection industriel des roches calcaires, dont les caractéristiques sont définies par la norme NF P 18-508 [29]. Les dimensions des particules de fillers s'étendent de quelques μm à quelques dizaines de μm , déterminées en utilisant la granulométrie laser.

D'après le rapport du RILEM [30], lorsque le filler calcaire est utilisé, trois phénomènes peuvent être observés lié à l'hydratation du ciment:

- Un raccourcissement considérable de la phase dormante ;
- Une accélération des réactions d'hydratation après la phase dormante ;
- (Parfois) l'apparition d'un troisième pic dans le taux de production de chaleur.

Barluenga et al [31] et Ramachandran [32] (cité dans [28]), montrent qu'en plus de leur effet physique, les fillers calcaires présentent une certaine activité physico-chimique, qui favorise l'accélération de l'hydratation du clinker par la création de sites de nucléation (germination)

hétérogène, notamment, lorsque l'addition est finement broyée. À long terme, les fillers siliceux peuvent contribuer faiblement à une réaction pouzzolanique [33]. Ye et al [34] montrent que la poudre de calcaire employée dans la pâte de ciment du BAP ne participe pas à la réaction chimique et elle agit comme un accélérateur au début de l'hydratation du ciment.

Les études publiées par Benmarce et al [35] et Tragardh [36] ont en effet montré que les additions minérales telles que le filler calcaire, donnent aux BAPs une microstructure plus dense que les BVs de même rapport E/C. La porosité de ces BAPs, en particulier celle de l'auréole de transition, est significativement plus faible que celle des BVs. D'après ces données, il en résulte de ces observations une amélioration de la durabilité des ces bétons.

Zhu et Gibbs [37] ont étudié l'influence de différents types de filler calcaire. Dans le cas des pâtes de ciment, le type de filler utilisé ne semble pas avoir d'influence sur l'étalement. Par contre, si on s'intéresse au béton, ils montrent que le type de filler a une forte incidence sur la quantité de superplastifiant pour un étalement donné. Malgré cela, quel que soit le type de filler utilisé, leurs résultats montrent que plus il y a de filler en remplacement du ciment, moins il faut de superplastifiants pour atteindre un étalement donné.

4.3.2. Laitier granulé

Les minerais de fer sont utilisés pour la fabrication de la fonte ; en plus de leurs phases ferreuses, ces minerais contiennent aussi des minéraux proches de ceux de la cru du clinker. Lors du processus de la fusion du minerai dans les hauts fourneaux à une température allant de 1135 à 1350°C, se produit la séparation gravitaire, la fonte se dépose dans la partie inférieure du four, tandis que le laitier surnage en partie supérieure dû à sa faible densité par rapport à la fonte. À la sortie du four, le laitier à une température avoisinant celle de la fusion, est soit refroidi brusquement à l'eau (trempe) et le laitier prend l'appellation de laitier granulé défini par la norme NF EN 15167-1 [38], soit déversé dans des fosses à sa sortie du haut fourneau et laissé refroidi lentement à l'air libre et le laitier prend l'appellation de laitier cristallisé (LC), il se présente sous forme de granulat de 0 à 20 mm après concassage. La vitrification du laitier granulé par la trempe confère au matériau son pouvoir hydraulique latent. Un broyage fin des laitiers leur permettent d'être utilisés comme additions dans les ciments et les bétons.

Considéré au début comme un déchet de la sidérurgie, ensuite comme coproduit, l'utilisation du laitier granulé reste cependant limitée en Algérie au domaine de la cimenterie en raison de son faible pouvoir hydraulique. Le laitier granulé procure au matériau des performances mécaniques et une durabilité accrues [39], c'est pourquoi les ciments au laitier sont

particulièrement indiqués pour les bétons soumis à des ambiances agressives. Le BAP à base de laitier de haut fourneau peut être obtenue de deux manières différentes: en ajoutant le laitier de haut fourneau séparément dans le mélange, ou en utilisant un ciment de laitier de haut fourneau. La réaction de laitier est principalement activée par la chaux mis à disposition lors de l'hydratation du clinker (et par les sulfates et les alcalis). Il est bien connu que les laitiers réagissent plus lentement avec de l'eau, et que la réaction de laitier est plus sensible à la chaleur que le clinker Portland [30].

4.3. 3. Laitier cristallisé

Le terme laitier du haut fourneau est limité seulement aux laitiers formés par la production du fer, et ne couvre pas les laitiers formés lors de la production des métaux non ferreux.

La coulée de laitier, encore liquide est directement déversée dans des fosses adjacentes au haut fourneau, où encore transportée par wagons dans les aires de refroidissement spécialement aménagées au dehors de l'usine. Le laitier se refroidit lentement à l'air libre par couches d'une dizaine de centimètres d'épaisseur. Lorsque la solidification en masse est réalisée (température de 400°C à 500°C) on arrose la fosse avec de l'eau froide pour abaisser la température du laitier à 150°C environ. Cet arrosage présente deux avantages :

1. Il permet de réduire quelque peu le séjour des matériaux dans les fosses en accélérant leur refroidissement ;
2. Il provoque de nombreuses fissures dans la masse du laitier, ce qui facilite son extraction ultérieure ;

Toutefois, il ne convient pas de faire descendre la température du laitier au dessous de 90°C lors de l'arrosage, afin que le laitier soit assez sec pour se prêter commodément à des opérations de broyage et de tamisage [40]. Le laitier cristallisé obtenu, présente une forte densité apparente et une bonne résistance au choc et à l'usure car leur grande viscosité empêche les gaz dissous de se dégager au cours du refroidissement.

En ce qui concerne la composition minéralogique du laitier cristallisé, la majorité des laitiers sont stables, mais dans certaines conditions où le laitier est à faible teneur en Al_2O_3 , il est considéré instable [40].

L'utilisation du laitier cristallisé comme granulats de béton est conditionné principalement par sa stabilité, il doit être en outre dense et doit avoir une texture cristalline plutôt que vitreuse [40]. Ces caractéristiques dépendent fortement de la composition chimique du laitier et de son mode de refroidissement. Le laitier cristallisé étant utilisé après concassages et criblages

comme granulats dans la fabrication de matériaux d'assises de chaussées (grave laitier tout laitier) [41], ou comme granulats dans le béton [40], ou même comme addition dans les BAP [42 et 43].

4.4. Effets des additions minérales

Dans ce qui suit est rapporté l'effet des additions minérales utilisées dans cette étude sur les propriétés rhéologiques, physiques, chimiques et mécanique des BAPs ainsi que sur leur durabilité.

4.4.1. Effets sur l'écoulement

4.4.1.1. Effet du filler calcaire

Le filler calcaire est largement employé dans les nouveaux bétons, tels que les BAP et à des dosages élevés. Il se caractérise par de faibles besoins en eau par rapport au ciment. En effet, Gallias et al [44], rapportent que son utilisation influence peu la demande en eau et peut conduire à une légère diminution de la viscosité du mélange cimentaire. Les travaux de Zhang et Han [45] et Yahia et al [46] révèlent que l'ajout du filler calcaire pour un dosage constant en ciment, diminue la viscosité de la pâte de ciment et cela malgré l'augmentation de la concentration volumique en solides. Cet ajout, entraîne une augmentation du seuil de cisaillement si la concentration volumique en solides de la suspension augmente [47]. Cependant, au-delà d'une certaine valeur critique en filler calcaire qui tient compte du rapport E/C, on assiste à une augmentation de la viscosité [45 et 46]. Les chercheurs Beixing et al [48] aperçoivent que cette valeur critique est une teneur de filler calcaire supérieure à 10% qu'au-delà une augmentation de la viscosité de la pâte et de la demande de superplastifiant ont eu lieu pour avoir un étalement visé du BAP. Felekoglu [27] a constaté que l'incorporation de la poudre de calcaire au même contenu de ciment a généralement réduit le besoin de superplastifiant.

Ali-Boucetta [28] a étudié l'effet de la teneur de 35 à 45 et 60 % de FC, PV et LG sur les caractéristiques des BAP à l'état frais et à l'état durci. Il a pu conclure que les demandes en eau et en superplastifiant des additions dépendent de leur finesse et de leur nature et dosage. Ainsi le filler calcaire est caractérisé par des demandes en eau et en superplastifiant modérées. L'augmentation du dosage en addition entraîne un accroissement des propriétés rhéologiques telles que le seuil de cisaillement statique et la viscosité apparente. D'après Elhilali [10], pour les fines calcaires utilisés, une augmentation de la surface de Blaine conduit à une diminution du dosage en superplastifiant répondant à la maniabilité du BAP et à une diminution légère de

la viscosité et le seuil de cisaillement des BAP. Neto et Campitelli [49] ont observé la réduction du seuil de cisaillement avec l'augmentation de la teneur en filler calcaire, et aussi l'augmentation de la viscosité plastique au-delà d'une certaine valeur de la finesse du calcaire (la valeur limite de la finesse du calcaire n'a pas été précisée).

Une étude de Esping [50] montre qu'en cas de variation de la surface spécifique BET (H₂O) – d'une valeur de 1000 m²/kg cela correspond à un besoin d'eau supplémentaire d'environ 0,85% en masse de la teneur en filler pour une fluidité constante. Une grande surface spécifique de filler se traduira par une augmentation de retrait endogène, une diminution de l'évaporation, faible tendance à la fissuration plastique et une résistance à la compression plus élevée. Avec de l'eau supplémentaire les résultats étaient le contraire.

Georghe et al [51] ont étudié l'influence du filler calcaire (comme référence) et du tuf volcanique, et d'autres principaux paramètres de composition sur l'ouvrabilité et à l'évolution dans le temps de la résistance à la compression du BAP. Ils ont apprécié que la poudre de calcaire est très bénéfique pour l'augmentation de la mobilité du BAP à l'état frais. Une étude de Uysal et Yilmaz [52] affirme l'effet positif de la poudre de calcaire et d'autres additions (poudre de basalte et poudre de marbre) sur les propriétés d'autoplaçabilité à l'état frais et notamment sur la l'écoulement. Nécira et al [53] constatent que l'introduction de (30% à 40% en masse de liant) du (filler calcaire, pouzzolane naturel et laitier) offre des formulations de BAP qui répondent aux critères requis par l'AFGC et améliore de manière significative les propriétés rhéologiques du BAP tout en assurant une résistance à la compression acceptable.

4.4.1.2. Effet du laitier granulé

Des études Ferraris [54] et Khayat [55] montrent que l'ajout du laitier granulé de hauts fourneaux en substitution du ciment, permet globalement de réduire le seuil de cisaillement et la viscosité plastique des pâtes de ciment. D'autres travaux de Shi et ali [56] (cité dans [28]) aperçoivent que les laitiers adsorbent le superplastifiant, ce qui se traduit par une demande en superplastifiant plus importante pour obtenir un même étalement ou valeur de seuil de cisaillement. Par contre l'étude réalisée par Ramanathan et al [57] cherchant l'effet de la teneur de 30, 40 et 50% des additions utilisées FS, CV et LG sur le performance du BAP authentifie que ces additions peuvent réduire la quantité de superplastifiant nécessaire pour obtenir une fluidité donné.

Le laitier granulé favorise l'écoulement des pâtes, principalement à cause de sa demande en eau qui est moins importante que celle du ciment [58], mais aussi à cause de sa morphologie

[44]. Les études de Boukendakji et al [59 et 60] qui consistent à quantifier l'influence de la teneur laitier algérienne (10, 15, 20 et 25 %) sur les propriétés du BAP à l'état frais et durci montre qu'une teneur optimale du laitier de 15% semble donner un bon mélange avec un maintien de fluidité d'environ 60 min.

Dans le cas des combinaisons binaire, ternaire et quaternaire des additions, Ahari et al [61] ont montré que la combinaison binaire de la fumée de silice et laitier granulé a diminuée les valeurs de la viscosité plastique et du temps V-funnel en par comparaison avec du BAP de référence sans addition. Par contre Vejmelkova et al [62] arrivent à conclure que pour des fluides newtoniens, le BAP au laitier a montré une viscosité typique plus élevée par rapport au BAP au métakaolin.

4.4.2. Effets sur les propriétés physico-chimiques

4.4. 2.1. Effet filler ou effet de remplissage

L'incorporation des additions au sein d'un matériau cimentaire améliore son squelette granulaire. En effet, les études de Baron et Ollivier [11] et Lawrenec [63] montrent l'existence d'une optimisation des propriétés du squelette granulaire par l'ajout d'additions. Ces fines particules s'intercalent entre les interstices des grains de ciment remplissant ainsi une partie du volume des vides. Le résultat de ce remplissage se traduit par une meilleure maniabilité du mélange et un accroissement des résistances pour un même rapport E/C et des propriétés de transfert. Ali-Boucetta et al [43] expriment que Le besoin en eau de la pâte contenant des additions minérales fines suit une tendance croissante à la surface spécifique. Cependant, la morphologie irrégulière des particules de certains adjuvants augmente de manière significative les besoins en eau. Pour de très faible proportion de ciment dans la pâte, le besoin en eau et, par conséquent, la porosité augmente de manière significative par rapport à celle mesurée sur pur pâte contenant des fines minérales empêchant toute optimisation du besoin en eau. Seules les additions avec une large distribution de particules pourraient réduire les besoins en eau des pâtes de ciment mélangés.

Dans les BAP, les fillers peuvent représenter une part importante du volume total. Benmarce et al [35] ont montré que les additions minérales comme les fillers calcaires, conduisent à une microstructure plus dense du BAP que du BV pour un même E/C.

4.4.2.2. Effet chimique ou pouzzolanique

L'effet chimique concerne la capacité des additions, caractérisées par des propriétés pouzzolaniques et/ou hydrauliques à réagir avec l'eau et les constituants anhydres ou hydratés

du ciment pour former de nouvelles phases minérales qui contribuent à la résistance mécanique au même titre que les produits hydratés du ciment, mais aussi à l'amélioration de la durabilité. Cet effet bénéfique est fonction de nombreux paramètres et tient compte de la composition chimique ou minéralogique de l'addition, de sa surface spécifique et du type de ciment.

De plus, les fillers peuvent être inertes, actifs ou encore pouzzolaniques [64]. Les matériaux pouzzolaniques tels que la fumée de silice, les cendres volantes et de laitier de haut fourneau est un moyen efficace pour densifier la microstructure et de réduire la taille des pores capillaire [29]. L'activité hydraulique concerne plus particulièrement le laitier granulé, qui développe des propriétés d'hydraulicité et demande une présence d'eau. Cette réaction est très lente d'où la nécessité de le broyer finement et de l'activer par ajout d'une base forte. On obtient alors des C-S-H dont le rapport C/S est plus important que celui des C-S-H issus de la réaction pouzzolanique [65].

Cherfa et Ait Mokhtar [41] ont utilisé du laitier cristallisé dans un BAP fibré et a montré que la substitution du filler calcaire par le laitier cristallisé entraîne une diminution de l'ouvrabilité et permis d'avoir un petit gain de résistance à 28 jours par effet hydraulique. Il est à noter que ces réactions pouzzolaniques et hydrauliques prennent toutes leurs ampleurs pour des longues échéances [66].

4.4.2.3. Effet physique ou de surface

L'incorporation d'addition inerte ou réactive au sein d'une matrice cimentaire contribue au développement des résistances à court terme. Il n'est plus à démontrer que les additions jouent le rôle de sites de nucléation préférentiels au cours des réactions d'hydratation du ciment [67, 68 et 43]. L'effet de surface consiste à la création de sites préférentiels d'hydratation constitués par les surfaces procurées par l'addition minérale. Par conséquent, l'épaisseur de la couche d'hydrate qui se forme autour d'un grain de ciment anhydre est réduite, facilitant ainsi l'hydratation du cœur anhydre par phénomène de diffusion. L'addition entraîne donc une meilleure hydratation du ciment à un instant donné.

La présence des additions entraîne une accélération de l'hydratation du ciment qui se traduit par un développement des résistances mécaniques au jeune âge. On s'attend donc à ce qu'il y ait une amélioration des résistances mécaniques avec l'augmentation de la finesse des additions [69] (cité dans [28]). A rapport constant E/C et au dosage constant de SP, Menadi et al [70] affirment que l'augmentation de la finesse du laitier de 350 m²/kg à 420 m²/kg a négativement affecté la déformabilité et la mobilité de BAP. Cependant, plus que la surface

spécifique, c'est vraisemblablement le nombre de particules d'addition par unité de volume de pâte qui est le paramètre essentiel de ce phénomène [38].

4.4.3. Effets sur la résistance mécanique et la durabilité des BAP

La pérennité d'un ouvrage en béton et sa durabilité dans le temps, dépend de plusieurs paramètres liés d'une part à l'environnement (milieu agressif, types et concentration des agents agressifs) et d'autre part au matériau lui-même (nature et dosage des constituants, conditions de confection et de cure). Il est généralement admis qu'un béton durable est un béton résistant aux agressions. La pénétration des éléments agressifs dans le béton s'effectue par l'intermédiaire du réseau poreux de la matrice cimentaire, qui représente une barrière ouverte au milieu extérieur. Ce réseau poreux est caractérisé par une quantité de pores de dimensions variables pouvant être connectées ou non. L'inter-connectivité de ce réseau est une caractéristique qui définit la susceptibilité du matériau d'absorption est le degré de pénétration de tel ou tel agents.

Comme les BAPs se caractérisent par un volume de pâte élevé qui peut être obtenu généralement par l'ajout d'une quantité importante d'additions minérales. Les auteurs Pandey et Sharma [71] et Ramezani pour [72] s'accordent sur le fait que les additions minérales développent une microstructure différente de celle développée par un ciment Portland ordinaire. Ceci dépend étroitement de la nature de l'addition (inerte ou réactive) et de sa finesse, mais aussi du mode d'introduction de l'addition par substitution et/ou ajout.

4.4.3.1. Résistance mécanique

Pour un rapport eau/liant similaire, les BAPs développent une résistance mécanique en compression égale et parfois même légèrement supérieure à celle des BVs [14, 20 et 66]. La raison à cette différence est liée à l'utilisation des additions minérale, la prise en compte ou non du concept du liant équivalent ainsi qu'un dosage en superplastifiant plus élevé que dans les BVs [17 et 73].

Pera et al [13] et Gibbs et Zhu [74] ont comparé l'évolution de la résistance mécanique des BAP contenant des fillers calcaires à celle des BV. Ces auteurs ont observé une accélération de la résistance au jeune âge jusqu'à 28 jours (Figure I.6). Ceci s'explique par l'hydratation favorisée par une multiplication des sites de nucléation des fines du filler. D'après Petersson [75] (cité dans [28]), cette résistance augmente d'autant plus que la finesse du filler est importante (Figure I.7).

L'étude menée par Assié [76] afin de savoir si à résistance mécanique égale, le BAP est aussi durable que le BV, révèle qu'il y avait très peu de différences entre les deux types de béton. Leurs résultats expérimentaux ont montré qu'à rapports Eau/Liant_{équ} similaires la résistance mécanique des BAPs étudiés est légèrement supérieure à celle des BVs à cause de l'utilisation de fillers calcaires et le dosage en superplastifiants plus élevé dans les BAPs (Figure I.8). Le module d'élasticité des BAPs s'est révélé inférieur à celui des BVs (-7%). Par conséquent, les différences en termes de volume de pâte ont pu amener les BAPs à présenter des déformations différées plus importantes que celles des BVs. Les BAPs ont prouvé qu'ils possèdent des comportements équivalents à ceux des BVs concernant les différentes propriétés de transfert étudiées (perméabilité à l'oxygène, diffusion des ions chlorures et absorption d'eau par capillarité).

Georghe et al [51] ont aussi confirmé que la contribution de la poudre de calcaire aux résistances à la compression au jeune âge est importante et bénéfique. Felekoglu [27] exprime que l'incorporation de la poudre de calcaire au même contenu de ciment a généralement amélioré la résistance à la compression de 28 jours des mélanges de BAP.

Nikbin et al [77] ont conclu qu'avec l'augmentation de la teneur en poudre de calcaire de 25% à 100% la résistance à la compression du BAP augmente de 20% et 38% pour les deux rapports E/C 0,6 et 0,47 respectivement. Avec un rapport E/C faible, l'effet de la teneur de la poudre de calcaire sur l'augmentation de résistance à la compression est plus perceptible. Une autre étude de l'effet du taux de substitution (de 17 à 33%) du ciment par du FC menée par Bensebti [78] a constaté que les résistances à la compression sont inversement proportionnelles avec le taux de substitution du ciment par des fillers calcaires. L'ordre de grandeur des résistances de BAPs obtenues restent dans la gamme des résistances usuelles des BVs. Il est donc important de noter que la gamme des BAPs, en matière de résistances mécaniques, est assimilable aux BVs.

A son tour, Boudchicha [79] a étudié l'effet du taux de substitution (de 10 à 50%) du ciment par du FC, LG et de la pouzzolane (PZ) sur l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des BVs. Il affirme que le comportement rhéologique dépend de la nature, la quantité et la finesse des additions, indépendamment de la nature du ciment utilisé et que l'utilisation des additions à faibles taux apporte des améliorations significatives aux propriétés mécaniques. Pour le laitier ces améliorations sont significatives à 20 % du taux de substitution et une finesse équivalente à celle du ciment, permet de garantir ces améliorations. Pour le calcaire, les améliorations de résistances à 28 jours, restent assez limitées à 10 % du taux de

substitution et qu'une finesse assez importante ($\sim 8000 \text{ cm}^2/\text{g}$), est nécessaire pour garantir un minimum d'amélioration. A 7 jours les améliorations sont beaucoup plus intéressantes.

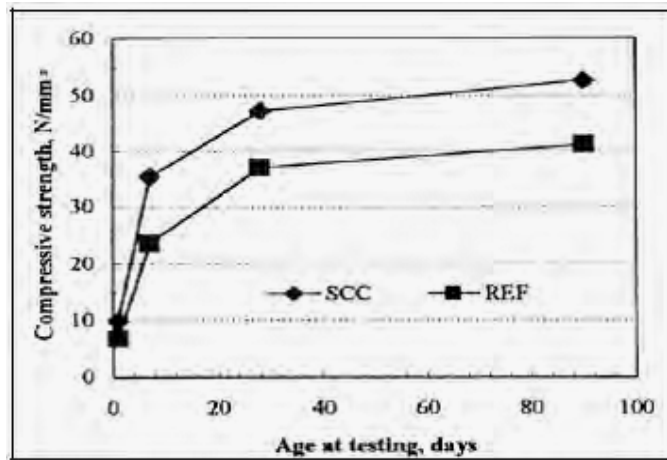


Figure I.6. Evolution de la résistance mécanique d'un BAP et d'un BV correspondant [74]

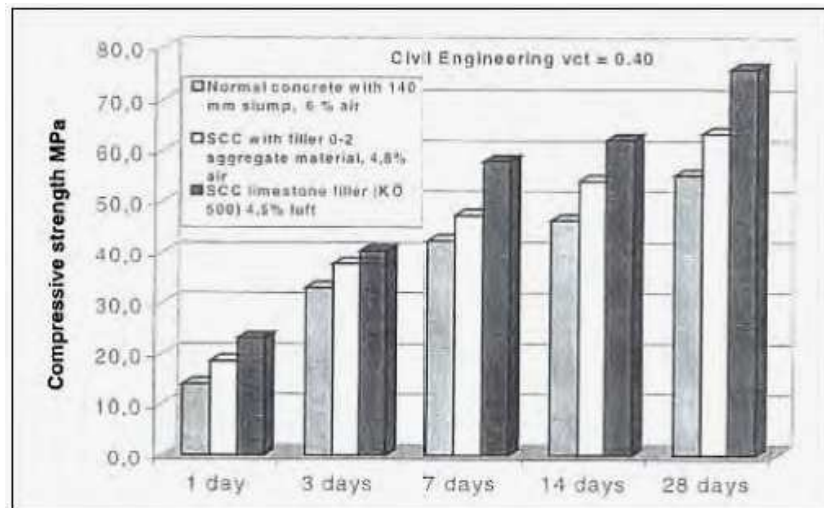


Figure I.7. Résistance mécanique d'un BV et de deux BAP [75]

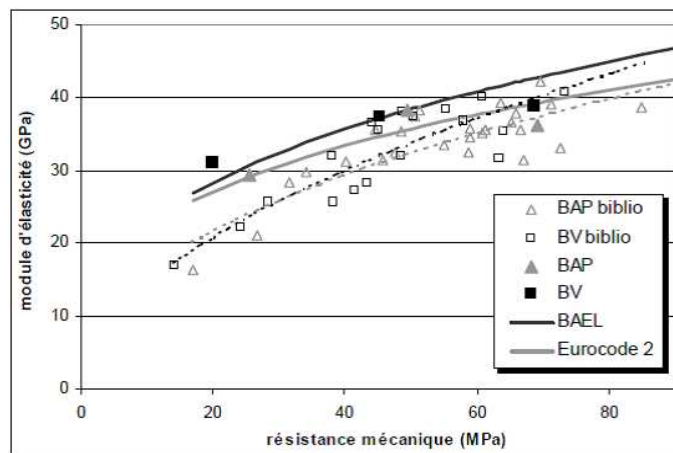


Figure I.8. Module d'élasticité de divers bétons en fonction de leur résistance mécanique [76]

Shi et al [80] ont étudié l'influence du remplacement du ciment Portland par de FD et du LG sur la résistance à la compression des BHPs. Les auteurs rapportent que la valeur critique au-delà de laquelle le remplacement du ciment par les additions n'altère pas les résistances, est fortement dépendante du rapport eau/liant (E/L). En effet, pour un rapport E/L de 0.25, la résistance à la compression des bétons à base de FS augmente avec l'augmentation du taux de remplacement jusqu'à 30%. Tandis que pour un rapport E/L de 0,30, les bétons à base de LG ont un taux de remplacement optimal de 15%. Pour un même rapport E/L, les auteurs trouvent que la résistance en compression des bétons à base de LG est beaucoup plus élevée que celle à base de FS. Ceci pourrait être attribué à la capacité hydraulique latente du LG.

L'étude de Boukendakji [59] montre que de la résistance à la compression diminue avec l'augmentation de la teneur en LG (10, 15, 20 et 25 %), mais cette diminution de la résistance est moins importante à long terme (56 et 90 jours).

Ali Boucetta [28] expose que le FC améliore les résistances mécaniques à court terme, ces dernières ayant tendance à se stabiliser au-delà de 28 jours. Le LG et le verre réduisent la porosité parallèlement à l'augmentation de la durée de cure, et permettent ainsi d'obtenir de bien meilleures résistances à plus longues échéances, principalement par effet hydraulique et pouzzolanique, significatifs au-delà de 28 jours à cause d'une densification de la matrice cimentaire.

4.4.3.2. Porosité

La porosité est définie comme étant le volume total des vides contenus dans le béton pour 1 m³ de matériau. Cette porosité augmente avec l'augmentation du rapport E/C et est en général comprise entre 11 et 18%. Elle est constituée de pores plus ou moins interconnectés, ainsi que de micro ou macro-fissurations. Les dimensions caractéristiques des pores vont d'une dizaine de nanomètres au millimètre. Ils peuvent être remplis d'air ou d'eau libre suivant la teneur en eau libre du béton. Cette teneur en eau libre désigne l'eau présente dans les vides du béton et ne participant pas à l'hydratation du ciment. On recherche particulièrement une faible porosité lors de la formulation du béton, qui assure une meilleure résistance mécanique du béton. La porosité du béton dépend du rapport E/C, un rapport E/C élevé induisant une plus forte porosité, mais également des conditions de cure ; l'hygrométrie doit être maintenue élevée pendant la cure afin d'assurer la meilleure hydratation possible du ciment, de même une augmentation de la durée de cure diminue le diamètre moyen des pores [68].

Le Comité Euro-International du Béton [81] propose une classification des pores présents dans la matrice cimentaire du béton comme suit:

- Porosité relative aux hydrates, dont le rayon moyen est compris entre 20 et 30 Å caractérisée par les vides les plus petits (pores du gel ou micropores), est une caractéristique intrinsèque des hydrates formés (exp : CSH). Ces pores ne sont pas affectés par la variation du rapport E/C. D'un point de vue de la durabilité, cette porosité n'a qu'un rôle secondaire ;
- Porosité capillaires, dont le rayon moyen est compris entre 0,01 et 100µm correspondent aux espaces vide de la matrice cimentaire non comblés par les hydrates et sont initialement occupés par l'eau en formant un réseau continu. Ce sont ces pores qui ont une influence prépondérante sur les mécanismes de transport de matière dans la matrice cimentaire du béton. Avec l'avancement de l'hydratation du ciment, les espaces capillaires se remplissent progressivement, ce qui favorise la diminution de la porosité capillaire dont le rapport E/C est fortement dominant ;
- Porosité dû à l'air occlus, dont le rayon moyen est compris entre 10µm et plus de 1mm apparaissent lors du malaxage et se caractérisent généralement par une forme sphérique (bulles d'air). Leurs dimensions et leur distribution dans la matrice cimentaire est liées aux conditions de mise en œuvre (malaxage et serrage), des propriétés rhéologiques du béton et de l'introduction ou non d'adjuvant. Ces vides n'évoluent pas au cours de l'hydratation, leur présence favorise la discontinuité des pores capillaire de la matrice cimentaire lors du transfert d'un liquide ou d'un gaz.

En ce qui concerne les additions, le réseau poreux du béton dépend de la nature et de l'intensité de leurs effets physiques, microstructural et éventuellement leurs effet chimiques. Les fillers améliorent la distribution des tailles de pores et les propriétés physiques du béton (ouvrabilité et rétention d'eau).

Ye et al [34] ont constaté que la structure des pores, incluant le volume total des pores, la distribution des dimensions des pores et le diamètre de pore critique, dans la pate de ciment du BAP au calcaire est très similaire à celle de la pate de ciment du BHP au calcaire.

Tandis que Boel et al [82] observent une distribution de la taille des pores différente entre BAP et BV avec des pores supplémentaires pour les BVs. Ce qui indique qu'il existe une zone moins dense et plus perméable de la microstructure des BVs.

Une différence significative est déterminée par Boel et al [83] pour la perméabilité apparente de gaz entre le BAP et BV. La différence pourrait être expliquée par la différence en volume des pores des bétons. Il est possible de réduire le transport dans le béton en remplaçant le FC

par des CV, en réduisant le rapport E/C, en augmentant le rapport C/P où en utilisant un ciment laitier de haut-fourneau au lieu du ciment Portland.

En effet, Buil et al [84] (cité dans [28]) rapportent que les distributions de taille de pores de ciment CEM I et CEM II à base de FC, pour la même classe de résistance sont très voisines. Les pâtes fabriquées avec ajout de LG ont une porosité plus importante, aux jeunes âges, du fait de leur réaction hydraulique latente. Par contre à long terme, l'effet chimique peut permettre une évolution notable de la porosité (à condition toutefois que la réaction puisse se dérouler c'est-à-dire qu'une cure efficace soit mise en œuvre pour le béton de peau) [32].

Le rapport du RILEM [30] révèle qu'en raison de la vibration, dans le cas d'un BV, il existe une porosité plus élevée dans la zone de transition inter-faciale (ITZ : interfacial transition zone). La raison de cette porosité plus élevée dans l'ITZ lorsque le béton a été vibré est supposée être l'accumulation de fluide interstitiel. Cet effet néfaste n'est pas présent dans le BAP, car il n'est pas soumis à des vibrations. Les résultats de certaines études montrent que la structure des pores dans le BAP, y compris le volume total des pores, la distribution et le diamètre critique des pores, est très similaire à béton haute performance (BHP). Par rapport à un BV, la microstructure du BAP est signalé à être plus dense. La microstructure plus dense et une diminution de la porosité peut en grande partie s'expliquer par la présence physique de charges minérales. Par ailleurs, en particulier le degré d'hydratation et le rapport E/C, en combinaison avec la quantité d'eau influencent fortement la structure des pores. Les produits d'hydratation se remplissent de plus en plus d'espace lorsque le degré d'hydratation augmente. Les dimensions des pores diminuent, ce qui induit une connectivité inférieure. Un faible rapport E/C donne une porosité capillaire et une connectivité inférieure. En général, le BAP a une meilleure ITZ par rapport au BV. On peut dire que l'ITZ dans le BAP ne diffère peu de la matrice de ciment en vrac. Toutefois, un rapport plus élevé E/C augmente l'ampleur et la porosité de l'ITZ. La comparaison des propriétés entre BAP et BV en général n'est pas facile en raison des concepts très différents de BAP existants dans le monde entier. Toutefois, il reste à quantifier certaines propriétés de microstructure, comme la porosité de gel, la porosité capillaire et la porosité totale.

4.4.3.3. Absorption capillaire

L'absorptivité est influencée par le rapport E/C, le taux de saturation des pores et la composition du liant, notamment, la nature du ciment et des additions minérales [65]. Les résultats obtenus par Assié [76] sur l'absorption capillaire entre des BVs et des BAPs à base de FC à différentes classes de résistance ne permettent pas de se prononcer sur la cinétique

d'absorption entre les deux types de bétons. Néanmoins, l'auteur admet qu'il y a une certaine ressemblance entre l'absorption capillaire des BAPs et celle des BVs, ce qui a été confirmé par Oliveira et al [85] qui rapportent que l'influence du FC est bénéfique pour l'absorption. D'autres résultats réalisés par Zhu et al [86] (cité dans [28]) démontrent que l'absorption capillaire des BAPs est inférieure à celle des BVs et qu'elle est d'autant plus faible qu'ils contiennent des FC.

5. PRINCIPALES METHODES D'EVALUATION DU BETON

5.1. Méthodes destructives

La plupart des propriétés des bétons sont en général évaluées par des essais sur des échantillons ayant été confectionnés avec la même gâchée que les ouvrages (éprouvettes normalisées 16/32 par exemple) ou bien ayant été prélevés directement sur les ouvrages à ausculter. Ces essais sont destructifs et les mesures des résistances R_c et R_t sont par exemple réalisées avec des presses (compression, traction par fendage, par flexion, etc.). La porosité peut être déterminée par le volume de mercure ou d'eau qui peut être injecté dans le béton, ou encore par gamma-densimétrie.

L'utilisation de méthodes dites non destructives applicables *in situ* est primordiale dans les cas où il est impossible de prélever un échantillon sur la structure, ou si l'on souhaite suivre l'évolution d'une caractéristique au cours du temps. Les principales techniques d'auscultation du béton couramment utilisées en génie civil sont présentées dans les ouvrages de [87 et 88].

Néanmoins, ces méthodes non destructives combinées peuvent nous renseigner sur la qualité du béton et il sera mieux pour un bon suivi de contrôle de qualité du béton; d'établir des corrélations entre les essais mécaniques sur des échantillons stockés dans les mêmes conditions que la structure de plutôt que d'utiliser des noyaux qui sont très difficile à réaliser, moins représentatif et plus coûteux à obtenir [89].

5.2. Mesures semi destructives

Une série de méthodes permet d'évaluer *in situ* la résistance mécanique en surface du béton. Leur utilisation est assez répandue et est normalisée. Des scléromètres permettent de mesurer la dureté de la surface de béton définis dans la norme NF P 18-417 [90].

5.3. Mesures non destructives

Pour l'évaluation non destructive du béton, les méthodes utilisant la propagation d'ondes et l'interaction de ces ondes avec le béton sont parmi les méthodes ayant le plus grand potentiel.

En effet, les propriétés de la propagation des ondes sont directement liées aux propriétés du matériau dans lequel elles se propagent. Ces ondes peuvent être de types électromagnétiques ou mécaniques et sont sensibles à des propriétés différentes du béton :

- Les méthodes utilisant la propagation d'ondes électromagnétiques qui sont les méthodes capacitatives, résistives, ou les méthodes GPR (Ground Penetration Radar). Elles peuvent être utilisées pour détecter des éléments métalliques, et permettre de localiser les armatures d'acier et d'en estimer le diamètre, ou la profondeur ;
- Les méthodes utilisant des ondes mécaniques se basent sur la propagation d'ultrasons dans le béton. Ces ondes sont sensibles aux propriétés mécaniques telles que les modules d'élasticité et le coefficient de Poisson, ou encore le taux de la porosité. Les méthodes les plus couramment employées à ce jour sont l'impact écho, l'auscultation sonique (ultrasonic pulse velocity "UPV") et l'émission acoustique [91].

5.3.1. Potentialité des méthodes ultrasonores «UPV»

L'utilisation d'ultrasons est un outil très adapté pour l'évaluation non destructive des bétons. La propagation des ondes dépend directement des propriétés mécaniques et structurelles du béton. La célérité des différents types d'ondes dépend directement de propriétés mécaniques telles que le module d'élasticité ou le coefficient de Poisson.

L'atténuation des ondes donne également des informations sur les propriétés du béton : caractère viscoélastique, porosité (pores et microfissurations), nature et dimensions des inclusions rocheuses (sables et granulats).

Le caractère fortement hétérogène et aléatoire du béton pose également le problème de la répétitivité des mesures en différents endroits du béton. Une configuration particulière de disposition/nature/forme des hétérogénéités rencontrées au cours de la propagation donnera des paramètres de propagation spécifiques et non représentatifs du matériau.

L'UPV est classiquement utilisée aussi bien en laboratoire que sur les ouvrages [87]. Cette méthode est également normalisée par les normes Française NF EN 12504-4 [92] et américaine ASTM C957-02 [93], et il existe des appareils commerciaux complets permettant de réaliser ce type de mesures.

Le principe général est de mesurer la vitesse de l'onde mécanique se propageant dans le béton en transmission, en réflexion, ou à la surface. On utilise pour cela une paire de transducteurs, l'un servant de source et l'autre le récepteur.

Cette méthode permet principalement de détecter entre autres choses un non uniformité des propriétés de la structure, des grosses fissures ou des vides résultants par exemple de “nids de cailloux”. Elle peut également être utilisée pour déterminer les modules d'élasticité ou les coefficients de Poisson des structures, à partir des relations qui se trouvent dans la littérature. Cependant, la vitesse mesurée dépendant également de beaucoup d'autres paramètres du béton comme les hétérogénéités, la teneur en eau, le rapport E/C, les conditions de cure, la température, la présence de microfissures, etc. [94], les valeurs obtenues peuvent être très différentes de celles obtenues par tests quasi-statiques de compression en laboratoire [95] (cité dans [94]), et l'emploi de cette méthode pour déterminer les valeurs E et ν en grande déformation est déconseillée par la norme [93].

5.3.1.1. Influence de la porosité

L'influence de la porosité du béton sur la propagation ultrasonore a principalement été étudiée expérimentalement sur des échantillons de ciment ou de mortier contenant uniquement du sable, pour s'affranchir des effets causés par la présence d'hétérogénéités de dimensions plus importantes.

Des adjuvants du béton appelés “entraîneurs d'air” permettent d'augmenter artificiellement la porosité de la pâte de ciment (dite Porosité artificielle). Ces adjuvants ont été utilisés par Punurai et al [96], générant ainsi 10% de pores de 1mm de diamètres dans des blocs de ciment. Chaix et al [97] ont remplacé de tels pores par des billes de polystyrène de 1 à 2mm de diamètre dans du mortier.

Les résultats montrent une très nette augmentation du facteur d'amortissement des ondes de compression en présence de tels pores. Cet effet est d'autant plus important que la fréquence est élevée (au delà de 500 kHz). Par ailleurs, la vitesse des ondes de compression diminue fortement avec la présence des bulles d'air.

5.3.1.2. Influence du rapport E/C

La porosité des pâtes de ciment dépend directement du rapport E/C utilisé dans la formulation. La dimension des pores est en général beaucoup plus petite que dans le cas d'une porosité artificielle, et la porosité peut varier de 11% à 18%.

A hautes fréquences ($>1,5\text{MHz}$), sur des blocs de ciment ou de mortier dont le rapport E/C varie de 0,45 à 0,65, des mesures en ondes de compression montrent que le rapport E/C influe fortement sur le facteur d'amortissement [98]. Par contre, des mesures similaires à plus basses fréquences (inférieures à 800 kHz) montrent que les variations du facteur d'amortissement en

fonction du rapport E/C sont plus faibles [99]. Quelle que soit la fréquence considérée, les mesures de vitesses des ondes de compression montrent une très forte sensibilité avec le rapport E/C.

Que ce soit sur du ciment, du mortier ou du béton, des variations du rapport E/C influent fortement sur les valeurs de vitesse. Les variations du facteur d'amortissement sont importantes pour les plus hautes fréquences, mais sont relativement faibles en dessous de 1MHz, la précision de l'estimation de ces facteurs d'amortissement doit donc être très grande, ce qui est rendu d'autant plus difficile par la présence des granulats.

5.3.1.3. Influence des microfissures

La présence de microfissures dans le mortier a été étudiée par Aggelis et al [100] et Ohdaira et al [101] en introduisant des petites plaquettes de vinyle de différentes dimensions (de 15 × 15 × 0, 2mm a 30×30×0, 5mm) et a différentes concentrations (de 1% a 10%). Une augmentation de la concentration d'inclusions augmente considérablement les valeurs de vitesse de phase et d'atténuation pour des fréquences inférieures a 300 kHz.

5.3.1.4. Influence du taux de saturation

La teneur en eau du béton représente le taux volumique d'eau libre dans le matériau, elle peut être comprise entre environ 4 et 14%. On peut également l'exprimer en terme de taux de saturation du béton, compris alors entre 0 (matériau complètement "sec") et 100% (complètement saturé), bien que ces valeurs extrêmes ne soient jamais atteintes en pratique. Ce taux de saturation influe sur la vitesse de propagation des ondes mécaniques dans le béton [102]. Villain et al [103] montrent que la variation de vitesses de phase avec la teneur en eau est importante et ne varie pas linéairement avec le taux de saturation.

5.3.2. Corrélation R_C - UPV

L'UPV dans les matériaux à base de ciment dépend principalement de son module élastique et, puisque celle-ci est étroitement liée à la résistance mécanique R_C (comment est le module d'élasticité lié à la force, quelque chose peut être raides et faibles) ou rigide et solide (par exemple fibre de carbone), il est naturel de croire que l'UPV peut également être corrélée à R_C [104].

La corrélation, cependant, n'est pas unique, mais dépend plutôt particulièrement des proportions de mélange, du type de ciment et du type d'agrégat utilisé [68 et 105].

De nombreuses données et relations de corrélation entre la résistance du béton et l'UPV ont été présentées et proposés. Domirboga et al [106] ont trouvé une relation exponentielle entre R_C et UPV pour le béton à base d'additions minérales. Même constatation que pour Zülfü et al [107] qui indiquent que les corrélations entre les valeurs d'UPV et R_C dans les BAPs réalisés en remplacement du ciment par CV et FS sont exponentielles. L'équation la plus couramment utilisée de Trtnik et al [105] est:

$$S = a.exp(b.V_p) \quad (I.2)$$

Où a et b sont des paramètres empiriques déterminés par la méthode des moindres carrés. Le Tableau I.2 présente certaines relations entre R_C (noté S : Strength) et l'UPV (noté V_p), ainsi que les coefficients de détermination R^2 .

Ainsi, il est bien connu que de nombreux paramètres et/ou caractéristiques de la pâte de ciment qui influencent la résistance du béton influencent également l'UPV, mais pas nécessairement de la même manière ou dans la même mesure [108]. Ikpong [109] a indiqué que l'introduction d'un matériau pouzzolanique dans le béton affecte à la fois R_C et l'UPV selon la même direction.

Tableau I.2. Les relations entre R_C et UPV des bétons [105]

Equation	R^2
$S = 1.146 \exp(0.77 V_p)$	0.80
$S = 1.19 \exp(0.715 V_p)$	0.59
$S = 8.4 * 10^{-9} (V_p * 10^3)^{2.5921}$	0.42
$S = 1.2 * 10^{-5} (V_p * 10^3)^{1.7447}$	0.41
$S = \exp[(-3.3 \pm 1.8) + (0.0014 \pm 0.0004) (V_p * 10^3)]$	0.48

6. CONCLUSION

Cette partie bibliographique a été menée pour faire le point sur l'état des connaissances relatives aux caractéristiques à l'état frais et à l'état durci des bétons autoplaçants formulés à base d'additions minérales. Ces caractéristiques sont très influencées par la composition des bétons notamment la nature des constituants et leurs dosages.

Les BAP ont besoin à un grand volume de pâte riche en fines. Par souci technique et économique, on a souvent recours aux additions minérales qui se présentent sous formes de poudres fines, moins réactives que le clinker certes, mais à faible coût. Ces additions peuvent améliorer les caractéristiques des BAPs à l'état frais et faciliter leur mise en œuvre. A l'état durci, elles peuvent améliorer la distribution des tailles de pores ce qui conduit à une densification de la microstructure. Du point de vue mécanique, leur l'emploi améliore la résistance au jeune âge. A long terme, dans certains cas, le volume de la pâte élevé peut avoir un effet réel mais limité sur le comportement mécanique entraînant soit à une augmentation, soit à une diminution de ces performances.

A cet effet, trois additions de deux natures différentes et deux teneurs ont été choisi pour étudier leur effet sur les caractéristiques des BAPs. Il s'agit des fillers calcaires, laitier granulé et laitier cristallisé. Elles sont de moindre cout et disponibles en grande quantité ici en Algérie. Il nous reste à savoir leurs effets dans le cas où les bétons subissent un traitement thermique dans le but d'accélérer leur durcissement. Ce sera l'objectif de la 2ème partie bibliographique.

Chapitre II

TRAIITEMENT

THERMIQUE

DU BETON

CHAPITRE II

TRAITEMENT THERMIQUE DU BETON

1. INTRODUCTION

Le problème principal au niveau des chantiers est la lenteur avec laquelle le ciment s'hydrate et développe ses résistances mécaniques. Les temps d'attente pour le durcissement naturel des bétons deviennent de plus en plus incompatibles avec la productivité des chantiers de construction et des usines de préfabrication.

C'est pourquoi les fabricants cherchent, en accélérant la prise et le durcissement du béton, à obtenir rapidement des résistances à la compression nécessaires et suffisantes pour le décoffrage, la manutention, le transport ou la mise en contrainte.

L'accélération du durcissement du béton peut s'acquérir par plusieurs méthodes, à savoir l'utilisation de ciments à forte chaleur d'hydratation initiale, l'utilisation des adjuvants accélérateurs de prise et de durcissement, ou bien par introduction d'une chaleur y compris le chauffage par conduction/convection, le chauffage par une résistance électrique, et le traitement thermique (à haute et à basse pression) [110 et 111]. Les moyens et les conditions d'application des différents traitements possibles sont variés et le choix du procédé résulte d'un compromis à entre les délais, les prix et la qualité. On applique le procédé qui, tout en étant le plus économique, aboutit au résultat recherché. Le traitement thermique peut s'appliquer au béton non armé, au béton armé et au béton précontraint ou l'on a besoin de très fortes résistances initiales afin de mettre le béton en compression. Il peut s'appliquer aussi bien à un béton placé en moule clos, en moule ouvert, ou à un béton à démoulage immédiat (blocs, hourdis ...).

Encore il faut connaître l'influence des principaux paramètres qui interviennent depuis la composition du béton (ciment, addition, eau, granulat et adjuvant) jusqu'au cycle de chauffage (procédé, conditions, durée et température de traitement, ..).

2. TRAITEMENT THERMIQUE PAR ETUVAGE

Le traitement thermique, est l'apport de l'énergie thermique au cours de la prise du béton afin d'accélérer son durcissement. Ce procédé dit couplage thermomécanique, souvent appelé thermo-activation, est avantageux lorsque des gains précoces de résistances dans le béton est important comme dans le domaine du béton préfabriqué et les applications de la précontrainte.

Par ailleurs, les réactions d'hydratation, donc de durcissement, des bétons sont exothermiques. La chaleur ainsi dégagée est appelée chaleur d'hydratation. Elle est variable selon la nature du ciment et est très influencée par la température initiale du béton ainsi que par la présence éventuelle d'un adjuvant.

Lorsqu'un cycle de traitement thermique est appliqué, le développement des propriétés de durcissement dans le béton dépend de la durée de traitement pour procéder à l'accélération de la réaction d'hydratation. En fait, le temps nécessaire pour procéder le processus d'hydratation est accompagné par des changements tangibles dans la température interne surveillé et par conséquent dans l'indice de la maturité du béton frais. Il est bien connu que la vitesse de la réaction augmente avec la température de l'enceinte lorsque le traitement thermique est appliqué; conduisant à une maturité précoce et une résistance supérieure. Néanmoins, le traitement thermique peut accélérer le processus d'hydratation; il ya cependant une période minimale pendant laquelle aucun gain de résistance à la compression est atteint.

Les cycles d'étuvage (ou régimes d'étuvages) permettent de réduire la durée d'immobilisation des moyens de la production et d'augmenter le nombre de fabrications journalières et par suite d'aboutir à des économies considérables et à une productivité supplémentaire.

2.1. Cycle de traitement thermique

En général, un cycle de traitement thermique comporte quatre phases (Figure II.1), définies chacune par un couple durée-température ou bien par une vitesse.

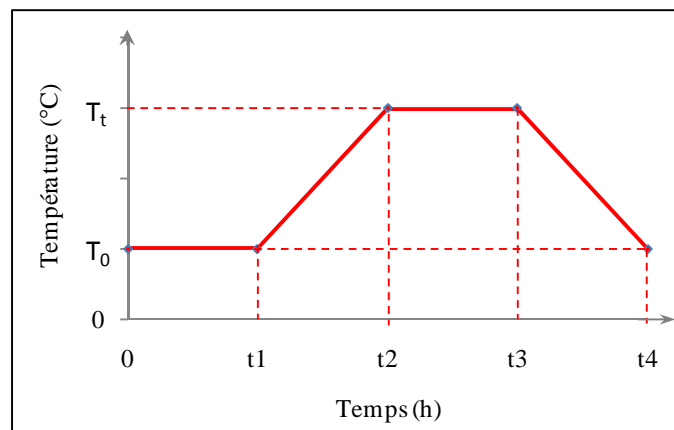


Figure II.1. Forme générale d'un cycle thermique.

En pratique, tous ces temps peuvent varier mais l'on a souvent affaire à trois ou quatre types de cycles. Des exemples sont donnés sur la Figure II.2. En fait, les appareils de chauffage doivent être réglés de façon à ce que l'évolution des températures enregistrées dans les différentes parties de la pièce traitée ne s'éloigne pas trop du cycle idéal choisi.

En général, les cycles courts sont associés à des températures élevées, des cycles lents à un temps d'attente prolongé et une température d'étuvage faible.

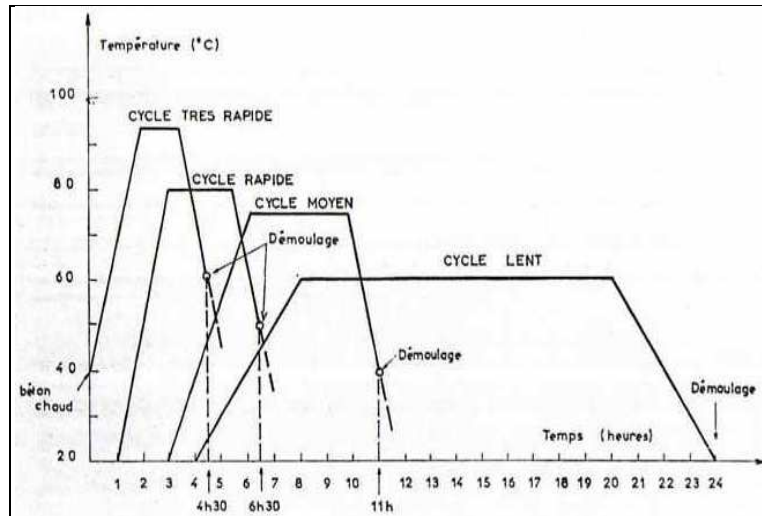


Figure II.2. Exemple de quelques cycles d'étuvage [110]

2.1.1. Phase de prétraitement ($t_0=0$ à t_1)

Cette phase, appelée aussi phase de préprise, est destinée à procurer au béton une cohésion suffisante pour qu'il puisse absorber les efforts internes occasionnés par la dilatation thermique de ses constituants. Pour obtenir de bonnes résistances finales il n'est pas conseillé de chauffer immédiatement le béton, à cause de certains désordres physiques provoqués par des déformations volumiques importantes du fait de l'expansion de l'air et de l'eau et des questions d'hétérogénéités de température (le coefficient de dilatation du béton frais est deux à trois fois plus important que celui du béton durci).

2.1.2. Phase de chauffage (t_1 à t_2)

La vitesse de chauffage, ou de montée en température, doit être choisie de manière à minimiser le développement de contraintes internes résultant de la différence de chauffage entre les surfaces du béton et le cœur.

Elle est caractérisée par une vitesse de montée en température V_{chauf} définie de la manière suivante :

$$V_{chauf} = \frac{T_t - T_0}{t_1 - t_2} \tag{II.1}$$

Avec T_t la température de traitement (fin de montée)

T_0 la température initiale (début de montée ou température ambiante).

2.1.3. Phase de maintien à la température de traitement (t_2 à t_3)

La durée et la température de cette phase, au cours de laquelle le processus de durcissement du béton amorcé lors de la phase précédente se poursuit, dépendent de la maturité acquise par le béton à la fin de la phase de montée en température, du nombre de fabrications journalières et de la résistance que l'on cherche à obtenir.

2.1.4. Phase de refroidissement (t_3 à t_4)

Cette phase permet à l'élément en béton de revenir à une température ambiante sans risque de désordre. La durée de cette phase a une influence sur la qualité finale du produit. Dans cette phase, bien que le béton soit plus résistant, donc plus apte à résister aux efforts, on doit veiller à ce que le refroidissement s'effectue de façon homogène et d'éviter de démouler trop chaud le béton et le maintenir humide en surface (pas de choc thermique). Un refroidissement lent est obtenu au moyen d'un calorifugeage adapté (bâche, plaque isolante...).

Cette phase se caractérise par la vitesse V_{ref} définie de la manière suivante :

$$V_{ref} = \frac{T_t - T_0}{t_4 - t_3} \quad (\text{II.2})$$

Avec T_t la température de traitement (début de refroidissement)

T_0 la température finale (fin de refroidissement).

2.2. Principales recommandations

Les principales règles et recommandations en vigueur à l'heure actuelle concernant la température au jeune âge d'une pièce en béton sont restrictives. Le Tableau II.1 résume quelques recommandations donné par Leklou [112]. D'autres recommandations présentées dans le Tableau II.2 ont été exposés par Venut [110] s'ajoutent à celles déjà énoncés dans les textes en vigueur. Ces recommandations s'appliquent aussi au domaine de la préfabrication, mais pour ce dernier la norme NF EN 13369 [113] est la norme de base pour toutes les normes de produits structuraux. Elle précise les exigences relatives aux constituants et au béton, en fonction de la classe d'exposition, des résistances propres aux produits préfabriqués et conditions de mise en précontrainte, de l'incidence des classes d'exposition sur l'enrobage minimal des aciers, des tolérances dimensionnelles des éléments et de positionnement des armatures et du contrôle de la production en usine.

