

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

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département de génie civil et hydraulique
Réf :.....



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية والري
المرجع:.....

Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de

Doctorat en sciences

Spécialité: Génie civil

**Comportement des bétons autoplaçants dans les zones arides et
semi arides**

Présentée par :

BENADDI Hachemi

Soutenue publiquement le 05/10/2022

Devant le jury composé de :

TAALLAH Bachir	Professeur	Président	Université de Biskra.
MEZGHICHE Bouzidi.	Maître de Conférences 'A'	Rapporteur	Université de Biskra
GUETTALA Salim	Professeur	Examineur	Université de Djelfa
GHRIB Abderrahmane	Maître de Conférences 'A'	Examineur	Université de Djelfa

Année universitaire 2022-2023

Remerciements

Le présent travail a été réalisé au laboratoire de recherche en génie civil (LRGC) de l'université Mohamed KHIDER Biskra

Tout d'abord louange à Dieu tout puissant pour tout ce qu'il m'a donné afin que je puisse terminer et réaliser ce travail.

Je voudrais exprimer mes vifs remerciements à Monsieur : **MEZGHICHE Bouzidi** maître de conférences à l'université de Biskra, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de diriger ce travail, je tiens à lui remercier sincèrement et infiniment suite à ses remarques pertinentes, ses conseils judicieux et son aide exceptionnel durant toute la durée de préparation de cette thèse.

Je tiens à exprimer mes chaleureux remerciements à Monsieur le Professeur : **TAALLAH Bachir** qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ma soutenance, ainsi que les membres, messieurs le Professeur : **GUETTALA Salim** et le Dr : **GHRIEB Abderrahmane** qui m'ont fait l'honneur de bien vouloir accepter et juger mon travail.

Mes sincères salutations s'adressent aussi à Monsieur : **SALHI Mohamed** maître de conférences au centre universitaire de Relizane , que je considère comme mon Co-encadreur qui m' a vraiment aidé et soutenu en partageant avec moi toutes ses connaissances et ses expériences. Je n'oublie pas aussi Monsieur : **BOUMAZA Abdecharif** Professeur à l'université de Khenchla de ses aides et ses encouragements.

Je remercie chaleureusement tous les personnels du département de génie civil et hydraulique et plus particulièrement Monsieur : **ABDESSALEM Aissam**, ainsi les membres du LRGC et LMDS notamment Monsieur : **TOUR Abdelmounam** et M^{elle} : **KHINECHE Rahwa** pour leur aide, leur disponibilité et leur présence durant la période de mon travail expérimental.

En fin j'adresse aussi mes salutations et ma reconnaissance à mes amis, ma famille, ma femme et mes enfants qui ont été toujours et le sont à coté de moi tout au long de mon travail.

Résumé

Le béton autoplaçant a inspiré ces dernières années de nombreux chercheurs dans le domaine de béton et des matériaux de construction, en raison de ses caractéristiques distincts tant de l'état frais ou de l'état durci et dans les différents milieux et sous les diverses conditions.

Les différentes recherches ont été effectuées dans des laboratoires sous des critères d'essai bien contrôlés et loin des conditions réelles du béton et les insuffisances constatés dans les chantiers sous un climat aride. A cet effet notre étude ne porte pas sur la reproduction des conditions de bétonnage par climat chaud en laboratoires, mais d'étudier dans un environnement réel et sous une température dépassant les 35°C à l'ombre, le comportement mécanique et la durabilité d'un béton autoplaçant notamment face aux attaques sulfatiques et les influences sur sa microstructure.

Dans le coté rhéologique, nous avons montré que jusqu'à 25 mn après malaxage et dans un climat aride (climat chaud), le BAP garde son aptitude d'autoplaçance. À l'état durci le climat chaud avec une température élevée conduit à une évolution rapide de la résistance à la compression aux jeunes âges, mais à long terme, les hydrates formés deviennent plus faibles mécaniquement et la résistance diminue considérablement pour les bétons exposés à l'air libre. L'effet de cure et des fillers calcaires est bien remarqué dans cette étude.

Concernant la durabilité des BAP vis-à-vis l'attaque sulfatique, les résultats ont montré que le vieillissement des BAP dans une solution d'acide sulfurique (5% H_2SO_4) et quelque soit le mode de murissement, est plus intense comparativement à une solution de sulfate de sodium (5% Na_2SO_4).

Les résultats macroscopiques ont été complétés et confirmés par des analyses microscopiques à l'aide de la diffraction des rayons X, la spectroscopie FTIR et, le microscope électronique à balayage MEB.

Mots clés : Béton autoplaçant - Température ambiante élevée- Résistances mécaniques- Durabilité-Attaques sulfatiques- Propriétés microstructuralles.

Abstract

In the field of concrete and building material, a great deal of research has recently been undertaken on self-consolidating concrete. Interest in that kind of concrete is due to its distinct characteristics both in fresh and hardened states within different environments and under various conditions. Research has been carried out in laboratories under well-controlled test criteria and far from the real conditions of the concrete, without the shortcomings observed in construction sites in arid and dry climates. For this purpose our study does intend to the reproduce the conditions of concreting in hot climate in laboratories. Rather our research aims to study the mechanical behaviour and the durability of self-compacting concrete, particularly facing sulphate attacks and effects on its microstructure, in a real environment and under a temperature exceeding 35°C.

As for the rheological aspect, we have shown that up to 25 min after mixing, and in a dry and arid climate (hot climate), the SCC retains its self-placing capability. In the hardened state, the hot climate with a high temperature leads to a rapid evolution of the compressive strength at young stages. However in the long term, the hydrates formed become mechanically weaker and the strength of concretes exposed to the open air decreases considerably. On the contrary, the effect of curing and limestone fillers is well noticed in this study. Concerning the durability of SCCs against sulphate attack, the results showed that the aging of SCCs in a solution of sulfuric acid (5% H_2SO_4), and whatever the mode of ripening, is more intense compared to a sodium sulfate solution (5% Na_2SO_4). The macroscopic results have been supplemented and confirmed by analyzes of the microstrue using X-ray diffraction, FTIR spectroscopy, and scanning electron microscope SEM.

The macroscopic results were complemented and confirmed by analyzes using X-ray diffraction, FTIR spectroscopy, and scanning electron microscope SEM.

Key words : Self compacting concrete- High ambient temperature- Mechanical resistance- Durability- Sulphate attacks – Microstructural properties.

الملخص

كانت الخرسانة ذاتية القولية في السنوات الأخيرة محل إهتمام العديد من الباحثين في مجال الخرسانة ومواد البناء نظرا لخصائصها المميزة سواء في الحالة الطرية أو في الحالة الصلبة وفي مختلف البيئات والظروف .

ولان معظم الأبحاث تمت في مخابر بعيدا عن الظروف الحقيقية للخرسانة وواجه القصور التي لوحظت في مواقع البناء في مناخ جاف وقاسي فان دراستنا لا تتعلق بتكرار ظروف الصب في المناخ الحار في المختبرات ولكن دراسة السلوك الميكانيكي وقوة التحمل والمحافظة علي ذاتية القولية و الديمومة في بيئة حقيقية وتحت درجة حرارة تتجاوز 35 درجة مئوية في الظل وخاصة في مواجهة الكبريتات والتاثيرات علي بنيتها المجهرية.

وقد بينت دراستنا في الجانب الريولوجي انه حتي الدقيقة 25 بعد الخلط وفي مناخ جاف ان الخرسانة ذاتية القولية تحتفظ بقدرتها علي الاستقرار الذاتي. أما في الحالة الصلبة فان المناخ الجاف مع الارتفاع في درجة الحرارة يؤدي الي التطور السريع لمقاومة الانضغاط في المدى القصير ولكن علي المدى الطويل تصبح الهيدرات المتكونة اضعف ميكانيبيا وتقل القوة بشكل كبير بالنسبة للخرسانة المعرضة للهواء الطلق علي العكس من ذلك فان تاثير المعالجة بالحفظ في الماء واستعمال الحجر الجيري له اثار ايجابية علي قوة الضغط والديمومة للخرسانة ذاتية القولية.

كما اننا لا حظنا في هذه الدراسة فيما يخص ديمومة الخرسانة ذاتية القولية تحت تاثير الكبريتات ان معدل التآكل للخرسانة اكثر حدة في محلول حمض الكبريت (5 % H_2SO_4) مقارنة بمحلول كبريتات الصوديوم (5% Na_2SO_4) . وقد تم التأكد من النتائج من خلال التحليل باستخدام الاشعة السينية DRX والتحليل الطيفي FTIR والمجهر الالكتروني الماسح MEB.

الكلمات المفتاحية : خرسانة ذاتية القولية- درجة حرارة محيطية عالية- المقاومة الميكنتيكية- ديمومة- هجمات الكبريتات الخصائص المجهرية

TABLE DES MATIERES

Remerciements	i
Résumé	ii
Abstract	iii
الملخص	iv
Table des matières	v
Liste des figures	viii
Liste des tableaux	xi
Liste des photos	xi
Abréviations	xii
Introduction générale	1
Première partie : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	4
Chapitre 1 : Généralités sur les milieux arides et semi arides	5
1.1 Introduction	5
1.2 Climat en Algérie	5
1.3 Biskra au cœur de la zone aride et semi aride	6
1.4 Climat aride, semi aride, et climat chaud	7
1.5 Paramètres climatiques caractérisant le climat chaud	8
1.6 Comportement des sols dans les zones arides et semi arides	10
1.7 Conclusion	11
Chapitre 2 : Aperçu sur les bétons autoplaçants	12
2.1 Introduction	12
2.2 Concept, caractérisation, et formulation des bétons autoplaçants	12
2.2.1 Définition des bétons autoplaçants	12
2.2.2 Catégories des bétons autoplaçants	14
2.2.3 Intervalle d'écoulement	14
2.3 Particularités des bétons autoplaçants	15
2.4 Formulation des bétons autoplaçants	16
2.5 Principes pour la formulation des bétons autoplaçants	17
2.6 Caractérisation des bétons autoplaçants à l'état frais	18
2.7 Caractérisation des bétons autoplaçants à l'état durci	21
2.7.1 Résistances mécaniques des BAP	21
2.7.2 Effet des fillers calcaires sur les résistances mécaniques des BAP	23
2.7.3 Module élastique des BAP	23
2.7.4 Retrait des BAP	24
2.7.5 Fluage des BAP	25
2.7.6 Propriétés physico-chimiques et durabilité des BAP	26
2.7.6.1 La porosité	26
2.7.6.2 La perméabilité	27
2.7.6.3 L'absorption d'eau	28
2.8 Conclusion	29
Chapitre 3 : Effet du climat chaud sur les propriétés des BAP- effet de la température....	30
3.1 Introduction	30
3.2 Effet du climat chaud sur les propriétés des BAP et bétons vibrés à l'état frais	31
3.3 Effet du climat chaud sur les propriétés des BAP et bétons vibrés à l'état durci	37
3.3.1 Effet de la température sur la résistance mécanique	37
3.3.2 Effet de la température sur le module élastique	44
3.3.3 Effet de la température sur les propriétés physico-chimiques et durabilité	46
3.3.3.1 Effet de la température sur la porosité	46
3.3.3.2 Effet de la température sur l'absorption d'eau	49
3.3.3.3 Effet de la température sur la perméabilité	51
3.4 Effet du climat chaud sur la durabilité vis-à-vis aux attaques sulfatiques	52
3.4.1 Les attaques sulfatiques	52

3.4.1.1	Mécanismes d'attaque sulfatique	53
3.4.1.2	Influence des ajouts minéraux sur la résistance aux attaques sulfatiques	54
3.4.2	Les attaques acides	55
3.4.2.1	Mécanismes d'attaque acides	56
3.4.2.2	Influence des ajouts minéraux sur la résistance aux attaques acides	57
3.5	Effet combiné température- attaque sulfatique sur les bétons vibrés	57
3.6	Effet combiné température- attaque sulfatique sur les BAP	59
3.7	Conclusion	62
	Deuxième partie : ETUDE EXPERIMENTALE	63
	Chapitre 4 : Matériaux utilisés et procédures expérimentales	64
4.1	Introduction	64
4.2	Matériaux utilisés	64
4.2.1	Ciment	64
4.2.2	Sable	65
4.2.3	Gravier	65
4.2.4	Fillers calcaires	66
4.2.5	Adjuvants chimiques	66
4.2.6	Eau de gâchage	67
4.2.7	Analyse par diffraction aux rayons X (DRX) des matériaux utilisés	67
4.2.8	Analyse par spectroscopie infrarouge (FTIR) des matériaux utilisés	68
4.3	Mélanges et procédures	69
4.3.1	Béton autoplaçant	69
4.3.2	Béton ordinaire vibré	70
4.3.3	Conditions de climat sec et aride (climat chaud)	70
4.3.4	Préparation des bétons	70
4.4	Essais réalisés sur les différents bétons à l'état frais	71
4.4.1	Essai réalisé sur le béton ordinaire	71
4.4.2	Essais réalisés sur le béton autoplaçant	71
4.5	Confection des éprouvettes	72
4.6	Mode de cure des éprouvettes	72
4.7	Essais réalisés sur les différents bétons à l'état durci	73
4.7.1	Essais mécaniques	73
4.7.1.1	Résistance mécanique à la compression	73
4.7.1.2	Résistance mécanique à la traction	74
4.7.1.3	Module élastique	74
4.7.2	Essai ultrasonique	76
4.7.3	Essais physico- chimique et durabilité	77
4.7.3.1	Porosité accessible à l'eau et densité	77
4.7.3.2	Absorption d'eau par immersion	78
4.7.3.3	Perméabilité	78
4.8	Etude de la durabilité face aux attaques sulfatiques externes	80
4.8.1	Principales techniques expérimentales	81
4.8.1.1	Techniques macroscopiques	81
	1 : Etude et examen visuel	81
	2 : Variation de masse	81
	3 : Mesure de la résistance à la compression	82
4.8.1.2	Techniques microscopiques	82
	1 : Analyse par diffraction aux rayons X (DRX)	82
	2 : Analyse par spectroscopie infrarouge (FTIR)	83
	3 : Analyse au microscope électronique à balayage (MEB)	84
4.9	Conclusion	85
	Chapitre 5 : Effet du climat chaud sur les propriétés à l'état frais et durci du BAP	86
5.1	Introduction	86
5.2	Effet du climat chaud sur les essais à l'état frais	86
5.2.1	Effet de la température sur l'étalement/ affaissement	86

5.2.2	Effet de la température sur l'écoulement à la boîte en L	88
5.2.3	Effet de la température sur la stabilité au tamis	89
5.3	Effet du climat chaud sur les essais à l'état durci	90
5.3.1	Etude de la résistance à la compression	90
5.3.1.1	Bétons autoplaçant et béton ordinaire dans le mode 1 (mûrissement à l'air libre)	90
5.3.1.2	Bétons autoplaçant et béton ordinaire dans le mode 2 (mûrissement dans l'eau)	91
5.3.2	Etude de la résistance à la traction	92
5.3.3	Résultats d'essai d'auscultation sonique	94
5.3.3.1	Vitesse d'impulsion ultrasonique (UPV) de différents bétons selon le mode de durcissement	94
5.3.3	Corrélation UPV/ Résistance à la compression	95
5.3.4	Calcul du module élastique à partir de la vitesse ultrasonique UPV	96
5.4	Etude de la déformabilité	95
5.4.1	Effet du climat chaud sur les déformations élasto- instantanées longitudinales	98
5.4.2	Effet du climat chaud sur les déformations élasto- instantanées transversales	99
5.4.3	Effet du climat chaud sur le module de déformabilité	101
5.4.4	Effet du climat chaud sur le module d'élasticité	102
5.4.5	Etude comparative entre module élastique calculé et mesuré	104
5.5	Conclusion	105
	Chapitre 6 : Effet du climat chaud sur les indicateurs de durabilité	107
6.1	Introduction	107
6.2	Effet du climat chaud sur la porosité accessible à l'eau	107
6.3	Effet du climat chaud sur l'absorption par immersion d'eau	109
6.4	Effet du climat chaud sur la perméabilité	110
6.5	Effet du climat chaud sur la durabilité face aux attaques sulfatiques	112
6.5.1	Etude macroscopique	112
6.5.1.1	Examen visuel	112
6.5.1.2	Variation de masse dans les différentes solutions d'étude	112
	a- Variation de masse dans la solution témoin (eau douce)	112
	b- Gain de masse dans la solution 5%Na ₂ SO ₄	114
	c- Perte de masse dans la solution 5%H ₂ SO ₄	116
6.5.1.3	Effet de l'attaque sulfatique sur la résistance à la compression	117
6.5.2	Etude microscopique	120
6.5.2.1	Résultats d'analyse de diffraction aux rayons X (DRX)	120
6.5.2.1.1	Résultats d'analyse des matériaux utilisés	120
6.5.2.1.2	Analyse de divers bétons immergés dans des différents milieux	122
6.5.2.2	Résultats d'analyse de spectroscopie FTIR	125
6.5.2.2.1	Résultats d'analyse des matériaux utilisés	125
6.5.2.2.2	Analyse de divers bétons immergés dans des différents milieux	127
6.5.3	Analyse au microscope électronique à balayage MEB	132
6.6	Conclusion	137
	Conclusion générale et perspectives	139
	Références bibliographiques	143
	Textes normatifs	151
	Annexes	152

LISTE DES FIGURES

N°	Figure	Page
1.1 :	Les trois types de climat en Algérie [Climat Algérie]	06
1.2 :	Température en 2019 à Biskra [info climat]	07
2.1 :	Les constituants d'un BAP et un béton ordinaire [Okamura et al, 2002]	16
2.2 :	Représentation schématique et photographique de l'essai de la boîte en L (L- Box) [EFNARC2002][Holcim, 2004]	20
2.3 :	Evolution de la résistance mécanique d'un BAP et d'un BO correspondant [Gibs et al ,1999]	22
2.4 :	Résistance en compression de différents mélanges [Molez, 2003]	22
2.5 :	Retrait total de différents bétons [Molèz, 2003]	25
2.6 :	Porosité ouverte de différents bétons testés en fonction de la résistance mécanique [Assié, 2004]	27
3.1 :	Effet de la température ambiante sur l'affaissement (de 22°C à 32°C) [Hampton 1981]	31
3.2 :	Effet de la température ambiante sur la demande d'eau du béton [ACI305, 1991]	32
3.3 :	Augmentation du dosage en eau en fonction de la température du béton pour maintenir un affaissement constant (8cm) [Mamillan et al, 1989]	32
3.4 :	Effet de la température sur le diamètre de l'écoulement d'un BAP [Cygan et al, 2016]	34
3.5 :	Effet des ajouts ou non (eau ou superplastifiant) sur l'essai d'étalement juste immédiatement après le malaxage lorsque la température initiale augmente de 20°C à 50°C [Vinh, 2014]	34
3.6 :	Effet de la température du BAP sur l'ouvrabilité initiale : l'étalement (a), temps d'écoulement à l'entonnoir en V (b) et rapport de remplissage à laboîte en L (c).[Abduljabar, 2008]	35
3.7 :	Effet de la température du BAP et des conditions ambiantes sur l'quantité de superplastifiant pour maintenir l'étalement [Weisheit et al, 2010]	36
3.8 :	Evolution des résistances en fonction de la température initiale du Béton [Mouret, 1997]	38
3.9 :	Développement de résistance des bétons en fonction de la température [Galluci et al, 2006 2006]	39
3.10 :	Evolution de la résistance à la compression des bétons exposés à un chaud et sec [Bendjilali et al, 2012]	40
3.11 :	Evolution de la résistance à la traction par flexion des bétons exposés à un climat chaud et sec [Bendjilali et al, 2012]	41
3.12 :	Evolution de la résistance à la compression dans deux milieux [Azzouz et al, 2004]	42
3.13 :	Evolution des résistances à la compression en fonction des moyens de maintenir l'autoplaçance avec l'élévation de la température initiale à 50°C – comparaison à la température initiale de 20°C [Vinh, 2014]	43
3.14 :	Evolution des résistances à 16h, 7j et 28j avec l'élévation de la température de cure d'un BAP incorporant un ciment au laitier [Weisheit et al, 2010]	44

3.15 :	Evolution des modules d'élasticité en fonction de la température initiale du béton, des moyens pour maintenir l'ouvrabilité lorsque la température initiale est de 50°C et du mode de conservation [Vinh, 2014]	46
3.16 :	Evolution de la porosité (mesurée par analyse d'image) [Galluci et al, 2006]	47
3.17 :	Porosité accessible à l'eau à 28 jours en fonction de la température de mûrissement [Mouret et al, 2005]	47
3.18 :	Porosité totale de différents BAP durcis à 20°C, 60°C and 80°C [Reinhardt et Stegmaier, 2006]	48
3.19 :	Valeurs de la porosité accessible à l'eau (moyenne et dispersion) obtenues pour les différents BAP [Vinh, 2014]	49
3.20 :	Absorptivité de bétons vibrés à 28 jours, mûris à des températures de 20°C ou 35°C durant les premières heures [Mouret et al, 2005]	50
3.21 :	Valeurs (moyenne et dispersion) de l'absorption d'eau par immersion totale, obtenues selon [EN13369] [Vinh, 2014]	50
3.22 :	Perméabilité à l'air après 28 jours des deux bétons siliceux et (s) et calcaire (c) [Mouret et al, 2005]	51
3.23 :	Valeurs (moyenne et dispersion) de la perméabilité intrinsèque pour les différents BAP [Vinh, 2014]	52
3.24 :	Résistance aux sulfates d'échantillons de mortier avec ajouts de laitier a- Ciment type II 6,4% de C3A, b- Ciment type V 3,7% de C3A. [GCI-714]	55
3.25 :	Evolution de la résistance à la compression des bétons immergés dans la solution de 5% MgSO4 [Safer, 2017]	58
3.26 :	Perte de masse en fonction de temps d'immersion dans l'acide sulfurique [Rahmani et al, 2008]	59
3.27 :	Evolution de la masse des échantillons dans une solution de Na₂SO₄ [Tenich et al, 2017]	61
3.28 :	Evolution de module dynamique des échantillons dans une solution de Na₂SO₄ [Tenich et al, 2017]	61
4.1 :	Courbe granulométrique du gravier utilisé	66
4.2 :	Analyse de diffractomètre des rayons x(DRX) des matériaux utilisés	68
4.3 :	Spectres FTIR des matériaux utilisés	69
5.1 :	Effet de la température sur l'étalement / affaissement des BAP et BV	88
5.2 :	Effet de la température sur le taux de remplissage à la boîte en L	89
5.3 :	Effet de la température sur la stabilité au tamis	89
5.4 :	Variation de la résistance à la compression de différents bétons à l'air libre	91
5.5 :	Variation de la résistance à la compression de différents bétons dans l'eau	92
5.6 :	Evolution de la résistance à la traction de différents bétons à l'air libre	94
5.7 :	Variation de la résistance à la traction de différents bétons dans l'eau	94
5.8 :	Vitesse d'impulsion ultrasonique de différents bétons	95
5.9 :	Corrélation résistance à la compression – UPV de différents bétons	96
5.10 :	Module élastique calculé théoriquement de différents bétons	97
5.11 :	Déformations élasto-instantanées longitudinales du béton ϵ_1 en fonction des contraintes relatives η à 120j pour les différentes séries de prismes	99

5.12 :	Déformations élasto-instantanées totales longitudinales du béton ϵ_{1T} en fonction des contraintes relatives η à 120j pour les différentes séries de prismes.	99
5.13 :	Déformations élasto-instantanées transversales du béton ϵ_2 en fonction des contraintes relatives η à 120j pour les différentes séries de prismes	100
5.14 :	Déformations élasto-instantanées totales transversales du béton ϵ_2 en fonction des contraintes relatives η à 120j pour les différentes séries de prismes	100
5.15 :	5.15 : Module de déformabilité E du béton en fonction des contraintes relatives η à 120j pour les différentes séries de prismes	101
5.16 :	Module d'élasticité E mesuré à 120j de différents bétons dans les différents modes	102
5.17 :	Module élastique calculé et mesuré de différents bétons dans les différents modes	104
6.1 :	Porosité accessible à l'eau de différents bétons dans les différents modes	108
6.2 :	Absorption par immersion d'eau de différents bétons dans les différents modes	109
6.3 :	Variation du coefficient de perméabilité K_P de différents bétons dans les différents modes	111
6.4 :	Variation de masse en fonction du temps de différents bétons immergés dans l'eau douce pendant 24 semaines	113
6.5 :	Variation de masse en fonction du temps de différents bétons immergés dans la solution 5% Na_2SO_4 pendant 24 semaines	115
6.6 :	Perte de masse en fonction du temps de différents bétons immergés dans la solution 5% H_2SO_4 pendant 24 semaines	117
6.7 :	Variation de la résistance à la compression de différents bétons selon les différents milieux d'immersion	119
6.8 :	pectres DRX des matériaux utilisés, a) le ciment ; b) sable et filler calcaire	121
6.9 :	Spectres DRX de différents bétons dans les différents milieux	124
6.10 :	Spectres FTIR de différents matériaux utilisés dans la formulation de différents bétons	125
6.11 :	Différents spectres FTIR du BAP1 immergé dans les différents milieux et le pourcentage des phases formées après six mois	129
6.12 :	Différents spectres FTIR du BAP2 immergé dans les différents milieux et le pourcentage des phases formées après six mois	130
6.13 :	Différents spectres FTIR du BO immergé dans les différents milieux et le pourcentage des phases formées après six mois	131
6.14 :	Microphotographies du BAP1 dans les différents milieux	134
6.15 :	Microphotographies du BAP2 dans les différents milieux	135
6.16 :	Microphotographies du béton ordinaire dans les différents milieux	136

LISTE DES TABLEAUX

N°	Tableau	Page
2.1 :	Catégories des BAP et leur domaine d'application [AFGC 2008]...	14
4.1 :	Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment utilisé	64
4.2 :	Caractéristiques physiques du ciment utilisé	65
4.3 :	Caractéristiques physiques du sable utilisé	65
4.4 :	Caractéristiques physique du gravier utilisé	66
4.5 :	Caractéristiques physiques du super plastifiant utilisé	67
4.6 :	Compositions et formulation des bétons utilisés	70
4.7 :	Qualité du béton et vitesse de propagation des impulsions	76
5.1 :	Temps d'écoulement T_{50} en secondes de différents bétons	88
5.2 :	Valeurs des modules élastiques calculés de différents bétons	97
6.1 :	Couleurs de différentes phases des matériaux utilisés	120
6.2 :	Les différents pics de différents composés en fonction des valeurs 2 θ	121
6.3 :	Résultats d'analyses DRX de différents bétons après six mois d'immersion dans de différentes solutions	123
6.4 :	Résultats d'analyses FTIR des matériaux utilisés	126

LISTE DES PHOTOS

N°	Photo	Page
2.1 :	Béton autoplaçant, les gravillons nagent sans aucune ségrégation	13
2.2 :	Essai d'étalement au cône d'Abrams (Slump Flow test) [holcim, 2004]	19
2.3 :	Essai de stabilité au tamis [Ployaert et al, 2015]	21
4.1 :	Superplastifiant de type médaflow30 utilisé	67
4.2 :	Essai de la résistance à la compression	73
4.3 :	Essai de la résistance à la traction (essai brésilien)	74
4.4 :	Emplacement des cadres et des comparateurs sur une éprouvette prismatique pour l'essai de déformations	75
4.5 :	Essai de la vitesse de propagation d'ultrason (UPV)	77
4.6 :	Pesée hydrostatique pour l'essai de la porosité accessible à l'eau	78
4.7 :	Dispositif pour l'essai de la perméabilité (Université de Biskra)	80
4.8 :	Flacon de H_2SO_4 utilisé pour un vieillissement accéléré	81
4.9 :	Tubes de Na_2SO_4 utilisées pour un vieillissement accéléré	81
4.10 :	Diffractomètre à poudre pour l'analyse par diffraction aux rayons X (Université de Biskra)	83
4.11 :	Spectrophotomètre SHIMADZUIR Affinity-1 (Université de Khenchela)	84
4.12 :	Microscope électronique à balayage équipé d'un spectromètre à rayons X (Université de Biskra)	84
4.13 :	Echantillons en poudre pour l'analyse DRX et FTIR	85
4.14 :	Echantillons pour l'analyse au MEB	85
6.1 :	Etat des échantillons après 24 semaines d'immersion dans les différents milieux	112

Abréviations

Abs : absorption d'eau par immersion exprimée en %

BAP : béton autoplaçant

BAP1 : béton autoplaçant formulé à 100% ciment

BAP2 : béton autoplaçant incorporant des fillers calcaires

BAP1M1 : béton autoplaçant 100% ciment dans le mode 1

BAP1M2 : béton autoplaçant 100% ciment dans le mode 2

BAP2M1 : béton autoplaçant incorporant des fillers calcaires dans le mode 1

BAP2M2 : béton autoplaçant incorporant des fillers calcaires dans le mode 2

BO : béton ordinaire

BOV : béton ordinaire vibré

BOM1 : béton ordinaire dans le mode 1

BOM2 : béton ordinaire dans le mode 2

BV : béton vibré

D : densité

E : module élastique

FC : fillers calcaires

f_{cj} : résistance mécanique à la compression à j jour

f_{tj} : résistance mécanique à la traction à j jour

K : perméabilité

K_p : coefficient de perméabilité

M1 : mode de murissement dans l'air libre

M2 : mode de murissement dans l'eau

UPV : vitesse de propagation d'ultrason

V_M : variation de masse

$\varepsilon(\%)$: porosité accessible à l'eau

Remarque : les notations BO, BOV et BV désignent le même terme qui est le béton ordinaire.

Introduction générale

Le béton est un matériau très sensible de l'ambiance qu'il entoure, notamment la température, l'hygrométrie, et la vitesse du vent. Ces paramètres agissent considérablement sur son comportement rhéologique à l'état frais et sur sa durabilité à l'état durci.

Les conditions appropriées de température sont autant nécessaires qu'important pour les réactions chimiques d'hydratation du ciment qui influent sur la durabilité du béton ainsi que sur ces propriétés physiques et mécaniques. C'est pour cela qu'il est important de prendre des dispositions spécifiques et nécessaires dès que la température dépasse 25°C afin de protéger le béton et assurer sa durabilité et ses performances à long terme. Car les conséquences du climat chaud sur les différents comportements des bétons sont très néfastes. L'augmentation de la température peut agir sur l'évolution de la rhéologie du béton, sur sa vitesse de prise, sur sa cinétique de durcissement et sa dessiccation. Donc avec l'accroissement de la température il ya une perte de maniabilité à l'état frais et de modifications physico- chimiques entraînant une baisse de résistance à l'état durci à long terme.

L'Algérie et suivant sa géographie qui compte plus de 85% des zones arides et semi arides de sa superficie, se caractérise par un climat aride ou plutôt un climat chaud qui est défini d'après le comité 305 de l'American Concrete Institute comme « toute combinaison d'une température élevée de l'air, d'une faible humidité relative, de la vitesse du vent et du rayonnement solaire, qui tend à altérer la qualité du béton frais ou durci ». [ACI 305, 2010]. Ainsi l'analyse des données climatiques de la région de Biskra comme un exemple d'une zone aride, de climat chaud et sec, explique les conditions sévères qui dépassent les tolérances et qui peuvent détruire la qualité et la durabilité du béton.

Le béton autoplaçant a fait l'objet de plusieurs recherches depuis son apparition à la fin des années huitante du siècle précédent, il ne se considère plus qu'une nouvelle famille de béton, mais il constitue davantage une nouvelle technologie dans le monde des matériaux de construction, avec un champ d'utilisation très varié du point de vue de la résistance mécanique, comme du point de vue de différentes applications visées. Ces avantages aussi sont liés à son homogénéité et sa fluidité qui lui permet de se mettre en œuvre et de s'écouler sans vibration et sous l'effet de son poids propre seul (effet gravitaire). Plus de ces caractères qui lui font se distinguer du béton dit ordinaire, le béton autoplaçant se formule différemment, avec un volume de pâte élevé, une quantité de fine très importante, l'emploi du superplastifiant, un faible volume de gravier et l'utilisation éventuelle d'un agent de

viscosité. Maintenant et à partir de ses multiples constituants, l'interrogation logique qui doit se poser et doit aussi trouver une réponse, c'est : est ce que le BAP avec sa distinction peut subir sous un climat aride c'est-à-dire sous un climat sec et chaud, les mêmes incidences que peut subir un béton ordinaire?

Donc pour répondre à cette question et aux sous questions implicitement posées concernant l'effet du climat aride sur le comportement rhéologique, physico- mécanique, et la durabilité des bétons autoplaçants notamment vis-à-vis aux attaques sulfatiques, nous avons structuré notre thèse après cette introduction générale en deux parties comprenant six chapitres comme suit :

- La première partie est consacrée à une synthèse bibliographique approfondie, contenant trois chapitres :
 - Chapitre 1 : Présente des généralités sur les milieux arides et semi arides où nous avons exposé le climat en Algérie, le climat aride et semi aride, le climat chaud et les paramètres qui le caractérisent, ainsi que le comportement des sols dans les zones arides et semi arides.
 - Chapitre 2 : Décrit l'état de l'art du BAP en tant que nouveau matériau, où nous avons exposé un aperçu contenant l'historique du BAP, son concept et les méthodes de sa formulation, les essais de sa caractérisation à l'état frais et à l'état durci, ainsi que ses propriétés physico- mécanique et sa durabilité.
 - Chapitre 3 : C'est une revue générale, en faisant le point sur l'influence du climat chaud sur les propriétés rhéologiques, physico-mécaniques des BAP, notamment l'effet de la température où nous avons procédé une comparaison entre le béton autoplaçant et le béton ordinaire vibré.
- La deuxième partie c'est notre étude expérimentale, contient trois chapitres aussi :
 - Chapitre 4 : Expose les matériaux utilisés et leurs caractéristiques physiques et chimiques, les procédures expérimentales et les essais effectués.
 - Chapitre 5 : Présente les résultats expérimentaux et leurs interprétations sur l'effet du climat chaud sur les propriétés aux états frais et durci du BAP en faisant la comparaison avec un béton ordinaire vibré.
 - Chapitre 6 : Présente les résultats expérimentaux et leurs discussions sur l'effet du climat chaud sur les indicateurs de durabilité du BAP notamment l'effet combiné climat chaud et attaque sulfatique, et la comparaison avec ceux trouvés pour un béton ordinaire.

Introduction générale

Enfin notre étude a été clôturée par une conclusion générale en faisant la synthèse des résultats trouvés, accompagnée de diverses recommandations que nous avons jugées utiles pour la recherche scientifique dans le même axe que nous avons franchi dans cette démarche..

Première partie
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre 1

Généralités sur les milieux arides et semi arides

1.1 Introduction

Les milieux arides comptent pour plus de 47% de la masse terrestre de la planète et sont réparties géographiquement, sur tous les continents [Joachim, 2004]. L'aridité se caractérise par un déficit pluviométrique presque permanent lié à une forte insolation, des températures diurnes élevées, une faible humidité de l'air et une évapotranspiration qui conduit à des déficits hydriques pendant la majeure partie de l'année. Les zones arides et semi-arides se caractérisent par des extrêmes climatiques saisonniers et des tendances pluviométriques imprévisibles. C'est un phénomène climatique structurel qui se différencie de la sécheresse qui survient aussi bien dans les milieux arides que dans les milieux plus humides [Tidiane.].

La zone aride se caractérise par une chaleur excessive et une précipitation insuffisante et variable ; on y trouve cependant des contrastes climatiques. Ceux-ci résultent en général des différences de température, de saison des pluies et de degré d'aridité. Lorsqu'on décrit la zone aride, on distingue trois grands types de climats : le climat méditerranéen, le climat tropical et le climat continental [Climat des zones arides].

- **Le climat méditerranéen** : La saison des pluies se situe en automne et en hiver. Les étés sont chauds et secs : Les températures hivernales sont douces.
- **Le climat tropical** : Les précipitations se produisent en été. Plus on est loin de l'équateur, plus la saison des pluies est courte. Les hivers sont longs et secs.
- **Le climat continental** : Les précipitations sont régulièrement réparties sur toute l'année, bien qu'il y ait une tendance à plus de pluie en été.

1.2 Climat en Algérie

L'Algérie est un pays de la zone subtropicale du Nord-africain, à part la frange nord possédant un climat méditerranéen, plus de 85% de sa superficie se caractérise par un climat semi-aride sur les hauts plateaux et le centre du pays, et un climat aride dès que l'on franchit la chaîne de l'atlas saharien (figure .1.1). C'est-à-dire un climat chaud et sec qui est défini d'après le comité 305 de l'American Concrete Institute comme « toute combinaison d'une température élevée de l'air, d'une faible humidité relative, de la vitesse du vent et du rayonnement solaire, qui tend à altérer la qualité du béton frais ou durci ». [ACI 305, 2010].

Chapitre 1 : Généralités sur les milieux arides et semi arides

En Algérie les précipitations sont caractérisées par une variabilité spatio-temporelle très marquante. La tranche de pluie annuelle décroît à mesure que l'on avance vers le sud et tombe à moins de 100 mm au sud de l'atlas saharien, cette valeur étant habituellement considérée comme marquant le début du désert. A la décroissance des pluies du Nord au Sud se superpose une décroissance de l'est à l'ouest. Les bordures Nord, Centre et Est reçoivent en moyenne des quantités annuelles de précipitations variant entre 600 et 1150 mm, elles sont de ce fait plus arrosées que le reste du pays. Les bordures Nord-Ouest par exemple enregistrent des totaux annuels moyens de l'ordre de 250 à 500 mm [Météo Algérie, 2020].

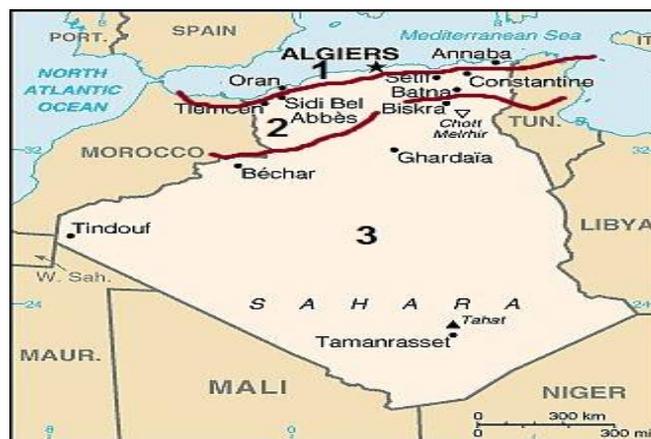


Figure 1.1 : les trois types de climat en Algérie [Climat Algérie]

1.3 Biskra au cœur de la zone aride et semi aride

Située au nord du Sahara, au pied du massif de l'Aurès et des monts du Zab, Biskra a un climat désertique chaud (classification de Köppen *BWh*) typique de la région dans laquelle elle se trouve.

L'analyse des données climatiques de la région de Biskra comme un exemple d'une zone aride, de climat chaud et sec montre que la période estivale est la plus chaude avec une température qui a dépassé 47°C à 11h00 au mois de juillet 2019 figure 1.2 [Info climat].

Le rayonnement solaire incident en ondes courtes quotidien moyen connaît une variation saisonnière considérable au cours de l'année. La période du 22 avril au 20 août, connaît un rayonnement solaire incident en ondes courtes par mètre carré supérieur à 6,9 kWh. L'humidité relative peut varier entre 20 % dans l'après-midi jusqu'à plus de 40 % la nuit. Le mois avec le taux de l'air le plus haut à Biskra est décembre avec 59% d'humidité, juillet est le mois le moins lourd, avec seulement 27% en moyenne par an. La vitesse horaire moyenne du vent à Biskra connaît une variation saisonnière modérée au cours de l'année. La période la

plus venteuse de l'année dure 3,8 mois, du 15 février au 9 juin, avec des vitesses de vent moyennes supérieures à 13,1 kilomètres par heure [Weather Spark].

Ces données expliquent sans doute les conditions climatiques sévères qui dépassent les tolérances et, qui peuvent altérer la qualité et le comportement rhéologique du béton à l'état frais tel que la perte rapide de la fluidité dans le temps, l'augmentation de la résistance aux jeunes âges, et les conséquences néfastes sur les propriétés mécaniques et la durabilité des structures en béton à long terme.

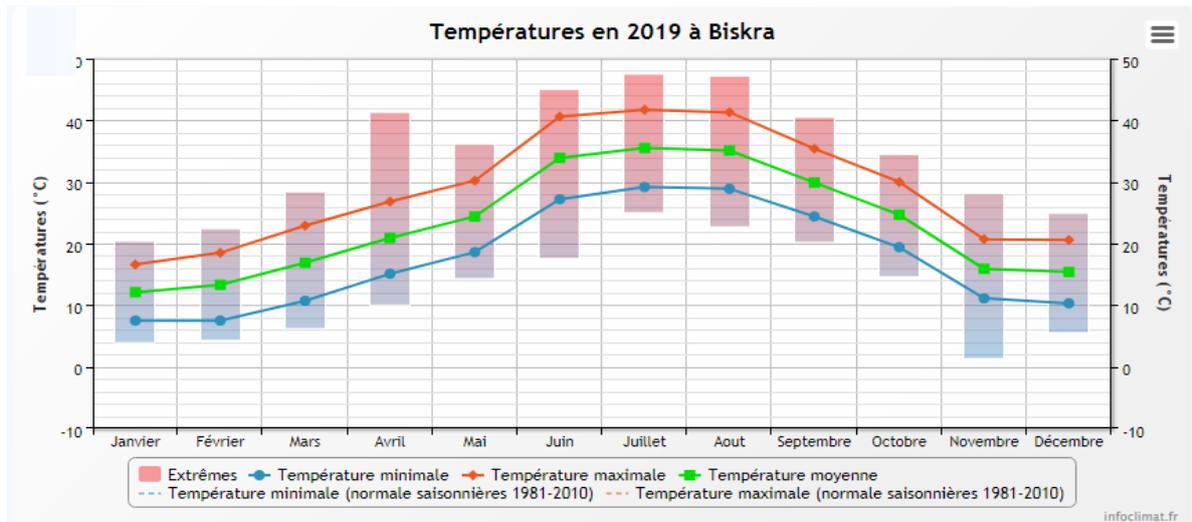


Figure 1. 2 : Température en 2019 à Biskra [info climat]

1.4 Climat aride, semi-aride et climat chaud

Le climat aride ou encore climat désertique se caractérise par une atmosphère très sèche, des températures élevées durant de longues périodes de l'année, des vents fréquents et réguliers, évaporation potentielle très importante, causé par une exposition au soleil dont l'intensité des rayons solaires est très forte. La faible pluviosité est extrêmement variable selon les saisons et selon les années, et La pluie tombe peu fréquemment, en orages isolés qui peuvent provoquer des crues dans les réseaux fluviaux asséchés [Joachim, 2004]. Alors que le climat semi-aride ou semi désertique (subdésertique), c'est un climat moins aride que le climat désertique avec une saison sèche s'étendant sur la plus grande partie de l'année, et une saison humide avec un taux d'évaporation qui excède les faibles précipitations.

Donc l'aridité qui est un lien commun entre les deux climats se caractérise par un déficit pluviométrique presque permanent lié à une forte insolation, des températures diurnes

élevées, une faible humidité de l'air et une évapotranspiration qui conduit à des déficits hydriques pendant la majeure partie de l'année [Tidiane].

Les températures diurnes élevées conduisent vers un climat chaud, qui est en basant sur l'humidité relative (HR) peut se regrouper en trois catégories [Berhane, 1992] :

- climat chaud et humide ($HR \geq 85\%$ et température toujours supérieure à 20°C), rencontré dans les zones de l'équateur et tropical
- climat chaud à humidité modérée ($50\% < HR < 65\%$),
- climat chaud et sec ($HR < 40\%$ et température toujours supérieure à 20°C) dans les régions désertiques et semi-désertiques.

1.5 Paramètres climatiques caractérisant un climat chaud

Le temps d'une façon général est la condition atmosphérique dominante dans une zone à un moment déterminé, se traduisant par la chaleur ou le froid, un ciel clair ou nuageux, la sécheresse ou l'humidité, le vent ou le calme. Selon [ACI 305. 2010] (Guide to Hot Weather Concreting), le temps chaud est défini comme « toute combinaison d'une température élevée de l'air, d'une faible humidité relative, de la vitesse du vent et du rayonnement solaire, qui tend à altérer la qualité du béton frais ou durci en accélérant l'évaporation et la vitesse de l'hydratation du ciment ou, sinon, à conduire à des propriétés anormales du matériau »

a) température élevée

Les zones arides et semi arides se caractérisent souvent par des températures élevées diurnes peuvent dépasser les 47°C (Biskra juillet 2019), ces températures ambiantes sont combinées avec une période importante d'ensoleillement direct. Cette élévation de la température accélère les réactions chimiques en entraînant une réduction sensible du temps de prise du béton, une augmentation des résistances initiales et une réduction des résistances à long terme.

b) humidité relative HR

Le terme « humidité relative » est défini comme étant le rapport de la vapeur d'eau disponible à la qualité d'eau nécessaire pour atteindre la saturation. En accord avec les lois de la nature, une augmentation de la température est souvent accompagnée par une réduction de l'humidité relative. Aux humidités relatives les plus petites, la plus grande capacité de l'air d'absorber l'humidité à partir des sources disponibles dont le béton [Chabbi, 2003]

Lorsque la teneur du sol en humidité est plus élevée que celle de l'air, l'eau a tendance à s'évaporer dans l'air. Dans le cas contraire, l'eau se condensera dans le sol. L'humidité est

Chapitre 1 : Généralités sur les milieux arides et semi arides

généralement faible dans les zones arides. Dans le sud algérien elle varie d'une moyenne maximale de 30 % à 70 % à une moyenne minimale de 10 % à 30 % tout au long de l'année.

c) rayonnement solaire

Le rayonnement direct provoque l'élévation de la température des matériaux de base stockés (ciment, granulats et eau). L'ensoleillement induit également l'élévation de la température des coffrages et des cages d'armatures disposées à l'intérieur et plus généralement de tous les équipements sur chantier (dispositifs de stockage, pompes à béton, canalisation...). Le site lui-même, dans lequel se déroule le chantier, est fortement réchauffé. Il en résulte une augmentation de la température du béton frais. Après la mise en place du béton, le rayonnement solaire direct conduit à une évaporation rapide de l'eau des surfaces en béton exposées et peut entraîner une fissuration par retrait plastique [Vinh, 2014].

À Biskra, les étés sont caniculaires, les hivers sont longs et frais et le climat est sec et dégagé dans l'ensemble tout au long de l'année. La longueur du jour varie considérablement au cours de l'année. En 2019, le jour le plus court est le 21 décembre, avec 9 heures et 49 minutes de jour ; le jour le plus long est le 20 juin, avec 14 heures et 30 minutes de jour.

La période la plus lumineuse de l'année dure 3,9 mois, du 22 avril au 20 août, avec un rayonnement solaire incident en ondes courtes par mètre carré supérieur à 6,9 kWh. Le jour le plus lumineux de l'année est le 9 juillet, avec une moyenne de 7,8 kWh.

La période la plus sombre de l'année dure 3,2 mois, du 30 octobre au 7 février, avec un rayonnement solaire incident en ondes courtes par mètre carré inférieur à 3,9 kWh. Le jour le plus sombre de l'année est le 15 décembre, avec une moyenne de 2,9 kWh.

d) Précipitations

Les précipitations diminuent l'effet de la radiation solaire puisqu'elles en absorbent une partie. Il s'ensuit l'augmentation de l'humidité relative et la diminution de la température, ce qui provoque la limitation de l'évaporation.

À Biskra, la saison connaissant le plus de précipitation dure 9,6 mois, du 22 août au 9 juin, avec une probabilité de précipitation quotidienne supérieure à 8 %. La probabilité de précipitation culmine à 14 % le 15 septembre.

e) Les vents

Une augmentation de la vitesse du vent entraînera une augmentation dans la part d'évaporation d'eau, conduisant à une réduction de l'ouvrabilité du béton et des difficultés de compactage. Il est estimé que l'évaporation d'eau à 15 et 40 km/h est respectivement 4 et 9 fois plus élevée que dans le cas d'air calme [Chabbi, 2003]

Chapitre 1 : Généralités sur les milieux arides et semi arides

La vitesse horaire moyenne du vent à Biskra connaît une variation saisonnière *modérée* au cours de l'année.

La période la plus venteuse de l'année dure 3,8 mois, du 15 février *au* 9 juin, avec des vitesses de vent moyennes supérieures à 13,1 kilomètres par heure. Le jour le plus venteux de l'année est le 11 avril, avec une vitesse moyenne du vent de 14,7 kilomètres par heure [*Weather Spark*].

f) Evaporation

L'évaporation est la conversion de l'eau, de l'état liquide à l'état gazeux, à une température inférieure au point d'ébullition, et sa diffusion dans l'atmosphère, elle se produit lorsque la surface de l'eau est exposée à un air non saturé [*Berhane, 1992*].

Une évaporation trop rapide de l'eau du béton peut entraîner quelques heures après le décoffrage des fissures de retrait plastique. Dans la pratique, il est conseillé de ne pas dépasser une vitesse d'évaporation supérieure à 1 kg/m²/h [*Bétonnage par temps chaud*].

1.6 : Comportement des sols dans les zones arides et semi arides

Les sols des régions arides, à climat toujours peu pluvieux, sec et très régulier, présentent souvent des croûtes calcaires, gypseuses ou salines [*Aubert, 1983*]. Le gypse qui est l'origine de toute attaque sulfatique se trouve en quantité très faibles dans la plupart du sol, d'environ 0.01 à 0.05% exprimé en SO₄ du sol sec. Mais il peut être rencontré en quantités très élevées et supérieures à 5% dans certaines régions notamment en Afrique du nord, les prairies canadiennes et la région parisienne sous la forme de Na₂SO₄ de l'ordre de 58g/litre [*GCI-714*].

En Algérie les sols gypseux sont très répandus, on en compte 8000km², ce qui représente 12% des sols gypseux du monde selon le classement FAO en 1990 [*FAO.1990*], et dans les régions Sud Est, le taux de sulfate varie entre 0.9 et 5.4% dans les sols [*LTPS. 2005*].

Les sols aux bords de certains Chotts, comme Chott Melghrir ou dans les régions au sud de Biskra jusqu'à Touggourt et Ouargla, sont affectés par la salinité ou susceptible de l'être [*Durant, 1983*], et les concentrations en sulfate SO₄⁻² des eaux souterrains dans ces régions sont très élevées et varient entre 366mg/l et 367mg/l [*LTPS. 2005*], ce qui explique le taux d'agressivité qui peut affecter les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons dans ces régions.

1.7 Conclusion

L'aridité se caractérise par un déficit pluviométrique presque permanent lié à une forte insolation, des températures diurnes élevées, une faible humidité de l'air et une évapotranspiration qui conduit à des déficits hydriques pendant la majeure partie de l'année. L'Algérie dont 85% de sa superficie fait partie de la zone aride et semi aride notamment dans la région sud où le climat est chaud. Un climat chaud qui se définit comme « toute combinaison d'une température élevée de l'air, d'une faible humidité relative, de la vitesse du vent et du rayonnement solaire, qui tend à altérer la qualité du béton frais ou durci ». [ACI 305, 2010].

Biskra et ces régions donnent l'exemple d'une zone aride de climat chaud avec leurs données climatiques très sévères, et qu'il est très difficile de pouvoir les étudier simultanément. Ces données peuvent altérer le béton à l'état frais comme à l'état durci.

L'analyse des données climatiques de la région de Biskra, explique les conditions climatiques sévères qui peuvent altérer le béton à l'état frais et leurs conséquences à l'état durci.

Chapitre 2

Aperçu sur les bétons autoplaçants

2.1 Introduction

Pour répondre aux questions de la durabilité insuffisante souvent provoquée par le compactage non conforme aux règles de l'art, dû à la réduction progressive des travailleurs qualifiés dans l'industrie de la construction au Japon, *Okamura* a proposé en 1986 l'utilisation du béton autocompactant ou béton autoplaçant ou SCC(de l'anglais Self Compacting Concrete) qui peut être compacté dans tous les coins d'un coffrage, uniquement au moyen de son propre poids et sans besoin de compactage vibrant [*Okamura et al. 1995*]. Son premier prototype d'un tel béton fut développé en 1988 à l'Université de Kochi. Sa première utilisation pratique intervint deux années plus tard pour la construction d'un pont [*Holcim. 2004*].

Afin de développer le béton autocompactant, des études, y compris une étude fondamentale sur l'aptitude au travail du béton, ont été menées par *Ozawa* et *Maekawa* à l'université de Tokyo [*Ozawa et al, 1989*][*Okamura et al, 1993*][*Maekawa et al, 1999*].

Dès l'année 1989, les premiers prototypes pratiques du BAP ont été produits à l'université de Tokyo en utilisant des constituants disponible sur le marché. Ce n'est qu'à partir des années 90 du 20^{ème} siècle que le Japon a commencé de développer et d'employer le BAP dans la construction [*Ouchi et al, 2003*].

L'intervention de *K.Ozawa* en 1992 au 4^{ème} congrès international CANMET & ACI à Istanbul, a accéléré la diffusion mondiale du concept de cette nouvelle génération du béton.

En 1988, le premier atelier international sur le BAP s'est tenu à Kochi, au Japon.

Grace aux efforts d'*Ozawa* et de son collègue, une recherche plus intensive a proposé, en particulier dans les grandes entreprises de construction en Asie [*Celik Ozyildirim et al, 2003*].

À la fin des années nonante, on vit apparaitre les premières applications en Suède, en France et aux Pays-Bas. Peu après, de premiers éléments d'ouvrages en béton SCC furent également réalisés en Suisse [*Holcim. 2004*]. Ensuite les BAP se développent partout dans le monde et connaissant à l'heure actuelle un essor considérable surtout au Japon, En Europe et en Amérique du nord [*R'mili, 2010*].

2.2 Concept, caractérisation et formulation des bétons autoplaçants

2.2.1 Définition d'un béton autoplaçant

Chapitre 2 : Aperçu sur les bétons autoplaçants

On désigne par « béton autoplaçant » ou « béton autocompactant » ou SCC de l'anglais « Self Compacting Concrete », un béton très fluide, homogène et stable , mis en œuvre sans vibration « la compaction s'effectue par le seul effet gravitaire » [AFGC. 2008].