Pour les produits structuraux préfabriqués, les normes de produits, les normes NF EN 13369 [113] et NF EN 206-1 [12], ainsi que les Eurocodes, constituent un ensemble cohérent (Figure

II.3). Leur respect à chaque étape de la réalisation des produits préfabriqués permet de réaliser des éléments performants, fiables et durables.

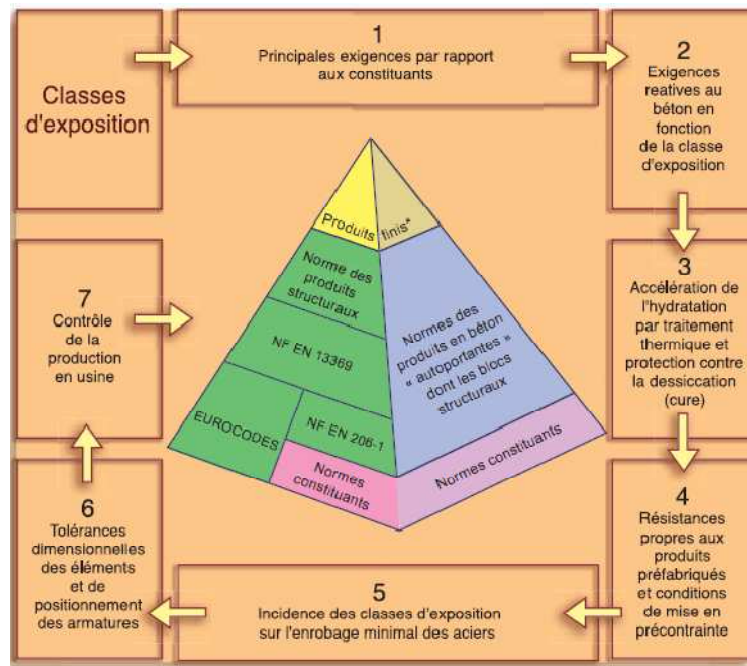


Figure II.3. Schéma synthétique des prescriptions de la norme [113 et 114]

2.2.1. Exigences relatives à l'accélération de l'hydratation par traitement thermique et protection contre la dessiccation (cure)

Les prescriptions relatives au traitement thermique, procédé largement employé pour la fabrication des produits structuraux en béton, visent à garantir une bonne durabilité des produits en assurant en particulier :

Tableau II.1. Recommandations pour la réalisation des traitements thermiques [112]

Température et durée de la période d'attente	Vitesse de montée en Température (°C/heure)	Température maximale critique (°C)
30°C, 3 heures	< 20	60 (65 pour des valeurs individuelles)
<u>Environnement sec :</u> 30°C, 3 heures <u>Environnement humide :</u> 40°C, 4 heures	< 20	<u>Environnement sec :</u> 80 <u>Environnement humide :</u> 60
T° ambiante, 4 heures	< 20	70
30°C, 3 heures	< 20	60, si SO ₃ ciment < 2% 55, si SO ₃ ciment < 3% 50, si SO ₃ ciment < 4%
38°C, 2 heures	< 14	66

Tableau II.2. Principales recommandations [110]

Etape du cycle	Attente (préprise)	Montée en température	Traitement isotherme	Refroidissement	Cure	
Cas général Commentaires	2 à 4 (h)	10 à 30 °C/h	4 à 20 (h)	5 à 20 °C/h	Plusieurs heures à plusieurs jours Arrosage (eau tiède) Bâche Produits de cure	
	D'autant plus long que : - La vitesse de chauffe est rapide - Le rapport E/C est élevé - Le moule déformable (ou sans moule).	Epaisseur > 10cm : 10 à 20°C/h	Max : 75 à 85°C	90°C : avec constituants Secondaires, liant à forte teneur silicate bicalcique		Dépend de la pièce (plus ou moins épaisse) Evité les chocs thermiques
		Epaisseur < 10cm : 20 à 30°C/h	Durée : suivant résistance a obtenir au démoulage			
		En fonction du temps de préprise T				
		T (h) V °C/h				
	3 10					
	4,5 20					
5 30						

- l'obtention de la résistance mécanique requise;
- la mise en œuvre de cycles de traitement (préchauffage, vitesse de montée en température, température maximale, refroidissement) limitant les risques de microfissures ou de porosité excessive (Tableau II.3);
- que les conditions limites conduisant à des risques de fissuration par formation différée d'ettringite (DEF) soient évitées.

Les prescriptions relatives à la cure permettent d'éviter que les surfaces des produits ne soient soumises à une dessiccation pouvant conduire à une fissuration du béton ou à une altération de l'hydratation du liant. Des mesures de protection appropriées pour limiter la dessiccation (Tableau II.4) doivent être prises jusqu'à l'obtention d'une résistance minimale (Tableau II.5) du béton. Cette résistance minimale est adaptée aux futures conditions environnementales du produit dans l'ouvrage.

Tableau II.3. Conditions pour les traitements thermiques [113]

Environnement des produits	Température maximale moyenne du Béton
A prédominance sec ou modérément humide	≤ 85 °C
Humide ou alternance d'humidité et de séchage	≤ 65 °C
T est la température maximale moyenne dans le béton, les valeurs individuelles peuvent être supérieures de 5 °C. Quand 70 °C < T < 85 °C des essais initiaux doivent avoir démontré que la résistance requise est respectée à 90 jours.	

2.3. Différentes techniques et conditions de chauffage

En général, il existe deux techniques de chauffage pour procéder à un traitement thermique [33, 110 et 115]:

- Chauffage du béton avant sa mise en place qui consiste à réaliser un préchauffage du béton ou de ses constituants (eau, granulats) afin de pouvoir ensuite profiter de l'élévation de la température. En général, on ne dépasse pas 30 °C en sortie du malaxeur ou 40 °C en sortie de la benne chauffante. Les techniques les plus courantes sont les suivantes : le chauffage des granulats, le chauffage de l'eau de gâchage, le chauffage par injection de la vapeur et le chauffage du béton par effet joule ;
- Chauffage du béton après sa mise en place qui est le plus utilisée. On distingue le chauffage par les moules (les moules transmettent la chaleur au béton par conduction thermique), le chauffage à la vapeur et le chauffage dans des chambres ou des cellules de durcissement (ce chauffage est le plus souvent réalisé dans des chambres ou cellules fixes, à l'intérieur desquelles les produits sont stockés), etc....

Deux conditions de pressions en traitements thermiques sont utilisés;

- Traitement thermique direct à la pression atmosphérique pour les structures fermées coulés en place et les grandes unités de béton préfabriqué ;
- Traitement thermique à haute pression dans des autoclaves pour les petites unités fabriquées.

Tableau II.4 Valeurs limites applicables en France pour la composition et les propriétés du béton en fonction de la classe d'exposition (Tableau NA.F.1) [113]

		Aucun risque de corrosion ou d'attaque	Corrosion induite par carbonatation			
		X0	XC1	XC2	XC3	XC4
Rapport maximal A/(A+C)	Rapport E _{eff} /liant éq maximal	–	0.65	Valeurs numériques identiques à XC1	Valeurs numériques identiques à XF1	Valeurs numériques identiques à XF1
	Classe de résistance minimale	–	C20/25			
	Teneur mini en liant éq (kg/m ³)	150	260			
	Teneur minimale en air (%)	–	–			
	Cendres volantes	0.30	0.30			
	Fumées de silice	0.10	0.10			
	Laitier moulu	0.30	0.30			
	Addition calcaire	0.25	0.25			
	Addition siliceuse	0.25	0.20			

Tableau II.5. Valeurs limites applicables en France pour la composition et les propriétés du béton des produits en béton préfabriqués en usine en fonction de la classe d'exposition (Tableau NA.F.2) [113]

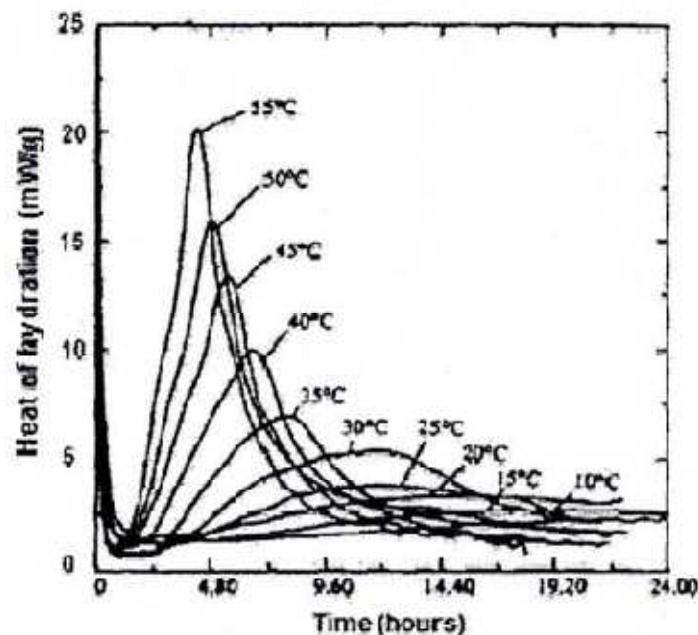
EN 206-1		X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2
Rapport $E_{eff}/liant$ éq maximal			0.60	0.55	0.50	0.50	0.45	0.45
Classe de résistance minimale		C20/25	C20/30 C30/37	C30/37	C35/45	C35/45	C35/45	C40/50
Absorption d'eau maximale (%)			7	6	6	5	6	6
Rapport maximal A/(A+C)	Cendres volantes	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.15	0.15
	Fumées de silice	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
	Laitier moulu	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.15	0.15
	Addition calcaire	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.05	0.05
	Addition siliceuse	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.15	0.15

3. INFLUENCE DU TRAITEMENT THERMIQUE SUR L'HYDRATATION DES CIMENTS

3.1. Effets sur la cinétique d'hydratation

Intrinsèquement, les matériaux cimentaires sont eux-mêmes une source de la chaleur. En effet, les réactions d'hydratation produites lors du mélange du ciment avec l'eau sont largement exothermiques.

Cependant, l'apport de la chaleur extérieure par traitement thermique accélère ces réactions d'hydratation et les temps de prise sont réduits d'autant. Une étude de Ma et Sample [116] (cité dans [117]) montre que l'hydratation des C_3S et du ciment Portland est proportionnelle à la température du béton frais (Figures II.4).



Figures II.4. Evolution de la chaleur d'hydratation d'un ciment Portland en fonction de la température extérieure [116].

3.2. Effets sur la résistance mécanique

Le traitement thermique permet d'augmenter la résistance mécanique du béton au jeune âge. De nombreuses études montrent que cette tendance s'inverse au delà de 28 jours, (Figure II.5) [68 et 118]. La figure II.6 montre qu'à une température élevée, le traitement thermique accélère la prise et augmente la résistance mécanique du béton au jeune âge mais il est néfaste pour les résistances mécaniques atteintes plus tardivement. Cet effet se constate de manière plus prononcée lorsque le béton est soumis à des températures élevées immédiatement après sa mise en place [119].

3.3. Effets sur la microstructure

L'accélération de l'hydratation du ciment par l'étuvage s'accompagne généralement d'une microstructure plus grossière de la pâte hydratée. Le degré d'hydratation des pâtes de ciment Portland est plus élevé lorsque les températures d'étuvage sont plus faibles. Une explication de ce phénomène est donnée par Kjellsen et al [118] : aux faibles températures, les éléments chimiques peuvent diffuser dans la matrice cimentaire et précipitent uniformément alors qu'aux températures élevées, l'accélération des réactions d'hydratation en résulte que la plupart des produits d'hydratation s'agglomèrent près des grains de ciment et ne remplissent pas l'espace interstitiel.

Les études de Goto et al [120], Marsh et al [121] et Older et al [122] confirment ces résultats en montrant une augmentation de la perméabilité avec la température d'étuvage, pour des pâtes de ciment (Figure II.7). En étudiant les pâtes de ciment hydratées à 5 °C, 20 °C et 50 °C (Figure II.8), Kjellsen et al [118] concluent qu'une augmentation de la température d'étuvage provoque par ailleurs une augmentation de la porosité.

3.4. Effets sur les produits d'hydratation

Le traitement thermique a une influence sur les différents produits d'hydratation du ciment tels que les C-S-H, la portlandite et l'étringite.

3.4.1. C-S-H

La température influence à la fois la morphologie et la composition des C-S-H. Une récente étude de Jennings et al [123] sur la diffraction de neutron à petits angles indique que l'hydratation à 20 °C d'une pâte de ciment forme des gels de C-S-H dont la structure est de faible densité. Par contre, si cette pâte de ciment est étuvée à 60 °C, la structure du gel est de densité plus élevée.

3.4.2. Portlandite

Une plus grande proportion de portlandite est formée aux températures élevées [124]. Dans ce cas, la portlandite se trouve sous forme de paquets de forte densité, contrairement à la morphologie de type lamellaire plus ordinaire que l'on retrouve dans les conditions ambiantes.

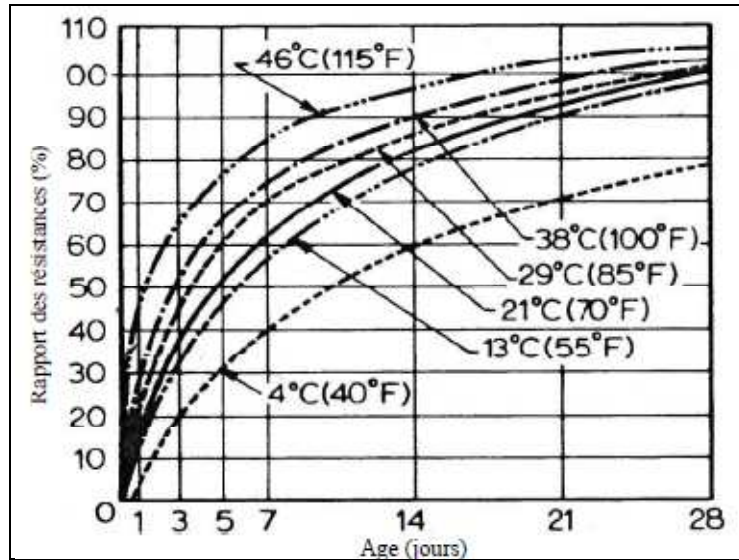


Figure II.5. Evolution des résistances mécaniques d'un béton ($E/C = 0,5$) pour différentes températures de traitement thermique (rapport = résistance du béton traité thermiquement pour différentes températures /résistance à 28 jours du béton mis en cure à 21 °C).

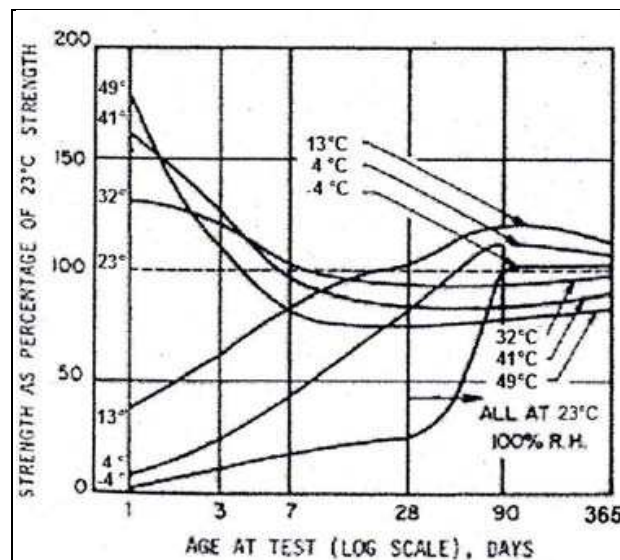


Figure II.6. Effet de la T° sur la résistance mécanique d'un béton à base de ciment Portland [119]

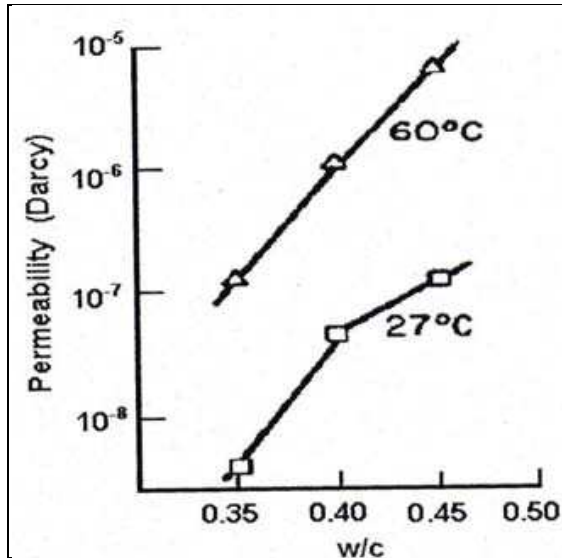


Figure II.7. Effets de la température sur la perméabilité des pâtes de ciment [122].

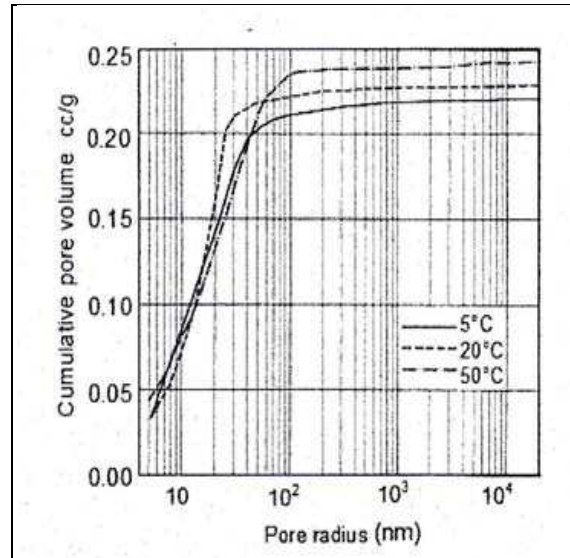


Figure II.8. Distributions de tailles de pores cumulées pour une pâte de ciment Portland hydratée à 5, 20 et 50 °C [118]

3.4.3. Formation d'ettringite différé

La formation d'ettringite, dans une pâte fraîchement mixée se produit immédiatement, après quelques minutes après le contact eau-ciment, et est l'un des premiers produits d'hydratation qui se forment. Cette forme d'ettringite (formation ettringite primaire) est associée au temps de prise de la pâte et ne produit aucune expansion dommageable [125]. L'augmentation de la température réduit le domaine de la stabilité de l'ettringite, ce qui correspond à une solubilité plus importante de l'ettringite [126]. L'alcalinité de la solution interstitielle peut également modifier la stabilité de l'ettringite. Le résultat est la formation de l'ettringite différé (DEF). C'est un phénomène qui provoque des dommages internes et un comportement expansif dans les échantillons de béton. Les cristaux d'ettringite sont instables lorsqu'ils sont exposés à des températures supérieures à 65°C [127 et 128], et par conséquent, leur formation est suivie de près par une décomposition lorsqu'ils sont exposés à des températures élevées du cycle de traitement thermique. Les ions sulfates libérés dans la solution sont adsorbés par les C-S-H, mais plus tard désorbés en présence d'humidité à des températures ambiantes pour reformer des cristaux d'ettringite [125 et 129].

D'autres paramètres peuvent aussi influencer la formation du DEF. Les résultats de la contribution à la connaissance de la réaction sulfatique interne réalisé par Leklou [112] montrent que les teneurs en alcalins et C₃A sont d'une grande importance pour le développement de la DEF alors que le rapport E/C et l'état de la préfissuration des matériaux sont importants pour la cinétique de la DEF. Il apparaît aussi qu'un rapport E/C élevé, une

température d'eau de conservation maintenue à 40-50°C et un renouvellement fréquent de l'eau de conservation entraîne à une apparition rapide des gonflements dus à la DEF. La nature du matériau (mortier ou béton) détermine aussi les expansions. Kelham [130] montre dans son recherche sur le comportement expansive dû au DEF des mortiers traités thermiquement (selon les cycles donnés au Tableau II.8) que l'amplitude de l'expansion augmente avec la finesse du ciment et passe au maximum à un ciment contenant 4% de SO₃.

Donc il faut surveiller la température de la chambre d'étuvage, car en plus de la température de traitement, la chaleur d'hydratation peut aussi pousser la température interne du béton à dépasser 70 °C. Il est recommandé que la température interne du béton soit limitée à 70 °C pour éviter la chaleur pouvant induire la formation d'ettringite différé et la réduction excessive de la résistance ultime [119].

Dans notre cas, on a limité la température de traitement à 60 °C pour éviter tous les problèmes liés au DEF.

4. INFLUENCE DES PARAMETRES DE TRAITEMENT THERMIQUE

Le béton est un matériau hétérogène composé de trois phases totalement différentes : l'eau de gâchage comme phase liquide, les granulats et le ciment comme phase solide et l'air occlus comme phase gazeuse. Ces trois phases se comportent différemment lorsqu'elles sont soumises à des températures élevées. L'eau de gâchage et l'air occlus se dilatent et augmentent de volume de plusieurs fois par rapport à la phase solide qui est la matrice cimentaire et les granulats. Cette augmentation de volume engendre des contraintes internes dans le béton, ce qui le fragilise et diminue sensiblement ces performances mécaniques et sa durabilité. L'eau évaporée pendant le chauffage et le refroidissement du béton constitue aussi une des causes d'altération des résistances du béton à long terme. Pour diminuer les contraintes lors du traitement thermique d'un béton, le choix d'un cycle d'étuvage approprié est plus que nécessaire.

Généralement, le temps total du traitement thermique et la température de traitement sont ajustés en fonction de la résistance à la compression des éléments durcis au jeune âge. Les changements de ces paramètres, et donc les caractéristiques du cycle d'étuvage appliqué, peuvent influencer les propriétés mécaniques et les performances qui peuvent diverger de ce qui est couramment attendu du béton durci dans les conditions standards [131]. Il est évident que l'application d'un traitement thermique à température plus basse est plus économique en termes d'énergie [132].

Cette investigation a impliqué l'effet d'un cycle d'étuvage adopté sur les propriétés physico-mécaniques clés des BVs et des BAPs qui sont présentés dans les paragraphes suivants. Le cycle adopté prend en considérations les spécifications d'étuvage recommandées par la norme NF EN 13369 [113] cités dans la section 3.5.

Dans ce qui suit, on essaye de présenter l'effet des paramètres de traitement thermique sur le comportement du matériau traité.

4.1. Effet de la phase de prétraitement

Les dommages physiques qui peuvent survenir dans le béton traité thermiquement apparaissent généralement comme des pertes de résistance à la compression à long terme. Pour minimiser ces dommages physiques, la solution est d'obtenir une résistance suffisante en appliquant une durée de préprise suffisamment longue avant que le traitement thermique soit appliqué. La Figure II.9 montre l'influence de la température sur le temps de prise des ciments courants. Le profil du cycle utilisé a une grande importance sur les propriétés du béton. Mais remarquons aussi que bien d'autres paramètres interviennent, comme par exemple, l'humidité de l'atmosphère, le traitement au moment du démoulage et lors du stockage des pièces et la forme plus ou moins massive des produits traités.

Plusieurs chercheurs exposent qu'une certaine durée avant l'application du traitement thermique est bénéfique à la résistance précoce à la compression, au moins avec des taux plus élevés d'élévation de la température [133, 134 et 135] (cités dans [136]). Il faudrait que le temps de préprise soit d'autant plus long que la vitesse de chauffe est plus rapide et que la température de traitement soit plus élevée (Figure II.10).

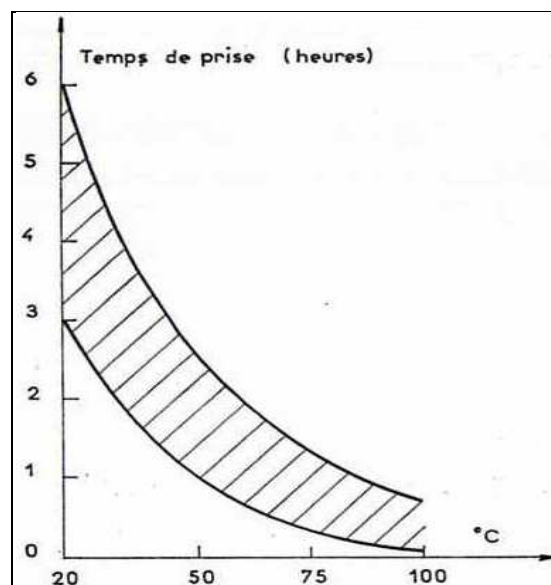


Figure II.9. Courbe schématique du temps de prise des ciments en fonction de la température [110]

Shidler et al [134] ont indiqué qu'une période de préprise de 2 à 6 heures pourrait produire une résistance à la compression à 24 heures 15% à 40% supérieure que lorsque le traitement est appliqué juste après la mise en place. Mironov [137] (cité dans [136]) exprime qu'une durée correspondante au temps nécessaire au béton d'avoir une résistance à la compression de 7 à 8 kg/m² doit être déterminée pour que le traitement thermique ne cause pas d'expansions. Alexanderson [138] (cité dans [136]) a observé que les expansions peuvent être négligées pour des périodes de préprises de 4-7 heures.

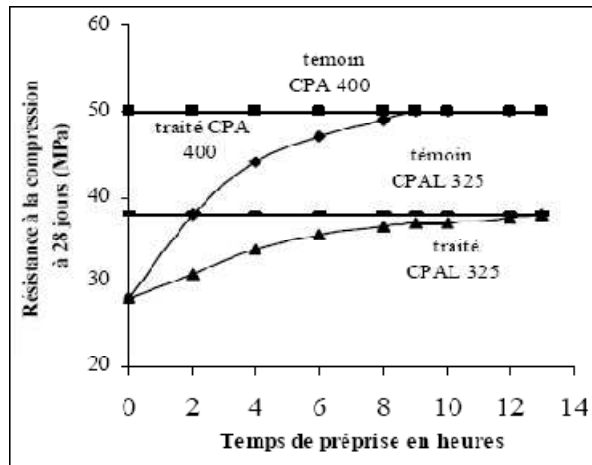


Figure II.10. Influence de la préprise sur les résistances d'un béton à l'âge de 28 jours [139]

4.2. Effet de la vitesse de chauffage et du refroidissement

Des vitesses excessives de chauffage et de refroidissement doivent être évitées pour prévenir les changements de volume dommageables. Les températures dans l'enceinte entourant le béton ne doivent pas être augmenté ou diminué de plus de 22 à 33 °C/h selon la taille et la forme de l'élément en béton [140] (cité dans [136]). Plus la vitesse de montée est rapide plus les résistances finales du béton traité sont affaiblies, sans doute à cause des contraintes thermiques différentielles qui apparaissent dans le béton et qui sont d'autant plus importantes que les pièces traitées sont plus massives. La Figure II.11 donne un exemple réel de cette influence. Mamillan [141] a conclu que les meilleures résistances mécaniques sont données par les bétons chauffés lentement. La cause physique de l'altération des résistances ultérieures est due à l'expansion très importante des constituants du béton frais, l'eau et l'air en particulier.

Des recherches approfondies sur l'accélération de durcissement par traitement thermique menées par Hanson [131], et notamment l'effet de la vitesse de chauffage sur la résistance à la compression du béton. Le taux variait de 11 à 44 °C/heure jusqu'à trois températures maximales de 52, 65, et 80 °C. Quelle que soit la température maximale de l'enceinte

d'étuvage, pour une durée de préprise de 5 heures, les valeurs maximales de la résistance à la compression ont été obtenues par la vitesse de chauffage d'environ 22 °C/h, comme illustré sur la Figure II.12. La résistance précoce relative à la compression diminue ensuite à partir de ce point maximum et a tendance à se stabiliser aux taux plus élevés de chauffage. Les résultats ont montrés aussi que beaucoup de cylindres durcis à des vitesses de température élevés avaient fissurés et présentaient des expansions permanentes de 0,4 à 1,6 mm après enlèvement de la chambre d'étuvage.

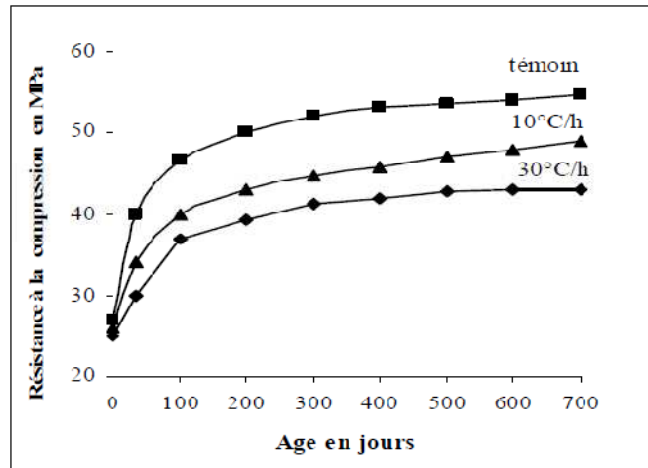


Figure II.11: *Influence de la vitesse d'élévation de la température d'un traitement thermique sur les résistances en compression à long terme, [141]*

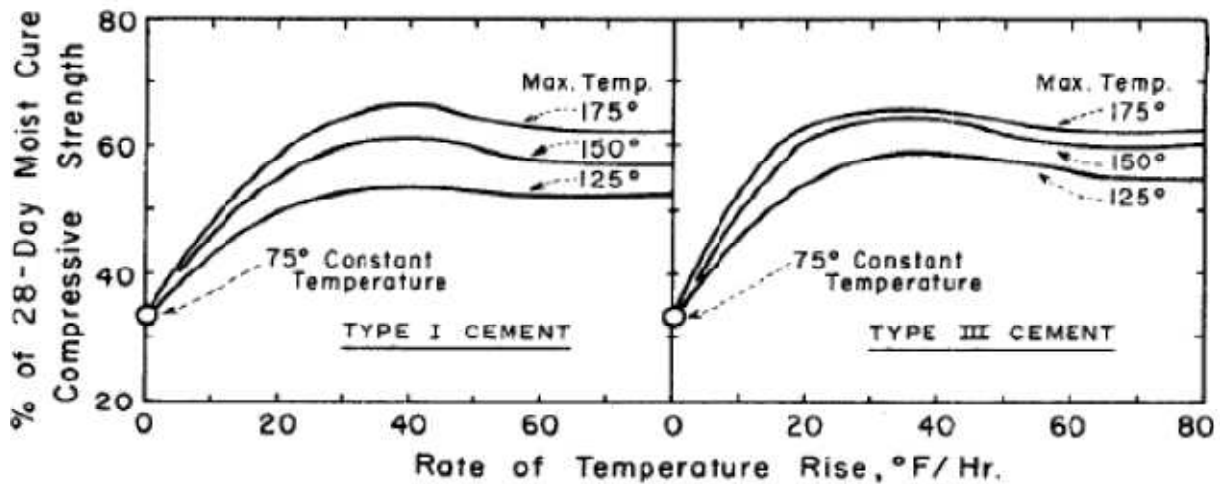


Figure II.12. *Effet de la vitesse de montée en température sur la résistance à la compression à 18 heures (période de préprise de 5 heures) [131]*

4.3. Effet de la température maximale et la durée d'exposition

Fondamentalement, les réactions chimiques de l'hydratation du ciment ont lieu rapidement sous des températures plus élevées de durcissement. Cependant, il est largement rapporté qu'une température de durcissement élevée immédiatement après la mise en place du béton

favorise le développement de l'hydratation et les propriétés mécaniques à un âge précoce, mais a des effets potentiellement négatifs sur les propriétés à l'état durcis et les performances de durabilité à long terme [142]. Il en résulte une plus grande résistance initiale et une rotation rapide des produits préfabriqués. Erdogu et Kurbetci [143] observent que la nécessité est évidente d'avoir une durée de préchauffage utile dans la pratique pour réduire au minimum les dommages physiques qui pourraient se produire dans le matériau en raison de l'effet négatif du traitement thermique, en particulier en ce qui concerne la résistance à long terme.

Pour cela, le contrôle de la température de traitement est nécessaire pour les raisons suivantes:

- L'application précoce de la température et l'augmentation rapide de la température peuvent négativement influencer la résistance et d'autres propriétés structurelles du béton ;
- Toujours une température maximale et optimale de traitement existe.
- La température homogène à l'intérieur du produit est nécessaire pour éviter un retrait différentiel ;

En pratique la durée et la température de traitement dépendent de:

- Nombre de rotations journalières ;
- Horaire journaliers de l'usine ;
- Temps nécessaire pour la préparation du moule ;
- Aussi il faut toujours choisir l'investissement le plus faible possible.

En général, la température de traitement dans l'enceinte doit être maintenue à environ 60 °C jusqu'à ce que la résistance du béton souhaitée soit développée [140]. Dans la Figure II.13, la température s'échelonne de 50 à 90°C et dure de 2 à 15 h. Venuat [110] a conclu qu'au-delà de 80°C, et dans le cas du traitement à la vapeur chaude, il est difficile d'avoir une enceinte saturée d'humidité. Pour un traitement à des températures allant de 20 à 80°C, l'évolution de la résistance à court terme est présentée sur la Figure II.14. La résistance à court terme augmente avec l'augmentation de la température de fabrication ou de mûrissement. Alors qu'à long terme, plus la température est élevée, moins les résistances sont bonnes [115]. Il convient donc soit de fournir suffisamment de vapeur d'eau pour maintenir l'enceinte de traitement saturée, soit d'avoir des étuves étanches et d'éviter les condensations d'eau sur les pièces (protection en surface).

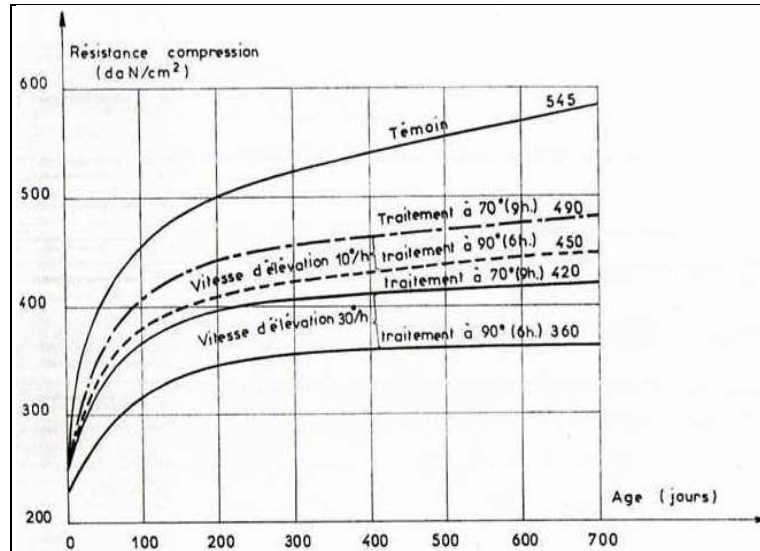


Figure II.13. Influence de la vitesse d'élévation de la T^{re} sur la résistance d'un béton chauffé à 70 et à 90°C ($E/C = 0,50$) [110]

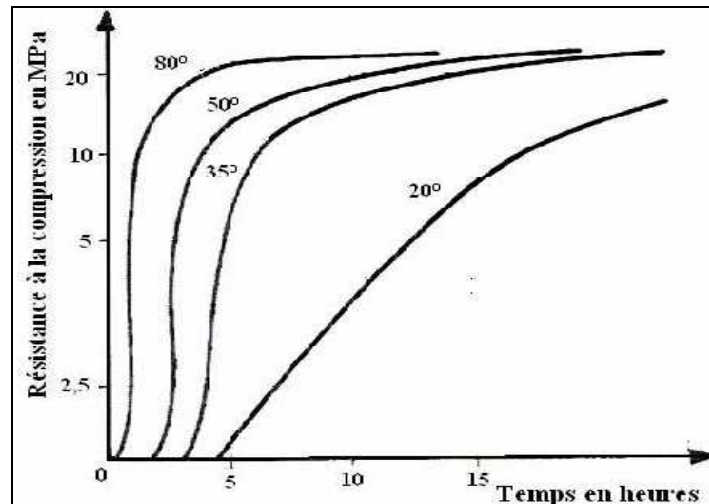


Figure II.14. Évolution de la résistance à la compression du béton en fonction de la T^{re} de chauffage [110]

Donc il est possible de déterminer une bonne combinaison entre la température et la durée de traitement. Neville [68] a entamé ce compromis et a donné des résistances en compression en fonction de la température pour des courbes isochrones à 6, 10, 15 et 24 heures (Figure II.15). Chaque temps possède une température optimale donnant la meilleure résistance immédiate, ainsi:

- Pour 80°C, il faut un traitement d'une durée de 6 heures ;
- Pour 70°C, il faut un traitement d'une durée de 10 heures ;
- Pour 60°C, il faut un traitement d'une durée de 15 heures ;
- Pour 50°C, il faut un traitement d'une durée de 24 heures.

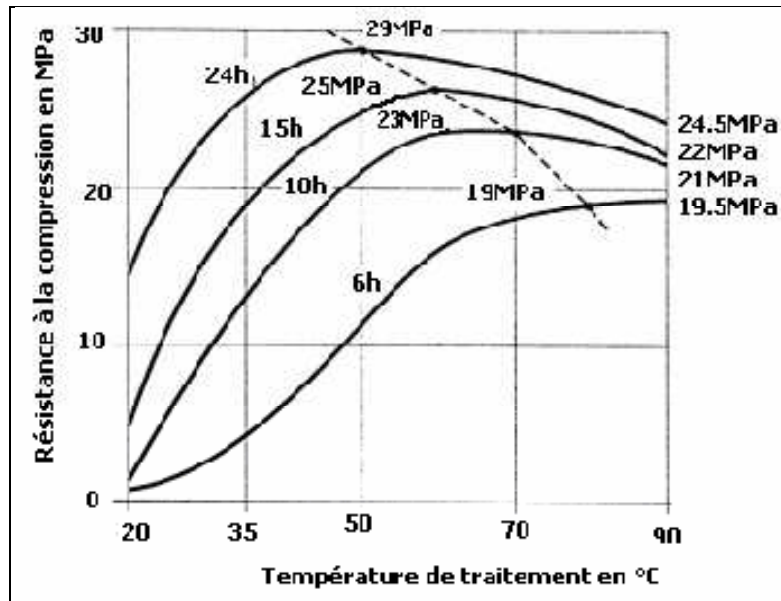


Figure II.15. Influence de la température et de la durée de traitement sur la résistance en compression à 350 Kg/m³ (chauffage dans l'eau .Ciment CPAL E/C=0,50) [68]

Plusieurs études réalisées avaient le but de chercher la meilleure combinaison température-durée de traitement en fonction de la composition du béton étudié.

Pour l'élément en béton préfabriqué à faible rapport E/L et de grands remplacements avec des additions minérales, Ba et al [144] constate qu'il existe une durée totale critique de cycle de traitement thermique à une température moyenne de 50°C. Cette durée supplémentaire de traitement pourrait rendre les pores plus gros, ce qui n'est pas en mesure d'être guéri même après le durcissement dans l'eau à une température ordinaire de 20°C pendant 90 jours. Selon Ba et Qian [145], il existe une durée efficace de traitement thermique à 70 °C et cette durée est de préférence 14 heures. Les pores capillaires dans ce cas ont été grandis à cause de la porosité due au traitement thermique plus long. A une température de traitement de 80 °C (cycle Tableau II.8), et pour obtenir des résistances plus élevées, Erdem et al [146] recommandent de prolonger la durée totale de l'opération de traitement thermique de 5 à 10 h tout en retardant l'application de l'opération d'une période égale au temps de prise du béton. La température de traitement qui permet l'obtention d'une bonne qualité au démoulage dépend de la durée de traitement. Pour des échantillons traités à 65 et à 85°C, Turkel et Alabasb [147] ont observé une diminution des propriétés mécaniques dans le temps, quelle que soit la durée d'exposition à la température maximale, Cassagnabère et al [142] expliquent cette diminution, de la résistance à la compression avec l'augmentation de la température de durcissement, par la vitesse d'hydratation initial rapide à des températures supérieures ce qui retarde l'hydratation subséquente et produit une distribution non uniforme des produits d'hydratation à l'intérieur de la pâte.

5. INFLUENCE DE LA COMPOSITION DU BETON

La composition d'un béton qui va subir un traitement thermique est d'une grande importance. Cependant, le béton doit être de bonne qualité et pour cela la plupart des constituants du béton interviennent, mais c'est surtout le ciment qui est le paramètre le plus important, et bien sûr la quantité d'eau et les adjuvants et les additions éventuellement ajoutés et en fin les granulats.

5.1. Ciment

Le type de liant et du superplastifiant sont d'une importance primordiale pour déterminer le cycle de traitement thermique et par la suite les propriétés des éléments durcis. La réponse du béton étuvé à la température de durcissement institué en termes de cinétique d'hydratation et de développement de la résistance précoce varie en fonction des propriétés du matériau cimentaire et du superplastifiant. Les premiers facteurs qui déterminent le comportement des ciments soumis à un traitement thermique sont la finesse et la composition de ces ciments, le type et la quantité des additifs utilisés dans les ciments composés et les paramètres du cycle de durcissement.

Pratiquement, tous les ciments courants peuvent être étuvés, surtout s'il s'agit de cycles moyens ou longs. Pour des cycles courts et très courts, le problème du choix se pose ; il est difficile. On a intérêt à choisir un ciment fin, actif, du type CPA 500. Selon Venuat [110], il conviendrait de limiter la teneur en aluminat tricalcique (10 à 12% par exemple). Cela n'est pas vrai pour tous les ciments, à condition qu'ils contiennent une teneur assez élevée en gypse (la teneur en gypse à ajouter est d'autant plus élevée que la température du traitement est plus grande, que la teneur en aluminat tricalcique et en alcalis est plus élevée). Les ciments destinés à l'étuvage doivent être stables et non éventés.

Les ciments à recommander doivent présenter une chaleur d'hydratation élevée, mais lorsque l'on procède par étuvage proprement dit, compte tenu des cycles de chauffage réglés en fonction de la réaction exothermique du ciment, il est impératif que la chaleur d'hydratation soit homogène d'une livraison à l'autre [148]. Les ciments à privilégier sont les CPA-CEM I et les CPJ-CEM II/A des classes 52.5 – 52.5 R ou éventuellement 42.5 R, à forte réaction exothermique, présentant des teneurs en C_3A et C_3S élevées.

Chanvillard et Laplante [115] recommandent, pour un cycle thermique court, une forte teneur en C_2S est préférable, alors qu'un cycle long bénéficie d'autant plus de la teneur en C_2S que celui-ci est finement broyé. Si l'on désire exploiter la chaleur d'hydratation du béton, pour les

pièces massives essentiellement, le plus judicieux est de rechercher des liants à fortes teneurs en C₃S et en C₃A.

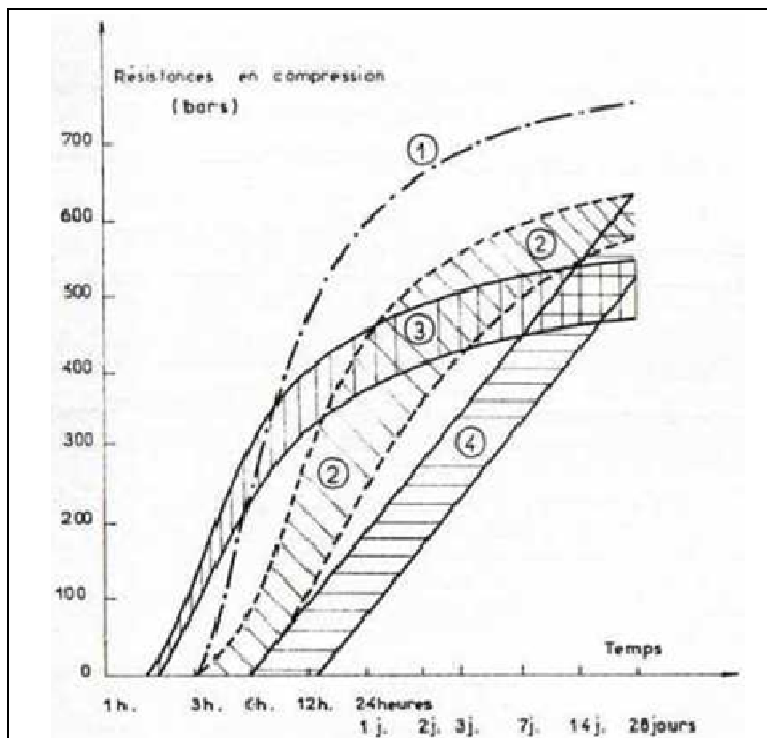
Venuat [110] rappelle que l'on peut déjà obtenir, et sans chauffage, de très fortes résistances mécaniques au bout de 24 h (Figure II.16):

- En utilisant un béton ayant un fort rapport E/C supérieur à 0,4, bien vibré, conservé en moule calorifugé, et avec l'emploi d'un ciment très réactif (résistance de 400 bars à 24 h) ;
- En utilisant un béton de ciment alumineux ayant également un rapport E/C supérieur à 0,4 (résistance de 600 bars à 24 h).

Une autre solution consiste au surdosage du ciment, Mais c'est un procédé onéreux et limité en performance. Un surdosage de 50 kg de ciment par m³ de béton augmente la résistance du béton de 10%, mais au-delà de 400 kg de ciment par m³ de béton, le surdosage devient préjudiciable sur le retrait et le coût du béton [149].

Remarque

Devant le problème pratique du choix du ciment on ne peut que conseiller aux utilisateurs de questionner leurs fournisseurs (service technico-commercial des sociétés cimentières) et de faire quelques essais préalables pour sélectionner le ciment qui convient le mieux, compte tenu du procédé d'étuvage adopté et du cycle prévu.



1. Ciment alumineux à 20 °C
2. Ciment très fin à hautes résistances à 20°C ;
3. Ciment moyen étuvé à 70°C ;
4. Ciment moyen à 20°C.

Figure II.16. schémas de l'évolution des résistances des bétons suivant la nature du ciment et le traitement [110]

5.2. Rapport E/C

Le meilleur moyen pour augmenter la résistance initiale d'un béton d'une manière importante consiste à réduire le rapport E/C. Ce dernier influe sur la compacité du béton et un béton qui contient trop de vide ne pourra jamais atteindre des performances exceptionnelles d'un béton traité thermiquement.

Mamillan [139] a étudié l'influence du rapport E/C sur la résistance à la compression à court terme en fonction de la durée de traitement, pour deux dosage en eau : 175 et 220 l/m³ (E/C=0,50 et 0,65). D'après leurs résultats présentés sur la Figure II.17 on peut constater qu'avec une température de 90°C et après 7 heures de traitement thermique le béton d'un E/C=0.50 donne une résistance à la compression supérieure de 45% à celle du béton d'un E/C=0.65, de 35% avec un traitement à 70°C et de 45% avec un traitement à 50°C.

On peut conclure que plus le rapport E/C d'un béton chauffé est élevé moins le sont les résistances mécaniques.

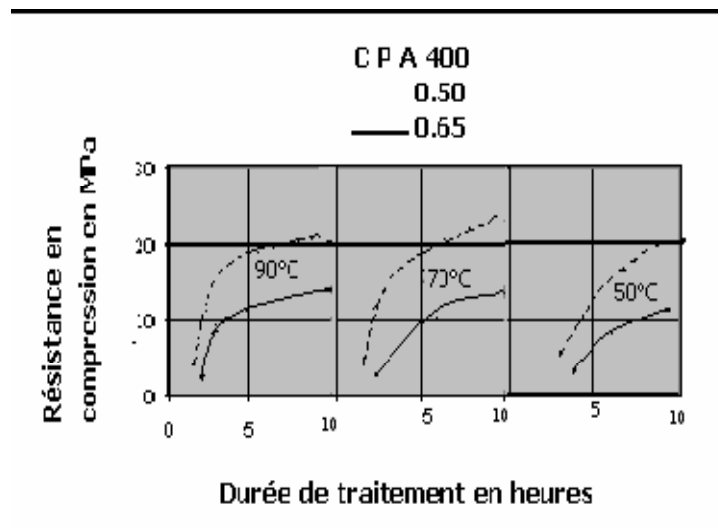


Figure II.17. Influence du rapport E/C sur la résistance en compression d'un béton traité thermiquement [139]

5.3. Additions minérales

L'ajout de constituants secondaires dans le cas du traitement thermique est favorable, surtout si ces constituants sont finement broyés. Ils supportent bien des températures élevées (jusqu'à 80-90°C) [110]. Une section plus détaillée sur l'avantage des additions minérales est entamée ci-dessous (section 9).

5.4. Granulats

La nature du granulat apparaît comme un facteur important du choix de la température d'étuvage des bétons hydrauliques. Le béton de granulat basalte profite légèrement mieux de

l'étuvage en montrant des résistances initiales supérieures et des pertes à long terme inférieures par rapport au béton de granulats calcaires [150]. Dans ce contexte, un cycle d'étuvage à haute température (70- 80°C) est nécessaire pour le béton de basalte. Aux basses températures (40-50°C) le béton de calcaire se comporte mieux sous l'étuvage. Une température d'étuvage supérieure est d'ailleurs inefficace et inutile. Une étude de l'effet du sable quartz broyé et laitier granulé de haut fourneau (LG) sur les propriétés de béton à haute résistance traité thermiquement et autoclave à 80 °C réalisé par Hu et Zhang [151] montre que le sable de quartz possède une propriété pouzzolanique efficace en autoclavage du béton.

5.5. Adjuvants

Un certain nombre d'adjuvants peuvent être utilisés après avoir fait l'objet d'essais préalables sur le béton étuvé [110].

5.5.1. Plastifiants-réducteurs d'eau

Les plastifiants réducteurs d'eau sont intéressants même pour des cycles très rapides grâce à la diminution qu'ils permettent de la teneur en eau. Il est même possible que ces produits, en améliorant la répartition du ciment, l'homogénéité du béton, et en limitant la ségrégation, jouent un rôle complémentaire bénéfique.

Les chaleurs se répartissent mieux et d'une façon plus uniforme dans le béton chauffé. La durée de la phase de préprise doit être déterminée avec soin surtout si des dosages élevés de superplastifiant ont introduit [152] (cité dans [136]).

5.5.2. Accélérateurs de prise

Diminuent le temps de passage du béton de l'état plastique à l'état solide, ce sont en général des alcalis, carbonates et sulfates de soude ou de potasse.

5.5.3. Accélérateurs de durcissement

Les accélérateurs sont en général moins efficaces à température élevée qu'à basse température. On peut utiliser des produits à base de chlorure de calcium (emploi limité par certaines réglementations), à base de sels de soude (sulfate en particulier). D'autres conviennent bien, mais leur action dépend beaucoup du régime thermique adopté et de la nature du ciment utilisé.

Ils peuvent dans certains cas permettre de raccourcir économiquement le temps d'étuvage. Ils sont souvent à ne préconiser que pour des cycles lents associés à une faible température d'étuvage et pour des pièces à faible rapport volume/surface.

5.5.4. Entraîneurs d'air

S'ils sont nécessaires pour la protection au gel des éléments durcis, les entraîneurs d'air ne seraient à utiliser que dans le cas où le béton subirait un temps de préprise de 2 ou 3 h avant l'étuvage.

5.5.5. Produits de cure

L'application des produits de cure à la surface du béton chaud venant d'être démoulé évite un départ rapide de l'eau, d'où une meilleure hydratation du béton et, partant, de meilleures résistances du béton en surface comme en profondeur, ainsi qu'une non-fissuration des produit (préjudiciable surtout aux résistances en flexion).

5.5.6. Retardateurs de prise

Enfin, on pourrait envisager paradoxalement l'utilisation de retardateurs de prise à action fluidifiante permettant un certain retard du béton préchauffé et permettant peut-être d'obtenir des temps de prise plus uniformes dans la masse et d'éviter parfois les raidissements dus à une légère fausse-prise, mais des essais dans ce domaine seraient nécessaires.

6. TRAITEMENT THERMIQUE DU BAP

Le BAP est largement utilisé dans plusieurs types d'applications structurelles. La maniabilité élevé de ce béton a été transformé en avantages concrets en préfabrication, la fabrication de la précontrainte en termes d'amélioration de la qualité globale du produit final et une productivité élevée. La gamme des avantages offerts par le BAP va au-delà des aspects fondamentaux de la qualité et de la productivité de béton, il comprend une amélioration majeure dans la santé et la sécurité des travailleurs et la réduction du niveau de bruit sur les chantiers de construction. Pour cela, l'utilisation du BAP est l'une des dernières innovations dans l'industrie du béton préfabriqué, et probablement le plus grand effet sur l'évolution de l'industrie dans un avenir proche [153 et 154]. Plusieurs unités dans de nombreux pays ont complètement changé au BAP pour être en mesure d'offrir une meilleure qualité de leur production et l'amélioration de l'environnement de travail dans des conditions concurrentielles.

Aux États-Unis, le BAP commence à gagner l'intérêt, en particulier par les fabricants d'adjuvants et l'industrie de béton préfabriqué. L'industrie du béton préfabriqué commence à appliquer cette technologie à des projets commerciaux quand les spécifications le permettent. Les applications vont de béton architectural des ponts privés complexes [155].

La fabrication de poutres de ponts précontraints dans des usines de préfabrication avec du béton classique nécessite un nombre relativement important pour placer les équipements, consolider et terminer ces poutres. En plus des exigences de l'équipage, le bruit associé à l'équipement de consolidation est excessive. Trejo et al [156] ont essayé d'évaluer le potentiel de mise en œuvre du BAP. Ils avisent qu'il est possible de réduire ce bruit qui se traduira par un environnement de travail meilleur et plus sûr à travers l'exploitation du BAP préfabriqué.

En outre, pour améliorer la productivité dans les usines de préfabrication, le traitement thermique par étuvage est souvent utilisé pour accélérer le gain de résistance et de raccourcir la durée de la construction. Il est bien établi que les propriétés mécaniques du BAP traité thermiquement sont influencées par la composition du mélange et peuvent varier largement avec les paramètres du traitement thermique.

L'application d'un traitement thermique optimisé à un mélange de BAP à base de constituants classiques et adjuvants appropriés est seulement 20% plus cher que le BAP traditionnelle qui atteindrait les mêmes propriétés après une journée de durcissement naturel [157]. Ainsi, en augmentant la productivité de bétonnage, cette solution semble techniquement et économiquement avantageuse. Le contrôle de la mise en œuvre industrielle de cette solution qui mène à démouler les produits en béton au jeune âge a besoin d'une résistance mécanique qui doit être surveillée par la méthode de la maturométrie.

On essaie par la suite d'éclaircir l'effet du traitement thermique sur la résistance et la durabilité du BAP, ainsi que l'influence de sa composition.

6.1. Résistance mécanique

Comme les propriétés et le comportement du béton ordinaire sont largement influencés par les traitements auxquels ils sont soumis au cours de leurs premières heures de durcissement, Les BAP le sont aussi. Pour cela plusieurs recherches ont été orientées dans ce sens.

Jaquemot et al [157] ont appliqué un traitement thermique optimisé (65 °C) à un mélange de BAP (Tableau II.8). Ce régime thermique a permis d'atteindre une résistance à la compression allant jusqu'à 25 MPa au bout de 4 heures de durcissement et de plus de 80 MPa à 28 jours.

L'étude réalisée par Boukni [4] afin d'investiguer le comportement des BAP à base de FC vis-à-vis des températures élevées a consacré une partie sur l'évolution des propriétés mécaniques des bétons ayant subi un traitement thermique à jeune âge à des températures de 40 et 60° pendant 24h. Les essais de résistance à la compression ont permis de mettre en

évidence que l'augmentation de la température de la cure a permis d'obtenir des résistances plus importantes aux jeunes âges. Par contre, des températures trop élevées peuvent modifier la structure des hydrates et dégrader les résistances après 7 jours. Le chercheur a constaté que l'accroissement du dosage du FC influence négativement l'évolution du module d'élasticité.

Afin d'évaluer l'effet de cycles thermiques de durée totale de 30 heures et des températures de 60 et 100 °C, avec et sans paliers intermédiaires, une étude expérimentale sur trois BAPs a été réalisée par Aggoun et al [158]. Les chercheurs constatent que l'application de la température ou l'étuvage augmente la résistance à la compression à 1 jour d'un BAP ordinaire par rapport à la résistance de même BAP à la température ambiante de 20°C. L'étuvage augmente également la résistance à la compression à 1 jour de BAP de résistance élevée (BAP50) ou très élevée (BAP70), exception faite pour le cas de 100 °C sans paliers intermédiaires. Par contre, l'étuvage, quelque soit le mode et la température du mûrissement, est clairement néfaste et conduit à une chute de résistance des trois bétons à partir du 3ème jour par rapport à la résistance obtenue à 20 °C.

Dans le but d'optimiser un régime thermique assurant le respect des exigences de la fabrication des mélanges proposés de façon efficace et économique, un projet de recherche réalisé par [136] vise à faire ressortir l'importance des paramètres du mélange et d'évaluer l'effet des différents paramètres de traitement thermique affectant la conception et la performance des BAP (notamment à jeune âge) pour des applications dans le domaine de la préfabrication. Les paramètres de mélanges étudiés étaient : le rapport E/L, le type et la teneur en liant et le type de superplastifiant. Les paramètres de cures étudiés étaient la température maximale, la période avant le début de la cure et le taux de gain en chaleur.

Khatib [136] a constaté que parmi les paramètres de mélange étudiés, le rapport E/L et la teneur en liant révèlent avoir un rôle crucial sur la majorité des propriétés mécaniques et de maniabilité. Ainsi, Parmi les paramètres de cure, la température maximale de la chambre de traitement thermique a un effet dominant sur la résistance mécanique à jeune âge. La période avant le traitement thermique (préprise) révèle aussi d'une grande influence sur les propriétés mécaniques. Il a été constaté que le traitement du BAP sous la température maximale d'environ 65 °C dans la chambre de traitement et avec une préprise de 5 heures avant le traitement thermique conduit à l'accroissement des résistances à la compression à jeune âge. Au-delà de ces limites, la température maximale de cure peut nuire au gain de résistance menant ainsi à une résistance à la compression moins élevée. Le chercheur a conclu aussi qu'un traitement thermique appliqué très tôt peut retarder le développement des résistances

mécaniques à jeune âge; il est donc recommandé d'avoir une période d'environ 5 heures avant le traitement thermique afin de gagner du temps et de réduire la consommation de carburant.

L'ouvrabilité et les propriétés à l'état durcis des mélanges BAP qui ont été soumis à différents cycles de traitement thermique étaient le sujet de Koehler et Fowler [159] (cité dans [136]). D'après leurs résultats présentés dans la Figure II.18, les mélanges de BAP étudiés ont été durcis à des périodes de préprises de 4, 6 et 8 heures et à des températures maximales de 49 °C, 63 °C et 77 °C. Comme dans le cas du BV avec une consistance normale, le BAP durci à la température maximale développe la plus grande résistance à la compression à 16 heures, comme illustré sur la Figure II.19. Pour une température maximale donnée, les mélanges traités thermiquement après une période de préprise de 4 heures présentaient des résistances à la compression à l'âge de 16 heures plus élevées que celles obtenues après 6 et 8 heures de préprise.

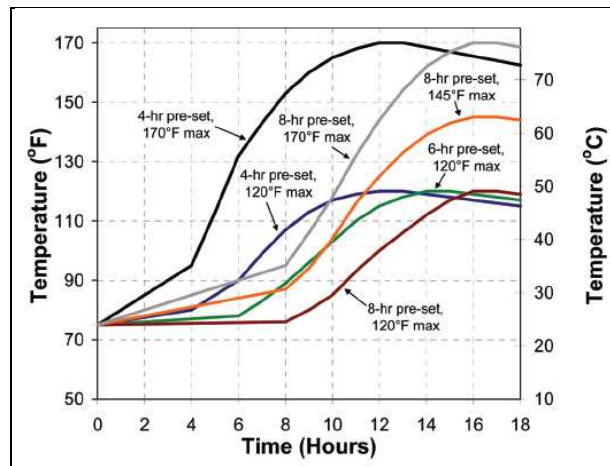


Figure II.18. Cycles de traitement avec différentes périodes de préprises et températures maximales [159]

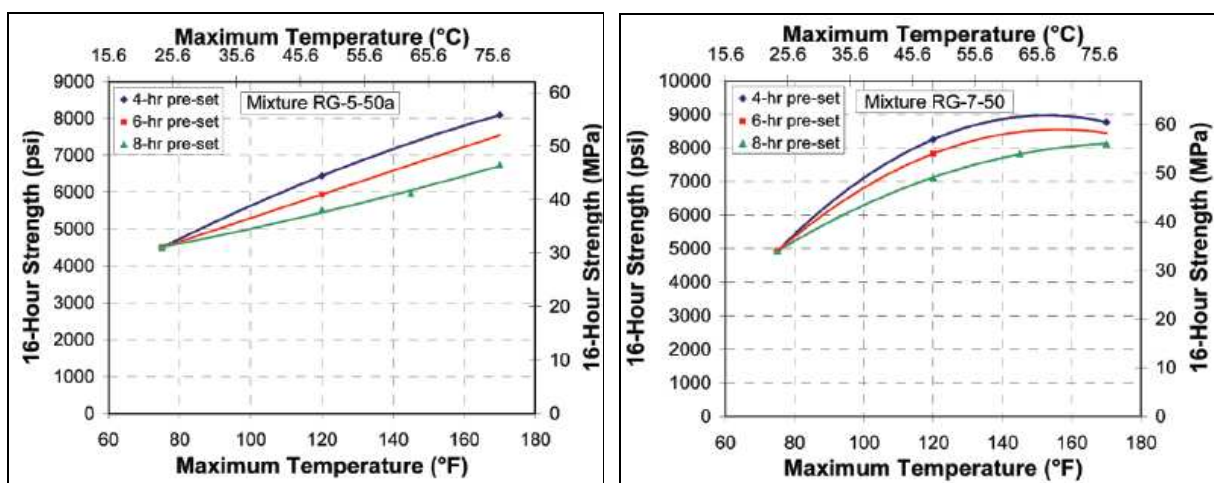


Figure II.19. Effet de l'histoire de la température sur la résistance à la compression [159]

Sur le même sujet du grand avantage de la période de préprise, des études antérieures sur l'étuvage des BAPs et des BHPs ont affirmé que l'application du traitement thermique devrait être retardée jusqu'au début de la prise ou au moins trois heures après le placement final de béton [152]. En général, la période de préprise de 3 à 5 heures peut être appliquée pour obtenir un développement maximal des propriétés mécaniques au jeune âge des BAPs et des BHPs utilisés pour des applications de la préfabrication. En plus, le temps total du traitement diminue avec l'augmentation de la période de préprise. La période de préprise plus longue serait plus économique pour la consommation de carburant des centrales de traitement, ainsi que de donner une accélération maximale pour la résistance initiale et une perte minimale de la résistance potentielle à long terme. Erdem et al [146] ont également conclu que des résistances plus élevées ont été obtenues lorsque la période retardée afin qu'elle soit égale au temps de la prise initial. Dans les mélanges BAP, où différents types et dosages de superplastifiant sont impliqués; la durée de préprise nécessaire pour atteindre la résistance précoce optimisée peut varier évidemment en raison de changements dans le dosage et le type de superplastifiant utilisé.

Du côté de l'influence du type de ciment, Santos et Barbosa [160] ont évalué les performances des propriétés mécaniques des BAP préparés avec différents types de ciments portland à base de laitier soumis au traitement thermique. Leurs résultats prouvent que le béton avec le ciment (CP II E-32) à 65 °C, avec une durée de traitement de 4 h, avait la meilleure résistance à la compression, alors que le béton avec le ciment CP III 40-RS à 65 °C, pendant 6 heures de traitement, avait la valeur optimale de la résistance.

6.2. Durabilité

Aujourd'hui, la durabilité des structures en béton est largement considérée comme une préoccupation majeure, pour cela beaucoup de recherches ont été effectuées à ce sujet.

6.2.1. Porosité

L'hydratation de la pâte de ciment à 20 °C forme une structure de gel CSH de basse densité avec une gamme de tailles de pores de gel et une fraction relativement faible de garnissage de particules solides [161]. Cette structure fine peut persister indéfiniment dans des conditions saturées. Cependant, si la pâte est séchée ou est durcie à des températures élevées (60 °C ou plus) la structure s'effondre et devient plus dense (moins poreuse) et une configuration plus stable avec moins de grands pores du gel C-S-H, ce qui entraîne une plus grande quantité de la porosité capillaire.

Une même constatation de celle de Mai-Nhu [162] qui a confirmé que l'application d'un traitement thermique tend d'une part à densifier la couche d'hydrates formés autour des grains de ciment (C-S-H internes) et d'autre part à augmenter la porosité dans la zone des hydrates formés entre les grains de ciment (C-S-H externes). Autrement dit, à porosité équivalente, la proportion des pores de plus grandes dimensions est supérieure dans le cas des bétons traités thermiquement. La distribution de la taille des pores est alors modifiée avec un accroissement de la proportion des pores de plus grand diamètre et une surface spécifique des C-S-H diminuée. Le chercheur expose que le traitement thermique semble ne pas avoir d'effets sensibles sur l'absorption d'eau mais davantage sur le séchage qui est plus rapide pour le béton traité thermiquement. Ces observations mettent en évidence une perméabilité plus importante pour le béton traité thermiquement que pour le béton témoin.

D'après Lumely et al [163] et Escalante et al [164], au-delà d'un rapport Eau/Solides = 0.40, une diminution de la quantité d'eau non évaporée est observée, car les gels d'hydrates du ciment se forment uniquement s'il existe un espace suffisant dans la pâte qui permet leur formation dans les pores. Cet espace est assuré par les pores capillaires formés par les particules d'eau qui doivent être en quantités suffisantes.

En ce qui concerne l'effet du rapport E/C et de la température de durcissement sur la porosité, la distribution de la taille des pores et la perméabilité des pâtes de ciment, Goto et Roy [120] constatent que les pores des échantillons durcis à 60 °C sont plus petits que ceux durcis à 27 °C, et le volume des pores ayant un rayon supérieur à 750 Å est plus grand pour les échantillons durcis à 60 °C et est lié à des perméabilités plus élevées aussi dans cette dernière.

Reinhardt et Stegmair [165] expliquent la raison de la perte importante de la résistance des BAPs traités thermiquement par rapport à la résistance du béton qui a été conservé dans des conditions standard, par un changement de la distribution de la taille des pores. Ce dernier résulte de l'influence de la composition du béton, en particulier le rapport E/C_{eq} .

La durée de l'exposition à la température maximale de traitement est aussi d'une grande importance. Ba et al [144] ont exploré son effet sur les pores de la microstructure des échantillons de béton durcis à 50 °C pour 5, 10, 14 et 24 heures. Les résultats ont révélé à une augmentation de la porosité grossière (pores supérieure à 500 nm de diamètre) des échantillons durcis à 24 heures. L'étuvage des échantillons de béton pendant 14 heures ou moins a amélioré la microstructure des pores en diminuant la quantité de pores grossiers. Donc la limitation des températures maximales de traitement thermique est un facteur important en raison de son impact sur la chimie des produits d'hydratation formés et

l'homogénéité de la matrice de ciment hydraté, affectant ultimement les propriétés à l'état durcis et les performances de durabilité. La diminution à long terme des propriétés mécaniques et de la nature grossière de pores de la microstructure des échantillons traité thermiquement a été signalée dans les recherches [142 et 166]. Pour un béton traité à une température 70°C, Ho et Lewis [167] (cité dans [168]) trouvent que, le béton d'enrobage est plus poreux.

6.2.2. Autres indicateurs de durabilité

Le traitement thermique a aussi une grande influence sur le comportement des bétons vis-à-vis d'autres indicateurs de durabilité tels que la perméabilité à l'eau, la perméabilité aux gaz; le coefficient d'absorption capillaire ou la sorptivité, la résistivité de surface, etc.

Une étude de l'effet de trente-six (36) cycles de traitement thermiques sur la résistance à la compression et la durabilité du BAP à base de FC a été réalisée par Ramezaniipoor et al [169]. Leurs résultats des essais de durabilité montrent que l'application de cycles avec une température maximale de 70 °C impose un effet négatif sur les propriétés de durabilité de BAP de référence, tels que la résistivité de surface et l'absorption capillaire. Les chercheurs ont adopté, sur la base de trois critères (résistance à la compression, la perméabilité et la consommation d'énergie par le cycle de traitement thermique), un cycle optimale à introduire et à utilisé dans l'usine de béton préfabriqué (Tableau II.8).

Une autre étude menée par Gesoglu [166] a montré que des échantillons durcis à 70°C présentaient une résistance de compression à 1-jour élevées, mais une sorptivité d'eau et une perméabilité aux ions chlorures plus élevée et des valeurs de résistivité électrique inférieures à ceux des échantillons de contrôle à 28 jours.

Le traitement à 50 °C pendant plusieurs heures (Tableau II.8) pour la production d'un BAP durable contenant 30% de CV a été étudié par Cano et al [170]. Les résultats de séchage ont indiqué une augmentation de la perte d'humidité dans le béton d'enrobage lorsque les échantillons ont été durcis à 50 °C. Les expériences d'absorption de l'eau ont montré une pénétration ultérieure de l'eau, une sorptivité plus élevée, et une diffusivité d'humidité élevée du béton durci à 50 °C par rapport au béton qui a été durci à 38 °C.

Une campagne d'essais a été menée par Hyvert [117] afin de proposer une modélisation de la carbonatation du béton industrialisé pour optimiser la durabilité des produits préfabriqués. A partir de la nature du ciment, de la composition du béton, des caractéristiques du traitement thermique et de la cure, et d'au moins un essai de carbonatation (ou à défaut à partir de la

résistance à la compression). Il a réalisé des essais expérimentaux sur un mortier à base de (CEM I 52,5 R) et a montré que le mortier présente une résistance mécanique à 7 jours plus élevée lorsqu'un traitement thermique (60 °C cycle Tableau II.8) est appliqué et qu'un effet bénéfique vis à vis de la diminution de l'épaisseur carbonatée du matériau étudié.

7. AVANTAGES DES ADDITIONS MINÉRALES DANS LE TRAITEMENT THERMIQUE

La résistance à la compression du béton ordinaire traité thermiquement est habituellement conçu pour obtenir 50 ~ 60 MPa, et la teneur en ciment dans le béton est aussi élevée que 500 kg/m³. Grâce à la teneur importante en ciment, les éléments préfabriqués en béton ordinaire traité thermiquement sont pauvres en durabilité, tels que la grande fragilité et sont faciles à fissuré, etc. Les additions minérales ont été plus en plus utilisé dans le béton en raison de leurs avantages en termes de résistance et de durabilité [171]. L'ajout de ces constituants secondaires tels que les laitiers granulés (LG), les cendres volantes (CV), les pouzzolanes (PZ), le métakaolin (MK), la fumée de silice (FS), les fillers calcaires (FC), ...etc, dans le cas du traitement thermique est favorable, surtout si ces constituants sont finement broyés. Ils supportent bien des températures élevées (jusqu'à 80-90°C) [110].

Des études étudiant l'effet des températures de traitement sur la résistance et la durabilité du béton révèlent que l'effet de la température varie avec le type de matériaux cimentaires supplémentaires. Chini et Acquave [172] ont étudié l'influence des températures de durcissement élevées (Tableau II.6) sur la résistance à la compression et la perméabilité aux ions chlorure déterminée à 28 jours pour les mélanges de béton fabriqués avec différents types de matériaux cimentaires supplémentaires. Un béton portland ordinaire présentait une résistance à la compression de 28 jours 15% et 18% inférieure des échantillons durcis à des températures de 71 et 82 °C dans des conditions semi-adiabatiques, respectivement, par rapport à ceux durci à la température ambiante de 23 °C. Le durcissement semi-adiabatique du béton à base de 18% de CV, a donné lieu à une réduction de 8% de la résistance à la compression à 28 jours pour les échantillons durcis à 71 et 82 °C comparées à celles durci à la température ambiante. De même, lorsque du ciment Portland est remplacé par 50% de LG, la résistance à la compression à l'âge de 28 jours des échantillons de béton durcis à des températures élevées diminuent de 7% et 15% pour des températures de durcissement de 71 et 82 °C par rapport à ceux durci à la température ambiante.

Cassagnabère [173] ont souligné que la valorisation du MK est possible à travers son incorporation avec 25%. Cette incorporation permet d'obtenir un matériau de performances

quasiment analogues tout en présentant un avantage environnemental non négligeable. Ce remplacement engendre une économie de 33% de CO₂ et un gain d'énergie grâce à une optimisation éventuelle du cycle d'étuvage à 55 °C (cycle Tableau II.8).

Tableau II.6. Résultats de l'essai de la résistance à la compression (MPa) – les échantillons durcis adiabatiquement à température élevée [172].

Temp. (°C)	Value	0% replacement			18% fly ash replacement			50% slag replacement		
		7 days	28 days	91 days	7 days	28 days	91 days	7 days	28 days	91 days
23	Mean*	40.8	45.7	50.0	44.6	51.5	57.7	38.1	53.3	58.6
	SD**	2.5	2.5	2.0	2.1	2.8	1.6	2.4	4.4	4.1
71	Mean	39.9	40.2	42.2	46.9	47.3	50.4	42.8	45.4	50.2
	SD	2.1	2.3	2.1	2.3	2.8	2.8	2.4	2.7	2.7
82	Mean	38.2	38.1	39.2	44.5	47.3	50.4	42.8	45.4	50.2
	SD	1.8	2.4	3.0	1.7	1.9	1.5	3.1	2.8	2.1

* Moyenne de six échantillons, ** Ecart type (standard deviation)

Ainsi, Cassagnabère a montré que ce taux d'incorporation du MK dans la formule d'un béton filé améliore certaines propriétés comme celles à l'état frais, de durabilité et de déformations différées, alors que d'autres propriétés comme la porosité et les résistances mécaniques sont légèrement diminuées. Par contre, Papzan et Majid [174] ont trouvé que la teneur optimale de MK est de 10% dans le cas de traitement normale à une même température, alors que le niveau de remplacement optimale est de 15% lorsque des échantillons de béton sont exposés à traitement thermique de 55 °C (cycle Tableau II.8). Par conséquent, le remplacement de 15% de ciment avec MK produira des bétons avec un volume poreux total supérieur, ce qui conduira finalement à augmenter l'absorption d'eau et la porosité.

Une autre étude réalisée par Aslan [175] sur la prévision à long terme de la résistance du béton compacté aux rouleaux contenant de PZ par traitement thermique ($T_{\max} = 55$ °C) montre que le traitement thermique est efficace pour des mélanges de ciment Portland ordinaire et n'est pas efficace pour des mélanges de ciment composé avec des ajouts supplémentaires.

La combinaison des additions minérales est possible et est une bonne solution pour améliorer encore plus le comportement des bétons traités thermiquement. Les résultats de Zhimin et Junzhe [176] ont indiqué que, le remplacement de 30% de ciment avec un double mélange de CV et de FS permet d'avoir le béton étuvé le moins poreux.

En combinant du MK et du LG, Zeng et al [177] montre que la structure des pores du béton est significativement raffiné et une structure plus dense des hydrates est obtenue en raison de l'effet filler et la réaction pouzzolanique des additions notamment le MK. Par ailleurs, la combinaison de la pâte agrégat et est renforcée aussi. Les améliorations de la résistance et de la microstructure deviennent de plus en plus évident quand MK et LG sont combinés (10% MK et 10% LG).

L'influence de la combinaison des CV et LG sur la durabilité du BHP traité thermiquement à 60 °C a été mené par Jianhua et Yunlan [171]. Leurs résultats montrent que, dans les deux cas de traitement, thermique et standard, l'incorporation de 20-30% du LG ou 15-20% de CV a diminué l'alcalinité et la résistance de la carbonatation du béton; avec l'augmentation de la proportion de l'addition mis en place. Ainsi, la résistance à la carbonatation de BHP a été diminuée; la perméabilité du chlorure du béton traité thermiquement a été améliorée, et l'influence de LG est meilleure que celle des CV.

Baoju et al [178] trouvent que le contenu de FS, du LG, et le contenu de l'eau sont les principaux facteurs affectant la résistance à la compression du béton traité thermiquement (60 °C cycle Tableau II.8) et la combinaison de FS et LG a pu résoudre le problème et donner des résistances supérieures, dans lequel le rapport d'augmentation de la résistance est plus faible. D'un autre côté, en faisant en compte le comportement des mélanges cimentaires avec additions face aux expansions dû au DEF, les mêmes cycles de traitement employés par Kelham [130] ont été utilisés par Ramlochana et al [179] pour faire une expertise sur les mortiers traités thermiquement contenant des PZ et du LG. Les chercheurs constatent que, dans la plupart des cas, l'addition de n'importe quelle quantité de ces matières au mélange typiquement réduite à l'expansion à long terme, a ralenti le taux d'expansion, et a retardé l'apparition d'expansion. Toutefois, à des niveaux plus élevés de remplacement, le LG et les CV, qui sont sources d' Al_2O_3 , étaient efficace pour supprimer l'expansion.

8. FORMULATION DES BETONS TRAITES THERMIQUEMENT

La démarche de la formulation d'un béton qui doit être traité thermiquement relève de considérations spécifiques. Ainsi, pour augmenter les gains de résistance initiaux, un moyen efficace consiste à réduire le rapport E/C. par le passé, cette démarche revenait à formuler des bétons de consistance ferme afin de limiter les dosages en ciment, puis à utiliser des moyens de serrage énergiques lors de la mise place du béton [139]. Avec le développement des adjuvants fluidifiants, il est aujourd'hui possible de réduire le rapport E/C tout en conservant au béton une bonne ouvrabilité. L'effet défloculant de ces adjuvants améliore la distribution

des grains de ciment dans le volume et répartit de façon uniforme les hydrates formés. Mentionnons également que, sous réserve d'une bonne compatibilité du ciment avec l'adjuvant et d'un dosage adapté, la baisse du rapport E/C se traduit également par une réduction du temps de prise, ce qui va dans le sens de performances mécaniques précoces.

Il est préférable également d'utiliser un ciment d'une classe de résistance plus élevée. Notons que plus le dosage est conséquent, meilleur seront les performances initiales. En fait, si l'on se réfère à la composition chimique du ciment, le choix du ciment peut relever d'une démarche plus complexe.

Il n'est bien sûr pas exclu d'utiliser des additions. Les CV et les LG, par exemple, sont fortement activés par une montée en température.

Pour les pièces non massives, les accélérateurs associés à une température d'étuvage limitée sont à préconiser.

Finalement, pour optimiser le traitement thermique des éléments de moyenne et grande dimensions, il est souvent préférable de fabriquer des bétons chauds (25 à 30 °C) et d'appliquer un cycle thermique modéré plutôt que de fabriquer du béton à des températures variables puis de faire subir un traitement thermique important au béton après sa mise en place dans les moules. En effet, plus la pièce du béton est massive, plus il est difficile et long d'activer le durcissement du béton par un apport de chaleur externe, étant donné la grande inertie thermique du béton frais [115].

9. CARACTERISTIQUES D'ETUVAGE EN USINE

Dans l'industrie de la préfabrication, l'utilisation de la technique de durcissement à température élevée pour accélérer l'hydratation a été adoptée comme l'une des méthodes standard pour la production à haut volume d'unités de béton. Actuellement, l'industrie de la préfabrication représente 20% de la production de béton dans le monde [142], et, par conséquent, une large gamme de cycles de durcissement existe.

La connaissance de ces cycles d'étuvage pratiqués sur différents usines de productions permet de se familiariser avec les différents traitements thermiques qui sont employés et de définir un traitement thermique représentatif que l'on pourra utiliser pour notre étude en laboratoire.

9.1. Cycles d'étuvage théoriques

Des cycles d'étuvage théoriques utilisés dans quatre sites et appliqués aux éléments lors de leur phase de maturation présentés par Cassagnabère [173] sont présentés dans la Figure II.20.

Ce qui peut être constaté de cette figure c'est que pour chaque site, les caractéristiques du cycle sont spécifiques au mode de production envisagé :

- Pour un cycle court avec une température élevée, une double rotation journalière est mise en place ;
- Pour un cycle plus long avec une montée en température moins élevée, une seule rotation journalière est envisagée.

Cependant, on observe des similitudes concernant l'allure générale de différents cycles et on peut distinguer pour chacun des cycles :

- Une phase de préprise avec une température à 30°C maintenue de 1,5 à 4 heures ;
- une rampe constante de montée en température de 10 à 15°C/h ;
- Une stabilisation à une température maximale de 50 à 60°C de 5 à 19 heures ;
- Un retour à la température ambiante ;
- Une durée totale du cycle de 14 à 20 heures.

Hyvert [117] a collecté des données sur les caractéristiques des BV et BAP à travers 3 usines dénommées usine A, usine B et usine C (Tableau II-7). Cette campagne de résultats vise à caractériser l'influence des spécificités du processus de préfabrication des produits (poutres, prédalles, voussoirs, éléments de ponts, cadres sous chaussées ...) sur la résistance à la compression à 28 jours des éprouvettes cubiques d'arrête 10 cm du béton préfabriqué. Ces éprouvettes ont été conservées dans les mêmes conditions de durcissement que celles des produits préfabriqués des usines.

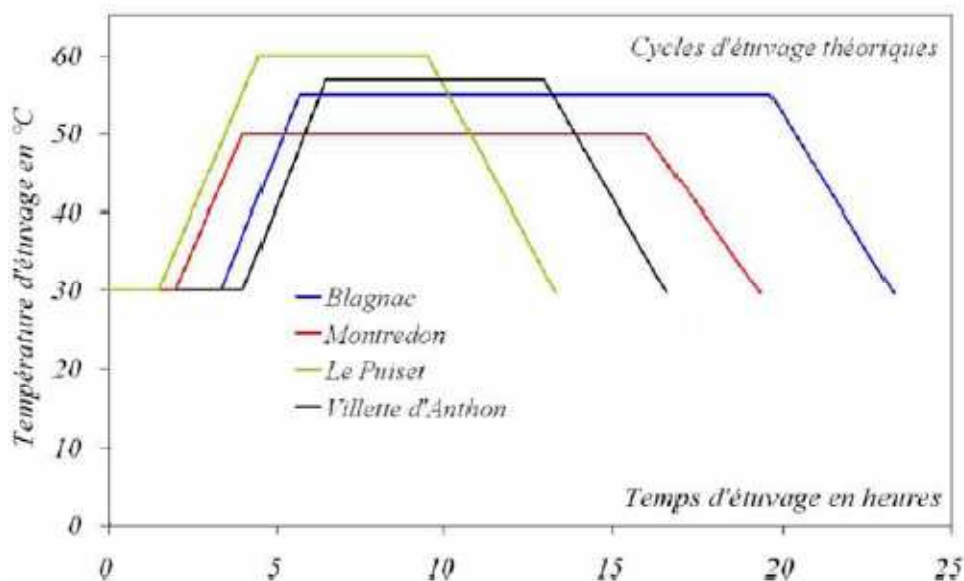


Figure II.20. Cycles d'étuvage théoriques [173]

Tableau II.7. Récapitulatif des cycles d'étuvages et des caractéristiques des BV et BAP réalisés dans trois usines [117]

	Béton	C (kg/m ³)	E/C	Filler Kg/m ³	Préprise (h)	V _{chauf} (°C/h)	T _{max} (°C)	D _{Tmax} (h)	T _{équi} (h)	R _{moy} (MPa)
Usine A	BV	365	0,50	/	/	20	80	2	44	31
	BAP	370	0,53	130	2	15	60	3.5	33	51
Usine B	BV	460	0,47	/	/	20	60	7	51	37
	BAP	434	0,45	70	2	15	65	3	36	41
Usine C	BV	350	0,49	50	3	10*	50	12	70	38
	BA	390	0,42	/	/	15	45	8	30	49

9.2. Cycle d'étuvage adopté

Afin de pouvoir adopter un cycle d'étuvage à utiliser dans notre thèse, on a essayé de faire un récapitulatif (Tableau II.8) de quelques cycles de traitement thermique utilisés par certains auteurs dans leurs recherches dans le domaine de traitement thermique du béton ou dans la préfabrication.

Sur la base des recommandations des normes en vigueur, des données des cycles théoriques utilisés dans les usines de préfabrication et les cycles thermiques utilisés par les chercheurs, on a adopté le cycle présenté sur la Figure II.21.

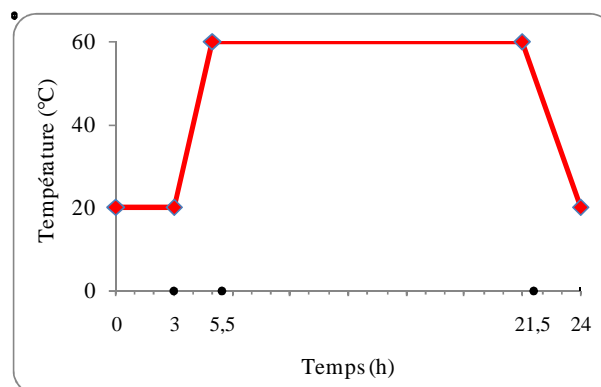


Figure II.21. Cycle de traitement thermique adopté

Tableau II.8. *Synthèse des différentes conditions de traitement thermique d'autres études*

Référence	Paramètres de traitement		Détails du cycle de traitement			
	D _{tot} (h)	T _{max} (°C)	Préprise D _p (h) et T(°C)	Chauffage D _{ch} (T _{min} →T _{max})	D _{Tmax} (h)	Refroidissement D _{ref} (T _{max} →T _{min})
[180]	26	85	4 (20)	5 (20→85)	6	11 (85→20)
[166]	24	70	2 (22)	3 (22→70)	17	1 (70→22)
[181] [168]	16	60	2 (23)	2 (23→60)	10	2 (60→23)
[182]	18	60	5 (23)	22 °C/h	5	(23)
[173]	20	55	2.83 (30)	2.67 (30→55)	12.5	2 (55→30)
[117]	12	60	2 (20)	2,66 (20→60)	5	2.44 (60→23)
[162]	22	60	3 (20)	4 (20→60)	7.5	3.5 (60→20) 4 (20)
[112]	24	80	1 (20)	3 (20→80)	10	10 (80→20)
[183]	< 18	60	4 (na)	Na (na→60)	8	2 (60→na)
[143]	22	80	4 (20)	4 (20→80)	10	4 (80→20)
[179] [130]	23	60, 70, 80 et 95	4 (23)	20 °C/h	12	20 °C/h (20)
[157]	3.75	65	0.25 (35)	1.5 (20 °C/h)	1.5	0.5
[165]	30	60	3 (30)	3 (10 °C/h)	5	10 °C/h (20)
[169]	10	60	3 (20)	(20→60)	5	(60→20)
[170]	18	50	4 (23)	4 (20→50)	4	4 (50→20)
[160]	11-16.5	65 80	3.5 (27)	1.5 (27→65) 2.66(27→80)	4, 6 et 8	2 (65→30) 2.5 (80→30)
[184]	7.5	55	1 (20)	0.5 (20→55)	5	1 (55→20)
[185]	24	55	3 (27)	3 (20→55)	8 (55)	7 (55→45) 3 (45→30)
[158]	30 30	60 100	2 (20)	8 à 9	16 à 17	2 (60→20) 2 (100→20)
[177]	19.5	80	6 (30)	3.5 (30→80)	8	2 (80→30)
[186]et [178]	13	60	2 (20)	2 (20→60)	8	1 (60→20)
[223]	24	80	4 (20)	4 (20→80)	10	6 (80→40)
[146]	22	80	4 (23)	21 °C/h	10	5 (80→23)
[187]	12	70	2 (20)	2 (20→70)	6	2 (70→20)
[174]		55	3 (30)	0.5	16	
Notre cycle adopté	24	60	3 (20)	2.5 (20→60) 16 °C/h	16	2.5 (60→20)

D_{tot}: la durée totale du cycle de traitement thermique (heure) ;

D_p: la durée de la phase de la préprise (heure) ;

D_{ch}: la durée de la phase de chauffage (heure) ;

D_{Tmax}: la durée du palier isothermique à la température maximale (heure) ;

D_{ref}: la durée de la phase de refroidissement (heure).

T_{max}: la température maximale du cycle de traitement thermique (°C) ;

T_{min}: la température minimale du cycle de traitement thermique (°C) ;

10. CONCLUSION

Cette partie bibliographique nous a permis de conclure que le processus de traitement thermique du béton accélère le développement de la résistance initiale, mais il a un effet négatif à long terme. Il y a un risque d'avoir de l'expansion et de la formation de fissures dans le béton durci à des températures supérieures à 65 °C en raison de la formation d'étringite différé (DEF) et une augmentation de la proportion des pores grossiers. Divers règlements sur l'étuvage recommandent des valeurs limites pour les quatre phases du cycle afin de prévenir ces conséquences et pour garantir des propriétés mécaniques favorables et une bonne durabilité à jeune âges et à long terme.

Donc, il est très important d'utiliser des matériaux supplémentaires tels que les additions minérales qui ont une grande importance dans ce cas de traitement. Elles peuvent supporter des températures d'étuvages et améliorer la structure des bétons élaborés. D'un autre coté il faut et est possible de déterminer un cycle approprié de traitement thermique.

Compte tenu des recommandations des normes en vigueur, des données des cycles théoriques utilisés dans les usines de préfabrication et des cycles étudiés par les chercheurs, on a adopté le cycle présenté sur la Figure II.21. Il se caractérise par :

- Une durée de préprise de 3 h à la température ambiante (≈ 20 °C) pour acquérir une cohésion suffisante afin de pouvoir résister aux conséquences causés par le chauffage,
- Une phase de chauffage de 20 à 60 °C pendant 2.5 h ce qui est équivalent à une vitesse de 16 °C/h, répondant aux exigences d'éviter des vitesses excessives pour prévenir les chocs thermiques,
- Une durée de traitement de 16 h à la température de 60 °C, ce qui permis d'avoir une combinaison de température faible avec une durée de traitement longue,
- Une phase de refroidissement pendant 2.5 h pour revenir à la température ambiante (≈ 20 °C) ce qui correspond à une vitesse de 16 °C/h pour répondre aux mêmes exigences citées pour la vitesse de chauffage.

La partie expérimentale sera consacrée à l'étude de l'effet de ce cycle de traitement thermique adopté sur les caractéristiques physico-mécaniques à jeune âge et à long terme des bétons élaborés à base des additions minérales.

Chapitre III

MATERIAUX

ET TECHNIQUES

EXPERIMENTALES

Chapitre III

MATERIAUX ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

1. ESSAIS DE CARACTERISATION

1.1. Caractérisation des constituants

Les méthodes d'essais de caractérisation des constituants sont décrites dans ce chapitre. Certains modes opératoires s'appuient sur des textes normatifs tandis que d'autres sont issus de protocoles expérimentaux publiés dans la littérature scientifique. Dans les deux cas, un renvoi à la norme ou la publication concernée est effectué.

1.1.1. Ciment et additions minérales

Certaines données utilisées dans cette étude, comme celles du ciment (C) ou des additions minérales (A) utilisées sont issues des analyses d'autocontrôle effectuées par les fournisseurs. D'autres caractérisations ont été effectuées expérimentalement au laboratoire. Le paragraphe qui suit explique les différents essais utilisés pour la caractérisation des poudres (ciments et additions minérales).

1.1.1.1. Granulométrie

La granulométrie a pour objet la détermination de la taille des particules élémentaires qui constituent l'ensemble de grains de substances diverses et la fréquence statistique des différentes tailles de grains dans l'ensemble étudié. Deux procédés peuvent être utilisés pour cette caractérisation.

- Par granulométrie Laser pour C et A. La technique de la granulométrie laser, adaptée aux poudres très fines, utilise le principe de diffraction et de diffusion d'un faisceau laser.

- Par tamisage et granulométrie

A partir de ces essais, on peut tracer les courbes granulométriques des ciments ou des additions et déterminer le refus sur tamis 0.08 mm.

1.1.1.2. Surface spécifique

La méthode utilisée est celle qui permet d'avoir la *Surface spécifique de Blaine (SSB) pour C et A*. Cette méthode permet de déterminer la surface spécifique d'une poudre, par perméabilité à l'air, en mesurant le temps de passage d'une quantité d'air au travers d'un lit de poudre compactée de dimensions et de porosité donnée.

1.1.2. Granulats

Les essais mis en œuvre pour déterminer les caractéristiques des granulats (sables et gravillons) sont :

1.1.2.1. Masse volumique

La masse volumique, est une caractéristique de base des granulats pour bétons. Cette caractéristique est définie selon NF P 18-554 [188] pour la masse volumique apparente et NF P 18-555 [189] pour la masse volumique absolue.

1.1.2.2. Granulométrie

Cet essai s'effectue selon la norme NF P 18-560 [190]. 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. Les résultats sont reportés sur un diagramme semi-logarithmique. L'analyse granulatoire s'effectue en deux temps. Une première étape s'effectue par un tamisage mécanique à l'aide d'une colonne montée sur une source vibrante durant un temps déterminé. La seconde phase (finition) se fait manuellement au niveau de chaque tamis de la série afin d'affiner l'analyse granulométrique.

1.1.2.3. Module de finesse

Le module de finesse M_f d'un granulat, déterminé selon NF P 18-560, est égal au centième de la somme des refus, exprimés en pourcentage sur les tamis de la série suivante : 0.16-0.315-0.63-1.25-2.5-5-10-20-40-80 mm. Généralement, il caractérise les sables. La norme française [191] indique que M_f doit être compris entre 1.8 et 3.2. Il existe trois intervalles de M_f conférant au béton des propriétés différentes :

- Pour $1.8 < M_f < 2.2$, l'ouvrabilité est avantagée au détriment de la résistance mécanique ;
- Pour $2.2 < M_f < 2.8$, l'ouvrabilité et la résistance s'avèrent satisfaisantes ;
- Pour $2.8 < M_f < 3.2$, la résistance mécanique est privilégiée au dépens de la mise en œuvre du béton.

1.1.3. Adjuvant

L'adjuvant utilisé dans cette étude est un superplastifiant MEDAPLAST SP 40 répondant aux exigences de la norme NF P 18-560 [192]. Les informations concernant les caractéristiques de ces produits ont été mises à disposition par les fournisseurs ; il s'agit de la nature chimique, de la densité, de l'extrait sec, etc.

1.2. Caractérisation du béton à l'état frais

Les essais à l'état frais sont primordiaux pour la connaissance du béton frais. En effet, le béton ordinaire vibré (BV) possède une consistance ferme et doit être mis en place avec vibration et le béton autoplaçant (BAP) possède une consistance fluide et sa mise en place s'effectue sans vibration. Les mélanges des bétons ont été préparés dans un malaxeur de type laboratoire (Figure III.1). La procédure de malaxage de chaque type de béton (BV ou BAP) est décrite dans la section 3.3.1.

1.2.1. Masse volumique et teneur en air occlus

La norme NF P18-443 [193] a pour objet de décrire la détermination du pourcentage d'air occlus créé lors du malaxage dans un béton frais, à l'aide de l'aéromètre à béton (Figure III.2). Préalablement, la masse volumique du béton à l'état frais est déterminée avec l'aéromètre.



Figure III.1. Malaxeur de béton utilisé



Figure III.2. Aéromètre à béton utilisé

1.3. Traitement thermique : Etuvage

La confection et l'étuvage des éprouvettes ont été effectués dans le laboratoire du département de génie civil (univ de Skikda). Le cycle de traitement thermique adopté a été réalisé en utilisant une étuve (Figure III.3) équipé d'un thermocouple positionné à l'intérieur afin de contrôler la température.

1.4. Essais de caractérisation des bétons à l'état durci

Les essais réalisés à l'état durci ont été réalisés dans le laboratoire de Génie civil et Hydraulique LGCH (université de Guelma)

1.4.1. Indicateurs de durabilité

Les résistances mécaniques en compression sont des valeurs essentielles pour le béton et aussi bien pour l'industrie de la préfabrication (jeune âge et long terme), mais elles ne constituent pas le seul critère de performance que l'on peut exiger d'un matériau cimentaire. Il faut que le matériau s'altère le moins possible avec le temps ; il faut qu'il soit durable. La durabilité des bétons de ciment exige un contrôle efficace et effectif de tous les facteurs susceptibles d'affecter son comportement dans le temps. L'expérience montre que les facteurs d'influence, de très loin les plus importants en matière de durabilité et qui doivent donc faire l'objet d'un contrôle suivi, sont la composition du béton (teneur en ciment et rapport E/C), l'enrobage des armatures, la compacité du béton et la protection du béton frais en cours de durcissement.

Cette partie retrace la mise en place des essais caractérisant les indicateurs de durabilité. Il s'agit de la porosité et la capacité d'absorption d'eau.

1.4.1.1. Porosité

La porosité (P) est un paramètre de premier ordre qui caractérise les propriétés mécaniques ainsi que la durabilité du béton. Elle représente la part de vide contenu dans le matériau à l'état durci à l'âge de 28 jours. La méthode de caractérisation la plus simple et la plus utilisée est sans doute la mesure de la porosité accessible à l'eau. Cette méthode ne donne toutefois accès qu'à la porosité totale et à la masse volumique apparente du matériau [33]. Le protocole utilisé pour la détermination de (P) est décrit dans la norme NBN B 15-215 [194].

1.4.1.2. Capacité d'Absorption d'Eau

Le protocole suivi pour la détermination de la capacité d'absorption d'eau (CAE) à l'âge de 28 jours est le même que celui utilisé pour la détermination de P [194]. L'absorption d'eau par immersion est donc le résultat des mouvements capillaires dans les pores du béton qui sont ouverts sur le milieu ambiant. Elle est déterminée par immersion d'une éprouvette de béton dans l'eau jusqu'à masse constante et en mesurant l'augmentation de masse. Elle est exprimée en pourcentage de la masse sèche de l'éprouvette. Etant une image de la porosité, l'absorption d'eau est utilisée comme un indicateur de la qualité du béton.

1.4.2. Essai d'ultrasons

L'essai de la vitesse de propagation d'ultrason (Ultrasonique Pulse Velocity « UPV ») permet de mesurer le temps de propagation d'un train d'ondes sonores entre l'émetteur et le récepteur de l'appareil (figure III.4) disposés sur deux points de l'éprouvette cubique du béton. Le temps de propagation mesuré à l'âge de 28 jours, selon la norme NF P 18-418 [91], permet de calculer la vitesse de propagation à l'intérieur du matériau. Le calcul d'UPV donne une

indication sur l'homogénéité du matériau ainsi qu'une estimation de sa qualité et de sa résistance. Il s'agit d'un essai non destructif. Les mesures ultrasoniques peuvent être interprétées selon les critères décrits dans le Tableau III .1 ci-dessous.

Tableau III.1. Corrélation entre la vitesse du son et la qualité du béton

Vitesse du son (m/s)	> 4500	3500 à 4500	3000 à 3500	2000 à 3000	< 2000
Appréciation de la qualité	Excellent	Bon	Assez bon	Médiocre	très mauvais



Figure III.3. Etuve utilisé pour le traitement thermique



Figure III.4. Appareil utilisé pour l'essai d'ultrasons

1.4.3. Performances mécaniques

Afin d'obtenir les valeurs de résistance mécanique en compression selon la norme NF EN12390-3, les essais sont pratiqués sur des éprouvettes cubiques de $(10 \times 10 \times 10)$ cm³ de dimensions. Les résistances ont été obtenues par écrasement des éprouvettes avec sur une presse asservie en force d'une capacité maximale de 3000kN, avec une vitesse de chargement de 0,5 MPa/s. Les échéances d'essai sont (1, 28 et 180 jours). En attendant l'échéance d'essai, les éprouvettes cubiques $10 \times 10 \times 10$ cm³ ont été conservées dans l'eau à la température ambiante du laboratoire.

Remarque

Il faut savoir qu'il existe un coefficient d'équivalence qui permet de retransformer les résultats obtenus sur cubes en valeurs obtenues sur cylindres ($\emptyset 16 \times h 32$) cm³. Cependant, les valeurs présentées dans ce mémoire sont les valeurs réellement obtenues lors des essais sans l'application de ce coefficient correctif. Deux éprouvettes ont été testées pour chaque essai.

2. CARACTERISTIQUES DES MATIERES PREMIERES

Cette étape est nécessaire pour une connaissance plus approfondie de matières premières utilisées. Les valeurs de caractérisation des constituants, données tout le long de ce chapitre, sont également utiles pour l'interprétation des résultats des essais réalisés sur les bétons.

2.1. Ciment

Le ciment employé est un ciment CPJ CEM II 42.5 de la cimenterie de Hadjar Soud (département de Skikda, nord algérien). Sa composition minéralogique fournie par le laboratoire de la cimenterie est: C₃S = 55 à 65 %, C₂S = 10 à 18 %, C₃A = 10 à 12 %, C₄A = 10 à 12 %.

Les caractéristiques physiques et les compositions chimiques du ciment utilisé présentées dans les Tableaux III.2 et III.3 ont été fournies par le laboratoire de la cimenterie. Nous avons effectuées quelques essais de contrôles en laboratoire pour vérifier certaines caractéristiques physiques et les résultats sont présentés dans le Tableau III.4.

Les informations recueillies pourront servir par la suite à expliquer certaines propriétés des bétons.

Tableau III.2. *Propriétés du ciment utilisé [fiche technique – Annexe]*

CARACTERISTIQUE PHYSIQUE			CARACTERISTIQUE MECANIQUE		
NORME NA			NORME NA	EN MpA	
NA230	CONSISTANCE NORMALE	≥ 25	NA 442	COMPRESSION	
NA230	DEBUT DE PRISE	≥ 60		02 jours	≥ 12.50
NA230	FIN DE PRISE	150 - 250		07 jours	25 - 35
NA232	EXPANSION A CHAUD	≤ 10mm		28 jours	42.5 - 52.5
NA231	SSBlaine cm ² /g	3300 - 4000	NA 234	FLEXION	
NA231				02 jours	3,0-4,0
				07 jours	5,0-6,5
NA440	RETRAIT SUR MORTIER μm/m	≤ 1000		28 jours	6,5-8,5

2.2. Additions minérales

Afin de développer la partie liante du matériau cimentaire, des additions minérales couramment employées dans l'industrie du béton ont été utilisées. Il s'agit du filler calcaire (FC) qui est un Carbonate de Calcium sous forme de poudre (CaCO₃ = 98 %) provenant du

l'entreprise nationale des granulats ENG d'El-Khroub (département de Constantine, nord algérien) et des laitiers (Laitier granulé LG et Laitier cristallisé LC) de hauts fourneaux du complexe sidérurgique d'El-Hadjar (département d'Annaba, nord algérien). Les laitiers ont été broyés pour avoir une poudre de finesse proche de celle des ciments courants.

Le diagramme DRX du laitier granulé effectué par Arabi et al., 11 [222] et présenté sur la Figure III.5, montre que sa structure est presque entièrement amorphe où les pics sont difficilement identifiables. Une bande angulaire comprise entre 25 et 35° (2 θ) est attribuée à une proportion importante de verre (amorphe). Toutefois, des traces de mellilite, de merwinite et probablement de la monticellite à la position 2 θ = 27.7°, identifiables sur des portions de laitier mieux cristallisé : certains agglomérats de laitier ont subi probablement une cristallisation partielle. En plus de ces minéraux, on peut noter la présence de quelques traces de quartz, de calcite et d'oxyde de fer dans ce même laitier.

Contrairement au FC et LG qui ont souvent été utilisés comme addition dans le béton, peu d'études ont été menées sur le laitier cristallisé (LC). L'emploi du laitier cristallisé dans les BAP pourrait constituer une alternative intéressante aussi bien sur le plan environnemental que sur le plan technico-économique. Le laitier cristallisé (LC) est déversé dans des fosses à sa sortie du haut fourneau et refroidit à l'air libre ; il se présente sous forme de granulats de 0 à 20 mm après concassage.

Le diagramme DRX du laitier cristallisé effectué par Laifa et al [42] et présenté sur la Figure III.6, montre l'existence d'une phase vitreuse. Le refroidissement lent du laitier ne peut être uniforme dans toute la masse, les couches au contact de l'air refroidissent plus rapidement et constitue la partie vitreuse du laitier cristallisé.

Les trois additions sont de deux natures différentes et ont été utilisées avec des teneurs de 20 et 40 %. Les taux d'additions minérales de 20 et 40% choisis dans ce travail correspondent aux taux habituellement adoptés dans la fabrication des ciments composés algériens tels que CPJ-CEM II/A (6 à 20% d'additions minérales) et CPJ-CEM II/B (21 à 35% d'additions minérales).

Les compositions chimiques des additions minérales sont présentées dans le Tableau III.3 et les caractéristiques physiques sont résumées dans le Tableau III.4.

Les courbes granulométriques sont présentées sur la Figure III.7 à partir desquelles le diamètre médian D50 est déduit.

2.3. Granulats

Concernant les études à l'échelle du béton, deux sables et deux gravillons utilisés réellement ont été sélectionnés. Un sable siliceux 0-1 mm (noté S1) de la région de Oued Zhor (département de Skikda), un sable calcaire concassé 0-4 mm (noté S2) de la carrière de Boucelba (département de Guelma, nord algérien) et un gravier 3-8 mm (noté G1) et un gravier 8-15 mm (noté G2) de la carrière de concassage de Guerbeze (département de Skikda). La Figure III.8 présente les courbes granulométriques des deux sables et des deux gravillons. Le Tableau III.5 donne les caractéristiques générales des granulats. Elles sont nécessaires pour effectuer la formulation des bétons par les différentes méthodes.