C'est presque la même définition dans l'Annexe nationale NA de la norme SN EN 206-1 : Le béton frais est appelé auto-plaçant lorsqu'il se compacte suffisamment grâce à son poids propre tout en ne présentant pas de ségrégation. [Holcim. 2004].

Pour les recommandations belges on trouve la définition suivante : « Le béton autoplaçant (BAP) est un béton qui, à l'état frais, est caractérisé par une fluidité telle que, par le seul effet de son poids propre et sans énergie de compactage supplémentaire. Il est capable de remplir complètement le coffrage, même à travers une nappe d'armatures dense ou en présence d'autres obstacles. Tout en ayant une résistance à la ségrégation suffisante pour rester homogène lors du transport, du pompage et de la mise en œuvre » [Ployaert et al, 2005].

Grâce à leur formulation, ils offrent des caractéristiques exceptionnelles de mobilité et de remplissage des coffrages tout en conservant leur homogénéité lors de l'écoulement (absence de ségrégation dynamique) et une fois en place (absence de ségrégation statique) [Patrick , 2018].



Photo2.1 : Béton autoplaçant, les gravillons nagent sans aucune ségrégation

[Patrick, 2018]

2.2.2 Catégories des BAP

En France les BAP sont classés en trois catégories numérotées de 1 à 3 suivant leur domaine d'application [AFGC, 2008]

La catégorie 1 : Correspond aux BAP utilisés dans le cas de coulages horizontaux de faible épaisseur (inférieure ou égale à 300 mm) et ayant un intervalle d'écoulement supérieur 100 mm (les bétons autonivelants dans l'ancienne appellation).

La catégorie 2 : Correspond aux BAP utilisés pour des applications horizontales de forte épaisseur (supérieure à 300 mm) ou pour des coulages courants en vertical. L'intervalle d'écoulement I est supérieur ou égal à 80 mm.

La catégorie 3 : Correspond aux BAP pour lesquels l'intervalle d'écoulement I est inférieur à 80 mm (4parties d'ouvrage exigües ou fortement ferraillées).

Tableau 2.1 : Catégories des BAP et leur domaine d'application [AFGC 2008]

Intervalles d'écoulements	Applications horizontales		Applications Verticales
	Épaisseur $\leq 300\text{mm}$	Épaisseur $> 300\text{mm}$	
$I \geq 100$	1	2	2
$80 \leq I < 100$	2	2	3
$I < 80$	3	3	3

2.2.3 Intervalle d'écoulement

Selon les recommandations de l'[AFGC 2008] pour l'emploi des BAP l'intervalle ,l'intervalle d'écoulement I est définit comme la dimension (en mm) de l'espace le plus petit à travers lequel le béton doit cheminer pour remplir correctement l'élément à bétonner .C'est une grandeur qui est caractéristique d'une partie d'ouvrage bétonnée en une seule fois et qui permet de quantifier la sévérité du confinement contrariant la mobilité du béton, prenant en compte les conditions géométriques, les divers inserts rencontrés (ferrailage, réservations précontrainte,...) et à la méthodologie de bétonnage. Sa méthode de détermination prenant en compte certaines dispositions consécutives à partir des plans de coffrage et de ferrailage.

Par exemple pour les voiles de bâtiment d'épaisseur 16cm, enrobage 2cm avec deux nappes de treillis soudés \emptyset 6mm (maille 200x200) :

$$I = 160 - 2 \times 20 - 2 \times 6 = 108 \text{ (espace libre entre les deux nappes de treillis soudé)}$$

2.3 Particularités des BAP à l'état frais

Les bétons autoplaçants se distinguent des bétons ordinaires principalement par leurs propriétés à l'état frais et leur capacité de moulage, d'enrobage et de compaction par le seul effet de la gravité.

Cinq particularités peuvent caractériser les BAP d'après l' [AFGC, 2008] :

1- un volume de pâte élevé

Les BAP doivent contenir un volume de pâte (ciment + additions + adjuvants + eau efficace + air) important, généralement de 330 à 400l/m³ pour limiter les frottements entre granulats et les écarter les uns des autres, afin d'avoir un bon étalement.

2- une quantité de fine importante

Pour limiter les risques de ségrégation et ressuage, les BAP doivent contenir une quantité de fins très importante inférieure à 125 μ m de l'ordre de 500kg/m³ proviennent du ciment, de granulats et des additions.

Afin d'éviter les problèmes liés à l'élévation de la chaleur de l'hydratation, le liant est fréquemment un mélange de deux, voire trois constituants : ciment plus cendre volante, laitier de haut fourneau, filler calcaire, etc. Ces additions et leur teneur doivent répondre aux exigences de la résistance à la compression à 28 jours et aux exigences de durabilité telles qu'imposées par les normes applicables (DTU21, norme NF EN 206-1, normes produits fabriqués en usine, etc.)

3- l'utilisation d'un superplastifiant

Généralement on utilise un adjuvant fluidifiant (superplastifiant), afin d'obtenir une très grande fluidité requise d'un BAP [Holcim, 2004]. Un superplastifiant permet de diminuer le teneur en eau de 10à 30%, tout en maintenant une même maniabilité [Roussel, 2000]. Toutefois un dosage trop élevé (proche ou supérieur au dosage de saturation peut augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage [AFGC, 2000].

4- l'utilisation éventuelle d'un agent de viscosité

Comme les fines, les agents de viscosité ont généralement pour rôle d'empêcher le ressuage et de limiter les risques de ségrégation de granulats en rendant la pâte plus

épaisse. De façon schématique leur utilisation semble se justifier dans le cas des bétons ayant des rapports E/L élevés, car les fines ne sont pas toujours suffisantes pour fixer l'eau dans le béton. Ils semblent par contre dans le cas des bétons ayant des rapports E/L faibles (notamment BAP de résistance supérieure à 50MPa [AFGC, 2000]).

5- un faible volume de gravillons

Les recommandations de l'AFGC conseillent à adopter un rapport gravier/ sable de l'ordre de 1 dans les BAP, car les gravillons sont à l'origine du blocage de béton en milieu confiné d'un coté, et d'un autre coté sa présence permet d'augmenter la compacité du squelette granulaire du béton.

les risques de blocage pour un confinement donné augmentent lorsque D_{max} augmente, c'est pour cela qu'il est indispensable de choisir un diamètre maximal D_{max} entre 10 et 20mm et de diminuer le volume de gravillons.

2.4 Formulation des bétons autoplaçants

Les constituants d'un béton autoplaçant sont au nombre au moins de six, contre quatre pour un béton vibré, ce qui explique sa formulation la plus complexe. Donc formuler un BAP c'est trouver un arrangement de ces constituants répondant à un cahier de charge donné, qui comporte plusieurs clauses surtout à l'état frais, et qui peuvent être dans des plusieurs cas paradoxales, car dans un coté on cherche la fluidité et dans un autre coté la stabilité.

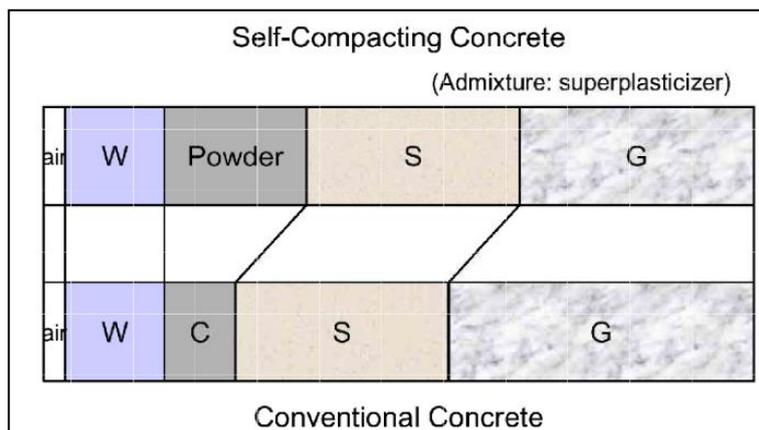


Figure 2.1 : Les constituants d'un BAP et un béton ordinaire [Okamura et al, 2003]

La plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique. La méthode de Dreux-Gorisse la plus utilisée pour les bétons vibrés n'est en effet pas adaptée, car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions [Turckry, 2004].

Depuis son apparition au Japon, diverses approches et formulations ont été élaborées à travers le monde entier pour faire face et répondre aux exigences grandissantes en termes de qualité et d'uniformité de ce type de béton.

Dans la littérature, trois grandes écoles peuvent résumer la démarche internationale des recherches et les différentes approches de la formulation du BAP [R'mili, 2010] :

1- L'école asiatique représentée par :

- Les méthodes Japonaises (travaux d'Okamura et al, d'Ouchi et al, et de Sakata et al).
- Les méthodes Chinoises (travaux de Su et al).

2- L'école européenne représentée par :

- Les méthodes françaises (travaux de Sedran et De Larrard, d'Ambroise et al, et Shen et al).
- Les méthodes suédoises (travaux de Tangtermsirikul et al, de Peterson et al, et de Bui et Montgomery).
- La méthode hollandaise (travaux de Brouwers et Radix).

3- L'école américaine représentée par :

- Les méthodes canadiennes (travaux de Khayat et al, et Miao et al).

Ces trois écoles permettent d'une manière plus complète de modifier les proportions des constituants du BAP par rapport au béton ordinaire vibré, en basant sur l'optimisation de différentes phases de celui-ci, tel que la quantité du mortier, et /ou le volume de la pâte, et/ou le squelette granulaire de sorte que la ségrégation, le ressuage et le tassement soit empêchés.

2.5 Principes pour la formulation des bétons autoplaçants

Pour la formulation des BAP, les méthodes utilisées pour le béton ordinaire tel que Dreux Gorisse, Faury, Bolomey, etc....ne sont en effet pas adaptées, car elles ne prennent en considération ni les additions ni les adjuvants. Ce qui implique que la plus part des formules actuellement se font d'une façon empirique et plusieurs institutions universitaires, de recherches, de fabricants d'adjuvants, de béton près emploi et de préfabricants ont conçu et développé leurs propres méthodes.

Le volume étant le principal paramètre pour toute formulation des BAP à fin de remplir et combler tous les vides entre les particules de granulats.

Avec le temps et sur la base de l'expérience, le guide [EFNRAC., 2005] et les recommandations [AFGC., 2008] ont fourni des directives et ont proposé une gamme typique des quantités des principaux constituants d'un BAP :

- Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1.
- Le volume de gravier est de l'ordre de 270 à 360 l/m³.
- Le volume du sable est de 48 à 55% du volume total des granulats.
- Le volume d'eau est de l'ordre de 150 à 210 l/m³.
- La masse de liant (ciment plus additions) est de l'ordre de 380 à 600 kg/m³.
- La masse de ciment est supérieure ou égale au minimum requis par la norme du BPE (P18-305), soit en général de 300 à 350 kg/m³. En complément, la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m³.
- Le volume de pâte varie entre 300 et 380 l/m³. [EFNARC., 2000], et de l'ordre de 330 à 400 l/m³ selon [AFGC., 2008].
- Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation.
- Le volume de l'air occlus est de 1 à 3%.

À la base de ces plages pour chaque constituant, la formulation se fait par tâtonnement et les concepteurs ont élaboré leurs propres outils car il n'y a aucune méthode standard peut être utilisée comme référence.

2.6 Caractérisation des BAP à l'état frais

La particularité du BAP réside à ces caractères à l'état frais. Pour caractériser et contrôler les propriétés du BAP, il existe de nombreux procédés, vont du simple cône destiné à la mesure de l'étalement jusqu'au complexe et coûteux rhéomètre à béton.

En France, trois essais de caractérisation ont été préconisés en l'an 2000 par l'Association Française de Génie Civil et deviennent sur site les essais de référence pour valider une formule de BAP.

a- Essai d'étalement au cône d'Abrams (mobilité en milieu non confiné)

L'essai d'étalement (ou slump flow test) est utilisé pour évaluer la fluidité des BAP. C'est l'essai le plus courant, car le plus facile à mettre en œuvre, permettant de caractériser la mobilité en milieu non confiné. Cet essai s'effectue par le même cône d'Abrams qui est utilisé pour l'essai d'affaissement des BO. Ce cône est placé sur une plaque d'étalement, à surface propre et humidifiée et de dimension suffisante (≥ 800 par 800 mm), est rempli de BAP. Le cône est ensuite soulevé et le BAP en sort en formant une galette qui s'élargit sous sa propre énergie (Photo 2.2). La valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette de béton ainsi obtenue, qui devrait être comprise entre 600 et 800 mm [Holcim, 2004].

La vitesse d'étalement du béton est également une indication souvent prise en compte et fournit une indication sur le caractère visqueux du matériau. On mesure le temps t50 (ou T500) pour atteindre une galette de diamètre 50 cm (ou 500 mm).

Le temps t50 est une indication secondaire d'écoulement et indique une grande fluidité s'il est faible et vis versa [EFNARC., 2005].

Il est à noter que les recommandations internationales classent les BAP en trois catégories selon la valeur de l'étalement (SF : Slump Flow) et les applications correspondantes [EFNARC., 2005] :

- SF1 (550 - 650 millimètres) est approprié pour les structures en béton non renforcées ou légèrement renforcées,
- SF2 (660 - 750 millimètres) convient aux applications courantes (murs, colonnes),
- SF3 (760 - 850 millimètres) est employé pour des applications verticales en structures très encombrées, structures avec des formes complexes.

Des valeurs à atteindre plus haut que 850 millimètres peuvent être spécifiées dans quelques cas spéciaux mais le grand soin devrait être pris concernant la ségrégation et la taille maximum.



Photo2.2 : Essai d'étalement au cône d'Abrams (Slump Flow test) [Holcim, 2004].

b- Essai de la boîte en L (mobilité en milieu confiné)

L'essai de la boîte en L (L-Box test) est utilisé pour vérifier la capacité du béton à s'écouler à travers d'un réseau d'armatures d'écartement défini et qualifier la capacité d'autonivellement des BAP. On remplit d'abord la partie verticale d'une boîte en forme de L (figure 2.2). Après une minute, la trappe est levée permettant l'écoulement à travers trois armatures de diamètre 12 mm et distantes de 41mm. Le taux de remplissage final H2/H1 renseigne sur la mobilité du béton en milieu confiné qui doit être en tout état de cause supérieur à 80%. [AFGC., 2000].

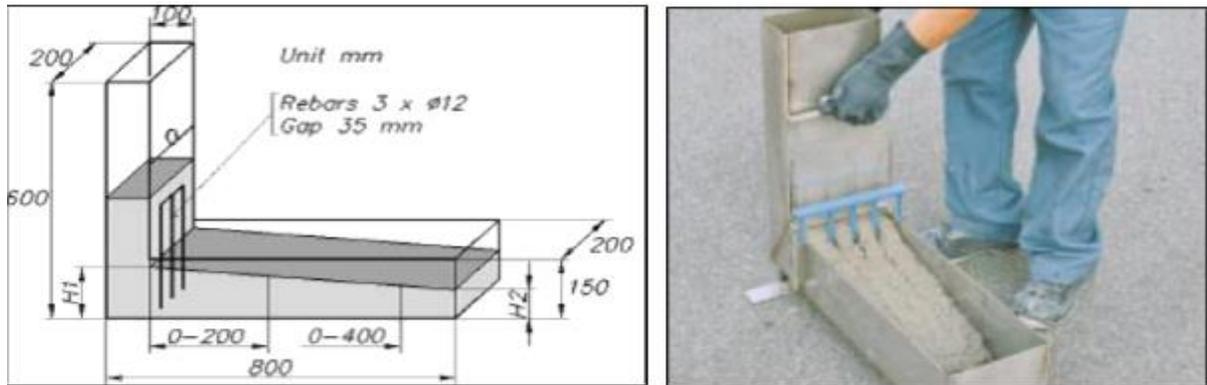


Figure 2.2 : Représentation schématique et photographique de l'essai de la boî en L (L-Box)[EFNARC2002][Holcim,2004]

On mesure aussi, le temps nécessaire dès l'ouverture du volet jusqu'à la fin de l'écoulement du béton dans la partie horizontale. Ce temps d'écoulement doit être compris entre 3 et 7 secondes [EFNARC 2005].

c- Essai de stabilité au tamis

Cet essai vise à qualifier les bétons autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation. Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton auto-plaçant en laboratoire, ou pour le contrôle de la stabilité du béton livré sur chantier. Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité [AFGC.2008].

Un échantillon de 10 litres de béton est mis au repos pendant 15 min. Il s'agit ensuite de déverser 4,8 kg de l'échantillon sur un tamis de 5 mm de diamètre de mailles (Photo 2.3). Après 2 min d'attente, le pourcentage de laitance qui est passée au travers du tamis est calculé selon l'expression : $\pi = (\text{masse de laitance} / \text{masse de l'échantillon}) \times 100$

Le critère de stabilité à la ségrégation est défini par [AFGC, 2008] :

- Stabilité (ou résistance à la ségrégation) satisfaisante : $0 \leq \pi \leq 15\%$,
- Stabilité (ou résistance à la ségrégation) critique : $15\% \leq \pi \leq 30\%$,
- Stabilité (ou résistance à la ségrégation) très mauvaise : $\pi \geq 30\%$.



Photo2.3 : Essai de stabilité au tamis [Ployaert et al, 2015]

2.7 Propriétés des BAP à l'état durci

Par expérience les résistances de 25 à 35MPa sont facilement à atteindre par les BAP [Turcry, 2004]. Cependant, lorsque le BAP est formulé et mis en œuvre de manière adéquate, ses propriétés à l'état durci (résistance, déformation, durabilité) ne se différencient guère de celles d'un béton ordinaire vibré. Souvent elles sont même meilleures, en particulier lorsque le béton spécifié doit répondre à des exigences courantes, ce qui est généralement le cas dans le domaine du bâtiment. [Holcim, 2004].

2.7.1 Résistances mécaniques

La mise au point d'une formule de béton consiste à rechercher à partir d'un composant donné, un mélange ayant à l'état frais une certaine maniabilité, à l'état durci une résistance en compression donnée, et ce au moindre coût. Ce critère de résistance conduira au choix du ciment (nature, classe) et son dosage, ainsi qu'au dosage en eau et à l'éventuelle utilisation d'adjuvants. Ce critère a également une influence sur le rapport G/S [Dreux & Festa 1998].

La formulation des BAP implique un rapport E/C bas, donc de nature à fournir de bonnes résistances mécaniques [Daoud, 1997].

[Gibbs et al, 1999] ont trouvé sur des éléments standards de test que la résistance à la compression à 28 jours est plus élevée pour les BAP que celle du béton vibré de référence (figure 2.3).

[Molez, 2003] sur une série de six mélanges de béton, il a trouvé que la courbe de la résistance en compression du BAP, après le 10^{ème} jour se coïncide avec celle du BO (figure 2.4), de même il a trouvé que la résistance en traction du BAP est supérieure à celle du BO.

[Paultre et al, 1996] dans une étude de comparaison ont trouvé que les résistances en compression des BAP et un BHP sont comparables [Paultre et al, 1996].

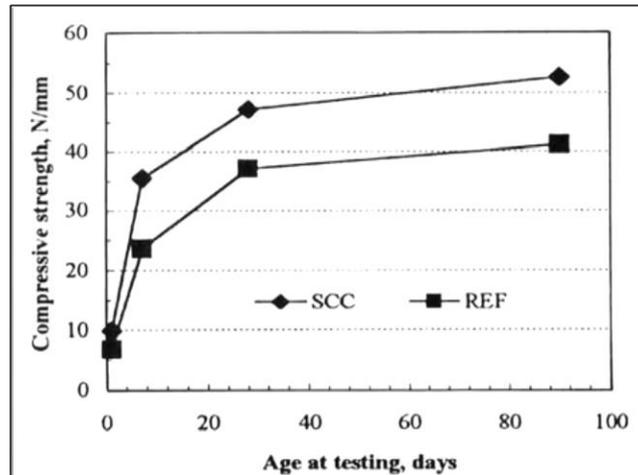


Figure 2.3: Evolution de la résistance mécanique d'un BAP et d'un BO correspondant [Gibs et al ,1999]

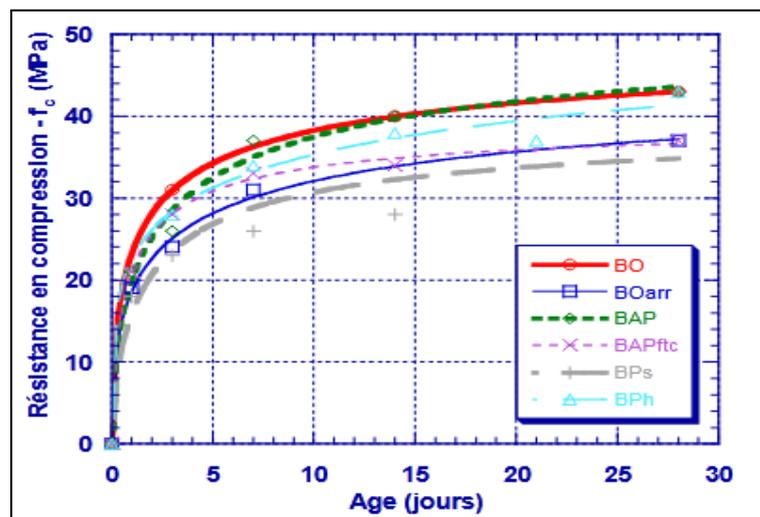


Figure 2.4 : Résistance en compression de différents mélanges [Molez, 2003]

Concernant la résistance à la traction [Molez, 2003] a trouvé également que la résistance à la traction des BAP est supérieure à celle du BO. C'est la même constatation de [Soneibi, 1997] qui a observé que dans les mêmes conditions de conservation dans l'eau, la résistance à la traction à 28 jours pour les BAP à celle du béton ordinaire de référence [Soneibi, 1997].

Alors qu'aucune différence n'a été constatée entre la résistance à la traction des BAP et celle des bétons de référence par [Gibbs et al, 1999]

2.7.2 Effet des fillers calcaires sur les résistances mécaniques

Les fillers calcaires sont des produits obtenus par broyage fin de roches naturelles présentant une teneur en carbonate de calcium – CaCO_3 – supérieure à 75 %. Leur incorporation sans doute améliore les propriétés du BAP à l'état frais d'une façon très significatif, mais à l'état durci leur effet est dans plusieurs cas contradictoire selon plusieurs études et qui dépend de plusieurs facteurs tels que la finesse, la nature et la quantité des fillers.

A cet effet [Bellifa et al, 2015] voient que la substitution d'une partie du ciment portland par les fillers calcaires est l'origine d'une diminution croissante des résistances à la compression.

Alors que [Beeralingewoda et al, 2013] ont constaté que les essais de la résistance à la compression sur des éprouvettes cubiques montrent une augmentation jusqu'à un remplacement de 20% au-delà duquel la résistance commence à diminuer. [Nécira, 2018] a trouvé que la résistance à la compression des BAP de haute performance commence à diminuer à partir de 20% de substitution du ciment. [Bahri, 2012] a trouvé que pour les bétons super plastifiés (BAP), une quantité de 60 à 80 kg/m^3 permet d'augmenter la compacité et améliorer sensiblement les performances mécaniques des bétons.

Pour [Bessa, 2004] la quantité de 30% de substitution des additions minérales dans les mortiers est optimale, au-delà duquel la résistance à la compression commence à chuter. Cependant d'après [Michel et al, 2008] le maximum de résistance à la compression est généralement atteint avec un taux de substitution de 15%, au-delà, l'effet des fillers n'entraîne pas de modification des résistances ou alors entraîne une diminution.

2.7.3 Module élastique

En se référant à la formule réglementaire du BAEL pour le calcul du module élastique du béton ($E_{ij} = 11000 f_{cj}^{1/3}$), celui-ci ne dépend que de la résistance du béton. Ainsi, à résistance égale, un BAP aurait donc le même module qu'un béton vibré [R'mili, 2010]. Cependant [Molez, 2003] a constaté que le module élastique du BAP est légèrement supérieur à celui du béton ordinaire.

Au contraire [Turcry, 2004] a trouvé que le module élastique d'un BAP est systématiquement inférieur à celui d'un béton ordinaire dérivé, mais la différence n'est pas très importante, puisqu'elle se situe entre 2 et 8%. Ces résultats sont aussi confirmés par [Assié, 2004] qui a prouvé que les modules élastiques mesurés des BAP et des BV sont assez proches même s'ils peuvent différer légèrement d'une méthode de mesure à l'autre.

D'une façon plus précise, le module élastique dépend essentiellement des quantités relatives de granulats et de pâte de ciment. Etant donné que la pâte de ciment est en proportion plus

importante dans un BAP et qu'elle présente un module généralement plus faible que les granulats, le module du BAP est environ 10% inférieur à celui d'un béton vibré de résistance identique et produit avec des granulats de même nature [Holcim, 2018].

2.7.4 Retrait

Dès sa mise en place jusqu'à l'état durci, le BAP subit des variations des volumes dite « retrait », il s'agit du retrait plastique avant sa prise, Il se développe lorsque la quantité d'eau évaporée à la surface est supérieure à la quantité d'eau de ressuage.

A partir du début de prise et à un instant donné, l'eau s'évapore plus vite à la surface qu'elle n'y apparaît en ressuage, il se forme un système complexe de ménisques entre les grains solides [Turcry, 2004], et le dessèchement du béton crée une dépression qui contracte le matériau. Il s'agit du retrait de séchage ou dessiccation [Rmili, 2010].

Après la prise, il s'agit du retrait endogène qui est la contraction volumique de la pâte de ciment sans échange d'humidité avec le milieu extérieur en conditions isothermes [Turcry, 2004].

L'affirmation la plus répandue est que les BAP se caractérisent par un retrait plus important comparable ment aux bétons ordinaires en raison de leurs dosages en eau, en fines, et en liant forcément plus élevés.

Dans un rapport du projet national du BAP en France, concernant l'étude du comportement de retrait et de fluage du BAP, en reposant sur un plan expérimental mené sur deux compositions de BAP, correspondant à des résistances caractéristiques en compression visées de 40 et 60MPa, afin de réaliser une étude comparative, deux bétons vibrés (BV) de résistance mécanique équivalente ont été confectionnés. Les essais ont été menés en mode endogène et en mode dessiccation, à une température de 20°C et avec un degré d'humidité relative de 55 %. Les résultats issus montrent que les déformations différées de retrait et de fluage dans le cas des BAP peuvent être significativement supérieures à celles du béton vibré de même classe de résistance [Vidal et al, 2004].

Les travaux de [Turcry et al.2003] ont montré que L'amplitude maximale du retrait plastique des BAP est environ cinq fois supérieure à celle des bétons ordinaires.

Cette tendance est confirmée par d'autres résultats de la littérature. [Assié, 2004] voit que les retraits totaux des BAP et des BV peuvent être considérés comme équivalents. C'est tout à fait contraire à ce qu'il a trouvé [Molez.2003] que le retrait total d'un BAP est supérieur à celui du béton ordinaire (figure 2.5). La même chose pour [Turcry.2004], qui révèle que le retrait total du BAP est plus élevé que celui du béton ordinaire mais l'écart est minime.

Une autre explication a été prononcée par l'AFGC 2008 affirme que l'influence du volume de la matrice de la pâte sur le retrait total du béton conduit à penser que ce type de déformation sera augmenté pour les BAP par rapport aux bétons ordinaires, et ce d'autant plus que la proportion granulaire s'éloigne des valeurs courantes des bétons ordinaires [AFGC 2008].

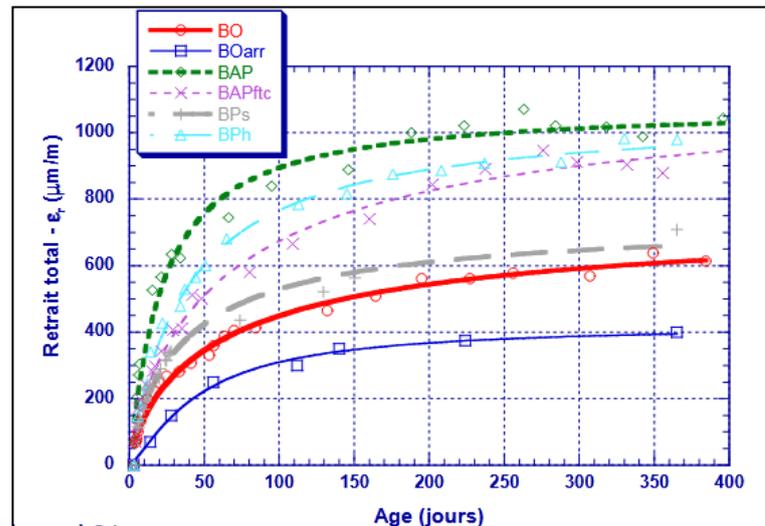


Figure 2.5 : Retrait total de différents bétons [Molèz, 2003]

2.7.5 Fluage

Le fluage est un comportement différé du béton soumis à un chargement stationnaire, ce phénomène est fortement dépendant de la maturité du béton.

Il est difficile, de donner des indications fiables sur la différence existant entre les BAP et le béton vibré. Les essais sont en effet peu nombreux, leurs résultats sont souvent contradictoires [Holcim, 2004]. D'après des résultats au laboratoire [Modjabi et al, 2006] ont confirmé que le BAP se caractérise par un fort potentiel de fluage, c'est également ce qu'il a noté [Molèz, 2003] que les matériaux qui présentent un retrait important, montrent aussi un fluage total élevé, comme les BAP et les bétons projetés à voie humide. Par contre [Turcry, 2004] voit que le fluage du BAP est proche à celui du béton ordinaire.

[Chopin. et al, 2003], dans une étude pour quantifier l'influence des principaux paramètres de formulation (volume de pâte, rapport G/S, résistance à la compression, type de superplastifiant) sur les déformations des BAP, ont constaté que sous une température élevée, les BAP ne présentent pas de déformations plastiques ou retardées significativement supérieures aux bétons conventionnels vibrés.

[Persson, 2001], a trouvé que le fluage et le retrait des BAP ne différaient pas significativement des propriétés correspondantes du béton vibré, dans une étude expérimentale et numérique sur les propriétés mécaniques des BAP et les propriétés correspondantes du béton vibré, concernant des échantillons durcis à l'air avec un rapport E/L variant entre 0.24 et 0.80, et l'âge de chargement de fluage variait entre 2 et 90 jours.

[Assié, 2004] a constaté qu'à résistance mécanique similaire, les déformations des BAP se révèlent légèrement plus importantes que celles des bétons vibrés.

2.7.6 Propriétés physico chimiques et durabilité

Les propriétés de transfert du béton sont souvent utilisées comme critère de sa durabilité, car la plupart des processus de détérioration des structures en béton, impliquent les transferts de matière (en particulier d'agents agressifs) à l'intérieur d'un matériau poreux comme le béton. Les propriétés de transfert du béton sont donc utilisées progressivement comme critère de sa durabilité [Assié, 2004].

La microstructure du BAP est principalement influencée par la quantité de la pâte élevée, l'utilisation des additions minérales en quantité importante ainsi que rapport E/C, ce qui lui offre une meilleure durabilité qu'un béton vibré, répondant aux classes d'exposition usuelles du bâtiment.

En général la durabilité est relative aux paramètres de composition en termes de compacité et de nature chimique du liant (et de la minéralogie des granulats pour l'alcali-réaction). Les règles applicables pour les bétons ordinaires restent valables pour les bétons auto-plaçants (norme NF EN 206-1, Fascicule 65A du CCTG, normes de produits préfabriqués) [AFGC2008].

2.7.6.1 La porosité

La porosité apparaît comme l'un des paramètres extrêmement important caractérisant la microstructure des bétons, puisqu'il conditionne la rugosité de surface ainsi que la quantité d'eau potentiellement présente dans le matériau

Un matériau présentant une porosité importante offre également une surface de réaction importante entre le matériau et les substances chimiques agressives avec lesquelles il est en contact. Ceci entraîne une vitesse de dégradation potentiellement plus élevée.

Par définition la porosité est le volume total des vides contenus dans le béton pour 1 m³ de matériau. Cette porosité est de l'ordre de 15% à 28 jours pour un béton courant, de 10 à 12 % pour un BHP, et de 7 à 9% pour un BTHP [Olivier et al, 2008].

Grâce à la porosimétrie par intrusion de mercure, [Boel *et al*, 2002] ont constaté (dans une étude de la structure de pores de 22 mélanges de pâte de ciment durci de 16 autoplaçantes et 6 pâtes traditionnelles), que la structure des pores de la pâte autoplaçante s'avère être plus dense que celle traditionnelle.

En introduisant le volume total, la distribution, les dimensions des pores et le diamètre de pore critique, [Ye *et al*, 2007] ont remarqué que la structure poreuse de la pâte de ciment du BAP au calcaire est très similaire à celle de la pâte de ciment du BHP au calcaire.

[Assié, 2004] voit qu'à résistance mécanique égale, la porosité ouverte des BAP est légèrement plus élevée que celle des bétons vibrés correspondants (+1% de porosité, figure 2.6). D'autres études publiées ont montré que les additions minérales telles que le filler calcaire, donnent aux BAP une microstructure plus dense que les bétons vibrés de même rapport E/C. La porosité de ces BAP, est significativement plus faible que celle des bétons vibrés [R'mili, 2010].

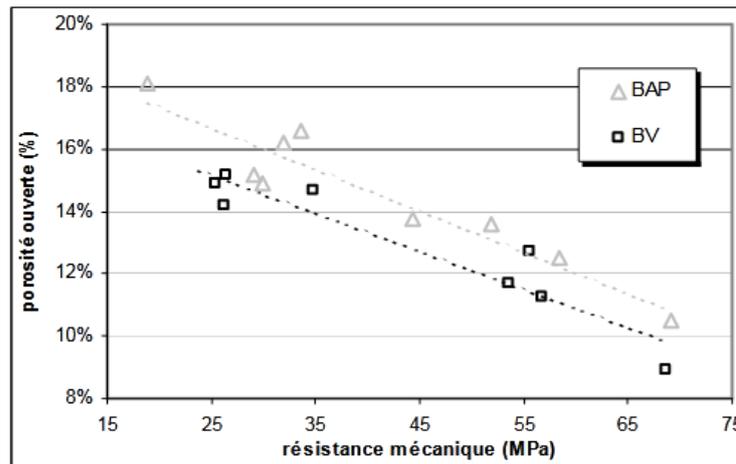


Figure 2.6 : Porosité ouverte de différents bétons testés en fonction de la résistance mécanique [Assié, 2004]

2.7.6.2 La perméabilité

La durabilité des bétons en général et du BAP en particulier dépend en grande partie de leurs propriétés de transport et en particulier de leur diffusivité et leur perméabilité face aux différents fluide notamment l'eau et le gaz.

Lors de l'écoulement d'un gaz à travers un milieu poreux comme le béton, plusieurs paramètres ont une influence sur la perméabilité. Le premier facteur est la teneur en eau du

béton, car en présence d'eau les échantillons sont presque imperméables aux gaz quelle que soit leur porosité. Il faut alors drainer l'eau interne, partiellement ou entièrement, avant qu'une mesure de perméabilité aux gaz ne puisse être réalisée. D'autre part, plus le rapport E/C est grand, plus la perméabilité est forte. Le deuxième facteur qui influe sur la perméabilité est la pression d'essai. Lorsque le parcours moyen est plus petit que la dimension des pores, l'écoulement est laminaire ou turbulent. En revanche, quand le libre parcours moyen est proche du diamètre des pores, l'écoulement est alors moléculaire [R'mili, 2010].

[Siad et al, 2012] voient que les BAP présentent des coefficients de diffusion et de perméabilité plus faibles que le béton ordinaire vibré.

[Davood & Siham, 2015] ont constaté que l'incorporation des additions minérales comme le laitier de haut fourneau, les cendres volantes, le métakaolin et le sédiment a un effet bénéfique certain sur la dimension des capillaires, sur la perméabilité et sur la diffusion aux chlorures des BAP.

[Zhu & Bartos, 2003] ont trouvé la perméabilité du BAP est sensiblement inférieure par rapport à celle des BO ayant les mêmes catégories de résistances.

2.7.6.3 Absorption d'eau

Le béton est un matériau poreux, et le phénomène physique susceptible de faire transférer et pénétrer des liquides de l'extérieur à l'intérieur de ce matériau est appelé l'absorption de l'eau. L'absorptivité est influencée par le rapport eau/ciment (E/C), le taux de saturation des pores et la composition du liant, notamment, la nature du ciment et des additions minérales [Bessa, 2004].

Deux méthodes dans la littérature pour mesurer l'absorption de l'eau :

- **L'absorption par capillarité** : consiste à mesurer le taux d'absorption d'eau par succion capillaire à l'intérieur d'une éprouvette de béton.
- **L'absorption par immersion** : en faisant sécher une éprouvette de béton, à masse constante, puis en l'immergeant dans l'eau et en mesurant l'augmentation de sa masse (exprimée en % de la masse sèche).

Les recherches et les travaux sur l'absorption d'eau des BAP et des BO, dans plusieurs cas sont contradictoires, [Kapoor et al, 2003] ont rapporté une valeur d'absorption d'eau de 1% pour le BAP contre 2% pour le BO. Ces résultats sont aussi confirmés par [Zhu et al. 2005]. Alors que [Boel et al. 2002] ont trouvé que l'absorption par immersion et par capillarité des BAP est analogue à celle des BO correspondants. Résultats aussi trouvé par [Assié, 2004] qui

a constaté qu'il y a une certaine ressemblance entre l'absorption capillaire des BAP et celle des bétons ordinaires.

L'effet des fillers calcaires sur l'absorption d'eau est significatif, [Böel et al.2002] rapportent que l'influence du filler calcaire est bénéfique pour l'absorption capillaire et néanmoins néfaste pour l'absorption par immersion. [Zhu et al. 2005] démontrent que l'absorption capillaire des BAP est d'autant plus faible qu'ils contiennent des fillers calcaires

2.8 Conclusion

Le BAP, ne se considère plus qu'une nouvelle famille de béton, mais il constitue davantage une nouvelle technologie dans le monde des matériaux de construction. C'est un béton, très fluide, homogène et stable, se mis en place sans aucune vibration et se compacte sous le seul effet de la gravitation. Sa formulation doit renfermer une forte teneur en pâte au détriment de celle des gravillons, comme il est nécessaire de substituer une fraction de ciment par une addition minérale et un superplastifiant en proportions bien précises.

La formulation des BAP est beaucoup plus complexe, car il n'existe pas une méthode de formulation généralisée, et la plus part des formules sont conçues de manière empirique.

L'affirmation la plus répandue, c'est que les BAP possèdent de bonnes résistances mécaniques comparativement aux bétons traditionnels vibrés. Tandis que les études de la durabilité dans plusieurs cas sont contradictoires par rapport au béton vibré.

Chapitre 3

Effet du climat chaud sur les propriétés rhéologiques et physico-mécaniques des BAP - Effet de la température

3.1 Introduction

La température élevée de l'air, l'humidité relative faible, le vent fort et les radiations solaires se sont les différents paramètres qui caractérisent un climat chaud. Il est très difficile de pouvoir étudier leur effet simultanément sur le béton dans leur ensemble. C'est ainsi que pour quoi on va se limiter de l'effet de la température comme paramètre important dans le climat chaud sur les propriétés des BAP. Une étude comparative sera faite pour chaque propriété étudiée avec le béton ordinaire.

L'élévation de la température généralement rencontrée en période estival est le paramètre le plus influençant sur la qualité finale du béton. Ces effets provoquent des changements microstructuraux en lui modifiant certaines propriétés physico-mécaniques.

Elle agit essentiellement sur la rhéologie du béton et son évolution, sur sa vitesse de prise, sur la cinétique d'hydratation du ciment, l'évaporation de l'eau, le durcissement et la dessiccation, et peut donc avoir une incidence défavorable sur les caractéristiques du béton durci, tels que la résistance mécanique et la durabilité.

La formulation des BAP qui est plus pointue que celles des bétons traditionnels, et vu sa hyper fluidité conduit à prendre des dispositions spécifiques pour éviter la ségrégation et adapter l'ouvrabilité, les propriétés rhéologiques et les performances qui sont influencées par les conditions externes notamment la température élevée.

Les réactions chimiques d'hydratation qui se produisent au sein du BAP lors du contact eau-ciment sont des réactions thermoactives, ce qui signifie que la vitesse à laquelle se font ces réactions chimiques croît avec la température.

Par ailleurs, la température estivale élevée qui dépasse quotidiennement les 35°C et peut atteindre 55°C, influence les propriétés du BAP que ce soit à l'état frais qu'à l'état durci.

En effet l'élévation de la température influence le comportement rhéologique du mélange en provoquant une altération de l'autoplaçance qui est propriété primordiale pour un BAP à l'état frais. Ainsi que le développement de la résistance mécanique et la durabilité du béton à l'état durci.

3.2 Effet du climat chaud sur les propriétés des BAP et Bétons vibrés à l'état frais

1- Béton vibré

Lorsque la température ambiante augmente, conduit à une augmentation de la température du béton frais, cette augmentation est une cause de perte de maniabilité, exprimé souvent par la diminution de l'affaissement mesuré avec le cône d'Abrams. Dans certaines études si l'affaissement est de l'ordre, par exemple, de 100 mm à 20°C, il sera de 50 mm à 35°C.

L'élévation de la température ambiante de 22°C à 32°C provoque l'augmentation de celle du béton et entraîne une perte d'affaissement, quel que soit la gamme de consistance étudié rapporte Hampton (figure 3.1) [Hampton 1981].

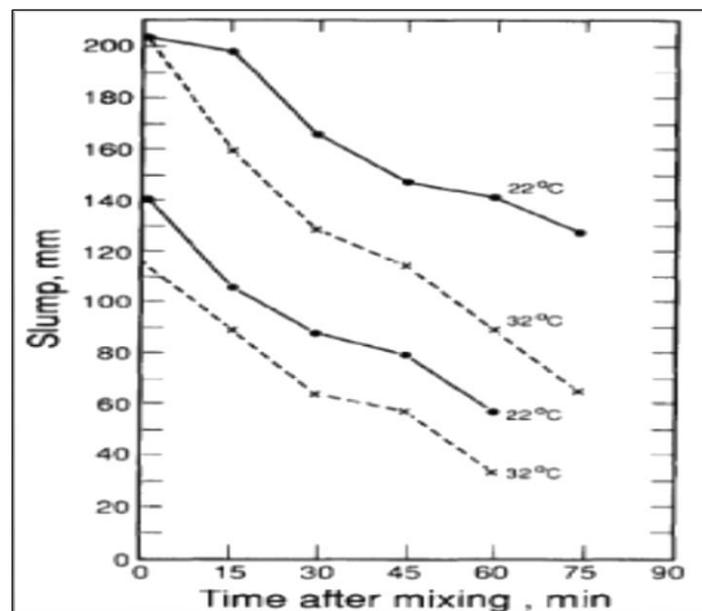


Figure 3.1 : Effet de la température ambiante sur l'affaissement (de 22°C à 32°C) [Hampton 1981]

Pour maintenir l'affaissement initial du béton sous un climat chaud il faut augmenter le dosage en eau, car la demande en eau du béton augmente avec l'élévation de la température [ACI305,1991], par exemple pour maintenir un affaissement de 75mm, la demande d'eau augmente d'environ 15l/m³, si la température du béton frais s'est élevée de 10 à 38°C, malgré que cette augmentation d'eau peut réduire la résistance à la compression du béton à 28 jours de 12 à 15% (figure 3.2)[ACI305,1991]. Résultat a été confirmé par [Mamillan et al, 1989] qui a trouvé que l'élévation de la température du béton de 22 à 37°C entraîne une augmentation du teneur en eau de 6% pour maintenir l'affaissement de 8cm après 5 minutes et 9% après 15 minutes (Figure 3.3).

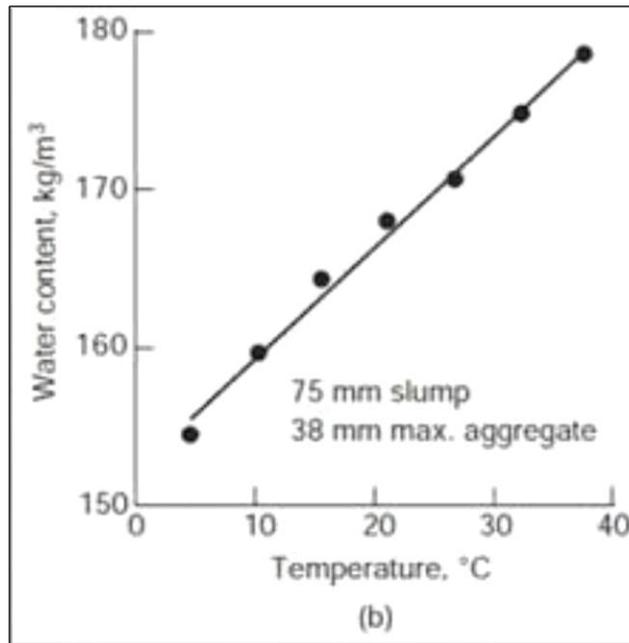


Figure 3.2 : Effet de la température ambiante sur la demande d'eau du béton [ACI305, 1991]

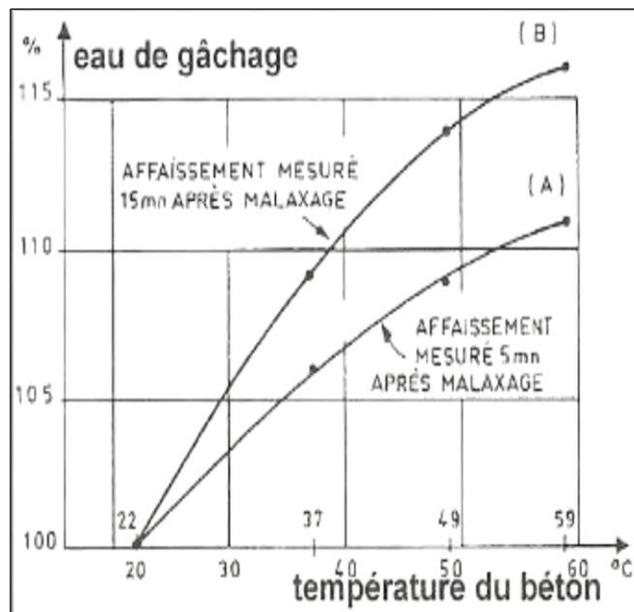


Figure 3.3 : Augmentation du dosage en eau en fonction de la température du béton pour maintenir un affaissement constant (8cm) [Mamillan et al, 1989]

2- Béton autoplaçant

Les BAP se distinguent des bétons ordinaires notamment par leurs propriétés à l'état frais. La qualité des structures finies réalisées en BAP dépendant quasi entièrement de l'autoplaçance ou l'aptitude à s'écouler sans aucun apport extérieur d'énergie.

Selon [Cygan et al, 2016] Le mécanisme de l'effet de la température sur les propriétés rhéologiques du béton autoplaçant est plus complexe que dans le cas du béton ordinaire. À une température de 20 ° C, l'écoulement d'affaissement diminue avec l'augmentation de la température, cette tendance s'accélère avec augmentation de la température. Il rajoute qu'à 30°C le béton frais initialement plus fluide se rigidifie plus rapidement avec un rapport E/C=0.4 (figure 3.4).

[Cecilia et al, 2018] ont utilisé deux BAP_s contenant un liant (OPC + enduit calcaire) et un super plastifiant PCP, dans des conditions météorologiques chaudes simulées, ils ont trouvé que lorsque la température passe de 20 à 50°C, les ajouts d'eau ou super plastifiant supplémentaire étaient nécessaires pour maintenir l'autoplaçance constante jusqu'à la fin du malaxage.

[Ghafoori et al, 2010] ont montré que l'altération de l'étalement immédiatement après le malaxage apparaît au-delà de la température de 28°C pour trois compositions variant seulement par les dosages en super plastifiant et en agent de viscosité. Ainsi qu'ils attribuent la perte d'ouvrabilité avec l'élévation de la température initiale à la cinétique accélérée de l'hydratation.

[Vinh, 2014] dans une étude sur trois formulations de BAP (BAP1 avec un faible dosage en ciment CEMI et rapport massique filler/ciment=0.5 ; BAP2 de même dosage en ciment que BAP1 et rapport massique filler /ciment=0.25 ; et BAP3 en liant ternaire CEM III+filler calcaire et à liant équivalent similaire à BAP2) a arrivé dans ces résultats qu'il est possible de conserver les propriétés autoplaçantes à la fin du malaxage lorsque la température initiale du mélange s'accroît de 20°C à 50°C (figure 3.5).

Dans le cas de BAP1 et BAP2, des ajouts d'eau ou un surdosage en superplastifiant ont été nécessaires. Pour le BAP3 incorporant le ciment au laitier CEM III, la propriété autoplaçante est maintenue sans aucune action supplémentaire.

Pour un rapport G/S proche de 1 d'un BAP, les propriétés d'écoulement ne sont pas fortement altérés par l'élévation de la température initiale jusqu'à 30mn après le malaxage rapporte [Abduljabar, 2008] (figure 3.6). De plus il ajoute qu'avec une humidité relative maintenue constante à 20% pour tous les mélanges, les effets de la température sur le maintien de

Chapitre 3: Effet du climat chaud sur les propriétés rhéologiques et physico-mécaniques des BAP – Effet de la température

l'autoplaçance juste après le malaxage dépendent de la composition essentiellement le rapport G/S.

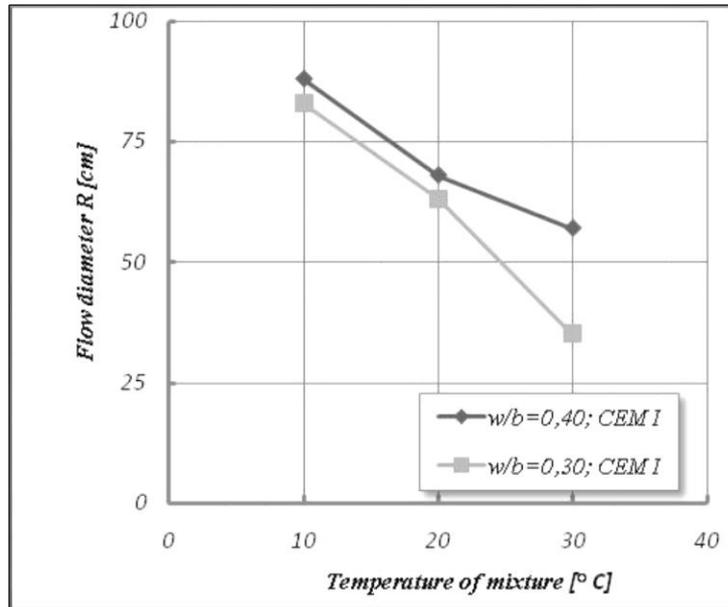


Figure 3.4 : Effet de la température sur le diamètre de l'écoulement d'un BAP [Cygan et al, 2016]

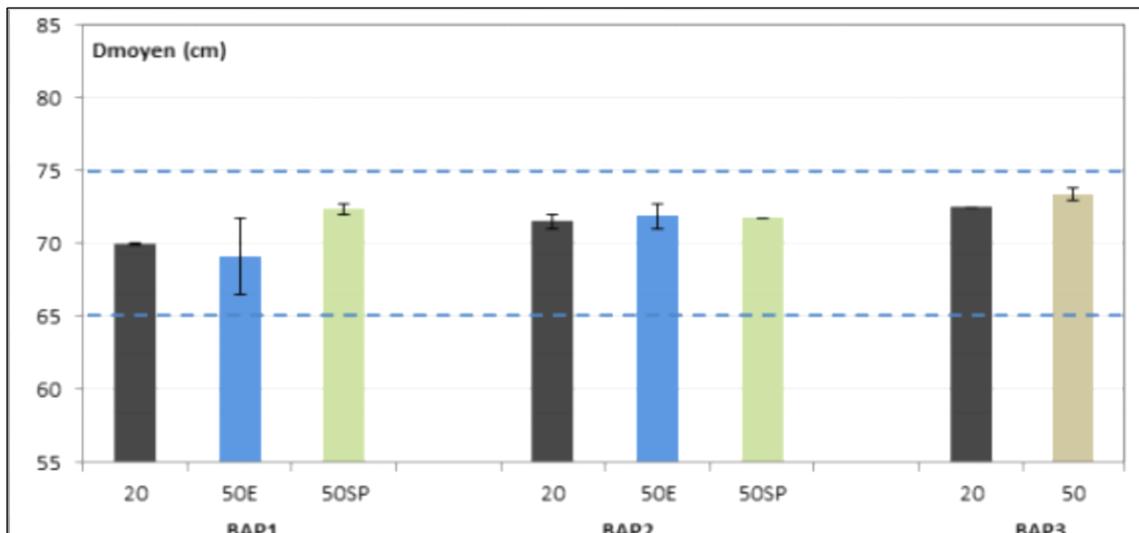


Figure 3.5 : Effet des ajouts ou non (eau ou superplastifiant) sur l'essai d'étalement juste immédiatement après le malaxage lorsque la température initiale augmente de 20°C à 50°C [Vinh, 2014]

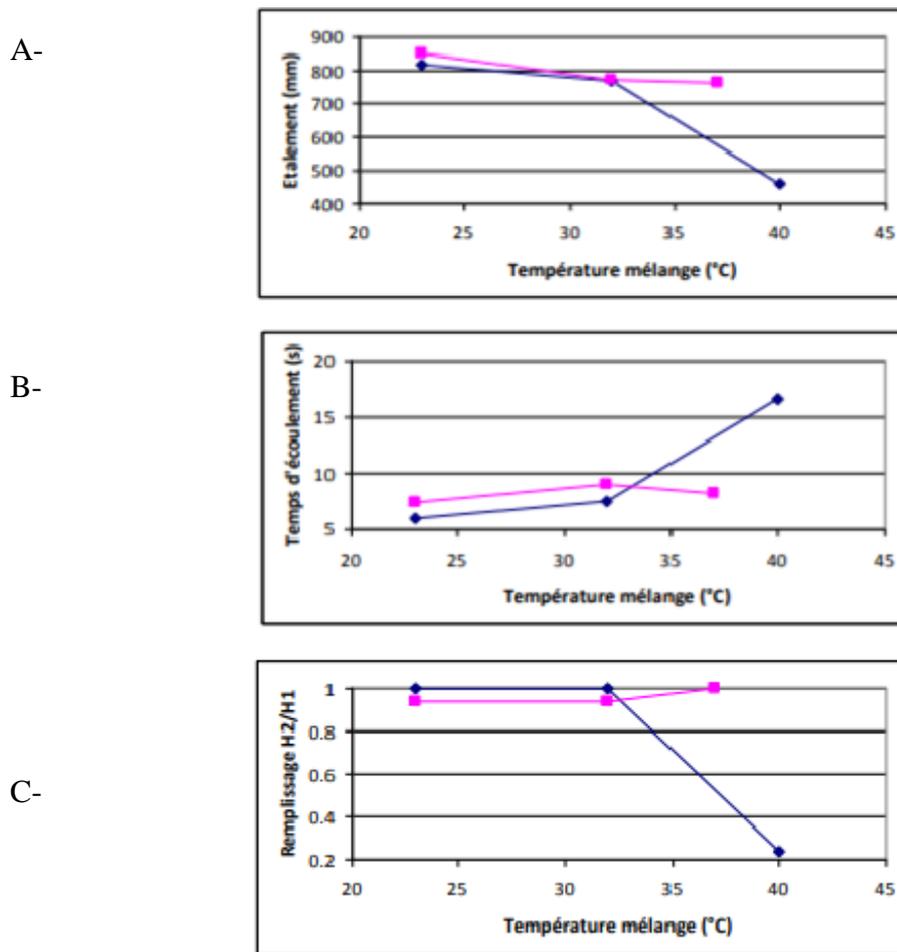


Figure 3.6 : Effet de la température du BAP sur l'ouvrabilité initiale : l'étalement (a), temps d'écoulement à l'entonnoir en V (b) et rapport de remplissage à la boîte en L (c)

[Abduljabar, 2008]

(Le bleu avec un rapport G/S=0.55, le rose avec un rapport G/S=1.05)

La fluidité du BAP est généralement assurée par le dosage en super plastifiant. Dans ce contexte [Ghafoori et al, 2010] montrent également que les surdosages en super plastifiant et éventuellement en agent de viscosité permettent de retrouver les étalements cibles.