Tableau III.3. Compositions chimiques du ciment et des additions minérales

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	PAF
C	59 - 62	22 - 24	5.3 - 6.0	3.0 - 4.0	1.5 - 1.8	< 0.9	< 0.7	1.8 - 2.2	--
FC	56.18	0.43	0.08	0.09	0.26	0.01	0.07	0.03	42.85
LG	42.77	41.23	7.89	1.38	4.60	0.94	00	0.34	--
LC	34.93	33.92	6.62	4.98	5.74	0.52	0.52	0.39	--
S1	0.62	95.21	1.12	0.55	0.04	0.46	0.10	00	--
S2	56.73	3.71	0.23	0.20	1.18	0.02	0.07	0.09	37.77

Tableau III.4. Caractéristiques physiques des additions minérales

	Densité absolue	SSB (cm ² /g)	SSDL (cm ² /g)	D50 (µm)
C	3.16	3630	6560	21.19
FC	2.40	5540	4520	6.56
LG	2.92	2280	4570	49.87
LC	2.73	4850	21900	14.77

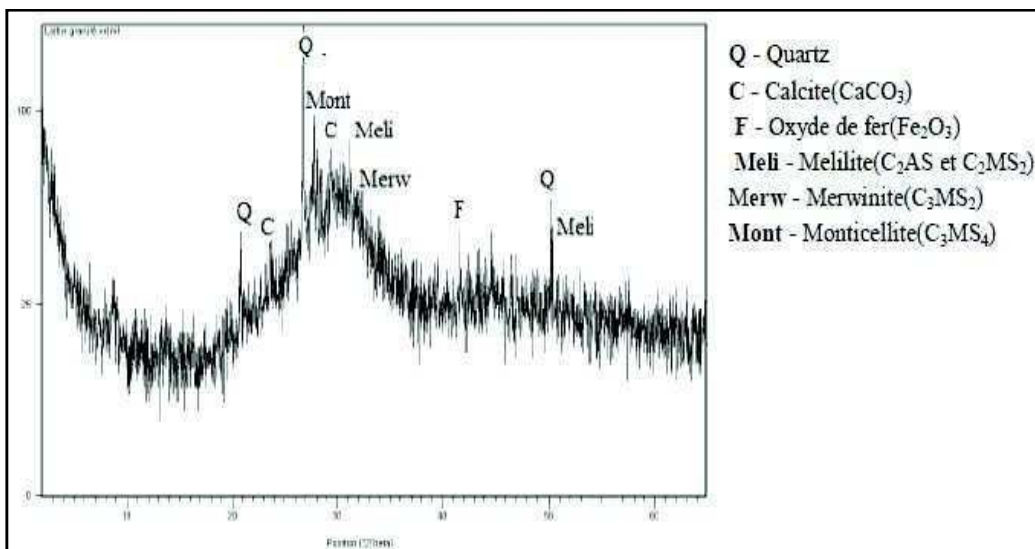


Figure III.5. DRX du laitier granulé d'El-Hadjar [222]

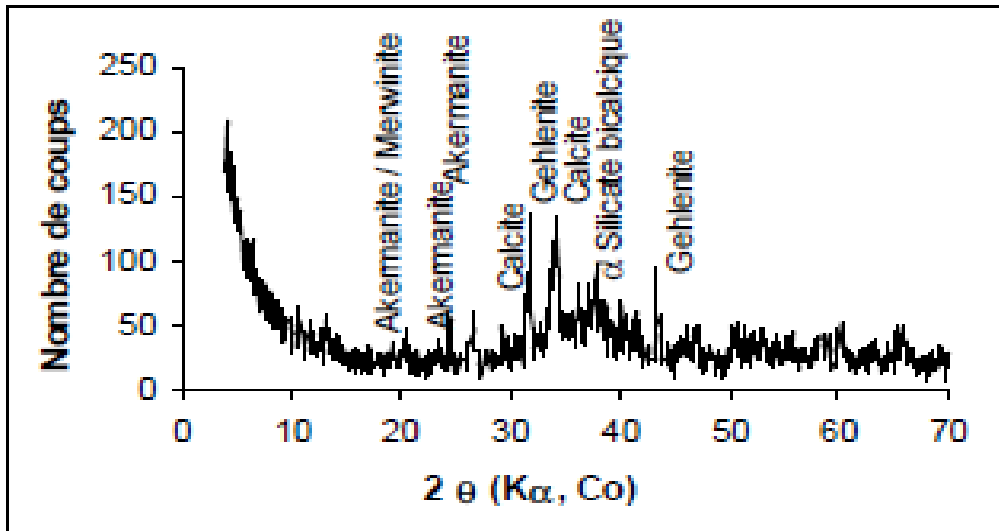


Figure III.6. DRX du laitier cristallisé d'El-Hadjar [42]

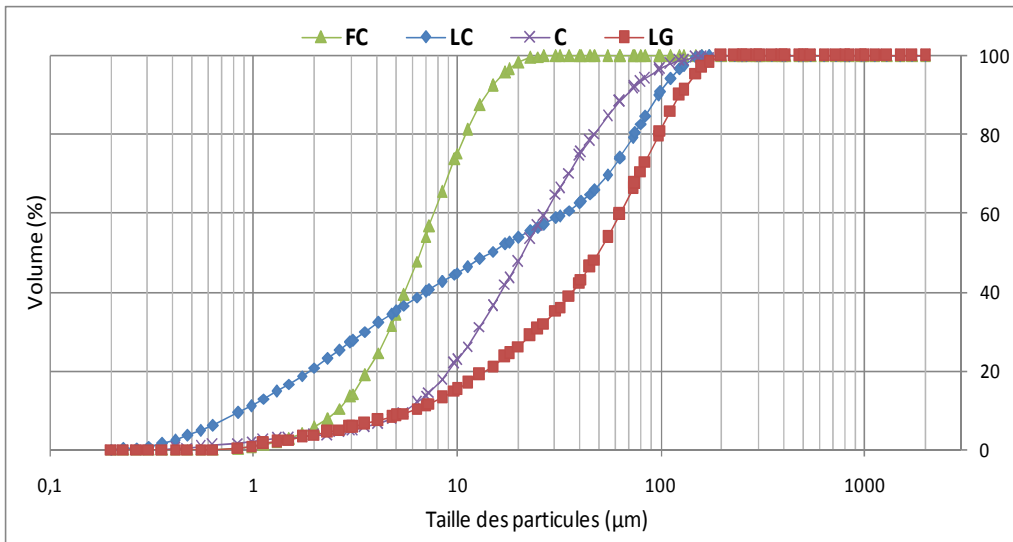


Figure III.7. Courbes granulométriques du ciment et des additions

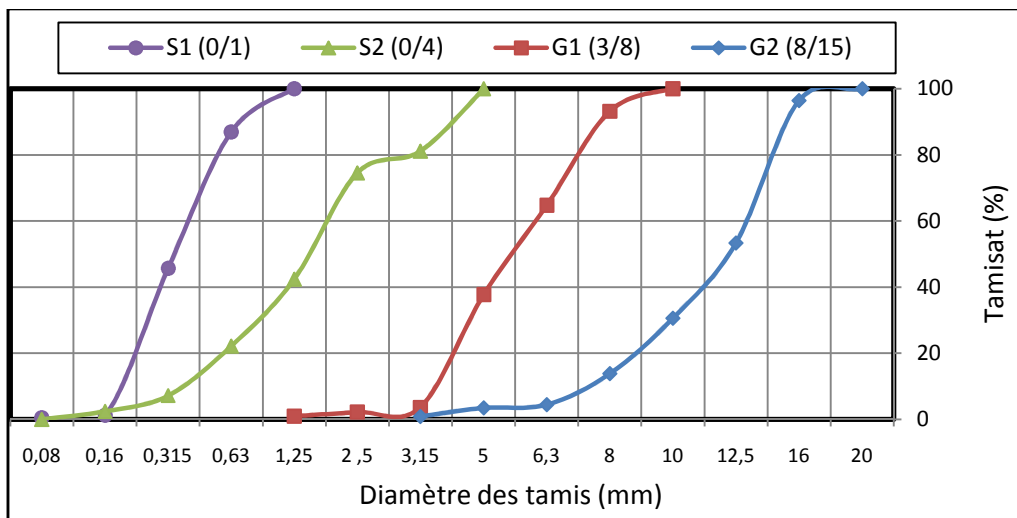


Figure III.8. Courbes granulométriques des granulats utilisés

Tableau III.5. *Propriétés générales des granulats*

	Unité	S1	S2	G1	G2
Module de finesse	(%)	1.66	3.51	--	--
Equivalent de Sable à vue	(%)	78.04	76.29	--	--
Equivalent de Sable au piston	(%)	73.68	70.97	--	--
Densité apparente	(kg/m ³)	1.46	1.49	1.57	1.51
Densité absolue	(kg/m ³)	2.50	2.56	2.63	2.66

2.4. Adjuvant

Le superplastifiant MEDAPLAST SP 40 produit par la société Granitex (Oued Smar, wilaya d'Alger) a été utilisé. C'est un haut réducteur d'eau pour le béton prêt à l'emploi conforme à la norme EN 934-2. Il se caractérise par une densité de $1,20 \pm 0,01$, un pH = 8, une teneur en ions chlore $\leq 1\text{g/l}$, un extrait sec de 40 %. La plage d'utilisation recommandée varie de 0,6 à 2,5 % du poids du liant.

3. CONFECTION, TRAITEMENT ET CONSERVATION DES MELANGES

3.1. Introduction

Cette étude, basée sur une approche multi-échelle, utilise deux types de matériaux cimentaires:

- Les bétons vibrés notés BV ;
- Les bétons autoplaçants notés BAP.

La procédure de malaxage de chaque type de béton (BV ou BAP) est décrite dans la section 3.3.1. Avant le coulage, une variété de tests a été effectuée pour déterminer les propriétés à l'état frais du BV et du BAP. Les éprouvettes ont été ensuite coulés dans des moules cubiques de 10 cm de côté avec vibration pour le BV et seulement sous l'effet du poids propre de la pâte (sans vibration) pour le BAP. Pour un même mélange, un lot d'éprouvettes a été conservé avant le démoulage dans les conditions de laboratoire pendant 24 heures.

Le reste des éprouvettes a été maintenu dans des moules pendant 3 heures, puis introduit dans une étuve de laboratoire pour un traitement thermique à une température de 60 °C.

3.2. Traitement thermique et programme des essais

L'accélération du durcissement des bétons a été effectuée à travers le processus de traitement thermique par étuvage selon le cycle adopté schématisé sur la Figure III.9. Le cycle utilisé dans ce travail est très proche des cycles théoriques utilisés dans les usines de préfabrication

et celles utilisés par les chercheurs. Le cycle adopté tient en compte les spécifications de la norme NF EN 13369 [113].

La température de traitement est de 60 °C et la durée totale est de 24 heures. Il comporte 3 heures de prétraitement (phase de préprise à 20 °C), une phase de montée en température de 16 °C/h, un palier iso-thermique à 60 °C de 16 heures de temps et enfin une phase de refroidissement ambiant pendant 2.5 heures. Le démoulage des éprouvettes se fait juste à la fin de la phase de refroidissement.

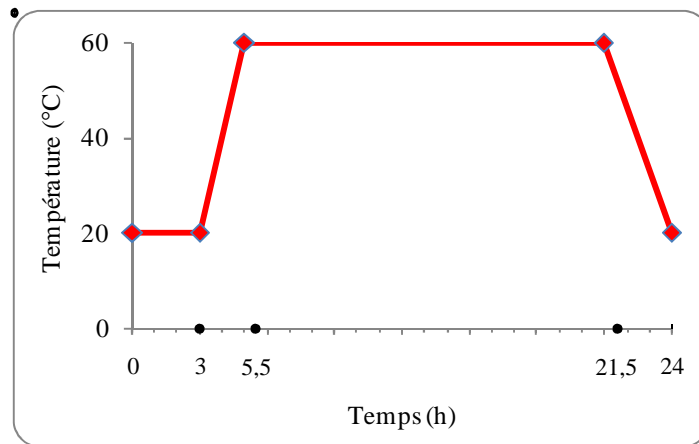


Figure III.9. Cycle de traitement thermique adopté

Après le démoulage on pèse les éprouvettes pour calculer le pourcentage d'eau évaporée (EE) sous l'effet du chauffage en utilisant la formule (III.1). Les résultats sont présentés dans le Tableau IV.1.

$$EE(\%) = \frac{V_{EE}}{V_{EG}} \times 100 = \frac{m_1 - m_2}{E \cdot (m_1 / \rho_{bf})} \times 100 \quad (III.1)$$

V_{EE} : volume d'eau échappée (litres), $V_{EE} = M_{EE} = m_1 - m_2$

m_1 : masse de l'éprouvette avant étuvage (kg)

m_2 : masse de l'éprouvette après étuvage (kg)

V_{EG} : volume d'eau de gâchage dans 1m³ du béton, $V_{EG} = E \cdot (m_1 / \rho_{bf})$

E : dosage de l'eau de gâchage dans 1m³ du béton (litres)

ρ_{bf} : masse volumique du béton frais (kg/m³)

La caractérisation des bétons à l'état durci a été effectuée sur des éprouvettes cubiques de 10 cm³ de coté à travers:

- La densité absolue du béton durci (ρ_{hd}) ;

- L'essai de la porosité accessible à l'eau (P) réalisé à l'âge de 28 j et calculée en accordance avec la norme NBN B 15-215 [194]. Les éprouvettes ont été séchées dans l'étuve (105 °C) jusqu'à stabilisation du poids pour avoir la masse sèche (m_{sec}). Ensuite, elles sont immergées totalement dans l'eau à la température ambiante jusqu'à saturation pour avoir la masse du matériau saturé (m_{sat}). Le rapport de la différence des deux masses au volume total de l'échantillon (V_T) donne la porosité.

Dans notre étude la porosité a été déterminée pour tous les bétons à 28 j par la formule (III.2).

La capacité d'absorption d'eau (CAE) à l'âge de 28 j a été déterminée suivant la même procédure que pour la porosité. Elle se calcule par la formule de l'équation (III.3).

$$P(\%) = \frac{m_{\text{sat}} - m_{\text{sec}}}{V_T} \times 100 \quad (\text{III.2})$$

$$\text{CAE}(\%) = \frac{m_{\text{sat}} - m_{\text{sec}}}{m_{\text{sec}}} \times 100 \quad (\text{III.3})$$

- L'essai de la vitesse de propagation d'ultrason (UPV) à l'âge de 28 j permet de mesurer le temps de propagation d'un train d'ondes sonores entre l'émetteur et le récepteur de l'appareil disposés sur deux points de l'éprouvette cubique du béton;
- L'essai de la résistance à la compression réalisé à travers l'écrasement des éprouvettes par la machine de compression. Un lot d'éprouvettes a été écrasé au jeune âge (R_{C1}) et le reste d'éprouvettes ont été conservées dans l'eau à la température ambiante pour les essais à long terme ; à 28 jours (R_{C28}) et à 180 jours (R_{C180}).

Les résultats obtenus à l'état frais et à l'état durci sont présentés dans les Tableaux IV.1 à IV.4 et IV.5.

3.3. Béton Vibré

3.3.1. Formulation du béton vibré

La formulation du béton vibré utilisé est celle de Dreux-Gorisse dreux et Festa [148]. Pour le béton témoin BV(R), deux rapports Eau/Liant (E/L, $L=C+A$) ont été adoptés ($E/L = E/C = 0.50$ et 0.42). Pour les bétons élaborés, E/L est maintenu constant ($E/L = 0.42$). A cet effet, 8 mélanges BV ont été préparés: BV(R)0.50, BV(R)0.42, BV20FC, BV40FC, BV20LG, BV40LG, BV 20LC et BV40LC. La formulation obtenue est présentée dans le Tableau III.6 ci-après.

Tableau III.6. *Composition des BV (kg/m³)*

	C	A	S1	S2	G1	G2	E	A/L	E/C	E/L	G/S
BV(R)0.50	430	0	226	415	137	916	215	0	0.50	0.50	1.64
BV(R)0.42	517	0	215	397	171	838	215	0	0.42	0.42	1.64
BV20FC	430	86	215	397	129	866	215	0.17	0.50	0.42	1.64
BV40FC	370	148	211	387	128	857	215	0.29	0.58	0.42	1.65
BV20LG	430	86	215	397	131	875	215	0.17	0.50	0.42	1.64
BV40LG	370	148	215	397	130	871	215	0.29	0.58	0.42	1.64
BV20LC	430	86	215	395	130	871	215	0.17	0.50	0.42	1.64
BV40LC	370	148	215	392	130	867	215	0.29	0.58	0.42	1.64

BV(R)0.50 = Béton vibré de Référence sans addition avec E/C = E/L = 0.50

BV(R)0.42 = Béton vibré de Référence sans addition avec E/C = E/L = 0.42

BV20FC = 20% de Filler Calcaire

BV40FC = 40% de Filler Calcaire

BV20LG = 20% de Laitier Granulé

BV40LG = 40% de Laitier Granulé

BV20LC = 20% de Laitier Cristallisé

BV40LC = 40% de Laitier Cristallisé

3.3.2. Confection et programme d'essais

Les composants du mélange ont été mis en lots par poids dans le malaxeur. Le ciment et l'addition minérale ont été pré-mélangés à sec avec les graviers et les sables pendant 1 min, puis la quantité d'eau de gâchage est introduite au mélange pendant 1 min. Enfin, le mélange du béton a été mixé pendant une durée de 2 min ce qui donne une durée totale de malaxage de 4 min. Avant le coulage, une variété de tests ont été effectués pour déterminer les propriétés du BV à l'état frais, il s'agit de : l'affaissement au cône d'Abrams (Aff) (Figure III.10) et la masse volumique absolue (Mv). Trente deux (32) éprouvettes ont été écrasées au jeune âge (R_{C1}) et 96 autres ont été conservées dans l'eau à la température ambiante pour les essais à long terme ; il s'agit des essais de détermination de la porosité (P_v) de la capacité d'absorption d'eau (CAE) et de la résistance à la compression à 28 jours (R_{C28}) et à 180 jours (R_{C180}).



Figure III.10. *Essai d'affaissement au cône d'Abrams*

3.4. Béton autoplaçant

3.4.1. Formulation du béton autoplaçant

Pour la formulation du béton autoplaçant, on a suivi les recommandations de l'AFGC qui permettent de garantir l'autoplaçabilité du béton. Il s'agit de choisir les proportions des constituants dans 1 m³ de béton sur la base des paramètres suivants :

- Un rapport G/S = 1,15 ;
- Un dosage en fines plutôt élevé et par suite un volume important de la pâte ($V = 395 \pm 2$ litres) ;
- Un pourcentage déterminé en addition (A) ;
- Un dosage en adjuvant (SP) voisin du dosage de saturation déterminé par l'essai d'étalement de la table à secousses effectué sur le mortier du BAP ;
- Air occlus (Ao) égal à 4%.

La formulation ainsi obtenue est présentée dans le Tableau III.7 ci-dessous.

Tableau III.7. Composition des BAP (kg/m³)

	C	A	S1	S2	G1	G2	E	SP	V(m ³)	A/L	E/C	E/L	G/S
BAP(R)0.50	430	0	380	389	352	334	215	7.96	358	0	0.50	0.50	1.15
BAP(R)0.42	531	0	360	369	332	504	216	9.82	396	0	0.42	0.42	1.15
BAP20FC	430	86	360	369	332	504	211	7.31	393	0.17	0.50	0.42	1.15
BAP40FC	362	145	360	369	332	504	207	7.24	393	0.29	0.58	0.42	1.15
BAP20LG	441	88	360	369	332	504	217	7.06	396	0.17	0.50	0.42	1.15
BAP40LG	377	151	360	369	332	504	217	6.03	396	0.29	0.58	0.42	1.15
BAP20LC	437	87	360	369	332	504	215	7.43	395	0.17	0.50	0.42	1.15
BAP40LC	369	148	360	369	332	504	215	6.27	397	0.29	0.58	0.42	1.15

BAP(R)0.50 = Béton Autoplaçant de Référence avec E/C = E/L = 0.50

BAP(R)0.42 = Béton Autoplaçant de Référence avec E/C = E/L = 0.42

BAP20FC = 20% de Filler Calcaire

BAP40FC = 40% de Filler Calcaire

BAP20LG = 20% de Laitier Granulé

BAP40LG = 40% de Laitier Granulé

BAP20LC = 20% de Laitier Cristallisé

BAP40LC = 40% de Laitier Cristallisé

3.4.2. Confection et programme d'essais

Les composants du mélange BAP ont été mis en lots par poids dans le malaxeur. Le ciment et l'addition minérale ont été pré-mélangés avec les graviers et les sables pendant 1 min, puis la quantité de 60% d'eau de gâchage est ajoutée et mélangée pendant 1 min, puis la quantité restante de l'eau de gâchage (40%) avec le superplastifiant dissous a été ajouté pendant 0.5

min. Enfin, le mélange du BAP a été mixé pendant 1.5 min supplémentaires, résultant en une durée totale de malaxage de 4 min.

Avant le coulage, une variété de tests ont été effectués pour déterminer les propriétés du BAP à l'état frais, il s'agit de : diamètre d'étalement, V-Funnel, boîte en L, stabilité au tamis, air occlus et densité absolue.

Huit (8) mélanges différents ont été préparés: BAP(R)0.50, BAP(R)0.42, BAP20FC, BAP40FC, BAP20LG, BAP 40LG, BAP 20LC and BAP40LC.

Cent soixante huit (128) éprouvettes ont été confectionnées. Quarante deux (32) éprouvettes ont été écrasées au jeune âge (R_{C1}) et 96 autres ont été conservées dans l'eau à la température ambiante pour les essais à long terme ; il s'agit des essais de détermination de la porosité (P), de la capacité d'absorption d'eau (CAE) et de la résistance à la compression à 28 jours (R_{C28}) et à 180 jours (R_{C180}).

La caractérisation des BAP à l'état frais a été effectuée par des essais recommandés par l'AFGC:

- Essai d'étalement au cône d'Abrams (Figure III.11), qui permet de caractériser la fluidité et la mobilité du béton en milieu non confiné. Il consiste à mesurer le diamètre d'une galette de béton après soulèvement du cône et le temps T_{500} que met la galette pour atteindre un diamètre de 500 mm ;
- Essai de l'entonnoir V-funnel (Figure III.12), qui a pour objectif d'évaluer la fluidité et la stabilité du BAP. Le temps $T_{V-Funnel}$ est la durée d'écoulement en secondes entre l'ouverture de la sortie de fond et le moment où la lumière est visible à partir du fond, lorsqu'il est observé d'en haut. Pour un BAP il est admissible d'avoir des temps entre 6 s et 12 s [6] ;
- Essai de la boîte en L (Figure III.13), qui permet d'évaluer le risque de blocage et la capacité de remplissage du béton en milieu confiné. On mesure le taux de remplissage qui est défini comme étant le rapport des hauteurs H_2/H_1 qui doit être supérieur à 0.8 ;
- Essai de stabilité au tamis (Figure III.14), qui sert à qualifier les bétons autoplaçants vis-à-vis du risque de la ségrégation, Il complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité.

D'autres essais ont été effectués sur les différents mélanges frais, il s'agit de l'essai de l'air occlus (A_o) et la mesure de la masse volumique absolue (ρ_{Bf})

Un calcul de la viscosité plastique a été entrepris. Ce paramètre constitue avec le T_{500} une corrélation dite rhéologie – ouvrabilité qui peut être souligné par la formule (III.4) selon Sedran [195].

$$\mu = \frac{\rho}{1000} (0,026.D - 2,39) T_{500} \quad (III.4)$$

μ : viscosité plastique du matériau en (Pa.s),

ρ : masse volumique du béton (Kg/m^3),

D: étalement en (mm),

T_{500} : temps que met la galette pour atteindre un diamètre de 500 mm (s).

D'après cette équation, pour un étalement de 650 mm et une masse volumique de $2300 kg/m^3$, l'obtention d'une valeur T_{500} inférieure à 6s permet de garantir une viscosité inférieure à 200 Pa.s ce qui est favorable au pompage du béton.



Figure III.11. Essai d'étalement



Figure III.12. Entonnoir V-funnel



Figure III.13. Boite en L utilisé



Figure III.14. Essai de stabilité au tamis

4. CONCLUSION

Ce chapitre a été consacré à la présentation des différents matériaux utilisés pour la formulation des BAPs et des BVs, leurs propriétés physico-chimiques ainsi que les procédures expérimentales suivies pour atteindre cet objectif. Cette caractérisation est nécessaire pour mettre en évidence les effets physico-chimiques et mécaniques des matières premières, notamment les additions minérales, sur les propriétés des BAPs et des BVs élaborés.

Les méthodes de formulations des bétons utilisés prennent en compte les caractéristiques des matières premières utilisées. Le BV a été formulé selon la méthode de Dreux Gorisse alors que le BAP a été formulé en respectant les recommandations de l'AFGC. Les mélanges ont été préparés en utilisant trois additions minérales de deux natures différentes (FC, LG et LC) et avec des teneurs de 20 et 40 %. La confection des mélanges a été effectuée selon les normes en vigueur.

Après caractérisation des BVs et des BAPs, le chapitre suivant discutera les résultats obtenus.

Chapitre IV

RESULTATS DES ESSAIS ET DISCUSSIONS

Chapitre IV

RESULTATS DES ESSAIS ET DISCUSSIONS

INTRODUCTION

L'accélération de durcissement des bétons est le processus le plus utilisé dans le domaine de la préfabrication du béton. Bien que les résistances finales des bétons préfabriqués traités thermiquement sont inférieures à celles des bétons traditionnels qui ont durci dans des conditions normales. Le but de ce travail est une contribution de l'amélioration du comportement mécanique de ce genre de bétons préfabriqués.

Cette partie est consacrée à l'analyse et à la discussion des résultats obtenus sur les bétons étudiés afin d'évaluer l'effet de l'incorporation des additions minérales sur le comportement au jeune âge (1 jour) et à long terme (28 et 180 jours) des bétons traités par deux modes différents : traitement standard et traitement thermique par étuvage. Deux types de bétons ont été étudiés. Il s'agit du béton vibré (BV) et du béton autoplaçant (BAP). Les caractéristiques des bétons à l'état frais et à l'état durci ont été aussi étudiées.

Le cycle de traitement thermique adopté se caractérise par une température maximale de 60 °C et une durée totale de 24 heures.

L'effet de la composition du béton est ainsi étudié afin d'apprécier son influence en parallèle avec l'effet du processus d'accélération de durcissement par traitement thermique. Pour cela, trois additions de deux natures différentes avec des teneurs de 20 et 40 % ont été utilisées : Fillers calcaires (FC), Laitier granulé (LG) et laitier cristallisé (LC).

L'analyse et la discussion se déroulera en trois phases : la première concerne le BV, la deuxième concerne le BAP et la troisième partie concerne de la différence entre ces deux types de bétons (BV et BAP).

1. BETON VIBRE

Les résultats des essais effectués sont regroupés dans le Tableau IV.1 et sont illustrés par les Figures IV.1 à IV.16 ci-dessous.

Pour une meilleure interprétation des résultats obtenus, on calcule, par rapport aux résultats du béton de référence BV(R)0.50, les rapports de résistances avec prise en compte du mode de traitement et l'âge de l'éprouvette. Les rapports obtenus sont résumés dans le Tableau IV.2.

Pour faciliter la comparaison entre les différents bétons tout en prenant en compte la teneur et la nature de l'addition, on a calculé les rapports des porosités et des résistances. Les rapports obtenus sont résumés dans le Tableau IV.3.

Tableau IV.1. Résultats des essais réalisés sur BVs

	Mv (kg/m ³)	Aff (cm)	Mode de cure	P (%)	CAE (%)	EE (%)	UPV (m/s)	R_{C1} (MPa)	R_{C28} (MPa)	R_{C180} (MPa)
BV(R)0.50	2315	7.5	NT	11.00	4.47	3.08	--	8.67	39.03	57.96
			T	8.00	3.23	8.15	--	16.53	37.49	53.28
BV(R)0.42	2329	5.0	NT	9.34	3.95	3.63	4296	8.87	42.32	54.43
			T	9.62	4.32	7.20	4287	21.78	40.56	55.54
BV20FC	2295	11.5	NT	9.41	4.17	4.66	4148	6.59	30.59	44.51
			T	9.15	4.10	6.83	4047	16.87	31.96	45.59
BV40FC	2274	7.0	NT	9.07	4.05	2.94	4157	5.22	24.78	29.39
			T	9.84	4.43	8.23	3985	11.84	26.41	33.14
BV20LG	2313	6.0	NT	5.28	2.36	4.84	4267	9.55	41.00	56.47
			T	8.30	3.90	8.87	4293	23.08	44.57	54.92
BV40LG	2302	7.0	NT	9.62	4.45	4.53	4183	7.60	33.27	48.17
			T	8.87	3.90	8.57	4229	20.06	31.08	47.46
BV20LC	2335	6.0	NT	5.47	2.35	8.49	4161	8.89	39.29	52.48
			T	11.70	5.43	12.33	4184	18.35	34.36	56.29
BV40LC	2313	8.0	NT	4.72	2.15	6.71	4110	7.41	30.99	42.88
			T	11.89	5.30	17.23	4104	15.83	30.48	34.11

T : Traité Thermiquement
NT : Non Traité (Traitement Normal)

Tableau IV.2. Rapports des résistances des BVs avec prise en compte du mode de traitement

Rapport (%)	BV(R)0.50	BV(R)0.42	BV20FC	BV40FC	BV20LG	BV40LG	BV20LC	BV40LC
$\frac{R_{C1}(T) - R_{C1}(NT)}{R_{C1}(NT)}$	91	146	156	127	142	164	106	114
$\frac{R_{C1}(T) - R_{C28}(NT)}{R_{C28}(NT)}$	42	51	55	48	56	60	47	51
$\frac{R_{C28}(T) - R_{C28}(NT)}{R_{C28}(NT)}$	- 4	- 4	+4	+7	+9	- 7	- 13	- 2
$\frac{R_{C28}(T) - R_{C28}(R)}{R_{C28}(R)}$	- 4	+4	- 18	- 32	+14	- 20	- 12	- 22
$\frac{R_{C180}(T) - R_{C180}(NT)}{R_{C180}(NT)}$	-8	+2	+2	+13	-3	-1	+7	- 20
$\frac{R_{C180}(T) - R_{C180}(R)}{R_{C180}(R)}$	- 8	- 4	- 21	- 43	- 5	- 18	- 3	- 41

R_{cj}(T): résistance à la compression à l'âge (j) jour du béton traité thermiquement.

R_{cj}(NT): résistance à la compression à l'âge (j) jour du béton non traité.

R_{cj}(R): résistance à la compression à l'âge (j) jour du béton vibré témoin non traité [BV(R)0.50(NT)].

Tableau IV.3. Rapports des porosités et des résistances des BVs avec prise en compte de la nature et la teneur de l'addition.

	BV(R)042		BV20FC		BV40FC		BV20LG		BV40LG		BV20LC		BV40LC	
	NT	T	NT	T	NT	T	NT	T	NT	T	NT	T	NT	T
$\frac{P(BV_i) - P(R)}{P(R)}$	-15	-20	-14	+14	-18	23	-52	+4	-13	+11	-50	+46	-57	+49
$\frac{P(BV 40) - P(BV 20)}{P(BV 20)}$	/	/	/	/	-4	+8	/	/	+82	+7	/	/	-14	+2
$r_1 = \frac{R_{C1}(BV_i) - R_{C1}(R)}{R_{C1}(R)}$	+2	+32	-24	+2	-40	-28	+10	+40	-12	+21	+3	+11	-15	-4
$r_{28} = \frac{R_{C28}(BV_i) - R_{C28}(R)}{R_{C28}(R)}$	+8	+8	-22	-15	-37	-30	+5	+19	-15	-17	+1	-8	-21	-19
$r_{180} = \frac{R_{C180}(BV_i) - R_{C180}(R)}{R_{C180}(R)}$	-6	+4	-23	-14	-49	-38	-3	+3	-17	-11	-9	+6	-26	-36
Moy[$r_j(BV_iNT) + r_j(BV_iT)$]	+8		-16		-37		+12		-8		0		-20	
Moy[$r_j(BV_i)A_k$]	+8		-26				+2				-10			

BV_i: Béton vibré n° i, i = 1 à 7 bétons, i = 1 = BV(R)0.42, i = 2 = BV20FC, etc...

P(BV_i): Porosité du béton vibré n° i.

P(R): Porosité du béton vibré de référence [BV(R)0.50]

P(BV20) et P(BV40): Porosité du béton vibré avec 20 et 40 % d'addition respectivement.

r_j: rapport de résistances à l'âge j.

r_j(BV_i)A_k: rapport des résistances des BV_i pour une meme addition A_k, k = FC, LG ou LC.

1.1. Etat frais

D'après les valeurs d'affaissements obtenues et présentées sur la Figure IV.1 on peut dire que le rapport E/C a une influence directe sur le comportement du béton frais. Le B(R)0.50 présente une fluidité supérieure à celle du BV(R)0.42 et par conséquent l'affaissement de ce dernier est 33 % moins que l'affaissement du B(R)0.50.

Avec un même rapport E/L = 0.42, le BV(R)0.42 présente un affaissement inférieur à ceux des bétons élaborés, et l'augmentation du dosage en addition de 20 à 40 % associée à l'augmentation du rapport E/C (de 0.50 à 0.58) entraînent une diminution de l'affaissement de l'ordre de 39 % pour BV(FC) et une augmentation de l'affaissement de l'ordre de 17 % et de 33 % pour BV(LG) et BV(LC) respectivement.

1.2. Etat durci

1.2.1. Porosité et capacité d'absorption d'eau

D'après les résultats des essais de P et de CAE présentés dans la Figure IV.2 et IV.3, on peut constater que :

Les valeurs de P sont absolument supérieures à celles de CAE. Ces résultats semblent logiques dans la mesure où P comprend les volumes totaux de pores qui existent dans le béton, tandis que CAE est liée aux pores interconnectées. Ce phénomène est compréhensible

puisque le processus d'hydratation continue à se produire dans le béton avec une porosité plus faible. Comme les produits d'hydratation vont remplir les vides existant entre les particules de ciment et les granulats alors le diamètre moyen des pores réduit et la capacité du béton à absorber l'eau réduit aussi [196]. De ce fait, il existe une quasi-proportionnalité entre P et CAE, une porosité élevée correspond à une CAE élevée et vice versa.

Comme dans l'état frais, le rapport E/C a aussi une influence directe sur les caractéristiques physiques du béton durci. Le BV(R)0.50 non traité est 15 % plus poreux que BV(R)0.42 non traité. Mais dans le cas du traitement thermique, BV(R)0.50 est 20 % moins poreux que BV(R)0.42.

Dans le cas de cure normal, E/C a une grande influence sur la porosité de la pâte de ciment hydraté car il gouverne directement l'espacement initial entre les grains de ciment en suspension dans l'eau de gâchage. Plus E/C est faible, plus, initialement, les grains de ciment sont rapprochés les uns des autres. Les espaces à combler entre les grains de ciment sont moins grands et il y a moins de chance d'avoir un grand vide ne pouvant pas être complètement rempli par les hydrates [197].

L'augmentation de la température engendre une augmentation du volume poreux total ainsi que de la dimension des pores [198]. Plus il ya de l'eau libre plus il se produit une évaporation à partir de laquelle se développent les pores [199].

L'incorporation des additions minérales entraîne une diminution de la porosité de la matrice cimentaire et améliore les résistances mécaniques des bétons au jeune âge par effet physique principalement et par effet pouzzolanique lorsqu'elles sont chimiquement actives, à plus longues échéances (≥ 28 j). Cette amélioration des résistances dépend de la nature, de la finesse et du dosage de l'addition. Dans notre cas, l'incorporation d'addition minérale dans le béton n'a permis de diminuer sa porosité, et par conséquent d'améliorer sa compacité, que dans le cas de durcissement normal. Ces diminutions de P sont de l'ordre de 13 à 57 %. Dans le cas d'accélération de durcissement par étuvage, des augmentations de P de l'ordre de 4 à 49 % ont été observées. Ces résultats de P nous permettent de dire que l'incorporation de ces additions est avantageuse dans les conditions de durcissement standards mais elle est néfaste pour les bétons à durcissement accéléré par étuvage.

Du point de vue de l'effet de la teneur de l'addition, dans le cas des bétons (NT), l'accroissement de la teneur mis en place de 20 à 40 % a permis d'avoir une diminution de P de 4 et 14 % avec du FC et du LC respectivement et une augmentation de 82 % avec du LG. Dans le cas des bétons (T), l'accroissement de la teneur mis en place a entraîné une

augmentation de P de l'ordre de 8, 7 et 2 % avec du FC, du LG et du LC respectivement. Ces résultats peuvent être expliqués par le fait que le FC ait un caractère non réactif (addition inerte) alors que LG et LC présentent généralement une réactivité acceptable par rapport au ciment et si ces produit sont finement broyés leur réactivité peuvent augmenter considérablement [39]. Dans le cas de durcissement dans des conditions normales, P a augmenté considérablement (82 %) avec l'accroissement de LG car une quantité d'eau encore plus importante est absorbée par LG ce qui provoque un mauvais déroulement de la réaction d'hydratation du ciment.

Avec le traitement thermique, les BV(LC) ont les plus grandes porosités. Ceci est dû essentiellement à la perte d'une grande quantité d'humidité par évaporation d'eau ($EE > 12\%$). L'EE du reste des bétons est limitée ($EE < 8.3\%$). Globalement, une augmentation de la quantité d'EE entraîne systématiquement un accroissement de P et de CAE et vice versa (Figure IV.4).

En comparant tous les résultats de P des bétons additionnés, BV20LG est le moins poreux alors que BV40LC est le plus poreux. Cette constatation nous a permis de conclure que 20 % de LG est très bénéfique pour avoir un béton de structure dense et compacte et par suite plus résistant et plus durable.

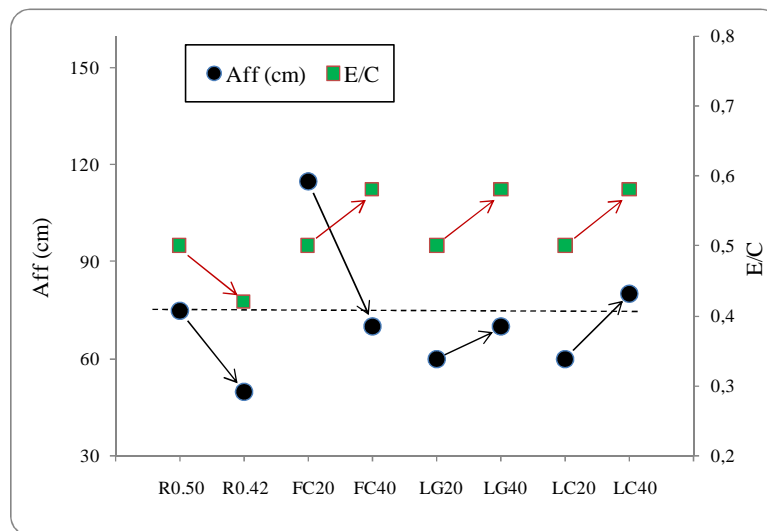


Figure IV.1. Affaissement des différents bétons en fonction du rapport E/C.

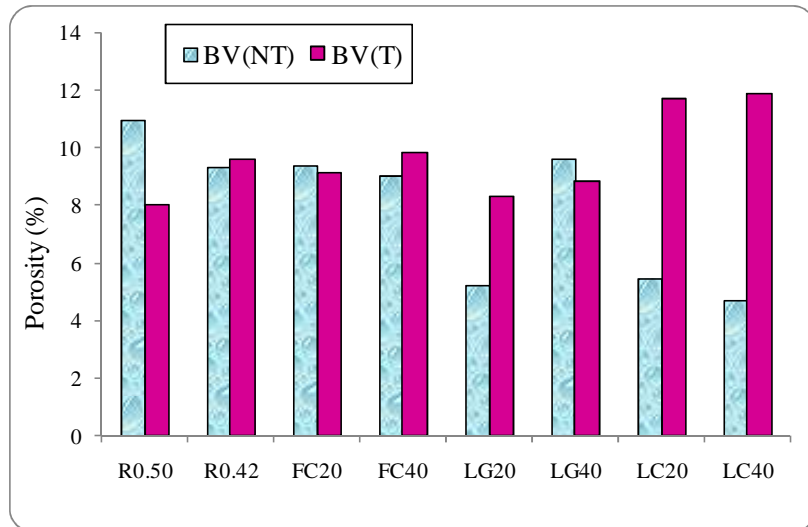


Figure IV.2. *La porosité des bétons vibrés.*

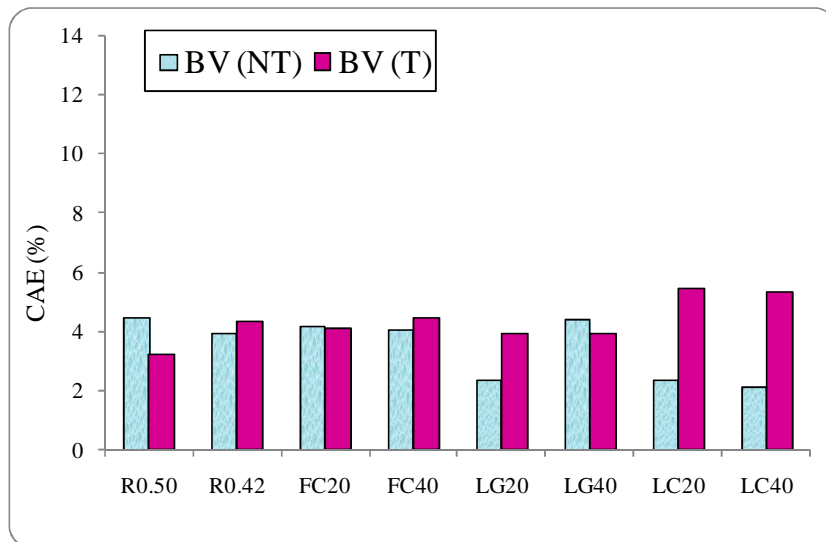


Figure IV.3. *La capacité d'absorption d'eau des bétons vibrés.*

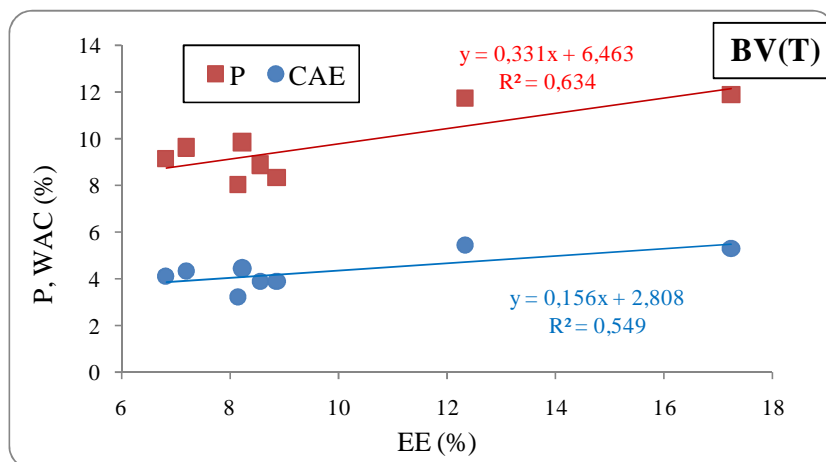


Figure IV.4. *P et CAE des bétons vibrés traité thermiquement en fonction d'EE.*

1.2.2. Résistance à la compression

Les essais de compression ont été effectués sur des éprouvettes cubiques de 10 cm d'arrête. Ils ont été effectués sur les différents bétons aux âges de 1, 28 et 180 j et ont fourni les résultats présentés sur les Figures IV.5 à IV.13.

Au jeune âge (1j) et pour les deux modes de traitement, la plus faible résistance est revenue au BV40FC (Figure IV.5). Le BV20LG présente les meilleures résistances mais légèrement supérieures à celles du BV(R)0.42.

A long terme (28 j), toujours BV20LG est le plus résistant et BV40FC est le moins résistant (Figure IV.6). A ce stade, seuls les bétons BV20FC, BV40FC et BV20LG demeurent résistants dans le cas du traitement thermique qu'avec la cure dans les conditions normales.

A l'échéance plus longue de 180 j (Figure IV.7), les bétons plus résistants sont BV(R)0.50 dans le cas de cure normale et BV(R)0.42 pour les cas d'accélération de durcissement par étuvage. Le BV40FC demeure toujours le mauvais béton. Les bétons élaborés BV20FC, BV40FC et BV20LC sont plus résistants avec du traitement thermique qu'avec du traitement standard. Au contraire, BV20LG, BV40LG et BV40LC sont plus résistants avec le traitement standard qu'avec le traitement thermique.

1.2.2.1. Effet du rapport E/C

Dans les conditions de traitement standard, BV(R)0.42 est de 2 et 8 % plus résistant que BV(R)0.50 à l'âge de 1 et 28 jours respectivement, alors qu'à l'âge de 180 jours BV(R)0.50 est 6 % plus résistant que BV(R)0.42 (Figure IV.8).

Dans le cas de traitement thermique, les résistances à la compression du béton de consistance ferme ($E/C=0.42$) sont nettement supérieures (de l'ordre de 32 %) à celles obtenues pour le béton de consistance plastique ($E/C=0.50$) notamment au jeune âge.

Ce résultat prouve que dans le cas où le béton subira un traitement thermique dans le but d'accélérer les cadences de l'acquisition de résistances mécaniques, plus l'eau de gâchage et l'air dans ce béton est important plus la résistance est néfaste. Cela s'explique par le fait que la partie gazeuse et liquide dans un béton, sous l'influence de températures élevées, se dilate de dizaines de fois plus que la partie majoritaire qui est solide. Dans le temps où la partie solide n'a pas acquis des résistances mécaniques capables de faire face à ces contraintes internes de dilatation, le béton se fissure et diminue ainsi de ses résistances mécaniques.

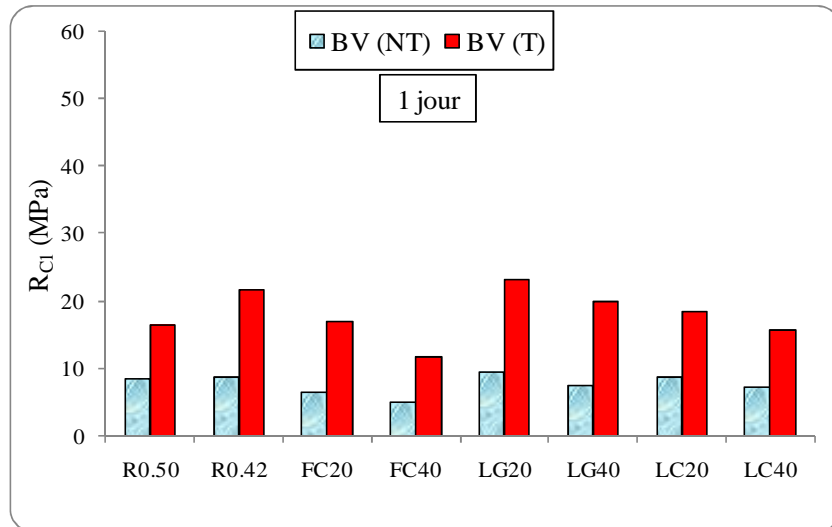


Figure IV.5. Résistances à la compression à l'âge de 1 jour des différents bétons vibrés

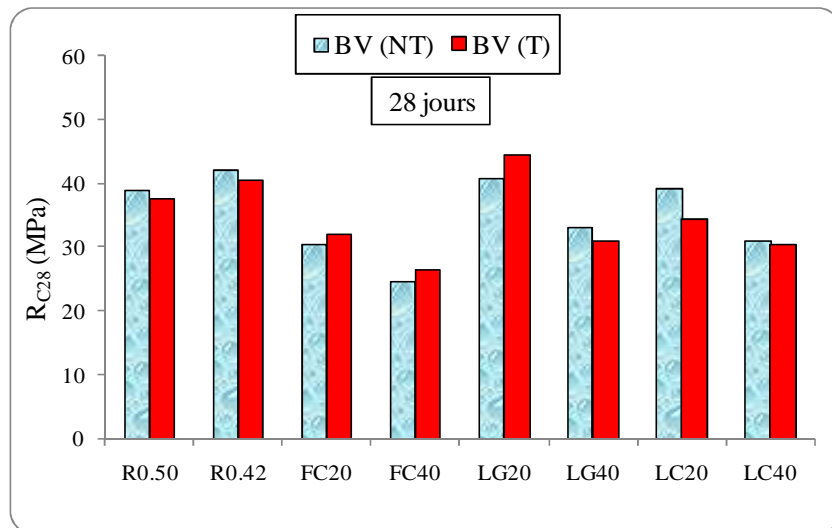


Figure IV.6. Résistances à la compression à l'âge de 28 j des différents bétons vibrés

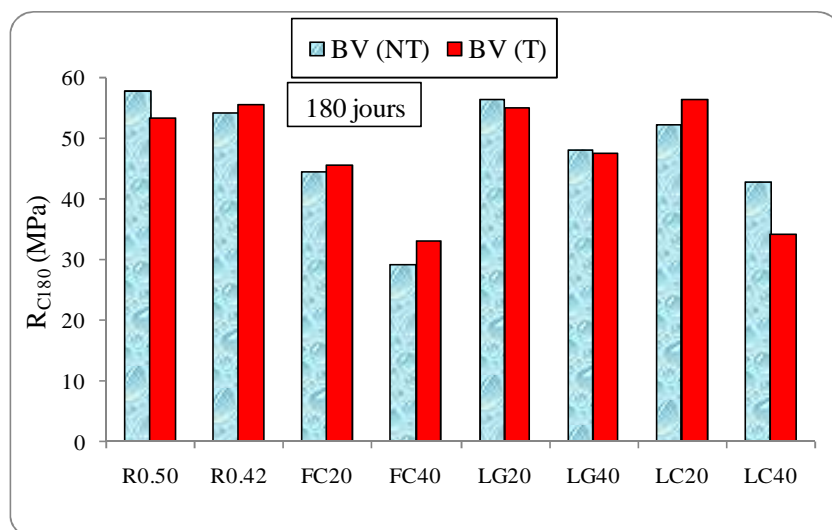


Figure IV.7. Résistances à la compression à l'âge de 180 j des différents bétons vibrés

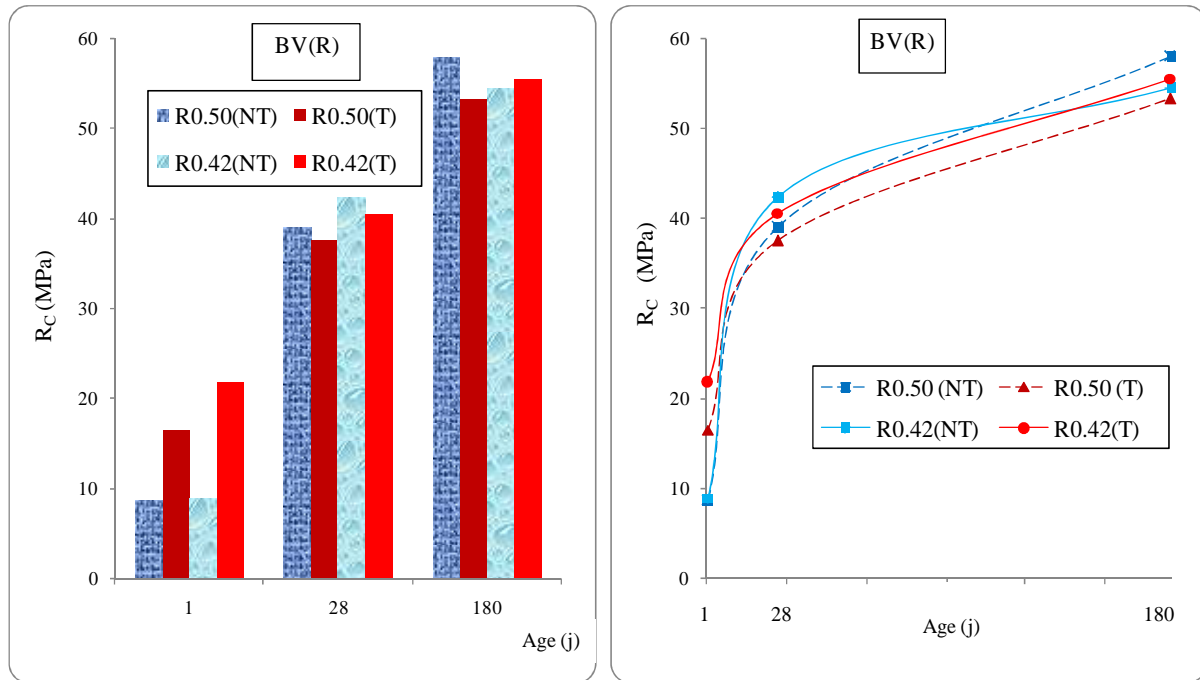


Figure IV.8. Résistances à la compression des BVs de références (effet du rapport E/C)

1.2.2.2. Effet du traitement thermique

Si on veut clarifier l'effet du traitement thermique aux différents stades, on peut facilement apprécier l'avantage de ce procédé d'accélération de durcissement par étuvage surtout au jeune âge. Tous les bétons qui ont subi ce type de traitement ont pu développer des résistances supérieures à celles des bétons de mûrissement standard à l'âge précoce de 1 j.

Si on fait une lecture des rapports de résistances calculées dans le Tableau IV.2, on peut exprimer ce qui suit. Avec du FC et du LC, le processus thermique a permis d'acquérir à l'âge de 1 j respectivement un gain de résistance de l'ordre de 156 et 127 % pour BV20FC et BV40FC et de 106 et 114 % pour BV20LC et BV40LC.

Et par rapport aux résistances caractéristiques à l'âge de 28 jours de ces bétons non traités, les résistances du BV20FC et BV40FC ont pu atteindre les 55 et 48 % et celles du BV20LC et BV40LC 47 et 51 %.

En utilisant du LG, les avantages sont encore plus importants vu la bonne réactivité de ce déchet sidérurgique sous l'effet du chauffage par étuvage. Les gains de résistances à l'âge de 1 j sont respectivement de l'ordre de 56 et 60 % pour BV20LG et BV40LG.

Donc presque la moitié (50%) de la résistance à 28 j a été obtenue uniquement après quelques heures de traitement, ce qui correspond à un avantage parfait. Cet avantage est notamment le grand but de ce procédé qui est largement utilisé dans les usines de préfabrication en vue

d'accélérer les cadences de la production en biais du décoffrage rapide des éléments préfabriqués. Au-delà de l'âge jeune, l'effet est plus ou moins avantageux et même néfaste en fonction de la mise en place de l'addition, de sa nature et de sa teneur par rapport au ciment.

A long terme (28 j), seuls les bétons BV20FC, BV40FC et BV20LG sont plus résistants dans le cas du traitement thermique qu'avec la cure dans les conditions normales. Ces bétons ont eu par traitement thermique des gains de résistances de l'ordre de 4%, 7% et 9 % par rapports aux mêmes bétons non traités.

Dans le même contexte, BV20LC a eu une perte de 13 % de sa résistance et le reste des bétons ont eu des pertes inférieures à 7%. Et par rapport à la résistance caractéristique à l'âge de 28 jours du béton témoin BV(R)0.50(NT), seuls BV(R)0.42(T) et BV20LG(T) ont eu des résistances qui dépassent celle du béton témoin avec un rapport de 4 et 14 % respectivement. Le reste des bétons traités présentent des valeurs de résistances inférieures (de 12 à 32 %).

A l'échéance plus longue de 180 j (Figure IV.7), tous les bétons traités sont moins résistants que BV(R)0.50(NT). Les bétons les plus proches sont BV(R)0.42(T), BV20LG(T) et BV20LC(T) avec une différence minimale $< -5\%$. Le reste des bétons traités sont beaucoup moins résistants ($-20\% < \text{rapport} < -43\%$).

1.2.2.3. Effet de la teneur et de la nature l'addition

Les résistances obtenues avec la teneur de 20 % sont meilleures que celles obtenues avec la teneur de 40 % aussi bien pour les trois additions que pour les deux modes de traitements.

L'utilisation du FC dans les bétons est beaucoup plus bénéfique avec 20 % qu'avec 40 % (Figure IV.9). Il est recommandé de limiter l'incorporation de cette addition dans le béton à des teneurs inférieures à 20 %.

Le niveau des résistances développées par les bétons élaborés à base de LG et de LC est très intéressant notamment pour BV20LG et BV20LC qui sont concurrents aux bétons de référence (Figure IV.10 et IV.11).

Si on fait une lecture des rapports des résistances calculés et données au Tableau IV.3, les constatations ci-après peuvent être tenues.

En faisant une comparaison entre les trois additions, on peut constater que le niveau des résistances développées par BV(FC) est faible (score moyen -26%) par rapport aux bétons témoins BV(R) ainsi que par rapport aux bétons confectionnés à base de LG (score moyen $+2$

%) et de LC (score moyen -10 %). Cette remarque reste valide que ce soit pour le cas du traitement standard (Figure IV.12) ou pour celui du traitement thermique (Figure IV.13).

Enfin, il faut signaler que le rendement de l'emploi des laitiers granulés dans les bétons, dans le cas où des performances importantes sont recherchées à des âges précoces, peut être amélioré si les LG sont micronisés pour aboutir à des finesses supérieures ou égales à celle du ciment. LG qui est très rentable notamment avec 20 % (score moyen +12 %). Cela revient principalement au caractère réactif des laitiers contrairement aux fillers calcaires qui sont généralement des produits inertes.

L'importance de la finesse de ces additions est prouvée par la valeur de la résistance du BV20LC(T) qui a pu dépasser toutes les autres résistances vu que le LC (SSB = 4850 cm²/g) qui est relativement réactif mais plus fine que LG (SSB = 2280 cm²/g).

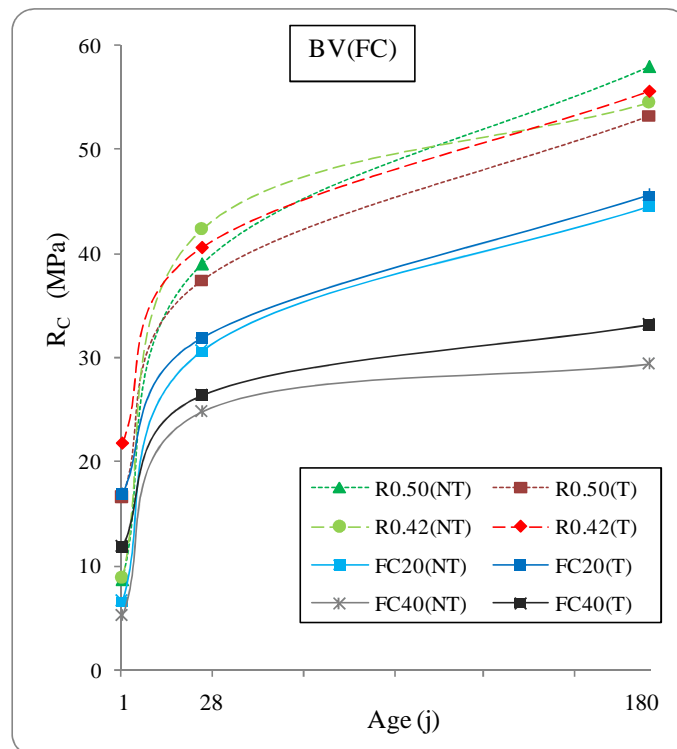


Figure IV.9. Influence du traitement thermique sur la résistance des BV(FC)

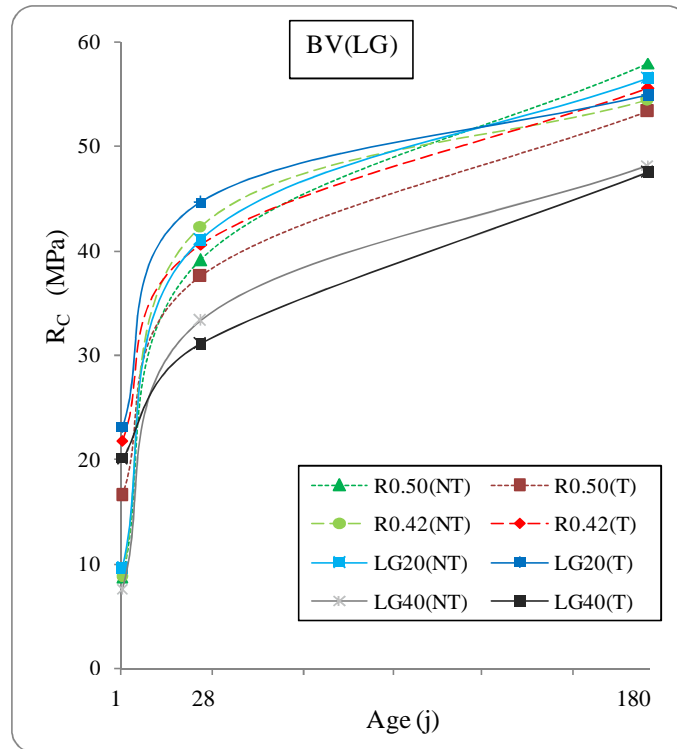


Figure IV.10. *Influence du traitement thermique sur la résistance des BV(LG)*

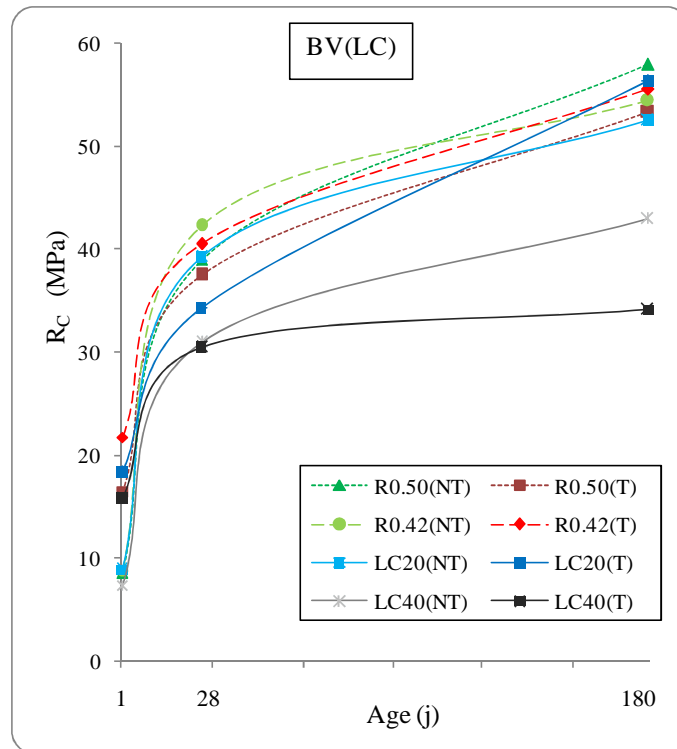


Figure IV.11. *Influence du traitement thermique sur la résistance des BV(LC)*

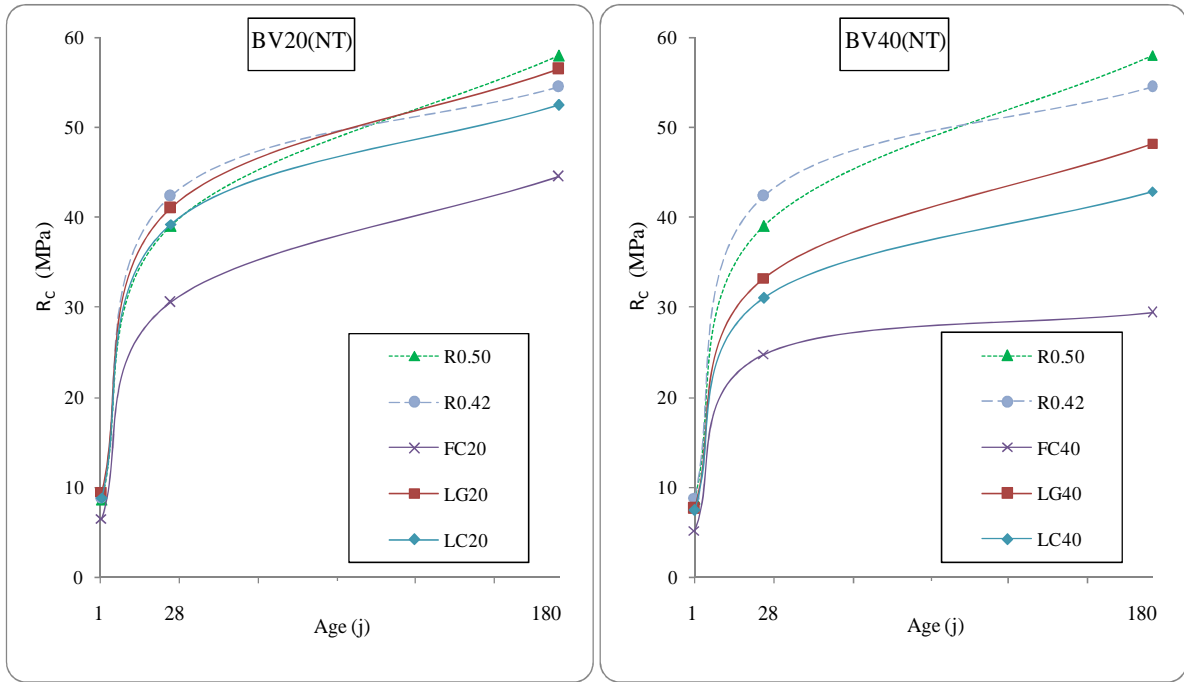


Figure IV.12. *Influence de la nature de l'addition sur la résistance des BV(NT)*

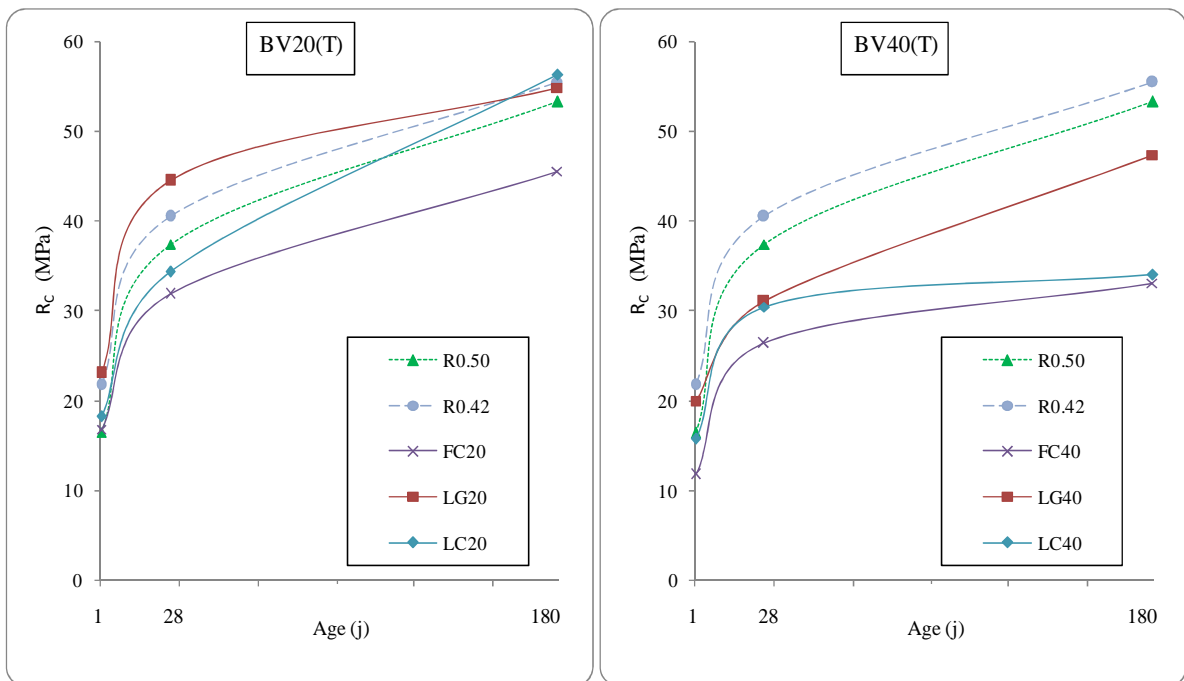


Figure IV.13. *Influence de la nature de l'addition sur la résistance des BV(T)*

1.2.3. Corrélation P - R_{C28}

La résistance dépend d'un certain nombre de paramètres, en particulier le type et le dosage du ciment, la porosité du béton et le facteur E/C. Pour cela, on a rassemblé les résultats des essais réalisés pour les deux caractéristiques P et R_{C28} sur une même présentation (Figure IV.14). Il s'agit d'une tentative pour voir si les deux paramètres R_{C28} et P se corrélaient dans notre cas de traitement thermique des bétons confectionnés à partir de différentes additions et différentes teneurs.

D'après Robler et Odler [200], la porosité semble être le principal facteur qui détermine les propriétés de résistance des pâtes de ciment indépendamment du rapport eau-ciment et/ou du degré d'hydratation. Ainsi, la relation existante résistance-porosité peut être exprimée plus précisément par un tracé linéaire [200].

Pour mettre en évidence les effets du rapport E/C et de la cure humide sur la porosité ouverte, les résultats obtenus par Rabehi et al [201] ont permis de souligner que P croît en fonction du rapport E/C et le taux de croissance diminue en fonction de la durée de cure humide. L'effet bénéfique de la cure, la prolongation de celle-ci favorise l'hydratation qui a pour effet de colmater les pores capillaires existants et renforcer les liaisons inter-granulaires et ceci augmente la résistance à la compression à 28 jours des bétons. Lian et al [202] et Rabehi et al ont pu déduire que la résistance à la compression à 28 jours est une fonction décroissante de la porosité ouverte. En conséquence, la résistance est aussi fonction décroissante de l'absorption capillaire qui est fortement liée à la porosité ouverte.

Compte tenu de ces constats sur la relation porosité-résistance en compression, nous avons voulu confronter nos résultats expérimentaux afin de déterminer si la présence des additions tendait à éloigner ou à rapprocher le comportement des bétons d'une approche phénoménologique simple.

Nous constatons globalement que la résistance en compression des bétons diminue avec l'augmentation de la porosité. Cependant, il n'y a pas de relation univoque entre P et R_{C28} ni en comparant les différents bétons vu le mode de traitement ni au sein d'un même mode de traitement (le coefficient de corrélation R^2 est très faible, proche de zéro), bien que des similitudes de comportement entre additions existent. La relation P- R_{C28} est plus vraisemblable dans les BV(T) que dans les BV(NT). Il en résulte que la présence des additions de différentes natures et leurs incorporations avec différentes teneurs qui est la cause.

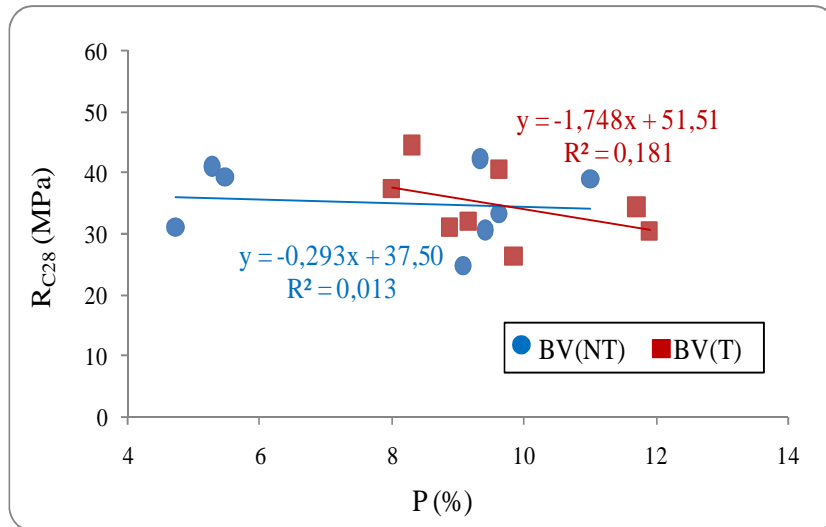


Figure IV.14. *Corrélation entre P - Rc28 des bétons vibrés*

1.2.4. Essai d'auscultation sonore

Selon les valeurs obtenues de UPV présentées dans l'histogramme de la Figure IV.15, il est clair que les bétons préparés avec du LG présentent des UPVs qui s'approchent de celles des BV(R) et sont supérieures à celles obtenues avec du FC et du LC pour les deux teneurs et pour les deux modes de traitement. Les bétons traités thermiquement BV(LG) et BV(LC) ont présenté des UPVs supérieures que celles de ces mêmes bétons non traités. Mais pour les BV(FC) le résultat est contraire, les UPVs des bétons non traités sont supérieures à celles des bétons soumis au traitement thermique. L'augmentation de la teneur de l'addition est associée à une augmentation de l'UPV des BVs. Le BV20LG se caractérise par une grande vitesse d'ultrasons en mode (T) et en mode (NT) (4293 m/s et 4267 m/s respectivement) et il très proche du béton témoin (4295 m/s et 4287 m/s).

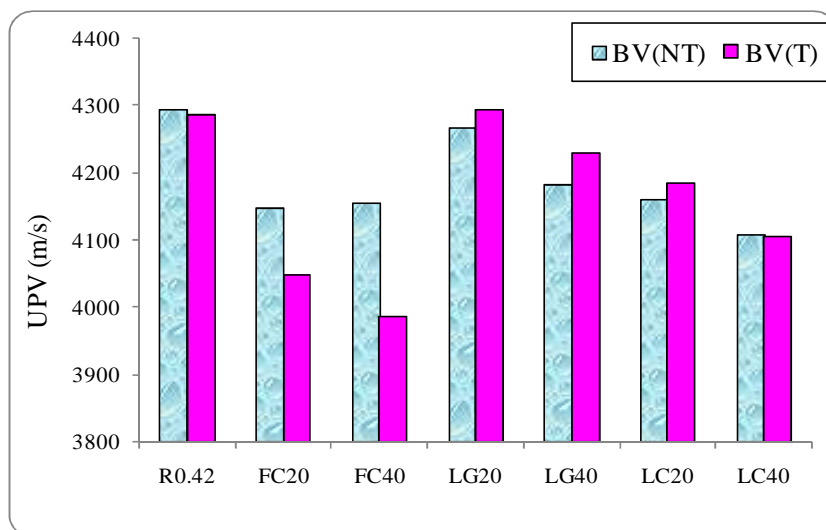


Figure IV.15. *UPV des bétons vibrés*

1.2.5. Corrélation R_C –UPV

Afin d'étudier la relation R_C –UPV, nous avons tracé sur la Figure IV.16 la variation de R_{C28} en fonction de l'UPV à 28 jours.

Une corrélation entre la résistance à la compression (R_C) des BVs et la vitesse de propagation d'ultrason (UPV) peut être remarquée mais elle est faible. Néanmoins, cette corrélation est plus remarquable dans le cas du traitement thermique ($R^2 = 0.710$) que dans le cas de traitement normal ($R^2 = 0.566$).

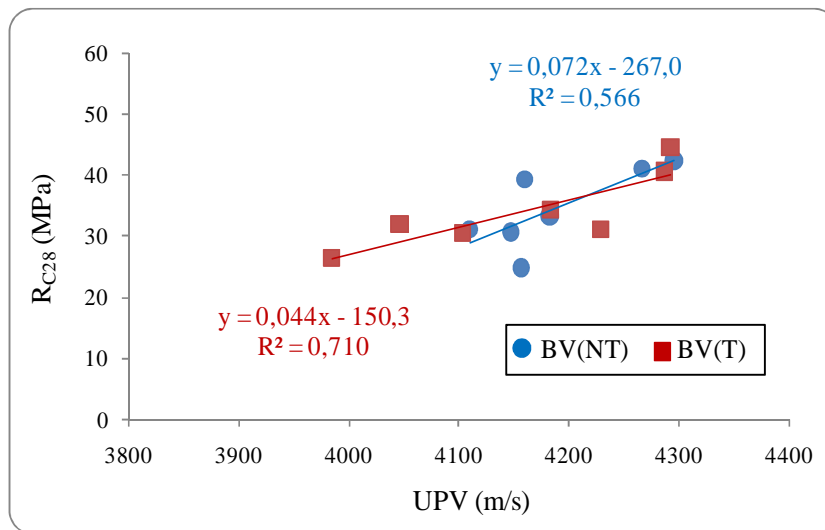


Figure IV.16. Corrélation entre R_{C28} - UPV des bétons vibrés.

1.3. Conclusion

Les résultats de l'investigation de l'effet des additions minérales et du processus du traitement thermique sur le comportement des BVs nous ont conduits à conclure ce qui suit :

Effet du rapport E/C

Le rapport E/C a une influence directe sur le comportement du béton frais. Avec un même rapport E/L = 0.42, les bétons élaborés s'affaissent plus que le béton témoin.

La diminution de E/C de 0.50 à 0.42 a conduit à :

- Diminution de l'affaissement de l'ordre de 33 % ;
- Diminution de la porosité du béton non traité de 15 % ;
- Augmentation de la porosité du béton traité thermiquement de 20 % ;
- Augmentation de 1 et 8% de la résistance à la compression des bétons non traités à l'âge de 1 et 28 j respectivement ;
- Diminution de 6% de la résistance à la compression à l'âge de 180 j des bétons non traités
- Augmentation de la résistance à la compression à toutes les échéances des bétons traités thermiquement et cette augmentation est importante au jeune âge (+32 %) ;

Effet de la nature de l'addition

La nature de l'addition a aussi une influence sur les caractéristiques physico-mécaniques des bétons étudiés :

- BV20LG est le moins poreux alors que BV40LC est le plus poreux ;
- BV(LC) traités thermiquement sont les plus poreux ;
- Au jeune âge et pour les deux modes de traitement, BV40FC est le moins résistant et BV20LG le plus résistant ;
- A l'âge de 28 j, toujours BV20LG est le plus résistant et BV40FC est le moins résistant et seuls les bétons BV20FC, BV40FC et BV20LG demeurent résistants dans le cas de traitement thermique qu'avec cure dans les conditions normales ;
- A l'âge de 180 j, les bétons plus résistants sont BV(R)0.50 dans le cas de cure normal et BV(R)0.42 pour les cas d'accélération de durcissement par augmentation de la température et seuls les bétons élaborés BV20LG, BV40LG et BV40LC sont plus résistants avec du traitement thermique qu'avec du traitement standard ;
- BV40FC demeure toujours le mauvais béton ;

- Il est recommandé de limiter l'incorporation du FC dans le béton à des teneurs inférieures à 20 % ;
- La finesse de l'addition, notamment pour le LG qui a la finesse la plus faible parmi les additions utilisées, est une caractéristique très importante pour améliorer le rendement de l'emploi du LG dans les bétons traités ou non traités thermiquement ;
- Les bétons traités thermiquement BV(LG) et BV(LC) ont présenté des UPVs supérieures que celles de ces mêmes bétons non traités ;
- Les bétons traités thermiquement BV(FC) ont présenté des UPVs inférieures que celles de ces mêmes bétons non traités ;
- Le BV20LG se caractérise par une grande vitesse d'ultrasons pour les deux modes et il est très proche du béton témoin.

Effet de la teneur de l'addition

L'augmentation du dosage en addition de 20 à 40 % a entraîné ce qui suit :

- Diminution de 39 % de l'affaissement de BV(FC), mais à une augmentation de l'affaissement de 17 % et de 33 % respectivement de BV(LG) et BV(LC) ;
- Diminution de 4 et 14% respectivement de P des bétons non traités BV(FC) et BV(LC) ;
- Augmentation de 8 et 2 % respectivement de P des bétons traités thermiquement BV(FC) et BV(LC) ;
- Augmentation de 82 et 7 % respectivement de P des BV(LG) normalement et thermiquement traités ;
- Diminution de la résistance à la compression aussi bien pour les trois additions que par les deux modes de traitements.
- L'augmentation de la teneur de l'addition est associée à une augmentation de l'UPV des BVs ;

Effet de processus de traitement thermique

En entamant l'effet du processus du traitement thermique avec et sans présence des additions minérales, on peut conclure que ce mode de traitement:

- Est très avantageux notamment au jeune âge où tous les bétons traités ont pu développer des résistances supérieures à celles des bétons normalement mûris ;
- Provoque des pertes d'humidités par EE et systématiquement P et CAE s'accroissent ;
- A permis d'acquérir à l'âge de 1 j des gains de résistance de 106 à 156 % ;

- A permis aux bétons d'atteindre au jeune âge des niveaux de résistances satisfaisantes. Ils ont pu atteindre de 47 jusqu'à 60 % de leurs résistances caractéristiques à l'âge de 28 jours. Donc presque la moitié de la résistance à 28 j a été obtenue uniquement après quelques heures de traitement, ce qui correspond à un avantage parfait ;
- A permis d'acquérir à l'âge de 28 j des gains de résistance jusqu'à 9 % pour certains bétons, et les pertes de résistances sont acceptables et sont inférieures à 13 % pour les autres bétons ;
- BV(R)0.42(T) et BV20LG(T) ont eu, à l'âge de 28 jours, des résistances qui dépassent celle du béton témoin avec un rapport de 4 et 14 % respectivement ;
- A l'échéance plus longue de 180 j, tous les bétons traités sont moins résistants que le béton témoin BV(R)0.50(NT).

Corrélations

Concernant la corrélation entre les différents paramètres physico-mécaniques, on a constaté :

- Une quasi-proportionnalité entre P et CAE ;
- La résistance en compression des bétons diminue avec l'augmentation de la porosité.
- la présence des additions de différentes natures et leurs incorporations avec différentes teneurs n'a pas permis d'avoir une relation P- R_{C28} ;
- Une corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse de propagation ultrasonique UPV peut être remarquée mais elle est faible. Néanmoins, cette corrélation est plus remarquable dans le cas du traitement thermique que dans le cas du traitement normal.

2. BETON AUTOPLAÇANT

Les résultats des essais effectués à l'état frais sont regroupés dans le Tableau IV.4 et illustrés par les Figures IV.17 et IV.18 qui suivent. Les résultats des essais effectués à l'état durci sont regroupés dans le Tableau IV.5 et illustrés dans les Figures IV.19 à IV.33 ci-dessous.

Tableau IV.4. Résultats des essais sur BAPs à l'état frais

	ρ_{Bf} kg/m ³	Ao %	D cm	T ₅₀₀ s	μ Pa.s	T _{V-Funnel} s	S %	H ₂ /H ₁ %	T _{L-Box} s
BAP(R)0.50	2235	5.1	67	2.90	97	4.60	6.25	0.91	3.05
BAP(R)0.42	2224	5.6	61	5.00	150	8.15	2.50	0.93	9.70
BAP20FC	2266	4.5	64	3.20	103	4.87	8.75	0.82	10.20
BAP40FC	2234	5.1	77	2.50	98	6.15	10.21	0.81	9.02
BAP20LG	2218	6.0	59	4.20	121	6.5	1.56	0.84	10.25
BAP40LG	2244	6.1	60	3.60	107	7.06	1.88	0.83	9.00
BAP20LC	2214	6.6	62	3.0	91	5.30	5.31	0.92	5.80
BAP40LC	2258	5.7	60	3.5	104	5.40	4.38	0.93	5.10

Tableau IV.5. Résultats des essais sur BAPs à l'état durci

		P (%)	CAE (%)	EE (%)	R _{C1} (MPa)	R _{C28} (MPa)	R _{C180} (MPa)	UPV (m/s)	ρ_{Bd} (kg/m ³)
BAP(R)0.50	T	12.30	5.43	8.02	16.49	32.10	39.61	3896	2235
	NT	10.57	4.69	4.32	6.54	34.08	47.91	3945	
BAP(R)0.42	T	10.14	4.61	8.34	21.76	38.17	50.40	4178	2224
	NT	10.14	4.77	3.13	6.92	44.47	58.33	4292	
BAP20FC	T	10.40	4.70	7.73	14.29	38.97	48.11	4112	2266
	NT	9.80	4.51	2.26	3.45	36.57	49.14	4104	
BAP40FC	T	11.20	5.07	10.15	16.35	26.66	40.06	4103	2244
	NT	9.80	4.53	3.24	6.58	29.78	40.38	4032	
BAP20LG	T	10.22	4.74	7.49	18.25	33.21	44.88	4123	2218
	NT	6.47	2.93	2.88	8.12	39.34	45.42	4173	
BAP40LG	T	9.93	4.50	7.49	14.55	30.11	42.60	4016	2234
	NT	9.11	4.33	3.21	6.09	32.53	43.40	3949	
BAP20LC	T	9.80	4.44	8.08	16.49	30.98	52.28	4259	2214
	NT	11.12	5.15	2.46	6.54	36.74	47.84	4156	
BAP40LC	T	6.44	2.86	6.89	14.18	32.14	47.36	4060	2258
	NT	6.83	3.03	2.88	4.35	33.81	49.83	4124	

Comme dans le cas du BV, et pour une meilleure interprétation des résultats obtenus, on a calculé, par rapport aux résultats du béton de référence (dans ce cas le BAP témoin est BAP(R)0.42), les rapports des résistances en prenant en compte le mode de traitement et l'âge de l'éprouvette. Les rapports obtenus sont résumés dans le Tableau IV.6. Ainsi, les rapports de porosités et des résistances ont été calculés pour faciliter la comparaison entre les différents BAPs en prenant en compte la teneur et la nature de l'addition. Les rapports obtenus sont résumés dans le Tableau IV.7.

Tableau IV.6. Rapports des résistances des BAPs avec prise en compte du mode de traitement

	BAP(R)0.50	BAP(R)0.42	BAP20FC	BAP40FC	BAP20LG	BAP40LG	BAP20LC	BAP40LC
$\frac{R_{C1}(T) - R_{C1}(NT)}{R_{C1}(NT)}$	152	214	314	148	125	139	152	226
$\frac{R_{C1}(T) - R_{C28}(NT)}{R_{C28}(NT)}$	48	49	39	55	46	45	45	42
$\frac{R_{C28}(T) - R_{C28}(NT)}{R_{C28}(NT)}$	-6	-14	+7	-10	-16	-7	-16	-5
$\frac{R_{C28}(T) - R_{C28}(R)}{R_{C28}(R)}$	-28	-14	-12	-40	-25	-32	-30	-28
$\frac{R_{C180}(T) - R_{C180}(NT)}{R_{C180}(NT)}$	-17	-14	-2	-1	-1	-2	+9	-5
$\frac{R_{C180}(T) - R_{C180}(R)}{R_{C180}(R)}$	-32	-14	-18	-31	-23	-27	-10	-19

$R_{cj}(T)$: résistance à la compression à l'âge (j) jour du béton traité thermiquement.

$R_{cj}(NT)$: résistance à la compression à l'âge (j) jour du béton non traité.

$R_{cj}(R)$: résistance à la compression à l'âge (j) jour du béton vibré témoin non traité [BAP(R)0.42(NT)].

Tableau IV.7. Rapports des P et R_c des BAPs avec prise en compte de la nature et la teneur d'addition

	BAP(R)0.50		BAP20FC		BAP40FC		BAP20LG		BAP40LG		BAP20LC		BAP40LC	
	NT	T	NT	T	NT	T	NT	T	NT	T	NT	T	NT	T
$\frac{P(BAP_i) - P(R)}{P(R)}$	+4	+21	-3	+3	-3	+10	-36	+1	-10	-2	+10	-3	-33	-36
$\frac{P(BAP 40) - P(BAP 20)}{P(BAP 20)}$	/	/	/	/	0	+8	/	/	+41	-3	/	/	-39	-34
$r_1 = \frac{R_{C1}(BAP_i) - R_{C1}(R)}{R_{C1}(R)}$	-5	-24	-50	-34	-5	-25	+17	-16	-12	-33	-5	-24	-37	-35
$r_{28} = \frac{R_{C28}(BAP_i) - R_{C28}(R)}{R_{C28}(R)}$	-23	-14	-18	+4	-33	-28	-12	-11	-27	-19	-17	-17	-24	-14
$r_{180} = \frac{R_{C180}(BAP_i) - R_{C180}(R)}{R_{C180}(R)}$	-18	-21	-16	-5	-31	-21	-22	-11	-26	-15	-18	+4	-15	-6
Moy[r _j (BAP _i NT)+r _j (BAP _i T)]	-18		-20		-24		-9		-22		-13		-22	
Moy[r _j (BAP _i)A _k]	-18		-22				-16				-17			

BAP_i: Béton autoplaçant n° i, i = 1 à 7 bétons, i = 1 = BAP(R)0.50, i = 2 = BAP20FC, etc...

P(BAP_i): Porosité du béton autoplaçant n° i.

P(R): Porosité du béton autoplaçant de référence [BAP(R)0.42]

P(BAP20) et P(BAP40): Porosité du béton autoplaçant avec 20 et 40 % d'addition respectivement.

r_j: rapport de résistances à l'âge j.

r_j(BAP_i)A_k: rapport des résistances des BAP_i pour une meme addition A_k, k = FC, LG ou LC.

2.1. Etat frais

On peut constater que, lorsque les additions minérales sont utilisées dans le BAP, elles peuvent réduire la quantité de superplastifiant nécessaire pour obtenir une fluidité désirée, comme indiqué par [203]. Aussi, Gunevisi et Gesoglu [204] ont conclu que l'utilisation de ciments composés (au calcaire et aux pouzzolannes) a légèrement diminué la nécessité de superplastifiant dans les mélanges.

Les valeurs obtenues des étalements (D) sont typiquement dans une fourchette de 59 à 77 cm (Figure IV.17). Elles se situent à l'intérieur du domaine des BAP. Le BAP(R)0.50 présente un étalement supérieure à celui du BAP(R)0.42 vu que ce dernier contient une quantité d'eau inférieure. Le BAP le plus étalé est bien le BAP40FC alors que le BAP20LG est le moins étalé. L'effet de l'addition sur l'écoulement est remarquable du point de vue de sa nature et de sa teneur. Ainsi, les BAP contenant de FC s'étalent mieux que ceux contenant du laitier que ce soit LG ou LC.

Le filler calcaire est inerte et plus fin que le ciment ce qui a offert un bon remplissage des vides et un meilleur arrangement des particules de la pâte. Le frottement et la viscosité diminuent avec l'augmentation du taux du filler mis en place ce qui a pu améliorer l'écoulement du BAP. Les résultats des essais réalisés par Yahia et al [46] confirment nos constatations. Ils ont prouvé que l'effet du filler calcaire sur les propriétés rhéologiques d'un mortier autoplaçant est principalement affecté par E/C et la teneur mise en place du FC. Pour E/C donné, l'addition d'une certaine marge du filler calcaire n'affecte pas la fluidité. Cependant, au delà d'un dosage critique, l'incorporation d'une certaine charge calcaire a eu comme conséquence une augmentation substantielle de la viscosité du mortier autoplaçant.

Pour le laitier, il est actif et a besoin d'une quantité d'eau plus importante que celle requise par le ciment ce qui a réduit la fluidité du béton et par conséquence son écoulement. Cette constatation est similaire à celle de Laifa et al [42] qui possède que l'emploi du laitier cristallisé (30 %) en remplacement du ciment entraîne une diminution de l'étalement du fait de la demande plus importante en eau du laitier cristallisé par rapport au filler calcaire.

En ce qui concerne les temps d'écoulement (T_{500}), ils augmentent au fur et à mesure que E/C diminue ainsi que une addition est mise en place. Sauf pour le BAP40FC qui a marqué le plus petit T_{500} .

Les temps d'écoulement à travers l'orifice de l'entonnoir ($T_{V-Funnel}$) obtenus se situent entre 4 et 9 s (Figure IV.18). Ces résultats indiquent que tous les mélanges BAP répondent aux exigences du temps d'écoulement admissible et sont acceptables pour la conception des mélanges de BAP appropriés. Le $T_{V-Funnel}$ augmente avec la diminution du rapport E/C. Néanmoins, en comparant le BAP(R)0.42 avec les autres BAPs, on constate que $T_{V-Funnel}$ diminue avec l'incorporation de l'addition mais il augmente avec l'accroissement du dosage de l'addition.

Des conclusions semblables ont été tirées par Gunevisi et Gesoglu [204] qui ont trouvé que l'utilisation des ciments Portland composés à base de pouzzolane et de calcaire a diminué le T_{500} et le $T_{V-Funnel}$ des BAPs par rapport au ciment portland artificiel notamment dans le cas où le laitier est utilisé avec des teneurs de 0-45% dans la composition du BAP.

Les valeurs calculées des viscosités plastiques (μ) sont situées entre 100 et 160 Pa.s (Figure IV.18). La valeur maximale et la valeur minimale sont acquises par le BAP(R)0.42 et le BAP20LC respectivement. La viscosité plastique diminue avec l'emploi et avec l'augmentation du taux de l'addition.

Le laitier granulé rend les BAP plus visqueux par rapport au filler calcaire. En interprétant la relation entre la viscosité et les temps mesurés aux différents essais sur les BAP avec addition on peut noter globalement que :

- T_{500} et T_{L-Box} sont proportionnels à μ ;
- $T_{V-Funnel}$ est inversement proportionnel à μ .

Pour la stabilité (S), tous les BAP étudiés sont supposés stables (Laitance < 15 %). Les trois bétons BAP(R), BAP20LG et BAP40LG se caractérisent par une grande stabilité (laitance < 2,5%) et par suite par une grande résistance à la ségrégation et au ressuage conformément au résultat antérieur rapporté par Boukendakdji et al [205]. La pâte de ces bétons est trop visqueuse pour s'écouler à travers les mailles du tamis. Ce phénomène est le résultat de l'activité du laitier qui entraîne une considérable absorption de l'eau. Les BAP20FC et BAP40FC sont homogènes et moins stables que les autres à cause de le caractère inerte et la finesse importante de l'addition ce qui rend la pâte plus fluide et par suite sa facilité d'écoulement à travers le tamis. Une proportionnalité entre S – D peut être distinguée (Figure IV.17).

Concernant la capacité de remplissage appréciée par le rapport H_2/H_1 mesuré à travers l'essai de la boîte en L, on remarque que $H_2/H_1 > 0,8$ pour tous les BAP. Les valeurs du paramètre d'appréciation de l'ouvrabilité (T_{L-Box}) des BAP sont proches de celles couramment trouvées (3 à 5 s). L'accroissement du dosage en addition accompagne une diminution du temps d'étalement.

Nos constatations sur l'utilisation du FC sont très proches de celles de Bouhamou et al [206] qui ont conclu que l'ajout du filler calcaire à un dosage inférieur à 25 % contribue à diminuer la viscosité du BAP et à augmenter le diamètre de l'étalement, alors que lorsqu'il dépasse 25 % (valeur critique), il provoque une augmentation de la viscosité se traduisant par une diminution du taux de remplissage H_2/H_1 .

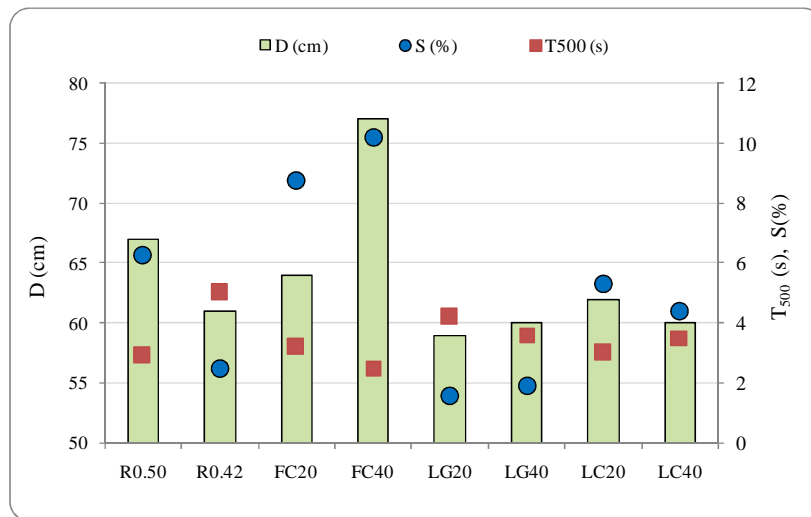


Figure IV.17. Essai d'étalement au cône d'Abrams et essai de la stabilité au tamis

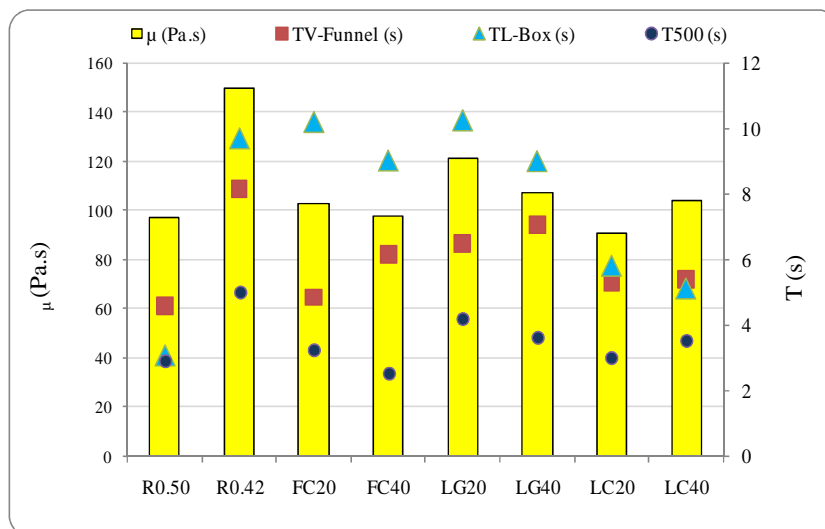


Figure IV.18. Viscosité plastique et temps mesurés aux différents essais

2.2. Etat durci

Les résultats des essais obtenus sont présentés dans le Tableau IV.5.

2.2.1. Porosité et capacité d'absorption d'eau

D'après les résultats des essais de la porosité (P) et de la capacité d'absorption d'eau (CAE) présentés dans la Figure IV.19 et IV.20, on peut constater que :

Les valeurs de la porosité (P) sont absolument supérieures à celles de la capacité d'absorption d'eau (CAE) pour les mêmes raisons données précédemment (Section 1.2.1). De ce fait, il existe une quasi-proportionnalité entre P et CAE, une porosité élevée correspond à une CAE élevée et vice versa.

Du point de vue du rapport E/C, ce rapport n'a pas beaucoup d'influence sur la porosité des BAPs non additionnés qui ont durci naturellement. Les valeurs de P sont très proches. Le BAP(R)0.50 est 4% plus poreux que le béton de référence BAP(R)0.42. Mais dans le cas du traitement thermique la différence est un peu considérable, le BAP(R)0.50 est 21 % plus poreux que BAP(R)0.42. La cause est certainement l'effet de la température sur l'évaporation de l'eau, plus il ya de l'eau plus il y aura une évaporation importante et par conséquent une augmentation de P.

En faisant une comparaison entre les BAPs élaborés et le BAP(R)0.42 dans le cas (NT), tous les BAP additionnés, mis à part le BAP20LC, présentent des porosité inférieures. Dans le cas (T), la nature de l'addition joue un rôle prépondérant. Les BAP à base de FC sont plus poreux alors que les BAPs à base des laitiers (LG ou LC) sont moins poreux que le BAP témoin. d'où l'importance de l'incorporation des additions fines réactives dans les BAPs pour avoir des mélanges plus denses et plus serrées notamment si ces BAPs ont subi une accélération de leurs durcissement par traitement thermique. Ces diminutions de P sont de l'ordre de 36 % obtenue par 20 % de LG dans le cas de NT et obtenue par 40 % de LC dans le cas de T. Ces résultats de P nous permettent de confirmer l'avantage et les bénéfices de l'incorporation de ces additions dans les mélanges des BAPs surtout ceux qui auront subi une accélération de durcissement par étuvage. Les BAPs les plus poreux sont BAP20LC dans le cas de (NT) et BAP40FC dans le cas de (T), ils ont provoqué une augmentation de P de l'ordre de 10 %.

Du point de vue de l'effet de la teneur de l'addition, dans le cas des bétons (NT), l'accroissement de la teneur mis en place de 20 à 40 % a permis d'avoir la même valeur de P avec du FC, à une augmentation de 41 % avec du LG et une diminution de 39 % avec du LC. Dans le cas des bétons (T), l'accroissement de la teneur mis en place a entraîné une

augmentation de P de 8 % avec du FC et une diminution de 3 et 34 % avec du LG du LC respectivement.

Ces résultats peuvent être expliqués par le fait que le FC se caractérise par un caractère non réactif (addition inerte) alors que LG et LC présentent généralement une réactivité acceptable par rapport au ciment et si ces produit sont finement broyés leur réactivité peuvent augmenter considérablement [39]. Ces résultats avantageux sont plus pertinents dans le cas du traitement thermique. Alors que dans le cas de durcissement dans des conditions normales, P a augmentée (de +41%) avec l'accroissement de LG car une quantité d'eau encore plus importante est absorbée par LG ce qui provoque un mauvais déroulement de la réaction d'hydratation du ciment.

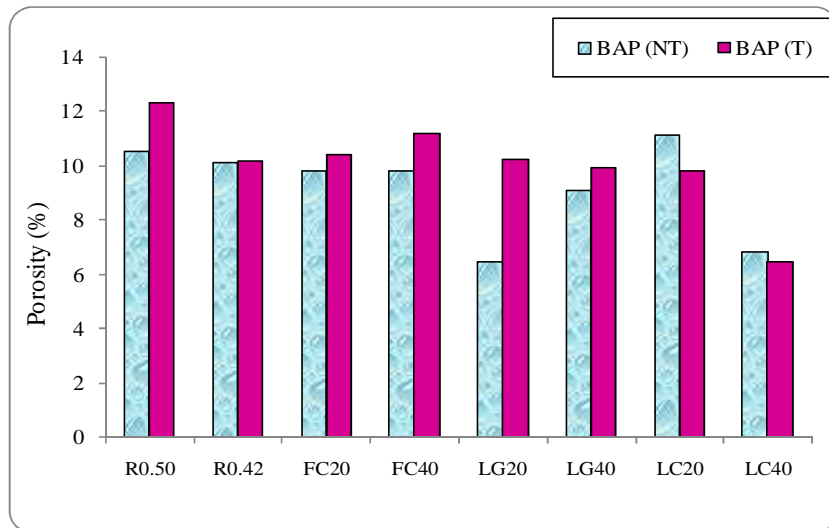


Figure IV.19. Porosité totale des BAP

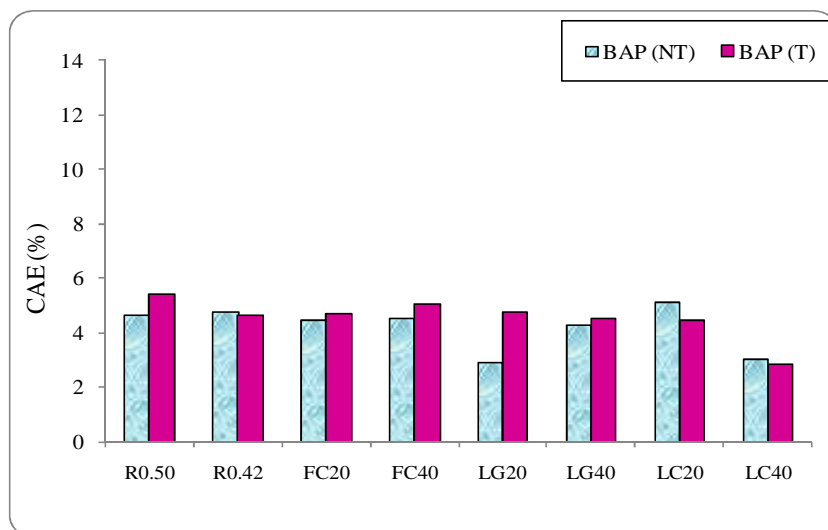


Figure IV.20. Capacité d'absorption d'eau des BAP

Pour évaluer le degré d'influence de la température du traitement thermique sur les performances du BAP suite aux pertes d'humidité par évaporation, la quantité d'eau évaporée (EE) a été déterminée par le pesage des éprouvettes avant et après l'étuvage. L'effet d'EE sur P et CAE des BAPs peut être évalué dans la mesure où une représentation assemble tous les résultats de ces grandeurs (Figure IV.21). Il est clair qu'une augmentation d'EE entraîne systématiquement un accroissement de P et de CAE.

Les résultats de P des BAPs étuvés montrent que mis à part les BAP qui contiennent du LC, tous les BAP(T) ont des porosités supérieures à celles des BAP(NT). Celui-ci est dû essentiellement à la perte de l'humidité par évaporation d'eau (EE).

L'augmentation de la teneur en addition mise en place entraîne systématiquement une augmentation de la porosité avec le FC et le LG et une diminution avec LC. C'est la finesse élevée du LC (SSB = 4850 cm²/g) et la faible quantité d'EE par rapport aux autres BAP traités (EE < 7%) qui a permis au BAP40LC d'avoir une bonne compacité et d'être le BAP le moins poreux. Le BAP le plus poreux est bien le BAP40FC qui a été le BAP le plus étalé (D = 77 cm) et le moins stable (S > 10 %) à l'état frais, ce qui l'a remis le plus sensible à la ségrégation et au ressuage et a été le BAP qui a eu plus d'EE après étuvage (EE > 10%).

La nature de l'addition joue un rôle déterminant dans le cas des bétons traités thermiquement. Plus l'addition est réactive plus elle est rentable notamment à des teneurs élevées. La finesse est plus importante pour une meilleure réaction. C'est le cas du LC qui est plus fin que le LG.

En comparant tous les résultats de P des bétons additionnés, le BAP20LG et le BAP20LC sont les moins poreux en mode (NT) alors qu'en mode (T) c'est bien le BAP40LC qu'est le moins poreux. Cette constatation nous a permis de conclure que pour avoir un béton de structure dense et compacte et par suite plus résistant et plus durable on doit tenir compte de :

- La nature de l'addition et sa réactivité dans les deux modes de traitement ;
- La teneur, où la teneur de 20 % est plus avantageuse en mode (NT) ;
- La finesse comme facteur primordial dans le mode (T), où le LC qui est plus fine que le LG a pu minimiser la P à des valeurs très minimales notamment avec la teneur de 40 %.

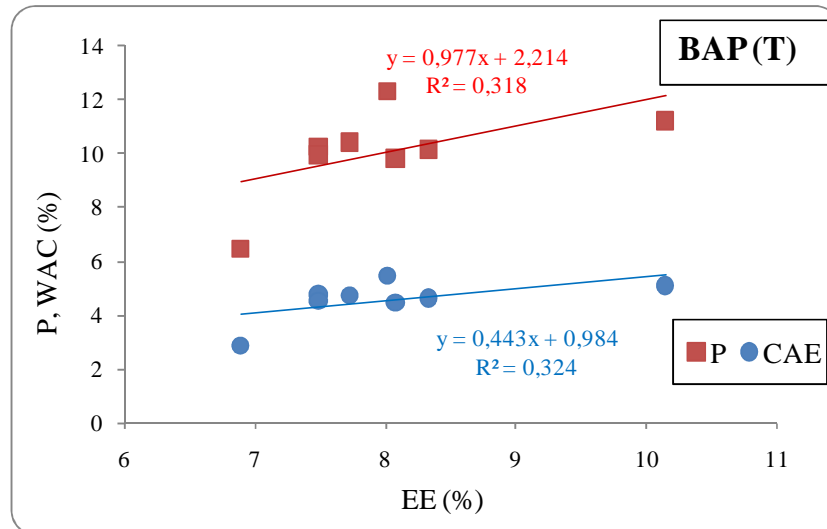


Figure IV.21. *P et CAE des BAP traité thermiquement en fonction d'EE.*

2.2.2. Résistance à la compression

Les essais de compression effectués sur les différents bétons à l'âge de 1j, 28 j et 180 j ont donné les résultats résumés dans le Tableau IV.5 et présentés sur les Figures IV.22 à IV.24.

L'incorporation des additions minérales peut améliorer les résistances mécaniques des bétons et cette amélioration est fortement liée à la nature, la finesse et le dosage de l'addition. Ramanathan et al [207] et Yahia et al [46] révèlent que les additions minérales ont la capacité d'assurer un bon remplissage des vides entre les particules de ciment de grande taille, et l'augmentation de la production d'hydrates secondaires par des réactions pouzzolaniques avec la chaux résultant de l'hydratation primaire ce qui améliore la résistance à la compression.

Globalement, si on fait une comparaison entre les BAPs d'études et le béton témoin BAP(R) (abréviation de [BAP(R)0.42NT]), la résistance du BAP(R) est toujours supérieure sauf à l'âge de 1j où le BAP20LG(NT) est 17 % plus résistant. À l'égard du mode de traitement thermique, le BAP(R) n'a été prédominé que par un taux de 4% par le BAP20FC(T) et BAP20LC(T) à l'âge de 28 j et 180 j respectivement.

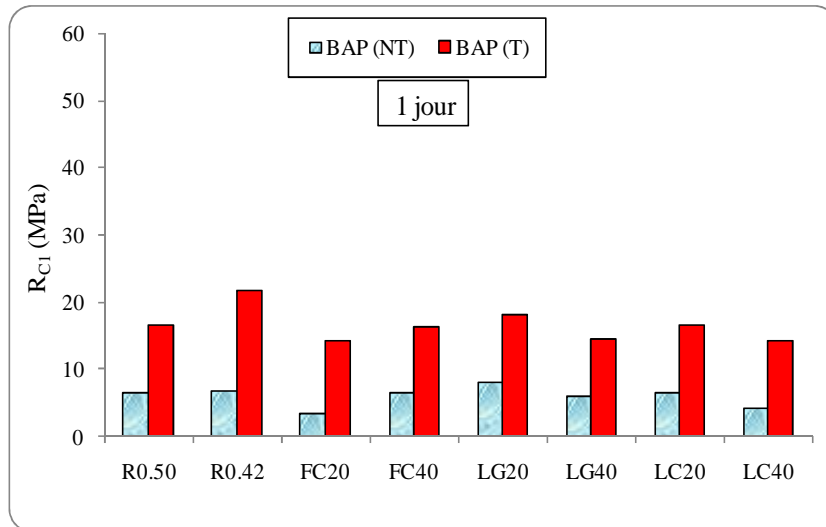


Figure IV.22. Résistances à la compression à l'âge de 1 jour des différents BAP étudiés

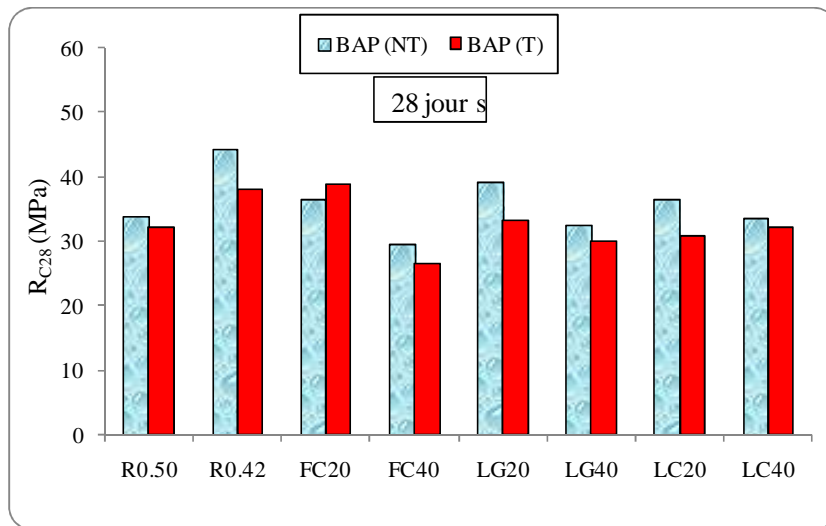


Figure IV.23. Résistances à la compression à l'âge de 28 jours des différents BAP étudiés

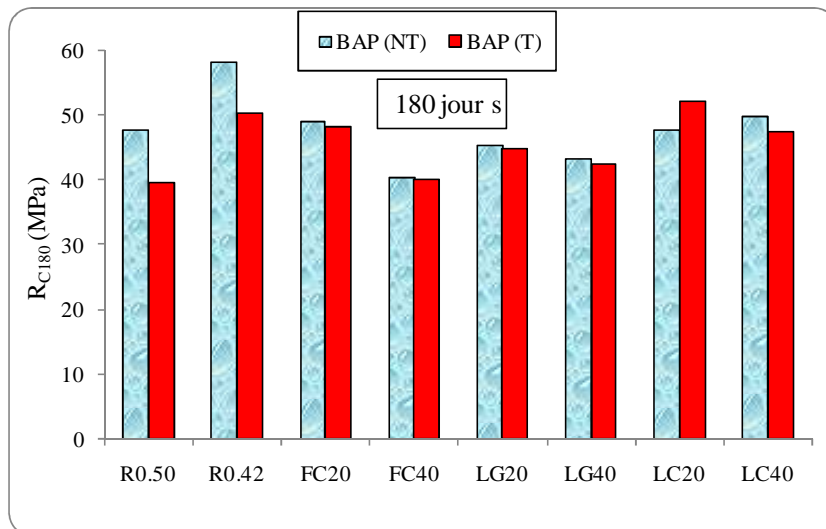


Figure IV.24. Résistances à la compression à l'âge de 180 jours des différents BAP étudiés

2.2.2.1. Effet du rapport E/C

Les résistances obtenues montrent que BAP(R)0.50 est toujours moins résistant que BAP(R)0.42 avec une différence moyenne de l'ordre de 18 %. Cette constatation est valable aussi bien pour les deux processus de traitement que pour tous les âges de béton (Tableau IV.7 et Figure IV.25). L'existence du superplastifiant (SP) dans les BAP étant la cause principale car la présence du SP a permis de réduire la quantité d'eau de gâchage tout en assurant une mise en place commode et sans problèmes.