Au contraire d'autres auteurs voient que le maintien de l'autoplaçance d'un BAP dépend de la nature et du dosage du super plastifiant et sa compatibilité avec le ciment utilisé, à cet effet [Cygan et al, 2016] ont trouvé que lorsque la température d'une part augmente, la vitesse de l'hydratation augmente aussi, provoquant ainsi une détérioration de la maniabilité, d'autre

Chapitre 3: Effet du climat chaud sur les propriétés rhéologiques et physico-mécaniques des BAP – Effet de la température

part plus la température est élevée plus elle entraîne la production de grandes quantités d'ettringite qui adsorbent le super plastifiant. Dans ce contexte et pour maintenir un étalement de 70cm jusqu'à la fin du malaxage dans les conditions climatiques (20°C ; 60%HR) et (30°C ; et 30%HR), [Weisheit et al, 2010] ont trouvé qu'il est nécessaire de diminuer la teneur en super plastifiant de 2.1% pour la température de 20°C à 1.75% pour la température de 30°C (figure 3.7).

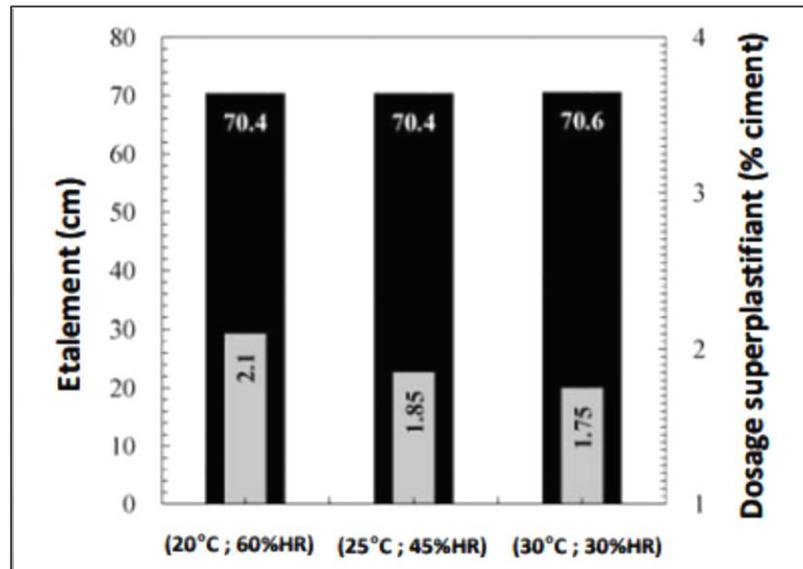


Figure 3.7 : Effet de la température du BAP et des conditions ambiantes sur la quantité de superplastifiant pour maintenir l'étalement [Weisheit et al, 2010]

De plus, au contraire du béton vibré, le plus grand nombre de constituants présents dans le mélange du BAP, explique la complexité du mécanisme de l'effet de la température sur leurs propriétés rhéologiques, car à l'état frais d'après la littérature les fillers calcaires modifient la structure du squelette granulaire en améliorant la capacité d'empilement des particules fines. [Elhilali, 2009] voit que la cinétique de diminution de l'étalement est plus prononcée pour le BAP formulé avec des fillers ayant une surface de Blaine faible, et le béton perd son caractère autoplacement après un temps de maintien inférieur à 30mn.

Dans les conditions normales [Nécira, 2018] rapporte qu'il est possible d'observer l'augmentation de l'étalement avec l'incorporation des taux volumiques en additions minérales dans le liant jusqu'aux proportions optimums par ordre décroissant ; 30% filler, 30% pouzzolane et 20% laitier, au-delà desquels, une légère diminution de l'étalement a été

enregistrée avec l'excès de ces additions. De plus il a enregistré que L'incorporation de filler calcaire et de pouzzolane naturelle à des teneurs faibles, de 20%, diminue le temps d'étalement à 2.4 et 2.8 sec respectivement, puis il devient plus lent à l'ajout de ces additions. Les teneurs faibles en filler et en pouzzolane réduisent le frottement inter granulaire en favorisant les étalements rapides.

Cependant pour [Diedirich,2010] Les bétons formulés avec 35% de filler satisfont également aux critères de l'autoplaçance avec des étalements compris entre 65cm et 75cm associés à une capacité de passage à la boîte en L supérieure à 0,8 et une stabilité au tamis < 5% quel que soit le filler.

3.3 Effet du climat chaud sur les propriétés des BAP et bétons vibrés à l'état durci

3.3.1 Effet de la température sur la résistance mécanique

1- Béton vibré

Comme il est évident l'augmentation de la température accélère les réactions chimiques d'hydratation et provoque ainsi aux échéances précoces (1 ou 2 jours) une augmentation de la résistance du béton mais une résistance à 28 jours moins élevée que celle du même béton qui aurait été conservé à une température plus basse. En effet, une hydratation initiale rapide peut conduire à la formation de produits d'hydratation présentant une structure physique moins compacte, probablement plus poreuse, de sorte qu'un pourcentage de pores restera non rempli, cela conduira à une résistance plus faible comparée à celle d'une pâte de ciment moins poreuse, hydratée lentement [Neville, 2000]

[Gaynor, et al, 1983] ont montré que sous l'effet d'une température de 38°C au cours des premiers 24 heures, le béton perd de 9 à 12 % de sa résistance à 28 jours, comparé au même béton mûri à 23 °C en continu.

En comparant l'effet d'une température élevée durant les premiers jours sur la résistance des cylindres à des cylindres mûri dans ses conditions habituelles, [Richardson, 1991] a trouvé qu'une réduction significative des résistances enregistrées à 28 jours. Le taux de réduction est de l'ordre de 10% pour un jour à 38°C, et de 22% de réduction pour trois jours à 38°C.

[Mouret, 1997] a réalisé des bétons de classe de résistance différente (22MPa et 35MPa, ciment CEM I 42,5), confectionnés à 25°C, 30°C et 50°C. Quelle que soit la classe de résistance, il a ajouté de l'eau de manière significative (10 à 20l/m³) pour maintenir la consistance constante seulement dans le cas où la température a été portée à 50°C en raison du raidissement immédiat du béton (figure 3.8). Les éprouvettes réalisées ont été conservées à

Chapitre 3: Effet du climat chaud sur les propriétés rhéologiques et physico-mécaniques des BAP – Effet de la température

20°C, 100%HR. Il observe des baisses significatives de résistance à 28 jours, d'autant plus marquées que le dosage en ciment est élevé (classe du béton = 35MPa), dès la température de 30°C :

- En moyenne, de 5% et 10% entre 25°C et 30°C, de 15% à 20% entre 25°C et 50°C (classe 35MPa) ;
- En moyenne, de 5% à 15% entre 25°C et 50°C (classe 22MPa).

Ainsi les désordres apparaissent avec l'élévation de la température mais la température la plus élevée aggrave les défauts de résistance en raison d'une demande en eau accrue pour rétablir l'ouvrabilité

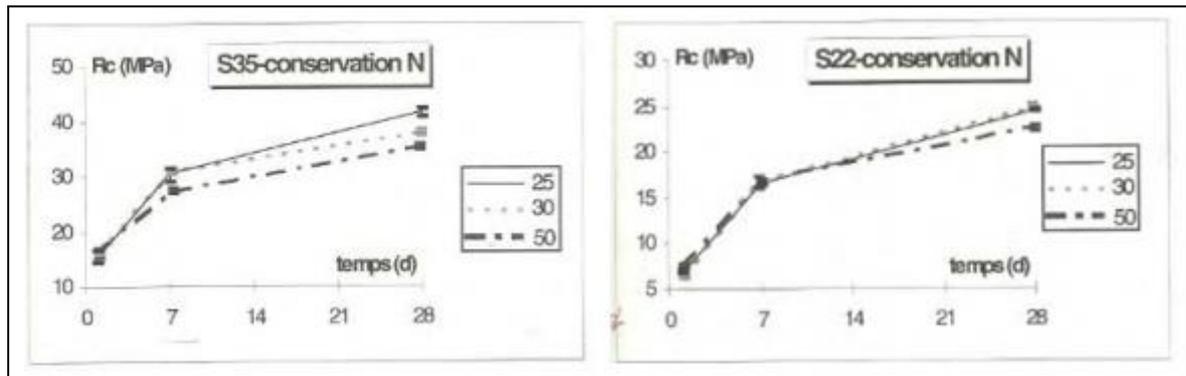


Figure 3.8 : Evolution des résistances en fonction de la température initiale du béton [Mouret, 1997]

Concernant l'effet de la température de murissement, toutes les études sont d'accord que les conditions de climat chaud (température élevée) augmentent la résistance au jeune âge du béton, mais cette résistance est affectée défavorablement à long terme.

[Almusalam, 2001] a conclu que les macro-pores sont plus importantes dans les bétons exposés à une température de 45°C que ceux exposés à une température de 35°C ce qui affecte considérablement la perméabilité de ces bétons et par suite leur durabilité.

[Galluci et al, 2006] dans leur étude « influence de la température sur le développement structural des bétons » ont trouvé que plus la température est élevée, plus le développement de la résistance à jeune âge est rapide comme suit :

- Après trois jours d'hydratation, la résistance du béton à 20°C rattrape celle des bétons à 40 et 60°C.
- Après 28 jours, elle les dépasse, alors que le développement du béton à 60°C semble s'arrêter.

Chapitre 3: Effet du climat chaud sur les propriétés rhéologiques et physico-mécaniques des BAP – Effet de la température

- Après un an, la résistance à 5°C rattrape celle à 20°C. La résistance à 60°C est de 25% inférieure.

Et vu aux résultats trouvés, [Galluci et al, 2006] ont conclu qu'il semble évident que la température a pour effet d'accélérer significativement l'hydratation du ciment : la consommation plus rapide des grains de ciment génère du C-S-H et de la portlandite en quantités importantes dès les premières heures de la cure, ce qui induit un développement de résistance plus rapide. De plus, plus la température est élevée, plus la résistance est faible à cause de l'augmentation d'un réseau poreux plus large, dû à un développement microstructural plus grossier, les hydrates (notamment les C-S-H) étant plus denses à haute température et distribués de manière plus hétérogène (figure3.9).

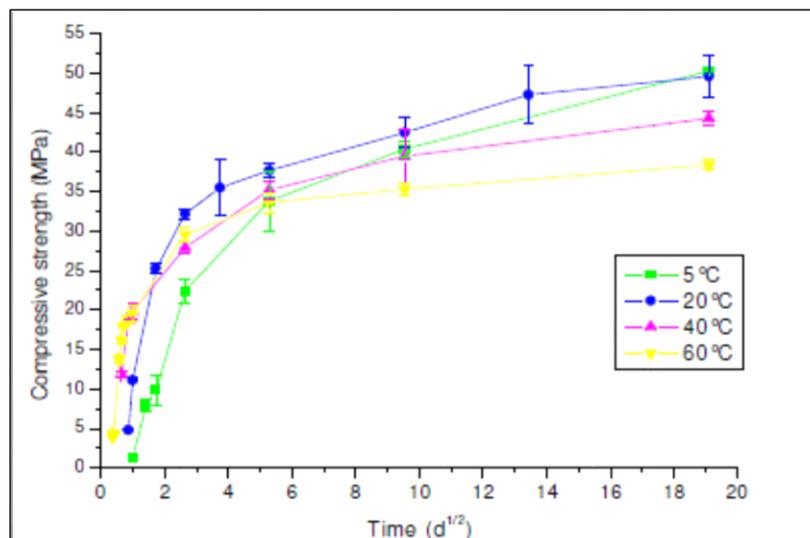


Figure 3.9 : Développement de résistance des bétons en fonction de la température
[Galluci et al, 2006]

Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés par [Kim et al, 2002] sur des essais de 480 cylindres confectionnés de différents types de ciment et durcis dans des conditions isothermes de 10, 23, 35, et 50°C, et testés à des âges de 1, 3, 7, et 28 jours. Les résultats expérimentaux de ces tests montrent que les bétons soumis à des températures élevées atteignent des résistances à la compression et à la traction plus élevées aux jeunes âges, mais plus faibles aux âges avancés que les bétons soumis à une température normale.

Chapitre 3: Effet du climat chaud sur les propriétés rhéologiques et physico-mécaniques des BAP – Effet de la température

Le même résultat était trouvé par [Bendjilali et al, 2012] élaboré dans le même axe sur quatre bétons formulés du même dosage en ciment et teneur en eau, mais ils se différencient en sable et gravier

- B1 en gravier calcaire et sable siliceux
- B2 en gravier calcaire et sable calcaire
- B3 en gravier siliceux et sable siliceux
- B4 en gravier siliceux et sable calcaire.

Les échantillons sont démoulés après 24 heures de leurs confections, les premiers 6 jours, ils sont conservés au laboratoire (la température varie entre 19 et 32°C et l'humidité est comprise entre 20 et 30%), puis ils sont affectés à l'air libre sous le climat aride réel (la température dépasse 40°C et l'humidité n'excède pas 6%) jusqu'au jour de l'essai. Les éprouvettes écrasées à 3 jours d'âge sont mises directement sous l'environnement réel (climat aride).

Au jeune âge la réaction d'hydratation est accélérée par l'élévation de la température du milieu environnant, puis cette dernière est probablement stoppée ou retardée suite au départ prématuré de l'eau de gâchage. Durant les trois premiers jours, l'évolution de la résistance des bétons testés est beaucoup plus importante comparée à celle à long terme. Cela est expliqué par le fait que dès les premières heures de sa fabrication, le béton gagne davantage d'hydrates qui contribuent à l'amélioration de sa compacité et de sa résistance à la compression. A trois jours, les bétons B1, B2, B3 et B4 gagnent respectivement 38.7%, 84.2%, 91.6% et 63.9% de leurs résistances à 28 jours (figure 3.10).

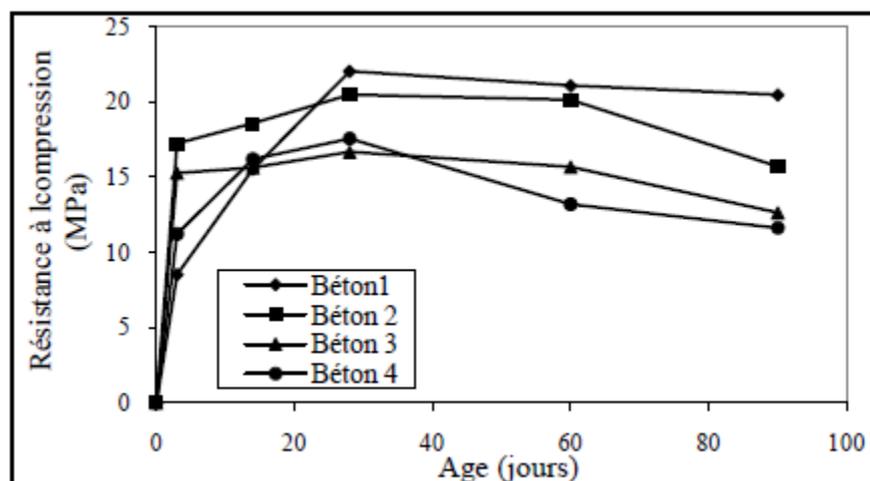


Figure 3.10 : Evolution de la résistance à la compression des bétons exposés à un climat chaud et sec [Bendjilali et al, 2012]

Chapitre 3: Effet du climat chaud sur les propriétés rhéologiques et physico-mécaniques des BAP – Effet de la température

Le même comportement a été observé pour la résistance à la traction par flexion sur des éprouvettes prismatiques 7x7x18, et qui est justifié par le nombre élevé d'hydrates formés dès la fabrication du béton. A trois jours, les bétons B1, B2, B3 et B4 atteignent respectivement 82%, 74%, 65.4% et 72,7% de leurs résistances à 28 jours (figure 3.11).

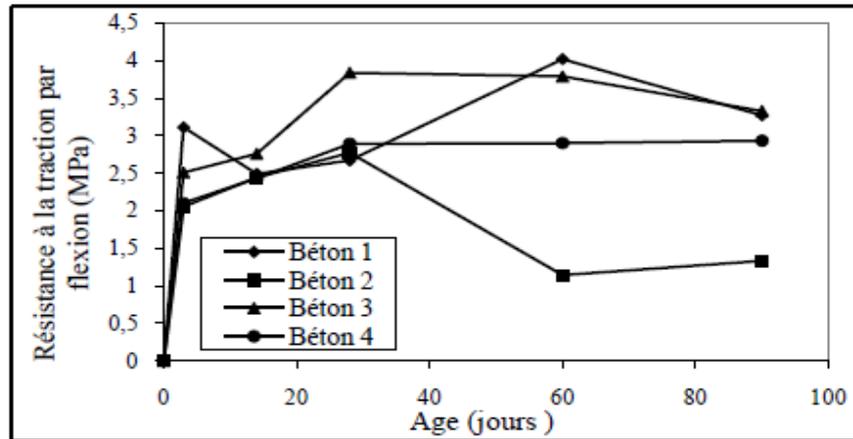


Figure 3.11 : Evolution de la résistance à la traction par flexion des bétons exposés à un climat chaud et sec [Bendjilali et al, 2012]

[Azzouz. et al, 2004], dans un climat chaud et sec (climat de Laghouat), ont adopté deux environnement de cure :

- Sous l'eau avec une température $T=20^{\circ}\text{C}$, et HR100%
- A l'air libre sous une température varie de 28° à 45°C , et HR n'excède pas 20%.

Ils ont constaté qu'au départ, et comme l'hydratation est une réaction thermo active, elle conduit à une évolution rapide de la résistance à la compression, mais à long terme les hydrates formés lorsque la température augmente sont plus faible mécaniquement et la résistance chute considérablement. De telle façon à trois jours la résistance présente 62.45% de celle à 28 jours, et 72.65% à sept jours, ensuite elle se diminue de manière significative à long terme (figure3.12).

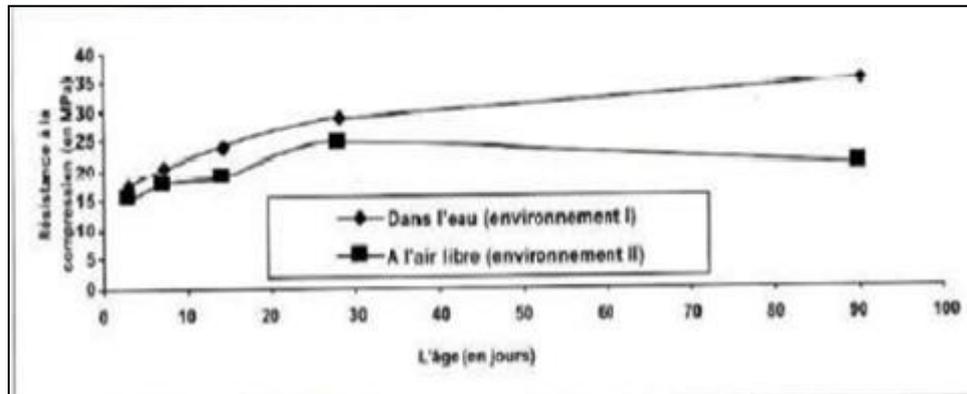


Figure 3.12 : Evolution de la résistance à la compression dans deux milieux [Azzouz et al, 2004]

2- Béton autoplaçant

Pour présenter l'évolution des résistances , mesurées sur éprouvettes de contrôle, des BAP mis en œuvre à 50°C et se différencient par leurs formulations et pour lesquels l'autoplaçance a pu être maintenue soit par un ajout d'eau, soit par un surdosage en superplastifiant, en faisant la comparaison de ces évolutions à celle des BAP de référence dont la température initiale est de 20°C, [Vinh, 2014] a trouvé que pour les BAP1 et BAP2 mélangés de ciment CEMI, l'élévation de la température de confection de 20°C à 50°C tend à induire une augmentation des résistances à 1 jour, 7 jours, et 28 jours, quels que soient les moyens de maintenir l'autoplaçance (figure 3.13).

Seule la résistance à 1 jour de BAP2 50SP-20 est équivalente à la référence. Ce retard de résistance par rapport à BAP2 50E-20 est dû vraisemblablement au surdosage en superplastifiant qui conduit à une plus faible maturité d'après le suivi des températures ; l'effet retard du superplastifiant est d'ailleurs très marqué par comparaison à BAP1.

Chapitre 3: Effet du climat chaud sur les propriétés rhéologiques et physico-mécaniques des BAP – Effet de la température

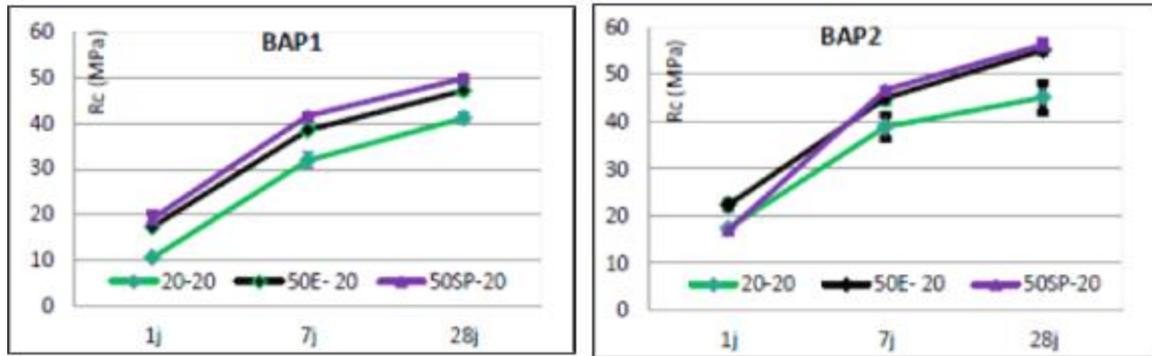


Figure 3.13 : Evolution des résistances à la compression en fonction des moyens de maintenir l'autoplaçance avec l'élévation de la température initiale à 50°C – comparaison à la température initiale de 20°C [Vinh, 2014]

Pourtant ces résultats positifs, l'auteur n'explique pas l'effet de la température initiale sur la résistance mécanique au-delà de 28 jours.

Cependant, selon [Abduljabar, 2008] l'effet de la température initiale sur la résistance à la compression dépend de la composition du BAP.

Concernant l'effet de la température de murissement, et Dans le même contexte, et avec les mêmes BAP, en faisant la comparaison de l'évolution des résistances mesurées sur éprouvettes muries à 20°C sans échanges hydriques durant les premières 14heures, et sur éprouvettes muries à 35°C sans échanges hydriques durant 5heures avec refroidissement progressif jusqu'à 25°C de 5 heures à 24heures après le malaxage. [Vinh, 2014] a trouvé que tous les BAP ont enregistré des résistances supérieures au premier jour mais équivalentes à 7 et 28jours à l'exception du BAP3 pour maintenir l'autoplaçance en rajoutant du super plastifiant, ou il a enregistré une résistance minimale devant le BAP de référence.

Ces résultats contredisent sans doute dans certaine mesure, les observations souvent constatés dans la littérature, où les auteurs confirment que la température de murissement plus élevée conduit certes à des résistances plus élevées aux jeunes âges, mais à des résistances systématiquement plus faible à partir du 7^{ème} jour.

Dans certaines études, l'effet de la température de murissement dépend de la nature du ciment utilisé, dans ce contexte [Weisheit et al, 2010] ont observé que les résistances des éprouvettes de BAP incorporant un ciment au laitier, et conservées à une température de 30°C durant 16heures puis dans l'eau à 20°C, sont plus élevées à court terme, et équivalentes à partir du septième jour, aux résistances des éprouvettes de référence muries à 20°C (figure 3.14).

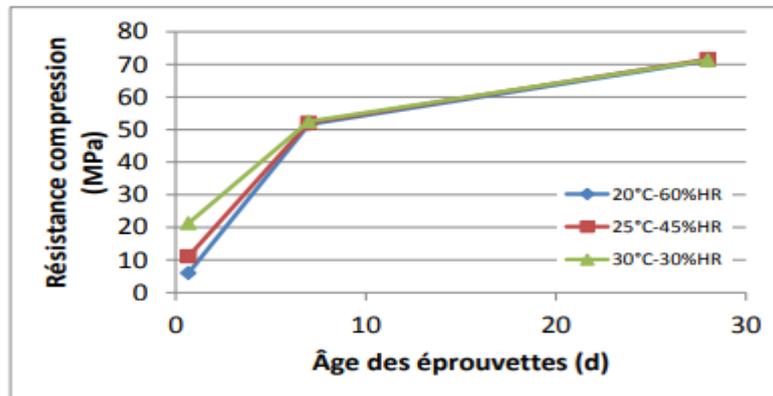


Figure 3.14 : Evolution des résistances à 16h, 7j et 28j avec l'élévation de la température de cure d'un BAP incorporant un ciment au laitier [Weisheit et al, 2010].

3.3.2 Effet de la température sur le module élastique

1- Béton vibré

Des tests à l'âge de 1.3.7.et 28 jours sur des éprouvettes cylindriques de béton ordinaire confectionnées avec de différents type de ciment incorporant de cendres volantes, et durcies dans des conditions isothermes de 10.23.35.et 50°C .[Kim et al, 2002] ont trouvé que la variation du module élastique avec l'élévation de la température de mûrissement n'est pas aussi évidente que la résistance à la compression qui est plus faible à un âge plus avancé que les bétons soumis à une température normale.

Dans le même contexte, [Kanstad et al, 2003] révèlent que la température de 40°C ne réduit ni la résistance à la compression, ni le module élastique du béton, par contre la résistance à la traction entraîne une diminution très importante, alors qu'à la température maximale de 50°C entraîne de réduction considérable pour le module élastique.

Ces études s'accordent avec celle de [Mouret, 1997] qui met en évidence que le module sécant à la compression, à 30% de la charge de rupture n'est pas modifié par l'augmentation de la température de cure de 20°C à 35°C durant les premières heures de l'hydratation, pour une classe de résistance donnée.

2- Béton autoplaçant

A une température ambiante, l'affirmation évidente est que le BAP a un module élastique plus faible que celui d'un béton vibré. Certaines études estiment cette faiblesse à 10% environ [Holcim, 2018].

À la base de mélange analogue des BAP et bétons vibrés, et mêmes résistance à la compression comprises entre 40 et 70MPa, [Pons et al, 2003] ont réalisé des tests dans les conditions endogènes et de dessiccation dans une salle à 20°C et 55% HR, ils ont trouvé que les modules d'élasticité des BAP sont très proches à ceux des bétons vibrés.

Dans une étude expérimentale et numérique sur les propriétés mécaniques, telles que la résistance, le module d'élasticité, le fluage et le retrait, du BAP, et les propriétés correspondantes du béton vibré. L'étude comprenait huit proportions de mélange d'échantillons scellés ou durcis à l'air avec un rapport eau-liant, E/L, variant entre 0,24 et 0,80 [Persson, 2001] a trouvé que le module élastique, le fluage et le retrait du BAP ne différaient pas significativement des propriétés correspondantes du béton vibré.

[Chopin et al, 2003], dans une étude concernant l'utilisation du BAP dans l'industrie du béton préfabriqué, et vu que le BAP contient généralement une proportion de pâte varié de 32à 42%, contre 34% pour le béton vibré dans les meilleurs cas, ont montré que les déformations instantanées des BAP n'étaient pas plus élevées que celles du béton vibré pour des éprouvettes conservées à une température de mûrissement élevée.

[Vinh, 2014] sur des éprouvettes cylindriques (11cm x22cm), en fonction des paramètres de la température initiale et les moyens de maintenir l'autoplaçance d'une part, et le mode de conservation (20°C et 35°C) et à l'échéance de 28jours, révèle que pour un mode de conservation donné, il ne se dégage pas d'écart significatif lorsque la température initiale augmente, quels que soient les moyens éventuels de maintenir l'autoplaçance.

De même, le mode de conservation des éprouvettes durant les premières 24 heures n'induit pas de différences significatives sur les modules d'élasticité. On retiendra simplement que les valeurs oscillent sans grande variation autour de 30 GPa (figure 3.15)

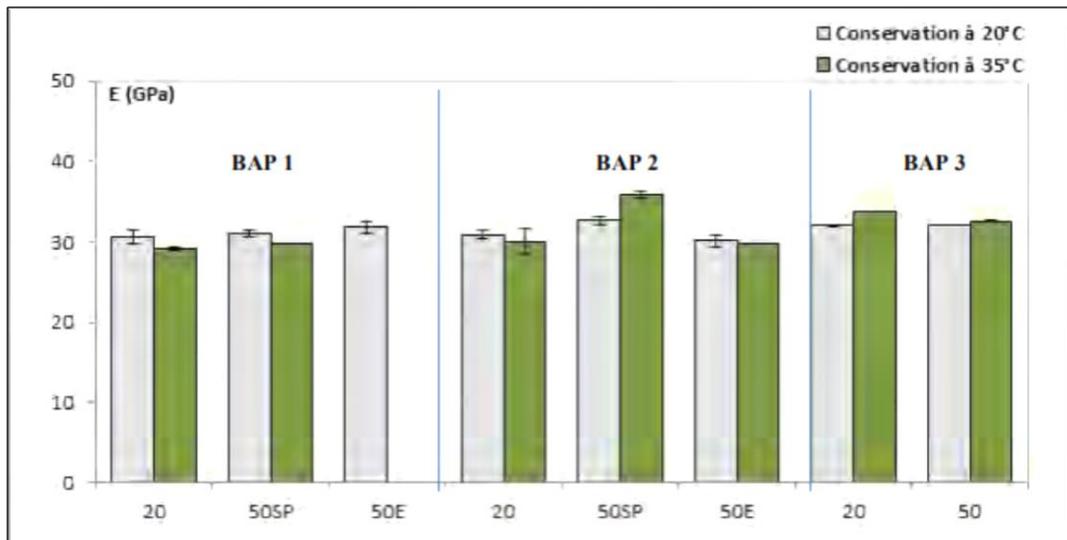


Figure 3.15 : Evolution des modules d'élasticité en fonction de la température initiale du béton, des moyens pour maintenir l'ouvrabilité lorsque la température initiale est de 50°C et du mode de conservation [Vinh, 2014]

3.3.3 Effet de la température sur les propriétés physico chimiques et durabilité des BAP et Bétons vibrés

La durabilité en général est relative aux paramètres de composition en terme de compacité et de nature chimique du liant (et de la minéralogie des granulats pour l'alcali-réaction). Les règles applicables pour les bétons courants restent donc normalement applicables aux BAP (norme XP 18-305 maintenant NF EN 206-1, ou fascicule 65A du CCTG) [Assié, 2004].

L'effet du climat chaud sur la durabilité des BAP est relativement peu étudié, dans cette section essayons de rassembler le maximum des énoncés concernant cette propriété.

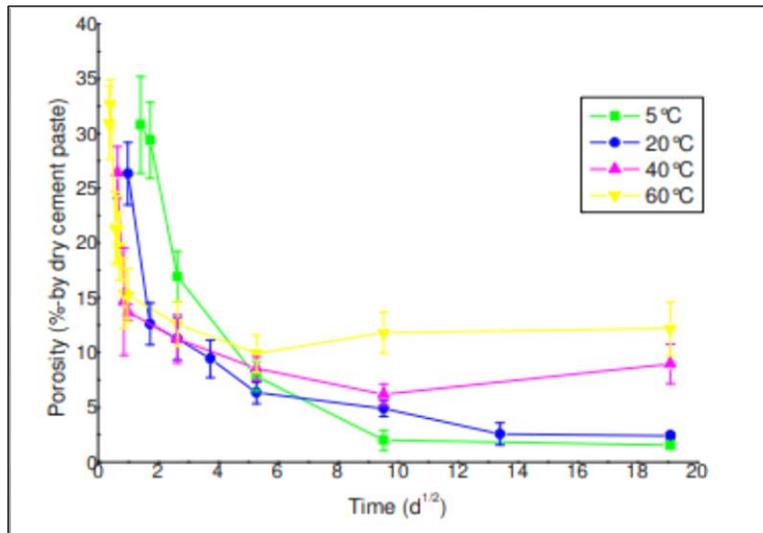
3.3.3.1 Effet de la température sur la porosité

1- Béton vibré

[Galluci et al, 2006], par analyse d'images obtenues en microscope électronique à balayage à partir de sections polies de béton, ont mesuré la porosité capillaire en fonction de la température de murissement maintenue jusqu'aux essais. Deux périodes peuvent être distinguées : à très jeune âge, plus la température est basse, plus la porosité est élevée. Ceci est lié aux faibles taux d'hydratation mesurés. Ensuite très rapidement, une inversion des tendances avec des porosités plus fortes à haute température a été observée. Le fait qu'il n'y a

Chapitre 3: Effet du climat chaud sur les propriétés rhéologiques et physico-mécaniques des BAP – Effet de la température

pas de relation directe entre le taux d'hydratation et la porosité confirme que la température agit sur la répartition des hydrates plutôt que sur leur quantité (figure 3.16).



**Figure 3.16 : Evolution de la porosité (mesurée par analyse d'image)
[Galluci et al, 2006]**

[Mouret et al, 2005] ont montré que pour une température initiale donnée du mélange de granulats calcaires ou siliceux, et quelles que soient la classe de résistance étudiée (22 et 35MPa), aucune différence significative de porosité de l'eau n'a été observée pour des éprouvettes de contrôle soumises à deux régimes de cure : cure 1 conservation normale à 20°C et 100%HR ; cure 2 conservation à 35°C et 100%HR pendant 5 heures avec retour progressive à 25°C jusqu'à 24 heures d'âge. Ces éprouvettes ont été confectionnées à 20° et 50°C avec l'ajout d'eau ou du superplastifiant (50LF) pour maintenir la consistance (figure 3.17).

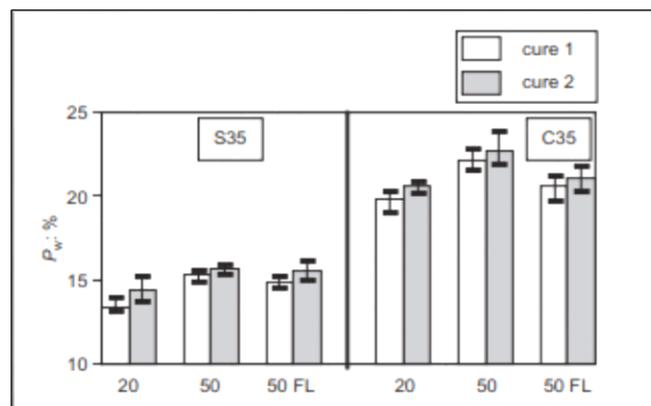
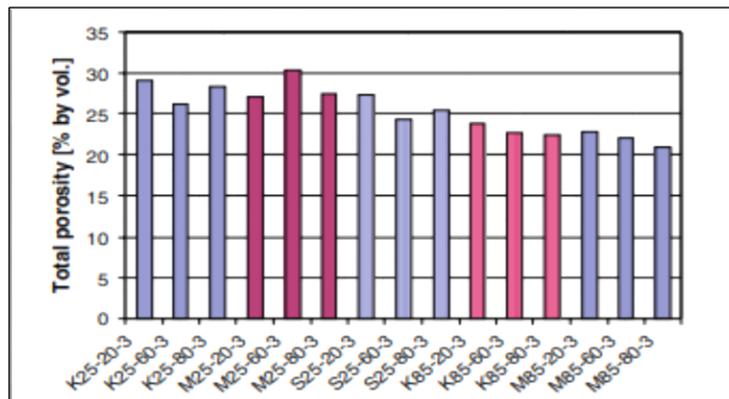


Figure 3.17 : Porosité accessible à l'eau à 28 jours en fonction de la température de mûrissement [Mouret et al, 2005]

2- Béton autoplaçant

[Reinhardt et Stegmaier , 2006] d'après les résultats des mesures de porosimétrie d'intrusion de mercure pour différents BAP durcis à différentes températures (20, 60, et 80°C), ont constaté que l'élévation de la température ne modifie pas significativement la porosité totale, mais le rayon moyen des pores s'agrandit également avec la hausse de la température et 6 fois plus élevé après le traitement à 80° C par rapport au stockage à 20°C(figure3.18).



**Figure 3.18 : Porosité total de différents BAP durcis à 20°C, 60°C and 80°C
[Reinhardt et Stegmaier, 2006]**

Par contre [Vinh, 2014] à partir de la figure 3.19, a abouti à deux tendances :

La première concerne les bétons incorporant du filler calcaire (BAP1 et BAP2) ; le climat chaud semble modifier de manière légère la porosité. Comparativement aux matériaux confectionnés à 20°C (20- 20), il a observé qu'un ajout d'eau permettant de maintenir les propriétés rhéologiques n'augmente pas significativement cette grandeur. Dans ce cas, l'augmentation de la quantité d'eau d'apport qui a été compensée par l'évaporation générée lors de la hausse de température des constituants n'a pas d'incidence sur le volume poreux. D'autre part, avec un surdosage en superplastifiant, les bétons fillérisés gâchés à température élevée présentent une diminution de la porosité. Ce résultat peut s'expliquer par un double effet généré par la défloculation des grains de ciment et par une diminution du rapport E/C due à l'évaporation de l'eau lors du gâchage

La seconde tendance est observée sur les matériaux confectionnés avec la matrice ternaire (BAP3). Pour une phase liante à base de laitier, une hausse des températures de confection et de maturation ne semblent pas affecter significativement cet indicateur de durabilité.

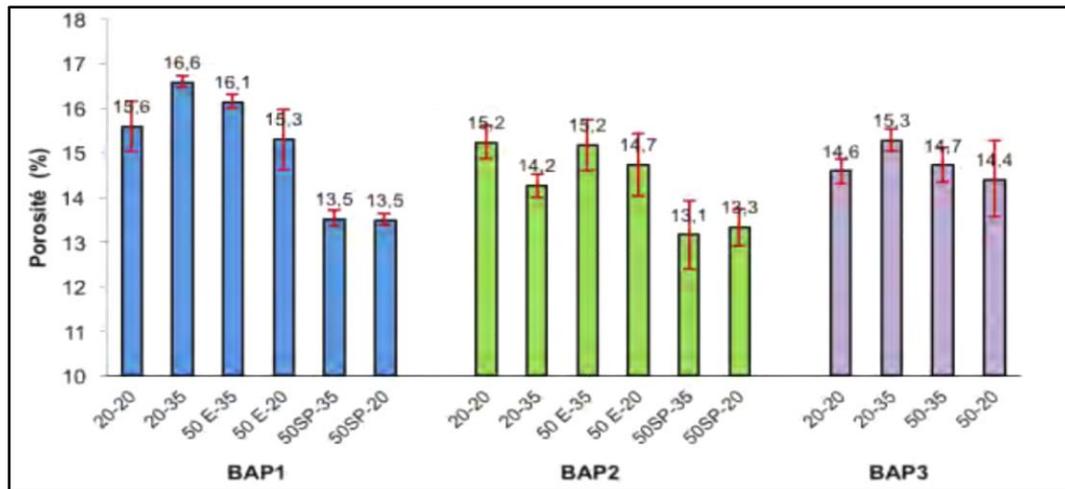


Figure 3.19 : Valeurs de la porosité accessible à l'eau (moyenne et dispersion) obtenues pour les différents BAP [Vinh, 2014]

3.3.3.2 Effet de la température sur l'absorption d'eau

1- Béton vibré

Dans son étude « durabilité des bétons autoplaçants », en faisant la comparaison directement avec les bétons vibrés, [Assié, 2004] a trouvé qu'à jeune âge d'une même série les BAP présentent une absorption capillaire et une cinétique d'absorption plus élevée que les bétons vibrés, alors qu'à plus long terme les BAP ont une absorption capillaire et une cinétique d'absorption légèrement plus faibles que celles des bétons vibrés. Il semblerait donc qu'il puisse exister des différences d'évolution de microstructure entre les deux familles de béton. Selon [Mouret et al, 2005] qui ont utilisé les mêmes échantillons pour la mesure de la perméabilité, et l'absorption capillaire était mesurée par pesées successives de ces échantillons, où ils ont constaté que l'absorption initiale des bétons à l'âge de 28 jours ne se modifie pas par la température de murissement élevée aux jeunes âges, mais une augmentation de leur absorptivité évaluée entre 1 heure et 24 heures d'absorption (figure 3.20).

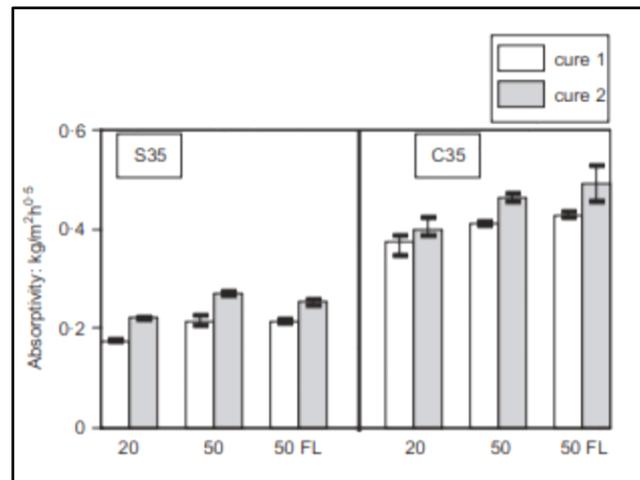


Figure 3.20 : Absorptivité de bétons vibrés à 28 jours, mûris à des températures de 20°C ou 35°C durant les premières heures [Mouret et al, 2005]

2- Béton autoplaçant

[Vinh, 2014] a constaté qu’aucune tendance n’a été enregistré selon le type de mélange utilisé (liant binaire plus ou moins fillérisé BAP1 et BAP2 ou liant ternaire BAP3), donc la hausse de température de confection et de maturation n’affecte pas significativement la propriété d’absorption (figure3.21).

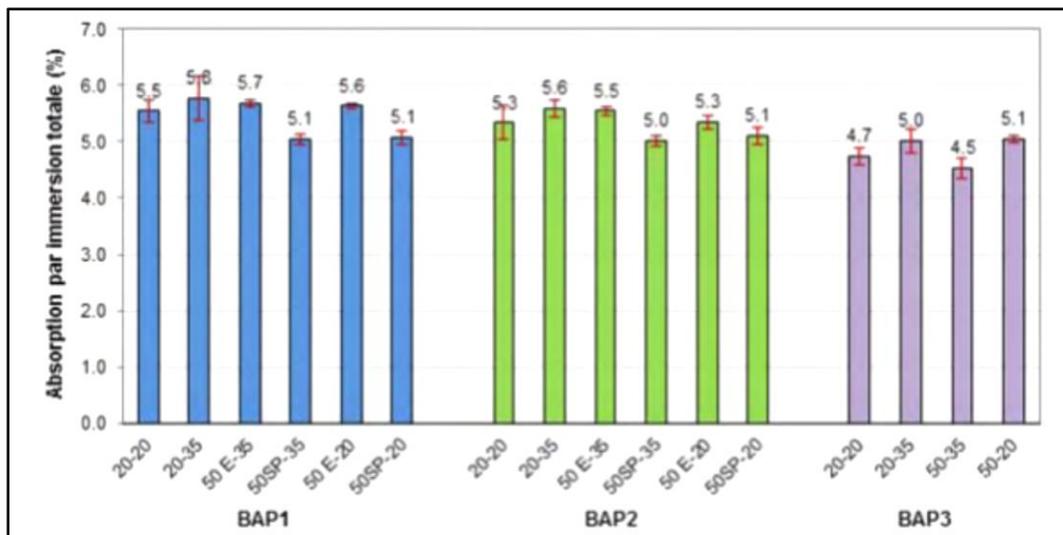


Figure 3.21 : Valeurs (moyenne et dispersion) de l’absorption d’eau par immersion totale, obtenues selon [EN13369] [Vinh, 2014]

3.3.3.3 Effet de la température sur la perméabilité aux gaz

1- Béton vibré

D'après les résultats d'une valeur moyenne calculée à partir de trois mesures, [Mouret et al, 2005] n'observent pas de variation de la perméabilité à l'air à 28 jours d'âge avec l'élévation de la température de cure, en fixant les paramètres d'étude (température initiale du béton, classe de résistance du béton et nature granulaire). Sauf pour le béton S22-50 et Béton C22-50, qui correspond à un pore plus grand interconnexion par rapport à d'autres bétons étudié (figure 3.22).

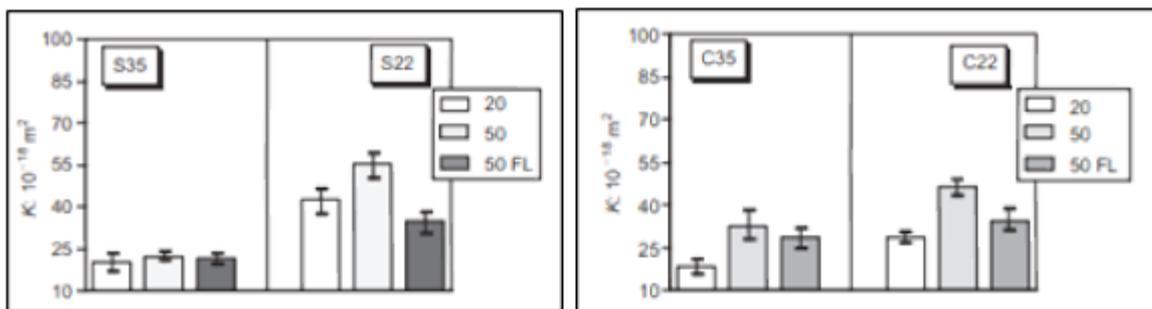


Figure 3.22 : Perméabilité à l'air après 28 jours des deux bétons siliceux et (s) et calcaire (c) [Mouret et al, 2005]

2- Béton autoplaçant

À partir des valeurs intrinsèques, et d'après la figure 3.23 [Vinh, 2014] a constaté que la température n'influe pas significativement sur la perméabilité quelle que soit la matrice utilisée (liants binaires plus ou moins fillérisés et liant ternaire). Mais en négligeant pas l'effet des fillers qui semble renforcer la compacité de la matrice et par conséquent sur la propriété de perméabilité du BAP1 avec un rapport F/C=0.5, qui représente les meilleurs résultats comparativement au BAP2 confectionné avec une matrice moins fillérisée (F/C=0.25). La même remarque peut être dite pour le BAP3 incorporant du laitier qui présente aussi de bons résultats, dans ce cas, [Vinh. A, 2014] renvoi le bénéfice de performance au crédit de l'effet chimique du laitier qui a la capacité à s'hydrater et ainsi de former de nouveaux hydrates à plus long terme.

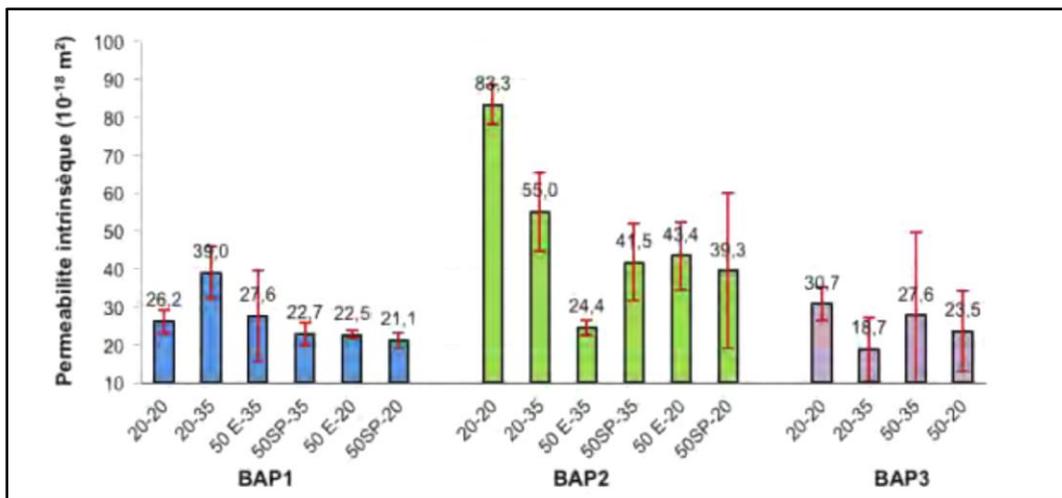


Figure3.23 : Valeurs (moyenne et dispersion) de la perméabilité intrinsèque pour les différents BAP [Vinh, 2014]

3.4 Effet du climat chaud sur la durabilité vis-à-vis aux attaques chimiques

Vu sa porosité le béton est un matériau susceptible d’être attaqué par les différentes agressions chimiques de différents types (sulfates, acides, le dioxyde de carbone, etc....).

À cet effet [Denecker, 2014] voit que les sulfates de sodium (Na_2SO_4) sont admis comme étant les sels les plus destructeurs pour les matériaux poreux

L’altération du béton causée par l’attaque chimique peut se produire après quelques années ou quelques dizaines d’années, concerne souvent la matrice cimentaire de la part de sa porosité et la composition chimique de la solution interstitielle.

3.4.1 Les attaques sulfatiques

Une enquête de l’organisation de coopération et de développement économique (OCDE) réalisée en 1989 indique que l’attaque par les sulfates est la deuxième cause de dégradation après la corrosion des aciers, le risque est alors d’avoir apparaitre une réaction sulfatique interne due à une élévation de température de 60° à 70°C [Divet, 2002].

L’attaque par les sulfates peut détériorer très significativement le béton dans un laps de temps relativement court (10 à 15 ans) [GCI-714], essentiellement dans certaines régions où les sols contiennent du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ou de l’anhydrite (CaSO_4), avec des concentrations élevées ($> 5\%$) tel que l’Afrique du Nord, les prairies canadiennes et la région parisienne, où le taux de sulfate de sodium Na_2SO_4 est de l’ordre de 58g/l. Cependant la plupart des sols

Chapitre 3: Effet du climat chaud sur les propriétés rhéologiques et physico-mécaniques des BAP – Effet de la température

contiennent des sulfates sous la forme de gypse (généralement entre 0,01% et 0,05 % (sol sec) exprimés en SO₄). Ces concentrations relativement faibles ne sont généralement pas agressives pour le béton [GCI-714]. Elle est associée à la précipitation de produits sulfatés secondaires, d'une expansion importante et de la détérioration chimio-mécanique (modifications des propriétés de transport de la porosité, fissures, perte de résistance et de cohésion,...). Ceci peut conduire à la ruine du matériau cimentaire, à plus ou moins long terme en fonction de l'attaque (nature, teneur et concentration des sulfates au contact) et du ciment utilisé (type et rapport Eau/Ciment).

L'attaque sulfatique externe se produit lorsqu'un matériau cimentaire se trouve en contact direct avec une source de sulfate, comme dans les sols, les eaux souterraines, les eaux d'infiltration, les pluies acides (acide sulfurique) liées à la pollution industrielle atmosphérique. Elle peut être décrite selon trois processus permettant d'évaluer l'agression [Khelifa, 2009].

- Le transfert dans le milieu poreux des ions sulfates qui est contrôlé par perméabilité et la diffusivité des matériaux,
- Les réactions chimiques entre les composants de la pâte de ciment, qui dépendent du ciment utilisé, et de l'apport en ions SO₄⁻²,
- Le phénomène d'expansion, résultant de la cristallisation de nouveaux hydrates (formation de l'ettringite secondaire)

Les sulfates peuvent détériorer le béton selon deux mécanismes physico-chimiques :

- Expansion
- Perte des propriétés liantes des C-S-H

3.4.1.1 Mécanismes d'attaque sulfatique

Ces mécanismes d'attaque se présentent par les réactions chimiques comme suit :

1- Formation de gypse secondaire (substitution ionique entre la portlandite et les sulfates)

Dans un milieu aqueux les ions sulfates réagissent avec la portlandite Ca(OH)₂ pour former le gypse (sulfate de calcium) suivant la réaction suivante :



NaOH : Alcalinité élevée → stabilisation des C-S-H.

CaSO₄·2H₂O : Produit expansif mais qui se forme uniquement dans les espaces internes de la pâte de ciment hydraté, Dans la majorité des cas, pas ou peu d'expansion.