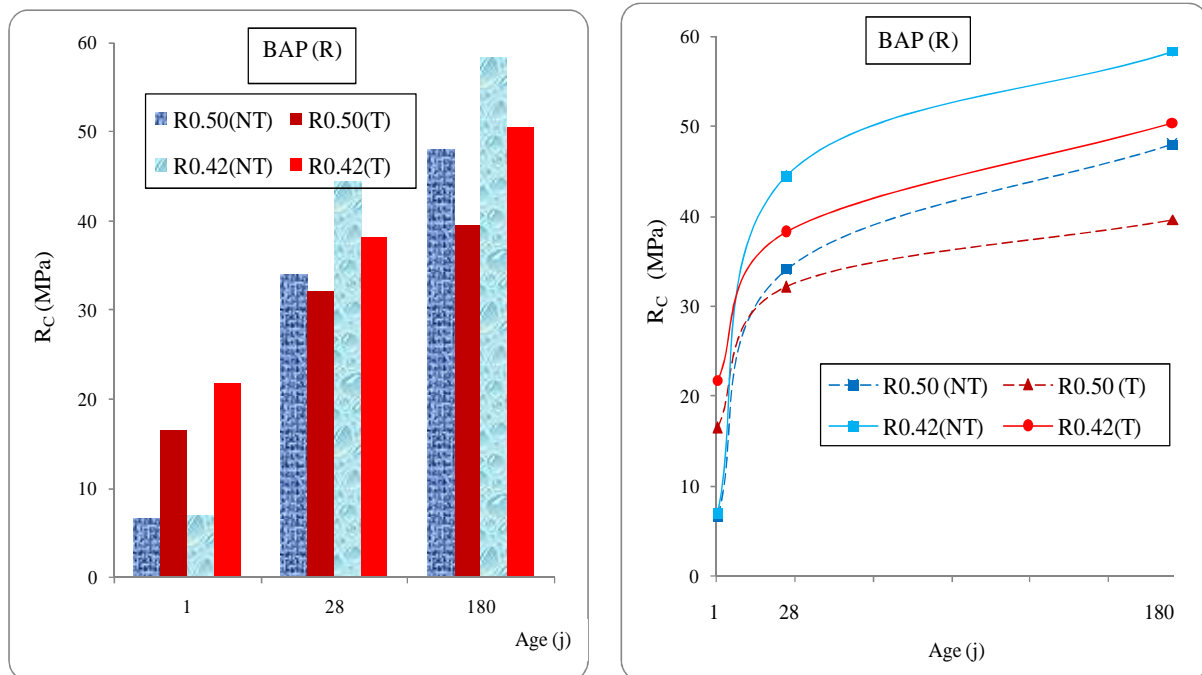


Figure IV.25. Résistances à la compression des BAP de références (effet du rapport E/C)

2.2.2.2. Effet du traitement thermique

Au jeune âge, le traitement thermique a pu augmenter le niveau de la résistance à la compression des BAPs de 1.39 à 3.14 fois par rapport à celle obtenue avec le traitement standard au même âge (Figure IV.22). Ainsi, ces valeurs représentent 39 à 55 % par rapport à celles obtenues avec le traitement standard à l'âge de 28 j. Le gain maximal de 55 % a été obtenu par BAP40FC. Ces résultats se situent pratiquement dans la même proportion moyenne de la résistance à la compression initiale par rapport à la résistance en compression à 28 jours conformes aux résultats de Ramzenianpoor et al [208] qui ont trouvé que les gains des résistances sont d'environ 39%, 46% et 53% à la température maximale de 50, 60 et 70 °C respectivement. Ces gains de résistances à l'âge précoce de 1 j peuvent conduire à la réutilisation des moules par suite de décoffrage rapide et ainsi la mise en tension des éléments précontraints et par conséquent à l'augmentation des cadences de la production.

Donc un niveau de 55% de la résistance à 28 j a pu être atteint très tôt ce qui est le but principal des ateliers et des usines de préfabrication dont l'objectif est d'augmenter les cadences de la production.

A long terme (28 j), à l'exception du BAP20FC qui a acquis un gain de résistance de 7 % vu qu'il contient moins d'air occlus ($A_o = 4,5\%$), les résistances des éprouvettes traitées thermiquement ont eu des chutes de résistances de l'ordre de 5 à 16 % par rapport à celles obtenues avec le traitement standard à l'âge de 28 j. Ces chutes minimales de résistances étaient prévisibles à cause des pertes d'humidité par évaporation (EE) suite à l'augmentation de la température. De même, Bingol et Tohumcu [209] et Mannan et al [210] ont rapporté que la perte d'humidité dans les pores capillaires dues à l'évaporation ou à l'hydratation dissipée peut entraîner une réduction de l'hydratation et par suite une résistance inférieure. Ainsi, cette chute s'explique par le fait que la partie liquide et gazeuse du béton, sous l'influence de températures élevées, se dilate des dizaines de fois plus que la partie majoritaire qui est solide. Pendant ce temps, le solide n'a pas encore acquis ses résistances mécaniques pour faire face au développement des contraintes internes; le béton se fissure et ainsi sa résistance mécanique réduit [211]. Ces facteurs perturbateurs confirment la nécessité d'assurer des bonnes conditions d'étanchéité pour limiter les pertes d'humidité.

A très long terme (180 j), les chutes de résistances persistent, à cause de l'étuvage, en comparaison avec les résistances des BAPs qui ont durci dans les conditions standards au même âge. Ces chutes sont de l'ordre de 14 et 17 % pour BAP(R) et BAP(R)0.50, et sont très minimales pour les BAPs additionnés et sont de l'ordre de 1 à 5 %. Une exception avec le BAP20LC qui a eu un gain de 9 % et c'est le plus proche du BAP(R) (-10%) (Tableau IV.6).

Nous pouvons conclure que l'accélération de durcissement des BAPs par utilisation de la technique de traitement thermique par étuvage a démontré son efficacité surtout au jeune âge. Elle a permis aux BAPs d'acquérir des niveaux de résistances très élevés. C'est exactement l'objectif fondamental de ce procédé notamment dans le domaine de l'industrie du béton préfabriqué.

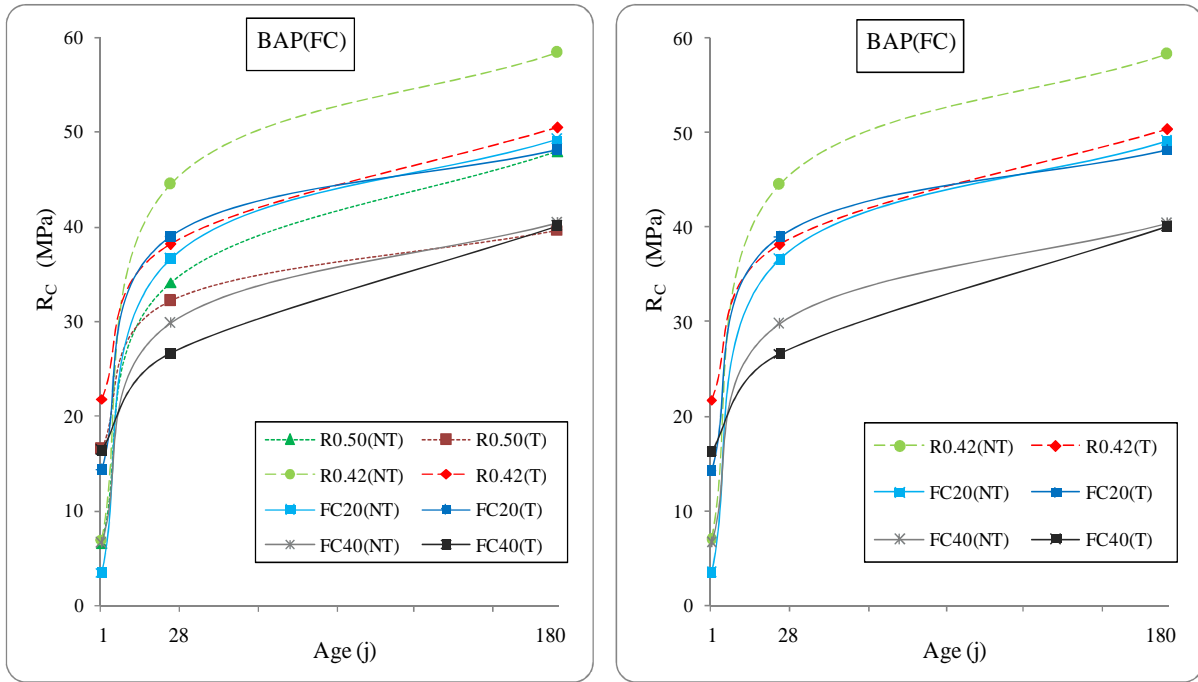


Figure IV.26. Influence du traitement thermique sur la résistance des BAP(FC)

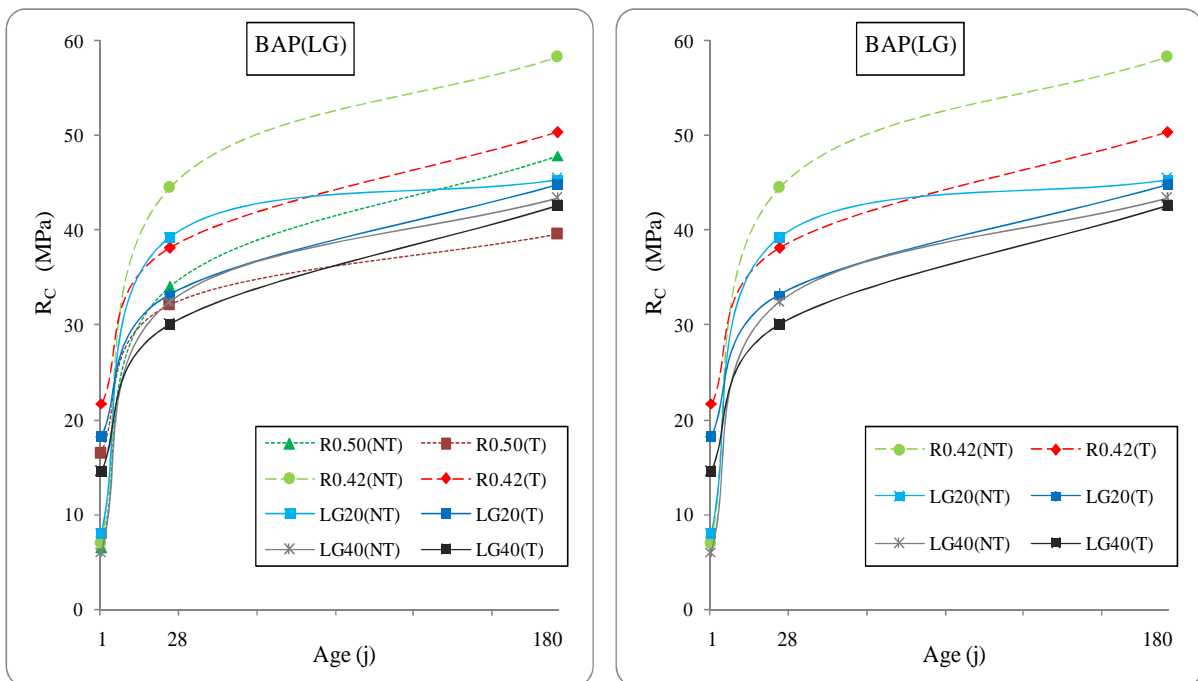


Figure IV.27. Influence du traitement thermique sur la résistance des BAP(LG)

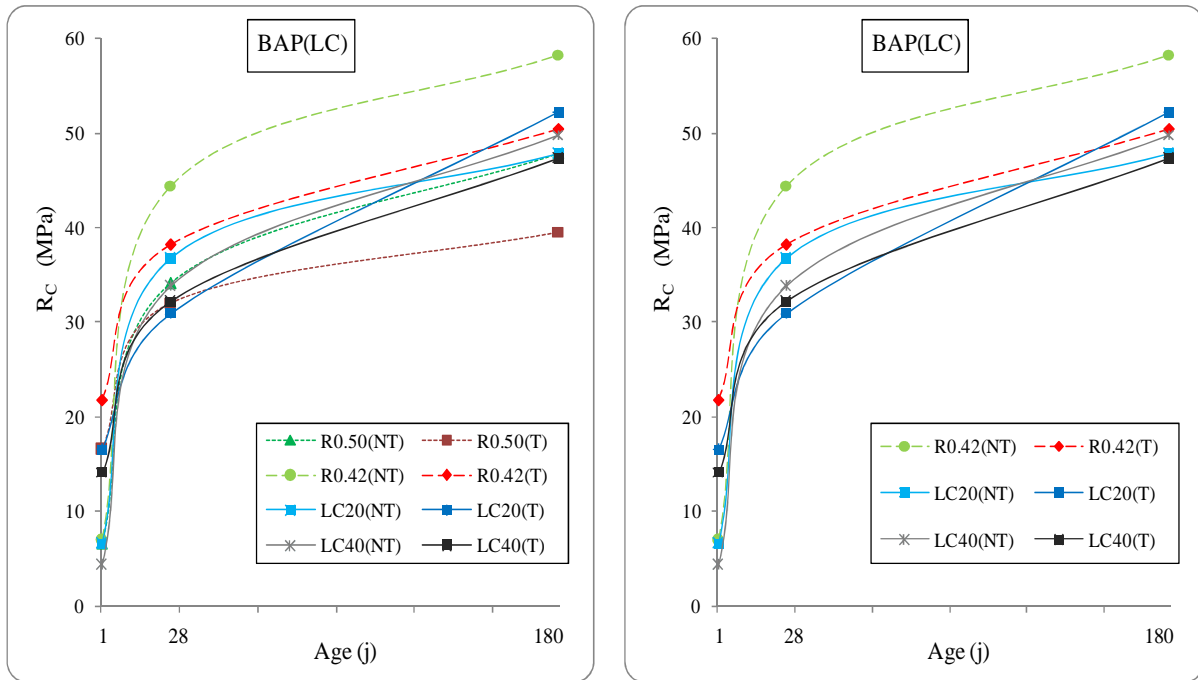


Figure IV.28. Influence du traitement thermique sur la résistance des BAP(LC)

2.2.2.3. Effet de la teneur et la nature de l'addition

A partir des résultats présentés sur la Figure IV.29, la teneur de 20 % du FC apparaît très avantageuse à l'âge de 28 j dans le cas où le BAP a eu une accélération de durcissement par traitement thermique. Le BAP20FC a pu même dépasser le BAP(R) par un taux de +4% à l'âge de 28 j et il est le plus résistant à l'âge de 180 j en mode (NT) par rapport aux BAPs élaborés (-16%). La teneur de 40 % est meilleure au jeune âge, elle a pu augmenter la résistance en comparaison avec les BAPs additionnés pour les deux modes (-5 et -25 % en mode NT et T respectivement) (Tableau IV.7), mais cette teneur est très néfaste à long terme. Ce constat est valable pour les deux modes de traitements. Le BAP40F était le BAP le plus étalé ($D = 77$ cm) et le moins stable ($S > 10$ %) à l'état frais ce qui l'a rendu plus sensible à la ségrégation et au ressuage. En plus, à des teneurs élevées, le caractère inerte de cette addition cause un problème car les grains vont occuper un grand espace sans pouvoir développer des résistances ce qui oblige à limiter le taux d'incorporation du FC à des proportions limites inférieures à 20%. Bouhamou et al [212] ont conclu que l'utilisation des fines calcaires dans la formulation des BAP sont rentables lorsqu'elles sont incorporées avec un taux optimal d'ajout de 25 %.

Avec du LG et du LC, il est très clair que l'incorporation de ces deux additions réactives avec un dosage de 20 % est très bénéfique à tous les échéances et a permis au BAP d'acquies de bonnes résistances. Au jeune âge, les meilleures résistances pour les deux modes de traitement

sont obtenues par le BAP20LG (+17 et -16%). A l'âge de 28 j, la résistance du BAP20LG est toujours supérieure pour le mode (NT) (-12%). A l'âge de 180 j, BAP20LC est plus résistant avec le mode (T) (+4%).

Avec un dosage de 40%, le LC qui possède une finesse supérieure que celle du LG est plus avantageux à long terme (28 j), a permis au BAP40LC d'être prépondérant pour les deux modes (-24 et -14 % en mode NT et T respectivement). A l'âge plus avancé de 180 j. Avec 40%, BAP40LC est toujours dominant (-6 et -15%).

Dans cette voie, Santos et Barbosa [160] montrent que le béton traité thermiquement avec ciment contenant la plus grande quantité de laitier (de 35% à 70% de laitier dans sa composition) peut avoir la meilleure performance puisque les réactions d'hydratation des ciments au laitier ont leur vitesse contrôlée principalement par la réactivité et la quantité de laitier et de la température.

Dans les conditions standards, nous concluons que le laitier est réactif et possède un pouvoir hydraulique latent au jeune âge, par contre il a pu contribuer à un accroissement des résistances par effet pouzzolanique et de prendre toute son ampleur à des échéances supérieures à 28 jours. Il ne faut pas aussi négliger l'effet de la finesse de mouture des laitiers qui a un grand intérêt Oner et al [213]. Pour cela le LC (SSB = 4850 cm²/g), qui présente une finesse largement supérieure à celle du LG (SSB = 2280 cm²/g), a permis au BAP(LC) d'atteindre des niveaux de résistances élevés et très proches de celles du BAP(R).

En faisant une comparaison entre les trois additions, on peut constater que le niveau des résistances développées sont distinctes avec la teneur de 20 % et sont très proches avec 40%. Le BAP composé avec 20% du LG est toujours meilleur. Les scores moyens sont résumés dans le Tableau IV.7.

Enfin, il faut rappeler encore une fois que le rendement de l'emploi des laitiers dans les bétons peut être amélioré s'ils sont finement broyés. Nos résultats montrent que LG est très rentable notamment avec 20 % (score moyen -16 %). L'importance de la finesse de ces additions est prouvée par les valeurs de la résistance obtenue par BV20LC qui est très proche du LG (score moyen -17%). Cette convergence peut être expliquée par le fait que le LG est plus réactif que LC mais le LC est plus fin que le LG. Les laitiers granulés se caractérisent généralement par une structure amorphe et des propriétés hydrauliques latentes mais des bons résultats à long terme. La relation entre la composition chimique, la structure et l'activité hydraulique du laitier, fait l'objet de plusieurs études. Ces études ont montré que l'activité du laitier dépend

essentiellement de sa finesse et de sa structure, qui dépend elle aussi de la composition chimique et du traitement thermique effectué [40] et [39].

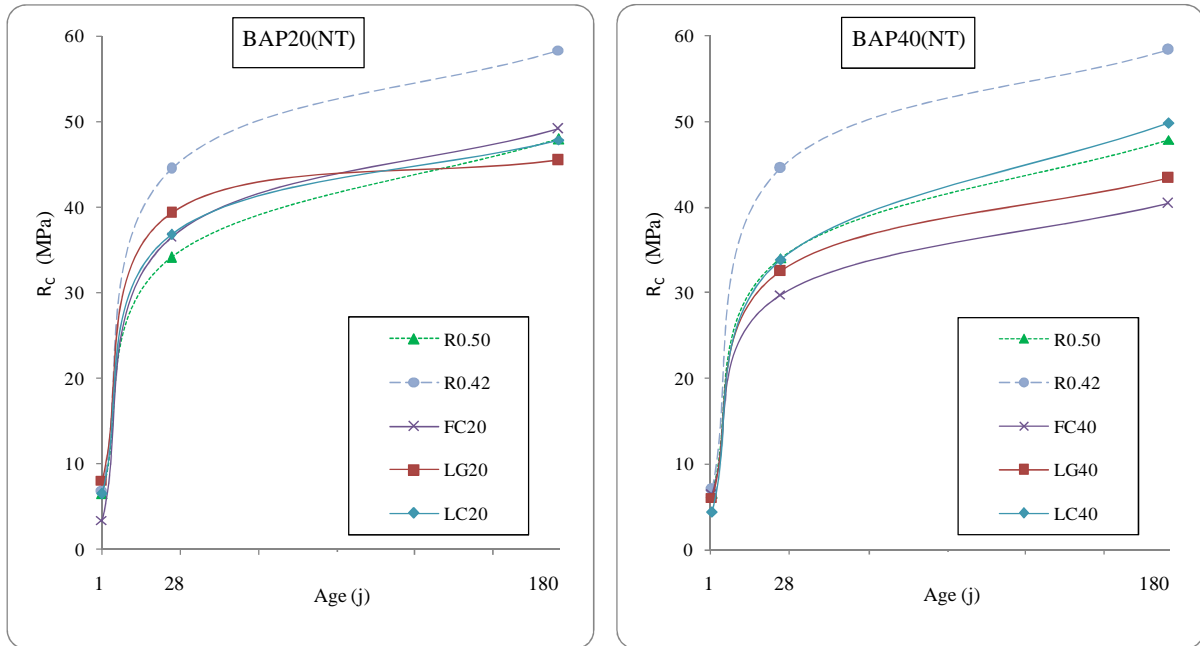


Figure IV.29. Influence de la nature de l'addition sur la résistance des BAP(NT)

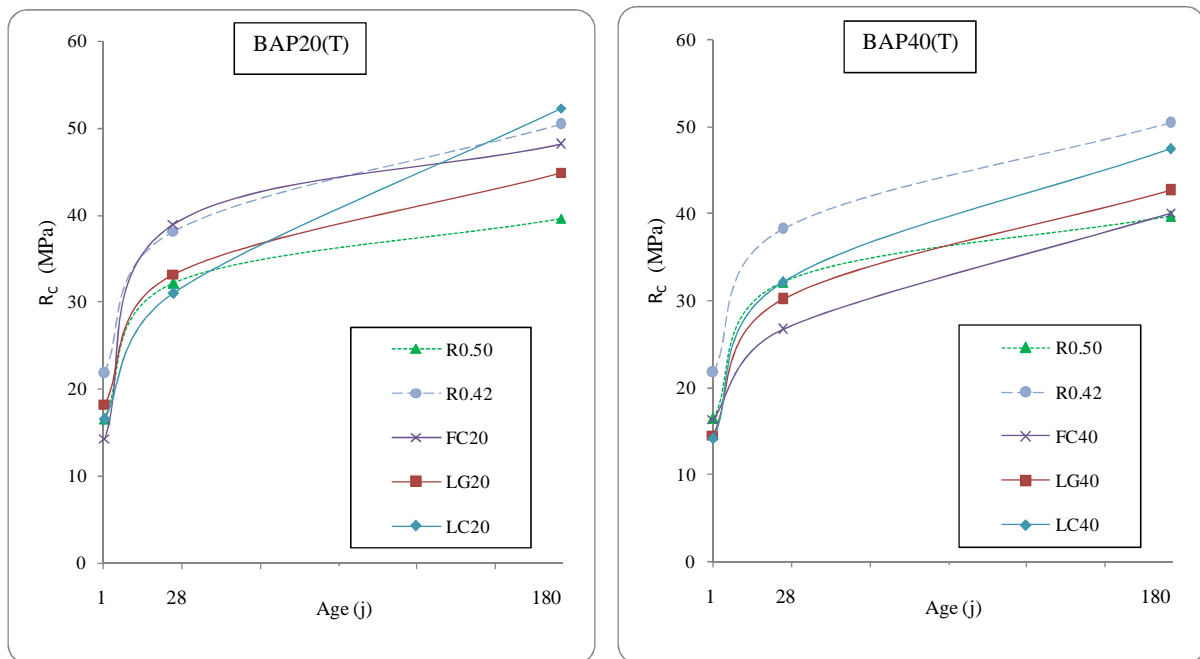


Figure IV.30. Influence de la nature de l'addition sur la résistance des BAP(T)

2.2.3. Corrélation P - R_{C28}

Pour évaluer le degré de corrélation P - R_{C28} dans le cas des BAPs, on a rassemblé les résultats de P et R_{C28} sur la Figure IV.31.

On peut constater que la relation P- R_{C28} n'existe plus ni pour les BAP(NT) ni pour les BAP(T) ($R^2 \approx 0$). On peut dire que la présence des additions minérales n'a pas permis d'avoir une relation P- R_{C28} .

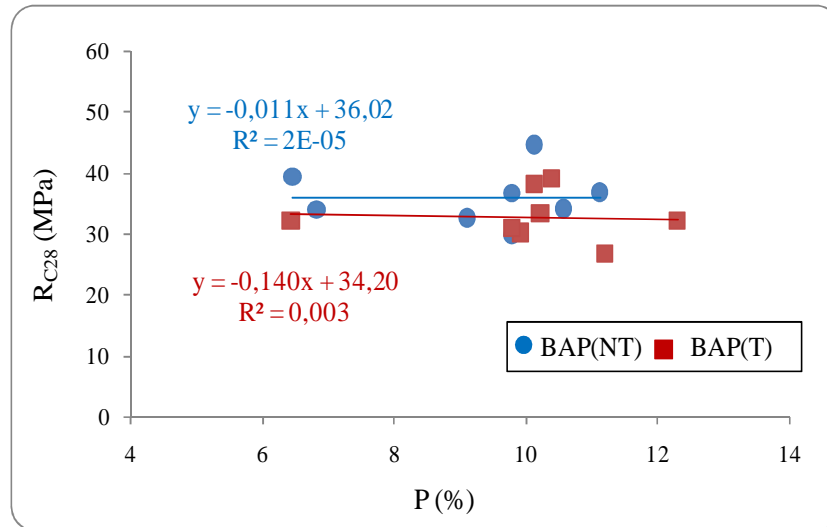


Figure IV.31. Corrélation entre R_{C28} - P des bétons autoplaçants

2.2.4. Essai d'auscultation sonore

D'après les résultats d'UPV présentés dans la Figure IV.32 on peut constater que le BAP(R) présente une UPV supérieure à celle de BAP(R)0.50 dans les deux cas de traitement. Le BAP élaboré proche du BAP(R) témoin est bien BAP20LG en mode (NT) et BAP20LC en mode (T). Les plus faibles vitesses pour les deux modes sont celles du BAP40LG. L'augmentation de la teneur de l'addition est associée à une augmentation de l'UPV des BAPs. Une corrélation entre la résistance à la compression des BAP et la vitesse de propagation d'ultrason (UPV) est établie (Figure IV.33). Une résistance élevée correspond à une grande vitesse de propagation.

Seddik et al [214] ont présenté la relation entre la résistance à la compression et l'UPV des BV et de BAP. Ils ont constaté que l'augmentation de l'UPV est accompagnée d'une augmentation de la résistance à la compression.

Cette corrélation dans le cas du BAP a été étudiée aussi par Zulfu et al [215], qui indiquent que les corrélations entre les valeurs UPV et la résistance à la compression dans les BAPs réalisés en remplacement du ciment par CV et FS sont exponentielles. Lorsque les propriétés à l'état durcis du BAP telles que la résistance à la compression, la vitesse de propagation d'ultrasons et la densité seront pris en compte, Uysal et Sumer [216] stipulent que l'utilisation des additions minérales en diverses combinaisons peut fournir d'excellentes propriétés

mécaniques et ils constatent d'après leurs résultats qu'il y avait un bon compromis entre la résistance à la compression et UPV de mélanges de BAP.

Dans notre étude, cette corrélation n'existe plus dans le cas des BAP(T) qui ont subi une accélération de durcissement par rapport aux BAP(NT) témoins qui ont muri dans des conditions normales où la corrélation est peu évidente ($R^2 = 0.692$). C'est la divergence de la nature des additions minérales utilisés ainsi que le taux de la porosité existant qui sont la raison. La porosité d'un béton traité thermiquement est élevée et par suite elle affecte la propagation des ultrasons à travers la structure du matériau. Par ailleurs, la vitesse des ondes de compression diminue fortement avec la présence des bulles d'air.

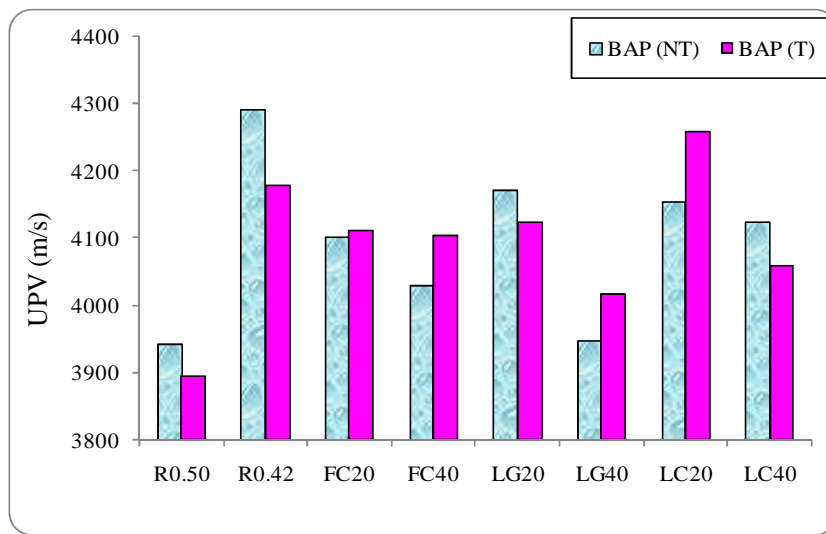


Figure IV.32. UPV des bétons autoplaçants

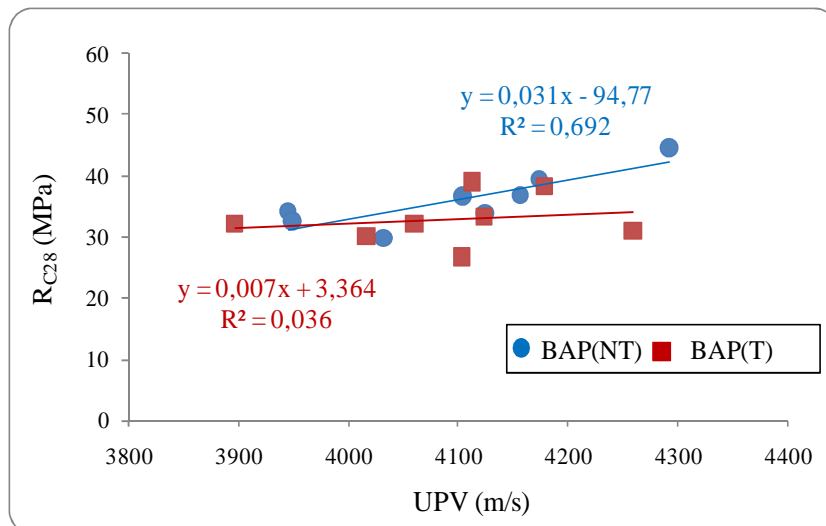


Figure IV.33. Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse de propagation d'ultrason des BAP

2.3. Conclusion

A l'issue de cette partie qui comporte l'étude de l'effet des additions minérales et le processus du traitement thermique sur le comportement des BAPs à l'état frais et à l'état durci, les conclusions suivantes peuvent être avancées :

A l'état frais

L'augmentation du rapport E/C de 0.42 à 0.50 entraîne:

- Une augmentation de l'étalement (D) et la diminution des temps T_{500} , $T_{V-Funnel}$ et T_{L-Box} ;
- Une diminution de la viscosité plastique ;
- Une diminution de la stabilité (S) du BAP, où BAP(R) (S = 2.5%) est plus stable que BAP(R)0.50 (S=6.25%) et par suite BAP(R) présente une grande résistance à la ségrégation et au ressuage ;

L'effet de la nature de l'addition :

- Lorsque les additions minérales sont utilisées dans le BAP, elles peuvent réduire la quantité de superplastifiant nécessaire pour obtenir une fluidité désirée, augmenter T_{500} ; diminuer $T_{V-Funnel}$ et diminuer la viscosité plastique des mélanges ;
- Les BAP contenant du FC s'étaient mieux que ceux contenant des laitiers (LG et LC) mais sont moins stables ;
- Le LC rend les BAP très visqueux notamment avec une teneur de 20 % ($\mu = 91$ Pa.s) et plus stables qu'avec du FC ;
- Le LG rend les BAP visqueux et plus stables (S < 2.5%).

L'augmentation de la teneur de l'addition entraîne une:

- Augmentation de l'étalement avec du FC et du LG et une diminution du LC ;
- Diminution de T_{500} , de la viscosité et de la stabilité avec du FC et du LG et une augmentation avec du LC ;
- Augmentation de $T_{V-Funnel}$ et une diminution du T_{L-Box} .

En interprétant la relation entre la viscosité et les temps mesurés aux différents essais sur les BAP avec addition on peut noter globalement que :

- T_{500} et T_{L-Box} sont proportionnels à μ ;
- $T_{V-Funnel}$ est inversement proportionnel à μ ;
- S est proportionnelle à D.

A l'état durci

- Le rapport E/C n'a pas beaucoup d'influence sur la porosité des BAP(R)NT. En mode de traitement naturel, le BAP(R)0.50 est 4% plus poreux que le béton de référence BAP(R) (E/C =0.42). Tandis que dans le cas du traitement thermique la différence est un peu considérable, le BAP(R)0.50 est 21 % plus poreux que BAP(R) ;
- BAP(R) est 18% plus résistant que BAP(R)0.50 aussi bien pour les deux processus de traitement que pour tous les âges de béton ;
- BAP(R) ont de grandes valeurs d'UPV par rapport à BAP(R)0.50 dans les deux cas de traitement.

Effet de la nature de l'addition:

- Dans le cas (NT), (P) a diminué peu (de 3%) avec FC mais a diminué considérablement (de 10 à 36%) avec les laitiers, mis à part avec 20 % de LC, où (P) a augmenté de 10% ;
- Dans le cas du (T), (P) a augmenté (de 10%) avec FC, n'a pas changé avec LG et a diminuée (de 36%) avec LC.

Effet de la teneur de l'addition:

L'augmentation de la teneur de l'addition de 20 à 40 % en résulte que :

- En mode (NT), (P) n'a pas changé avec du FC, a augmenté de 41% avec du LG et a diminué de 39 % avec du LC ;
- En mode (T), (P) a augmenté de 8 % avec du FC et a diminué de 3 et 34 % avec du LG et du LC respectivement ;
- Le niveau des résistances développées sont distinctes avec la teneur de 20 % et sont très proches avec 40% ;
- Avec un dosage de 20 %, les meilleures résistances au jeune âge pour les deux modes de traitement sont obtenues avec du LG (+17 et -16%). A l'âge de 28 j, la résistance du LG est toujours supérieure pour le mode (NT) (-12%). A l'âge de 180 j, le BAP le plus résistant en mode (T) est bien avec du LC (+4%) ;
- La teneur de 20 % du FC apparaît très avantageuse à l'âge de 28 j dans le cas des BAP(T) et a pu même dépasser le BAP(R) par un taux de +4% à l'âge de 28 j et il est le plus résistant à l'âge de 180 j en mode (NT) par rapport aux BAPs élaborés (-16%) ;
- Avec un dosage de 40%, le LC qui possède une finesse supérieure que celle du LG est plus avantageux à long terme (28 j), a permis au BAP40LC d'être prépondérant pour les

deux modes (-24 et -14 % en mode NT et T respectivement). A l'âge plus avancé de 180 jours. Avec 40%, BAP40LC est toujours dominant (-6 et -15%) ;

- La teneur de 40 % du FC est meilleure au jeune âge et a permis au BAP d'être plus résistant en comparaison avec les BAPs additionnés pour les deux modes (-5 et -25 % en mode NT et T respectivement), mais cette teneur est très néfaste à long terme. Ce constat est valable pour les deux modes de traitements ;
- Les BAPs élaborés ayant des UPV les plus proches du BAP(R) sont bien le BAP20LG en mode (NT) et BAP20LC en mode (T) ;
- Les plus faibles valeurs d'UPV pour les deux modes sont celles obtenues pour BAP40LG.

Effet du processus de traitement thermique :

Concernant la Porosité, on a pu constater:

- Une augmentation de P des BAPs à base de FC et diminution de P des BAPs à base des laitiers (LG ou LC) en comparaison avec BAP(R) ;
- Une P maximale avec 40% de FC (de l'ordre de 10% supérieure à celle du BAP(R)) ;
- Une P minimale avec du LC (de l'ordre de 36 % inférieure à celle du BAP(R)) ;
- Une augmentation des pertes d'humidité par évaporation d'eau (EE).

Concernant la résistance à la compression, on a pu constater:

Au jeune âge

- le traitement thermique a pu augmenter le niveau de la résistance à la compression des BAPs de 1.39 à 3.14 fois par rapport à celle obtenue avec le traitement standard au même âge ;
- Les valeurs des résistances au jeune âge des BAP(T) représentent 39 à 55 % par rapport à celles obtenues avec le traitement standard à l'âge de 28 j ;
- Le gain maximal de 55 % a été obtenu par BAP40FC.

A long terme (28 j)

- Les BAPs ont eu des chutes de résistances de l'ordre de 5 à 16 % par rapport à celles obtenues avec le traitement standard ;
- Le BAP20FC est le seul qui a acquis un gain de résistance (de l'ordre de 7 %) vu qu'il contient moins d'air occlus ($A_o = 4,5\%$).

A très long terme (180 j)

- Les chutes de résistances sont de l'ordre de 14 et 17 % pour BAP(R) et BAP(R)0.50 ;
- Elles sont très minimales pour les BAPs additionnés et sont de l'ordre de 1 à 5 % ;
- Le BAP20LC est le seul qui a eu un gain de résistance (de l'ordre de 9 %) et c'est le plus proche du BAP(R) (-10%).

Les corrélations qu'on a pu enregistrer pour les BAPs sont :

- L'étalement important ($D = 77$ cm) et la stabilité faible ($S > 10$ %) du BAP40FC les ont rendu le plus sensible à la ségrégation et au ressuage et a été le BAP qui a eu plus d'EE après étuvage ($EE > 10\%$) et par suite d'être le BAP le plus poreux ;
- Il existe une quasi-proportionnalité entre P et CAE, une porosité élevée correspond à une CAE élevée et vice versa. A cet effet, les constatations faites sont semblables pour ces deux paramètres ;
- L'augmentation d'EE entraîne systématiquement un accroissement de P et de CAE ;
- La finesse élevée du LC ($SSB = 4850$ cm²/g) et la faible quantité d'EE par rapport aux autres BAP traités ($EE < 7\%$) a permis au BAP40LC d'avoir une bonne compacité et d'être le BAP le moins poreux ;
- Le BAP40F était le BAP le plus étalé ($D = 77$ cm) et le moins stable ($S > 10$ %) à l'état frais ce qui l'a rendu le moins résistant à long terme ;
- La finesse a une conséquence positive sur la résistance car le LC ($SSB = 4850$ cm²/g), qui présente une finesse largement supérieure à celle du LG ($SSB = 2280$ cm²/g), a permis au BAP(LC) d'atteindre des niveaux de résistances élevés et très proches de celles du BAP(R) ;
- La corrélation P- R_{C28} n'existe plus dans le cas des BAPs ni pour les BAP(NT) ni pour les BAP(T);
- La corrélation R_{C28} - UPV n'existe plus dans le cas des BAP(T) qui ont subi une accélération de durcissement par rapport aux BAP(NT) témoins qui ont mûri dans des conditions normales où la corrélation est peu évidente. C'est la divergence de la nature des additions minérales utilisés ainsi que le taux de la porosité existant qui sont la raison.

3. BETON VIBRE et BETON AUTOPLAÇANT : COMPARAISON

3.1. Etat frais

A l'état frais, la comparaison ne peut pas être faite vu que les deux bétons possèdent des comportements totalement différents bien que les composants de base d'une formulation de BAP sont identiques à ceux du BV, par contre leurs proportions sont différentes. Le BAP a besoin d'obtenir des propriétés spécifiques à l'état frais pour qu'il se mette en place sans vibration. Ces propriétés peuvent être acquises par l'utilisation d'une importante quantité de fines et l'incorporation d'adjuvants (notamment les superplastifiants) [76]. Cependant, le BV est plastique et doit être mis en place avec vibration.

3.2. Etat durci

3.2.1. Porosité et capacité d'absorption d'eau

Les résultats des porosités et de la capacité d'absorption d'eau des BVs et des BAPs sont présentés sur les Figures IV.34 et IV.35 respectivement.

Globalement, les BAPs présentent des porosités supérieures à celles des BVs dans trois quarts des résultats. Ces résultats reviennent essentiellement à la manière de la mise en place des deux types de bétons (ç-à-d avec ou sans vibration) ce qui tend à donner des microstructures des bétons différentes. On peut aussi raisonnablement supposer que la porométrie dans les deux types de bétons est différente pareillement à la justification d'Assié [76].

L'effet du rapport E/C dans ce cas est important et distinct entre les deux bétons. Boel et al [217] ont étudié l'influence de quelques paramètres de composition sur la perméabilité au gaz du BAP et BV. Ils ont conclu que la perméabilité au gaz est plus ou moins 5 fois plus basse pour le BAP que pour le BV et que le paramètre le plus important semble être le rapport E/C et deuxièmement la quantité de la poudre. Ils ont estimé la porosité capillaire et ont pu trouver une bonne corrélation avec la perméabilité au gaz.

Dans les conditions normales, Robler et Older [200] exposent que les progrès de l'hydratation et la composition des produits d'hydratation formés (rapport E/C, rapport C/S des hydrates CSH) semblent dépendre du rapport E/C utilisé. Aux rapports E/C faibles le taux

d'hydratation est ralentie et les phases d'hydrate peuvent se former avec des teneurs en eau plus faibles mais avec des rapports C/S élevés.

Dans notre cas on a constaté que le rapport E/C =0.42 est beaucoup plus avantageux pour le BV que pour le BAP pour minimiser légèrement la porosité (d'environ 1%). Le rapport E/C =0.50 est très rentable pour le BV dans les cas de (T) où P est de 4 % moins par rapport à celle du BAP.

Concernant l'effet de la teneur, il apparait que 20% de LG et 40% de LC sont très favorables pour limiter la porosité des deux types de bétons. En mode NT, le BAP n'est moins poreux par rapport au BV qu'avec 40 % de LG (mais avec une faible différence de l'ordre de 1 %). En mode de traitement thermique, le BAP n'est moins poreux par rapport au BV qu'avec du LC avec une différence de 2 et 5 %.

Une bonne corrélation P – EE est obtenue pour le BV, alors que pour le BAP elle est moins bonne dans les deux cas de modes de traitements (Figure IV.36). Cette corrélation est de 1.7 et 2 fois bonne pour le BV que pour le BAP en mode NT et T respectivement (vu les facteurs de détermination R²).

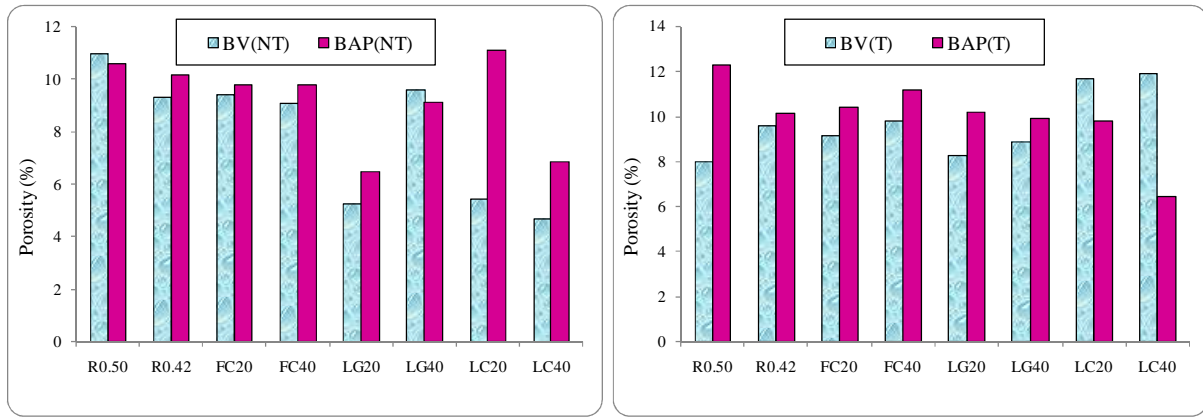
3.2.2. Résistance à la compression

La comparaison entre les résistances à la compression des deux types de bétons étudiés (BV et BAP) s'effectue en deux parties.

La première partie est consacrée aux bétons de références (sans additions) sur la base de l'influence des deux paramètres : rapport E/C et mode de traitement.

La deuxième partie est consacrée aux bétons élaborés (avec additions) sur la base de l'influence des trois paramètres : le mode de traitement, la nature et la teneur de l'addition.

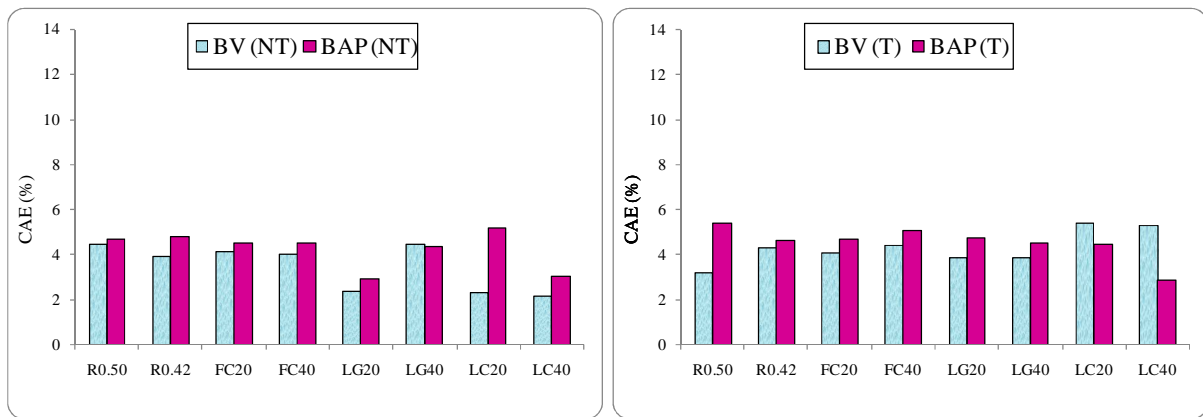
Les histogrammes des Figures IV.37 à IV.39 montrent toutes les valeurs de la résistance des deux bétons.



(a)

(b)

Figure IV.34. La porosité : BV et BAP. (a) Traitement normal (b) Traitement thermique

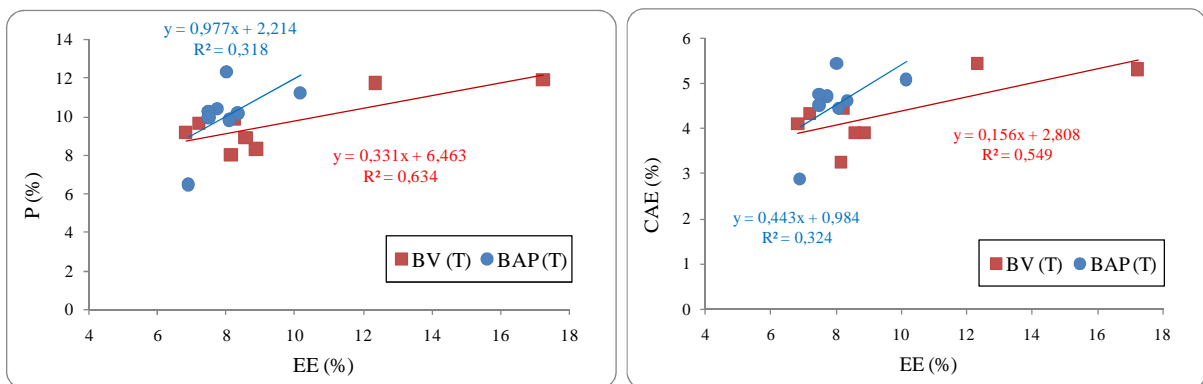


(a)

(b)

Figure IV.35. Capacité d'absorption d'eau: BV et BAP.

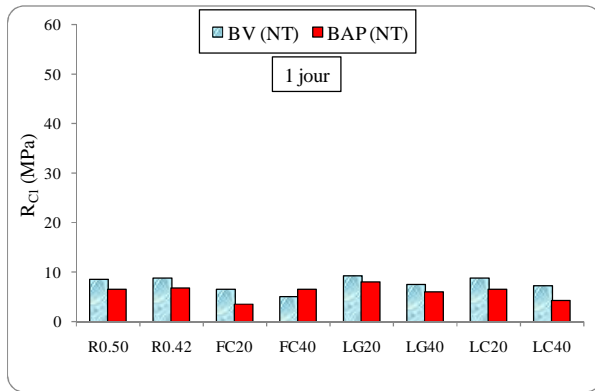
(a) Traitement normal (b) Traitement thermique



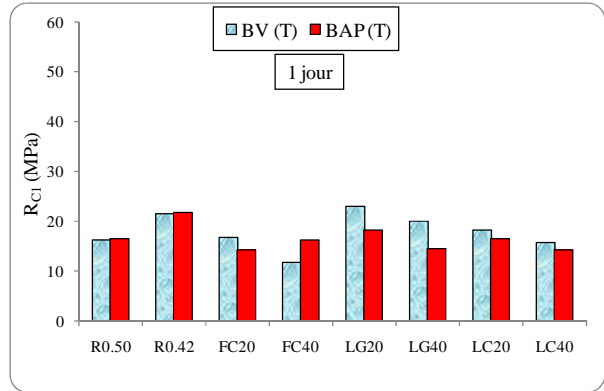
(a)

(b)

Figure IV.36. Corrélation P-EE et CAE-EE du BV et BAP. (a) Porosité (b) CAE

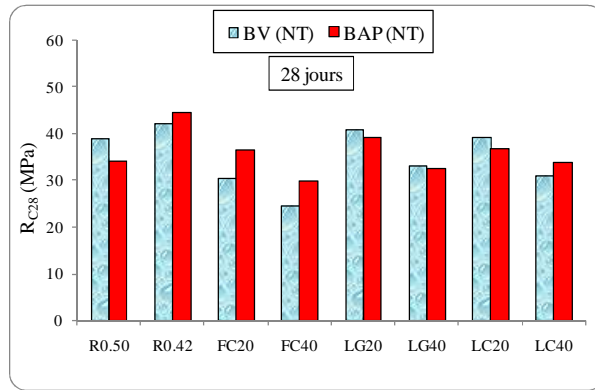


(a)

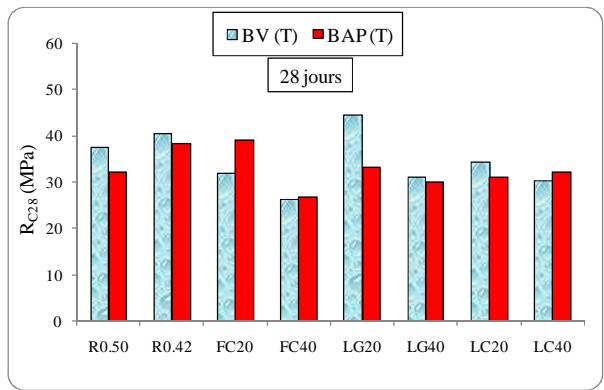


(b)

Figure IV.37. Résistance à la compression à l'âge de 1 jour : BV et BAP.

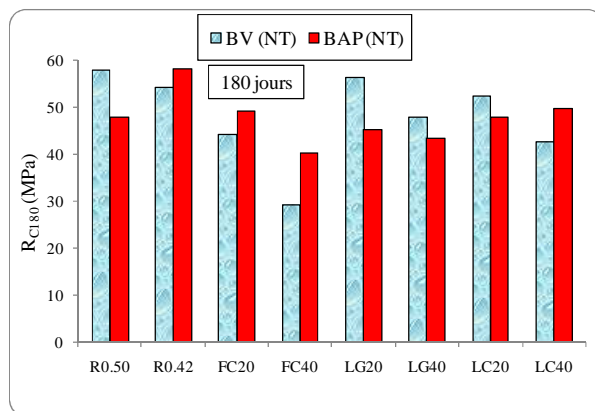


(a)

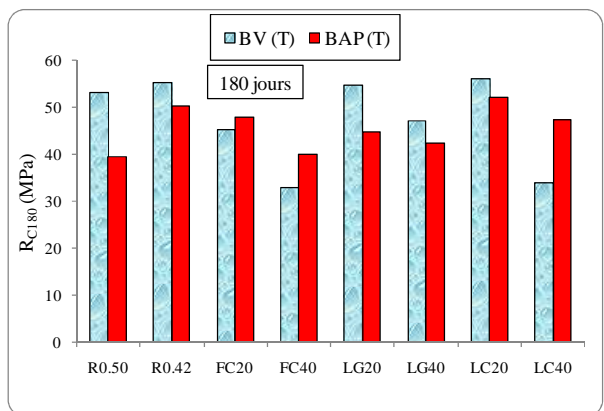


(b)

Figure IV.38. Résistance à la compression à l'âge de 28 jours : BV et BAP.



(a)



(b)

Figure IV.39. Résistance à la compression à l'âge de 180 jours : BV et BAP.

3.2.2.1. Bétons de références

3.2.2.1.1. Effet du rapport E/C

En mode standard (Figure IV.40-a), le BV est de 2 à 10 MPa plus résistant à tous les âges avec E/C=0.50 et le BAP n'a obtenu des résistances supérieures à celles du BV qu'avec E/C=0.42 à long terme (de 2 et 4 MPa).

En mode de traitement thermique et avec les deux rapports E/C (Figure IV.40-b), les résistances du BV et du BAP au jeune âge sont égales mais à long terme le BV est de 2 à 14 MPa plus résistant. Ce résultat nous a permis de conclure que pour le BV, le rapport E/C le plus adéquat est 0.50. Pour le BAP c'est le rapport E/C=0.42 qui est le plus approprié car l'existence du superplastifiant permet de réduire la quantité d'eau de gâchage nécessaire pour une mise en place aisée du mélange.