2- Formation d'ettringite secondaire

Ce gypse produit par la décalcification de la portlandite participe à la formation de l'ettringite secondaire, soit à partir de l'aluminat tricalcique C₃A, présent dans la composition du clinker suivant la réaction suivante :



Ou à partir du mono-sulfato-aluminat de calcium hydraté suivant la réaction suivante :

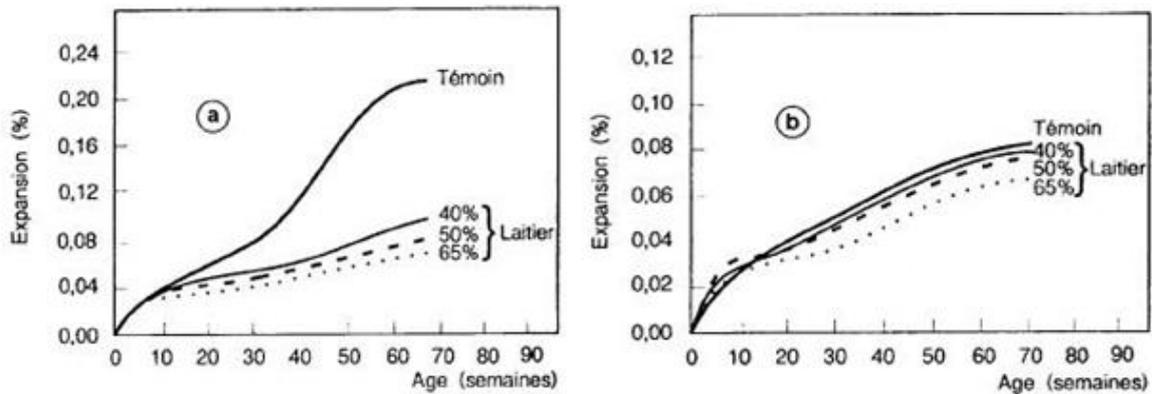


La précipitation de l'ettringite secondaire conduit à la formation de cristaux très fins (ettringite non fibreuse de nature colloïdale) dont le volume molaire est de 3 à 8 fois supérieures (suivant qu'il s'agit du C₃A ou du C₄AH₁₃) au volume du solide initial [GCI-714].

3.4.1.2 Influence des ajouts minéraux sur la résistance des bétons aux attaques sulfatiques

La substitution d'une portion du ciment par ajouts minéraux permet d'augmenter la résistance des bétons face aux attaques sulfatiques, car un moins de ciment conduit vers un teneur en C₃A plus faible ce qui provoque l'augmentation de la résistance face aux attaques sulfatiques. Dans la littérature, les mortiers fabriqués de ciments contenant 40% ou plus de laitier, 20% à 30% de cendres volantes, 7 à 10% de la fumée de silice ont généralement une bonne résistance aux sulfates expliquée par le pourcentage d'expansion qui plus faible comparable ment avec un mortier témoin (figure3.24) [GCI-714].

[Siad,2010], dans une étude en comparant des résultats des bétons ordinaires et BAP à base de pouzzolane PZ, de cendres volantes CV et de fillers calcaires FC montre que les BAP à base de PZ et CV, présentent un gain de masse moins important que celui des BO de même classe de résistance. Alors que le BAP à base de fillers calcaires présente un gain de masse presque proche à celui du béton ordinaire. Ce qui explique l'effet bénéfique des ajouts sur la résistance des BAP face aux attaques sulfatiques.



**Figure 3.24 : Résistance aux sulfates d'échantillons de mortier avec ajouts de laitier
a- Ciment type II 6,4% de C3A, b- Ciment type V 3,7% de C3A. [GCI-714]**

3.4.2 Les attaques acides

Un acide est un composé chimique généralement défini par ses réactions avec des produits chimiques complémentaires, les bases ou alcalins, c'est-à-dire leur pH est supérieur à 7. Le pH (potentiel Hydrogène) est une mesure logarithmique de la concentration effective d'ions d'hydrogène caractérise l'acidité ou la basicité d'un produit ou d'un milieu. Plus le pH est bas, plus l'acidité est forte. Une solution ou un produit est dit acide si son pH est inférieur à 7, basique ou alcalin s'il est supérieur à 7 et neutre si son pH est égal à 7.

Le béton est susceptible d'être attaqué par différents types d'acides (acide sulfurique, nitrique, phosphorique, acétique, lactique, ...).

Les sources acides les plus fréquents sont :

- 1- Les eaux naturelles des tourbières et des marécages, où le pH peut s'abaisser jusqu'à 4 ;
- 2- Les tuyaux d'égout, ils peuvent être le siège d'un phénomène d'attaque complexe : les eaux qu'ils transportent contiennent des composés soufrés et des bactéries réductrices de sulfate qui transforment ces composés en acide sulfhydrique (H_2S), un gaz qui s'échappe des eaux usées. Ce dernier peut ensuite être oxydé par d'autres bactéries, puis transformé en acide sulfurique (H_2SO_4), qui attaque le béton (attaque acide bactérienne) ;
- 3- Les pluies acides, qui contiennent principalement de l'acide sulfurique et de l'acide nitrique, ayant un pH entre 4.0 et 4.5, peuvent provoquer la dégradation de la surface exposée du béton ;

- 4- Les milieux industriels : dans les industries chimiques ainsi que les industries agroalimentaires.

3.4.2.1 Les mécanismes d'attaque acide

L'attaque du béton par les acides comprend un ensemble de processus complexes qui entraînent une réduction des propriétés structurelles du matériau, telles que la résistance en compression. Tout comme les granulats calcaires, le béton est un matériau basique (son pH est supérieur à 12,5) susceptible d'être attaqué par les acides. Ceux-ci réagissent avec les composés calciques du béton pour mener à la formation de sel de calcium de l'acide corrodant. Si l'acide circule suffisamment pour éliminer ce dépôt de sel, l'attaque se renouvelle indéfiniment. La mobilité du liquide acide est donc un facteur capital du degré d'agressivité.

La réaction des acides avec les corps composés à base de calcium entraîne finalement une dissolution de la structure du ciment durci [CSTC2004].

- Acide sulfurique : L'acide sulfurique est relativement inoffensif, car les sulfates de calcium sont difficilement solubles dans l'eau. Mais les ions de sulfate jouent en l'occurrence un rôle nuisible pour le béton (gonflement dû aux sulfates).

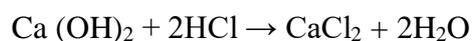


Hydroxyde de calcium + acide sulfurique → sulfate de calcium + eau

L'acide sulfurique réagit donc avec la chaux libre dans le béton et forme du gypse. Cette réaction est associée à une augmentation du volume du béton. Une action bien plus destructive est la réaction entre l'aluminate de calcium et les cristaux formés de gypse. Ces deux produits forment l'ettringite ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) moins soluble dans l'eau.

- Acide chlorhydrique

L'acide chlorhydrique fait partie des substances très agressives, car le sel correspondant (chlorure de calcium) est très facilement soluble dans l'eau. La formule suivante décrit la réaction entre l'acide chlorhydrique et la portlandite.



Hydroxyde de calcium + acide chlorhydrique → chlorure de calcium + eau

Les acides inorganiques forts ne réagissent pas uniquement avec l'hydroxyde de calcium. Ils attaquent également les autres composants de la pâte de ciment durcie, en formant des sels

Chapitre 3: Effet du climat chaud sur les propriétés rhéologiques et physico-mécaniques des BAP – Effet de la température

calciques, aluminiques ou ferriques, ainsi que des acides siliciques colloïdaux (gels de silice) [Belaribi, 2015]

Sous l'acide sulfurique H_2SO_4 [Mouallif et al, 2013] ont constaté que la perte de résistance à la compression des éprouvettes immergées dans le H_2SO_4 est plus grande que celle pour les éprouvettes immergées dans le Na_2SO_4 .

3.4.2.2 Influence des ajouts minéraux sur la résistance des bétons aux attaques acides

L'effet des ajouts minéraux sur la résistance des matériaux cimentaires dans les milieux acides est très significatif.

À titre d'exemple, [Senhadji et al, 2016] ont trouvé que la substitution du ciment par les fillers calcaires pour les mortiers, augmente la résistance chimique vis-à-vis de l'attaque de 5% H_2SO_4 , ainsi que la perte de masse est moins par rapport aux mortiers sans ajouts.

[Ghrici et al, 2007] ont trouvé que le filler calcaire présente une meilleure résistance dans la solution d'acide sulfurique que celle avec de l'addition pouzzolane naturelle et l'addition binaire pouzzolane naturelle + filler calcaire. Cependant dans la solution d'acide chlorhydrique le béton à base de pouzzolane naturelle présente une faible perte de masse.

Après six mois d'immersion des mortiers et des bétons dans des solutions acides. [Rahmani et al, 2008] ont montré que la perte de masse est de 62,6 % pour le béton à base de filler (C2), de 56,6 % pour l'addition binaire filler + fumée de silice (C3) de 30,1 % pour le filler + pouzzolane naturelle (C4) et de 40,2 % pour l'addition binaire filler + fines de pierre ponce (C5). Pour les bétons témoins (C1), la perte de masse était plus importante, cependant l'addition binaire filler + pouzzolane naturelle (C4) conserve sa meilleure résistance dans un environnement d'acide sulfurique (figure 3.26).

3.5 Effet combiné température -attaque sulfatique sur les bétons vibrés

[Azziez, 2017] voit que les mortiers conservés pendant 24 mois à 50°C montrent un meilleur comportement à l'attaque de sulfate que ceux conservés à 5, et 20°C. Ainsi que la température élevée améliore la résistance à la compression dans une attaque par les sulfates de magnésium $MgSO_4$. Cette augmentation de la résistance à la compression selon lui, peut être due à la forte température qui accélère l'hydratation du ciment pour produire plus de C-S-H et aux réactions entre le sulfate et le ciment hydraté pour former du gypse et de l'ettringite.

[Fevziye Akö et al, 1999] dans une étude expérimentale a été réalisée sur des mortiers avec et sans fumée de silice immergés dans des solutions de sulfate et magnésium de concentration de 18000mg/l et 13000mg/l de SO_4 respectivement. Les températures des solutions étaient de 20

Chapitre 3: Effet du climat chaud sur les propriétés rhéologiques et physico-mécaniques des BAP – Effet de la température

à 40°C pendant 300jours. D'après les résultats de la recherche, ils ont trouvé que la température élevée de la solution n'accélérait pas la détérioration de mortiers dans les conditions utilisées, mais au contraire elle améliore de nombreuses propriétés des échantillons.

A une température ambiante [Safer, 2017], a trouvé que les résistances à la compression sur des éprouvettes de 10x10x10cm³ de béton ordinaire confectionnées en vase calcinée de dosage 10et 20% (BOV10 et BOV20), présentent des résistances meilleures par rapport au béton témoin (0%) à 360jours d'immersion dans la solution 5% MgSO₄ (figure 3.25).

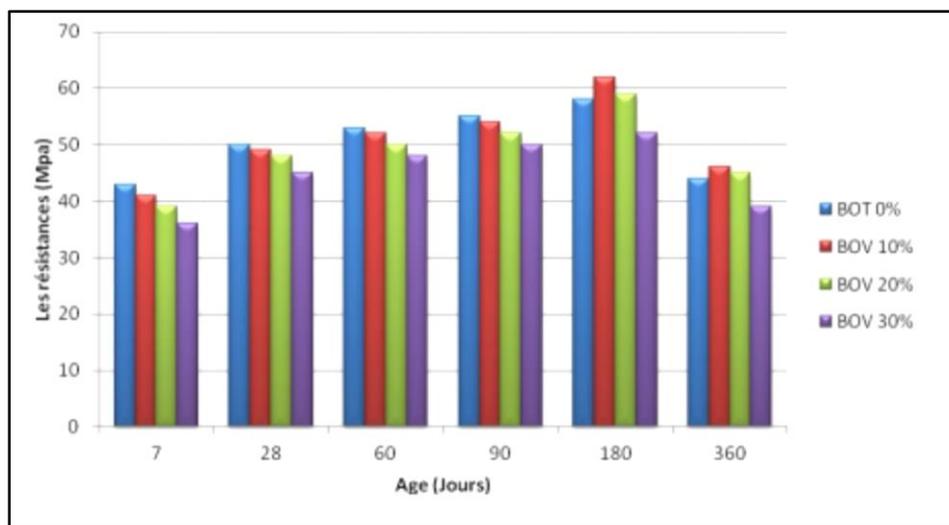


Figure 3.25 : Evolution de la résistance à la compression des bétons immergés dans la solution de 5% MgSO₄ [Safer, 2017]

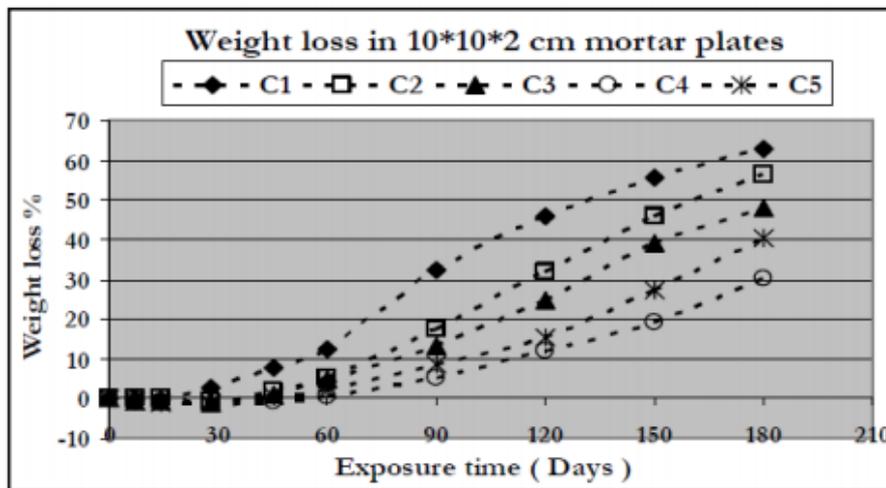


Figure 3.26 : Perte de masse en fonction de temps d’immersion dans l’acide sulfurique [Rahmani et al, 2008]

[Mouallif et al, 2013] ont préparé des éprouvettes selon le procédé de moulage de béton frais de type CR (Compactage Radial). Ils ont utilisé des moules cubiques de dimensions 10x10x10 cm³. Les éprouvettes préparées, sont plongées dans deux solutions Na₂SO₄ 5% et H₂SO₄ 5% aussi. Après 40 jours d’immersion, ils ont constaté que le vieillissement par la solution d’acide sulfurique attaque plus les éprouvettes en béton par rapport à la solution de sulfate de sodium. Ainsi que plus le temps de vieillissement par H₂SO₄ augment plus le phénomène de lixiviation de béton est accéléré.

3.6 Effet combiné température-attaque sulfatique sur les BAP

[Belaribi, 2015] dans un travail où il a formulé quatre BAP (BAPT témoin sans ajout, BAPPZ incorporant 20% de la pouzzolane, BAPVC incorporant 20% de la vase du barrage Chorfa, et BAPVF incorporant aussi 20% de la vase du barrage Fergoug), ces BAP ont été immergés dans des solutions sulfatiques 5%Na₂SO₄ et 5%H₂SO₄ à température ambiante de 23°C. Les résultats de ce travail montrent que la résistance à la compression de tous les bétons conservés dans la solution sulfatique Na₂SO₄ se développe positivement jusqu’à 60 jours d’âge d’immersion.

Chapitre 3: Effet du climat chaud sur les propriétés rhéologiques et physico-mécaniques des BAP – Effet de la température

Pour l'effet de l'acide sulfurique, il a constaté que tous les BAP ont subi des dégradations exprimées par une perte moyenne du poids d'environ 57% pour 70 jours d'immersion dans la solution H_2SO_4 .

[Salhi et al, 2019] dans une nouvelle publication en avril 2019 a constaté qu'avec des rapports $E/L=0.38$ et 0.44 de différentes formulations de BAPs, des expansions induites par la cristallisation en augmentant la compacité du béton, ce qui entraîne une augmentation de la résistance à la compression au niveau des micropores au premier stade, cependant en deuxième stade de nouvelles fissures commencent à apparaître ce qui provoque la diminution de cette résistance.

[Khelifa, 2009] a constaté qu'à la base du même ciment des BAPs, la plus faible résistance aux sulfates est celle du béton de rapport $E/C=0.59$ qui se dégrade plus vite et de manière plus importante que celui du rapport $E/C=0.49$.

[Tennich et al, 2017] ont utilisé trois types des BAPDs avec les déchets industriels (D1, D2 et D3) ont été préparés pour évaluer leur résistance à l'attaque de sulfate externe. La durabilité de ces BAPDs a été comparée à un BAPT et un BOV.

Les échantillons utilisés dans cette étude sont de forme cubique ($70 \times 70 \times 70$ mm), obtenus après sciage d'éprouvettes prismatiques ($70 \times 70 \times 280$ mm). Avant le sciage, ces éprouvettes ont été fabriquées et durcis dans de l'eau maintenue à $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ pendant 28 jours. Après sciage, les échantillons ont été séchés à une température de $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Pour chaque essai, trois échantillons ont été préparés pour chaque type de béton et exposés à une attaque par le sulfate externe (Na_2SO_4 à 5%, $10H_2O$).

A partir de cette étude expérimentale, ils ont trouvé que les bétons BAPDs ont une résistance suffisante à la dégradation chimique sévère de la solution de Na_2SO_4 . Le gain de masse des BAPs était entre 5% et 7% pendant 20 mois d'immersion alors que pour le BOV, il était supérieur à 10% (figure 3.27). De même, le module élasticité dynamique des BAPDs est resté supérieur à 25 GPa pendant 14 mois d'exposition (pour BAPD3) tandis que pour le BOV, il a diminué en-dessous de 25 GPa après seulement 8 mois d'exposition (figure 3.28).

Pour étudier l'évolution de la résistance à la compression et la durabilité des BAP vis-à-vis aux attaques sulfatiques au climat chaud stimulé au laboratoire. [Salhi et al, 2019] ont utilisés deux types de ciment, le ciment Portland et le ciment de laitier, trois rapport eau / liant (E / L) ($0,32$, $0,38$ et $0,44$) et cinq modes de durcissement. A la base des résultats obtenus, ils ont conclu que la résistance à la compression est fortement influencée par le durcissement, et sept jours de durcissement initial dans l'eau suivi d'une maturation dans un climat chaud était la meilleure durée pour un meilleur développement de la résistance à la compression.

Chapitre 3: Effet du climat chaud sur les propriétés rhéologiques et physico-mécaniques des BAP – Effet de la température

Pour l'attaque sulfatique, ils ont conclu aussi suivant les tests de diffractogramme que les bétons formulés à partir du laitier restent moins sensibles aux attaques sulfurique et attaque sulfatique externe par rapport au BAP formulés avec du ciment Portland quel que soit le rapport E / L. Ainsi que les bétons incorporant le ciment portland avec un rapport E/L plus élevés sont ceux qui ont les signes les plus visibles d'attaque acide.

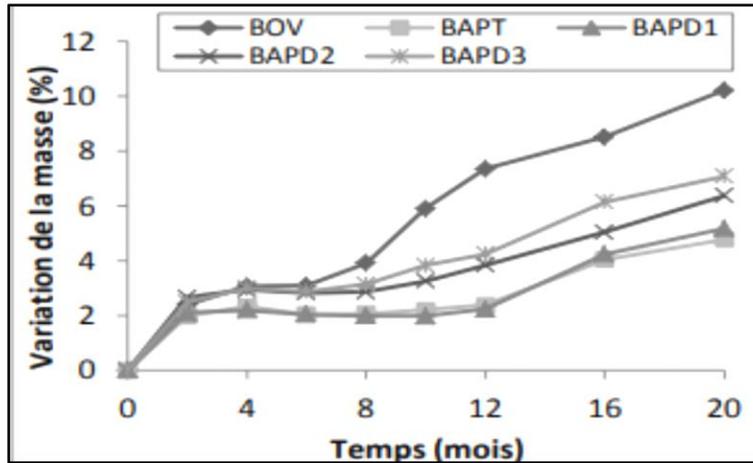


Figure 3.27 : Evolution de la masse des échantillons dans une solution de Na_2SO_4 [Tenich et al, 2017]

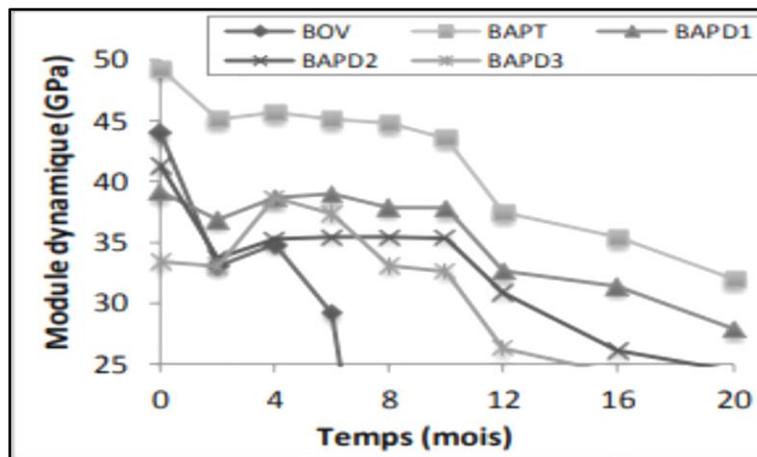


Figure 3.28 : Evolution de module dynamique des échantillons dans une solution de Na_2SO_4 [Tenich et al, 2017]

3.7 Conclusion

Il est clair que l'effet du climat chaud et sec sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et physico-chimiques est non négligeable.

L'augmentation de la température à l'état frais conduit à l'accélération de la vitesse de prise et la cinétique d'hydratation du béton, ainsi son évaporation et sa dessiccation. Ce qui conduit à la perte importante de la maniabilité caractérisée par la diminution de l'affaissement pour le béton ordinaire, et l'aptitude de l'autoplaçance pour le BAP.

L'affirmation la plus répandue est qu'aux jeunes âges le climat chaud et sec conduit l'accroissement rapide de la résistance, mais à long terme cet accroissement devient lent et dès fois chute considérablement surtout dans l'absence d'une cure humide appropriée.

Concernant le module élastique, l'élévation de la température n'en a pas un effet important selon plusieurs chercheurs. Par exemple pour [Mouret, 1997] a trouvé que le module élastique du béton ordinaire ne se modifié pas avec l'augmentation de la température de 20 à 35°C [Mouret, 1997]. C'est la même constatation de [Kim et al, 2002] pour des bétons durcis dans des conditions isothermes de 10.23.35.et 50°C. Alors [Kanstad et al, 2003] ont prouvé que l'élévation de la température à 40°C ne réduit pas le module élastique du béton ordinaire.

Pour le BAP [Vinh, 2014] a trouvé que l'augmentation de la température de 20à 35°C durant les premières 24 heures n'induit pas de différences significatives sur les modules d'élasticité.

Ce qui concerne l'effet du climat chaud et sec sur les propriétés différés (retrait et fluage) des bétons autoplaçants, les études sont très rares, et les résultats concernant les propriétés physico chimique et durabilité sont dès fois contradictoires et dépendent des compositions des bétons et aussi à la durée de l'application du mode de cure.

Deuxième partie

ETUDE EXPERIMENTALE

*Matériaux utilisés, procédures, discussion &
interprétation des résultats*

Chapitre 4

Matériaux utilisés et méthodes expérimentales

4.1 Introduction

La connaissance de diverses propriétés : physique, chimique, minéralogique et mécanique des matériaux utilisés, est une exigence importante de toute opération de recherche à fin d'aboutir aux résultats souhaités. A cet effet tous les matériaux utilisés dans notre étude sont identiques pour les BAP et le béton vibré, et parmi les meilleurs disponibles dans le marché algérien, ce qui nous permet de considérer leurs caractéristiques comme suffisantes pour réaliser notre étude. Nous rappelons que tous les essais sont effectués au laboratoire de recherche en génie civil de l'université de Biskra (LRGC). L'analyse par diffraction des rayons X(DRX) et l'analyse au microscope à balayage (MEB) couplé d'EDS sont effectués au niveau du laboratoire de physique des couches minces et applications (LPCMA) de l'université de Biskra, tandis que l'analyse par la spectroscopie FTIR infrarouge (*Fourrier-Transform-Infrared-spectroscopy*) est réalisée au sein du laboratoire de chimie de l'université de Khenchela.

4.2 Matériaux utilisés

4.2.1 Ciment

Pour tous les mélanges on a utilisé un seul type de ciment (CPJ-CEM II/42.5A) du groupe GIGA de la cimenterie d'Ain -Touta, un ciment disponible et utilisable par la majorité des chantiers de la région. Ses analyses physiques, chimiques et minéralogiques communiqués par le producteur sont représentés dans les tableaux suivants.

Tableau 4.1 : Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment utilisé

Compositions chimiques (%)									
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	R.insol
61.37	22.28	4.56	3.88	1.40	1.72	0.06	0.33	3.71	3.29
Compositions minéralogiques (%)									
C ₃ S		C ₂ S		C ₃ A		C ₄ AF			
59.2		14.1		6.1		11.4			

Tableau 4.2 : Caractéristiques physiques du ciment utilisé

Caractéristiques physiques	Valeurs
Densité absolue (g/cm³)	3.1
Densité apparente (g/cm³)	1.09
Surface spécifique de Blaine (cm²/g)	3775
Consistance normale (%H₂O)	25.6
Début de prise (mn)	171
Fin de prise (mn)	232
Expansion à chaud (mm)	1.80

4.2.2 Sable

Dans tous les mélanges de notre étude nous avons utilisé un sable local prélevé d'Oued Ittel (ElBaadj wilaya d'El méghaier) à 85km sud de Biskra, il s'agit d'un sable siliceux de classe granulaire (0/5mm) et utilisé couramment dans la confection du béton dans cette région.

Tableau 4.3 : Caractéristiques physiques du sable utilisé

Caractéristiques physiques	Valeurs
Densité absolue (g/cm³)	2.56
Densité apparente (g/cm³)	1.54
Module de finesse	2.54
Equivalent de sable visuel (%)	78.32
Equivalent de sable par piston (%)	73

4.2.3. Gravier

Pour assurer une bonne maniabilité, un seul type de gravier était utilisé pour le béton autoplaçant, il s'agit de gravier de type (7/15), deux types pour le béton vibré (7/15) et (15/25). Graviers concassés, de nature calcaire, disponibles dans le marché algérien, provenant pour notre région du gisement d'Ain-Touta de la wilaya de Batna.

Tableau 4.4 : Caractéristiques physique du gravier utilisé

Caractéristiques physiques	Gravier 15/25	Gravier 7/15
Densité absolue (g/cm ³)	2.62	2.61
Densité apparente (g/cm ³)	1.255	1.283
Coefficient d'absorption (%)	0.64	0.60
Porosité (%)	0.96	0.56
Coefficient de Los Angeles %	26	26

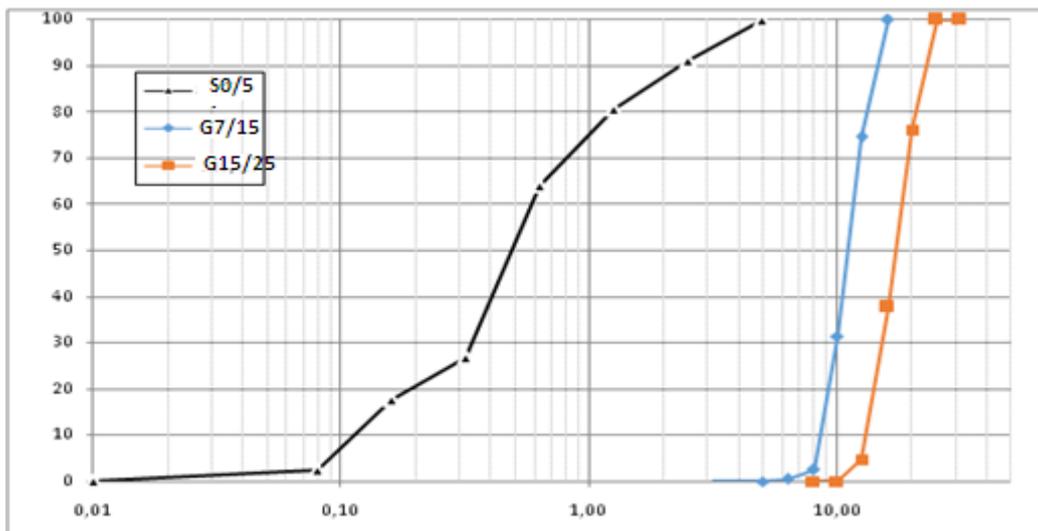


Figure 4.1 : Courbe granulométrique des granulats utilisés

4.2.4 Fillers calcaires

Il s'agit d'une roche calcaire disponible dans la majorité des carrières d'Ain-Touta, broyée et tamisée, possédant suivant notre analyse au laboratoire les caractéristiques suivantes :

Densité absolue = 2.76, densité apparente = 1.09 et surface spécifique = 3070 cm²/g).

4.2.5 Adjuvant chimique

Nous avons utilisé dans notre étude un seul adjuvant produisant par la société « GRANITEX », il s'agit du super plastifiant « MEDAFLOW30 », sous forme liquide brun clair et est conçu de base de Poly carboxylates, de caractéristiques suivantes selon le fabricant :

Tableau 4.5 : Caractéristiques physiques du super plastifiant utilisé

Caractéristiques physiques	Valeurs
Aspect	Liquide
Couleur	Brun claire
PH	6-6.5
Densité	1.07
Teneur en chlore	Inférieur à 0.1g/l
Extrait sec	30%



Photo4.1: Superplastifiant de type « médaflow30 » utilisé

4.2.6 Eau de gâchage

Il s'agit de l'eau potable du robinet du réseau public de la ville de Biskra, qui convient à la fabrication de tout type de béton de qualité conforme à la norme P18-303.

Pour la température de l'eau nous avons procédé à deux types de températures :

1. Comprise entre 15 et 18°C, pour obtenir la température du béton après malaxage constante et comprise entre 20 et 25 °C et ceci pour le cas du béton témoin.
2. Selon les conditions climatiques réelles de chantier (climat chaud).

4.2.7 Analyse par diffraction aux rayons X (DRX) des matériaux utilisés

L'analyse par diffraction des rayons X des matériaux utilisés dans nos mélanges s'est révélée efficace car elle a révélé l'essentiel des composés constitutifs de chaque mélange réalisé.

Ainsi, nous avons débuté cette partie d'analyse DRX, par les composés de départ. La figure 4.2a et 4.2b, qui révèlent les produits essentiels qui composent le ciment de départ, et aussi les analyses relatives aux sable et au FC respectivement.

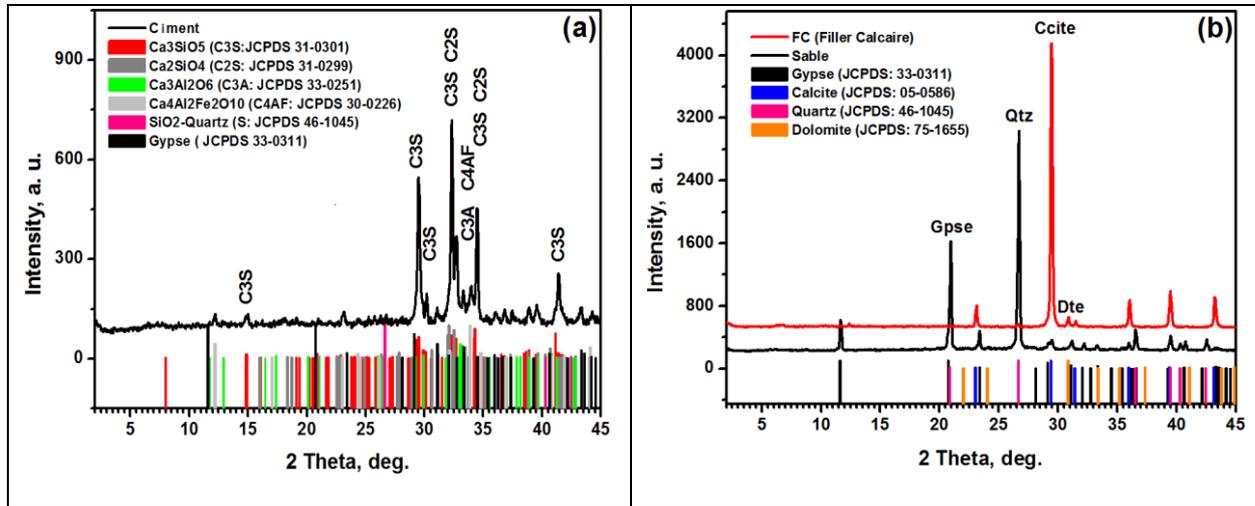


Figure 4.2 : Analyse de diffractomètre des rayons x(DRX) des matériaux utilisés (a : ciment ; b : filler calcaire et sable)

Dans le cas du ciment, les analyses permettent de distinguer la présence des composés C3S (Alite), C2S (Belite), C3A (Tricalcium aluminate), C4AF (Calcium aluminoferrite), et enfin une très faible quantité de SiO₂. Les composés ont été identifiés en concordance avec les fiches JCPDS correspondantes, et les spectres DRX de la figure 1a, sont très similaires à ceux données en littérature, concernant les ciments.

Le sable utilisé est constitué d'une grande quantité de quartz (SiO₂), de gypse (CaSO₄, 2H₂O), et d'une faible quantité de calcite (CaCO₃).

Le composé FC (filler Calcaire) est composé principalement de calcite (CaCO₃), de plus faible quantité de dolomite (CaMg(CO₃)₂), et aussi de plus faible quantité de Quartz (SiO₂).

Notons que les pics les plus intenses de ces composés sont localisés aux valeurs 2θ suivantes :

Produit	C3S	C2S	C3A	C4AF	Quartz	Gypse	Calcite	Dolomite
2 Theta	32.34	32.34	33.32	33.65	26.70	26.55	29.49	30.90

4.2.8 Analyse par spectroscopie infrarouge (FTIR) des matériaux utilisés

Les analyses par spectroscopie ftir(Fourier-Transform-Infrared-spectroscopy), associées aux analyses par DRX, permettent une meilleure compréhension du sujet, car la spectroscopie

permet en plus de caractériser même les produits amorphes rajoutés à ceux cristallisés retrouvés par DRX.

Les spectres FTIR des matériaux utilisés sont représentés sur la figure 4.3 ci-dessous. Les analyses et affectations des pics obtenus par ces analyses nous permettent de caractériser les produits constitutifs des sables, du ciment, et des FC.

Dans tous les cas, ces analyses corroborent et complètent les résultats déjà retrouvés par DRX.

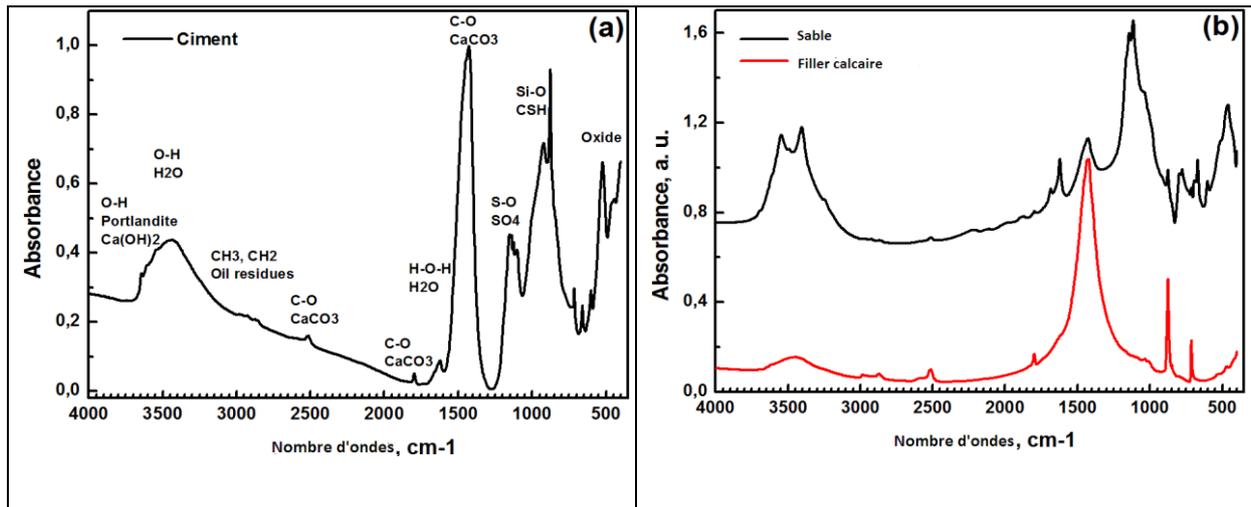


Figure 4.3 : Spectres FTIR des matériaux utilisés

(a : ciment ; b : filler calcaire et sable)

4.3 Mélanges et procédures

4.3.1 Béton autoplaçant

La plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique. La méthode de Dreux-Gorisse n'est en effet pas adaptée, car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions [Turcry, 2004]. A cet effet notre formulation dans cette étude est conforme au guide [EFNARC2005], qui a fourni des directives et a proposé une gamme typique de quantités des principaux constituants dans un BAP [R'mili, 2010]. Ces directives se résument au rapport massique G/S proche de l'unité, au volume de la pâte qui doit être de 330 à 400 l/m³, à la quantité total du liant (ciment + ajout) varie de 400 à 600 kg/m³, au dosage du superplastifiant qui ne doit en aucun cas dépasser sa saturation. Donc à la base de ces directives nous avons procédé aux plusieurs formulations préliminaires afin d'optimiser et caractériser notre BAP qui répond aux critères et recommandations à l'état frais de l'AFGC

2008. En premier lieu nous avons formulé un béton 100% ciment (BAP1), ensuite pour avoir un BAP2 équivalent en ciment à un béton ordinaire (350kg/m³), une partie du ciment était remplacée par des fillers calcaires (24.75%). Ce choix a été justifié en littératures en allant de 15 à 35% de substitution.

4.3.2 Béton ordinaire vibré

C'est la méthode [Dreux & Festa, 1998] utilisée dans cette étude pour formuler notre béton ordinaire.

Les compositions des trois bétons sont représentées dans le tableau 4.6 suivant ;

Tableau 4.6 : Compositions et formulation des bétons utilisés

	E/ (C+F)	Ciment Kg/m ³	F.Calcai re Kg/m ³	Sable 0/5 Kg/m ³	Gravier 7/15 Kg/m ³	Gravier15/25 Kg/m ³	Eau l	Sp% Kg/m ³	G/S
BAP1	0.48	465	00	741.46	804	00	220.16	4.65	1.08
BAP2	0.48	350	115	741.46	804	00	220.16	4.65	1.08
BO	0.55	350	00	697	395	757	192.5	00	1.65

4.3.3 Conditions du climat sec et aride (climat chaud)

Tous les bétons ont été préparés dans des conditions climatiques assez sévères (durant les mois de mai, juin et juillet 2019) représentant d'une manière significative le climat aride de la région de Biskra suivant les données météorologiques.

Les valeurs mesurées pendant cette période sont les suivantes :

- Température moyenne à l'air libre variable entre 40°C et 55°C.
- Température moyenne sous l'ombre variable entre 30°C et 42°C ;
- Humidité variable entre 15% et 40% ;
- La vitesse moyenne du vent est de 4m/s.

4.3.4 Préparation des bétons

a- Béton ordinaire vibré

Nous travaux ont été effectués au laboratoire de génie civil à l'université de Biskra (LRGC).

Après avoir pesé les quantités de sable, de gravillons lavés et du ciment, les composants seront introduites dans un malaxeur à cuve verticale tournante d'une capacité maximale de 100L selon les normes [NF P .18-404] suivant la procédure suivante :

- 1- Introduction du sable et des graviers; malaxage pendant 1 minute (les granulats sont utilisés à l'état sec).
- 2- Introduction du ciment en continuant du malaxage;
- 3- Après trente secondes on ajoute l'eau de gâchage ;
- 4- on poursuit le malaxage humide pendant deux autres minutes, ce malaxage sera interrompu pendant une minute pour racler les parois afin d'homogénéiser le béton ;
- 5- Puis on reprend le malaxage pour une dernière minute ;
- 6- Immédiatement on passe pour déterminer sa propriété à l'état frais, il s'agit de mesurer l'affaissement au cône d'Abrams.

b- Béton autoplaçant

Nous avons utilisé le même malaxeur cité précédemment, avec la séquence d'introduction des différents matériaux comme suit :

- 1- On verse d'abord le sable dans le malaxeur pour l'homogénéiser pendant environ 30s ;
- 2- On ajoute le liant (ciment seulement ou ciment et filler calcaire) et on malaxe pendant 1 minute ;
- 3- On additionne les graviers et on malaxe à sec pendant durant 1 minute aussi ;
- 4- On introduit ensuite les trois quarts de la quantité d'eau, et on malaxe pendant deux minutes ;
- 5- On ajoute, au fur et à mesure, le reste de l'eau et le superplastifiant et on malaxe durant deux minutes environ jusqu'à l'homogénéisation de l'ensemble.
- 6- On arrête enfin le malaxeur et on commence les essais à l'état frais immédiatement.

4.4 Essais réalisés sur les différents bétons à l'état frais

4.4.1 Essai réalisé sur le béton ordinaire

- Essai d'affaissement [NFP 18-451]

Cet essai demeure aujourd'hui le plus simple et le plus utilisé pour caractériser le comportement rhéologique des bétons de chantier. Il est décrit par la norme [NFP 18-451].

L'affaissement a été mesuré directement après la fin du malaxage (affaissement initial) ensuite, après 25, 45 et 65 minutes après malaxage dans un climat sec et aride c'est l'affaissement dans le temps.

4.4.2 Essais réalisés sur le béton autoplaçant

➤ ***Essai d'étalement au cône d'Abrams (mobilité en milieu non confiné) [NF EN 12350-8]***

Le cône est placé sur une plaque d'étalement, à surface propre et humidifiée et de dimension suffisante (≥ 800 par 800 mm), est rempli de BAP. Le cône est ensuite soulevé et le BAP en sort en formant une galette qui s'élargit sous sa propre énergie, La valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette de béton ainsi obtenue, qui devrait être comprise entre 600 et 800 mm [AFGC, 2008].

➤ ***Essai de la boîte en L (mobilité en milieu confiné) [NF EN 12350-10]***

On remplit d'abord la partie verticale d'une boîte en forme de L. Après une minute, la trappe est levée permettant l'écoulement à travers trois armatures de diamètre 12 mm et distantes de 41 mm. Le taux de remplissage final $H2/H1$ renseigne sur la mobilité du béton en milieu confiné qui doit être en tout état de cause supérieur à 80% [AFGC, 2008].

➤ ***Essai de stabilité au tamis [NF EN 12350-11]***

Un échantillon de 10 litres de béton est mis au repos pendant 15 min. Il s'agit ensuite de déverser $4,8$ kg de l'échantillon sur un tamis de 5 mm de diamètre de mailles. Après 2 min d'attente, le pourcentage de laitance qui est passée au travers du tamis est calculé selon l'expression : $\pi = (\text{masse de laitance} / \text{masse de l'échantillon}) \times 100$ [AFGC, 2008].

4.5 Confection des éprouvettes

Après les essais à l'état frais, la mise en place du béton a été effectuée dans les différents moules préalablement huilés destinés aux échantillons correspondants aux essais programmés.

Pour le béton vibré nous avons utilisé la table vibrante comme méthode de serrage, alors qu'aucune méthode de compaction n'a été envisagée pour le béton autoplaçant.

Ensuite les moules remplis par le béton frais ont été recouverts par un film plastique afin d'éviter tout type d'évaporation et, maintenus sous abris à une température ambiante plus de 35°C et une humidité relative entre 11 et 28% , jusqu'au démoulage après 24 h.

4.6 Mode de cure des éprouvettes

Après le démoulage et afin de suivre l'effet du climat sec et aride sur le comportement de différents bétons (béton ordinaire vibré et béton autoplaçant), nous avons adopté deux modes de murissement jusqu'à l'âge prévu de l'écrasement :

- 1- Mode 1 : à l'air libre et sous rayons solaires avec une température entre 35°C et 55°C, humidité relative entre 15 et 40%, et vent n'excède pas 4m/seconde. Ces conditions se sont les conditions réelles de nos chantiers au sud.
- 2- Mode 2 : sous l'eau avec une température entre 20°C et 22°C et humidité relative de 100% jusqu'au moment des essais. Ce mode est pris comme mode de béton témoin.

4.7 Essais réalisés sur les différents bétons à l'état durci

4.7.1 Essais mécaniques

4.7.1.1 Résistance mécanique à la compression

Cet essai est déterminé conformément à la norme [NFP 18-406] sur des éprouvettes cubiques de 10x10x10 cm³. La charge est appliquée pour l'écrasement des éprouvettes par une presse hydraulique de 1300KN de force et de vitesse de chargement de 0.5MPa / seconde.

Pour chaque échéance (7, 14, 28 et 120 jours), la résistance calculée f_{cj} correspond à la moyenne des résistances obtenues sur trois (03) éprouvettes. L'expression des résultats sera donnée par la relation $f_{cj} = F/S$ (en MPa) où F est la charge maximale et S est la surface de compression de l'éprouvette.



Photo 4.2 : Essai de la résistance à la compression

4.7.1.2 Résistance mécanique à la traction (essai brésilien)

Cet essai est effectué conformément à la norme [NFP 18-408] sur des éprouvettes cylindriques de dimensions 16x32. L'essai consiste à placer l'éprouvette horizontalement entre les plateaux de la presse et dans l'axe ; le contact des génératrices supérieure et inférieure avec les plateaux est assuré par l'intermédiaire de bandes de mesures en contreplaqué.

L'expression des résultats est donnée par :

$$f_{ij} \text{ (en MPa)} = \frac{2}{\pi} \frac{F}{dh}$$

Avec F : la charge de rupture en newtons ;

d : le diamètre de l'éprouvette en mm ;

h : la hauteur de l'éprouvette en mm.



Photo 4.3: Essai de la résistance à la traction (essai brésilien)

4.7.1.3 Module élastique

Le module d'élasticité est déterminé l'échéance de 120 jours, les essais sont conduits sur des prismatiques de 10x10x40 cm³ que l'on fixe à l'intérieur d'une cage extenso métrique, afin de mesurer la déformation au moyen des capteurs à cadran indiquant le 0.01mm qui sont installés à l'aide des cadres appropriés sur une surface de 200mm dans le sens longitudinal et de 100mm dans le sens transversal, selon la méthode exposée par [Mezghiche,1996].

Le principe de l'essai consiste à effectuer dix cycles de charge et décharge d'une amplitude égale à 1/3 de la charge de rupture, cette valeur ayant été déterminée au préalable à partir des essais de résistance en compression. La vitesse de chargement appliquée est égale à 0,5 MPa/s. Pour chaque éprouvette au niveau de la charge égale 30% de la charge de destruction, on détermine le module d'élasticité :

$$E_{el} = \sigma_1 / \varepsilon_{1el}; \quad \sigma_1 = P_1 / F$$

σ_1 : accroissement de la contrainte de zéro conventionnel au niveau 30% de la charge de destruction.

P_1 : charge de destructions correspondantes. F = l'air de la section de l'éprouvette.

ε_{1el} : accroissement des déformations relatives élasto-instantanées longitudinales, des éprouvettes correspondant à la charge $P_1 = 0.3 P$

L'accroissement des déformations se détermine comme la moyenne arithmétique des indicateurs des quatre cotés du prisme $\varepsilon_{1el} = \Delta l_1 / l_1$

Δl_1 : accroissement absolu des déformations longitudinales des éprouvettes correspondant à l'accroissement des contraintes

l_1 : les bases fixes pour les mesures des déformations longitudinales des éprouvettes.

A partir des résultats des essais sur les prismes on a construit des graphiques présentant l'évolution du module de déformation des bétons en compression, des déformations élasto-instantanées longitudinales (t) et relatives totales ($t+\Delta t$) avec la contrainte relative.

On détermine le module d'élasticité initial à la compression à partir de la formule:

$$E = \Sigma \Delta \sigma / \Sigma \Delta \varepsilon$$

$\Sigma \Delta \sigma$: la somme d'accroissement de la contrainte à chaque degré de 0.05 à 0.3 P_c .

$\Sigma \Delta \varepsilon$: la somme d'accroissement de la déformation élasto-instantanées longitudinale relative à chaque degré de la même gamme.

Photo 4.4 : Emplacement des cadres et des comparateurs sur une éprouvette prismatique pour l'essai de déformations



4.7.2 Essai ultrasonique

Connu depuis longtemps l'essai de la vitesse de propagation d'ultrason (Ultrasonique PulseVelocity « UPV ») permet de mesurer le temps de propagation d'un train d'ondes sonores entre l'émetteur et récepteur de l'appareil disposés sur deux points de l'éprouvette cubique du béton. Ce temps permet de calculer selon la norme [NF P18-418], la vitesse de propagation à l'intérieur du matériau, qui est liée essentiellement à la masse volumique et le coefficient dynamique du béton comme l'indique l'équation suivante dans les normes en vigueur :

$$V^2 = \frac{E_d \cdot (1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}$$

Avec :

E_d : est le module d'élasticité dynamique du béton

ρ est la masse volumique du béton

ν est le coefficient de Poisson.

Le calcul d'UPV donne une indication sur l'homogénéité du matériau ainsi qu'une estimation de sa qualité et de sa résistance. Or une vitesse élevée de propagation des impulsions indique généralement un béton de bonne qualité (voir le tableau suivant 4.7) :

Tableau4.7 : Qualité du béton et vitesse de propagation des impulsions

Vitesse du son (m/s)	< 2000	2000 à 3000	3000 à 3500	3500 à 4500	> 4500
Qualité	Très mauvais	Médiocre	Assez bon	Bon	Excellent

À partir de l'équation de la vitesse de l'ultrason on peut calculer la valeur du module élastique comme suit :

$$E_d = \frac{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} V^2$$

Ou bien, le module élastique peut être donné en fonction de la constante (K),

$$E_c = K \cdot V^2 \text{ en [GPa]}$$

Avec : V c'est la vitesse du son dans le béton ;

$$K = 1.68 \quad \text{pour } t \geq 180 \text{ jours}$$

$$K = t^{0.1} \quad \text{pour } t < 180 \text{ jours, } t \text{ c'est l'âge du béton en jour.}$$



Photo 4.5 : Essai de la vitesse de propagation d’ultrason (UPV)

4.7.3 Essais physico-chimiques et durabilité

4.7.3.1 Porosité accessible à l’eau et densité

L’essai permet d’évaluer un volume de pores ouverts accessibles à l’eau. La porosité ouverte, notée ε (%), correspond au rapport du volume total des pores ouverts dans un corps poreux à son volume apparent.

L’essai consiste à déterminer la masse d’un corps d’épreuve sec (105°C), sa masse lorsqu’il est saturé en eau et son volume apparent par pesée hydrostatique, en suivant les recommandations normalisées [NF-P18-459].

La porosité est estimée après 28 et 120 jours de durcissement sur des éprouvettes cubiques de $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$, par la formule suivante :

$$\varepsilon(\%) = \left[\frac{M_{\text{sss}} - M_{\text{sèche}}}{M_{\text{sss}} - M_{\text{eau}}} \right] \times 100\%$$

Avec :

M_{sss} : Masse de l’éprouvette saturée, superficiellement sèche, pesée dans l’air en (g).

$M_{\text{sèche}}$: Masse sèche de l’éprouvette en (g).

M_{eau} : Masse de l’éprouvette saturée, superficiellement sèche, pesée dans l’eau et déterminée par pesée hydrostatique en (g). De même la densité sera donnée par la formule suivante :

$$D = \left[\frac{M_{\text{sèche}}}{M_{\text{sss}} - M_{\text{eau}}} \right]$$



Photo 4.6: Pesée hydrostatique pour l'essai de la porosité accessible à l'eau

4.7.3.2 Absorption d'eau par immersion

L'essai consiste à mesurer la masse d'eau absorbée par une éprouvette de béton selon les directives de l'annexe G de la norme [EN13369]. Les échantillons sont immergés dans de l'eau potable à une température de $20 \pm 5^\circ\text{C}$ durant un minimum de trois jours jusqu'à ce que la masse constante M_1 soit atteinte (la différence de masse entre deux pesées effectuées à 24 h d'intervalle est inférieure à 0.1% de la masse de l'éprouvette). Ensuite les éprouvettes sont placées dans une étuve au moins trois jours ($105 \pm 5^\circ\text{C}$) jusqu'à masse constante M_2 après retour à température ambiante (lorsque la différence de masse entre deux pesées effectuées à 24 h d'intervalle est inférieure à 0.1% de la masse de l'éprouvette).

L'absorption d'eau par immersion en % s'exprime alors par la relation suivante :

$$Abs = \left[\frac{M_1 - M_2}{M_2} \right] \times 100$$

4.7.3.3 Perméabilité

La perméabilité (k) caractérise l'aptitude du matériau à se laisser traverser par un fluide soumis à un gradient de pression, elle est calculée à partir de la formule de Darcy suivante :

$$Q = A \cdot K \cdot i$$

Q : étant le débit volumique.

A : section traversée par l'eau.

i : gradient hydraulique à travers l'échantillon.

k : coefficient de perméabilité.

Le coefficient de perméabilité est une caractéristique intrinsèque du matériau dans la mesure où un certain nombre de conditions sont remplies :

- Le matériau doit être saturé par de l'eau désaérée.
- La température de l'eau doit être constante.
- Il n'existe pas d'interactions physiques ou chimiques entre l'eau et les composants du béton.

L'essai consiste à mettre une éprouvette cylindrique de 16x16 cm² obtenue par sciage en deux d'une éprouvette de 16x32cm², dans un appareil de perméabilité (le perméamètre) à ce qu'elle soit traversée de haut en bas par de l'eau sous pression. La durée de l'essai est estimée à 8 heures, dont la pression est augmentée d'une unité de 1 bar par heure, en commençant par une valeur minimale de 0,2 bars. A la fin de l'essai la pression atteindra 10 bars. Cependant, un bon béton est défini comme tel du point de vue perméabilité, lorsqu'il est susceptible de supporter une pression d'eau au minimum égale à 6 bars suivant la norme internationale «ISO». Le coefficient de perméabilité K_p est calculé à partir de la formule de Darcy :

$$K_p = \frac{Q.H}{F(P_1-P_2).\tau} \cdot \eta \cdot k$$

Avec :

Q : Débit d'eau en m³.

H : Epaisseur de l'éprouvette en m.

F : Section droite de l'éprouvette en m².

P₁-P₂ : Différence de pression appliquée sur l'éprouvette en bar.

τ : Temps d'écoulement en seconde

η : Viscosité de l'eau donnée en fonction de la température

k : l'influence du diamètre de l'éprouvette.

Les coefficients : D, η et k sont donnés en fonction de la température par le tableau suivant :

Température, ° C	20	15	25
η	1.0	1.13	0.89
D	150	100	50
K	1.0	1.8	5.5



Photo 4.7: Dispositif pour l'essai de la perméabilité (Université de Biskra)

4.8 Etude de la durabilité face aux attaques sulfatiques externes

Pour l'étude de l'effet du climat sec et aride sur la durabilité face aux attaques sulfatiques, une série des éprouvettes confectionnées dans un climat aride et après 28j de durcissement dans les deux modes de cure cités auparavant dans le paragraphe (4.6), ont été immergées dans trois milieux différents de vieillissement accéléré afin de suivre l'effet des attaques :

- solution contenant 5% de sulfate de sodium Na_2SO_4 .
- Solution contenant 5% de l'acide sulfurique H_2SO_4
- Eau douce comme témoin.

Le choix de 5% de Na_2SO_4 et H_2SO_4 est basé sur l'étude bibliographique [*Ghrici et al, 2006*] [*GCI-714*] [*Tennich et al, 2017*]

Pour garder le pH de la solution de sulfate compris entre 6 et 8 , nous avons adopté la méthode de [*Mehta.P.K,1975*] qui recommande la correction de la solution déjà utilisée par l'ajout d'une quantité (0.1% H_2SO_4) d'acide sulfurique quotidiennement au cours des premières semaines de l'essai , ensuite elle devient hebdomadaire. Les solutions seront renouvelées chaque mois.



Photo 4.8: Flacon de H₂SO₄ utilisé pour un vieillissement accéléré



Photo 4.9: Tubes de Na₂SO₄ utilisées pour un vieillissement accéléré

4.8.1 Principales techniques expérimentales

Dans le cadre d'une étude approfondie de l'effet du climat aride et sec sur la durabilité des bétons (autoplaçant et ordinaire) face aux attaques sulfatiques, nous avons adopté deux catégories d'étude : macroscopique et microscopique :

4.8.1.1 Techniques macroscopiques :

1- Etude et examen visuel :

Une comparaison a été faite visuellement entre l'état de chaque échantillon testé avant et après l'attaque sulfatique pour évaluer son degré d'endommagement.

2- Variation de la masse :

La variation de la masse se traduit soit par un gonflement (gain de masse), soit par une perte de la matière par ruine fait chuter la masse de l'échantillon.

Le mode opératoire pour suivre la variation de la masse selon la procédure de la norme [ASTM C 267] est de nettoyer les éprouvettes trois fois avec de l'eau douce pour éliminer le béton altéré, puis on les laisse à l'air libre pendant 30 minutes pour procéder ensuite à la pesée. Cette opération est effectuée après chaque semaine d'immersion et pendant 24 semaines.

La variation de la masse de chaque éprouvette est calculée à partir de l'équation suivante :

$$VM = \left[\frac{M_0 - M_i}{M_0} \right] \times 100$$

Avec M_0 : la masse de l'éprouvette avant exposition à l'attaque en (gramme);

M_i : la masse après i semaines d'attaques en (grammes).

3- Mesure de la résistance à la compression :

Cet essai est effectué sur des éprouvettes cubiques de $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ de dimensions, afin de suivre leur évolution après l'exposition dans un milieu agressif. Avant l'écrasement sous une presse de capacité maximale de 3000KN, l'éprouvette est essuyée et laissée pendant deux heures à l'air libre.

4.8.1.2 Techniques microscopiques :

1- Analyse par diffraction des rayons X (DRX)

L'analyse par la diffraction des rayons X est la méthode la plus couramment utilisée pour se renseigner sur la structure cristalline. Dans le cas d'échantillons en poudres formées de très petits cristaux orientés aléatoirement, toutes les orientations possibles sont représentées, ce qui permet de faire une moyenne statistique.

Notre étude a été effectuée au niveau du laboratoire de physique des couches minces et applications « LPCMA » de l'université de Biskra sur un diffractomètre de type AXRD benchtop POWDER Diffractometer -Proto Manufacturing de caractéristiques suivantes: longueur d'onde $\lambda_{Cu} = 1.54251 \text{ \AA}$, et de géométrie $\theta/2\theta$.

Toutes les analyses ont été réalisées sur des échantillons en poudre après broyage des morceaux représentatifs de 100g à l'aide d'un broyeur à billes et passés dans un tamis de 80microns.

Le principe de la méthode consiste à bombarder l'échantillon avec des rayons X, et à regarder l'intensité du rayon X qui est diffusée selon l'orientation dans l'espace. Le rayonnement provoque l'émission de son spectre. Le spectre est formé de raies caractéristiques des différents éléments présents dans l'échantillon.

Le traitement des résultats a été fait par un logiciel X'Pert High Score

L'identification est réalisée en comparant le diffractogramme obtenu avec une base de données internationale (JCPDS : Joint Committee on Powder Diffraction Standards) contenant les diffractogrammes de référence de plus de 80000 phases. Cette méthode permet l'identification

des différentes phases cristallines constitutives de l'échantillon et aussi d'estimer les proportions relatives de ces différentes phases.



Photo 4.10: Diffractomètre à poudre pour l'analyse par diffraction aux rayons X (Université de Biskra)

2- Analyse par spectroscopie infrarouge (FTIR)

La technique de l'analyse par la spectroscopie infrarouge (FTIR) (*Fourier-Transform-Infrared-spectroscopy*) est une technique basée sur l'interaction entre un rayonnement IR et un échantillon pouvant être solide, liquide ou gazeux. Elle mesure les fréquences auxquelles l'échantillon absorbe le rayonnement, ainsi que l'intensité de ces absorptions. Les fréquences sont utiles pour l'identification de la composition chimique de l'échantillon car les groupes fonctionnels chimiques sont responsables de l'absorption du rayonnement à différentes fréquences. La concentration d'un composant peut être déterminée en fonction de l'intensité d'absorption.

Dans cette partie de notre étude a été réalisée au niveau du laboratoire de recherche en chimie de l'université de Khenchela. Nous avons utilisé la spectroscopie FTIR pour identifier les divers composés qui se forment lors de l'exposition des différents bétons dans les différents milieux. De plus et une fois ayant réalisé cette identification, nous avons évalué les quantités relatives de chacun des composés retrouvés dans cet amalgame, en exploitant la région du spectre FTIR entre 900 et 1600 cm^{-1} nous a donc permis de faire cette estimation.



Photo 4.11: Spectrophotomètre SHIMADZUIR Affinity-1 (Université de Khenchela)

3- Analyse au microscope électronique à balayage (MEB) couplée d'EDS

Cette étude a été faite au niveau du Laboratoire de Physique des couches minces et applications « LPCMA » de l'université de Biskra avec un MEB de type TESCAN VEGA3SB Easy Probe, le microscope électronique à balayage à émission thermo-ionique équipé d'un spectromètre à rayons X à dispersion d'énergie totalement intégré à la plate forme logicielle du microscope. Il est également équipé d'un détecteur à électrons secondaires (SE) et à électrons rétrodiffusés (BSE) rétractable. Le détecteur SE fournit des images haute résolution utiles pour déterminer la forme et la taille des particules, tandis que le détecteur BSE fournit un excellent contraste de matière. Le spectromètre EDS permet d'analyser en détail la composition chimique des échantillons de fractures avec une grande précision.



Photo 4.12 : Microscope électronique à balayage équipé d'un spectromètre à rayons X (Université de Biskra)



Photo 4.13 : Echantillons en poudre pour l'analyse DRX et FTIR



Photo 4.14 : Echantillons pour l'analyse au MEB

4.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé les différents matériaux utilisés dans notre étude. Il nous semble que leurs qualités sont parmi les meilleurs disponibles dans le marché algérien, et leurs caractéristiques sont suffisantes pour aboutir aux bons résultats souhaités dans notre recherche. Nous avons procédé aussi à un protocole expérimental allant de plusieurs essais préliminaires a fin de caractériser un béton autoplaçant 100% ciment (BAP1) ensuite un béton incorporant des fillers calcaires (BAP2) , ainsi que la formulation du béton ordinaire vibré à l'état frais, jusqu'aux essais mécaniques et les propriétés de la durabilité à l'état durci dans les deux modes de murissement.

Chapitre 5

Effet du climat chaud sur les propriétés à l'état frais et durci du BAP

5.1 Introduction

Le comportement du béton sous un climat aride est très complexe et, dépend de plusieurs facteurs (Température, vitesse du vent, hygrométrie, etc..). Diverses études simulées aux laboratoires ont été réalisées mais loin aux conditions réelles des chantiers.(Travaux de Berhane 1992 ; Mouret1997 ; Vin-AnLe 2014 ;) et d'autres.

À l'état frais, le maintien de la maniabilité est un facteur plus qu'important pour tous les bétons, elle est altérée essentiellement par l'augmentation de la température ambiante qui conduisait à l'augmentation de la température du béton frais, en influençant directement sur ses propriétés rhéologiques. A cet effet on va suivre l'effet du climat chaud sur les essais l'état frais tels que : l'essai d'étalement, de la boîte en L et la stabilité au tamis selon les directives de l' [AFGC, 2008] pour les bétons autoplaçants et l'essai d'affaissement mesuré au cône d'Abrams selon les spécifications de la norme [ENV 206-1] pour le béton ordinaire.

À l'état durci, nous allons étudier l'effet du climat chaud sur les résultats des essais mécaniques instantanés car les problèmes particuliers liés par le bétonnage par temps chaud sans doute, font les sujets de différentes études à travers le monde entier en montrant l'effet néfaste de la température élevée sur le comportement mécanique, et même la durabilité des bétons [Amoudi et al, 1995] [Neville, 2000] [Almusalam,2001]. Certaines études ont montré que pour chaque unité de 1°C au-dessus de 25°C la résistance spécifiée diminue de 0,5 MPa [Béton Provincial Québec].

5.2 Effet du climat chaud sur les essais à l'état frais

5.2.1 Effet de la température sur l'étalement

La figure 5.1 montre que le BAP1 (100% ciment et sans substitution) à une température ambiante supérieure à 35°C et une humidité relative oscille entre 11 et 28%, garde son autoplaçance jusqu'à 25 minutes après la fin du malaxage, un seuil dès lequel le béton perd ses caractères. À cet effet nous avons remarqué que l'étalement diminue de 76cm après 5minutes à 65cm après 25minutes de la fin du malaxage, et 48 cm et 37 cm après 45 et 65 minutes respectivement où il a perdu son écoulement définitivement.

C'est résultats se concordent avec ceux trouvés par [Abduljabar, 2008] qui a constaté que jusqu'à 30 minutes après malaxage, les propriétés d'écoulement ne sont pas fortement altérées

avec l'élévation de la température initiale notamment pour le mélange à rapport G/S voisin de 1. Par contre avec un rapport G/S plus faible provoque l'altération de l'autoplaçance avec l'élévation de la température du mélange ajoute [Abduljabar, 2008].

C'est le même résultat trouvé par [Vinh. A , 2014] en formulant un BAP avec un ciment incorporant du laitier et moindre quantité de clinker CEMIII, ce béton qui reste autoplaçant même d'aller de la température de 20° à 50°C, mais il n'a pas expliqué le temps de maintenir son étalement.

L'effet des fillers calcaires sur la rhéologie des BAP est remarquable et des fois contradictoire. Différents auteurs ont établi que les fines calcaires augmentent la stabilité et l'ouvrabilité des BAP frais [Elhilali, 2009] car l'incorporation participe à son comportement pour obtenir plus facilement l'autoplaçance.

L'essai de l'étalement d'après la figure 5.1 enregistre une légère augmentation pour le BAP2 contenant des fillers calcaires comparable ment au BAP1 100%C, 78cm pour le BAP2 contre 76cm pour le BAP1 juste 5 minutes après le malaxage ; mais après 25 minutes nous avons enregistré le même étalement de 65cm, alors qu'après 45 minutes nous avons remarqué une perte de fluidité remarquable du BAP2 devant le BAP1 sans substitution. Résultat qui se concorde avec les travaux d' [Elhilali, 2009] qui voit que la cinétique de diminution de l'étalement est plus prononcée pour le BAP formulé avec des fillers ayant une surface de Blaine faible, et le béton perd son caractère autoplaçance après un temps de maintien inférieur à 30mn. Ce résultat peut être expliqué par le temps d'écoulement T_{50} de différents bétons (BAP1 et BAP2) dans le tableau 5.1 où nous avons enregistré pour le BAP1 un temps de 2.5 seconde juste 5 minutes après malaxage contre 2 secondes seulement pour le BAP2 contenant des fillers calcaires, mais après 25 minutes tout à fait c'est le contraire et le temps d'écoulement pour le BAP2 devient plus lent de 5secondes contre 4 secondes pour le BAP1 sans substitutions. Cette diminution de l'étalement et la perte de la fluidité du béton incorporé des fillers calcaires revient à la surface de Blaine faible de ce type de filler utilisé comme indique [Elhilali, 2009] auparavant.

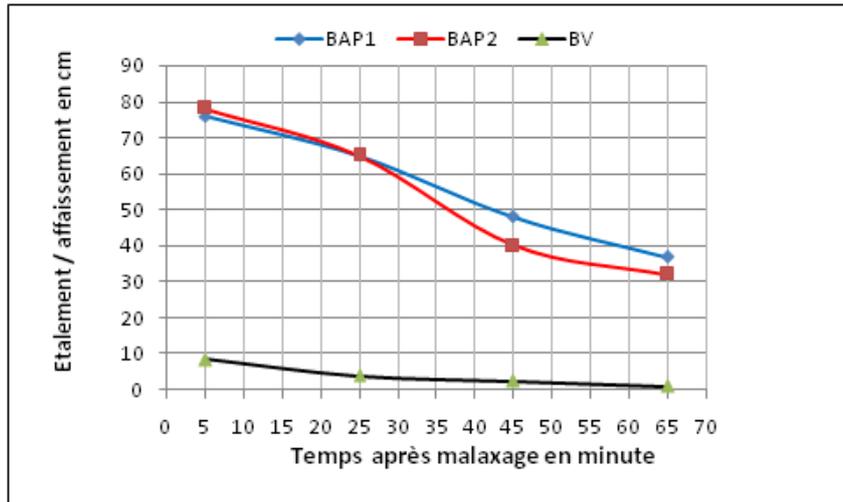


Figure 5.1 : Effet de la température sur l'étalement / affaissement des BAP et BV.

Pour le béton vibré, d'après la figure 5.1 toujours on constate que la température ambiante élevée provoque une perte excessive de l'affaissement de 8.5 cm après 5 minutes du malaxage à 4 puis 2.5 à 25 et 45 mn après le malaxage, en fin il arrive à 1 cm à 65mn après la fin du malaxage. , Cette perte bien sûr due à une accélération rapide de l'hydratation et l'évaporation de l'eau, résultat confirmé par les études de [Dodson et al, 1979] et [Hampton, 1981] qui ont constaté que l'élévation de la température ambiante de 22°C à 32°C contribue à élever celle du béton et entraîne une perte d'affaissement quel que soit la gamme de la consistance étudiée.

Tableau 5.1 : Temps d'écoulement T_{50} en secondes de différents bétons

Type de béton	5 mn après malaxage	25 mn après malaxage	45 mn après malaxage	65 mn après malaxage
BAP1	2.5s	4s	N'est pas atteint	N'est pas atteint
BAP2	2 s	5s	N'est pas atteint	N'est pas atteint

5.2.2 Effet de la température sur l'écoulement à la boîte en L.

Jusqu'à 25minutes après le malaxage, la température élevée n'altère pas la capacité de remplissage à la boîte en L des deux bétons BAP1 et BAP2 comme explique-la figure 5.2, où nous avons constaté que toutes les valeurs H2/H1 sont supérieures à 0.8 et la température élevée n'altère pas fortement les propriétés d'autoplaçance des bétons confectionnés avec un rapport G/S voisin de 1 . Résultats confirmés par [Abduljabar, 2008] et [Vinh, 2014], ce dernier qui a constaté que le climat chaud allant de 20° à 50°C n'altère pas les propriétés d'écoulement d'un BAP fabriqué avec un ciment incorporant du laitier et moindre quantité de clinker.

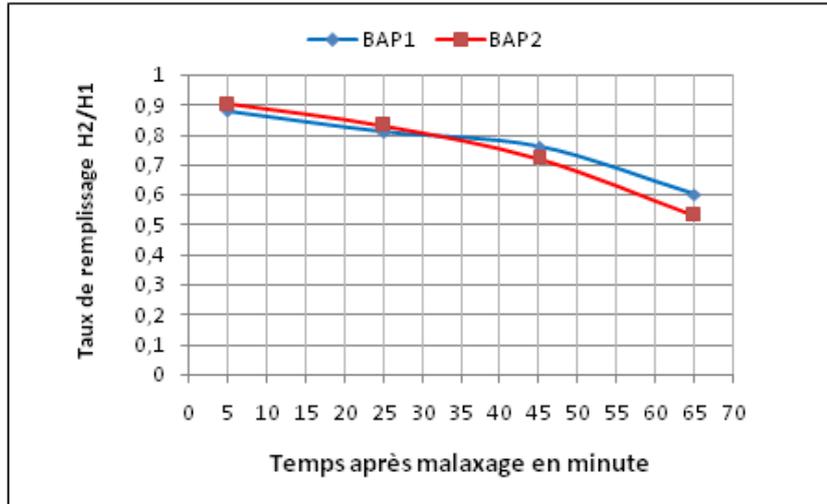


Figure 5.2 : Effet de la température sur le taux de remplissage à la boîte en L.

5.2.3 Effet de la température sur la stabilité au tamis

Le pourcentage de laitance π passant au tamis de 5mm, pour chaque échantillon de différents bétons BAP1 et BAP2 pour les différentes échéances de 5.25.45 et 65mn après malaxage est représenté dans la figure 5.3, où nous constatons qu'aucun effet néfaste de la température élevée dépassant les 35°C sur la stabilité des bétons autoplaçants jusqu'à 45 mn après le malaxage et nos bétons BAP1 et BAP2 conservent leur autoplaçance et leurs propriétés d'écoulement. L'effet bénéfique des fillers calcaires (taux de 24,75% de substitution) est bien remarqué en marquant une stabilité accrue pour le BAP2.

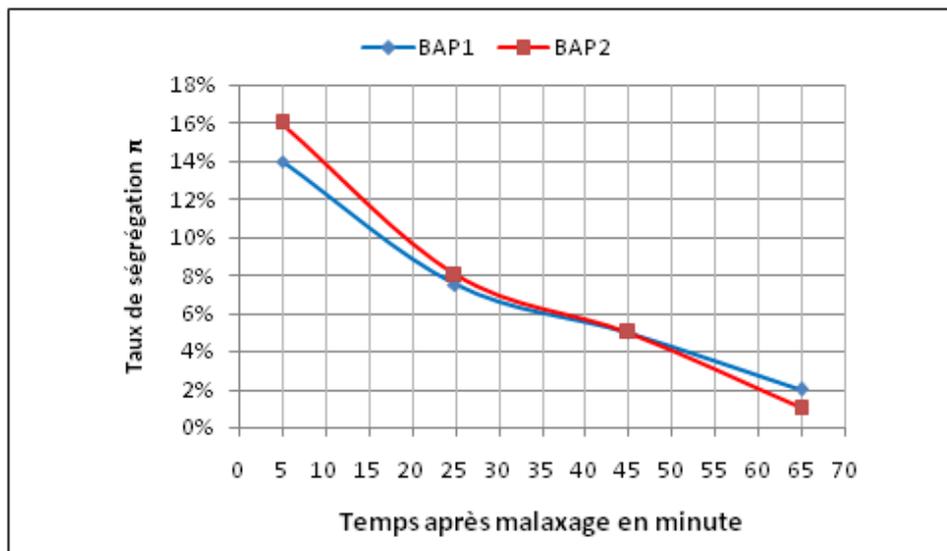


Figure 5.3 : Effet de la température sur la stabilité au tamis.

5.3 Effet du climat chaud sur les essais à l'état durci

5.3.1 Etude de la résistance à la compression

5.3.1.1 Bétons autoplaçants et béton vibré sous le mode 1(à l'air libre)

Aux premiers jours, comme il est illustré sur la figure 5.4, tous les bétons ont développé des résistances à la compression très élevées tel que le BAP1 à sept jours sa résistance atteint 86.79% de sa résistance à 28j, le BAP2 contenant des fillers calcaires a développé 81.08% de sa résistance alors que le béton vibré a enregistré 82.5% de sa résistance à 28jours.

Ces résultats expliquent l'effet de la température élevée aux premiers jours sur la réaction de l'hydratation qui conduit à une évolution rapide de la résistance à la compression. Donc plus la température est élevée plus le développement de la résistance aux jeunes âges est rapide, résultats a été confirmé par plusieurs chercheurs.

A long terme la température joue un rôle néfaste sur le comportement mécanique des bétons, à 120jours nous avons enregistré une chute de 9.43% par rapport à la résistance à 28jours du BAP1contenant 100%ciment, 5.40% pour le BAP2 incorporant des fillers calcaires et 7.5%pour le béton vibré. Ceci est dû à un développement microstructural plus grossier, les hydrates (notamment les C-S-H) étant plus denses à haute température et distribués de manière plus hétérogène, permettent ainsi le développement d'un réseau poreux plus large, à l'origine de la perte de résistance [*Galluci et al, 2006*].

Au même âge, pour tous les bétons on remarque la favorisation du BAP1 100% de ciment, qui a marqué des bonnes valeurs de résistance comparable ment aux BAP2 incorporant des fillers calcaires et le béton vibré. Ceci est dû à l'effet de la composition qui joue un rôle primordiale dans le développement des résistances mécaniques. Le BAP2 a enregistré des résistances médiocres et plus inférieures aux celles du BAP1 100%ciment, et plus proche à celle du béton vibré dans tous les âges, peut-être c'est la finesse (moins du celle du ciment) et la quantité substituée (24.73%) des fillers utilisées qui sont à la cause de ces résultats de résistances, résultats ne sont pas loin et se concordent aux plusieurs recherches.

[*Bellifa et al, 2015*] voient que la substitution d'une partie du ciment portland par les fillers calcaires est l'origine d'une diminution croissante des résistances à la compression. Alors que [*Beeralingeowda et al, 2013*] ont constaté que les essais de la résistance à la compression sur des éprouvettes cubiques montrent une augmentation jusqu'à un remplacement de 20% au-delà duquel la résistance commence à diminuer.

[Nécira, 2018] a trouvé que la résistance à la compression des BAP de haute performance commence à diminuer à partir de 20% de substitution du ciment.

[Bahri, 2012] a trouvé que pour les bétons superplastifiés (BAP), une quantité de 60 à 80 kg/m³ permet d'augmenter la compacité et améliorer sensiblement les performances mécaniques des bétons. Pour [Bessa, 2004] la quantité de 30% de substitution des additions minérales dans les mortiers est optimale, au-delà duquel la résistance à la compression commence à chuter.

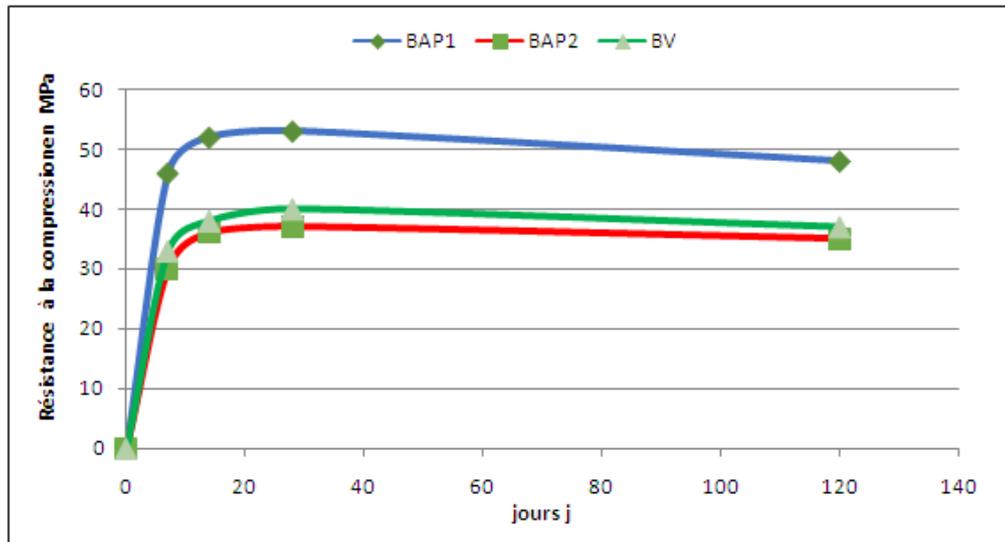


Figure 5.4 : Variation de la résistance à la compression de différents bétons à l'air libre

5.3.1.2 Bétons autoplaçants et béton vibré sous le mode 2 (murrissement dans l'eau)

Dans ce mode on constate que tous les bétons ont développé de bonnes résistances à la compression et la réaction d'hydratation aura tout son temps pour se compléter même après 28 jours et à long terme contrairement à la résistance à la compression dans l'air libre.

D'après la figure 5.5 nous avons marqué que la résistance à la compression de différents bétons se continuent son augmentation même après 28 jours et peut atteindre des valeurs très élevées à l'âge de 120 jours, et les rapports des résistances R_{c120}/R_{c28} à la à l'âge 120j sont de 109.61% pour le BAP1, de 104.8% pour le BAP2 et de 113.33% pour le béton ordinaire. Ces résultats expriment l'effet positif du milieu du murrissement dans l'eau seulement pour permettre à la réaction d'hydratation de différents bétons de se continuer et développer de bonnes résistances de compression avec le temps. Tandis qu'à l'air libre et sous une température élevée la résistance augmente considérablement dans les premiers jours et peut

atteindre des valeurs plus élevées à celle obtenue avec l'immersion, mais après 28 jours elle commence à se chuter car les effets de la température se controversent et conduisent à un départ excessif d'eau, ce qui provoque l'arrêt complètement de la réaction d'hydratation et la résistance à la compression devient plus faible [Azzouz *et al*, 2004].

L'effet des fillers calcaires pour la résistance à la compression du BAP2 est médiocre aussi, une substitution de 24.73% de ciment de notre cas, plus la finesse qui est moins de celle du ciment, peuvent en être la cause de ces résultats qui sont les moins développés. Mais il est intéressant de remarquer que même avec ce taux de substitution de fillers calcaires (24.73%), la résistance à la compression demeure dans des limites raisonnables préconisée par les différents cahiers de charges de construction pour les bétons de bâtiment.

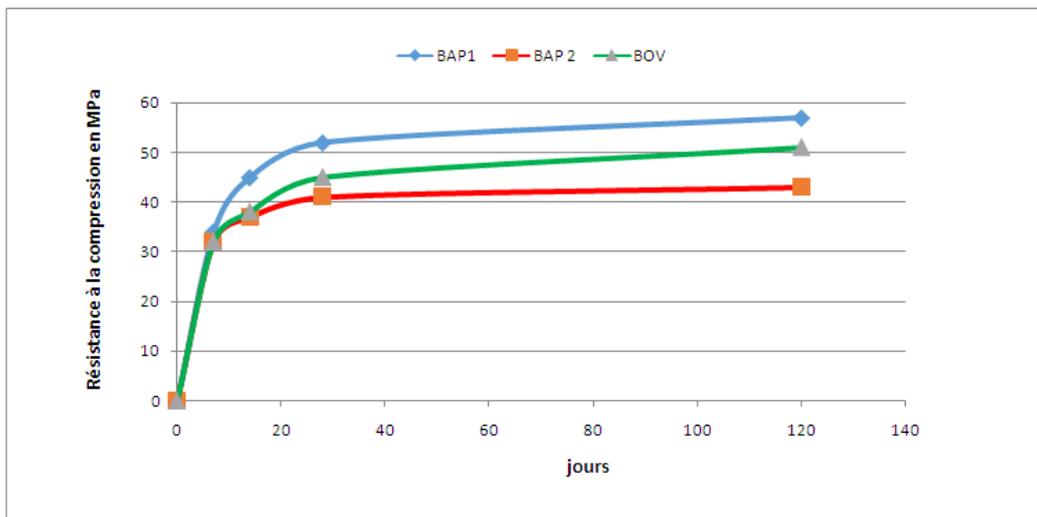


Figure 5.5 : Variation de la résistance à la compression de différents bétons dans l'eau

5.3.2 Etude de la résistance à la traction

Il est évident que les facteurs et les paramètres influant sur l'évolution de la résistance à la compression influent également sur l'évolution de la résistance à la traction d'un béton.

Les résultats expérimentaux de [Kim, *et al*, 2002] montrent que les bétons soumis à des températures élevées atteignent des résistances à la compression et à la traction plus élevées aux jeunes âges, mais plus faibles aux âges avancés que les bétons soumis à une température normale.

La particularité des BAP notamment la quantité de fines ou bien le volume de sable peuvent entraîner des variations sur la résistance à la traction [Hanna, 2009]. A cet effet [Boukni,

2012] voit une augmentation de la résistance en traction des BAP sous une température de 40°C, puis une diminution à 60°C par rapports aux éprouvettes testées à 20°C.

[Gibbs *et al*, 1999] ont constaté qu'il n'y a aucune différence entre la résistance à la traction des BAP et celle des bétons de référence (béton ordinaire). Par contre [Sonebi *et al*, 1999] observent que la résistance à la traction à 28 jours pour les BAP (conservés dans l'eau) est supérieure à celle du béton de référence conservé dans les mêmes conditions.

Les figures 5.6 et 5.7 représentent respectivement la variation et l'effet du climat aride sur les valeurs de la résistance à la traction par fendage à 7,14,28 et 120 jours des BAP1, BAP2, et béton vibré confectionnés au climat chaud et conservés dans les deux modes de durcissement définis auparavant (dans l'air libre et dans l'eau).

La première remarque à constater c'est que les courbes de la résistance à la traction de tous les bétons testés sur des cylindres de 16x32cm² à chaque échéance, ont les mêmes tendances des courbes de la résistance à la compression et dans les deux modes de durcissement.

Dans le mode 1 et après 28 jours, les courbes du BAP1 et BO presque se collent où nous avons marqué une chute de la résistance à la traction du BAP1 de 1.85% à 120jours et de 0.769% pour le béton ordinaire comparable ment aux résistances à 28jours. Tandis que le BAP2 contenant des fillers calcaires a connu la plus grande chute de sa résistance en traction à 120jours avec un taux de 3.703%. Donc l'effet du climat chaud est néfaste et la température élevée provoque l'arrêt totalement de la réaction de l'hydratation qui cause la chute de la résistance à la traction, conséquence qui ne se diffère pas à celle de la résistance à la compression. Résultat qui est en accord avec les travaux de [Kim, *et al*, 2002] et [Boukni, 2012].

Dans le mode 2 où les bétons ont subi un mode de cure de murissement sous l'eau, nous avons constaté que l'évolution de la résistance à la traction après 28 jours est presque stationnaire pour tous les bétons, et quelque légère augmentation a été enregistrée à 120jours, de 1.03% pour le BAP1, 1.52% pour le BAP2 et de 0.74% pour le béton ordinaire. Ces résultats donnent le privilège au BAP1 sans substitutions contre le BAP2 contenant des fillers calcaires et le béton ordinaire. Ces résultats expliquent comme le cas de la résistance à la compression que la substitution d'une portion du ciment par les fillers calcaires est la cause de la diminution de la résistance [Bellifa *et al*, 2015], notamment lorsque la substitution est de l'ordre de 20% et au plus [Nécira, 2018] [Beeralingeowda *et al*, 2013] ou de 30% [Bessa, 2004].

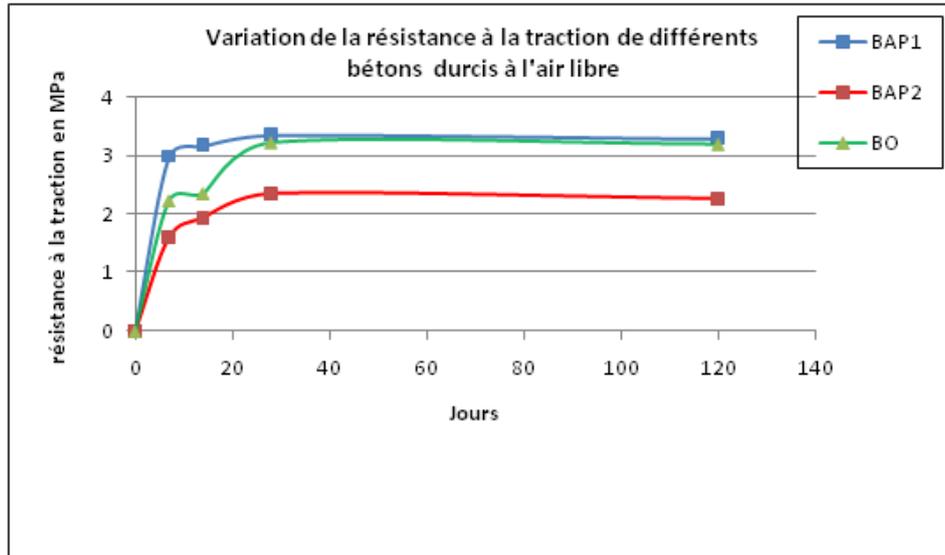


Figure 5.6 : Variation de la résistance à la traction de différents bétons à l'air libre

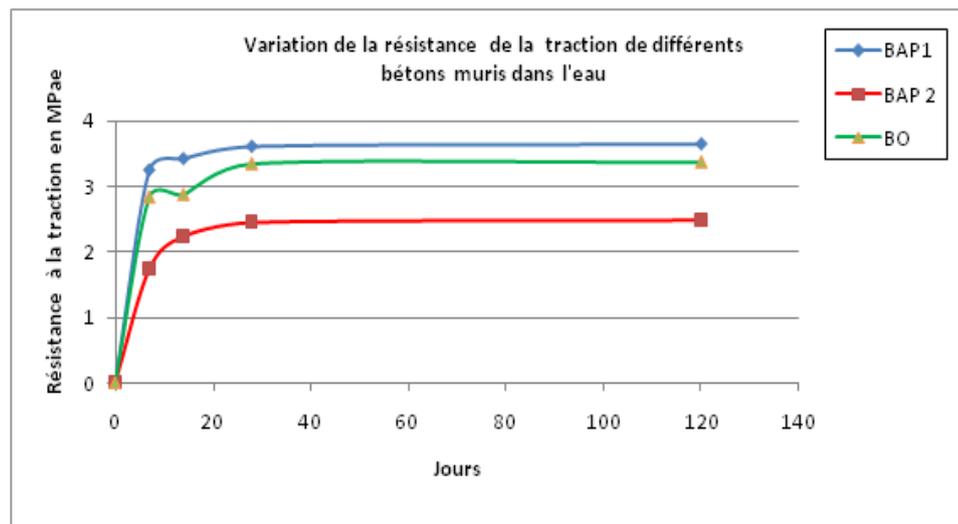


Figure 5.7 : Variation de la résistance à la traction de différents bétons dans l'eau

5.3.3 Résultats d'essai d'auscultation sonore

5.3.3.1 Vitesse d'impulsion ultrasonique (UPV) de différents bétons selon le mode de durcissement

La vitesse d'impulsion des ultrasons est un test non destructif pour vérifier le contrôle qualité de la structure et des éléments en béton. Le béton avec une vitesse plus élevée est considéré comme contenant moins de défauts et d'imperfections dans la microstructure du béton. Les résultats de la vitesse d'impulsion ultrasonore de tous les mélanges de béton utilisés à différents âges de durcissement et quel que soit le mode de durcissement (climat chaud ou eau) sont indiqués sur la figure 5.8. Le béton témoin a montré une vitesse de l'ordre

de 3980 à 4680 m/s à l'âge de durcissement de 7 à 120 jours pour les éprouvettes stockées dans l'eau et de l'ordre de 4430 à 4370 m/s pour les éprouvettes exposées au climat chaud. La vitesse ultrasonore pour le mélange BAP2 incorporant un filler calcaire est de l'ordre de 3830 à 4225m/s et de 3760 à 3730m/s pour les mélanges conservés dans l'eau et en climat chaud respectivement. Par ailleurs, l'UPV des bétons ordinaires est de l'ordre de 4310 à 4530m/s et de l'ordre de 4070 à 3820m/s pour les bétons stockés dans l'eau et exposés au climat chaud respectivement. On constate que les vitesses de tous les bétons conservés dans l'eau augmentaient avec la période de durcissement ascendante au fur et à mesure que le mécanisme d'hydratation progressait ; en revanche, les taux des vitesses des bétons exposés au climat chaud ont augmenté jusqu'à 28 jours au-delà duquel des valeurs de l'UPV commencent à se diminuer ; cette diminution est plus prononcée pour les bétons ordinaires par rapport aux bétons autoplaçants.

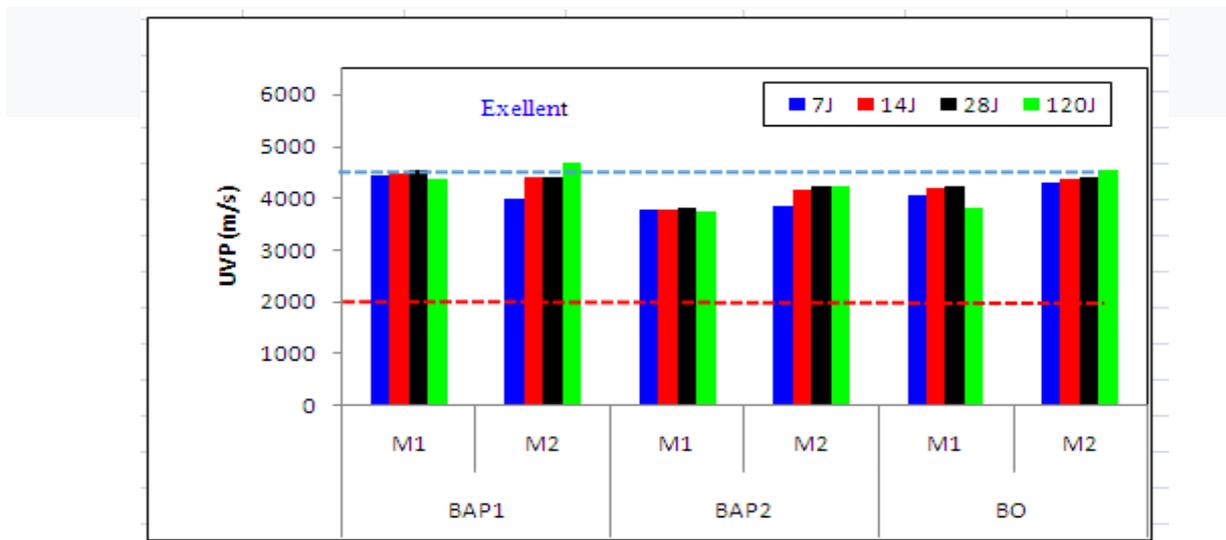


Figure 5.8 : Vitesse d'impulsion ultrasonique de différents bétons

5.3.3.2 Corrélation UPV- Résistance à la compression

Dans les matériaux cimentaires à base de ciment, l'UPV dépend principalement de son module élastique, et puisque celle-ci est étroitement liée à la résistance mécanique, il est naturel de croire que l'UPV peut également être corrélée à la résistance de la compression R_c [Panzera et al, 2001].

Plusieurs chercheurs ont travaillé sur la relation liant l'UPV et la résistance à la compression, [Demirboga et al, 2004] ont trouvé une relation exponentielle entre R_c et UPV pour le béton à base d'additions minérales. [Salhi et al, 2017] ont trouvé une bonne corrélation entre la

résistance à la compression mesurée et la valeur obtenue par la relation entre la résistance et la vitesse d'impulsion ultrasonique pour différents bétons avec trois rapports E/L (0.32; 0.38, et 0.44) et le coefficient de corrélation R^2 est égal à 0.938. [Drebla, 2015] pour des BAP traités thermiquement a trouvé un coefficient de corrélation R^2 proche de 8. D'après la figure 5.9 notre coefficient de corrélation R^2 égal à 0.6367, valeur proche à 1, ce qui explique qu'il ya une corrélation entre la vitesse d'impulsion ultrasonique et la résistance à la compression.

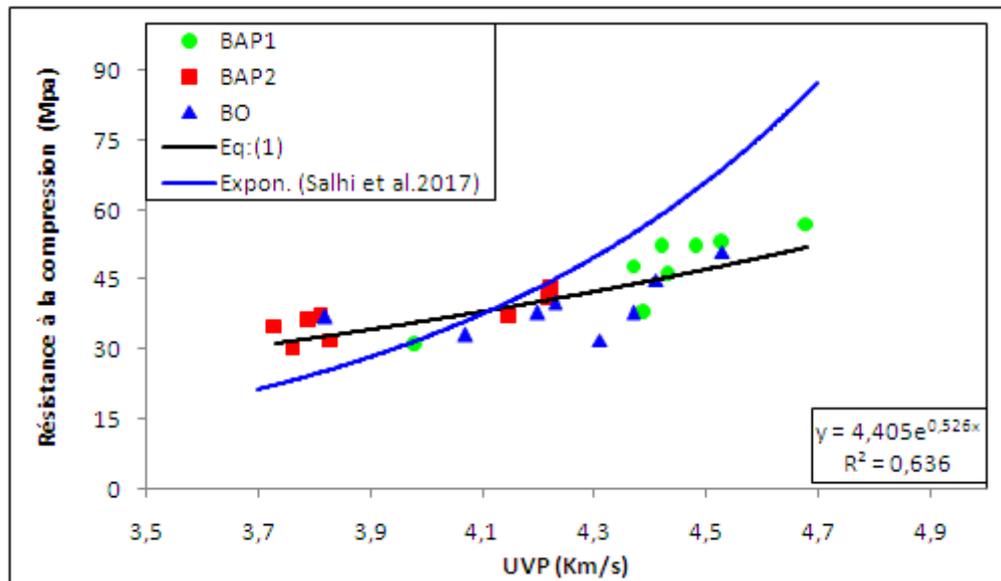


Figure 5.9 : Corrélation résistance à la compression – UPV de différents bétons

5.3.4 Calcul du module élastique à partir de la vitesse ultrasonique UPV

L'affirmation évidente est qu'il n'existe pas une règle générale pour distinguer le module élastique des BAP de celui des bétons vibrés, à résistance mécanique équivalente : les deux types de bétons ne semblent pas présenter de différence significative au sujet de cette propriété mécanique instantanée [Assié, 2004]. Et puisque la pâte de ciment est en proportion plus importante dans un BAP et qu'elle présente un module généralement plus faible que les granulats, alors certaines études confirment que le module élastique du BAP est environ 10% inférieur à celui d'un béton vibré de résistance identique et produit avec des granulats de même nature [Holcim, 2018]. Tandis que [Pons, et al, 2003] ont aussi trouvé que les modules d'élasticité des BAP sont très proches à ceux des bétons vibrés sur des tests dans une salle à 20°C et 55% HR.

Dans un climat chaud, et sur l'effet de ce climat sur le module sécant du BAP [Vinh, 2014] a trouvé que les valeurs des modules élastiques des BAP oscillent sans grande variation autour de 30 GPa, et sans aucune différence significative pour des éprouvettes testés en fonction des

paramètres de la température initiale et les moyens de maintenir l'autoplaçance d'une part, et le mode de conservation (20°C et 35°C) et à l'échéance de 28 jours.

Les valeurs des modules élastiques E_c calculé à partir de la vitesse de propagation du son, de différents bétons durcis dans deux modes sont représentées dans le tableau 5.1 suivant :

Tableau 5.2 : Valeurs des modules élastiques calculés de différents bétons

Age	Module élastique E_c en GPa					
	BAP1		BAP2		BO	
	M1	M2	M1	M2	M1	M2
7J	23,8	19,2	17,2	17,8	20,1	22,6
14J	26,1	25,1	18,7	22,4	23,0	24,9
28J	28,6	27,3	20,3	24,9	25,0	27,1
120J	30,8	35,4	22,5	28,8	23,6	33,1

L'analyse des résultats trouvés et transformés dans la figure 5.10 montre que tous les bétons muris dans le mode M2 (murissement dans eau) ont enregistré des modules élastiques à 28j plus élevés à ceux des bétons durcis à l'air libre et sans différence significative entre le béton ordinaire et le BAP1 sans substitution. À l'âge 120j, tous les bétons continuent la croissance de leurs modules élastiques même les bétons durcis à l'air libre, sauf le béton ordinaire à l'air libre a marqué une diminution de son module élastique. Ces résultats qui ne se différencient pas à ce que nous avons cité dans la littérature, mais il reste à confirmer à l'aide de l'essai du module élastique pratiquement dans les sections suivantes.

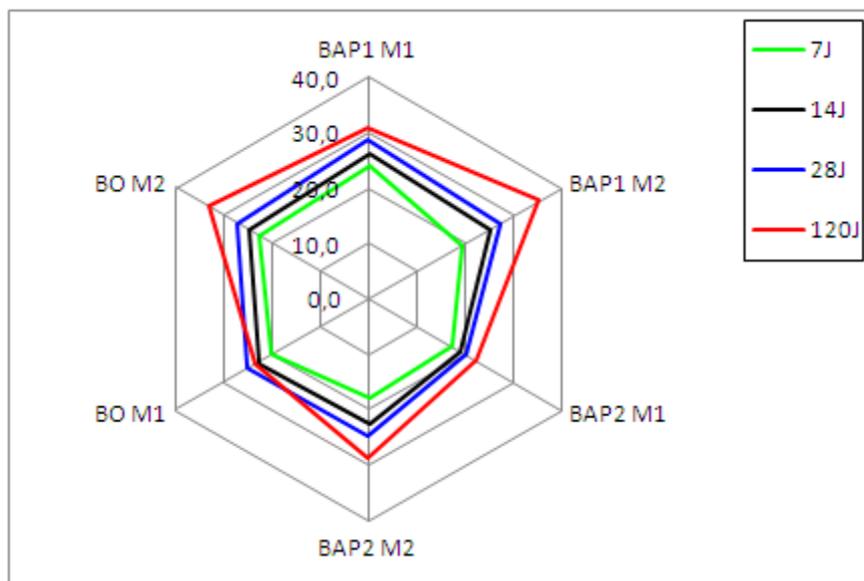


Figure 5.10 : Module élastique calculé théoriquement de différents bétons

5.4 Etude de la déformabilité

Le principe de l'essai est décrit au chapitre 4 ; Nous analysons les résultats de manière très synthétique en prenant compte les paramètres déjà étudiés en ce qui concerne les résistances à la compression tels que les modes de conservation de différents bétons et l'effet du climat sec et aride sur :

- Les déformations élasto-instantanées longitudinales des bétons en fonction des contraintes relatives à 120jours ;
- Les déformations élasto-instantanées totales longitudinales des bétons en fonction des contraintes relatives à 120jours ;
- Les déformations élasto-instantanées transversales des bétons en fonction des contraintes relatives à 120jours ;
- Les déformations élasto-instantanées totales transversales des bétons en fonction des contraintes relatives à 120jours ;
- La variation du module de déformabilité E des bétons en fonction des contraintes relatives à 120jours ;
- Le module d'élasticité E à 120jours des bétons.

5.4.1 Effet du climat chaud sur les déformations élasto-instantanées et élasto-instantanées totales longitudinales

Les résultats de l'effet du climat chaud sur les déformations élasto-instantanées et élasto-instantanées totales longitudinales en fonction des contraintes relatives η sont illustrés dans les figures 5.11 et 5.12 respectivement. Ces résultats indiquent que l'évolution de la déformation élasto-instantanée longitudinale à l'instant (t) et relative totale à l'instant (t+ Δt) de tous les bétons prend un comportement élastique linéaire en fonction de la contrainte relative η dans l'intervalle η entre [0.1- 0.6] de la contrainte maximale. Un comportement qui caractérise par :

- La réversibilité, si arrivé à un point on diminue la contrainte, on redescend suivant la même courbe.
- La linéarité où la contrainte est proportionnelle à la déformation, c'est la déformation réversible.

Dans l'intervalle [0.6 - 0.9] le comportement de déformations devient non linéaire ce qui explique le comportement plastique, essentiellement l'effet irréversible de déformation des bétons.

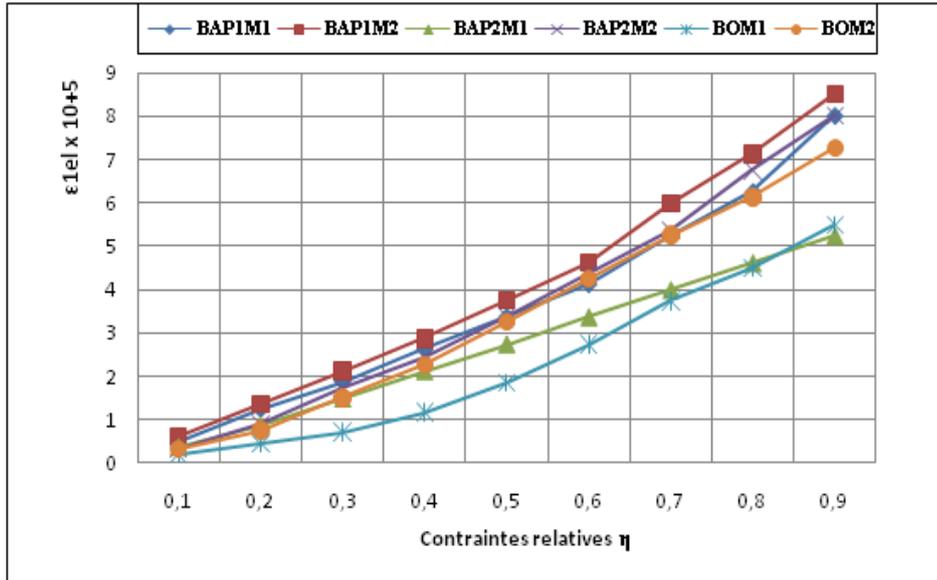


Figure 5.11 : Déformations élasto-instantanées longitudinales du béton ϵ_{1el} en fonction des contraintes relatives η à 120j pour les différentes séries de prismes

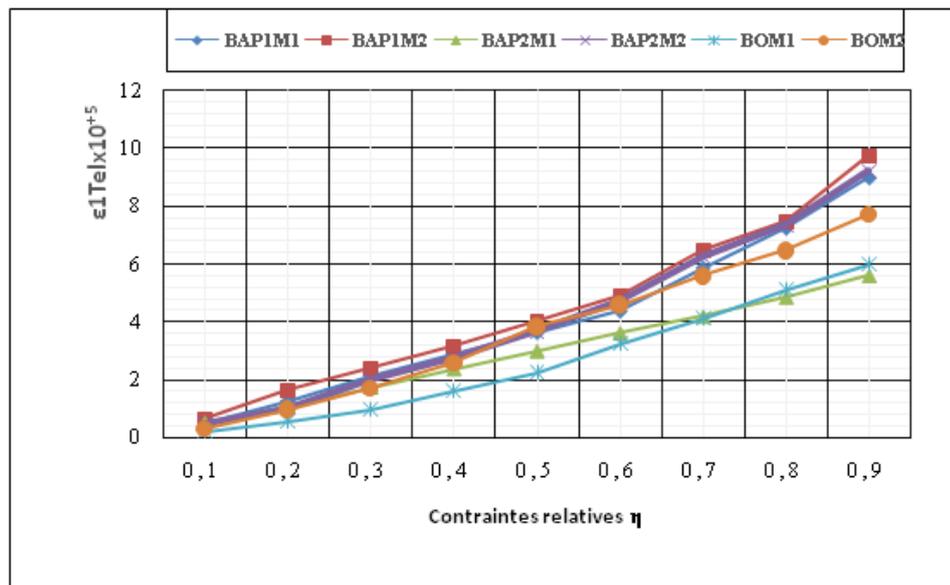


Figure 5.12 : Déformations élasto-instantanées totales longitudinales du béton ϵ_{1Te} en fonction des contraintes relatives η à 120j pour les différentes séries de prismes.

5.4.2 Effet du climat chaud sur les déformations élasto-instantanées et élasto-instantanées totales transversales

Contrairement aux résultats précédents, tous les bétons ont présenté des allures différentes à celles des déformations élasto-instantanées et élasto-instantanées totales longitudinales. D'où Les bétons autoplaçants sans substitutions BAP1M1 et BAP1M2 d'après les figures

5.13 et 5.14 présentent des déformations élasto-instantanées transversales et déformations élasto-instantanées totales transversales plus basses, alors les bétons incorporant des fillers calcaires BAP2 ont marqué les déformations les plus élevées. En revanche le béton ordinaire a enregistré des résultats médiocres entre les deux types de béton autoplaçant. Donc la nature du béton exerce une influence significatif sur l'évolution des déformations élasto-instantanées pour une sollicitation de court terme.

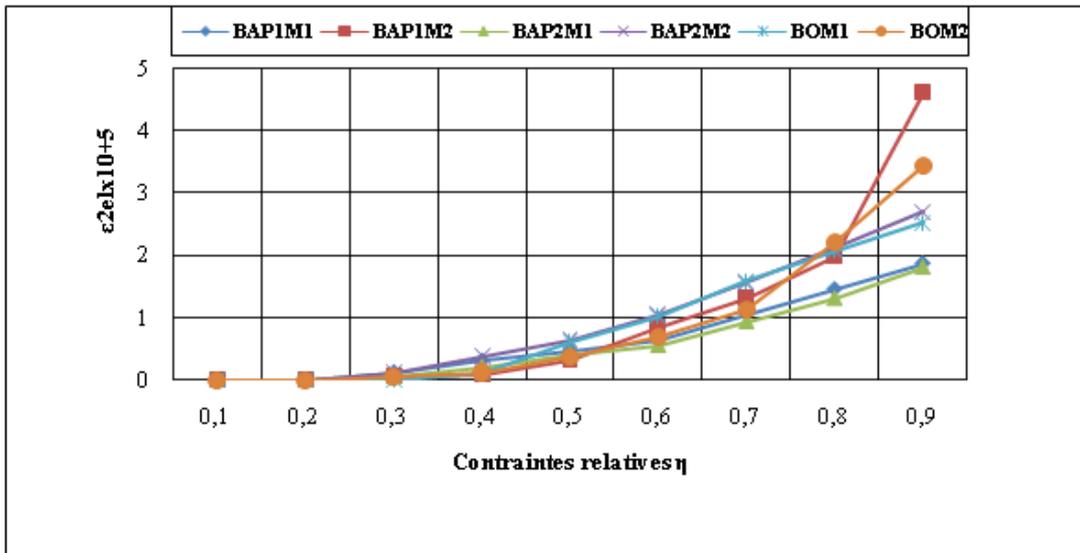


Figure 5.13 : Déformations élasto-instantanées transversales du béton ϵ_{2el} en fonction des contraintes relatives η à 120j pour les différentes séries de prismes

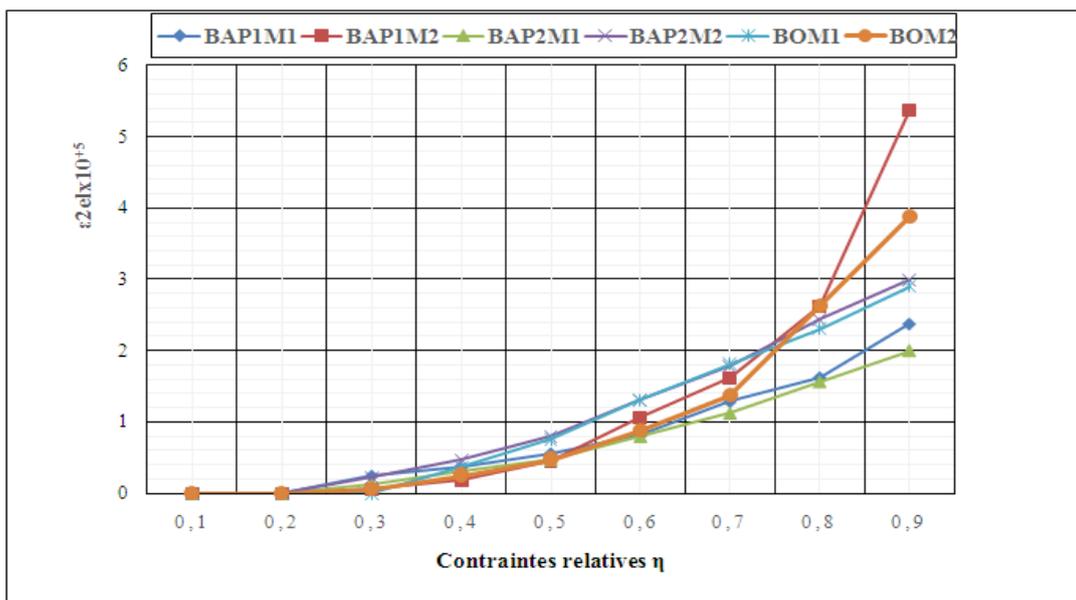


Figure 5.14 : Déformations élasto-instantanées totales transversales du béton ϵ_{2el} en fonction des contraintes relatives η à 120j pour les différentes séries de prismes

5.4.3 Effet du climat chaud sur le module de déformabilité

A travers cette étude on détermine les valeurs du module de déformabilité de différents bétons pour des contraintes relatives différentes.

Les dépendances de ces modules vis-à-vis de aux contraintes relatives sont représentées par la figure 5.15 suivante :

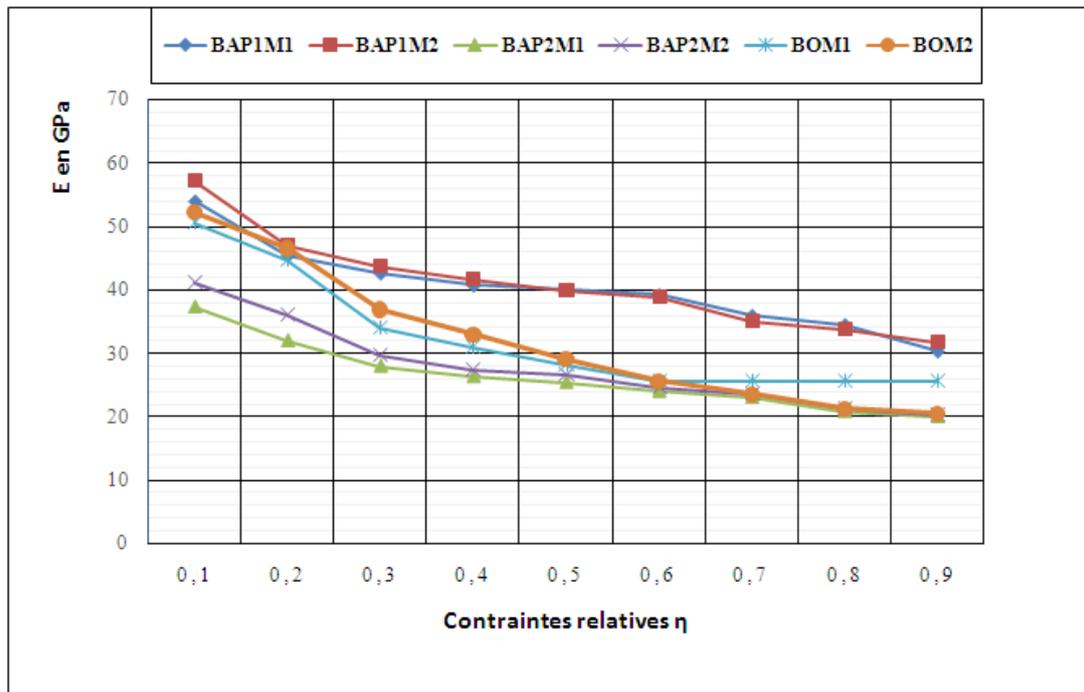


Figure 5.15 : Module de déformabilité E du béton en fonction des contraintes relatives η à 120j pour les différentes séries de prismes

La première remarque à considérer c'est que le module de déformation de tous les bétons se diminue avec l'augmentation de la contrainte relative. Cette diminution est plus remarquable dans l'intervalle [0.1- 0.3], ensuite elle devient presque stationnaire dans l'intervalle [0.3- 0.6] et en fin elle se chute dans l'intervalle [0.6-0.9].

Le béton autoplaçant sans substitution et dans le mode humide de murissement BAP1M2 représente un module de déformabilité plus élevé, suivi du béton mûri dans l'air libre BAP1M1, alors que les bétons autoplaçants contenant des fillers calcaires BAP2 représentent les modules de déformation les plus bas. Alors les bétons ordinaires BV ont enregistré des modules de déformation médiocre entre les deux types des bétons autoplaçants.

Ces résultats sont liés directement à la résistance à la compression de différents bétons, où nous avons trouvé que les BAP sans substitutions muris dans l'eau ont marqué les résistances les plus élevées, suivis des bétons ordinaires, ensuite les BAP incorporant des fillers calcaires en dernier place.

Concernant le mode de murissement, les bétons muris dans l'eau mode 2, nous avons enregistré des modules de déformations plus élevés par rapport aux bétons muris à l'air libre.

5.4.4 Effet du climat chaud sur le module d'élasticité

A partir des résultats précédents, on peut déterminer les modules d'élasticité de différents bétons dans les différents modes de murissement selon la formule suivante :

$$E = \frac{\sum \Delta \sigma}{\sum \Delta \varepsilon}$$

Avec : $\sum \Delta \sigma$: La somme des accroissements de la contrainte à chaque degré de 0,05 à 0,3Pc

$\sum \Delta \varepsilon$: La somme des accroissements de la déformation élasto-instantanée

longitudinale relative à chaque degré de la même gamme.

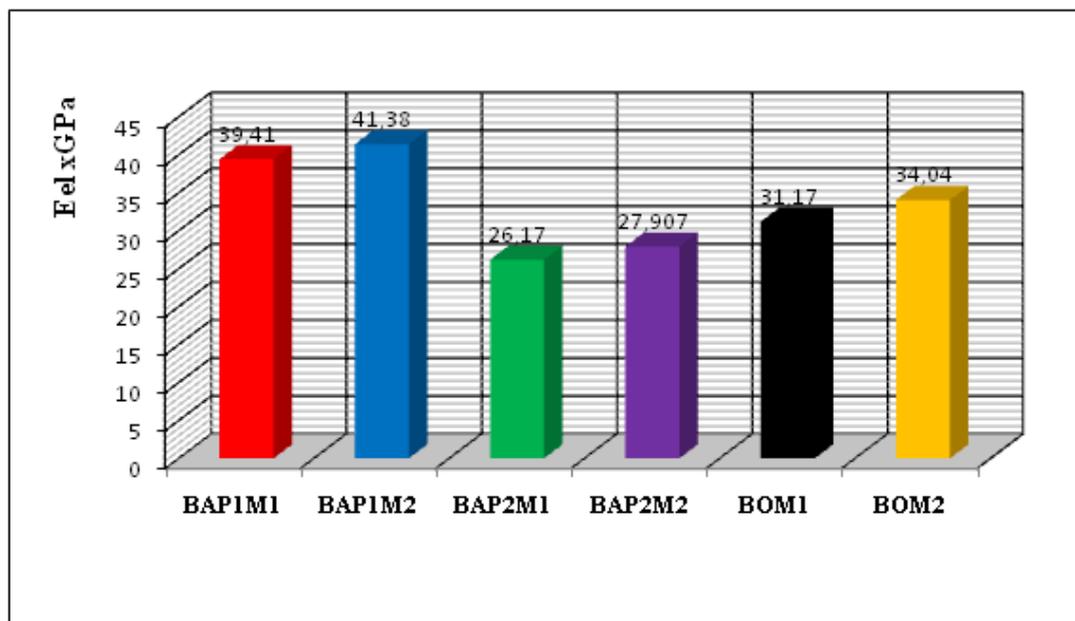


Figure 5.16 : Module d'élasticité E mesuré à 120j de différents bétons dans les différents modes

D'après les résultats illustrés dans la figure 5.16 ; les bétons autoplaçants sans substitutions (BAP1) ont exprimé des modules élastiques les plus élevés, cette élévation est peut être due à

leurs résistances les plus élevées, alors que les modules élastiques des bétons ordinaires sont plus proches à ceux des bétons autoplaçants incorporant des fillers calcaires à cause aussi à leurs résistances les plus proches. Pour le mode de murissement nous n'avons pas trouvé de grandes différences entre les modules d'élasticité d'un même béton de deux modes différents M1 et M2. De telle façon on a enregistré 39.41 et 41.38 GPa pour les BAP1M1 et BAP1M2 respectivement c'est-à-dire de 1.07 GPa de différence ; 26.17 et 27.90 GPa pour les BAP2M1 et BAP2M2 respectivement c'est-à-dire de 1.73 GPa de différence et en fin 31.17 et 34.04 GPa pour les BOM1 et BOM2 respectivement, c'est-à-dire de 3.87 GPa de différence. Ces résultats sont en accord d'une part et en désaccord d'une autre part avec plusieurs chercheurs en faisant la comparaison entre les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires, car il n'existe pas une règle générale pour distinguer le module élastique des BAP de celui des bétons vibrés, à résistance mécanique équivalente : les deux types de bétons ne semblent pas présenter de différence significative au sujet de cette propriété mécanique instantanée [Assié, 2004]. A cet effet [Pons et al, 2003] ont trouvé que les modules d'élasticité des BAP sont très proches à ceux des bétons vibrés sur des tests dans une salle à 20°C et 55% HR. C'est le cas de certains chercheurs qui ont présenté des comportements identiques entre BV et BAP pour le module élastique (35.5 et 35.6 GPa respectivement) pour des résistances similaires (45.1 et 44.5 Mpa), mais avec des volumes de pâtes distincts (270 litres pour le BV contre 370 litres pour le BAP) et un rapport G/S de 1.78 pour le BV et de 1 pour le BAP [Vieira et al, 2003]. Tandis que l'affirmation évidente est qu'étant donné que la pâte de ciment est en proportion plus importante dans un BAP et qu'elle présente un module généralement plus faible que les granulats, alors le module élastique du BAP est environ 10% inférieur à celui d'un béton vibré de résistance identique et produit avec des granulats de même nature [Holcim, 2018].

Dans un climat chaud, [Vinh, 2014] a trouvé que les valeurs des modules élastiques des BAP oscillent sans grande variation autour de 30 Gpa, et sans aucune différence significative pour des éprouvettes testés en fonction des paramètres de la température initiale et les moyens de maintenir l'autoplaçance d'une part, et le mode de conservation (20°C et 35°C) et à l'échéance de 28 jours, même, le mode de conservation durant les premières 24 heures n'induit pas de changement remarquable sur les modules d'élasticité.

5.4.5 Etude comparative entre module élastique calculé et mesuré

Plusieurs recherches ont été faites sur la comparaison entre les modules élastiques mesurés et calculés du béton. [Gadri & Guettala, 2015] sur des éprouvettes cylindriques (16x32) ont trouvé une différence importante entre les valeurs du module d'élasticité obtenus en fonction de vitesse du son par rapport aux modules déterminés théoriquement.

Après l'étude comparative entre le module élastique mesuré sur des éprouvettes prismatiques (10x10x40) cm³ et le module élastique calculé à partir de la formule exposée théoriquement dans le 4^{ème} chapitre, et d'après la figure 5.17 nous constatons que 5/6 de résultats montrent que le module élastique mesuré sur des éprouvettes est plus grand par rapport au module élastique calculé soit pour les bétons durcis à l'air libre soit pour les bétons témoins muris dans l'eau. Le seul cas où nous avons trouvé que le module élastique calculé est supérieur à celui mesuré concerne le BAP2 incorporant du filler calcaire dans le mode M2 c'est-à-dire dans le mode de murissement dans l'eau. La différence entre les deux modules peut aller de 8.61Gpa pour le BAP1 dans le mode 1 jusqu'à 0.94 Gpa pour le béton ordinaire dans le mode M2. Les grandes différences ont été enregistrées pour le BAP1 et le béton ordinaire dans le mode M1 de 8.61 et 7.57 Gpa respectivement. Le BAP2 a enregistré des différences de 3.67 et 0.896Gpa pour les modes M1 et M2 respectivement.

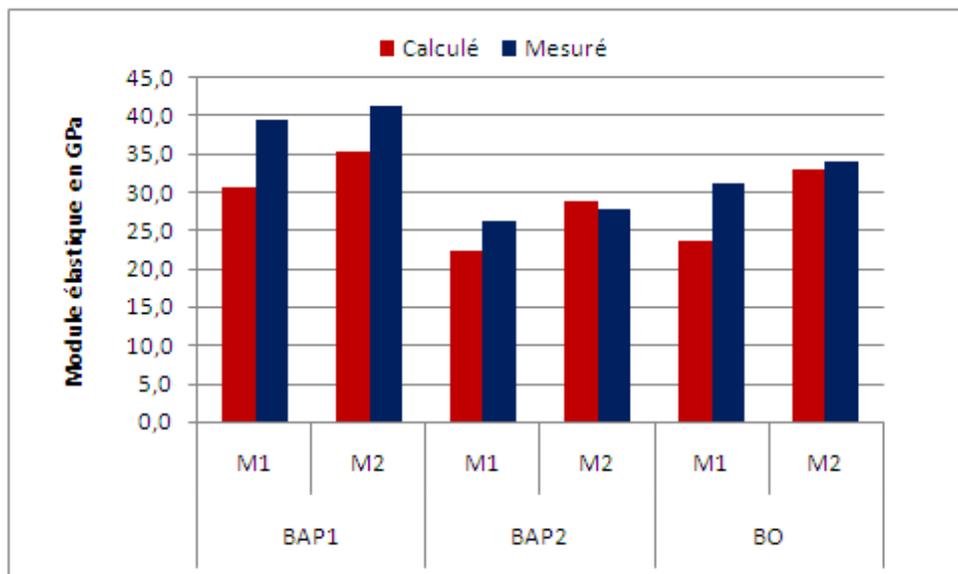


Figure 5.17 : Module élastique calculé et mesuré de différents bétons dans les différents modes

5.5 Conclusion

À l'état frais les essais d'ouvrabilité de différents bétons (BAP1, BAP2, et BV), ont montré que jusqu'à 25 minutes, le BAP1 sous une température ambiante supérieure à 35°C et une humidité relative oscille entre 11 et 28%, garde son autoplacement. On remarque que l'étalement diminue de 76cm après 5minutes à 65cm après 25minutes de malaxage et, un taux de remplissage réduits de 0.88 après 5minutes à 0.81 après 25 minutes de malaxage, en même temps le taux de stabilité devient 7.5% à 25minutes après le malaxage.

Pour le béton vibré, on constate que la température ambiante élevée provoque une perte excessive de l'affaissement qui s'arrive à 1cm à 65minute après le malaxage. Cette perte bien sûr due à une accélération rapide de l'hydratation et l'évaporation de l'eau.

Concernant le BAP2, les essais d'ouvrabilité montrent l'effet positif et bénéfique des fillers calcaires sur sa fluidité où nous avons constaté une légère augmentation d'étalement de 78 cm contre 76cm pour le BAP1 à 5mn juste après le malaxage, et la même chose pour les essais de la capacité de remplissage sur la boîte en L et la stabilité au tamis, résultats qui se concordent avec plusieurs recherches [Elhilali et al] [Diedirich, 2010] [Courard et al,2014]. [Boudhcicha, 2007].

Cependant, à 25 minutes après le malaxage, la perte de la fluidité des BAP2 contenant des fillers calcaires devient plus remarquable et très rapide comme il est illustré dans la figure 3. Cette perte de fluidité peut être due à la nature calcaire des fillers qui exige une demande d'eau ou de superplastifiant pour maintenir sa fluidité. Mais l'effet des fillers calcaires qui améliore les propriétés rhéologiques des BAP et augmente leur stabilité dépend de plusieurs facteurs tels que la finesse qui influe fortement sur l'écoulement [Diedirich, 2010] ainsi que la nature et la quantité [Boudraa et al, 2015].

Concernant l'effet du climat chaud (effet de la température) sur les propriétés mécaniques instantanées (résistance à la compression, résistance à la traction et le module élastique), nous avons marqué les points suivants :

- Un climat estival sec et chaud provoque l'élévation rapide de la résistance à la compression aux jeunes âges, mais à long terme (120jours), la résistance décroît considérablement par rapport à l'âge de 28 jours.
- A une température élevée on constate la favorisation du BAP sans substitution, qui a marqué de bonne résistance comparativement au BAP contenant des fillers calcaires ou et le béton ordinaire, soit à jeunes âges soit à long terme.

Chapitre 5 : Effet du climat chaud sur les propriétés à l'état frais et durci du BAP

- La substitution d'une portion de ciment (24.73%) par des fillers calcaires est positive pour stopper ou minimiser la chute de la résistance à la compression à long terme et sous une température élevée ($>35^{\circ}\text{C}$), avec un taux de 5.40% simplement contre 9.43% pour le BAP sans substitution et 7.5% pour le béton ordinaire.
- L'effet de cure dans l'eau est très bénéfique pour garder une résistance croissante même après 120jours.
- La résistance à la traction a les mêmes tendances que la résistance à la compression.
- Les bétons autoplaçants sans substitutions ont exprimé des modules élastiques plus élevés, par rapport au béton incorporant des fillers calcaires et au béton ordinaire. Cette élévation est peut être due à leurs résistances les plus élevées.
- Les modules élastiques des bétons muris dans l'eau sont plus élevés par rapport à ceux des bétons exposés à l'air libre dans un climat chaud et sec.

Chapitre 6

Effet du climat chaud sur les indicateurs de durabilité du BAP

6.1 Introduction

La durabilité dans le temps à toutes dégradations issues du milieu extérieur du béton est l'objectif de tous les ingénieurs et les intervenants dans le domaine. Cette durabilité peut être altérée par diverses attaques physiques ou chimiques néfastes conduisant à des détériorations totales du béton. Ces détériorations sont généralement des phénomènes complexes faisant intervenir des écoulements de fluide à travers la matrice poreuse.

Ainsi, la perméabilité, la diffusion et l'absorption sont les trois principaux processus qui peuvent amener des substances agressives à pénétrer dans le béton et affecter ses qualités mécaniques et protectrices [Assié, 2004]. Donc la durabilité d'un béton dépend à son aptitude à conserver les fonctions d'usage pour lesquelles il a été conçu et sa capacité de résister à la pénétration des agents agressifs à l'intérieur du matériau suivant les trois mécanismes d'écoulement cités ci-dessus. A cet effet, nous essayons dans cette partie en premier lieu d'étudier l'impact et l'effet du climat chaud (sec et aride) sur les propriétés d'indicateurs de la durabilité des BAP en faisant la comparaison avec ceux du béton vibré. En même temps pour suivre l'effet du climat chaud sur les propriétés de la durabilité face aux attaques sulfatiques, nous avons procédé à deux phases d'étude : macroscopique concernant l'examen visuel après immersion dans les différentes solutions, la variation de masse et la résistance à la compression. La deuxième phase est consacrée pour l'étude microscopique, comprenant l'analyse par la diffraction aux rayons X, le FTIR et la technique des électrons secondaires par le microscope électronique à balayage MEB couplée d'EDS.

6.2 Effet du climat chaud sur la porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau qui est le reflet des caractéristiques intrinsèques du matériau béton qui découle de sa composition, et est l'un des indicateurs de durabilité qui traduit le volume de vide ouvert sur le volume total du béton. Et vu que le béton est un matériau poreux, cet indicateur informe sur la capacité du matériau à se laisser pénétrer par des agents agressifs.

La figure 6.1 présente les valeurs de la porosité accessible à l'eau pour les différents bétons dans les différents modes. À partir de cette figure les tendances semblent à se dégager sont :

- La porosité accessible à l'eau se diminue avec le temps quelque soit le mode de murissement mais plus autant au béton vibré que le béton autoplaçant.

- A un climat aride la porosité accessible à l'eau des bétons autoplaçants est plus élevée que celle du béton vibré. Résultat qui est en accord avec les travaux de [Assié, 2004] dans une température ambiante qui a trouvé pour la même résistance (60MPa) 10.5% pour un BAP contre 8.9% pour un béton ordinaire.
- Les bétons autoplaçants incorporant du filler calcaire (BAP2) à un climat chaud présentent une diminution de la porosité par rapport aux bétons autoplaçants sans substitution (BAP1), ce résultat s'explique par l'effet généré par la défloculation des grains de ciment [Vinh, 2014].
- Tous les bétons muris dans l'eau (témoins) présentent une diminution de la porosité ouverte par rapport aux bétons exposés à l'air libre, ce qui explique l'impact du climat chaud qui semble modifier légèrement la porosité du béton. Ce résultat est en accord d'une part avec [Vinh, 2014] et contredit d'autre part [Reinhardt & Stegmaier, 2006], qui ont constaté que l'élévation de la température ne modifie pas significativement la porosité totale.

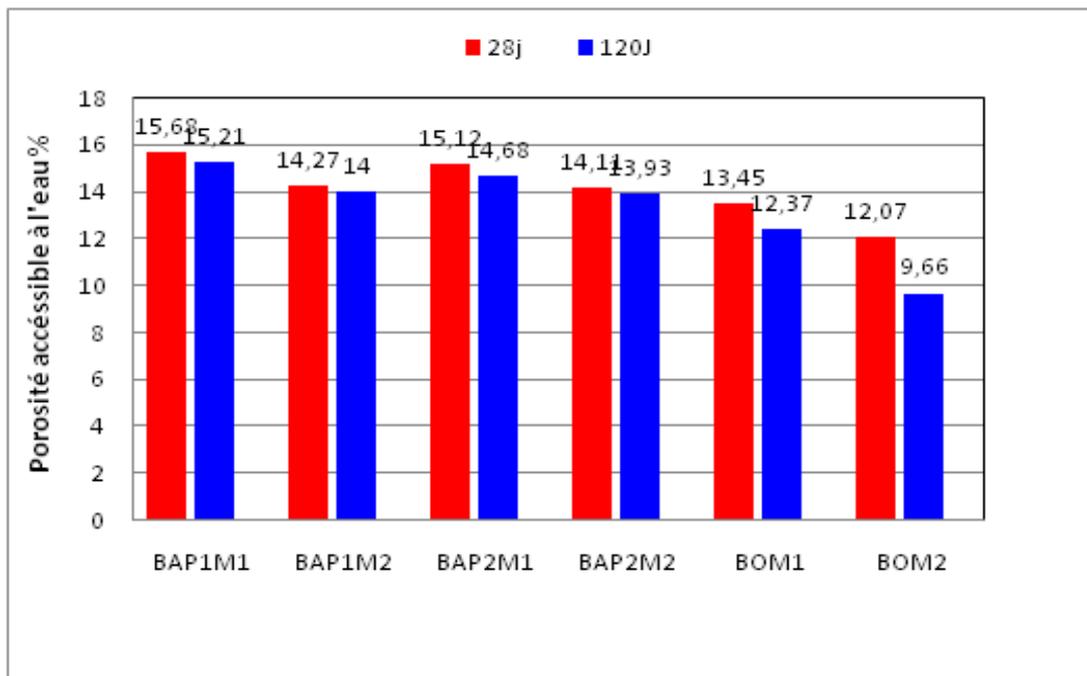


Figure 6.1: Porosité accessible à l'eau de différents bétons dans les différents modes

6.3 Effet du climat chaud sur l'absorption par immersion d'eau

L'absorption par immersion d'eau est l'un des indicateurs de durabilité du béton aussi qui traduit sa capacité à se faire pénétrer par l'eau durant une phase d'immersion totale. Elle est donc le résultat des mouvements capillaires dans les pores du béton qui sont ouverts sur le milieu ambiant. En pratique, l'absorption se mesure en faisant sécher une éprouvette de béton, à masse constante, puis en l'immergeant dans l'eau et en mesurant l'augmentation de sa masse (exprimé en % de la masse sèche).

La figure 6.2 présente les valeurs de l'absorption par immersion d'eau pour de différents bétons dans les différents modes.

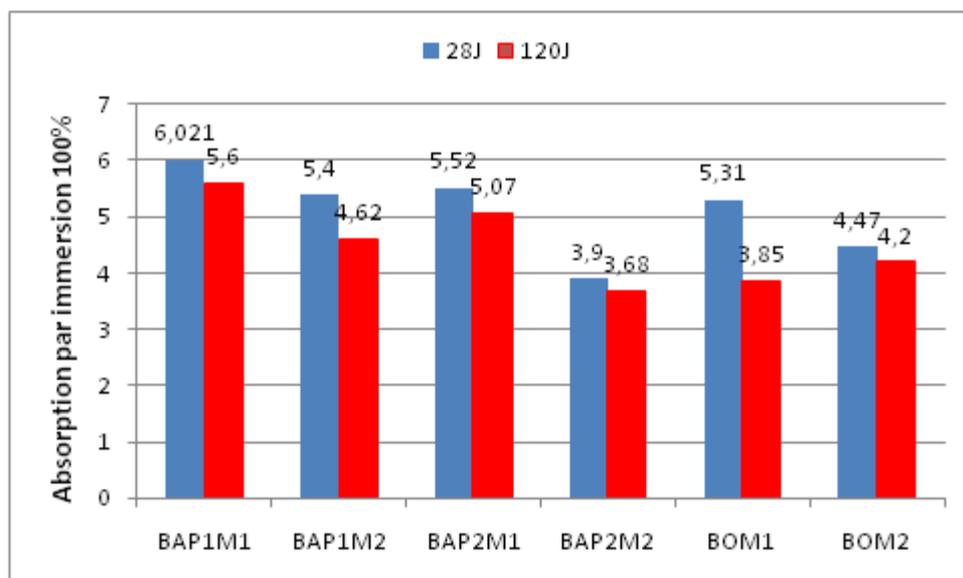


Figure 6.2 : Absorption par immersion d'eau de différents bétons dans les différents modes

D'après certains chercheurs le climat chaud et la levée de température, n'affecte pas significativement la propriété d'absorption du BAP [Vinh, 2014], tandis que [Assié, 2004] a constaté qu'aucune différence n'est été marqué entre l'absorptivité des BAP et celle des bétons vibrés dans une température ambiante et ils possèdent des coefficients d'absorption capillaire équivalents.

Et vue l'absence d'une affirmation évidente expliquant la différence d'absorption par immersion d'eau entre béton autoplaçant et béton vibré dans un climat chaud, nous constatons d'après nos résultats à partir de la figure 6.2 toujours que le béton autoplaçant non

incorporant du filler calcaire (BAP1) possède un taux d'absorption par immersion plus élevé comparativement aux autres bétons (béton autoplaçant avec substitution BAP2 et béton ordinaire vibré) dans les deux modes de murissement. Ce qui explique l'effet positif du mode de cure dans l'eau d'une part, et la présence des fillers calcaires d'autre part. De plus ces résultats sont plus ou moins compatibles avec les résultats de l'essai de la porosité accessible à l'eau, tant que la porosité est élevée, l'absorption par immersion est aussi élevée. Au même temps le béton ordinaire dans les deux modes de murissements M1 et M2 à enregistré des valeurs d'absorption plus diminuée que celles du béton autoplaçant sans et avec substitution (BAP1 et BAP2) avec l'effet bénéfique du mode de murissement humide (M2) pour tous les bétons. Résultats'accorde avec les travaux de [Böel et al.2002] qui a trouvé que l'effet du filler calcaire est néfaste pour l'absorption par immersion des BAP par rapport au béton vibré (5.1 et 6.1% pour les BAP contre 4.9% pour un béton vibré).

6.4 Effet du climat chaud sur la perméabilité

La perméabilité d'un matériau traduit son aptitude à se laisser traverser par un fluide sous l'effet d'un gradient de pression motrice. C'est un autre paramètre fondamental contrôlant la durabilité du béton. Elle s'exprime au moyen de la relation de Darcy.

La perméabilité k est une caractéristique intrinsèque du matériau dans la mesure où certaines conditions sont satisfaites. Elle s'exprime en m^2 . L'écoulement doit se faire dans des conditions données (température et caractéristiques constantes du matériau en fonction du temps) et il ne doit pas y avoir d'interactions physiques et chimiques entre le fluide et le matériau. [GCI-714].

Dans le cas de la perméabilité à l'eau, on utilise souvent le coefficient de perméabilité ou la conductivité hydraulique $K(m/s)$ au lieu de la perméabilité intrinsèque $k (m^2)$. Ce coefficient est défini comme : $K= kx(\rho xg/\eta)$, avec $\rho (kg/m^3)$ est la masse volumique du fluide, $g (m/s^2)$ est l'accélération de la pesanteur. le poids volumique (ρxg) de l'eau (à $20^\circ C=10^4 N/m^3$). La viscosité de l'eau (à $20^\circ C=10^{-3} N.s/m^2$). La perméabilité k de $1m^2$ correspond à une conductivité hydraulique K de l'ordre de $10^7 m/s$. Alors si la perméabilité k est une caractéristique du matériau fortement contrôlée par la porosité, la conductivité hydraulique K est une caractéristique des conditions d'écoulement dans un matériau donné pour un fluide donné [Guettala, 2012].

La figure 6.3 suivante présente les coefficients de perméabilité K_p de différents bétons étudiés dans les différents modes de durcissement à 28 et 120jours.

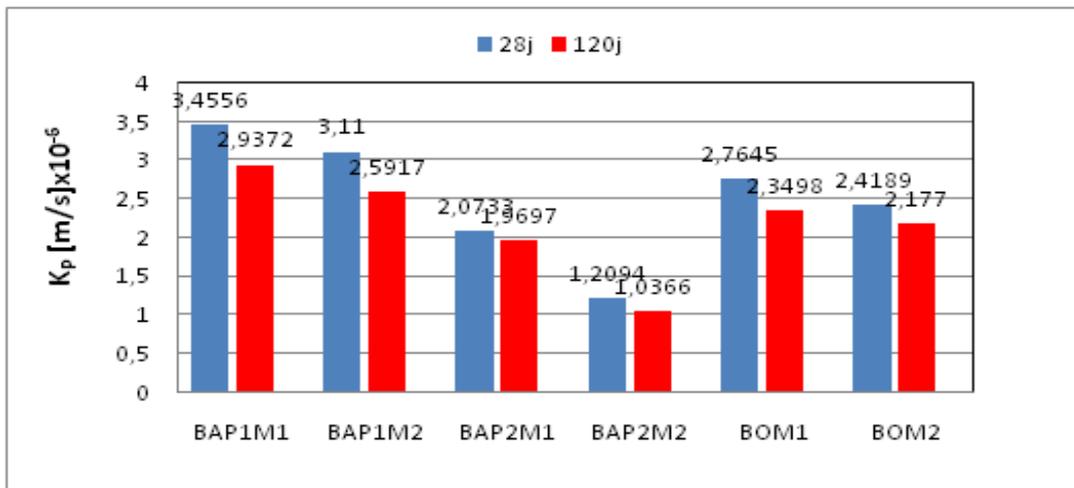


Figure 6.3 : Variation du coefficient de perméabilité K_P de différents bétons dans les différents modes

Trois tendances semblent se dégager à partir de l'analyse des résultats illustrés dans la figure précédente : la première c'est que tous les bétons muris dans l'eau présentent des coefficients de perméabilité plus inférieures comparativement aux bétons exposés à l'air libre, ce qui s'explique par l'effet bénéfique du durcissement dans l'eau qui favorise une plus grande quantité d'hydrates qui viennent combler et fractionner davantage la porosité capillaire [GCI-2]. La deuxième tendance c'est que les bétons autoplaçants sans substitutions (BAP1) dans les deux modes de durcissement ont enregistré des coefficients de perméabilité plus grands, ce qui contredit [Assié, 2004] qui a constaté que la perméabilité à l'état sec des BAP de bâtiment est sensiblement inférieure à celle des bétons vibrés. La troisième tendance concernant les BAP2 incorporant du filler calcaire qui a permis de diminuer leurs coefficients de perméabilité, cet effet peut être expliqué par la teneur plus importante en filler qui donne au BAP une microstructure plus dense que le béton vibré [Trägårdh, 1999], et qui semble renforcer la compacité de la matrice fillérisée, et par conséquent sur la propriété de perméabilité [Vinh, 2014].

Plus ces trois tendances générales, nous avons constaté que le coefficient de perméabilité après 120j du BAP1M1 est diminué de 15.01% par rapport à 28j, c'est également le même taux de diminution pour le BOM1 (15.01% aussi), alors que le BAP1M2 a enregistré une diminution de 16.67% à 120j par rapport à 28j, ces résultats expliquent qu'il n'y a pas de différence significative entre les coefficients de perméabilité des BAP et bétons vibrés d'une part, et il est important de constater que le climat chaud n'influe pas significativement sur la perméabilité de différents bétons, d'autre part. Résultat a été constaté par [Vinh, 2014]

6.5. Effet du climat chaud sur la durabilité face aux attaques sulfatiques

6.5.1 Etude macroscopique

6.5.1.1 Examen visuel

Après 24 semaines d'immersion des échantillons dans les différents milieux, l'inspection visuelle nous révèle comme il est indiqué dans la photo 6.1 les points suivants :

- Dans l'eau douce aucune changement ou dégradation sur les échantillons ;
- Dans la solution Na_2SO_4 on remarque la formation d'une légère couche jaunâtre sur la surface des éprouvettes ;
- Dans la solution H_2SO_4 formation d'une couche blanche sur la surface et détérioration des coins et des bords des échantillons



a- Après immersion dans l'eau douce

b- Après immersion dans une solution de 5% Na_2SO_4

c- Après immersion dans une solution de 5% H_2SO_4

- **Photo 6.1: Etat des échantillons après 24 semaines d'immersion dans les différents milieux**

6.5.1.2 Variation de masse dans les différentes solutions d'étude

a- Variation de masse dans la solution témoin (eau douce) :

La cinétique du gain de la masse de différents bétons immergés dans l'eau douce d'après la figure 6.4 est la même. La référence est la dernière mesure avant immersion.

La première constatation c'est que la variation de masse de différents bétons muris reste presque stationnaire après la première semaine d'immersion dans l'eau douce quelque soit le mode de murissement. Après 24 semaines d'immersion dans l'eau douce les différents bétons exposé à l'air libre ont subi une variation plus grande par rapport aux bétons muris dans l'eau

de telle façon nous avons enregistré un taux de 5.4% pour la BAP1, 6.1% pour le BAP2 et 4.6% pour le béton ordinaire vibré contre 2.74 ; 3.72 et 3.06% pour les bétons BAP1, BAP2 et BO respectivement muris dans l'eau, ce qui explique l'effet bénéfique du mode de cure dans l'eau. Nous avons constaté aussi que pour les deux modes le BAP2 incorporant du filler calcaire a subi la plus grande variation, ce qui confirme nos résultats de l'essai d'absorption et se concorde aussi avec les travaux de [Böel et al.2002] qui a trouvé que l'effet du filler calcaire est néfaste pour l'absorption par immersion des BAP par rapport au béton vibré.

La structure poreuse des bétons autoplaçants exposés dans un climat aride et sec est bien exprimé dans le taux de variation de masse pour les bétons BAP1 et BAP2 muris dans le mode M1 (air libre), où nous avons constaté une légère supériorité comparativement au béton ordinaire. Tandis que pour le mode M2 de murissement (mode eau), le BAP1 sans substitution a marqué les plus moins valeurs de variation après immersion.

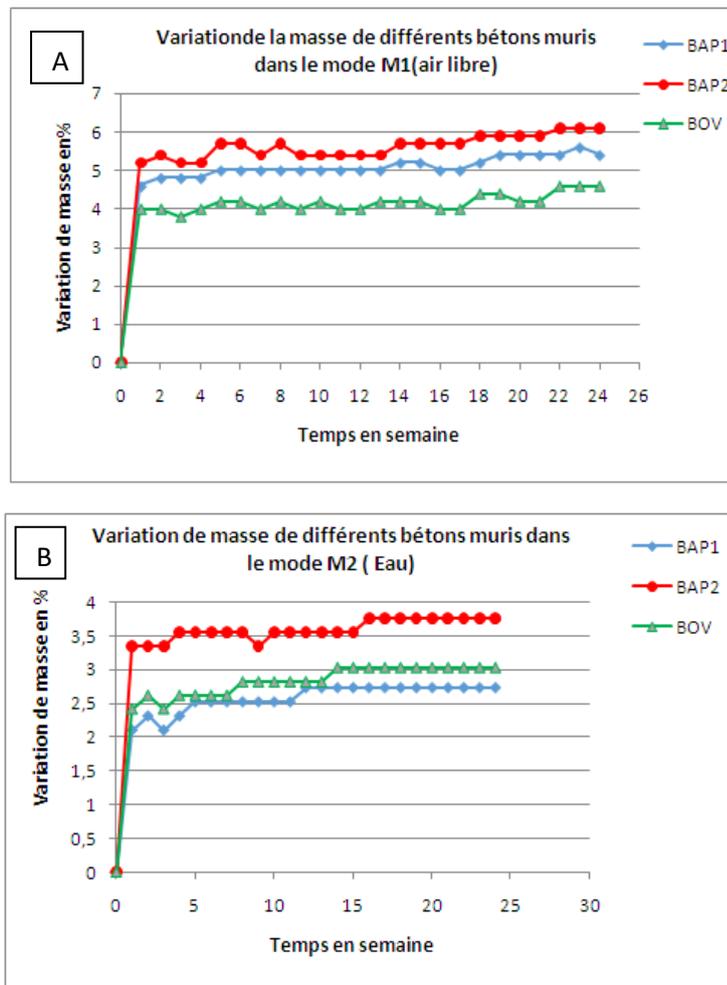


Figure 6.4: Variation de masse en fonction du temps de différents bétons immergés dans l'eau douce pendant 24 semaines

b- Gain de masse dans la solution 5% Na₂SO₄ :

La variation de la masse de différents bétons immergés dans la solution de sulfate de sodium à une concentration de 5% est représentée dans la figure 6.5. Un gain de masse a été observé pour tous les bétons en fonction du temps d'immersion.

Pour les bétons muris dans le mode M1 (air libre) comme il est exprimé dans la figure 6.5(A), on observe tout d'abord une croissance rapide de l'augmentation de la masse durant les six premières semaines pour tous les bétons jusqu'à 4.7% pour le BAP1% ciment par rapport à la dernière mesure avant immersion, 5.2% pour le BAP2 contenant du fillers calcaires et 5.1% pour le béton ordinaire vibré. Ensuite la croissance devient lente où nous avons enregistré après 24 semaines d'immersion, une prise de masse de 5.5% pour le BAP1, 7.6% pour le BAP2, et 6.4% pour le béton ordinaire vibré, ces résultats se coïncident aux résultats trouvés par [Mouallif et al, 2013] et [Tennich et al, 2017].

La même tendance de la variation de la masse des bétons muris dans le mode M2 (eau) a été observé dans la figure 6.5 (B) mais avec des taux plus bas où nous avons enregistré après 24 semaines d'immersion une augmentation de masse de 3.44 % pour le BAP1 ; 4.01% pour le BAP2 et 3.63% pour le BO. Ce qui explique l'effet positif de murissement dans l'eau.

Ces augmentations de masse de différents bétons immergés dans une solution de 5% de Na₂SO₄ c'est expliqué par l'absorption de l'eau et la pénétration des ions SO₄²⁻ dans les pores capillaires des échantillons. Une légère supériorité de prise de masse a été observée pour le BAP2 est due à la présence des fillers calcaires qui augmente la porosité et par conséquent la pénétration des sulfates [Boudhcicha, 2007] [Boudraa et al, 2015].

1- Formation du gypse secondaire

Les ions sulfates réagissent en milieu aqueux avec la portlandite Ca(OH)₂ pour former le gypse (sulfate de calcium) suivant la réaction suivante :

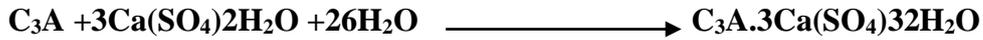


- NaOH : Alcalinité élevée → stabilisation des CSH.
- CaSO₄.2H₂O : Produit expansif mais qui se forme uniquement dans les espaces internes de la pâte de ciment hydraté. Dans la majorité des cas, il n'y a pas ou peu d'expansion. Cependant, son dispositif agit pour diminuer la résistance et l'adhérence de la pâte de ciment due à la dissolution de la portlandite CH et le gel de la décalcification de la C-S-H qui est responsable des propriétés liantes de la pate de ciment [Mehta, 1993].

2- Formation d'ettringite secondaire

Le gypse produit par la décalcification de la portlandite participe à la formation de l'ettringite secondaire, soit à partir :

- a- De l'aluminate tricalcique C_3A , présente dans la composition du clincker suivant la réaction suivante :



- b- Ou à partir du mono-sulfano-aluminate de calcium hydraté suivant la réaction suivante :

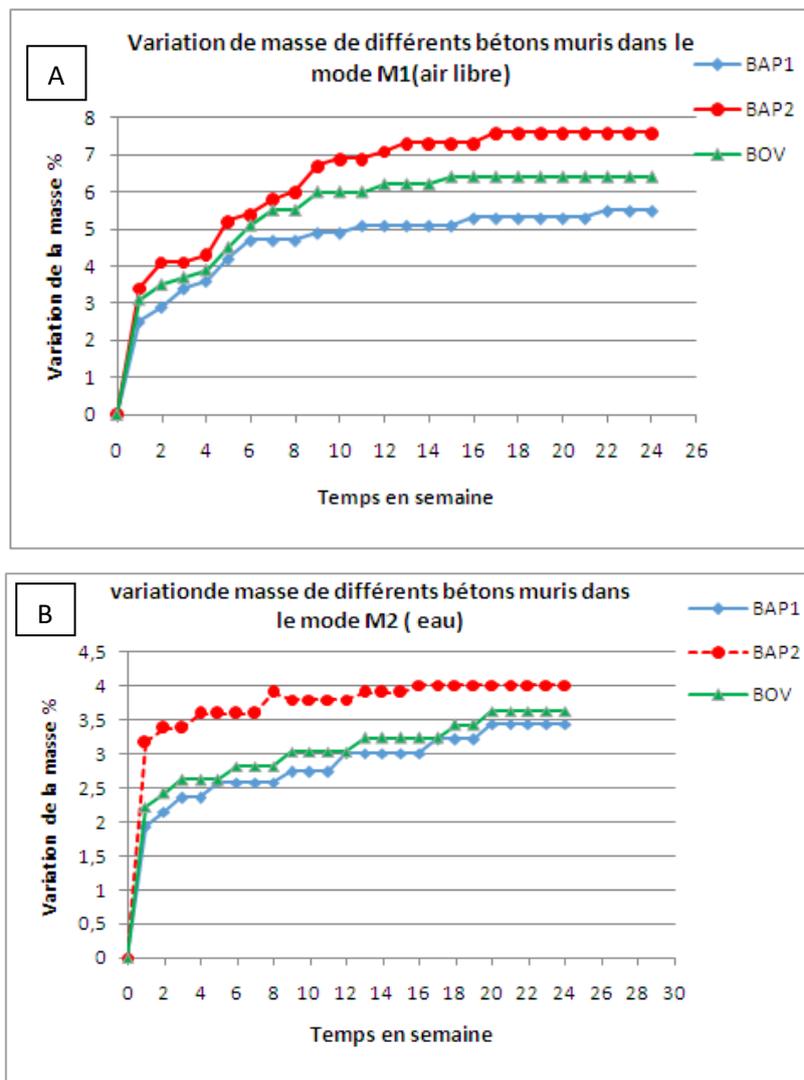


Figure 6.5: Variation de masse en fonction du temps de différents bétons immergés dans la solution 5% Na_2SO_4 pendant 24 semaines

C- Perte de masse dans la solution 5% H₂SO₄

Le suivi du vieillissement accéléré est exprimé par la perte en masse en fonction du temps dans la figure 6.6, sur des échantillons immergés dans la solution d'acide sulfurique H₂SO₄ à une concentration de 5%.

On constate que pour tous les bétons muris dans le mode M1 (figure 6.6 A) et sous une température élevée, ont perdu une quantité importante de leurs masses. On remarque que le BAP1 a perdu 30.9% de son poids après vingt-quatre semaines d'immersion. Le béton ordinaire vibré a subit presque la même perte de masse de 27%, alors que le BAP2 contenant des fillers calcaires parait le moins attaquant par l'acide sulfurique avec une perte de 20% de son poids seulement, résultat explique l'effet bénéfique de la substitution des fillers calcaires en réduisant considérablement la perte de masse vis-à-vis aux attaques par l'acide sulfurique, ce qui est en accord avec d'autres chercheurs [Rahmani. et al, 2008] [Rozière et al,2007] [Salhi et al, 2019][Senhadjiet all, 2016][Tennich et al, 2017].

Pour les bétons muris dans l'eau (figure 6.6B) on constate les mêmes tendances de la perte de masse, mais cette fois-ci on remarque tout d'abord une augmentation de masse pour le BAP2 incorporant du filler calcaire pendant les quatre premières semaines, ensuite la courbe commence à se chuter, où nous avons enregistré après 24 semaines d'immersion une perte 23.61% de sa masse, contre 22.46% pour le béton ordinaire et 35.44% pour le BAP1 sans substitution. Donc la perte de masse pour les bétons muris dans l'eau est légèrement supérieure par rapport aux bétons exposés à l'air libre.

Le mécanisme de la perte de masse est justifié par l'attaque d'acide sulfurique qui réagit avec l'hydroxyde de calcium Ca(OH)₂, en donnant naissance du sulfate de calcium CaSO₄ un sel provoque une dégradation très accrue pour le béton en réagissant avec les aluminates tricalcique C₃A en formant l'ettringite secondaire suivant les réactions suivantes :



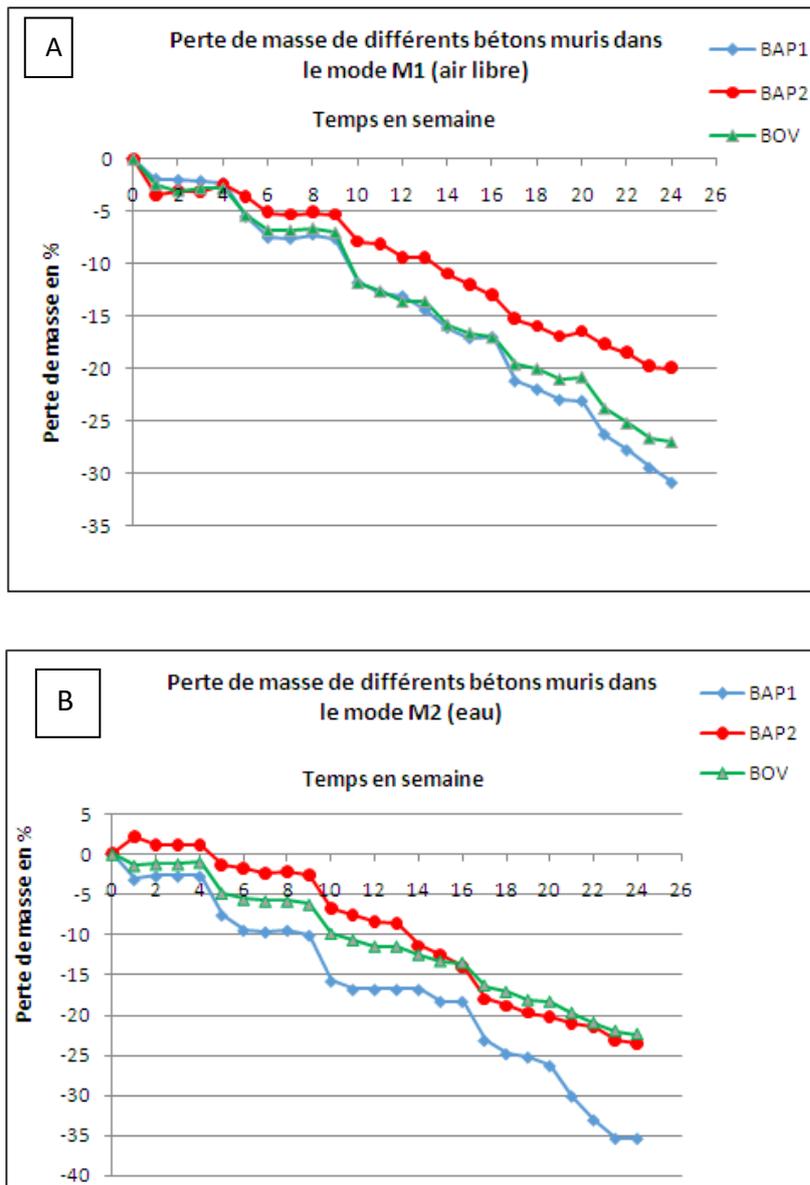


Figure 6.6 : Perte de masse en fonction du temps de différents bétons immergés dans la solution 5% H₂SO₄ pendant 24 semaines

6.5.1.3 Effet de l'attaque sulfatique sur la résistance à la compression

Le suivi de la résistance à la compression des échantillons confectionnés dans un climat aride et sec avec une température ambiante dépassant les 40°C, et durci suivant les deux modes cités auparavant M1 à l'air libre et M2 dans l'eau nous a donné les résultats illustrés dans la figure 6.7. Cette figure nous révèle que tous les bétons immergés dans les solutions 5%

Na_2SO_4 et 5% H_2SO_4 ont subi une attaque sulfatique externe pour les deux modes de durcissement. Au contraire ces bétons (BAP1, BAP2 et BO) immergés pendant six mois dans l'eau douce ont connu des évolutions de la résistance à la compression, cette évolution est très claire pour le béton incorporant du filler calcaire (BAP2) dans les deux modes, notamment pour le mode M1 (air libre) où le BAP2 a enregistré une augmentation de sa résistance de 23.24% contre 14.39% dans le mode M2 (témoin à eau), ce qui explique l'effet positif du filler calcaire dans l'amélioration de la résistance de compression à long terme.

Pour les bétons durcis à l'air libre c'est-à-dire dans mode M1, et après une immersion de six mois dans la solution 5% Na_2SO_4 nous avons enregistré une chute de la résistance de 45,02% pour le BAP1 par rapport à la résistance à 28 jours avant immersion, et de 52.35% pour le BO, contre 34,30 pour le BAP2, ce qui montre que le béton ordinaire est plus touché par l'attaque sulfatique externe. Tandis que pour les bétons muris dans l'eau (mode M2), la chute de la résistance est plus proche pour les trois bétons, 28.95% pour le BAP1, 30.00% pour le BAP2 et 29.85% pour le béton ordinaire.

Dans la solution 5% H_2SO_4 et pour les deux modes de durcissement, la chute de la résistance est très dramatique, nous avons enregistré pour les bétons durcis à l'air libre : 90.57% pour le BAP1, 80.55 pour le BAP2 et 88.75% pour le BO contre 89.49% pour le BAP1, 84.70% pour le BAP2 et 84.58 % pour le BO pour le mode M2 de durcissement c'est-à-dire dans l'eau. Bien sur ces résultats démontrent que les bétons soumis à l'acide sulfurique se dégradent drastiquement car ils développent lors de leur immersion des phases qui prédisposent des matériaux aptes à la fragilisation particulièrement le gypse qui se transforme en étringite.

Ces résultats expriment que le vieillissement des bétons par la solution d'acide sulfurique est plus intense par rapport à la solution de sulfate de sodium [Mouallif et al, 2013]. Ainsi que la substitution des fillers calcaires est bénéfique pour conserver la meilleure résistance dans un environnement sulfatique [Rahmani et al, 2008] et même de l'augmenter vis-à-vis de l'attaque de 5% H_2SO_4 [Senhadji et al, 2016]. Résultats seront confirmés par l'étude microscopique à l'aide du DRX et FTIR dans les paragraphes suivants.

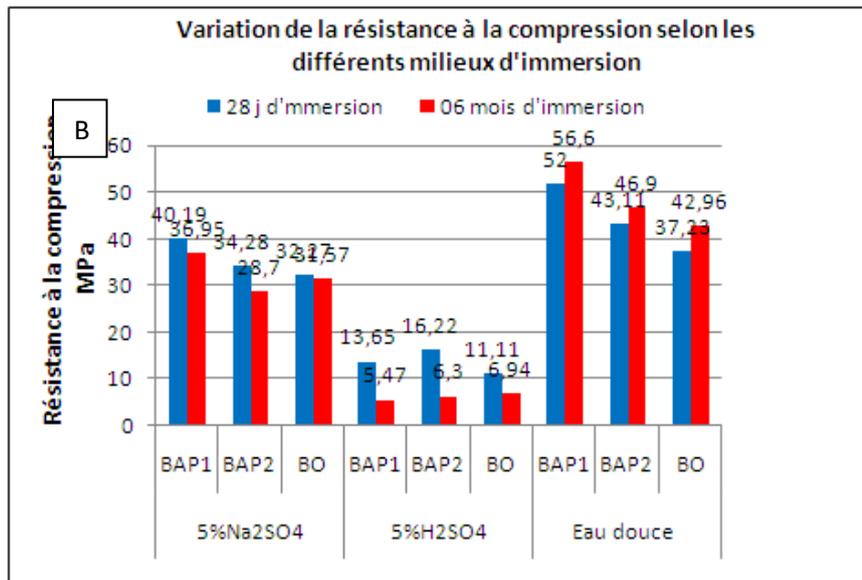
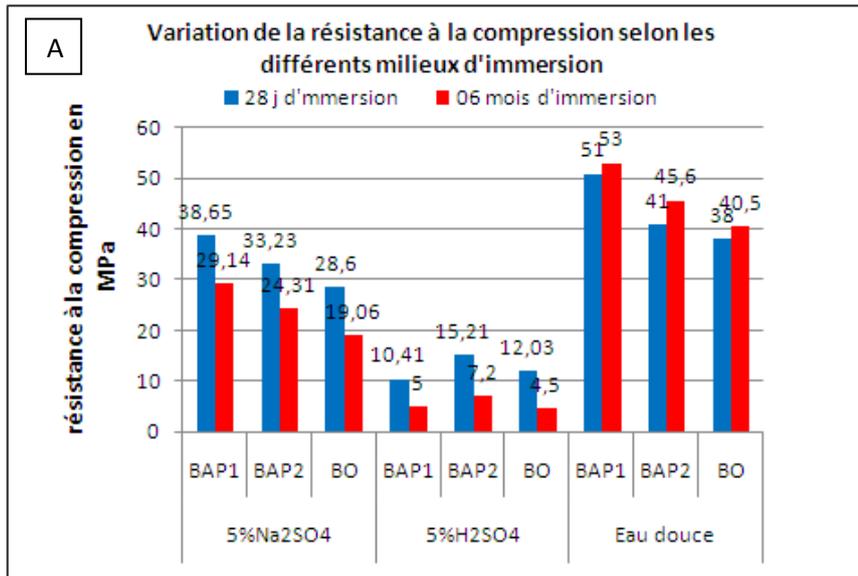


Figure 6.7 : Variation de la résistance à la compression de différents bétons selon les différents milieux d'immersion

A : Mode 1 , B : Mode2

6.5.2 Etude microscopique

L'étude microscopique comme le FTIR, la diffraction par rayons X, et l'analyse au microscope électronique à balayage, de nos échantillons est plus que nécessaire pour nous donner des informations complètes et plus pointues sur le comportement de nos bétons face à l'attaque sulfatique externe.

Il est intéressant dans cette partie, de noter qu'à défaut de moyen l'étude sera faite exclusivement sur les bétons durcis à l'air libre seulement c'est-à-dire dans le mode M1 à l'air libre.

6.5.2.1 Résultats d'analyse de diffraction aux rayons X (DRX)

6.5.2.1.1 Résultats d'analyse DRX des matériaux utilisés

L'analyse par diffraction des rayons X des matériaux utilisés s'est révélée efficace car elle a révélé l'essentiel des composés constitutifs de chaque béton confectionné. Les figures suivantes révèlent les produits essentiels relatifs qui composent le ciment, le sable, et les fillers calcaires respectivement.

Rappelons que pour les fiches JCPDS, nous avons adopté des couleurs uniformes dans toutes les figures DRX, ainsi nous avons :

Tableau 6.1 : Couleurs de différentes phases des matériaux utilisés

Phase	C3S	C2S	C3A	C4AF	Gypse	Calcite	Quartz	Dolomite	Portlandite
Formule	Ca ₃ SiO ₅	Ca ₂ SiO ₄	Ca ₃ Al ₂ O ₆	CaAl ₂ Fe ₂ O ₁₀	CaSO ₄ , 2H ₂ O	CaCO ₃	SiO ₂	CaMg(CO ₃) ₂	Ca(OH) ₂
JCPDS – ICDD file n°	31-0301	31-0299	33-0251	30-0226	46-1045	33-0311	46-1045	75-1655	44-1481
Couleur	Rouge	Gris	Vert	Gris clair	Noir	Bleu	Rose	Orange	Magenta

Et la phase Ettringite est donnée par le numéro: 41-1451[Goetz et al, 2006].

Dans le cas du ciment, les analyses permettent de distinguer la présence des composés C₃S (Alite), C₂S (Belite), C₃A (Tricalcium aluminate), C₄AF (Calcium aluminoferrite), et enfin une très faible quantité de SiO₂. Les composés ont été identifiés en concordance avec les fiches JCPDS correspondantes, et les spectres DRX de la figure 6.8(a), sont très similaires à ceux données en littérature, concernant les ciments [Rohan et al, 2011] [Hoang et al, 2016].

L'analyse du sable utilisé d'après la figure 6.8 (b), montre qu'il est constitué d'une grande quantité de quartz (SiO₂), de gypse (CaSO₄, 2H₂O), et d'une faible quantité de calcite (CaCO₃). Alors que les fillers Calcaires (figure 6.8 (b)) sont composés principalement de

calcite (CaCO_3), de plus faible quantité de dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), et aussi de plus faible quantité de Quartz (SiO_2).

Notons que les pics les plus intenses de ces composés sont localisés aux valeurs 2θ suivantes :

Tableau 6.2 : Les différents pics de différents composés en fonction des valeurs 2θ

Produit	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	Quartz	Gypse	Calcite	Dolomite
2 Theta	32.34	32.34	33.32	33.65	26.70	26.55	29.49	30.90

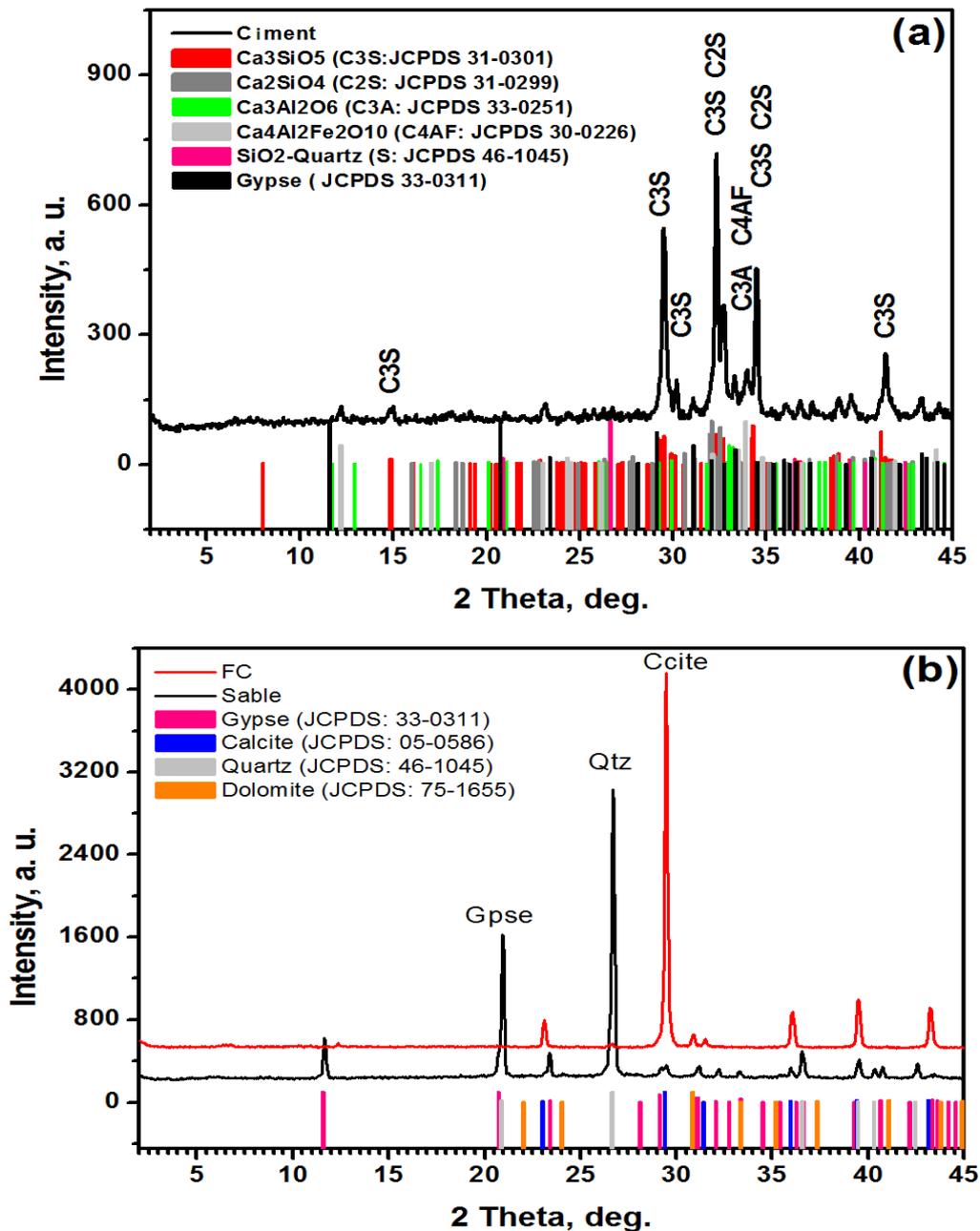


Figure 6.8: Spectres des matériaux utilisés, a) le ciment ; b) sable et filler calcaire

6.5.2.1.2 Analyse de divers bétons immergés dans des différents milieux

Les analyses DRX sur poudre relatives à nos échantillons de bétons (BAP1, BAP2, et BO) ont été réalisées et étudiés profondément selon l'effet des milieux dans lesquels ils ont été immergés tel que l'acide sulfurique (H_2SO_4), les sulfates de sodium (Na_2SO_4), et l'eau douce.

Après six mois d'immersions, nous avons retrouvé en quantités importantes les produits suivants : Gypse, Calcite, Quartz, et la portlandite ($Ca(OH)_2$).

D'après le tableau 6.3 et la figure 6.9 de différents spectres de divers bétons représentant l'estimation des quantités relatives des composés de chaque béton après immersion, nous constatons que le composé $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (le gypse) présente un pic très intense pour tous les bétons immergés dans la solution H_2SO_4 même par rapport à celui de la calcite avec un taux relative de 55.32% pour le BAP1, 55.44% pour le BAP2 et 59.46% pour le béton ordinaire, ce qui montre que ce dernier est plus touché par l'attaque sulfatique externe. Cette présence de gypse est accompagnée de faible quantité de la portlandite $Ca(OH)_2$, ce composé présente un pic de diffraction des rayons X vers 18.13° avec des taux relatives de 5.46% pour le BAP1, 4.5% pour le BAP2 et 4.57% pour le béton ordinaire. Les CSH SiO_2 sont aussi en faibles quantités de 11.90% pour le BAP1, 11.03% pour le BAP2 et 11.90% pour le béton ordinaire. Ces plus faibles quantités semblent être en faveur de la formation d'autres composés plus complexes influençant la résistance à la compression de nos bétons où nous avons enregistré 5MPa pour le BAP1, 7.2MPa pour le BAP2 et 4.5MPa pour le béton ordinaire dans l'étude macroscopique.

Nos bétons semblent moins touchés dans la solution Na_2SO_4 , de telle façon nous avons trouvé que les quantités relatives de gypse sont de l'ordre de 31.32% pour le BAP1, 33.97% pour le BAP2 incorporant des fillers calcaires et 24.7% pour le béton ordinaire. De même les quantités relatives de la portlandite $Ca(OH)_2$ sont plus retrouvées dans la solution Na_2SO_4 que dans la solution H_2SO_4 , ces quantités sont de l'ordre de 14.8% pour le BAP1, 14.3% pour le BAP2 et 14.34% pour le béton ordinaire.

Nous constatons clairement que les bétons testés sous l'eau douce, sont ceux qui ne présentent pas de formation de gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) en leur sein, avec la présence d'une élévation des valeurs de la silicate de calcium hydraté (CSH SiO_2) de l'ordre de 21.06% pour le BAP1, 18.95% pour le BAP2, et 20.82% pour le béton ordinaire.

Chapitre 6 : Effet du climat chaud sur les indicateurs de durabilité du BAP

Nous pouvons voir que pour des angles 2θ , 9.08° , 15.85° , 18.91° , 22.94° , et 25.65° , de très faibles pics sont retrouvés, ces raies témoignent de la présence en très faible quantité d'étringite de formule chimique : $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$. Ce composé résulte de réaction entre le gypse et les oxydes de calcium suivant la réaction suivante [Martin] :

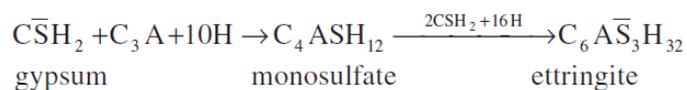


Tableau 6.3 : Résultats d'analyses DRX de différents bétons après six mois d'immersion dans de différentes solutions.

Béton	Quantités relatives	Eau douce	Na_2SO_4	H_2SO_4
BAP1	Gypse	18.48	31.32	55.32
	CSH-SiO2	21.06	22.11	11.90
	CaCO3	32.70	24.42	22.74
	Ca(OH)2	18.55	14.8	5.46
	Autre	9.21	7.35	4.58
BAP2	Gypse	21.73	33.97	55.44
	CSH-SiO2	18.95	20.56	11.03
	CaCO3	43.36	23.55	23.71
	Ca(OH)2	10.68	14.3	5.3
	Autre	5.28	7.62	4.5
BO	Gypse	24.41	24.7	59.46
	CSH-SiO2	20.82	17.09	11.95
	CaCO3	38.53	36.56	19.14
	Ca(OH)2	8.48	14.34	4.88
	Autre	7.76	7.3	4.57

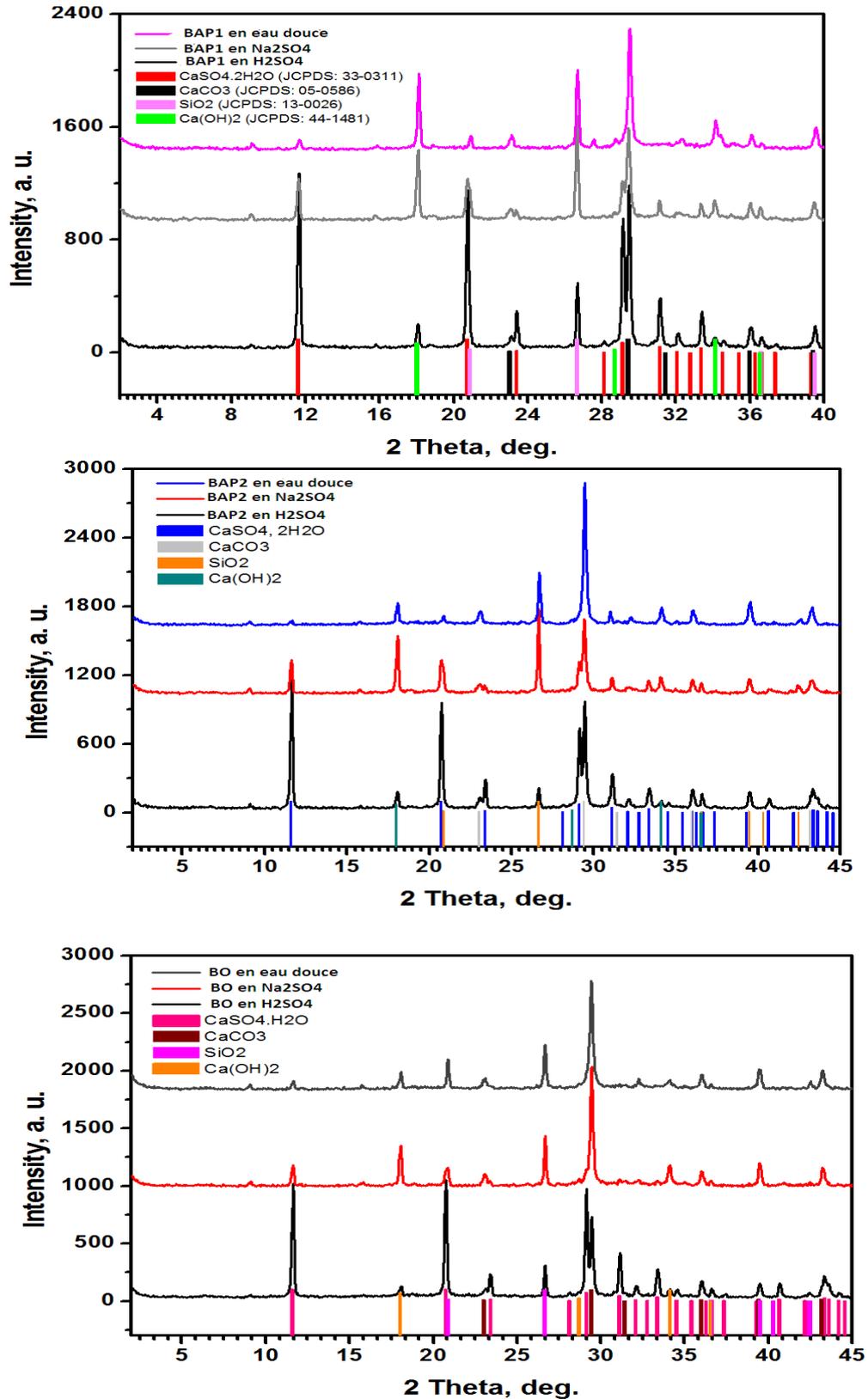


Figure 6.9: Spectres de différents bétons dans les différents milieux

6.5.2.2 Résultats d'analyse de spectroscopie FTIR

Les analyses par spectroscopie FTIR, associées aux analyses par DRX, permettent une meilleure compréhension du sujet, car la spectroscopie permet en plus de caractériser même les produits amorphes rajoutés à ceux cristallisés retrouvés par DRX.

6.5.2.2.1 Résultats d'analyse des matériaux utilisés

Les spectres FTIR des matériaux utilisés sont représentés sur la figure 6.10 ci-dessous. Ces analyses et affectations des pics obtenus, nous permettent de caractériser les produits constitutifs des sables, du ciment, et des fillers calcaires. Dans tous les cas, ces analyses corroborent et complètent les résultats déjà retrouvés par DRX.

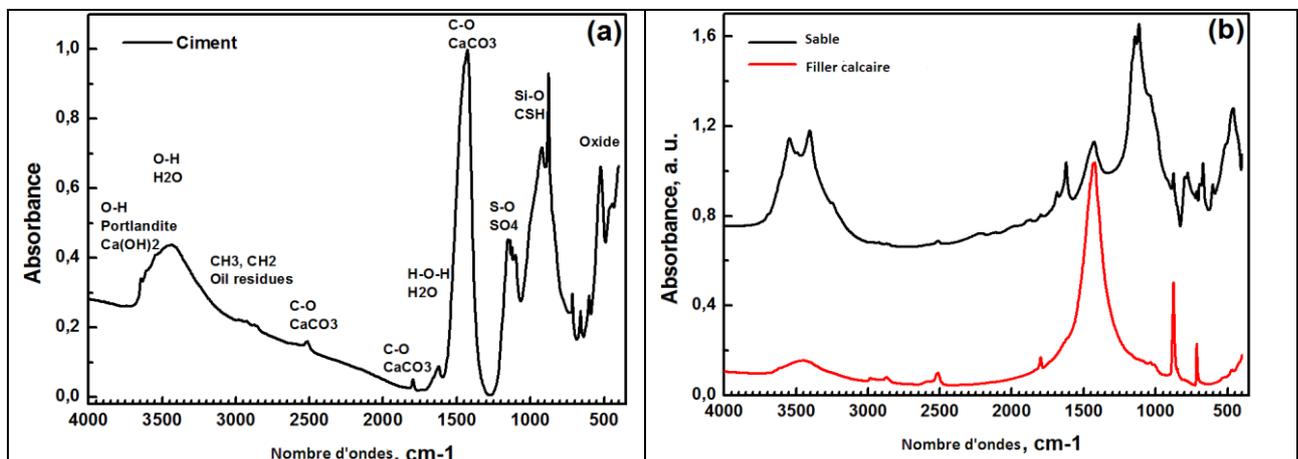


Figure 6.10 : Spectres de différents matériaux utilisés dans la formulation de différents bétons.

Les résultats de ces analyses sont représentés dans le tableau 6.4 suivant. .

Tableau 6.4 : Résultats d’analyses FTIR des produits constituant les matériaux utilisés

Matériau	Produits constitutifs (minéral)	Nombre d’ondes cm-1	Estimation quantitatif
Ciment	Oxide (SiO ₂ , ...)	444-522-1102-1126-	Important
	CaSO ₄ , 2H ₂ O	602-658-1140-1154-	Important
	CSH	920	Important
	Calcite, CaCO ₃	712-876-1428-1796-2514-	Partie principale
	CH ₃ /CH ₂ (résidus d’huile)	2862-2924-2980-	Petite quantité
Sable	SiO ₂	460-516-692-778-796-1040	Important
	CaSO ₄ , 2H ₂ O	602-670-1116-1142	Très important
	Calcite, CaCO ₃	712-874-1428-1798-2513-2858	Faible quantité
	CH ₃ /CH ₂ ((résidus d’huile)	2858-2923	Petite quantité
	Eau	1622-1686-3245-3406-3494-3546-3614-3698	Important
Filler calcaire	Calcite, CaCO ₃	712-874-1420-1798-2514-2874	Partie principale
	Oxide (SiO ₂)	470-1007-1041	Très faible
	Eau	1622-3450	Très faible

Comme retrouvé sur les analyses des matériaux de départ, nous pouvons confirmer ce qui suit :

Matériau	Constituants en quantité prédominante	Faibles quantités
Ciment	Calcite + CSH + silice	CH ₃ /CH ₂
Sable	Gypse + silice + calcite+ eau	CH ₃ /CH ₂
Filler calcaire	Calcite + oxide + eau	Eau

6.5.2.2 Analyse de divers bétons immergés dans des différents milieux

Dans cette partie de notre étude nous avons utilisé la spectroscopie FTIR pour identifier les divers composés qui se forment après immersion pendant six mois dans les différents milieux. De plus et une fois ayant réalisé cette identification, nous avons évalué les quantités relatives de chacun des composés retrouvés dans cet amalgame, en exploitant la région du spectre FTIR entre 900 et 1600 cm^{-1} nous a donc permis de faire cette estimation.

Ainsi, pour le mélange silicate de calcium hydraté (CSH-SiO₂) nous avons utilisé la région 900-1050 cm^{-1} , pour le produit de gypse (CaSO₄.2H₂O), nous avons utilisé la région 1050-1250 cm^{-1} , et pour le carbonate de calcium (CaCO₃), nous avons utilisé la région 1300-1600 cm^{-1} . Bien sûr les valeurs sont relatives et qualitatives, toutefois elles rendent compte de la réalité des phénomènes rencontrés, car elles reflètent concrètement les observations macroscopiques.

La figure 6.11 regroupe les résultats d'analyse du BAP1 (sans substitution) soumis par immersion pendant six mois à l'effet du H₂SO₄, le Na₂SO₄ et l'eau douce. Cette figure dans ces différentes parties : a, b, c, et d ; nous confirme l'effet très nocif du H₂SO₄, qui a réduit les parties SiO₂, et CSH presque complètement en gypse (61.05%), et une grande partie de la calcite. L'effet du Na₂SO₄ est aussi négatif mais à un degré moins moindre, vu qu'il permet la formation d'une importante quantité de gypse (41.85%), en réduisant des parties non négligeables des CSH, de SiO₂ et de CaCO₃ en gypse. La figure 8d montre une ration dans les normes, des composés CSH-SiO₂/CaCO₃ qui permet l'obtention après l'immersion dans l'eau douce d'un mélange durable et résistant vu qu'il est exempt de gypse.

Les résultats concernant le BAP2 (béton autoplaçant incorporant du filler calcaire) sont illustrés dans la figure 6.12 où leurs spectres nous conduisent aux mêmes constatations antérieures. L'effet du H₂SO₄ est très nocif de telle façon à réduire le composé BAP2 à un mélange majoritaire de gypse (58.35%) avec une quantité faible de CSH-SiO₂ (12.48%) et de moyenne quantité de calcite (29.17%).

L'effet du Na₂SO₄ est aussi bien remarquable sur le BAP2, la quantité de gypse est estimée à 35.48%, mais il paraît que le Na₂SO₄ n'altère pas la présence de la calcite comparativement au H₂SO₄, le taux du CaCO₃ est de l'ordre de 49.74%.

Donc il est clair que la substitution d'une portion de ciment par les fillers calcaires est très bénéfique, tel que le BAP2 soumis à un vieillissement de H₂SO₄ pendant six mois renferme une quantité de gypse (58.35%), une quantité faible de CSH-SiO₂ (12.48%) contre 61.05 et 11.61% pour le BAP1, et 63.78 et 9.83% pour le béton ordinaire. Ainsi que le meilleur

pourcentage est donné pour le béton BAP2 avec 5.39% de gypse seulement. Résultat a été confirmé dans notre étude macroscopique exprimant l'effet positif des fillers calcaires pour conserver une meilleure résistance dans un milieu sulfatique [Rahmani et al, 2008] et même de l'augmenter vis-à-vis de l'attaque de 5% H_2SO_4 [Senhadji et al, 2016].

Sur les mêmes tendances, les résultats du béton ordinaire d'après la figure 6.13, montrent l'effet très significatif du H_2SO_4 qui conduit à la formation prédominante de gypse (63.78%) lequel est mélangé à la calcite (26.39%) et à une faible quantité de CSH-SiO₂ (09.83%). C'est le cas le plus défavorable pour lequel nous pronostiquons de mauvais comportements mécaniques.

L'effet du Na_2SO_4 sur le béton ordinaire est aussi négatif mais d'une façon plus moindre par rapport à l'effet du H_2SO_4 . Il permet la formation d'une quantité de gypse de 19.64% lequel est mélangé à la calcite $CaCO_3$ (66.64%) avec une quantité faible de CSH-SiO₂ (19.64%). Résultat très proche au résultat du DRX.

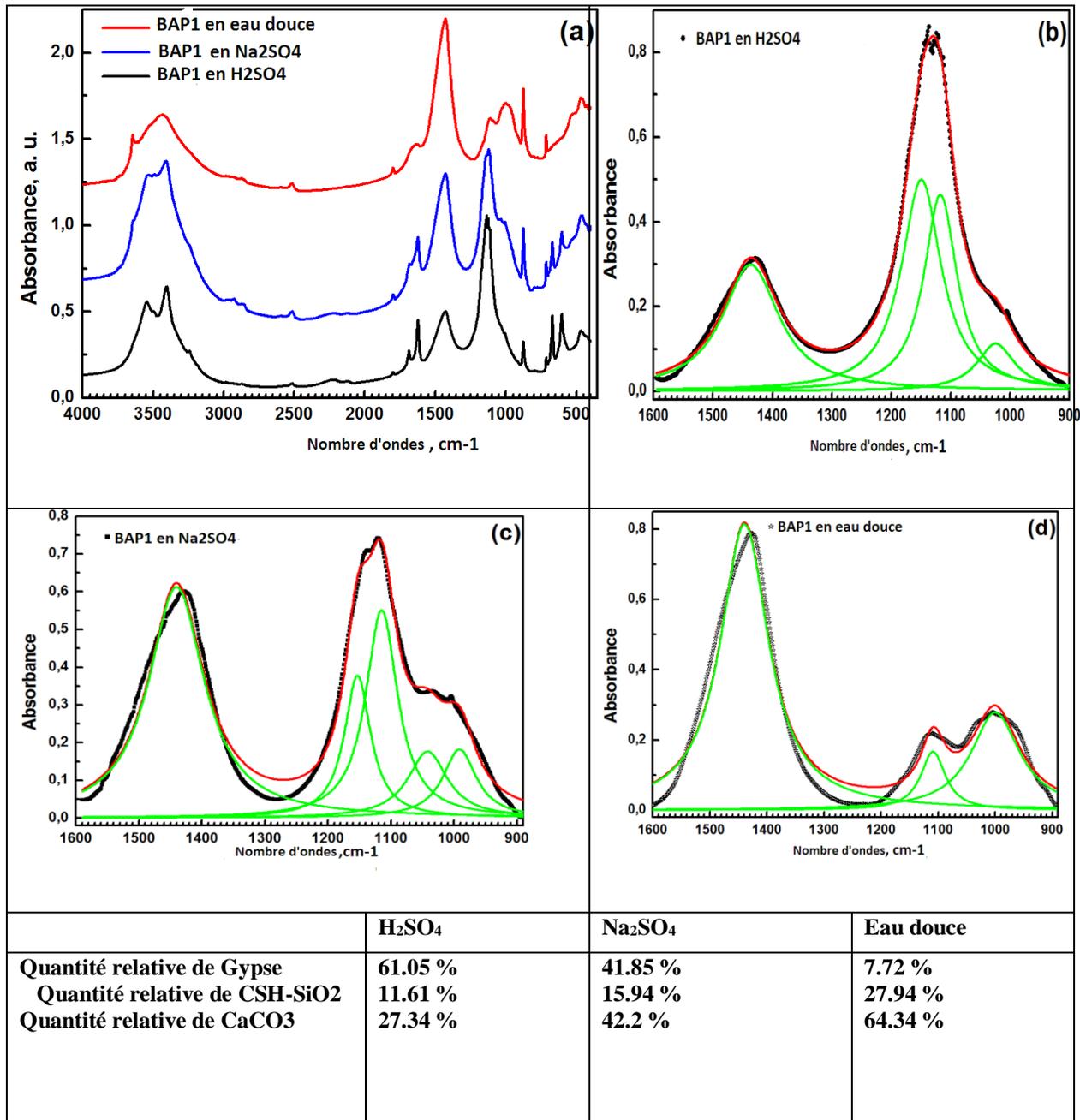


Figure 6.11 : Différents spectres du BAP1 immergé dans les différents milieux et le pourcentage des phases formées après six mois

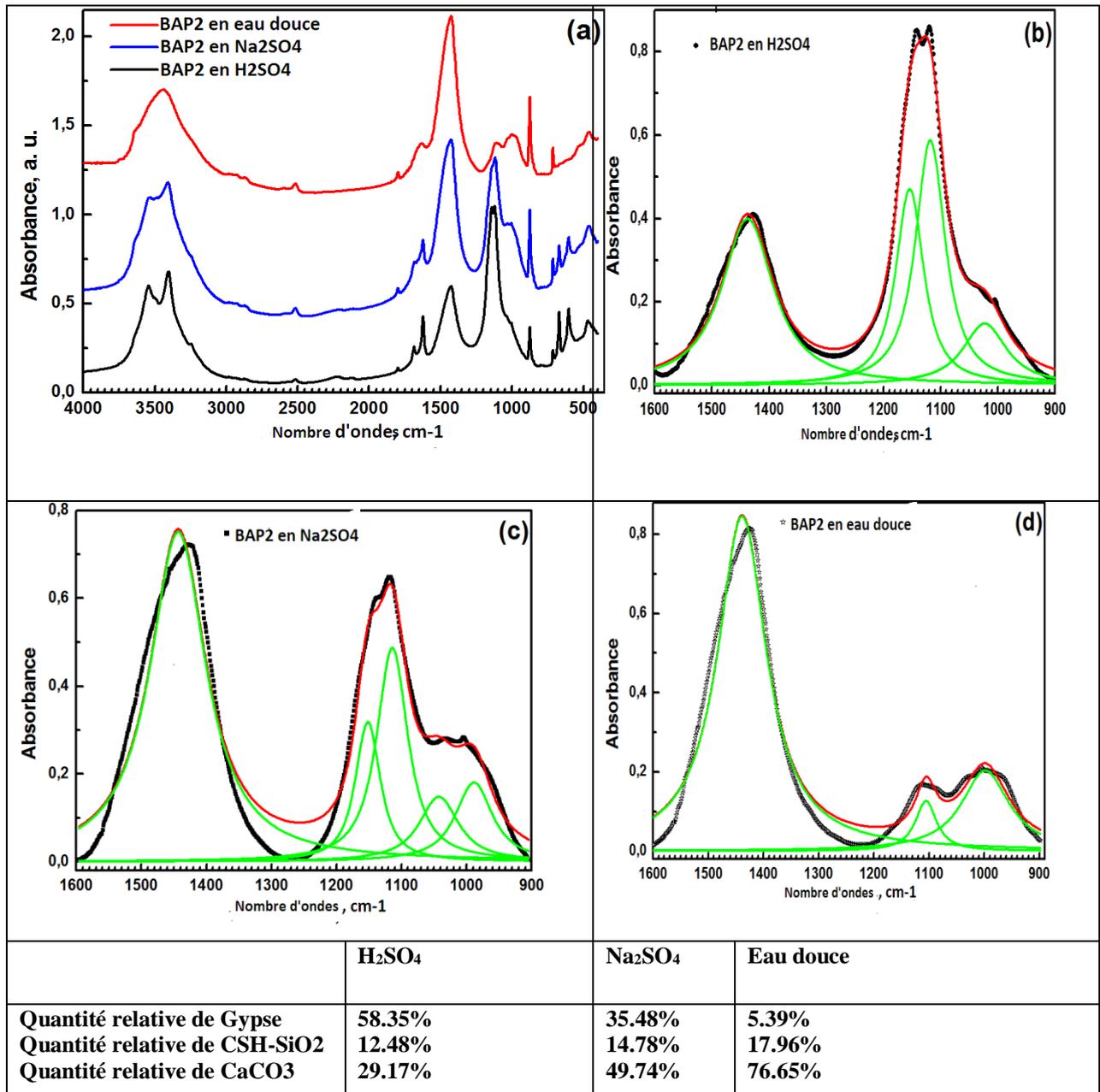


Figure 6.12: Différents spectres du BAP2 immergé dans les différents milieux et le pourcentage des phases formées après six mois

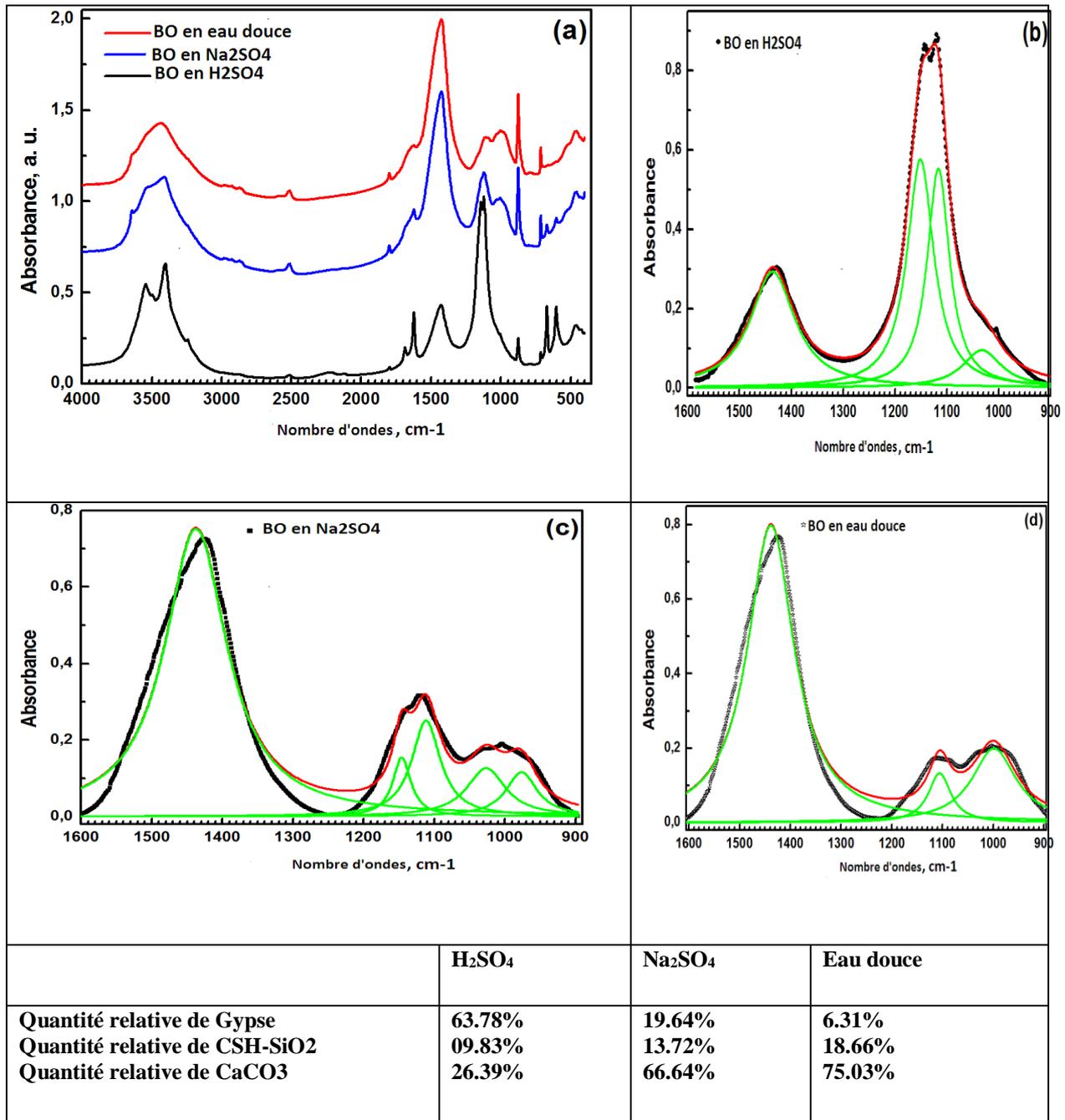


Figure 6.13 : Différents spectres du BO immergé dans les différents milieux et le pourcentage des phases formées après six mois

6.5.2.3 Analyse au microscope électronique à balayage (MEB)

Les observations au MEB permettent donc de rendre compte de la microstructure des bétons, des défauts inclus, de microfissures, et de porosités. Lorsque ces observations sont couplées à des analyses chimiques par EDX on peut reconnaître les phases présentes et remonter à leurs influence sur la durabilité de ces matériaux. Des observations MEB des différents bétons, et des matériaux utilisés ont été effectuées. D'une manière globale, ces observations corroborent avec les résultats d'analyses DRX.

Les images MEB, et les analyses EDX correspondantes sont exposés sur les figures 6.14 ; 6.15 ; et 6.16 ci-dessous. Nous avons réalisé les observations sur les différents bétons que nous avons caractérisé, observé, et aussi testé mécaniquement afin de relier entre les différents protagonistes constituant les échantillons, et les performances obtenus

Il est à noter que dans toutes les analyses, la présence de l'Ag est due à l'étape préliminaire de préparation des échantillons par métallisation afin qu'ils deviennent conducteurs ce qui optimisera la qualité des images obtenues

Les images MEB correspondantes aux différents bétons (BAP1, BAP2, et BO) immergés dans l'eau douce pendant six mois, montrent que ces bétons présentent des structures homogènes et de bonne répartition des grains, et les analyses EDX correspondantes révèlent la présence de l'oxygène (O), du calcium (Ca), du silicium (Si), l'aluminium (Al), le fer (Fe), le magnésium (Mg), Cette analyse confirme ainsi la présence de la calcite (CaCO_3), et des silicates et silices (CSH- SiO_2) pour le BAP2 et éventuellement une faible présence de sulfates pour le BAP1 et le béton ordinaire. Donc à l'eau douce tous les bétons étaient sains et ne contiennent pas de l'étringite ou de quantité négligeable seulement. Ces résultats ont été confirmé par l'étude macroscopique.

Pour les échantillons immergés dans la solution 5% Na_2SO_4 les images MEB montrent des reliefs hétérogènes présentant des fissurations nettes pour le BAP1, des pores pour le BAP2, et une mauvaise répartition de micro galets pour le béton ordinaire.

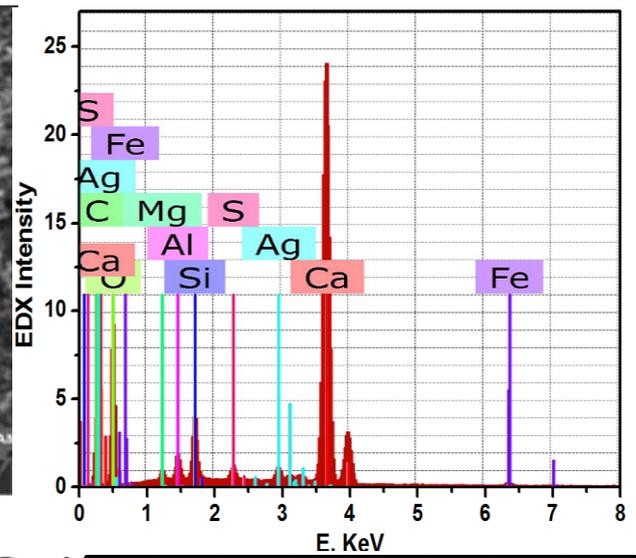
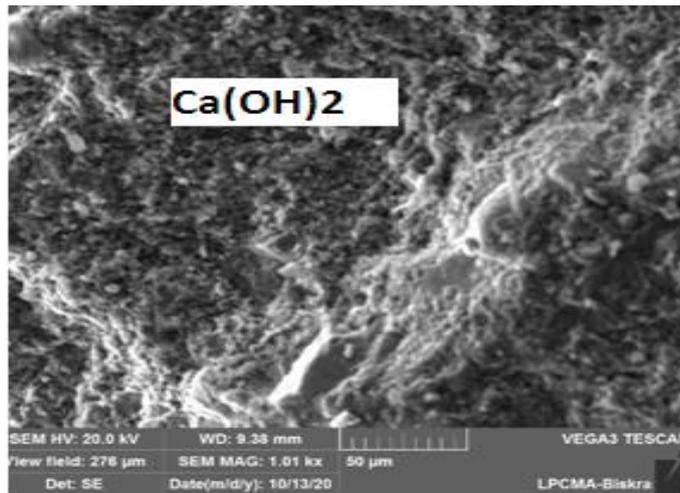
Les analyses EDX correspondantes révèlent une plus importante quantité de l'élément soufre (S), ce qui indique une plus importante présence de matériau sulfaté tel le gypse, ce qui explique qu'ils sont soumis à une attaque sulfatique externe. Donc l'immersion de bétons dans la solution 5% Na_2SO_4 permet de rendre les aspects des bétons très hétérogènes, en présentant des microfissurations, et des cavités liés aux réactions du béton avec ses sulfates.

La dégradation des échantillons immergés dans la solution 5% H_2SO_4 est plus grave, les images MEB correspondantes révèlent des faciès plus hétérogènes, renfermant des grains de

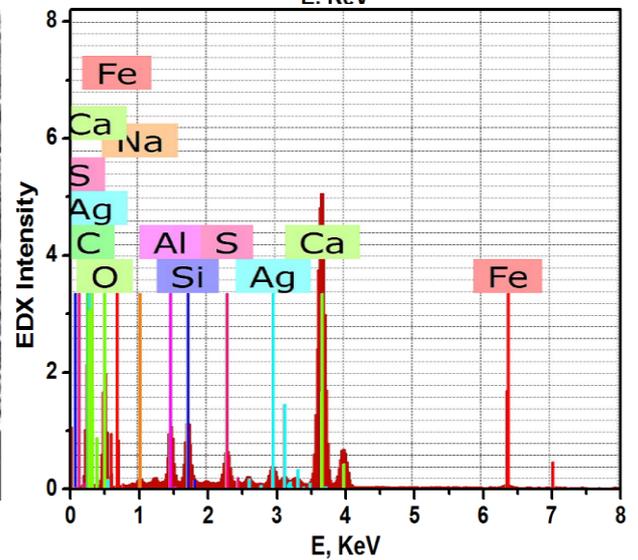
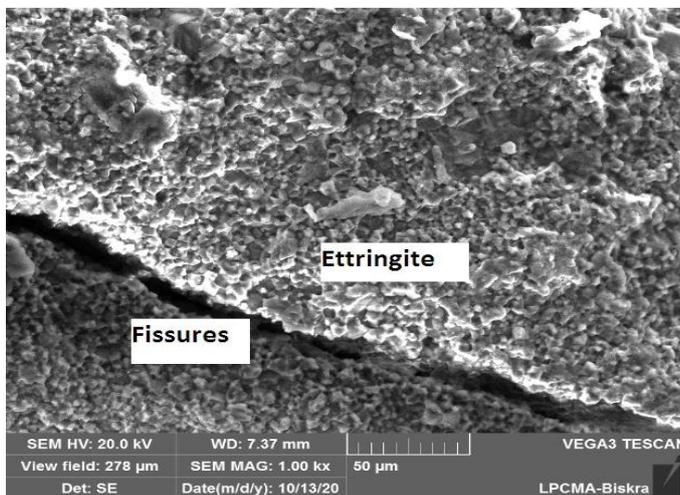
géométries très diverses, ces variétés de la géométrie et de la taille des grains témoignent de la présence de plusieurs constituants de compositions chimiques différentes. Certains échantillons du BO en H₂SO₄ présentent des surfaces à faciès tranchant contenant des vides, permettant de prévoir un comportement fragile.

La présence d'aiguilles d'ettringite est détectée dans tous les échantillons. Ce sont les signes d'une attaque sulfatique externe significative. L'analyse EDX de ces échantillons confirme la présence très importante de l'élément S, à l'origine de la formation du gypse et d'ettringite.

Après six mois eau douce



Après six mois en 5% Na₂SO₄



Après six mois en H₂SO₄

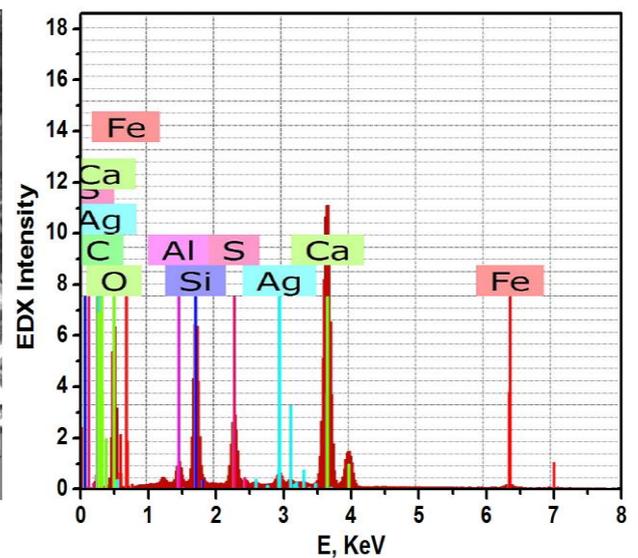
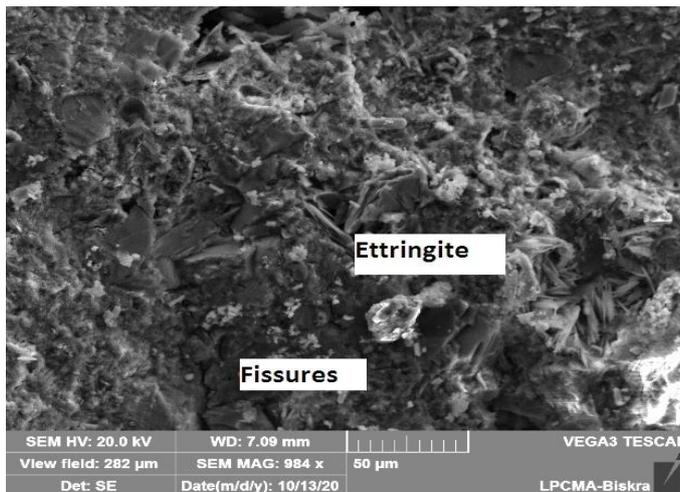
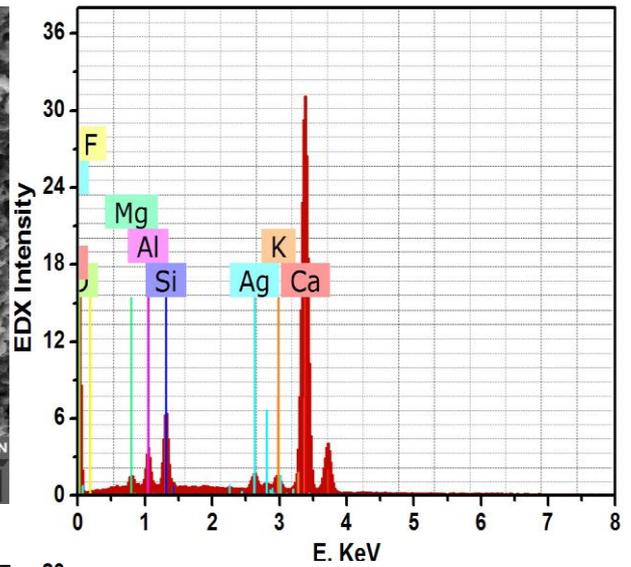
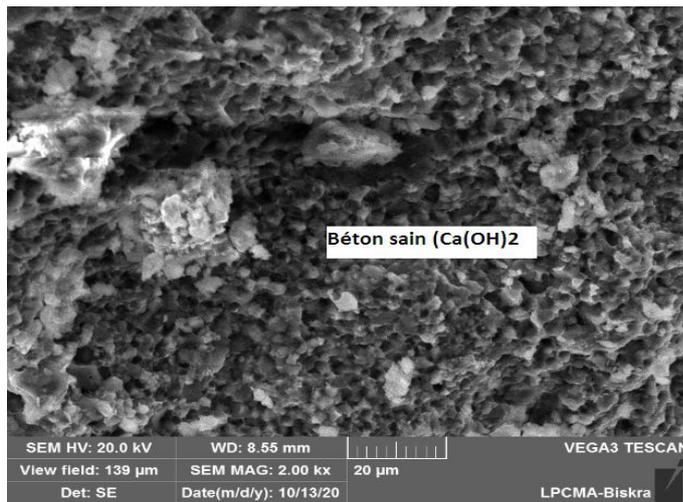
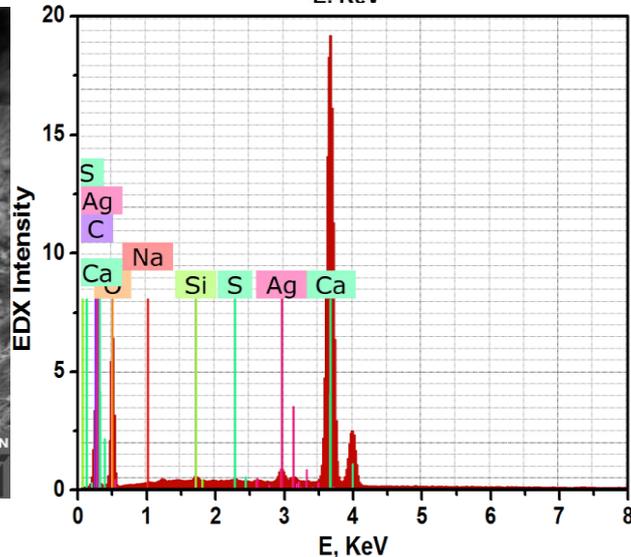
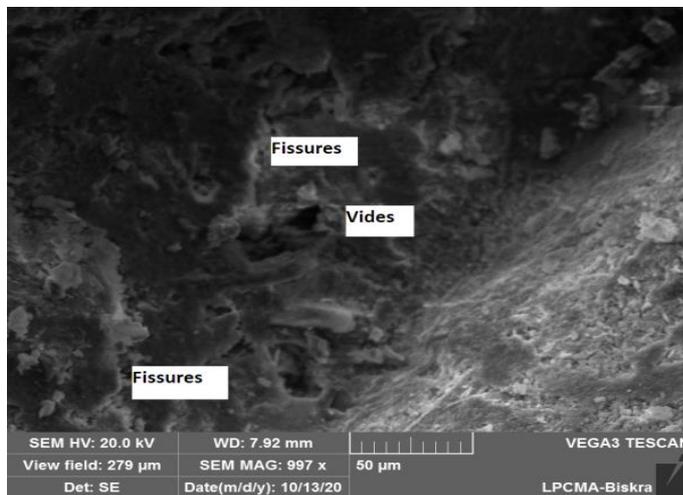


Figure 6.14 : Microphotographies du BAP1 dans les différents milieux

Après six mois eau douce



Après six mois en 5% Na₂SO₄



Après six mois en H₂SO₄

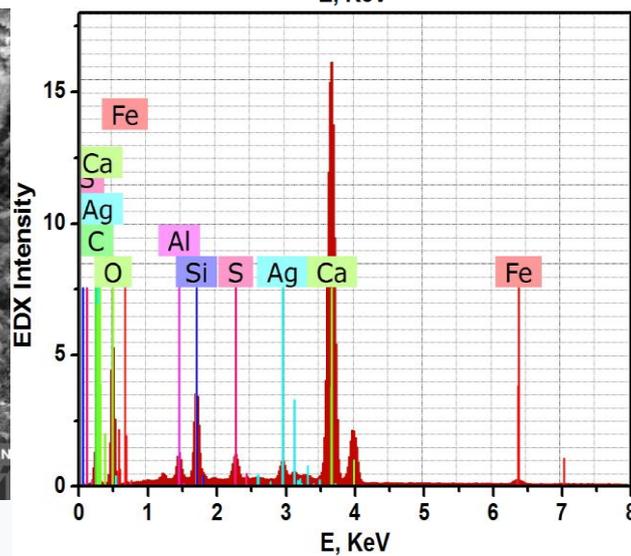
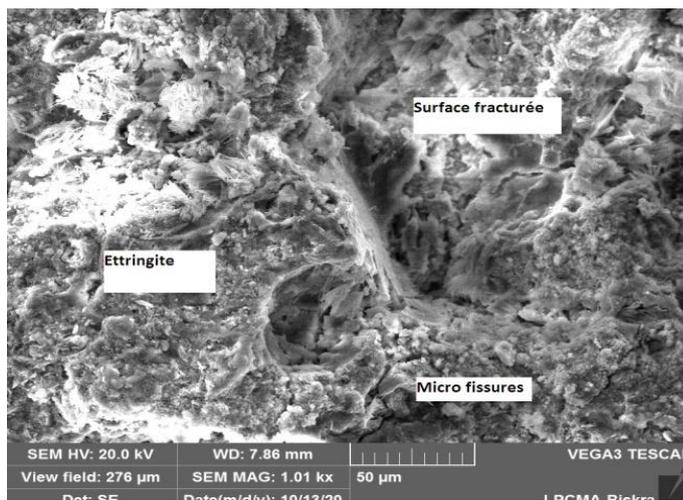
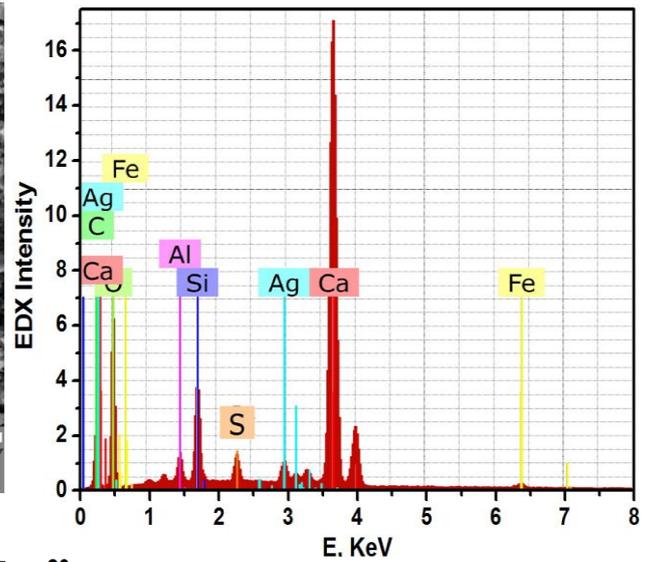
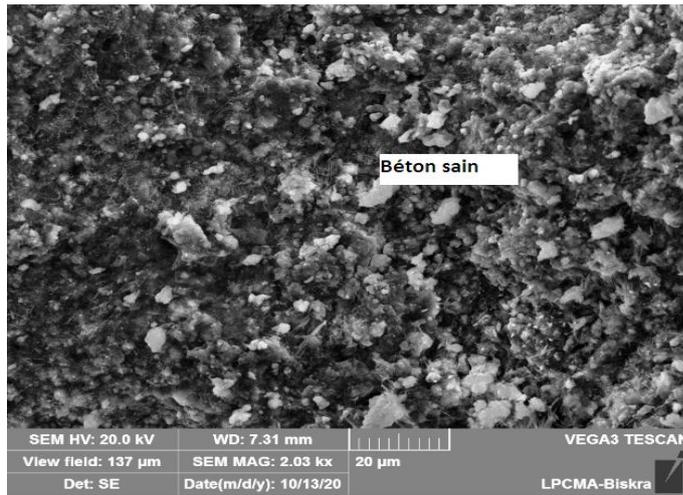
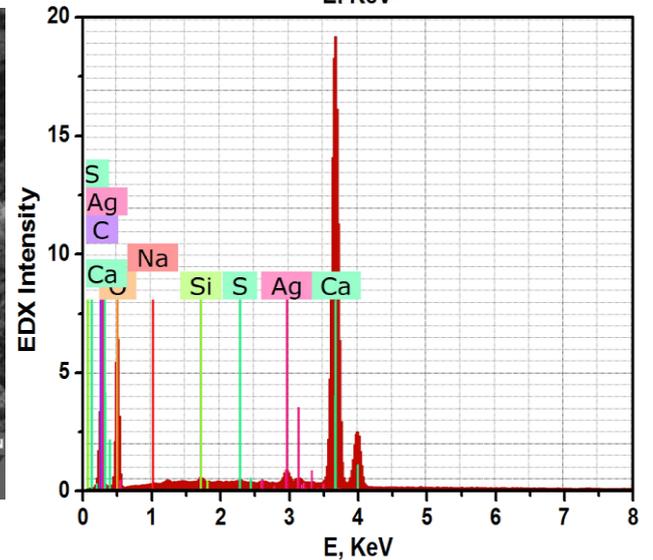
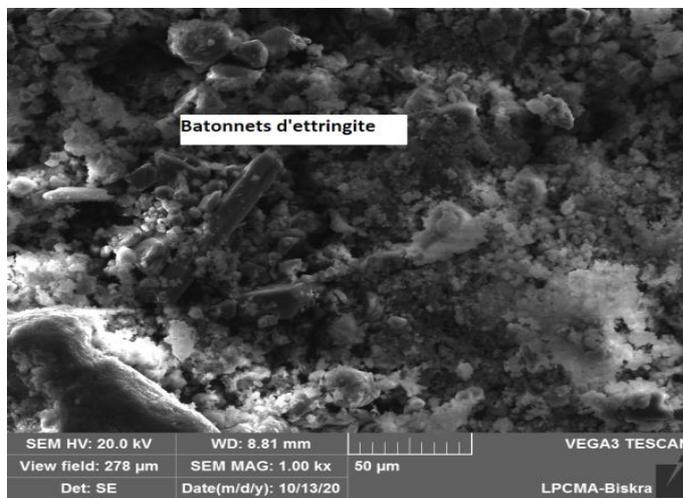


Figure 6.15 : Microphotographies du BAP2 dans les différents milieux

Après six mois eau douce



Après six mois en 5% Na₂SO₄



Après six mois en H₂SO₄

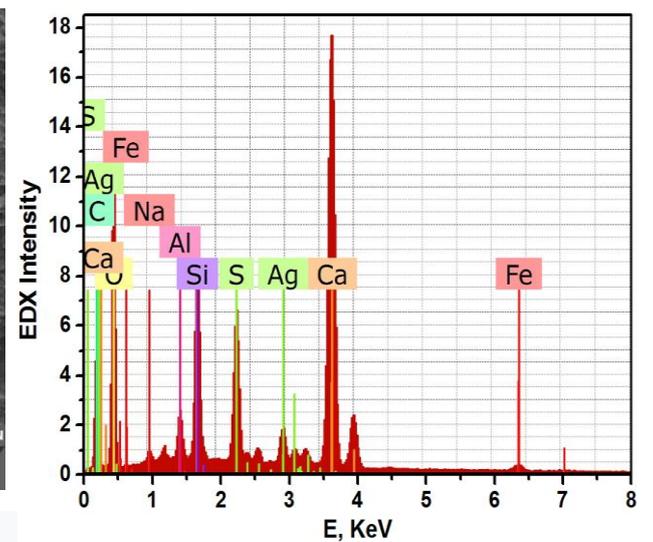
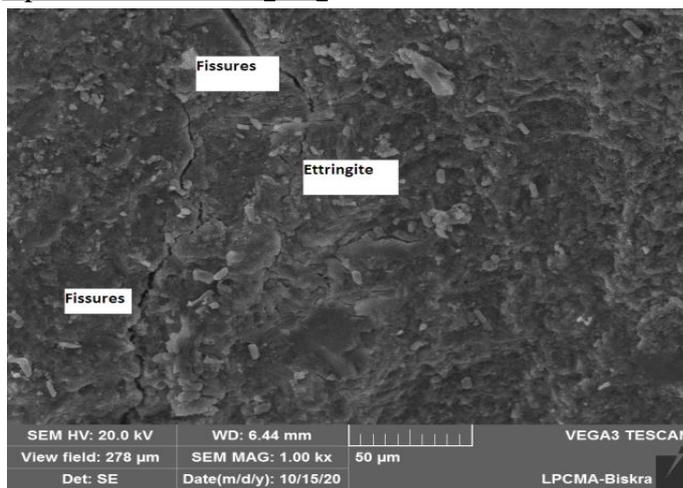


Figure 6.16 : Microphotographies du béton ordinaire dans les différents milieux

6.6 Conclusion

À partir des résultats trouvés dans notre étude sur l'effet du climat aride sur les propriétés de la durabilité, nous pouvons conclure les points suivants :

- La porosité accessible à l'eau se diminue avec le temps quelque soit le mode de murissement mais plus autant au béton vibré que le béton autoplaçant.
- A un climat aride la porosité accessible à l'eau des bétons autoplaçants est plus élevée que celle du béton vibré.
- Les bétons autoplaçants incorporant du filler calcaire à un climat aride présentent une diminution de la porosité par rapport aux bétons autoplaçants sans substitution.
- Les bétons muris dans l'eau présentent une diminution de la porosité ouverte par rapport aux bétons exposés à l'air libre.
- Au contraire de la porosité, Les bétons autoplaçants incorporant du filler calcaire à un climat aride présentent un taux d'absorption plus élevé par rapport aux BAP sans substitution et au béton ordinaire.
- Le coefficient de perméabilité des bétons autoplaçants incorporant du filler calcaire, est inférieur par rapport aux BAP sans substitution et au béton ordinaire.
- Le mode de murissement dans l'eau est très bénéfique pour les propriétés de durabilité des bétons dans un climat chaud.

Cependant le suivi de l'attaque sulfatique (5%Na₂SO₄ et 5% H₂SO₄) combinée au climat chaud de différents bétons nous conduit aux résultats suivants :

- Dans l'eau douce quelque soit le mode de mûrissement, la variation de masse de différents bétons reste stationnaire après la première semaine d'immersion, mais avec une légère supériorité pour les bétons exposés à l'air libre.
- Dans la solution 5% Na₂SO₄, les différents bétons exposés à l'air libre ont connu des variations de masse plus grande par rapport aux bétons muris dans l'eau. Résultat explique l'effet bénéfique de la cure humide pour le béton.
- Les BAP avec ou sans substitutions ont enregistré des variations de masse inférieures par rapport au béton ordinaire, ce qui explique l'avantage du BAP dans un climat aride.
- Dans la solution 5% H₂SO₄, le BAP2 incorporant du filler calcaire est moins dégradé par rapport au BAP1 sans substitutions et au béton ordinaire, ce qui explique l'effet bénéfique des fillers calcaires vis-à-vis aux attaques sulfatiques.

Chapitre 6 : Effet du climat chaud sur les indicateurs de durabilité du BAP

- L'immersion dans l'eau douce pendant six mois, provoque l'augmentation de la résistance à la compression de tous les bétons et quel que soit le mode de mûrissement, notamment pour le BAP incorporant des fillers calcaires.
- Le suivi du vieillissement des bétons confectionnés et muris dans un climat aride pendant 24 semaines par la solution d'acide sulfurique est plus intense par rapport à la solution de sulfate de sodium.
- Le test/vieillissement sous l'eau douce ne déstabilise pas le béton.
- Les microstructures du béton dégradé dans l'acide H_2SO_4 étudiés par DRX, FTIR et le MEB présentent l'existence d'une quantité considérable de gypse, et une faible quantité de portlandite, ce gypse occupe un volume considérable et remplace la calcite et les silicates. La présence d'une quantité de gypse associée à la présence de l'ettringite, favorise la formation de phases nuisibles au béton.
- L'effet de Na_2SO_4 , est moindre mais permet aussi de convertir une quantité de calcite, et de silicates en gypse.
- L'immersion dans l'eau douce ne semble pas affecter de manière tangible la qualité du béton.
- Les spectres DRX permettent de rendre compte parfaitement des diverses séquences qui se produisent lors des tests réalisés, et s'avèrent en tant qu'outil très efficace dans ce genre de travaux..
- Les résultats des résistances à la compression des bétons vieillis dans 5% H_2SO_4 sont catastrophiques comparativement aux bétons séjournés sous 5% Na_2SO_4 ou l'eau douce après 24 semaines d'immersion car il favorise la formation de phases tel le gypse, l'ettringite, et diminue par conséquent l'effet des autres phases tel la calcite, les silicates, et le quartz.
- La substitution des fillers calcaires est bénéfique pour conserver la meilleure résistance dans un environnement sulfatique, tel que sa chute de la résistance est d'environ de 80.54% contre 90.56% pour le BAP1 sans substitution et 88.75% pour le béton ordinaire.

Conclusion générale et perspectives

Notre étude s'inscrit dans le contexte du comportement des BAP dans les zones arides et semi arides, et l'effet du climat chaud qui caractérise ces zones sur leurs propriétés rhéologique, physico-chimique et mécanique. Cette étude vise à répondre à la question objective posée au début de la recherche : Est ce que le BAP avec sa distinction, peut subir sous un climat aride (climat chaud) les mêmes incidences que peut subir un béton ordinaire?

À cet effet notre programme expérimental a fixé les paramètres suivants :

- les compositions choisies ont conduit à l'étude des formulations suivantes :
 - BAP1 (100%C) sans substitutions
 - BAP2 incorporant des fillers calcaires (24.73%)
 - Béton ordinaire (BO)
- Tous les bétons ont été préparés et confectionnés dans des conditions climatiques assez sévères :
 - Température moyenne à l'air libre variable entre 40°C et 55°C.
 - Température moyenne sous l'ombre variable entre 30°C et 42°C ;
 - Humidité variable entre 15% et 40% ;
 - La vitesse moyenne du vent est de 4m/s.
 - nous avons adopté deux modes de murissement:
 - 3- Mode 1 : à l'air libre et sous rayons solaires avec une température entre 40°C et 55°C, humidité relative entre 15 et 40%, et vent n'excède pas 4m/seconde. Ces conditions se sont les conditions réelles de nos chantiers au sud.
 - 4- Mode 2 : sous l'eau avec une température entre 20°C et 22°C et humidité relative de 100% jusqu'au moment des essais. Ce mode est pris comme mode de béton de référence.
 - Pour l'étude de la durabilité face aux attaques sulfatiques, tous les bétons ont été immergés dans trois milieux différents de vieillissement accéléré afin de suivre l'effet des attaques :
 - Solution contenant 5% de sulfate de sodium Na_2SO_4 .
 - Solution contenant 5%de l'acide sulfurique H_2SO_4
 - Eau douce comme témoin.

À partir de ces données et aux différents essais effectués, nous exposons les différents résultats trouvés dans les chapitres précédents comme suit :

- Jusqu'à 25 minutes après malaxage, le BAP confectionné avec un rapport G/S proche de 1, et sous une température supérieure à 35°C et une humidité oscille entre 11 et 28% garde son autoplacement.
- Juste après malaxage l'effet des fillers calcaires sur la fluidité des BAP est positif, mais avec le temps, la perte de la fluidité devient plus remarquable et très rapide.
- Une température ambiante dépassant les 35°C conduit à une évolution rapide de la résistance à la compression aux premiers âges de différents bétons (BAP et BO).
- A long terme (120 jours), et sans aucune cure, la température élevée supérieure à 35°C provoque une chute considérable de la résistance à la compression.
- A une température élevée on constate la favorisation du BAP sans substitution, qui a marqué de bonne résistance comparablement au BAP contenant des fillers calcaires ou et le béton ordinaire, soit à jeunes âges soit à long terme.
- La substitution d'une portion de ciment (24.73%) par des fillers calcaires est positive pour stopper ou minimiser la chute de la résistance à la compression à long terme et sous une température élevée (35°C), avec un taux de 5.40% simplement contre 9.43% pour le BAP sans substitution et 7.5% pour le béton ordinaire.
- L'effet de cure dans l'eau est très bénéfique pour garder une résistance croissante même après 120 jours.
- La résistance à la traction a les mêmes tendances que la résistance à la compression.
- Les bétons autoplaçants sans substitutions ont exprimé des modules élastiques plus élevés, par rapport au béton incorporant des fillers calcaires et au béton ordinaire. Cette élévation est peut être due à leurs résistances les plus élevées.
- Les modules élastiques des bétons muris dans l'eau sont plus élevés par rapport à ceux des bétons exposés à l'air libre dans un climat chaud et sec.
- La porosité accessible à l'eau se diminue avec le temps quelque soit le mode de murissement mais plus autant au béton vibré que le béton autoplaçant.
- A un climat aride la porosité accessible à l'eau des bétons autoplaçants est plus élevée que celle du béton vibré.
- Les bétons autoplaçants incorporant du filler calcaire à un climat aride présentent une diminution de la porosité par rapport aux bétons autoplaçants sans substitution.
- Les bétons muris dans l'eau présentent une diminution de la porosité ouverte par rapport aux bétons exposés à l'air libre.

- Les résultats des essais d'absorption sont plus ou moins compatibles avec les résultats de l'essai de la porosité accessible à l'eau, tant que la porosité est élevée, l'absorption par immersion est aussi élevée.
- Le coefficient de perméabilité des bétons autoplaçants incorporant du filler calcaire, est inférieur par rapport aux BAP sans substitution et au béton ordinaire.
- Le suivi du vieillissement des bétons confectionnés et muris dans un climat aride pendant 24 semaines par la solution d'acide sulfurique est plus intense par rapport à la solution de sulfate de sodium.
- Le test/vieillissement sous l'eau douce ne déstabilise pas le béton.
- Les microstructures du béton dégradé dans l'acide H_2SO_4 étudiés par DRX, FTIR, et le MEB présentent l'existence d'une quantité considérable de gypse, et une faible quantité de portlandite, ce gypse occupe un volume considérable et remplace la calcite et les silicates. La présence d'une quantité de gypse associée à la présence de l'étringite, favorise la formation de phases nuisibles au béton.
- L'effet de 5% Na_2SO_4 , est moindre mais permet aussi de convertir une quantité de calcite, et de silicates en gypse.
- L'immersion dans l'eau douce ne semble pas affecter de manière tangible la qualité du béton.
- Les spectres DRX permettent de rendre compte parfaitement des diverses séquences qui se produisent lors des tests réalisés, et s'avèrent en tant qu'outil très efficace dans ce genre de travaux.
- Le BAP2 contenant des fillers calcaires paraît le moins attaquant par l'acide sulfurique avec une perte de 20% de son poids seulement, contre 30.9% pour le BAP1 sans substitution et 27% pour le béton ordinaire, résultat explique l'effet bénéfique de la substitution des fillers calcaires en réduisant considérablement la perte de masse vis-à-vis aux attaques par l'acide sulfurique.
- Les résultats des résistances à la compression des bétons vieillissés dans l'acide sulfurique sont catastrophiques comparativement aux bétons séjournés sous le 5% Na_2SO_4 ou l'eau douce après 24 semaines d'immersion car il favorise la formation de phases tel le gypse, l'étringite, et diminue par conséquent l'effet des autres phases tel la calcite, les silicates, et le quartz.
- La substitution des fillers calcaires est bénéfique pour conserver la meilleure résistance dans un environnement sulfatique, tel que sa chute de la résistance est

d'environ de 80.54% contre 90.56% pour le BAP sans substitution et 88.75% pour le béton ordinaire.

Ces résultats peuvent nous répondre à notre question posée au début, et de conclure qu'il n'y a pas une grande différence tant à l'état durci ou aux propriétés de la durabilité entre BAP et béton ordinaire dans un climat aride tel qu'il existe dans notre région (région de Biskra). Avec l'avantage bien sûr du BAP à l'état frais vu à sa fluidité et son homogénéité. Ainsi qu'il reste d'approfondir les études sur :

- L'utilisation des matériaux locaux pour la formulation des BAP et leurs effets sur la résistance et la durabilité notamment les fillers calcaires.
- Les moyens de maintenir l'autoplaçance du BAP pendant une durée plus élevée soit avec l'ajout de l'eau ou du superplastifiant, et l'effet de ces moyens sur la résistance et la durabilité.
- L'impact du temps de transport du BAP dans un climat chaud et l'effet de l'agitation continue.
- L'effet du climat chaud sur les propriétés différées des BAP (retrait et fluage).

Références bibliographiques

A

- [**Abduljabar, 2008**]: Al-abduljabbar A.H. *Effect of time and temperature on workability of SCC*. Source: <http://faculty.ksu.edu.sa/28745/DocLib/Hisham.SCC.pd>
- [**ACI305, 1991**]: American Concrete Institute. *Report of ACI Committee 305 on Hot Weather Concreting*, ACI Materials Jour., Vol. 88, N° 4, P.422. 1991.
- [**ACI305, 2010**]: American Concrete Institute. *Guide to Hot Weather Concreting*. Reported b ACI Committee 305 of American Concrete Institute, 28p, October 2010.
- [**AFGC, 2000**]: Association française de Génie Civil. *Bétons Auto-Plaçants. Recommandations provisoires*, 63p, Juillet 2002, 63. 2002.
- [**AFGC2008**]: Association Française de Génie Civil. Groupe de travail. *Recommandations pour l'emploi des bétons auto-plaçants*. AFGC / PN B@P. Documents scientifiques et techniques. Janvier 2008.
- [**Almusalam, 2001**]: Almusalam A. A. *Effect of environmental conditions on the properties of fresh and hardened concrete*. Cement Concrete Composites. 23, P.353-361. (2001).
- [**Amoudi et al, 1995**]: Amoudi A. O. S. B., Almusalam A. A, Khan M. M., Maslehuddin M. *Effect of hot weather on the strength of plain and blended cement*. In proceeding of the fourth Saudi Engineering Conference, vol II, Jeddah Arabia, p.193-9. 1995.
- [**Assie, 2004**]: S. Assie. *Durabilité des bétons autoplaçants*. Thèse de doctorat de l'INSA de Toulouse. 29 Octobre 2004.
- [**Aubert, 1983**]: G. Aubert. *Observation sur les caractéristiques, la dénomination et la classification des sols salés salsodiques*. Cah. O.R.S.T.O.M. Sér.Pédol. 20(1) : 73-78. 1983.
- [**Azziez, 2017**]: Azziez.M.N. *Attaques sulfatiques externes des matériaux cimentaires : influence de la température*. Thèse de doctorat LMD. Université Aboubakr Belkaid. Tlemcen. Algérie. 2017.
- [**Azzouz et al, 2004**]: Azzouz.L., Bouchicha.M., Kenai.S. *Influence des paramètres de cure sur la résistance du béton dans un climat chaud*, revue Algérie équipement janvier 2004.

B

- [**Bahri, 2012**]: Bahri.Joudi.Imène. *Influence des sables fillérisés calcaires sur les propriétés des bétons courants et superplastifiés. Un exemple tunisien*. Thèse de doctorat de l'Université de Lorraine, France & de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tunis. 10.11.2012.
- [**Beeralingowda et al, 2013**]: B. Beeralingowda., V. D. Gundakalle. *The effect of addition of limestone powder on the properties of self compacting concrete*. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (An ISO 3297: 2007 Certified Organization) Vol. 2, Issue 9. 2013.
- [**Belaribi, 2015**]: Belaribi.Omar. *Durabilité des bétons autoplaçants à base de vase et de pouzzolane*. Thèse de doctorat. Université de Mostaganem 2015.
- [**Bellifa et al, 2015**]: Bellifa Soufiane., Fouad Ghomari., Mohammed Amine., Boukli Hacene., Omar Taleb. *Influence des fillers calcaires sur la porosité et la distribution porale des pâtes autoplaçantes*. Revue : Nature & Technologie. A- Sciences fondamentales et Engineering, n° 12. (1). Pages 60 à 66. 2015.
- [**Bendjilali et al, 2012**]: K. Bendjilali., et Z. Makhloufi. *Study of the effect of the nature of aggregates on the mechanical behavior of the concrete in hot and dry zones. Contribution of the curing*. 2012.
- [**Bessa ,2004**]: Anissa Bessa Badereddine. *Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques, mécaniques et de durabilités des mortiers*. Thèse de doctorat de l'Ecole Doctorale Sciences et Ingénierie. Université de Cergy-Pontoise. 25.Juin 2004.
- [**Berhane, 1992**]: Berhane.Z. *The Behaviour of Concrete in Hot Climates*. Materials and Structures, vol. 25, 147, pp. 157-162. 1992.

[Bétonlab Pro2] : *Différentes approches pour la formulation des bétons autoplaçants Influence sur les caractéristiques rhéologiques et mécaniques*. Philippe Turcry, Ahmed Loukili R&DO, Laboratoire de Génie Civil de Nantes Saint Nazaire Ecole Centrale de Nantes, 1 rue de la Noë BP 92101 F-44321 Nantes cedex 3

[Bétonnage par temps chaud] : *Chapitre 2, les bétons courants, 2.7.1 le bétonnage par temps chaud* PP78-83.

[Béton Provincial Québec] : *Bétonnage par temps chaud*, www.betonprovincial.com

[Boel et al, 2002] : Boel V., Audenaert K., De Schutter G. *Pore structure of self-compacting concrete*, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, ACBM center, pp. 837-843, 12-13.November 2002.

[Boudchicha, 2007] : Boudchicha. A. *Utilisation des additions minérales et des adjuvants fluidifiants pour l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons*, Thèse de doctorat de l'Université Mentouri Constantine.17 Decembre2007.

[Boudraa et al, 2015] : Sara Boudraa., Salah Eddine Bensebti., Rachid Lassoued. *Effet de l'ajout de filler calcaire sur le retrait des bétons autoplaçants*. HAL Id: hal-01167614 <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01167614>.2015.

[Boukni, 2012] :Boukni.Bariza. *Contribution a l'étude expérimentale du comportement thermomécanique des bétons autoplaçants*. Thèse de doctorat Université de Constantine 2012.

C

[Chabbi, 2003] : Khédidja Chabbi. *Bétonnage et comportement du béton en milieu aride*. Mémoire de magister USTHB/FGC.2003.

[Celik Ozyildirim et al, 2003] : Celik Ozyildirim and Stephen Lane. *Final report evaluation of self-consolidating concrete*. In Cooperation with the U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration Charlottesville, Virginia.June. VTRC 03-R13, p1-18.2003.

[Cecilia et al, 2018] : Ana Cecilia Vieira da Nóbregaa., Michel Mouretb., Franck Cassagnabereb., Vinh-An Le. *Improved 28-day compressive strength of SCC mixed and cured in hot weather: Non-conventional behavior*. Construction and Building Materials 173 (2018) 650-661.2018.

[Chopin et al, 2003] : Chopin D., Francy O., Lebourgeois S., Rougeau P. *Creep and shrinkage of heat-cured SCC*. Proceedings of the Third International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 672-683.2003.

[Climat Algérie, 2020] : <https://www.climatsetvoyages.com/climat/algerie>

[Climat des zones arides] : <http://www.fao.org/3/t0122f/t0122f03.htm>

[Courard et al, 2014] : Luc Courard and Frédéric Michel. *Limestone fillers cement based composites : Effects of blast furnace slags on fresh and hardened properties*. Université de Liège, Département ArGEnCo, Chemin des Chevreuils, 1 – 4000 Liege (Belgique).2014.

[CSTC2004] : CSTC (2004).*Normalisation – Réglementation – Certification*, Les Dossiers du CSTC – Cahier n° 9 – 4e trimestre– pages1-4.2004.

[Cygan et al, 2016] : G. Cygan., J. Gołaszewski, M. Drewniok.*The effect of temperatur on the properties of fresh self-compacting concrete*. De GRYETER OPEN –Archives of civil engineering. Vol.LXII Issue3.2016.

D

[Daoud, 1997] : Mohamed Daoud. *Influence des conditions climatiques sur l'état des contraintes d'un béton de masse dans un barrage*. Thèse de doctorat université de Sherbrooke Faculte des sciences appliquées.1997.

[Davood&Siham 2015] : Davood Niknezhad., Siham Kamali-Bernard. *Etude du retrait et des propriétés de transport d'Eco-BAP à base d'additions minérales*. 33èmes Rencontres de l'AUGC, ISABTP/UPPA, Anglet, 27 au 29 mai 2015.

[**Demirboga et al, 2004**] : Demirboğa. Ramazan., Türkmen. İbrahim., et Karakoc. Mehmet B. *Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixed concrete*. Cement and concrete research. Vol. 34, No 12, p. 2329-2336.2004.

[**Denecker, 2014**] : Mélanie. Denecker. *Le rôle des sulfates de sodium dans l'altération des pierres du patrimoine bâti : méthodes indirectes d'identification pour l'approche expérimentale*. Thèse de doctorat de l'école doctorale sciences de l'ingénierie de l'Université de Cergy-Pontoise.20.06.2014.

[**Diedirich, 2010**] : Pacco Diedirich. *Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton*. Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III - Paul Sabatier.17.12.2010.

[**Divet, 2002**] : Divet. Loïc. *Comment se prémunir des réactions sulfatiques dans les bétons ? Point sur les normes actuelles et quelques recommandations*. Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées - 240 – septembre- octobre RÉF. 4447 - PP. 87-94. 2002.

[**Dodson et al, 1979**] : Dodson C. J., and Rajagopalan K. S. *Field tests verify temperature effects on concrete strength*. Concrete International, 1, N°. 12.1979.

[**Drebla, 2015**] : Derabla.Riad. *Influence des additions minérales sur le comportement au jeune âge et à long terme des bétons autoplaçants traités thermiquement*. Thèse de doctorat. Guelma 2015.

[**Dreux &Festa1998**] : Dreux.G & J.Festa. *Nouveau guide de béton et ses constituants*. 8^{ème} Edition Eyrolles.1998.

[**Durant.1983**] : Durant.J.H. *Les sols irrigables* .Presses universitaires de la France, Paris p 322, 1983.

E

[**ENV 206-1**] : 206-1: Béton - Partie 1. *Spécification, performances, production et conformité*.2004.

[**EFNARC2002**] : EFNARC European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures. *Specifications and Guidelines for Self-Compacting Concrete* February 2002. pp. 1-32. (www.efnarc.org)

[**EFNARC 2005**] : EFNARC European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures. *Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*. May2005. pp 1– 68.2005. <https://www.feb.unesp.br/pbastos/c.especiais/Efnarc.pdf>

[**ELHilali et al, 2009**] : A. El Hilali., E. Ghorbel., P. Gonnon. *Influence des fillers sur l'ouvrabilité des bétons autoplaçants*. Revue. Volume X – n° x/année, pages 1 à X.2009.

[**El Hilali, 2009**] : A. El Hilali. *Étude Expérimentale de la Rhéologie et du Comportement des bétons autoplaçants (BAP) : Influence des Fines Calcaires et des fibres végétales*. Thèse de Doctorat. Université de Cergy-Pontoise.17Decembre 2009.

F

[**FAO.1990**] : Distribution Of Gypsiferous Soils By Countries, [consulted 04/21/2016, <http://www.fao.org/docrep/t0323e/t0323e02.htm#1.4> Classification of Gypsiferous Soils, , Food and Agriculture Organisation of the United Nations

[**Fevziye Akö et al, 1999**] : Fevziye, Aköz., Fikret, Türker., Sema, Koral., Nabi Yüzer. *Effects of raised temperature of sulfate solutions on the sulfate resistance of mortars with and without silica fume*. Cement and Concrete Research 29(4) .pp 537-544.1999.

G

[**Gadri & Guettala, 2015**] :K.Gadri., A .Guettala. *Evaluation du module d'élasticité à la compression à l'aide des techniques non destructives*. 22^{ème} Congrès Français de Mécanique Lyon, 24 au 28 Août.2015.

[**Galluci et al, 2006**] : E,Gallucci,, Xinyu, Zhang., K,Scrivener. *Influence de la température sur le développement microstructural des bétons*. Septième édition des Journées scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton (RF) ²B, Toulouse, France 19-20 juin 2006.

[**Gaynor et al, 1983**] : Gaynor R. D., Meininger R. C, and Khan T. S. *Effect of temperature and delivery time on concrete proportions, in Temperature Effects on concrete*. ASTM Sp. Tech. Publ. N°.858 .Philadelphia, Pa.1983.

[**GCI-714**] : Durabilité et réparation du béton. *Chapitre 2 notes de cours* pp160-185 – Université de Sherbrooke.

[**Ghafoori et al, 2010**] : [N.Ghafoori](#)., H.Diawara. *Influence of temperature on fresh performance of self – consolidating concrete*. Construction and Building Materials, 24, pp. 946-955.2010.

[**Ghrici et al, 2007**] : Ghrici M., Kenai S., Said-Mansour M. *Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements*. Cement & Concrete Composites 29 542–549. 2007.

[**Gibbs et al, 1999**] : Gibbs J.C, Zhu, W. *Strength of hardened of self- compacting concrete* . Proc. Of the first RILEM symposium on self-compacting concrete, Stockholm, 13-15 Sept1999.

[**Goetz et al, 2006**] : F.Goetz-Neunhoeffler and J. Neubauer. Refined ettringite, $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 (\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$ structure for quantitative X-ray diffraction analysis, Powder Diffraction 21(1), March 2006 JCPDS-ICDD)

[**Guettala, 2012**] : Salim. Guettala. *Contribution à l'étude de l'influence de l'ajout du sable de dune finement broyé au ciment sur les performances physico-mécanique, la déformabilité & la durabilité du béton*. Thèse de doctorat de l'université de Biskra 15.03.2012.

H

[**Hampton, 1981**] : HAMPTON J. S. *Extended Workability of Concrete Containing High-Range Water-Reducing Admixtures in Hot Weather, In Development in the Use of Superplasticizers*. ACI Spec. Publ. SP 68, Detroit, 1981, pp. 409-22.1981.

[**Hanna, 2009**] : Farès Hanna. *Propriétés mécaniques et physico-chimiques de Bétons autoplacants exposés à une température élevée*. Thèse de doctorat del' Ecole Doctorale Sciences et Ingénierie . Université de Cergy-Pontoise le 07.12.2009

[**Hoang et al, 2016**] : Hoang-Anh Nguyen, Ta-Peng Chang, Jeng-Ywan Shih, Chun-Tao Chen, Tien-Dung Nguyen. *Sulfate resistance of low energy SFC no-cement mortar*, Construction and Building Materials 102 (2016) 239–243.2016.

[**Holcim2004**] : *Le béton autocompactant*. Recommandation éditée par Holcim (Suisse) SA. Source: http://www.hcb.ch/holcimcms/uploads/CH/scc_productinfo_F0.pdf

[**Holcim ,2018**] :<https://www.holcimpartner.ch/fr/betonpraxis/beton-autoplacant>

I-J

[**Infociments, 2018**] : *Les bétons autoplacants* . <https://www.infociments.fr/betons/les-betons-autoplacants#>

[**Infoclimat**] : Temps réel de Biskra.

<https://www.infoclimat.fr/observations-meteo/tempsreel/biskra/60525.html?metar>

[**Joachim, 2004**] : Industries extractives dans les zones arides et semi-arides. *Planification et gestion de l'environnement*. Collection Gestion des Écosystèmes No 1, UICN, Gland, Suisse et Cambridge, Royaume-Uni 2004

K-L

[**Kanstad et al, 2003**] : Kanstad T., Hammer T.A., Bjontegaard.O., Sellevold E.J. *Mechanical properties of young concrete: Part I: Experimental results related to test methods and temperature effects*. Materials and Structures, Volume 36, May 2003, Number 4, pp. 218-225.2003.

[**Kapoor et al, 2003**] : Kapoor Y.P., Munn C., and Charif K. *Self-Compacting Concrete-An Economic Approach*. 7th International Conference on Concrete in Hot & Aggressive Environments, Manama, Kingdom of Bahrain, 13-15 October (2003). pp. 509-520

[**Khelifa, 2009**]: M.R.Khelifa. *Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants*. Thèse de doctorat Université de Constantine, Université d'Orléans 20/06/2009.

[**Kim et al, 2002**] : Kim K. J., Sang H. H., Young C. S. *Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete*. Part I. Experimental results. Cement and Concrete Research 32, 1087-1094, 2002.

[**LTPS, 2005**] : Laboratoire des travaux publics de sud (LTPS) d'Ouargla. *Rapports internes* (2005).

M-N

[**Maekawa et al. 1999**]: Maekawa, K., and Ozawa, K. *Development of SCC's prototype. (written in Japanese), Self-Compacting High-Performance Concrete*. SocialSystem Institute, 20-32. (1999).

[**Mamillan et al, 1989**]: Mamillan, Minard, Zanghellini. *Bétonnage par temps chaud. Connaissances actuelles et recommandations*. Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et de Travaux publics, n°474, pp. 78-119, 1989.

[**Martin et al, 2015**] : Martin Vysvaril, Patrik Bayer, MarkétaRovnaníková. *Microstructural Changes OF Fine-Grained Concrete Exposed to a Sulfate Attack*. Materials and technology 49 (2015) 6, 883–888

[**Mehta, 1975**] : MEHTA P.K. *Evaluation of sulfate resisting cements by a new test method*. Journal ACI. 72 (40), pp. 573-575, 1975

[**Mezghiche, 1996**] : Mezghiche B. *Résistance et déformabilité de Béton Basique*. Premier séminaire national en génie civil Biskra le 8-9 Décembre 1996.

[**Météo Algérie, 2020**] : Office national de la météorologie 2020 : <https://www.meteo.dz>

[**Michel et al, 2008**] : Frédéric Michel, Julie Pièrard, et Luc Courard. *Application du concept de performance équivalente aux bétons additionnés de fillers calcaires*. XXIV^{ème} Rencontres Universitaires de Génie Civil. Nancy, 4 au 6 juin 2008

[**Modjabi et al, 2006**] : F. Modjabi-Sangnier A, A. Ghezal A, B. Bissonnette A, M. Jolin A A CRIB. *Durabilité et compatibilité des réparations en béton autonivelant*. Septième édition des Journées scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton (RF)² B Toulouse, France 19-20 juin 2006

[**Molèz, 2003**] : L.Molèz. *Comportement des réparations structurales en béton : couplage des effets hydrique et mécanique*. Thèse de doctorat (PhD), Université de CACHAN (France 2003).

[**Mouallif et al, 2013**]: I.Mouallif., .Lasfar,A., Iatrach,M. ,Chergui,N.Barbe .*Influence du vieillissement sulfatique sur la résistance mécanique et la microstructure du béton*. 21ème Congrès Français de Mécanique Bordeaux, 26 au 30 août 2013

[**Mouret, 1997**] : Mouret. M. *Contribution à l'étude des phénomènes d'altération des résistances des bétons confectionnés par temps chaud*. Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, 1997.

[**Mouret et al, 2005**] : Mouret .M., Bascoul. A., Escadeillas. G. *Strength impairment of concrete mixed in hot weather: analysis in relation to physical and chemical properties of hardened concrete*. Magazine of Concrete Research, Vol. 57, 5, pp. 301-308, 2005.

[**Necira, 2018**] : Brahim. Necira. *Développement des bétons autoplaçants à haute performances : Influence de la composition*. Thèse de doctorat, Université de Biskra 29/11/2018.

[**Neville, 2000**] : Neville A. M. *Propriétés des bétons*. Editions Eyrolles, Paris, (2000).

[**Okamura et al. 1995**]: Okamura.H., K. Ozawa.,Ouchi.M. *Self-compacting high performance concrete*. Proceeding of the Fifth EA SEC, vol.3, pp.2381-2388. 1995.

[**Okamura et al, 1995**] : Okamura.H., Ozawa. K. *Mix design method for self-compacting concrete*. Proceedings of Japan Society of Civil Engineers 24.8 (496). 1995.

[**Okamura et al. 2000**]: Okamura H., Ozawa K., and Ouchi M. *Self-compacting concrete*. Structural Concrete. (1) :3-17. March 2000.

[Okamura et al, 2003] : Okamura.H and Ouchi.M. *Self-compacting concrete* . Journal of Advanced Concrete Technologie, V.1, No1-5-15, April 2003.

[Olivier et al, 2008] : J.P.Olivier and J.M.Torrenti, *la structure poreuse des bétons et les méthodes de transfert*, chapter, January 2008 p 61.

<https://www.researchgate.net/publication/290158099>

[Ouchi et al. 2003]: Ouchi, M., Nakamura, S., Osterson, T., Hallberg, S., Lwin, M. *Applications of Self-Compacting Concrete in Japan, Europe and the United States*. ISHPC, 2003 p 2-5.

[Ouch et al, 1997] : Ouchi M., Hibino M., and Okamura H. *Effect of Superplasticizer on self Compactability of Fresh Concrete*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. V 1574, pp. 37-40. January 1997.

[Ozawa et al. 1989]: Ozawa K., Maekawa K., Kunishima M. and Okamura H. *Development of high performance concrete based on the durability design of concrete structures*. Proceedings of the second East- Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-2), 1, 445-450, (1989).

P

[Panzer et al, 2001] : Panzer.T.H., Christoforo. André Luis., Cota. Fabio Paiva. *Ultrasonic pulse velocity evaluation of cementitious materials*. Advances in composite materials-analysis of natural and man-made materials, 2011, p. 411-436.

[Patrick, 2018]] : Patrick Guiraud, les bétons autoplaçants, infociments. Novembre 2018.

<https://www.infociments.fr/betons/les-betons-autoplaçants#>

[Paultre et al, 1996] : Paultre., Khayat., Langlois., Trudel., Cusson. *Structural performance of some special concrete*. Fourth international symposium on the utilization of high strength / high performance concrete. P 787-796 Mai 1996

[Persson, 2001]: Persson B. *A comparison between mechanical properties of SCC and the corresponding properties of normal concrete*. Cement and Concrete Research, 31(2), pp. 193-198, 2001

[Ployaert et al, 2005] : C. Ployaert., J.P. Jacobs. *Les bétons autoplaçants*. Dossier ciment n°36, aout 2005.

[Pons et al, 2003] : Pons. G., Proust. E. and Assie. S. *Creep and shrinkage of self compacting concrete: a different behavior compared with vibrated concrete?*. Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, pp. 645-645, 17-20 août 2003.

R

[Rahmani et al, 2008] : Rahmani.H., Ramzani pour A.A. *Effect of silica fume and natural pozzolanas on sulfuric acid resistance of dense concretes*. Asian Journal of Civil Engineering (building and housing) VOL. 9, Nbr. 3, pp 303-319, 2008.

[Reinhardt et Stegmaier, 2006] : Reinhardt. H. W., Stegmaier. M. *Influence of heat curing on the pore structure and compressive strength of SCC*. Cement and Concrete Research, 36(5), pp. 879-885, 2006.

[Richardson, 1991] : Richardson D. N. *Review of variables that influence measured concrete compressive strength* . Journal of Materials in Civil Engineering, 3, N°. 2, (1991).

[R'mili, 2010] : R'mil.A. *Étude de formulation et de comportement des Bétons Auto-Plaçants : Incorporation du sable de concassage et du sable du désert*. Thèse de doctorat de L'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis 13/01/2010.

[Rozière et al, 2007] : Emmanuel Rozière, Frédéric Grondin, Ahmed Loukili & Evangeline Wenger. *Etude expérimentale et modélisation des attaques de sulfate dans les matériaux cimentaires*. 18ème Congrès Français de Mécanique Grenoble, 27-31 août 2007.

[Rohan et al, 2011] : Rohan.Jadhav and N. C. Debnath. *Computation of X-ray powder diffractograms of cement components and its application to phase analysis and hydration performance of OPC cement*. Bull. Mater. Sci., Vol. 34, No. 5, August 2011, pp. 1137-1150. Indian Academy of Sciences.

[**Roussel, 2000**] : Y. Roussel. *Bétons autoplaçants avec fibres comme matériaux de réparation du béton*. Mémoire de Maîtrise ès sciences appliquées, Spécialité génie civil, Université Sherbrook(Québec) CANADA(2000).

S

[**Safer, 2017**] : SAFER. Omar. *Optimisation de la formulation d'un éco-béton à base de sédiments de dragage et étude de sa résistance aux attaques chimique*. Thèse de doctorat, Université de Mostaganem 2017.

[**Siad, 2010**] : SIAD. HOCINE. *La durabilité des bétons autoplaçants à base des additions pouzzoloniques et fillers calcaires*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2010.

[**Siad et al, 2012**] : H. Siad., S. Kamali Bernard., H.A. Mesbah., M. Mouli et H. Khelafi. *Influence du type d'addition minérale sur les propriétés de transfert des Bétons AutoPlaçants*.
<http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/20120201008>

[**Salhi et al, 2017**] : Salhi, M., Ghrici, M., Li, A. and Bilir, T. Effect of curing treatments on the material properties of hardened self-compacting concrete. *Advances in Concrete Construction*. 5(4), 359–375.2017.

DOI: [10.12989/acc.2017.5.4.359](https://doi.org/10.12989/acc.2017.5.4.359)

[**Salhi et al, 2019**] : M. Salhi., A.Li., M. Ghrici and C. Bliard . *Effect of temperature on the behavior of self compacting concretes and their durability*. *Advances in Concrete Construction*, Vol. 7, No. 4 (2019) 277-288

DOI: <https://doi.org/10.12989/acc.2019.7.4.277>.

[**Senhadji et al, 2016**] : Senhadji. Y., A.S. Benosman., G. Escadeillas., M. Mouli., L. Laoufi and H. Khelafi. *Mortar incorporating supplementary cementitious materials : Streng the, isothermal calorimetry and acids attack*. *J Fundam Appl Sci*. 2016, 8(2), 232-243

[**Simbéton**] : <https://www.infociments.fr/publicationsite> d'industrie Française

[**Sonebi, 1997**] : Sonebi. M. *Développement des bétons autonivelants à haute performance pour des travaux de réparation sous l'eau*. Thèse de Doctorat. Université de Sherbrooke

Québec. Septembre 1997.

T

[**Tennich et al, 20 :17**] : Tennich. Mohsen., Mongi ben Ouezdou., Abderrazak Kallel. *Durabilité des bétons autoplaçants à base des déchets de marbre et de carrelage exposés à l'attaque du sulfate*, journées nationales du béton 17 Hammamet, 5-7 mai 2017.

[**Tidiane**] : Dr Cheikh Tidiane Wade. *Aridité et Semi-aridité : Acceptions, Contenus et Evolutions, ied afrique*
<https://www.iedafrique.org/aridite-et-semi-aridite-acceptations-contenus-et-evolutions>

[**Trägårdh, 1999**] : Trägårdh J. *Microstructural features and related properties of self-compacting concrete*. Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suède, pp. 175-186, 13-15 .1999.

[**Turckry, 20004**] : Turckry P. *Retraits et fissuration des bétons autoplaçants influence de la formulation* . Thèse de doctorat de l'Université de Nantes, 2004.

[**Turckry et al, 2003**] : Turckry P., Loukili A. *Différentes approches pour la formulation des bétons autoplaçants* . *Revue Française de Génie Civil*, Vol. 7, n°04, pp. 425 à 450, 2003.

V-W

[**Vidal et al, 2004**] : Vidal.Thierry., Assie.Stéphan. , Pons. Gérard. [laboratoire matériaux et durabilité des constructions institut national des sciences appliquees](#) 10/12/2004.

[**Vieira et al, 2003**] : Vieira. Manuel et Bettencourt.Antonio. *Deformability of hardened SCC.In: International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*. RILEM Publications SARL, 2003. p. 637-644.

[**Vinh, 2014**] :Vinh-AnLE. *Comportement des bétons autoplaçants par temps chaud*.Thèse de doctorat de l'université de Toulouse 3Paul Sabatier 28 janvier 2014.

[**Weisheit et al, 2010**]: Weisheit. S., Waldmann. N., Reger. A. *Influence of environmental conditions on the rheological properties of SCC*. Proceedings of the 6th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Montréal Canada, pp. 453-460, 2010.

[**WeatherSpark**] : Météo typique partout dans le monde,<https://fr.weatherspark.com/>

Y-Z

[**Ye et al, 2007**] : 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.

[**Zhu et Bartos, 2003**] : ZHU. W., Bartos P.J.M. *Permeation properties of self-compacting concrete*. Cement and Concrete Research, 33, pp. 921-926, 2003.

[**Zhu et al. 2005**] : Zhu et Gibbs. *Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete*. Cement and concrete research, 2005, vol 35, pp1457-1462.

Textes normatifs

[ASTMC1012-04] : Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution, (2004).

[EN 206-1] : Béton - Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité », avril 2004

[NF- P 18-404] : Bétons - Essais d'étude, de convenance et de contrôle confection et conservation des éprouvettes. Décembre 1981.

[NF-P18-404] : NORME FRANÇAISE NF P 18-404, « Bétons - Essais d'étude, de convenance et de contrôle - Confection et conservation des éprouvettes », AFNOR, décembre 1981.

[NF-P18-406] : Normes nationales et documents normatifs nationaux. Bétons - Essai de compression. Décembre 1981.

[NF-P18-408] : Bétons de construction. Détermination des caractéristiques mécaniques des bétons. Essai de traction par fendage.

[NF-P18-418] : Béton - Auscultation sonique - Mesure du temps de propagation d'ondes soniques dans le béton. Décembre 1989.

[NF-EN 13369] : Règles communes pour les produits préfabriqués en béton , AFNOR, Essai d'absorption par immersion. Décembre 2018.

[NF-P18-560] : Normes nationales et documents normatifs nationaux. Granulats - Analyse granulométrique par tamisage. Septembre 1990.

[EN-933-1] : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage. Mai 2012.

[NF-P18-303] : Normes nationales et documents normatifs nationaux. Béton - Mise en oeuvre - Eau de gâchage pour béton de construction. Mai 1941.

[NF-P 18-451] : Bétons. Essais d'affaissement. Décembre 1981.

[NF EN 12350-8] : Essai pour béton frais - Partie 8 : béton auto-plaçant - Essai d'étalement au cône d'Abrams. Novembre 2010.

[NF EN 12350-10] : Essai pour béton frais - Partie 10 : béton auto-plaçant - Essai à la boîte en L. Novembre 2010.

[NF EN 12350-11] : Essai pour béton frais - Partie 11 : béton auto-plaçant - Essai de stabilité au tamis. Novembre 2010.

[NFP 18-406] : Bétons. Essais de compression. Décembre 1981.

[NFP 18-408] : Normes nationales et documents normatifs nationaux. Bétons - Essai de fendage. Décembre 1981.

[NF-P18-459] : NORME FRANÇAISE NF P 18-459 « Béton – Essai pour béton durci – Essai de porosité et de masse volumique », mars 2010.

Annexes

A- Résultats d'essais à l'état frais

1- Essai d'étalement/ affaissement en cm

	5mn après malaxage	25mn après malaxage	45mn après malaxage	65mn après malaxage
BAP1	76	65	48	37
BAP2	78	65	40	32
BV	8,5	4	2,5	1

2- Essai de déformabilité (boite L-x)

	5mn après malaxage	25mn après malaxage	45mn après malaxage	65mn après malaxage
BAP1	0,88	0,81	0,76	0,6
BAP2	0,9	0,83	0,72	0,53

3- Essai de stabilité au tamis

	5	25	45	65
BAP1	14%	7,50%	5%	2%
BAP2	16%	8%	5%	1%

B- Résultats des essais à l'état durci (la moyenne de trois essais)

1- Résistance à la compression sur des prismes cubiques 10x10x10 cm³ (en MPa)

Béton	Mode	Age			
		7J	14J	28j	120J
BAP1	M1	46	52	53	48
	M2	31	38	52	57
BAP2	M1	30	36	37	35
	M2	32	37	41	43
BO	M1	33	38	40	37
	M2	32	38	45	51

2- Résistance à la traction sur des éprouvettes cylindriques 16x32 en MPa

Type béton	modes	age(j)	coef (2/ π dh)	F (N)	ft	ft (Mpa)
BAP1	M1	7	0,124414062	240000	29859,3749	2,98593749
		14	0,124414062	255000	31725,5858	3,17255858
		28	0,124414062	270000	33591,7967	3,35917967
		120	0,124414062	265000	32969,7264	3,29697264
	M2	7	0,124414062	261000	32472,0702	3,24720702
		14	0,124414062	275000	34213,8671	3,42138671
		28	0,124414062	290000	36080,078	3,6080078
		120	0,124414062	293000	36453,3202	3,64533202
BAP2	M1	7	0,124414062	129000	16049,414	1,6049414
		14	0,124414062	156000	19408,5937	1,94085937
		28	0,124414062	189000	23514,2577	2,35142577
		120	0,124414062	182000	22643,3593	2,26433593
	M2	7	0,124414062	140000	17417,9687	1,74179687
		1j	0,124414062	180000	22394,5312	2,23945312
		28	0,124414062	197000	24509,5702	2,45095702
		120	0,124414062	200000	24882,8124	2,48828124
BO	M1	7	0,124414062	180000	22394,5312	2,23945312
		14	0,124414062	190000	23638,6718	2,36386718
		28	0,124414062	260000	32347,6561	3,23476561
		120	0,124414062	258000	32098,828	3,2098828
	M2	7	0,124414062	228000	28366,4061	2,83664061
		14	0,124414062	231000	28739,6483	2,87396483
		28	0,124414062	269000	33467,3827	3,34673827
		120	0,124414062	271000	33716,2108	3,37162108

3- Essai d'ultrasonique et résistance à la compression sur cubique 10x10x10 cm³

Béton	mode	âge en jour	poids (g)	Vitesse (m/s)	Temps (s)	RC (Mpa)
BAP1	M1	7	2455,24	4430	22,7	46
		14	2415,8	4480	22,5	52
		28	2400,6	4530	22,1	53
		120	2400	4370	23	48
	M2	7	2411,03	3980	24,5	31
		14	2435,4	4390	22,8	38
		28	2473,5	4420	22	52
		120	2470	4680	21,7	57
BAP2	M1	7	2253,75	3760	24,5	30
		14	2205,9	3790	23	36
		28	2185	3810	23	37
		120	2333	3730	24,8	35
	M2	7	2377	3830	25,1	32
		14	2391,4	4150	23,7	37
		28	2423	4220	22,6	41
		120	2322	4225	22	43
BO	M1	7	2496,67	4070	22,1	33
		14	2378,37	4200	23,8	38
		28	2374,38	4230	22,4	40
		120	2339,12	3820	25,2	37
	M2	7	2504,7	4310	23,6	32
		14	2529,9	4370	23,2	38
		28	2540	4410	22,2	45
		120	2508,7	4530	22,1	51

4- Déformations élasto-instantanées longitudinales du béton ϵ_1 el en fonction des contraintes relatives η à 120j pour les différentes séries de prismes.

Cycle de charge et décharge	BAP1M1	BAP1M2	BAP2M1	BAP2M2	BOM1	BOM2
0,1	0,5	0,625	0,375	0,325	0,2125	0,325
0,2	1,25	1,375	0,875	0,9	0,45	0,75
0,3	1,875	2,125	1,5	1,725	0,725	1,5
0,4	2,625	2,875	2,125	2,4375	1,175	2,25
0,5	3,375	3,75	2,75	3,375	1,875	3,25
0,6	4,125	4,625	3,375	4,375	2,75	4,25
0,7	5,25	6	4	5,375	3,75	5,25
0,8	6,25	7,125	4,625	6,75	4,5	6,125
0,9	8	8,5	5,25	8	5,5	7,25

5- Déformations élasto-instantanées totales longitudinales du béton ϵ_{1T} el en fonction des contraintes relatives η à 120j pour les différentes séries de prismes.

Cycle de charge et décharge	BAP1M1	BAP1M2	BAP2M1	BAP2M2	BOM1	BOM2
0,1	0,5	0,6375	0,5	0,5	0,2125	0,3375
0,2	1,25	1,625	1,063	1,05	0,575	1
0,3	2,125	2,375	1,75	2	1	1