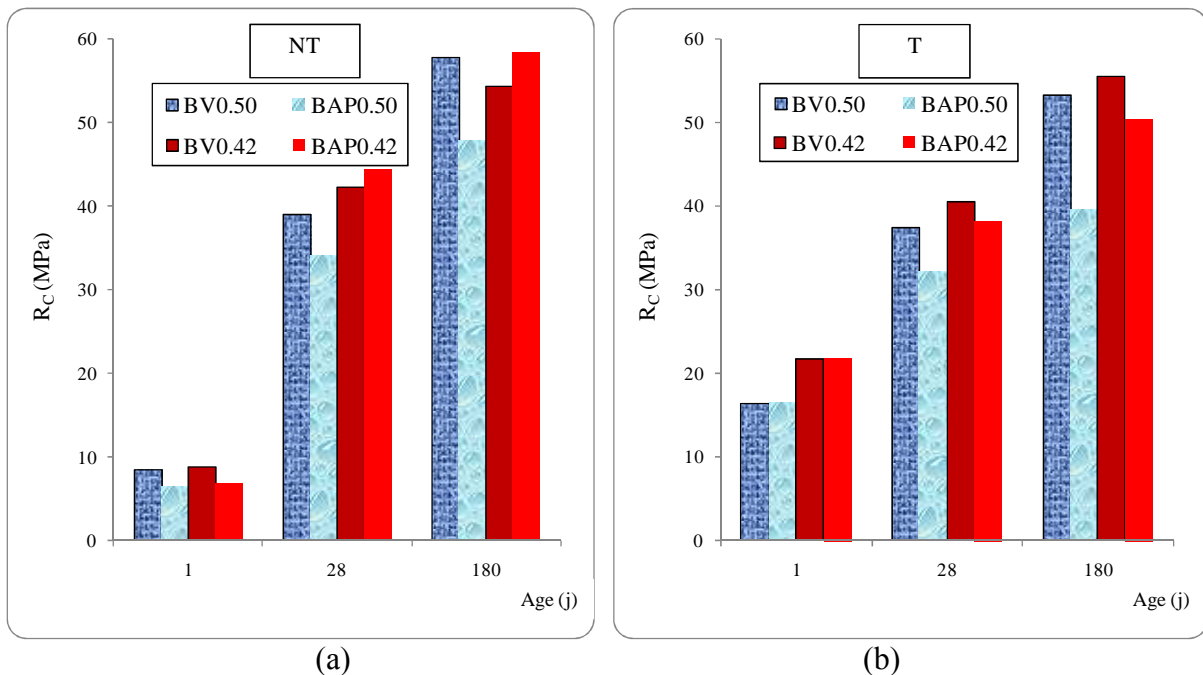


Figure IV.40. Effet du rapport E/C sur les résistances à la compression : BV(R) et BAP(R)

3.2.2.1.2. Effet du traitement thermique

Avec E/C=0.50 (Figure IV.41-a), le BV est de 2 à 14 MPa plus résistant que le BAP à toutes les échéances et avec les deux modes de traitement.

Avec E/C=0.42 (Figure IV.41-b), le BV est de 2 à 5 MPa plus résistant que le BAP à toutes les échéances en mode de traitement thermique mais uniquement au jeune âge en mode de traitement standard. Le BAP est plus résistant que le BV en mode de traitement standard à l'âge de 28 et à 180 jours.

Ce résultat confirme l'incompatibilité d'une quantité d'eau élevée avec une bonne résistance en traitement thermique à long terme. Le chauffage implique une évaporation de l'eau et cette évaporation augmente avec l'augmentation du rapport E/C. Ce phénomène est néfaste pour le déroulement normal de l'hydratation du ciment et par suite il se produit des chutes de résistances.

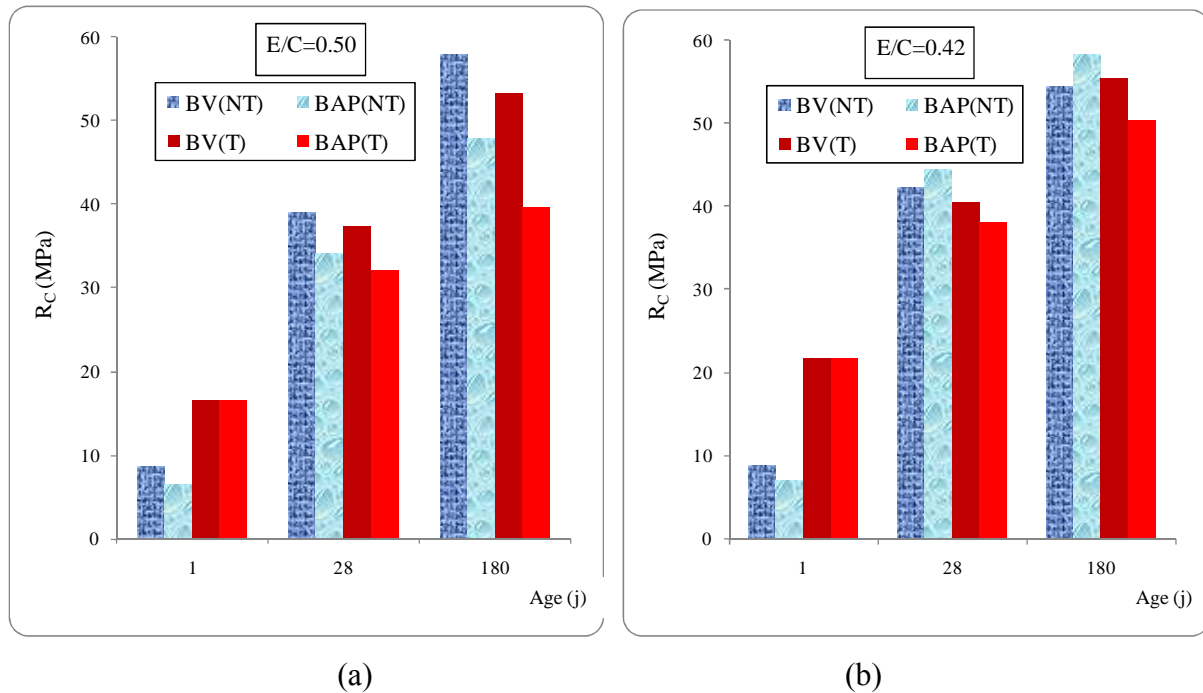


Figure IV.41. Effet du traitement thermique sur les résistances à la compression: BV(R) et BAP(R)

3.2.2.2. Bétons élaborés (additionnés)

3.2.2.2.1. Effet du traitement thermique

Avec du FC (Figure IV.42-a), sauf au jeune âge et avec 20% où le BV est de 3 MPa plus résistant, le BAP est de 1 à 11 MPa plus résistant que le BV à tous les âges et pour les deux modes de traitements et avec les deux teneurs. Ces résultats sont presque identiques à celles obtenues par Bosiljkov et al [218] qui ont montré qu'avec un rapport E/C de 0,43 et une teneur élevée de FC (250 kg/m^3), environ 10 MPa de plus peuvent être obtenues pour la résistance à la compression de BAP à l'âge de 28 jours, comparé au BV avec le même type de ciment portland et le même rapport E/C mais sans FC.

Avec du LG (Figure IV.42-b), le BV est aussi de 1 à 11 MPa plus résistant que le BAP à tous les âges et pour les deux modes de traitements et avec les deux teneurs.

Avec du LC (Figure IV.42-c), à l'exception à long terme (28 et 180 jours) et avec 40% où le BAP est de 2 à 13 MPa plus résistant, le BV est de 2 à 5 MPa plus résistant que le BAP à tous les âges et pour les deux modes de traitements et avec les deux teneurs.

3.2.2.2.2. *Effet de la teneur de l'addition*

Avec du FC, le béton le plus résistant au jeune âge dans les deux modes de traitements est le BV20 alors qu'à long terme c'est le BAP20. Au jeune âge et dans les deux cas de traitement, la teneur de 20% est adéquate pour le BV et la teneur de 40% est bonne pour le BAP. A long terme, la teneur de 20 % a permis d'avoir les bonnes résistances pour les deux bétons et avec les deux modes de traitement.

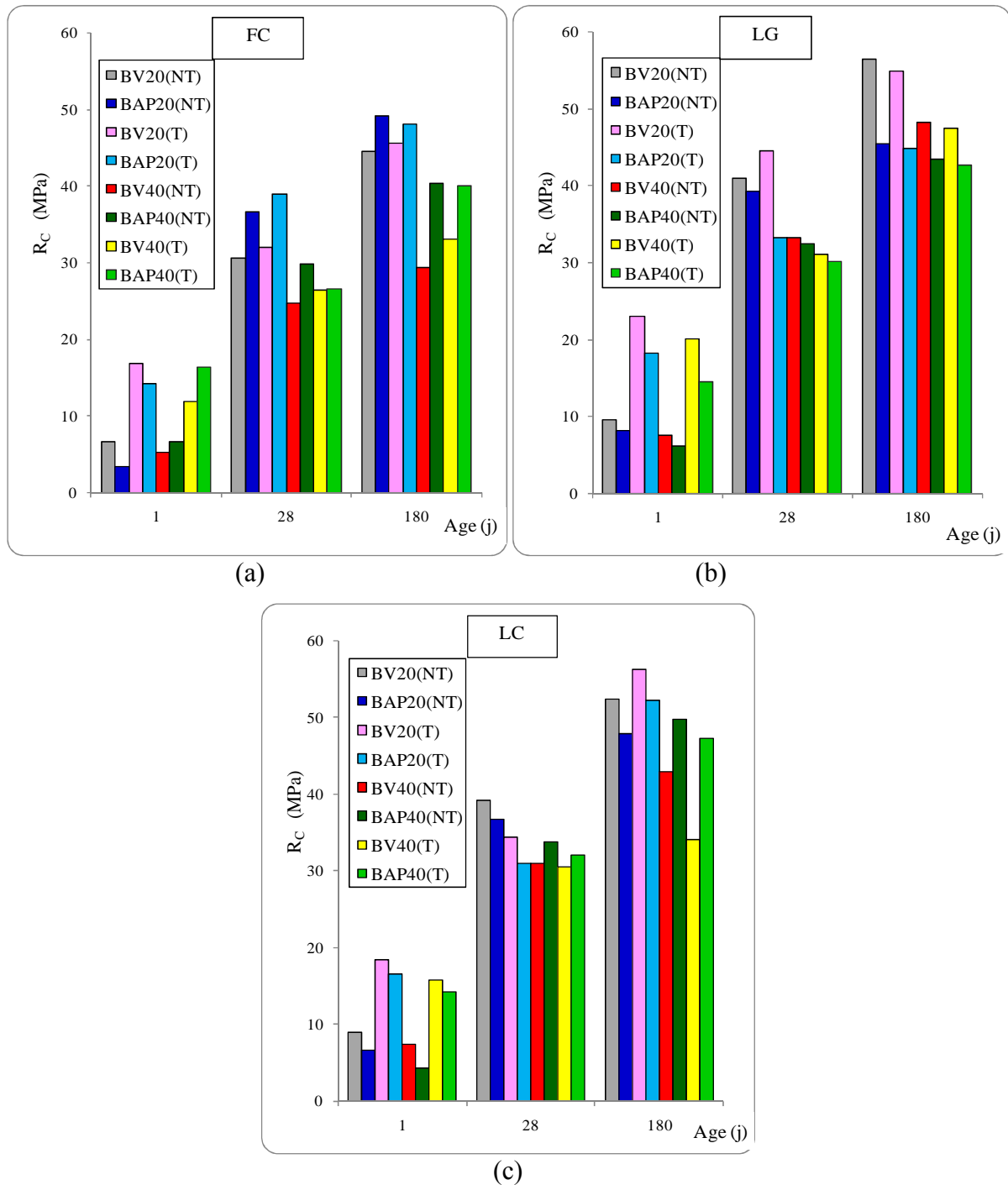


Figure IV.42. *Effet du traitement thermique et de la teneur de l'addition sur les résistances à la compression: BV et BAP*

Avec du LG, le béton le plus résistant à toutes les échéances et dans les deux modes de traitements est le BV20. La teneur de 20 % a permis d'avoir les bonnes résistances pour les deux bétons et avec les deux modes de traitement et à toutes les échéances.

Avec du LC, le béton le plus résistant à toutes les échéances et dans les deux modes de traitements est le BV20. Au jeune âge et à l'âge de 28 jours et dans les deux cas de traitement, la teneur de 20 % a permis d'avoir les bonnes résistances pour les deux bétons et avec les deux modes de traitement. A l'âge de 180 jours, la teneur de 20% est adéquate pour le BV et la teneur de 40% est la plus adaptée pour le BAP.

3.2.2.2.3. Effet de la nature l'addition

En mode de traitement normal et avec la teneur de 20% (Figure IV.43-a), le BV(LG) est le plus résistant à tous les âges.

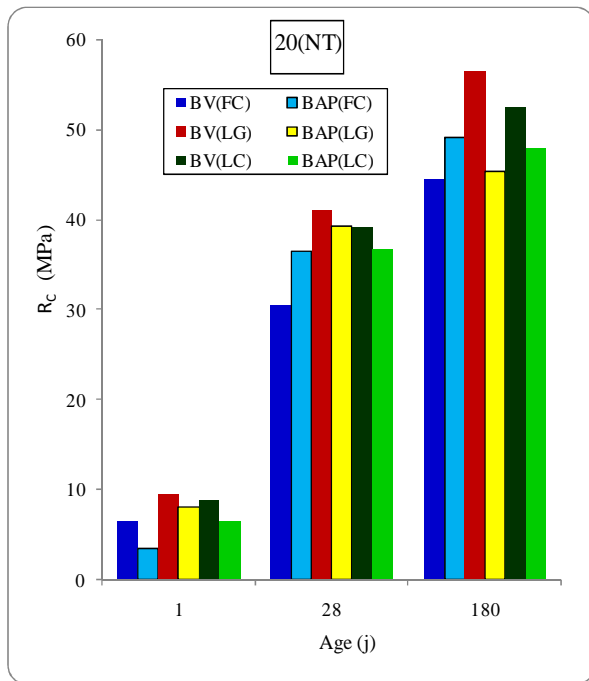
En mode de traitement thermique et avec la teneur de 20% (Figure IV.43-b), les bétons les plus résistants sont le BV(LG) à l'âge de 1 et 28 jours et le BV(LC) à l'âge de 180 jours.

Dans les deux modes de traitement et avec la teneur de 40% (Figure IV.43-c et IV.43-d), les bétons les plus résistants sont le BV(LG) au jeune âge et le BAP(LC) à long terme.

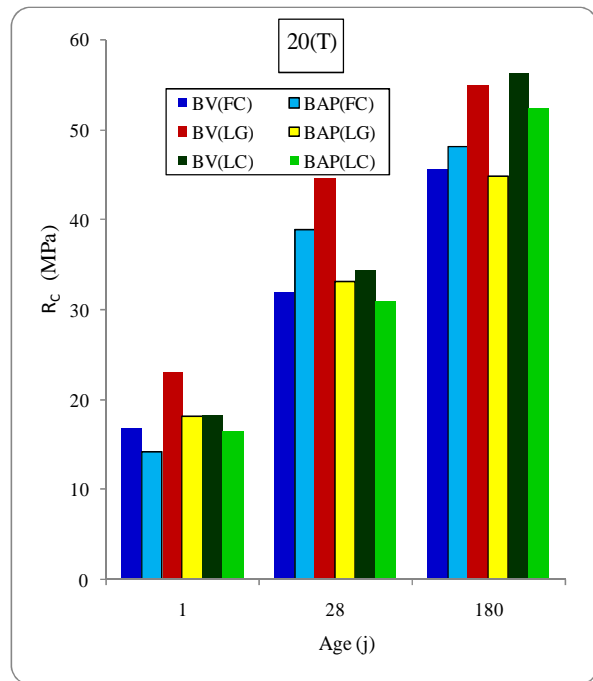
Ces résultats confirment les conclusions d'autres chercheurs sur les avantages du laitier dans le cas de durcissement du béton dans des conditions de cure à une température > 20 °C. Austin et al [219] ont démontré que l'utilisation du laitier avec 50 % dans un climat chaud typique des régions arides de l'Algérie peut produire un béton de haute qualité constamment et significativement mieux que le béton sans laitier en termes de résistance, de la perméabilité et de l'absorption, à condition qu'une certaine forme de cure humide ait été appliquée dans les 7 premiers jours.

Ces résultats nous permettent de conclure que :

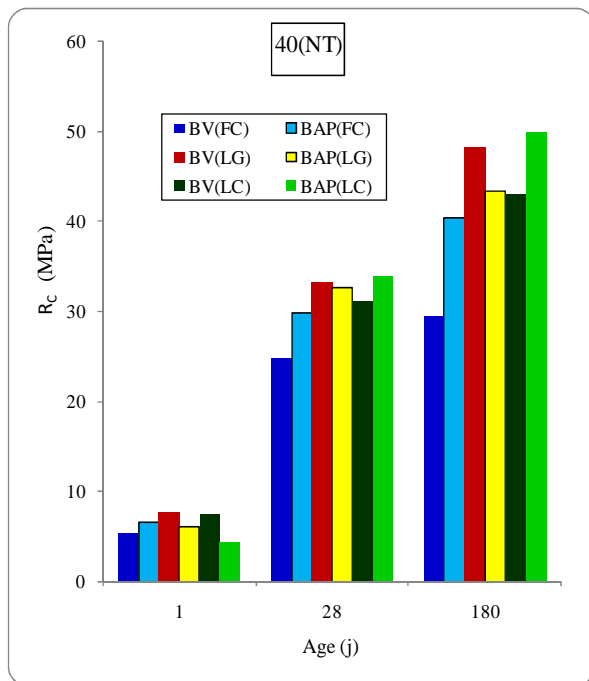
- L'utilisation du FC n'a pas beaucoup d'importance pour les deux types de bétons. Néanmoins, il est un peu bénéfique pour les BAPs avec une teneur de 40% au jeune âge et avec la teneur de 20% dans le cas du traitement thermique ;
- L'utilisation du LG est très bénéfique pour le BV alors que pour le BAP la teneur de 20% est plus rentable qu'avec 40% ;
- L'utilisation du LC est très avantageuse pour le BAP notamment avec la teneur de 40% et pour le BV avec 20% à très long terme.



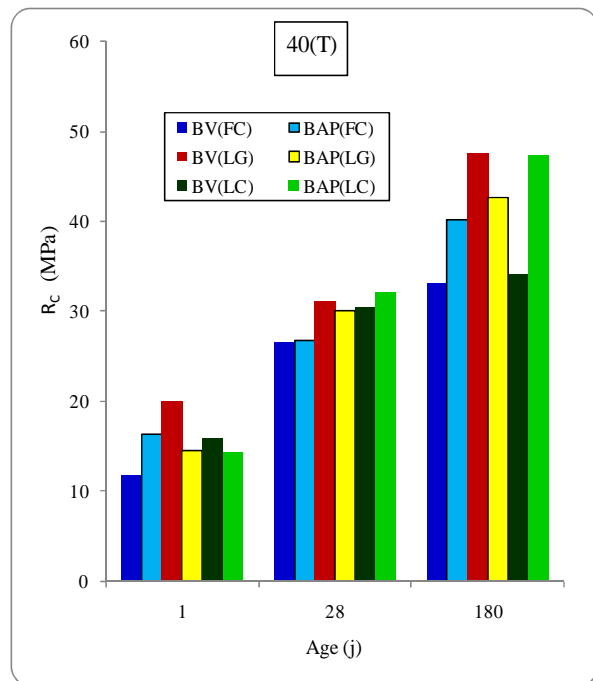
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure IV.43. Effet de la nature de l'addition sur les résistances à la compression :BV et BAP

3.2.3. Corrélation P - R_{C28}

Tous les résultats des porosités et des résistances dans les deux cas de traitements et des deux types de bétons sont présentés sur la Figure IV.44.

Les courbes de tendances obtenues montrent que la relation P-R_{C28} n'existe plus. L'incorporation des différentes additions à des teneurs différentes étant la cause.

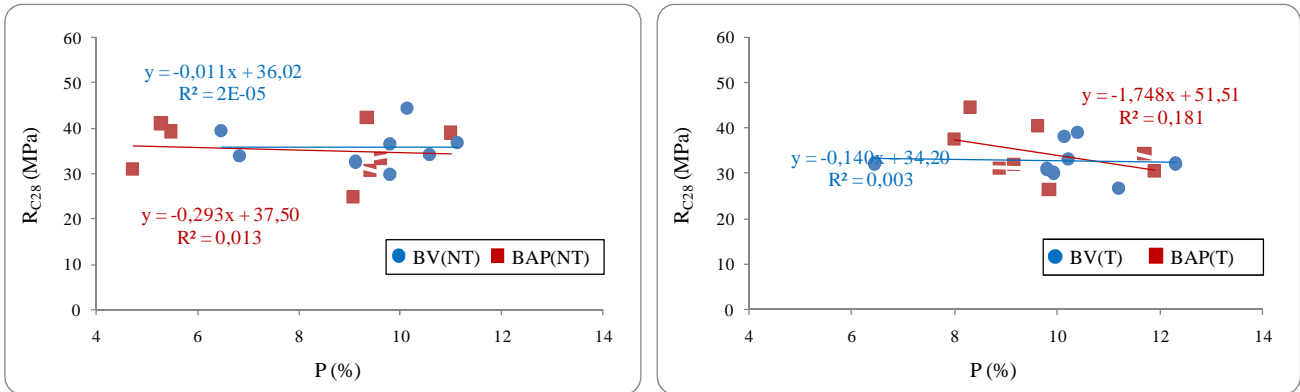


Figure IV.44. Corrélation P-R_{C28}: BV et BAP.

3.2.4. Essai d'auscultation sonore

Dans le cas du traitement normal, les BV présentent des UPV jusqu'à 234 m/s plus que celles obtenues par les BAPs, à l'exception avec LC40 où l'UPV du BAP est de 14 m/s supérieure à celle du BV.

En mode de traitement thermique, le BV(R)0.42 présente une UPV supérieure à celle du BAP(R). Pour les bétons élaborés, la nature de l'addition a une influence sur l'UPV et dépend du type de béton. Les UPV des BV(FC) sont 65 et 118 m/s inférieures que celles des BAP(FC) et les UPV des BV(LG) sont 170 et 213 m/s supérieures que celles des BAP(LG). Avec du LC, la teneur entre en jeu et l'UPV du BV est 75 m/s inférieure avec 20% et 44 m/s supérieure avec 40% par rapport à celles des BAPs. Ces résultats concordent avec celles obtenues par Seddik et al [214] qui ont présenté la relation entre la résistance à la compression et l'UPV des BV et de BAP et ont constaté que le mélange de BV a eu la valeur la plus élevée d'UPV en comparaison avec les UPV des BAP.

3.2.5. Corrélation R_C –UPV

Afin d'évaluer la relation R_C –UPV et faire une comparaison entre le BV et le BAP, nous avons présenté sur la Figure IV.47 l'évolution de R_{C28} en fonction de UPV à l'âge de 28 jours.

Les coefficients de corrélation obtenus n’atteignent pas la valeur qui nous permet de dire que la corrélation R_C –UPV existe d’une façon claire.

Dans le cas des BV(T), cette corrélation n’existe plus. Tandis que pour le cas du traitement standard du BV et dans le cas de traitement thermique du BAP, R^2 est proche de 0.8.

La nature et la teneur des additions utilisées et le taux de la porosité existante étant la cause. la configuration particulière de la disposition, de la nature et de la forme des hétérogénéités rencontrées au cours de la propagation donnera des paramètres de propagation spécifiques et non représentatifs du matériau. La porosité du béton traité est élevée et par suite elle affecte la propagation des ultrasons à travers la structure du matériau. Ces résultats sont en conformité avec ceux obtenus par Benouis et al [220] et Soltani et al [221].

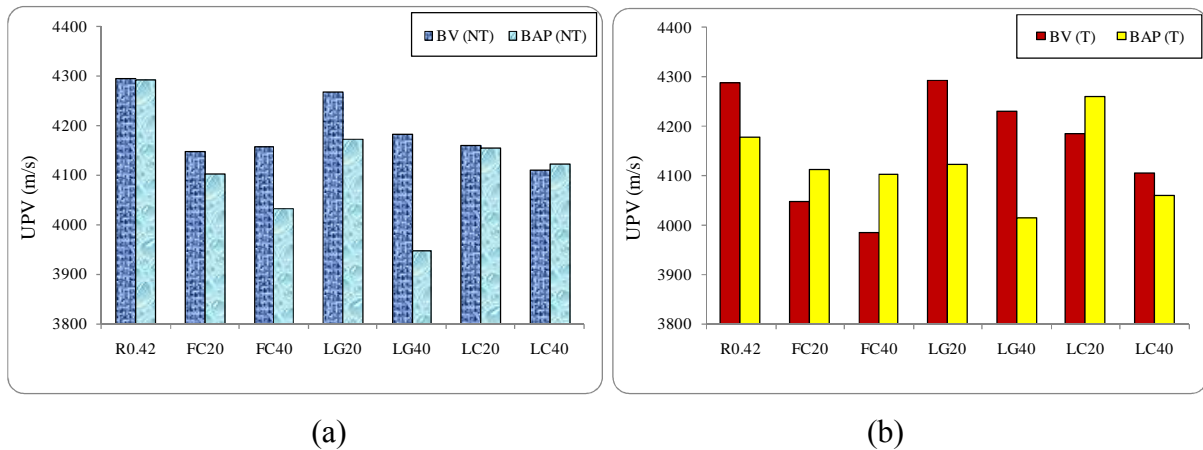


Figure IV.45. Vitesse de la propagation d’ultrasons (UPV) : BV et BAP.

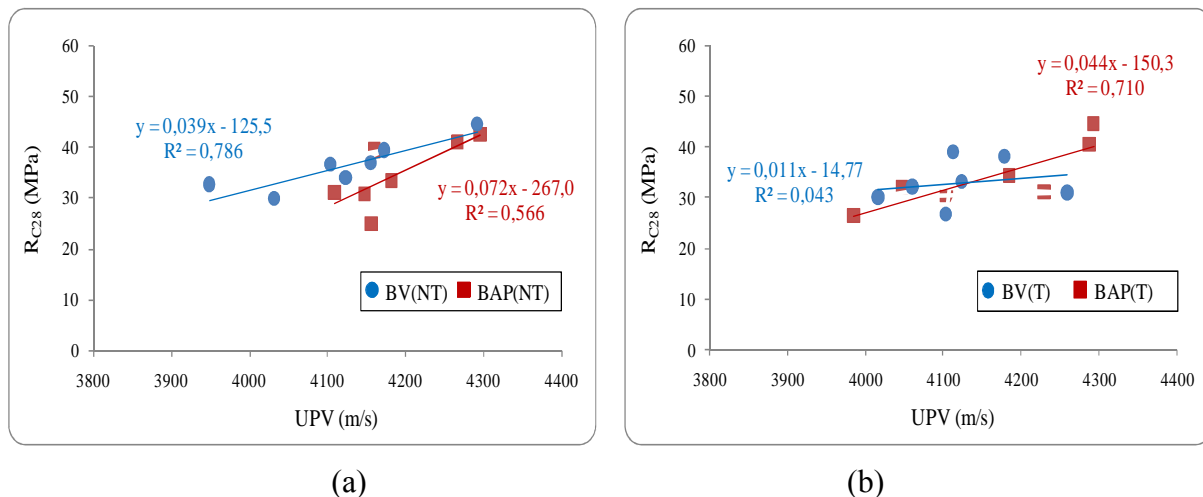


Figure IV.46. Corrélation UPV- R_{C28} : BV et BAP.

3.3. Conclusion

Cette partie a été consacrée à une comparaison entre les caractéristiques physico-mécaniques des BVs et des BAPs, ayant durci dans deux conditions, cas de conditions naturelles et un deuxième cas où le durcissement de ces bétons ait été accéléré par l'utilisation d'un cycle de traitement thermique adopté. Les conclusions suivantes peuvent être exprimées:

À l'état frais, La comparaison entre les BVs et les BAPs ne peut pas être effectuée vu que les deux types de bétons ont des comportements totalement différents.

A l'état durci, on peut noter ce qui suit:

Effet du rapport E/C :

- Du point de vue de la porosité (P), le rapport E/C =0.42 est beaucoup plus avantageux pour le BV que pour le BAP pour minimiser légèrement P ;
- Le rapport E/C =0.50 s'avère très rentable pour le BV dans les cas de (T) où (P) est de 4 % moins par rapport à celle du BAP ;
- En mode standard, le BV est de 2 à 10 MPa plus résistant à tous les âges avec E/C=0.50 et le BAP n'a obtenu des résistances supérieures à celles du BV qu'avec E/C=0.42 à long terme (de 2 et 4 MPa) ;
- En mode de traitement thermique et avec les deux rapports E/C, les résistances du BV et du BAP au jeune âge sont égales mais à long terme le BV est de 2 à 14 MPa plus résistant ;
- De point de vue de la résistance, le rapport E/C=0.50 semble plus adéquat pour le BV alors que E/C=0.42 est plus approprié pour le BAP ;
- En mode de traitement thermique, le BV(R)0.42 présente une UPV supérieure à celle du BAP(R).

Effet de la nature de l'addition:

- En mode de traitement normal et avec la teneur de 20%, le BV(LG) est le plus résistant à tous les âges ;
- En mode de traitement thermique et avec la teneur de 20%, les bétons les plus résistants sont le BV(LG) à l'âge de 1 et 28 jours et le BV(LC) à l'âge de 180 jours ;
- Dans les deux modes de traitement et avec la teneur de 40%, les bétons les plus résistants sont le BV(LG) au jeune âge et le BAP(LC) à long terme ;

- En mode de traitement thermique, pour les bétons élaborés, la nature de l'addition a une influence sur l'UPV et dépend du type de béton ;
- Les UPV des BV(FC) sont 65 et 118 m/s inférieures que celles des BAP(FC) et les UPV des BV(LG) sont 170 et 213 m/s supérieures que celles des BAP(LG) ;
- Avec du LC, la teneur entre en jeu et l'UPV du BV est 75 m/s inférieure avec 20% et 44 m/s supérieure avec 40% par rapport à celles des BAPs.

Effet de la teneur de l'addition:

- La teneur de 20% de LG et 40% de LC sont très favorables pour limiter la porosité des deux types de bétons ;
- En mode NT, le BAP n'est moins poreux par rapport au BV qu'avec 40 % de LG ;
- En mode de traitement thermique, le BAP n'est moins poreux par rapport au BV qu'avec du LC avec une différence de 2 et 5 % ;
- Avec du FC, en terme de résistance, la teneur de 20 % est très bénéfique par rapport à la teneur de 40 %, dans les deux modes de traitements pour les deux bétons et à toutes les échéances ;
- Avec du LG, la teneur de 20 % a permis d'avoir les bonnes résistances pour les deux bétons et avec les deux modes de traitement et à toutes les échéances ;
- Avec du LC, la teneur de 20 % offre un béton plus résistant au jeune âge et à l'âge de 28 jours et dans les deux modes de traitements pour les deux types de bétons. A l'âge de 180 jours, la teneur de 20% est adéquate pour le BV et la teneur de 40% est le plus adapté pour le BAP.

Effet du mode de traitement thermique:

- Avec $E/C=0.50$, le BV est de 2 à 14 MPa plus résistant que le BAP à tous les échéances et avec les deux modes de traitement ;
- Avec $E/C=0.42$, le BV est de 2 à 5 MPa plus résistant que le BAP à toutes les échéances en mode de traitement thermique mais uniquement au jeune âge en mode de traitement standard ;
- Le BAP est plus résistant que le BV en mode de traitement standard à l'âge de 28 et à 180 jours ;

- Avec du FC, sauf au jeune âge et avec 20% où le BV est plus résistant, le BAP est plus résistant que le BV pour les deux modes de traitements et avec les deux teneurs ;
- Avec du LG, le BV est aussi plus résistant que le BAP à tous les âges et pour les deux modes de traitements et avec les deux teneurs ;
- Avec du LC, à l'exception à long terme (28 et 180 jours) et avec 40% où le BAP est plus résistant, le BV est plus résistant que le BAP à tous les âges et pour les deux modes de traitements et avec les deux teneurs.

Les corrélations que peuvent être consignés sont :

- Une bonne corrélation P – EE est obtenue pour le BV, cependant elle est moins bonne dans le cas du BAP ;
- La relation P- R_{C28} n'existe plus pour les deux types de bétons (BV et BAP) ;
- La corrélation R_{C28} -UPV est très faible dans le cas des BV(T). Elle est peu évidente pour le BV dans le cas de traitement standard et elle est plus remarquable pour le BAP dans le cas du traitement thermique.

CONCLUSION

GENERALE

CONCLUSION GENERALE

A l'issue de ce travail, les points essentiels qu'on peut retenir sont :

- ✓ Le rapport E/C a une grande importance autant dans le cas du traitement thermique que dans le cas de traitement normal ;
- ✓ Globalement, l'incorporation des additions minérales dans les bétons traités thermiquement été plus ou moins avantageuse.
- ✓ La finesse et la nature réactive de l'addition minérale incorporée ont une importance primordiale en cas de traitement thermique ;
- ✓ La teneur adéquate de l'addition nécessite une étude approfondie ;
- ✓ L'accélération de durcissement des bétons additionnés en utilisant la technique de traitement thermique par un cycle d'étuvage ($T^{\circ} \text{ max} = 60^{\circ} \text{C}$ et durée totale de 24 heures) est très bénéfique où il a pu augmenter le niveau de la résistance au jeune âge de 1.5 à 3 fois, il a permis d'avoir jusqu'à 60% de la valeur de la résistance à 28 jours. A long terme, des gains de résistances (jusqu'à 9 %) ont été obtenues pour certains bétons et des chutes de résistances minimales pour d'autres bétons ($< -20\%$);
- ✓ Le LG a permis d'obtenir des bétons traités thermiquement de bonne qualité notamment avec 20 %, le LC avec 40 % est aussi rentable, alors que le FC n'a pas beaucoup d'importance en terme de résistance et doit être limitée à une teneur $< 20\%$;
- ✓ Le BAP est sans doute une meilleure solution pour une mise en œuvre aussi simple et rapide, mais pour avoir des performances égales ou supérieures à celle du BV il faut le formuler avec soin.

PERSPECTIVES

Parmi les perspectives de cette recherche, il est intéressant de mener des études sur la durabilité de bétons traités thermiquement. De nouvelles études pourront faire suite à ce travail tout en variant les paramètres de composition tels que la teneur en addition et la combinaison des additions. Il est intéressant aussi d'utiliser la méthode de maturité basée sur le principe de l'âge équivalent pour pouvoir estimer les résistances finales à 28 jours juste à la fin du cycle de traitement thermique.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES

- [1] **AFGC** : Association Française du Génie Civil Les BAP: *Recommandations provisoires pour l'emploi des bétons autoplaçants*. Janvier 2008. Disponible sur : <http://www.afgc.asso.fr/images/stories/pub/Recommandations-IV.AFGC-version-francaise.pdf>
- [2] **Ozawa K., Sakata N. and Okamura H.**, *Evaluation of Self-Compactibility of Fresh Concrete Using the Funnel Test*. Concrete Library of JSCE, (25) June 1995, pp. 59-75.
- [3] **NF EN 12350-9** : *Essai pour béton frais - Partie 9 : béton autoplaçant - Essai d'écoulement à l'entonnoir en V*, 2010.
- [4] **Boukni B.**, *Contribution à l'étude expérimentale du comportement thermomécanique des bétons autoplaçants*. Thèse Doctorat en science en Génie Civil. Université Mentouri Constantine, Juin 2012. 144p.
- [5] **Bethmont S.**, *Mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçants (BAP)*. Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2005.
- [6] **EFNARC**: *Specification and guidelines for self compacting concrete*. Mai 2005. Disponible sur <http://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf>
- [7] *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use*. May 2005.
- [8] **Sugamata T., Umezawa K. and Okazawa S.**, *A study of particle dispersing retention effect of polycarboxylate-based superplasticizers*. Transactions of NMB Central Research Laboratories - Japan, Vol. 13 : 7-14, 2000.
- [9] **Fares H.**, *Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplaçants exposés à une température élevée*. Thèse de doctorat de l'université de Cergy-Pontoise, 2009, 192 p.
- [10] **Elhilali A.**, *Etude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autoplaçants (BAP)- influence des fines calcaires et des fibres végétales*. Thèse de doctorat de l'université Cergy Pontoise 2009, 183 p.
- [11] **Baron J. and Ollivier J. P.**, *Les bétons: Bases et données pour leur formulation*. Edition Eyrolles, 1999.
- [12] **NF-EN-206-1** : *Béton - partie 1 : Spécification, performances, production et conformité*. AFNOR, *Indice de classement : P18-325-1*, Avril 2004.
- [13] **Pera J., Husson S. and Guilhot B.**, *Influence of finely ground limestone on cement hydration*. Cement and Concrete Composites, Vol. 21 N°2: 99-105, 1999.
- [14] **Domone P.L.**, *A review of the hardened mechanical properties of self compacting concrete*. Cement & Concrete Composites 29 (2007) 1–12.
- [15] **Billberg P.**, *Influence of filler characteristics on SCC rheology and early hydration*. Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, 23-25 Octobre 2001, pp. 285-294
- [16] **Felekoglu B., Yardimci M. and Baradan B.**, *A comparative study on the use of mineral and chemical types of viscosity enhancers in self-compacting concrete*. Proceeding of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (Pro 33), Reykjavik, Iceland: 446-456, 2003.
- [17] **Shi C., Wu Y., Shao Y. and Rieer M.**. *Comparison of two design approaches for self-consolidating concrete*. First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, ACBM Center : 349-354, 2002.
- [18] **Holschemacher K.**, *Hardened material properties of self-compacting concrete*. Journal of Civil Engineering and Management, Vol. 10, no 4 :261-266, 2004.

- [19] **Persson B.**, *A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete*. Cement and Concrete Research, Vol. 31, no 2 :193-198, 2001.
- [20] **Klug Y. and K. Holschemacher**. *Comparison of the hardened properties of self compacting concrete and normal vibrated concrete*. Proceeding of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (Pro 33), Reykjavik, Iceland: 596-607, 2003.
- [21] **Turcry P., Rozière E. and Loukili A.**, *Influence du volume de pâte et des additions sur le retrait de fissuration des bétons autoplacants*. XXII^{ème} Rencontres Universitaires de Génie-Civil, Grenoble, 2005.
- [22] **Pineaud A.**, *Contribution à l'étude des caractéristiques mécaniques des bétons autoplacants et application à l'industrie de la préfabrication*. Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2007, 271 p.
- [23] **Kolias S. and Georgiou C.**, The effect of paste volume and of water content on the strength and water absorption of concrete. Cement and Concrete Composites, Vol. 27, N°2 :211-216, 2005.
- [24] **De Larrard F. and Le Roy R.**, *Relation entre formulation et quelques propriétés mécaniques des bétons à hautes performances*. Materials and Structures, Vol. 25 : 464-475, 1992.
- [25] **Konig G., Holschemcher K., Dehn F. and Weie D.**, *Self-compacting concrete time development of material properties and bond behaviour*. Proceeding of 2nd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (Pro 33), Tokio, Japan : pp. 507-516, 2001.
- [26] **Vlastimil B.**, *Self-compacting alkali activated concrete for production of concrete elements*. 36th Conference on Our World in Concrete & Structures: 14 - 16 August 2011, Singapore. <http://cipremier.com/100036030>
- [27] **B. Felekoglu**. *Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case)*. Resources, Conservation and Recycling 51 (2007) 770–791. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.12.004>
- [28] **Ali-Boucetta T.**, *Contribution du laitier granulé et de la poudre de verre sur les propriétés d'écoulement et de durabilité des bétons autoplacants et de hautes performances*. Thèse de doctorat 3ème cycle. Université Badji Mokhtar-Annaba, 2014, 210 p.
- [29] **NF P18 -508** : *Additions pour béton hydraulique - Additions calcaires - Spécifications et critères de conformité, Indice de classement*, AFNOR, Juillet 1995.
- [30] **RILEM Technical Committee**. *Final report of RILEM TC 205-DSC: durability of self-compacting concrete*. Materials and Structures (2008) 41:225–23. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-007-9319-9>
- [31] **Barluenga G., Puentes J. and I. Palomar.**, *Early age monitoring of self-compacting concrete with mineral additions*. Construction and Building Materials 77 (2015) 66–73. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.033>
- [32] **Ramachandran V. S.**, *Cement with calcium carbonate addition*. 8th Proceedings of the International Congress, Chemistry of Cement, RIO DE JANEIRO, III, 1986, p.109-119.
- [33] **De Larrard F.**, *Construire en béton, l'essentiel sur les matériaux*. Presse de l'école nationale des Ponts et chaussées, ISBN 2-85978-366-0, Paris, 2002, 191 p.
- [34] **Ye G., Liu X., De Schutter G., Poppe A. M. and Taerwe L.**, *Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes*. Cement & Concrete Composites 29 (2007) 94–102. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.09.003>
- [35] **Benmarce A., Boudjehem H. and Bendjhaiche R.**, *Durability of Self-compacting concrete*. Advanced Materials Research Vol. 324 (2011) pp. 340-343
- [36] **Tragårdh J.**, *Microstructural features and related properties of self-compacting concrete*. Proceeding of first International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (Pro 7), Stockholm, Sweden: 175-186, 1999.

- [37] **Zhu W. and Gibbs J. C.**, *Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete*. Cement and Concrete Research, Vol. 35, N°8 : 1457-1462, 2005.
- [38] **NF EN 15167-1**. *Laitier granulé de haut-fourneau moulu pour utilisation dans le béton, mortier et coulis - Partie 1 : définitions, exigences et critères de conformité*, 2006.
- [39] **Behim M.**, *Sous produits industriels et développement durable : Réactivité, rôle et durabilité des laitiers d'El-Hadjar dans les matériaux à matrice cimentaire*. Thèse de doctorat d'état en cotutelle Université d'Annaba – INSA de Toulouse, France. 2005, 187 p.
- [40] **Zeghichi L.**, *Etude des bétons basiques a base des différents granulats*. Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider Biskra 2006, 162 p.
- [41] **Cherfa H. and Ait Mokhtar K.**, *Utilisation de granulats de laitier cristallisé comme matériau de construction en technique routière*. XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011, pp. 128-137.
- [42] **Laifa W., Behim M., Turatsinze A et Ali-Boucetta T.**, *Caractérisation d'un béton autoplaçant avec addition de laitier cristallisé et renforcé par des fibres de polypropylène et de diss*. Rev. Sci. Technol., Synthèse 29: (2014), pp. 100-110.
- [43] **Ali-Boucetta T., Behim M et Laifa W.**, *Etude comparative sur l'effet d'une même addition inerte ou chimiquement réactive sur les propriétés des bétons autoplaçants (cas des laitiers granule et cristallise)*. INVACO2 : Séminaire International, Innovation & Valorisation en Génie Civil & Matériaux de Construction, Rabat – Maroc / 23-25 novembre 2011.
- [44] **Gallias J. L., Kara-Ali R. and Bigas J. P.**, *The effect of fine mineral admixtures on water requirement of cement pastes*. Cement and Concrete Research, vol.30, n° 10, 2000, p.1543-1549. [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00380-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00380-X)
- [45] **Zhang X. and Han J.**. *The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste*. Cement and Concrete Research, vol.30, n° 5, 2000, p.827-830.
- [46] **Yahia A., Tanimura M and Shimoyama Y.**, *Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio*. Cement and Concrete Research, vol.35, n° 3, 2005, p.532-539. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.008>
- [47] **Diederich P.**, *Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaire sur le comportement autoplaçant du béton*. Thèse de doctorat INSA, Toulouse, France. 2010, 253 p.
- [48] **Beixing L., Mingkai Z., Yanwei F., Putao S. and Guoju KE.** *Self-compacting Concrete-filled Steel Tubes Prepared from Manufactured Sand with a High Content of Limestone Fines*. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed. Apr. 2011. <http://dx.doi.org/10.1007/s11595-011-0223-3>
- [49] **Neto S.N. and Campitelli V.C.**, *The influence of limestone additions on the rheological properties and water retention value of portland cement slurries*. ASTM Spec Tech Publ 1064 (1990)24±29. <http://books.google.dz/books?id=UY0Xbnya1-YC&printsec=frontcover&hl=fr#v=onepage&q&f=false>
- [50] **Esping O.**, *Early age properties of self-compacting concrete – Effects of fine aggregate and limestone filler*. Thesis of doctor of philosophy. Chalmers University of technology Göteborg, Sweden, 2007, 90 p.
- [51] **Gheorghe M., Saca N. and Radu L.**, *Correlations between filler type and the self compacted concrete properties*. Challenges, Opportunities and Solutions in Structural Engineering and Construction – Ghafoori (ed.) Taylor & Francis Group, London, 2010.
- [52] **Uysal M and Yilmaz K.**, *Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete*. Cement & Concrete Composites 33 (2011) 771–776. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.04.005>
- [53] **Nécira B., Guettala A. and Guettala S.**, *Effect of the viscosity modifying agent and the different mineral additions on rheology and Compressive strength of self-compacting Concrete*. Asian journal of civil engineering (BHRC) vol. 16, no. 1, 2015, pp. 111-126.

- [54] **Ferraris C. F.**, *Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete : State of the Art Report*. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, vol.104, n° 5, 1999, p.461-478.
- [55] **Khayat K. H.**, *Workability, Testing and performance of self-compacting concrete*. ACI Materials Journal, vol.96, n°3, 1999, pp. 346-352.
- [56] **SHI Y., TANIGAWA Y., MORI H. and KUROKAWA Y.**, *A study of effect of superfine powders on fluidity of cement paste*. Transactions of the Japan Concrete Institute, vol.20, n° 2, 1998, pp. 9-14.
- [57] **Ramanathan P., Baskar I., Muthupriya P. and Venkatasubramani R.**, *Performance of Self-Compacting Concrete Containing Different Mineral Admixtures*. KSCE Journal of Civil Engineering (2013) 17(2):465-472. <http://dx.doi.org/10.1007/s12205-013-1882-8>
- [58] **Lange F., Mörte H. and Rudert V.**, *Dense packing of cement pastes and resulting consequences on mortar properties*. Cement and Concrete Research, vol.27, n° 10, 1997, p.1481-1488.
- [59] **Boukendakdji O., Kenai S., Kadri E.H. and Rouis F.**, *Effect of slag on the rheology of fresh self-compacted concrete*. Construction and Building Materials 23 (2009) 2593–2598. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.029>
- [60] **Boukendakdji O., Kadri E. H; and Kenai S.**, *Effects of granulated blast furnace slag and superplasticizer type on the fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete*. Cement & Concrete Composites 34 (2012) 583–590. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.08.013>
- [61] **Ahari R. S., Erdem T. K. and Ramyar K.**, *Effect of various supplementary cementitious materials on rheological properties of self-consolidating concrete*. Construction and Building Materials 75 (2015) 89–98. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.014>
- [62] **Vejmelkova E., Keppert M., Grzeszczyk S., Skalinski B., Cerny R.**, *Properties of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin and blast furnace slag*. Construction and Building Materials 25 (2011) 1325–1331. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.012>
- [63] **Lawrence P.**, *Sur l'activité des cendres volantes et des additions minérales chimiquement inertes dans les matériaux cimentaires*. Thèse de doctorat, Université Paul-Sabatier, Toulouse, France, 2000.
- [64] **Jones M. R., Zheng L. and Newlands M.D.**, *Estimation of the filler content required to minimise voids ratio in concrete*. Magazine of Concrete Research, Vol. 55, N°2 :193-202, 2003.
- [65] **Bessa-Badreddine A.**, *Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques mécaniques et de durabilité des mortiers*. Thèse de doctorat en génie civil université de Cergy Pontoise, juin 2004, 236 p.
- [66] **Torben C. H.**, *Long-term strength of high fly ash concretes*. Cement and Concrete Research, vol.20, n° 2, 1990, p.193-196.
- [67] **Gutteridge W. A. et Daziel, J. A.**, *Filler cement: the effect of the secondary component on the hydration of Portland cement*. Cement and Concrete Research, vol.20, n° 5, 1990, pp. 778-782.
- [68] **Neville, A. M.**, *Propriétés des Bétons*, Édition Eyrolles, Paris, 2000, 806 p.
- [69] **Caré S., Linder R., Baroghel-Bouny V., De Larrard F. et Charonnat Y.**, *Effet des additions minérales sur les propriétés d'usage des bétons – Plan d'expérience et analyse statique*. LCPC, Ouvrages d'art OA 33, 2000, p.102.
- [70] **Menadi B., Kenai S. and Kouider Djelloul O.**, *Properties of Fresh Self-Compacting Concrete Containing Slag*. 10th International Congress on Advances in Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey. 17-19 October 2012
- [71] **Pandey S. P. and Sharma R. L.**, *The influence of mineral additives on the strength and porosity of OPC mortar*. Cement and Concrete Research, vol.30, n° 1, 2000, pp. 19-23.

- [72] **Ramezani pour A. A. and Malhotra V. M.**, *Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume*. Cement and Concrete Composites, vol.17, n° 2, 1995, pp. 125-133.
- [73] **Thomas M. D. A. and Bamforth P. B.**, *Modelling chloride diffusion in concrete. Effect of fly ash and slag*. Cement and Concrete Research, vol.29, n° 4, 1999, pp. 487-495.
- [74] **Gibbs J.C. and Zhu W.**, *Strength of hardened self-compacting concrete*. Proceedings of First international RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suede 1999, pp. 199-209.
- [75] **Petersson O.**, *Limestone powder as filler in self-compacting concrete - frost resistance and compressive strength*. Proceeding of 2nd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japan: 277-284, 2001.
- [76] **Assié S.**, *Durabilité des bétons autoplaçants*, Thèse de doctorat INSA, Toulouse, France, 2004, 249 p.
- [77] **Nikbin I.M., Beygi M.H.A., Kazemi M.T., Vaseghi Amiri J., Rabbanifar S., Rahmani E. and Rahimi S.**, *A comprehensive investigation into the effect of water to cement ratio and powder content on mechanical properties of self-compacting concrete*. Construction and Building Materials 57 (2014) 69–80.
- [78] **S. Bensebti**. *Formulation et Propriétés des Bétons Autoplaçants à Base de Matériaux Locaux*. Thèse de doctorat de l'université Mentouri – Constantine, 2008, 129 p.
- [79] **Boudchicha A.**, *Utilisation des additions minérales et des adjuvants fluidifiants pour l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons*. Thèse de Doctorat d'état en Génie Civil. Université Mentouri Constantine, Juin 2007. 249p.
- [80] **Shi H. S., Xu B. W. and Zhou X. C.**, *Influence of mineral admixtures on compressive strength, gas permeability and carbonation of high performance concrete*. Construction and Building Materials, vol.23, n° 5, 2009, pp.1980-1985.
- [81] **Comité Euro-International du Béton**, *A Guide to the Comité Euro-International du Béton*, n° 225, 1996, 82 p.
- [82] **Boel V., Audenaert K. and De Schutter G.**, *Characterization of the pore structure of hardened self-compacting concrete*. 12th International Congress on the Chemistry of Cement, Canada, Montreal, 2007.
- [83] **Boel V., Audenaert K., De Schutter G., Heirman G., Vandewalle L., Desmet B. and Vantomme J.**, *Transport properties of self compacting concrete with limestone filler or fly ash*. Materials and Structures (2007) 40:507–516. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-006-9159-z>
- [84] **Buil, M. et Ollivier, J.P.**, *Conception des bétons : la structure poreuse. Durabilité des bétons*, sous la direction de Baron. J et Ollivier. J.P., Presse de l'ENPC, 1992, pp.57-99.
- [85] **Oliveira L.A.P., Gomes J.P.C. and Pereira C.N.G.**, *Study of sorptivity of self-compacting concrete with mineral additives*. Journal of Civil Engineering and Management, 12:3, 215-220. <http://dx.doi.org/10.1080/13923730.2006.9636395>
- [86] **Zhu W., Quinn J. et Bartos P. J. M.**, *Transport properties and durability of self-compacting concrete*. Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japan, 2001, pp.451-458.
- [87] **Malhotra M. and Carino N.J.**, editors. *Handbook on non destructive testing of*. Francis and Taylor e-Library, 2nd edition, 2006.
- [88] **Bungey J.H., Millard S.G. and Grantham M. G.**, *Testing of concrete in structures*. Francis and Taylor e-Library, 4th edition, 2006, 334 p.
- [89] **Hannachi S., Guetteche M. N.**, *Application of the Combined Method for Evaluating the Compressive Strength of Concrete on Site*. Open Journal of Civil Engineering, 2012, 2, 16-21. <http://dx.doi.org/10.4236/ojce.2012.21003>

- [90] **NF P 18-417**: Béton - Mesure de la dureté de surface par rebondissement à l'aide d'un scléromètre. Décembre 1989.
- [91] **NF P 18-418**: Auscultation sonore ; mesure du temps de propagation d'ondes soniques dans le béton. Décembre 1989.
- [92] **NF-EN-12504-4** : Essais pour les bétons dans les structures - partie 4: détermination de la vitesse de propagation du son, 2005.
- [93] **ASTM-C597-02**. *Standard test method for pulse velocity through concrete*. Normalisation de l'American Society of Testing Materials, 04.02, feb. 2003.
- [94] **Chekroun M.**, *Caractérisation mécanique des premiers centimètres du béton avec des ondes de surface*. Thèse de Doctorat au LCPC – Nantes, 2008, 149 p.
- [95] **Popovics J.S.**, *Comment on "Determination of elastic constants of a concrete specimen using transient elastic waves*. [J. Acoust. Soc. Am. 98, 2142-2148 (1995)]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 100 (5) :3451–3453, 1996.
- [96] **Punurai W., Jarzynski J., Qu J., Kurtis K.E. and Jacobs L.J.**, *Characterisation of entrained air voids in cement paste with scattered ultrasound*. *NDT&E Int.*, 39 :514–524, 2006.
- [97] **Chaix J.F., Garnier V. and Corneloup G.**, *Ultrasonic wave propagation in heterogeneous solid media : Theoretical analysis and experimental validation*. *Ultrasonics*, 44(200-210), 2006.
- [98] **Vergara L., Miralles R., Gosalbez J., Juanes F.J., Ullate L.G., Anaya J.J., Hernandez M.G. and Izquierdo M.A.G.**, *NDE ultrasonic method to characterise the porosity of mortar*. *NDT&E International*, 34 :557–562, 2001.
- [99] **Philippidis T.P. and Aggelis D.G.**, *Experimental study of waves dispersion and attenuation in concrete*. *Ultrasonics*, 43 :584–595, 2005.
- [100] **Aggelis D.G. and Shiotani T.**, *Experimental study of surface wave propagation in strongly heterogeneous media*. *J. Acoust. Soc. Am* EL, 122(5) :EL151–E1157, 2007.
- [101] **Aggelis D.G. and Shiotani T.**, *Surface wave dispersion in cement-based media : Inclusion size effect*. *NDT&E Int.*, 41 :319–325, 2008
- [102] **Ohdaira E. and Masuyama N.**, *Water content and its effects on ultrasound propagation in concrete*. *Ultrasonics*, 38 :546–552, 2000.
- [103] **Villain G., Derobert X., Abraham O., Chekroun M., Coffec O. and Durand O.**, *Complémentarités de techniques non destructives pour déterminer les propriétés de différents bétons hydrauliques*. In Actes des journées COFREND, Toulouse, France, May 2008.
- [104] **Panzer T. H., Christoforo A. L., Cota F. P., Borges P. H. R. and Bowen C. R.**, *Advances in Composite Materials - Analysis of Natural and Man-Made Materials. Chapitre 17: Ultrasonic Pulse Velocity Evaluation of Cementitious Materials*. Book edited by Pavla Těšinová, September 9, 2011. <http://dx.doi.org/10.5772/17167>
- [105] **Trtnik G., Kavcic F. and Turk G.**, *Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks*. *Ultrasonics* Vol. 49, (2009) pp. 53–60. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultras.2008.05.001>
- [106] **Demirboga R., Türkmen I. and Karako M.B.**, *Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixed concrete*. *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 12, (2004) pp. 2329–2336. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.017>
- [107] **Zülfü Ç. U, Kazım T. and Mehmet K.**, *Effect of Mineral Admixtures on the Correlation between Ultrasonic Velocity and Compressive Strength for Self-Compacting Concrete*. *Russian Journal of Nondestructive Testing* 2008; 44 (5): 367–374. <http://dx.doi.org/10.1134/S1061830908050100>

- [108] **Popovics S.**, *Analysis of the Concrete Strength Versus Ultrasonic Pulse Velocity Relationship*, In: American Society for Nondestructive Testing, 12th of December 2010, Available from: <http://www.asnt.org/publications/materialseval/basics/feb01basics/feb01basics.htm>
- [109] **Ikpong A.A.**, *The relationship between the strength and non-destructive parameters of rice husk ash concrete*. Cement and Concrete Research, Vol. 23 (1993) pp. 387-398. [http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(93\)90104-H](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(93)90104-H)
- [110] **Venuat M.**, *La pratique des ciments et des bétons*. Editions du Moniteur des travaux publics du bâtiment, 1976, 631 p.
- [111] **Singh R., Saini L., Sharma T.**, *Curing of concrete: a technical study to increase rate of curing*. International Journal of Advanced Engineering Technology. Vol. V, Issue I, Jan.-March 2014, pp. 49-53
- [112] **Leklou N.**, *Contribution à la connaissance de la réaction sulfatique interne*. Thèse de doctorat de l'université de Paul Sabatier - Toulouse III. 2008, 210 p.
- [113] **NF EN 13369**. *Règles communes pour les produits préfabriqués en béton*. 2004.
- [114] *Conception et réalisation des ouvrages avec les produits structuraux en béton G 58*. Collection Technique Cimbéton. Édition, septembre 2004. www.infociments.fr/telecharger/CT-G58.1-25.pdf
- [115] **Chanvillard G. et Laplante P.**, *Chapitre 9 : Viser une résistance à court terme pour tenir les délais de fabrication, dans : "Les Bétons bases et données pour leur formulation"*, Eyrolles. 1997.
- [116] **Ma W. and Sample D.**, *Calorimetric study of cements blends containing fly ash, silica fume and slag at elevated temperatures*. Cement Concrete and Aggregates, Vol. 16, 1994, pp. 93-99
- [117] **Hyvert N.**, *Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton*. Thèse de doctorat de l'université Paul Sabatier – Toulouse III. 2009, 225 p.
- [118] **Kjellsen K.O., Detwiler R.J. and Gjorv O.E.**, *Pore structure of plain cement pastes hydrated at different temperatures*. Cement and Concrete Research, Vol. 20, 1993, pp. 927-933.
- [119] **Klieger, P.**, *Some Aspects of Durability and Volume Change of Concrete for Prestressing*, PCA Research and Development Laboratories, Research Department Bulletin 118, vol. 2, No. (3), 1960, pp. 2-12. http://www2.cement.org/pdf_files/RX118.pdf
- [120] **Goto S. and Roy D. M.**, *The effect of w/c ratio and curing temperature on the permeability of hardened cement paste*. Cement and Concrete Research. Vol. II, 1981, pp. 575-579. [http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(81\)90087-9](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(81)90087-9)
- [121] **Marsh B.K., Day R.L., Bonner D.G.**, *Pore structure characteristics affecting the permeability of cement paste containing fly ash*. Cement and Concrete Research, Vol. 15, 1985, pp. 1027-1038.
- [122] **Odler I. and Koster H.**, *Investigation on the structure of fully hydrated portland cement and tricalcium silicates pastes. III. Specific surface area and permeability*. Cement and Concrete Research, Vol. 21, 1991, pp. 975-982.
- [123] **Jennings H.M. and Thomas J.J., Gevrenov J. S., Constantinides G., Ulm F. J.**, *A multi-technique investigation of the nanoporosity of cement paste*. Cement and Concrete Research. Cement and Concrete Research 37 (2007) 329–336. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.021>
- [124] **Kjellsen K.O., Detwiler R.J. and Gjorv O.E.**, *Development of microstructures in plain cement pastes hydrated at different temperatures*. Cement and Concrete Research, Vol. 21, 1991, pp. 179-189.
- [125] **Colleparidi M.**, *A State-of-the-Art Review on Delayed Ettringite Attack on Concrete*. Cement and Concrete Composites. Volume 25, 2003, pp. 401-407. [http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00080-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00080-X)
- [126] **Daminot D. and Glasser F.P.**, *Thermodynamic investigation of the CaO-Al₂O₃-CaSO₄-H₂O system at 50 °C and 85 °C*. Cement and Concrete Research, Vol. 22, 1992, pp. 1179-1191.

- [127] **Mehta P.K. and Monteiro P.J.M.**, *Concrete Microstructure, Properties and Materials*. 3rd edition. Chapter 12, 2006, pp. 478-479;
- [128] **Scrivener K. L., Damidot D. and Famy C.**, *Possible Mechanisms of Expansion of Concrete Exposed to Elevated Temperatures During Curing (Also Known as DEF) and Implications for Avoidance of Field Problems*. Cement, Concrete, and Aggregates, CCAGDP, Vol. 21, No. 1, June 1999, pp. 93–101.
- [129] **Ramlochan T., Zacarias P., Thomas M.D.A. and Hooton R.D.** *The Effects of Pozzolands and Slag on the Expansion of Mortars Cured at Elevated Temperature, Part I: Expansive Behaviour*. Cement and Concrete Research, Volume 33, 2003, pp. 807-814. [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01066-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01066-9)
- [130] **Kelham S.**, *The effect of cement composition and fineness on expansion associated with delayed ettringite formation*. Cement and Concrete Composites 18 (3) (1996) 171–179. [http://dx.doi.org/10.1016/0958-9465\(95\)00013-5](http://dx.doi.org/10.1016/0958-9465(95)00013-5)
- [131] **Hanson, J. A.**, *Optimum Steam Curing Procedure in Precasting Plants*. Proc., Journal of the American Concrete Institute, Illinois, USA, 1963, pp. 75-100. http://www2.cement.org/pdf_files/DX062.pdf
- [132] **Erdogdu S. and Kurbetci S.**, *Optimum Heat Treatment Cycle for Cements of Different Type and Composition*, Cement and Concrete Research, vol. 28, No. (11), 1998, pp. 1595-1604.
- [133] **Saul A. G. A.**, *Principles Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure*. Magazine of Concrete Research, vol. 2, No. (6), 1951, pp. 127-140.
- [134] **Shidler, J. J. and Chamberlin, W. H.**, *Early Strength of Concrete as Affected by Steam Curing Temperatures*. Proc., ACI Journal, vol. 46, No. (6), 1949, pp. 273-283.
- [135] **Higginson, E. C.**, *Effect of Steam Curing on the Important Properties of Concrete*, Proc., ACI Journal, vol. 58, No. (3), 1961, pp. 281-298.
- [136] **Khatib R.**, *High-Strength, Steam-Cured Self-Consolidating Concrete for Precast, Prestressed Applications*. Mémoire de maîtrise en sciences appliquées Génie Civil. Université de Sherbrooke (Québec), Canada. 2009, 172 p.
- [137] **Mironov S. A.**, *Some Generalizations in Theory and Technology of Acceleration of Concrete Hardening*, Highway Research Board Special Report, Issue Number: 90, 1966, pp. 465-474.
- [138] **Alexanderson J.**, *Strength Losses in Heat Cured Concrete*, Proc. Swedish Cement and Concrete Research Institution, vol. 43, 1972, Stockholm.
- [139] **Mamillan M.**, *Recherches expérimentales sur l'accélération du durcissement du béton par le chauffage*. Annales de l'ITBTP (F) 1970, n°267, ET 268.
- [140] **Portland Cement Association**, *Design and Control of Concrete Mixtures*, 358 p.
- [141] **Mamillan M.**, *L'accélération du durcissement du béton par la chaleur, l'influence des conditions de traitements et de la composition sur la qualité du béton*. Annales de l'ITBTP, n° 302, 1973, 2006, p. 15-28.
- [142] **Cassagnabère F., Mouret M., Escadeillas G., Broilliard P., Bertrand A.**, *Metakaolin, a solution for the precast industry to limit the clinker content in concrete: Mechanical aspects*. Construction and Building Materials 24 (2010) 1109–1118. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.032>
- [143] **Erdogdu S. and Kurbetci S.**, *Optimum Heat Treatment Cycle for Cements of Different Type and Composition*. Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 11, 1998, pp. 1595–1604. [10.1016/S0008-8846\(98\)00134-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00134-3)
- [144] **Ba M.F., Qian C.X., Guo X., Han X.Y.**, *Effects of steam curing on strength and porous structure of concrete with low water/binder ratio*. Construction and Building Materials 25 (2011) 123–128. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.049>

- [145] **Ba M., a, Qian C.**, *Evolution of Capillary Porous Structure in Steam Curing Concrete with Mineral Admixtures*. *Advanced Materials Research Vols. 450-451 (2012) pp 3-7*. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.450-451.3>
- [146] **Erdem T.K., Turanlı L., Erdogan T.Y.**, *Setting time: An important criterion to determine the length of the delay period before steam curing of concrete*. *Cement and Concrete Research* 33 (2003) 741–745. [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01058-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01058-X)
- [147] **Türkel S., Alabasb V.**, *The effect of excessive steam curing on Portland composite cement concrete*. *Cement and Concrete Research* 35 (2005) 405– 411. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.038>
- [148] **Dreux G. et Festa J.**, *Nouveaux guide du béton et de ces constituants*. 8^e Edition Eyrolles, 3^e tirage, Paris, 1998. 411 p.
- [149] **Caumette J.**, *Traitement thermique du béton par l'électricité*, Edition Masson, Paris. 1990
- [150] **Erbil O.**, *Influence de la nature du granulat sur l'étuvage des bétons*. Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur n° 30 Paris 1984, pp. 285-287. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02600687>
- [151] **Hu Y., He T., Zhang X.**, *Effect of ground quartz sand and ground granulated blast-furnace slag on properties of high-strength concrete in the steam and autoclaved curing*. *Advanced Materials Research Vols. 1033-1034 (2014) pp 878-881*. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1033-1034.878>
- [152] **SAMSUNG final report**, *Development of High Strength Self-Consolidating Concrete for Precast, Prestressed Beam Elements*, University of Sherbrooke, Quebec, Canada. 2009.
- [153] **Vollenweider B.**, *Various Methods of Accelerated Curing for Precast Concrete Applications and Their Impact on Short and Long Term Compressive Strength*. CE 241: Concrete Technology Paper 1, 2004
- [154] **RILEM Technical Committee**. *Final report of RILEM TC 188-CSC 'Casting of self compacting concrete*. *Materials and Structures* (2006) 39:937–954. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-006-9186-9>
- [155] **Ouchi M., Nakamura S., Osterberg T. and Hallberg S.**, *Applications Of Self-Compacting Concrete In Japan, Europe And The United States*, 5th International Symposium, ISHPC. Tokyo-Tokyo-Odaiba, Japan , 2003.
- [156] **Trejo D., Hueste M. B., Kim Y. H., and Atahan H.**, *Characterization of self-consolidating concrete for design of precast, prestressed bridge girders*. *Texas Transportation Institute the Texas A&M University System College Station*. Report No. FHWA/TX-09/0-5134-2. December 2008, 364 p.
- [157] **Jacquemot F., Rougeau P., Flahault N.**, *Acceleration of hardening kinetics of SCC, design production and placement of self-consolidating concrete*. *Rilem bookseries* 2010; 1: 307-316. http://dx.doi.org/10.1007/978-90-481-9664-7_26
- [158] **Aggoun A., Yurtdas I., Berthet J. F. et Li A.**, *Influence de la température sur le comportement mécanique des bétons autoplaçants*. XXVI^e Rencontres Universitaires de Génie Civil. Nancy, 4 au 6 juin 2008
- [159] **Koehler E. P. and Fowler, D. W.**, *Development of Self-Consolidating Concrete for Prestressed Bridge Beams*, ACI SP-247, American Concrete Institute, 2007, pp. 1-15.
- [160] **Santos L.F, Barbosa M.P.**, *Performance evaluation of mechanical properties of self-compacting concrete prepared with different cements types submitted to steam curing*. *IBRACON Structures and Materials Journal* 2011; 4(3): 361-385. <http://revistas.ibracon.org.br/index.php/riem/article/view/212/190>
- [161] **Jennings H. M., Thomas J. J., Gevrenov J. S., Constantinides G. and Ulm F.**, *A multi-technique investigation of the nanoporosity of cement paste*. *Cement and Concrete Research* 37 (2007) 329–336. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.021>

- [162] **Mai-Nhu J.**, *Corrosion des armatures du béton (préfabriqué) couplage carbonatation chlorures*. Thèse de doctorat de l'université de Paul Sabatier - Toulouse III. 2013, 244 p.
- [163] **Lumely J. S., Golop R. S., Moirand G. K. H. F. W. Taylor.**, *A degree of reaction of the slag in some blends with Portland cements*, Cement and Concrete Research, Vol. 26 N1 (1996) pp 139-151.
- [164] **Escalante J. S., Gomez L. Y., Johal K. K., Mendoza G., Mancha H. et Mendez J.**, *Reactivity of blast furnace slag in Portland cement blends hydrated under different conditions*, Cement and Concrete Research, Vol. 31 (2001) pp. 1403-1409.
- [165] **Reinhardt H. W. et Stegmaier M.**, *Influence of heat curing on the pore structure and compressive strength of self-compacting concrete (SCC)*. Cem. & Conc. Res. 2006; 36: 879–885. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.12.004>
- [166] **Gesoğlu M.**, *Influence of Steam Curing on the Properties of Concretes Incorporating Metakaolin and Silica Fume*. Materials and Structures, Volume 43, 2010, pp. 1123-1134. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-009-9571-2>
- [167] **Ho D.W.S, Lewis R.K.** *Curing Techniques and Their Effectiveness*. Concrete in Australia, Volume 18, 1992, pp3-7
- [168] **Clarridge E.**, *An Investigation of the Hydration of Steam-Cured Ternary and Quaternary Cement Blends*. A Master thesis of Applied Science and Engineering - University of Toronto, 2011, 331p.
- [169] **Ramezani pour A.A., Khazali M.H., Vosoughi P.**, *Effect of steam curing cycles on strength and durability of SCC: A case study in precast concrete*. Construction and Building Materials 49 (2013) 807–813. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.040>
- [170] **Cano Barrita F. de J., Bremner T. W. and Balcom B. J.**, *Effects of curing temperature on moisture distribution, drying and water absorption in self-compacting concrete*. Magazine of Concrete Research, 2003, 55, No. 6, December, 517–524. <http://dx.doi.org/10.1680/mac.2003.55.6.517>
- [171] **Jianhua W. et Yunlan L.**, *Influence of Mineral Admixtures on the Carbonation Resistance and Chloride Permeability of Steam-Cured HPC*. Key Engineering Materials Vol. 477 (2011) pp 366-374. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.477.366>
- [172] **Chini A. R. and Acquaye L.**, *Effect of Elevated Curing Temperatures on the Strength and Durability of Concrete*, Materials and Structures, vol. 38, 2005, pp 673-679. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02484312>
- [173] **Cassagnabere F.**, *Produits préfabriqués en béton filé : Vers l'amélioration des performances du matériau pour mieux gérer le procédé de production*. Thèse de doctorat de l'université de Toulouse III, Septembre 2007, 287 p.
- [174] **Papzan A., Majid T. A.**, *The Effects of Steam Curing on Porosity of High Strength Concrete Containing Metakaolin*. Journal of American Science 2012;8(11)
- [175] **Aslan O.**, *Predicting long term strength of roller compacted concrete containing natural pozzolan by steam curing*. A Thesis Submitted To The Graduate School Of Natural And Applied Sciences Of Middle East Technical University, 2006, 74 p.
- [176] **Zhimin H., Junzhe L.**, *Effect of Binders Combination on Porosity of Steam-Cured Concrete*. Advanced Materials Research Vols. 183-185 (2011) pp 1984-1988. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.183-185.1984>
- [177] **Zeng J., Fan Z., Chen L.**, *Influence of metakaolin on strength and microstructure of steam-cured high-strength concrete*. Advanced Materials Research Vols. 838-841 (2014) pp 42-46. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.838-841.42>
- [178] **Baoju L., Youjun X., Shiqiong Z., Jian L.**, *Some factors affecting early compressive strength of steam-curing concrete with ultrafine fly ash*. Cement and Concrete Research 31 (2001) 1455–1458. [10.1016/S0008-8846\(01\)00559-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00559-2)

- [179] **Ramlochana T., P. Zacariasb, Thomasc M.D.A., Hooton R.D.**, *The effect of pozzolans and slag on the expansion of mortars cured at elevated temperature Part I: Expansive behaviour*. Cement and Concrete Research 33 (2003) 807–814. [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01066-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01066-9)
- [180] **Patel H. H., Bland C. H., and Poole A. B.**, *The microstructure of steam-cured precast concrete*, Advances in Cement Research, 1995. 8(29): p. 11-19. [http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00036-C](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(95)00036-C)
- [181] **Khayat K. H., Mitchell D.**, *Attachment D: Research Description and Findings to Self-Consolidating Concrete for Precast, Prestressed Concrete Bridge Elements*. National Cooperative Research Program Report 628, 2009 pp D-12.
- [182] **Hwang S., Khatib R., Lee HK., Seung-Hoon L., and Khayat K. H.**, *Optimization of steam-curing regime for high-strength self-consolidating concrete for precast, prestressed concrete applications*. PCI Journal, vol. 57, n°3, 2012, pp. 48-62
- [183] **Deogekar P., Jain A., Mishra S. and Nanthagopalan P.**, *Influence of steam curing cycle on compressive strength of concrete*. International Journal of construction materials and structures, Vol. 1, No. 2, 2013, pp. 18-28.
- [184] **Fernandez L., Rio O. et Castillo A.**, *Performance-based proposal for precast self-compacting concrete (scc) segments*. ECCOMAS conference EURO-TUN, Vienna, Austria, August 27-29, 2007. <http://hdl.handle.net/10261/25172>
- [185] **Ho D.W.S., Chua C.W., Tam C.T.**, *Steam-cured concrete incorporating mineral admixtures*. Cement and Concrete Research 33 (2003) 595–601. [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01028-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01028-1)
- [186] **Zhi-min H., Guang-cheng L., You-jun X.**, *Influence of subsequent curing on water sorptivity and pore structure of steam-cured concrete*. J. Cent. South Univ. (2012) 19: 1155–1162. <http://dx.doi.org/10.1007/s11771-012-1122-2>
- [187] **Corobceanu V. et Giusca R.**, *Technology for preparing and thermal treatment of high strength concretes*. Journal of Applied Sciences 6 (5): 1033-1039, 2006. <http://www.docsdrive.com/pdfs/ansinet/jas/2006/1033-1039.pdf>
- [188] **NF P 18-554** : *Granulats - Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux*. Décembre 1990.
- [189] **NF P 18-554** *Granulats - Mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables*. Décembre 1990
- [190] **NF P 18-560** : *Granulats - Analyse granulométrique par tamisage*. Septembre 1990.
- [191] **Norme AFNOR** : *Granulats pour bétons hydrauliques*. Mai 1994.
- [192] **NF P 18-342** : *Adjuvants pour béton, mortier et coulis - Adjuvants pour béton; Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage*. Septembre 2002.
- [193] **NF P18-443**: *Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis - Mesure de pourcentage d'air occlus dans un béton frais à l'aéromètre à béton*. Juin 1985
- [194] **NBN B 15-215** : *Essais des bétons – Absorption d'eau par immersion* Bruxelles : IBN, 1989
- [195] **Sedran T.**, *Rhéologie et Rhéomètre des bétons: application aux bétons autonivelants*. Doctorat Thèse de l'ENPC 1999; p 220.
- [196] **Ho D.W.S, Chua CW, Tam CT.**, *Steam-cured concrete incorporating mineral admixtures*. Cement and Concr Res 2003;33:595–601. [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01028-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01028-1)
- [197] **Gagné R.**, *Cours de Génie Civil : Durabilité et réparations du béton, GCI – 714*, université de Sherbrooke. <http://www.usherbrooke.ca/genie/fc/microprogrammes-techniques/genie-civil/gci-714-durabilite-et-reparation-du-beton/>

- [198] **Wei C.**, *Etude expérimentale de la perméabilité du béton sous Conditions thermiques et hydriques variables*. Thèse de Doctorat en Génie civil, Ecole centrale de Lille, Décembre 2011, 171 p.
- [199] **Derabla R., Sajedi F.**, *Acceleration of the Hardening of Concrete containing different levels of Slag: Comparison between Heat Treatment and using Admixture*. 1st International Seminar on Civil Engineering, University of Bechar, Algeria, 6-7 March 2013.
- [200] **Robler M. and Odler I.**, *Investigations on the relationship between porosity, structure and strength of hydrated portland cement pastes I: Effect of porosity*. CEMENT and CONCRETE RESEARCH. Vol. 15, pp. 320-330, 1985. [http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(85\)90044-4](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(85)90044-4)
- [201] **Rabehi M., Guettala S. & Mezghiche B.**, *La porosité ouverte du béton d'enrobage corrélation entre la résistance à la compression et l'absorption initiale*. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 16:6, (2012) 730-743. <http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2012.675174>
- [202] **Lian C., Zhuge Y., Beecham S.**, *The relationship between porosity and strength for porous concrete*. Construction and Building Materials 25 (2011) 4294–4298. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.05.005>
- [203] **Ramanathan P., Baskar I., Muthupriya P. and Venkatasubramani R.**, *Performance of Self-Compacting Concrete Containing Different Mineral Admixtures*. KSCE Journal of Civil Engineering (2013) 17(2):465-472. <http://dx.doi.org/10.1007/s12205-013-1882-8>
- [204] **Guneyisi E., Gesoglu M.**, *Properties of self-compacting portland pozzolana and limestone blended cement concretes containing different replacement levels of slag*. Materials and Structures (2011) 44:1399–1410. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-011-9706-0>
- [205] **Boukendakdji O, Kenai S, Kadri E.H, Rouis F.** *Effect of slag on the rheology of fresh self-compacted concrete*. Construction and Building Materials 2009; 23: 2593–2598. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.029>
- [206] **Bouhamou N., Belas N., Mesbah H., Mebrouki A. et Yahia A.**, *Influence des paramètres de composition sur le comportement du béton autoplaçant à l'état frais*. Afrique science 04(1) (2008) 1 – 20.
- [207] **Ramanathan P., Baskar I., Muthupriya P., Venkatasubramani R.**, *Performance of Self-Compacting Concrete Containing Different Mineral Admixtures*. KSCE Journal of Civil Engineering 2013; 17(2): 465-472. <http://dx.doi.org/10.1007/s12205-013-1882-8>
- [208] **Ramezani pour A.A, Khazali M.H, Vosoughi P.** *Effect of steam curing cycles on strength and durability of SCC A case study in precast concrete*. Construction and Building Materials 2013; 49: 807–813. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.040>
- [209] **Ferhat Bingol A., Tohumcu I.**, *Effects of different curing regimes on the compressive strength properties of self compacting concrete incorporating fly ash and silica fume*. Materials and Design 2013; 51: 12–18. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2013.03.106>
- [210] **Mannan MA, Basri HB, Zain MFM, Islam MN.** *Effect of curing conditions on the properties of OPS-concrete*. Build Environ 2002; 37: 1167-71. [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00078-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00078-6)
- [211] **Corobceanu V., Giusca R.**, *Technology for preparing and thermal treatment of high strength concretes*. Journal of applied sciences 2006; 6 (5): 1033 – 1039. <http://scialert.net/abstract/?doi=jas.2006.1033.1039>
- [212] **Bouhamou N., Belas N., Mesbah H., Jauberthie R., Ouali A. et Mebrouki A.**, *Influence des rapports eau/ciment et fines/ciment sur le comportement à l'état durci du béton autoplaçant à base de matériaux locaux algériens*. Rev. Can. Génie Civ. 36: 1195–1206 (2009). <http://dx.doi.org/10.1139/L09-071>
- [213] **Oner M., Erdogdu K., Gunlu A.**, *Effect of components fineness on strength of blast furnace slag cement*. Cem & Concr Res 2003; 33: 463–9. [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00713-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00713-5)

- [214] **Seddik A., Beroual A, Zergua A.S., Guetteche M. N.,** *Self Compacting Concrete under Local Conditions.* Open Journal of Civil Engineering, 2013, 3, 119-125. <http://dx.doi.org/10.4236/ojce.2013.32014>
- [215] **Zülfü Ç. U., Kazım T., Mehmet K.,** *Effect of Mineral Admixtures on the Correlation between Ultrasonic Velocity and Compressive Strength for Self-Compacting Concrete.* Russian Journal of Nondestructive Testing 2008; 44 (5): 367–374.
- [216] **Uysal M., Sumer M.,** *Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures.* Construction and Building Materials 25 (2011) 4112–4120. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.032>
- [217] **Boel V., Audenaert K. et De Schutter G.,** *Gas permeability and capillary porosity of self-compacting Concrete.* Materials and Structures (2008) 41:1283–1290. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-007-9326-x>
- [218] **Bosiljkov V. B., Duh D. et Zarnic R.,** *Time Evolution of Properties of SCC Mixtures Produced Using Crushed Limestone Aggregate and High Content of Limestone Filler.* K.H. Khayat and D. Feys (eds.), Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete, RILEM Bookseries 1, 317. http://dx.doi.org/10.1007/978-90-481-9664-7_27
- [219] **Austin S. A., Robins E J. & Issaad A.,** *Influence of Curing Methods on the Strength and Permeability of GGBFS Concrete in a Simulated Arid Climate.* Cement & Concrete Composites 14 (1992) 157-167. [http://dx.doi.org/10.1016/0958-9465\(92\)90009-K](http://dx.doi.org/10.1016/0958-9465(92)90009-K)
- [220] **Benouis A., Grini A., Labrouki B.,** *Estimation de la porosité des bétons par les ultrasons.* Colloque National : Pathologie des Constructions : Du Diagnostic à la Réparation Université Mentouri Constantine - 25 et 26 Novembre 2008
- [221] **Soltani F., Lafhaj Z., Goueygou M.,** *Étude expérimentale de la propagation de l'onde de surface dans un milieu poreux sec et saturé.* Congrès Cofrend Toulouse 20-22 mai 2008.
- [222] **Arabi N., Jauberthie R., Sellami A.,** *Influence de la substitution partielle de la chaux par le laitier granulé sur les phases formées en autoclave - cas des briques silico-calcaires.* XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 30 Mai 2011, pp. 108-117
- [223] **Lee N.,** Post-demould curing of heat-treated concrete: necessity or complication. Branz ltd 2006. http://www.branz.co.nz/cms_show_download.php?id=4e3d2bff09ac0b16d183c2b407d30a964d63bd87

ANNEXE



CIMENT PORTLAND COMPOSE CPJ-CEMII/A 42,5

MARS 2011

CARACTERISTIQUE CHIMIQUE		CARACTERISTIQUE PHYSIQUE			CARACTERISTIQUE MECANIQUE	
ELEMENTS	% EN MASSE	NORME NA			NORME NA	EN MPa
PAF 975° C	1 - 2	NA230	CONSISTANCE NORMALE	≥ 25	NA 442	COMPRESSION
CaO	55 - 65	NA230	DEBUT DE PRISE	≥ 60		02 jours ≥ 12,30
SiO2	22 - 28	NA230	FIN DE PRISE	150 - 250		07 jours 25 - 35
Al2O3	5 - 6	NA232	EXPANSION A CHAUD	≤ 10mm		28 jours 42,5 - 52,5
Fe2O3	3 - 3,6	NA231	SSBlaine cm ² /g	3300 - 4000	NA 234	FLEXION
MgO	1 - 2	NA231				02 jours 3,0-4,0
K2O	0,3 - 0,6					07 jours 5,0-6,5
Na2O	0,1 - 0,16	NA440	RETRAIT SUR MORTIER μm/m	≤ 1000		28 jours 6,5-8,5
SO3	1,8 - 2,5	COPOSITION POTENTIELLE EN %		% DES CONSTITUANTS		
CaOL	0,8 - 1,8	C3S	55 - 65	CLINKER	≥ 74	
CL ⁻	0 - 0,01	C2S	10 - 25	GYPSE	4 - 6	
		C3A	8 - 12	CALCAIRE	0	
		C4AF	9 - 13	LAITIER	≤ 20	

DOMAINE D'UTILISATION

Utilisation courante de notre ciment :

- Fondations (béton de propreté et béton de semelle en milieux non agressifs).
- Ouvrage en béton armé (Murs, Linteaux, Poteaux et dalle de compressions).
- Dallage en béton, Montage de mure et maçonnerie et Scellements de carrelage (Dalles, pierres et carrelage)
- Chape (mortier de ciment) .

PRECAUTION D'EMPLOI

Ce type de ciment ne convient pas pour :

- Ouvrages en milieux agressifs (terrains gypseux, sulfates, eaux industriels) emploi obligatoire de ciment

ES pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates.

- Travaux à la mère (emploi obligatoire de ciment PM pour travaux à la mer).
- Bétonnage au dessous de 5° C (il est conseillé d'utiliser des ciments de résistance initiale élevée R)

STOCKAGE :

Eviter :

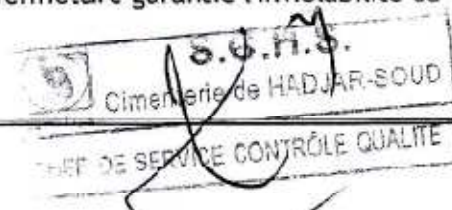
- Un stockage prolongé au-delà de trois (03) mois.
- Un stockage dans des endroits humides.

EMBALLAGE :

- Le ciment est emballé dans des sacs en papier kraft à 02 plis, le système de fermeture garantie l'inviolabilité du sac.

ATTENTION

- Un contact prolongé du ciment avec la peau peut être irritant.



MEDAPLAST SP 40

Conforme à la norme EN 934-2 Tab 1, 3.1
et 3.2 NA 774

Super plastifiant - haut réducteur d'eau

DESCRIPTION

Le **MEDAPLAST SP 40** est un superplastifiant haut réducteur d'eau permettant d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton.

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux
- Bétons extrudés
- Bétons BCR

PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le **MEDAPLAST SP 40** permet :

Sur béton frais :

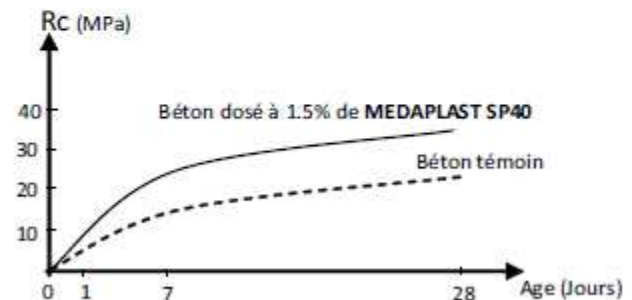
- Améliorer la fluidité
- Augmenter la maniabilité
- Réduire l'eau de gâchage
- Éviter la ségrégation
- faciliter la mise en œuvre du béton

Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques même à jeune âge
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait

CARACTÉRISTIQUES

- Aspect Liquide
- Couleur Marron
- pH 8,2
- Densité $1,20 \pm 0,01$
- Teneur en chlore $< 1\text{g/L}$
- Extrait sec 40%



Evolution des résistances en compression

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAPLAST SP 40** est introduit dans l'eau de gâchage.

Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait été introduite.

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :

0,6% à 2,5% du poids de ciment soit 0,5L à 2L pour 100 kg de ciment

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

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le **MEDAPLAST SP 40** est conditionné en bidons de 12Kg, fûts de 270 kg et cubitenaire de 1200 kg.

Délai de conservation :

Une année emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur ($5^{\circ}\text{C} < t < 35^{\circ}\text{C}$).

PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : www.granitex-dz.com

PV d'essais conforme aux normes, établi par le **CNERIB** en Janvier 2007.

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



Granitex

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com





ENG LABORATOIRE CENTRAL

Rapport d'analyse

Sample Name: Cimont

SOP Name:

Measured: jeudi 2 août 2012 10:23:59

Sample Source & type:

Measured by: louiza.benmenni

Analysed: jeudi 2 août 2012 10:24:00

Sample bulk lot ref:

Result Source: Measurement

Particle Name: Cement

Accessory Name: Hydro 2000G (A) Analysis model: General purpose Sensitivity: Normal

Particle RI: 1.680

Absorption: 0.1

Size range: 0.020 to 2000.000um Obscuration: 15.11 %

Dispersant Name: Eau

Dispersant RI: 1.330

Result Emulation: Off

Weighted Residual: 0.667 %

Concentration: 0.0200 %Vol

Span : 2.937

Uniformity: 0.923

Result units: Volume

Specific Surface Area: 0.656 m²/g

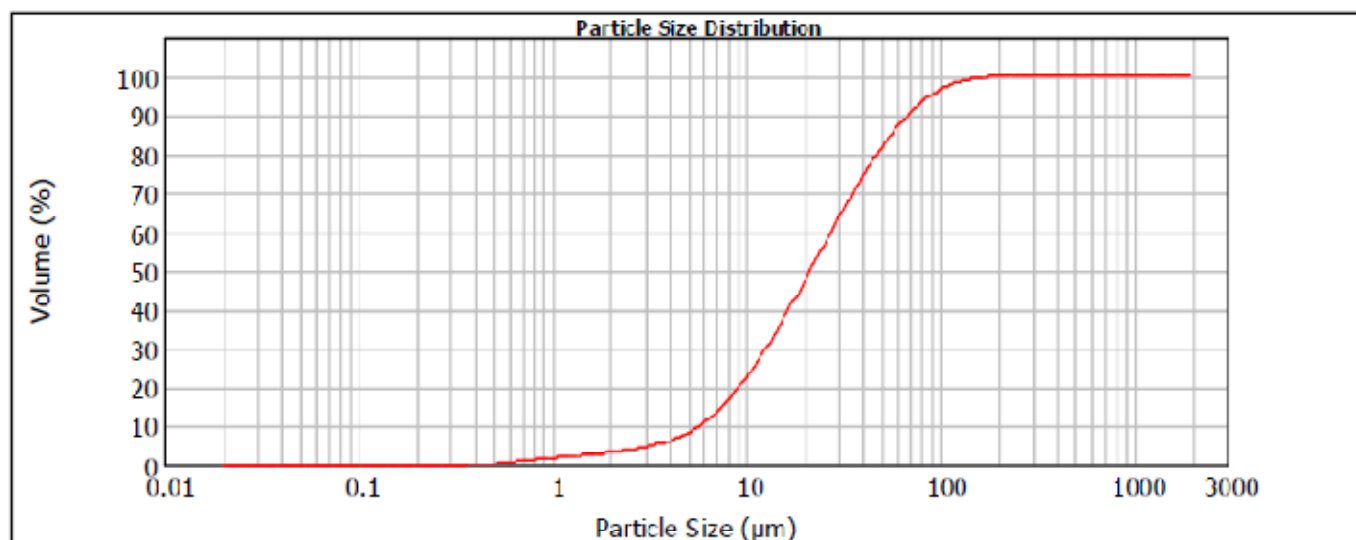
Vol. Weighted Mean D[4,3]: 30.433 um

Surface Weighted Mean D[3,2]: 9.142 um

d(0.1): 5.644 um

d(0.5): 21.189 um

d(0.9): 67.880 um



Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %
0.020	0.00	0.411	0.14	4.743	7.86	25.000	56.61	100.000	96.59	500.000	100.00
0.023	0.00	0.474	0.37	5.000	8.44	26.370	59.13	112.468	97.77	547.684	100.00
0.027	0.00	0.548	0.68	5.477	9.58	30.799	64.73	125.000	98.55	600.466	100.00
0.031	0.00	0.632	1.02	6.325	11.70	32.000	66.26	129.876	98.78	700.348	100.00
0.036	0.00	0.743	1.72	7.000	13.67	36.588	70.21	160.000	99.10	800.000	100.00
0.055	0.00	0.974	2.80	7.303	14.54	40.000	74.44	160.000	99.50	943.090	100.00
0.063	0.00	1.120	2.31	8.434	17.87	41.071	75.30	173.183	99.74	973.635	100.00
0.084	0.00	1.289	2.57	9.738	21.78	46.000	78.44	200.000	99.81	1000.000	100.00
0.097	0.00	1.500	2.82	10.000	22.56	47.427	80.14	230.968	99.99	1124.683	100.00
0.130	0.00	1.732	3.09	11.227	26.23	54.768	84.49	250.000	100.00	1298.763	100.00
0.150	0.00	2.000	3.41	12.988	31.15	63.000	88.23	286.704	100.00	1469.786	100.00
0.173	0.00	2.310	3.77	14.998	36.44	63.246	88.33	300.000	100.00	1731.629	100.00
0.200	0.00	2.667	4.23	16.000	36.44	73.035	91.53	307.965	100.00	2000.000	100.00
0.231	0.00	3.000	4.49	17.319	41.98	75.000	92.17	365.866	100.00		
0.267	0.00	3.080	4.81	19.000	43.60	80.000	93.33	400.000	100.00		
0.300	0.00	3.557	5.56	20.000	47.69	84.308	94.23	410.705	100.00		
0.300	0.00	4.107	6.50	23.090	53.40	87.384	96.23	474.270	100.00		

Operator notes:



E N G LABORATOIRE CENTRAL

Rapport d'analyse

Sample Name: ALCAL UF5

SOP

Measured: mercredi 1 août 2012 11:13:20

Sample Source &

Measured by: louiza.benmenni

Analysed: mercredi 1 août 2012 11:13:22

Sample bulk lot ref:

Result Source: Edited

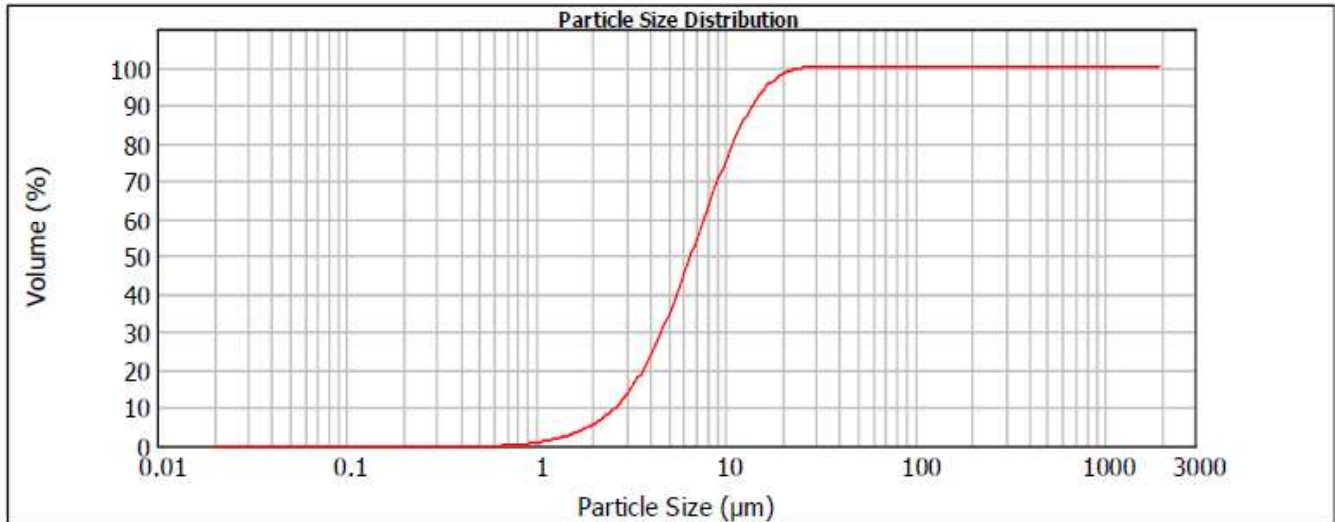
Particle CaCO3 (calcite) Accessory Name: Hydro 2000G (A) Analysis model: General purpose Sensitivity: Normal
 Particle RI: 1.710 Absorption: 0.001 Size range: 0.020 to 2000.000um Obscuration: 17.29 %
 Dispersant Name: Eau Dispersant RI: 1.330 Result Emulation: Off Weighted Residual: 0.477 %

Concentration: 0.0112 %Vol Span : 1.723 Uniformity: 0.535 Result Volume
 Specific Surface Area: 0.452 m²/g Vol. Weighted Mean D[4,3]: 7.559 um
 Surface Weighted Mean D[3,2]: 4.920 um

d(0.1): 2.613 um

d(0.5): 6.565 um

d(0.9): 13.924 um



Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %
0.020	0.00	0.411	0.00	4.743	31.43	25.000	99.74	100.000	100.00	500.000	100.00
0.023	0.00	0.474	0.00	5.000	34.19	26.670	99.92	112.468	100.00	547.684	100.00
0.027	0.00	0.548	0.00	5.477	39.22	30.799	100.00	125.000	100.00	632.456	100.00
0.031	0.00	0.632	0.00	6.325	47.72	32.000	100.00	129.876	100.00	730.348	100.00
0.036	0.00	0.843	0.33	7.000	53.96	35.566	100.00	150.000	100.00	800.000	100.00
0.055	0.00	0.974	0.71	7.303	56.59	40.000	100.00	160.000	100.00	843.363	100.00
0.063	0.00	1.125	1.24	8.434	65.41	41.071	100.00	173.193	100.00	973.935	100.00
0.084	0.00	1.299	1.93	9.739	73.75	45.000	100.00	200.000	100.00	1000.000	100.00
0.097	0.00	1.500	2.82	10.000	75.20	47.427	100.00	230.656	100.00	1124.683	100.00
0.130	0.00	1.732	3.99	11.247	81.20	54.768	100.00	250.000	100.00	1298.763	100.00
0.150	0.00	2.000	5.55	12.988	87.46	63.000	100.00	266.704	100.00	1499.788	100.00
0.173	0.00	2.310	7.65	14.998	92.35	63.246	100.00	300.000	100.00	1731.929	100.00
0.200	0.00	2.667	10.45	15.000	92.36	73.035	100.00	307.665	100.00	2000.000	100.00
0.231	0.00	3.000	13.38	17.319	95.66	75.000	100.00	355.656	100.00		
0.267	0.00	3.080	14.12	18.000	96.58	80.000	100.00	400.000	100.00		
0.308	0.00	3.557	18.81	20.000	98.12	84.339	100.00	410.705	100.00		
0.356	0.00	4.107	24.58	23.096	99.38	97.394	100.00	474.275	100.00		

Operator notes:



ENG LABORATOIRE CENTRAL

Rapport d'analyse

Sample Name: Laitier granulé

SOP Name: CaCO3 (calcite)

Measured: jeudi 2 août 2012 10:45:53

Sample Source & type:

Measured by: louiza benmenni

Analysed: jeudi 2 août 2012 10:48:11

Sample bulk lot ref:

Result Source: Edited

Particle Name: Détaut Accessory Name: Scirocco 2000 Analysis model: General purpose Sensitivity: Normal
 Particle RI: 1.520 Absorption: 0.1 Size range: 0.020 to 2000.000um Obscuration: 5.15 %
 Dispersant Name: Dispersant RI: 1.000 Result Emulation: Off Weighted Residual: 1.922 %

Concentration: 0.0019 %Vol Span : 2.387 Uniformity: 0.746 Result units: Volume

Specific Surface Area: 0.457 m²/g

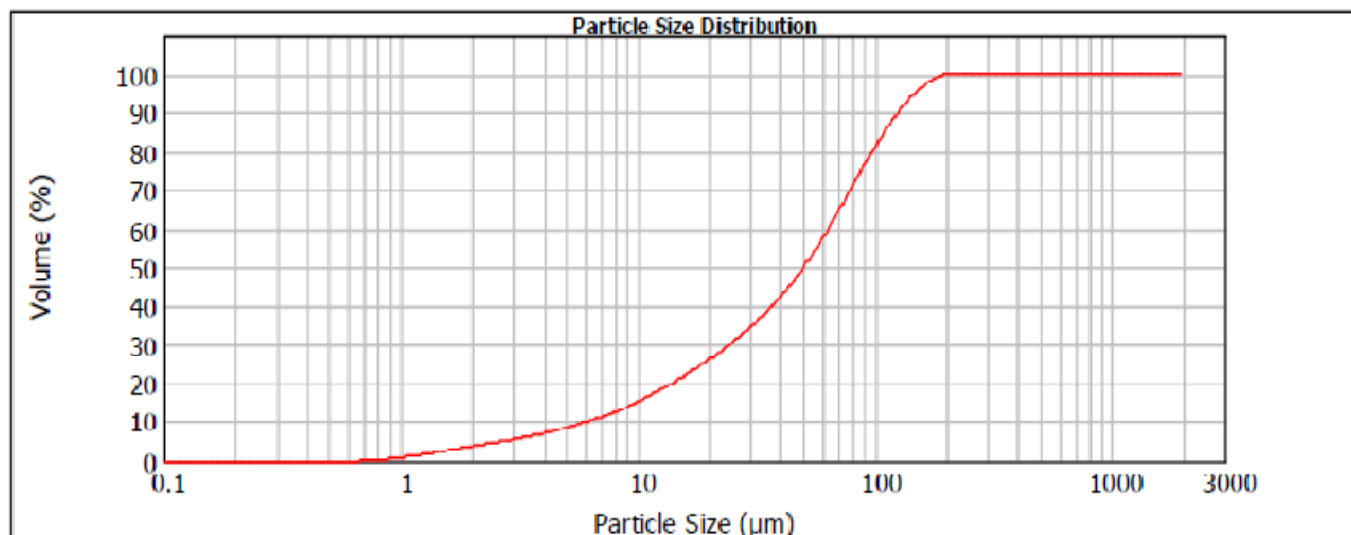
Vol. Weighted Mean D[4,3]: 58.319 um

Surface Weighted Mean D[3,2]: 13.121 um

d(0.1): 6.074 um

d(0.5): 49.867 um

d(0.9): 125.084 um



Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %
0.020	0.00	0.411	0.00	4.743	8.11	25.000	30.59	100.000	89.98	500.000	100.00
0.023	0.00	0.474	0.00	5.000	8.48	26.670	31.97	112.468	89.94	547.684	100.00
0.027	0.00	0.548	0.00	5.477	9.16	30.799	35.27	125.000	89.98	632.466	100.00
0.031	0.00	0.630	0.00	6.305	10.35	30.000	36.71	150.000	91.30	730.348	100.00
0.036	0.00	0.843	0.40	7.000	11.29	35.596	38.99	160.000	95.53	800.000	100.00
0.055	0.00	0.974	0.02	7.303	11.70	40.000	42.41	180.000	96.97	943.580	100.00
0.063	0.00	1.125	1.33	8.434	13.22	41.071	43.24	173.193	98.37	973.835	100.00
0.084	0.00	1.299	1.89	9.739	14.82	45.000	46.27	200.000	99.91	1000.000	100.00
0.097	0.00	1.500	2.48	10.000	15.25	47.427	48.14	230.656	100.00	1124.683	100.00
0.130	0.00	1.732	3.09	11.247	16.81	54.788	53.89	250.000	100.00	1293.783	100.00
0.150	0.00	2.000	3.69	12.989	18.90	63.000	59.88	266.704	100.00	1400.798	100.00
0.173	0.00	2.310	4.31	14.990	21.15	63.246	59.03	300.000	100.00	1701.829	100.00
0.200	0.00	2.667	4.95	15.000	21.15	73.035	66.39	307.685	100.00	2000.000	100.00
0.231	0.00	3.000	5.50	17.319	23.99	75.000	67.63	366.656	100.00		
0.267	0.00	3.080	5.62	18.000	24.27	80.000	70.88	400.000	100.00		
0.308	0.00	3.557	6.36	20.000	28.19	84.339	73.14	410.705	100.00		
0.366	0.00	4.107	7.18	23.066	28.97	97.394	79.77	474.775	100.00		

Operator notes:



ENG LABORATOIRE CENTRAL

Rapport d'analyse

Sample Name: Laitier cristallisé

SOP Name: CaCO₃ (calcite)

Measured: jeudi 2 août 2012 10:43:07

Sample Source & type:

Measured by: louiza.benmenni

Analysed: jeudi 2 août 2012 10:48:36

Sample bulk lot ref:

Result Source: Edited

Particle Name: Défaut

Accessory Name: Scirocco 2000

Analysis model: General purpose

Sensitivity: Normal

Particle RI: 1.520

Absorption: 0.1

Size range: 0.020 to 2000.000um

Obscuration: 7.02 %

Dispersant Name:

Dispersant RI: 1.000

Result Emulation: Off

Weighted Residual: 1.000 %

Concentration: 0.0006 %Vol

Span: 6.572

Uniformity: 2.16

Result units: Volume

Specific Surface Area: 2.19 m²/g

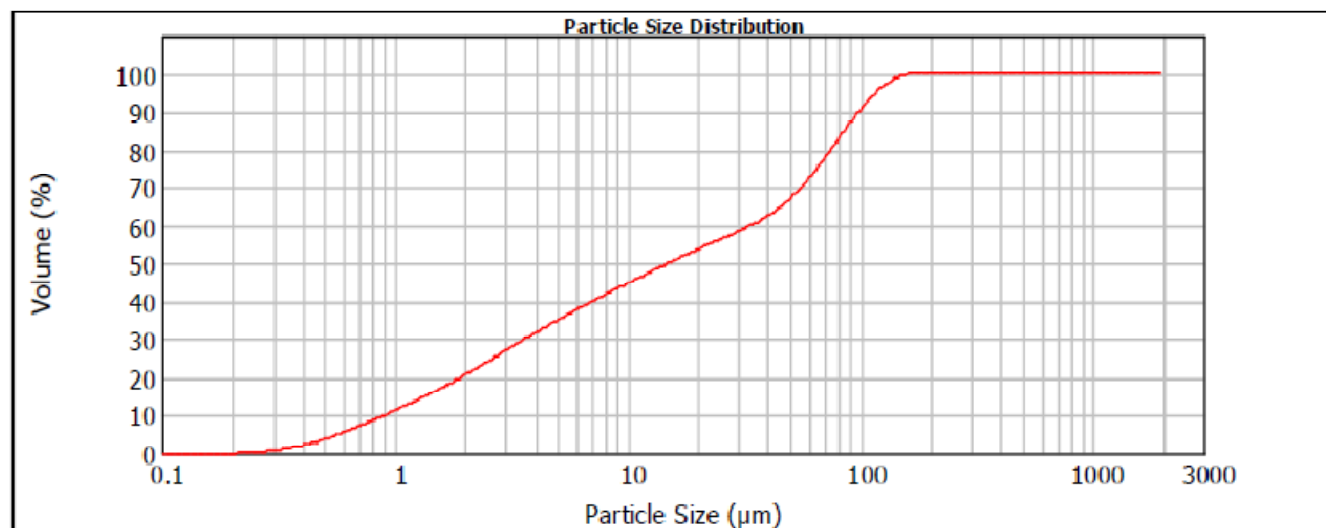
Vol. Weighted Mean D[4,3]: 35.873 um

Surface Weighted Mean D[3,2]: 2.745 um

d(0.1): 0.892 um

d(0.5): 14.768 um

d(0.9): 97.946 um



Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %
0.020	0.00	0.411	2.33	4.743	34.37	25.000	58.30	100.000	90.89	500.000	100.00
0.023	0.00	0.474	3.42	5.000	36.17	26.670	57.04	112.468	94.19	547.684	100.00
0.027	0.00	0.548	4.70	5.477	38.52	30.799	58.74	125.000	96.88	632.456	100.00
0.031	0.00	0.632	6.13	6.325	38.59	32.000	59.22	129.876	97.41	730.348	100.00
0.036	0.00	0.843	9.34	7.000	40.01	36.586	60.67	150.000	99.36	800.000	100.00
0.056	0.00	0.974	11.05	7.303	40.59	40.000	62.53	160.000	99.79	843.353	100.00
0.083	0.00	1.125	12.85	8.434	42.58	41.071	63.00	173.193	99.99	973.935	100.00
0.084	0.00	1.299	14.71	9.739	44.49	45.000	64.79	200.000	100.00	1000.000	100.00
0.097	0.00	1.500	16.64	10.000	44.85	47.427	65.94	230.956	100.00	1124.683	100.00
0.130	0.00	1.732	18.86	11.247	46.42	54.788	69.84	250.000	100.00	1298.783	100.00
0.150	0.00	2.000	20.77	12.988	48.33	63.000	74.00	288.704	100.00	1499.788	100.00
0.173	0.00	2.310	22.97	14.998	50.20	63.246	74.14	300.000	100.00	1731.929	100.00
0.200	0.00	2.867	25.24	15.000	50.20	73.035	79.26	307.985	100.00	2000.000	100.00
0.231	0.13	3.000	27.12	17.319	52.01	75.000	80.25	365.858	100.00		
0.267	0.41	3.080	27.55	18.000	52.48	80.000	82.88	400.000	100.00		
0.308	0.84	3.557	29.85	20.000	53.74	84.339	84.88	410.705	100.00		
0.356	1.46	4.107	32.14	23.096	55.40	97.394	89.81	474.275	100.00		

Operator notes: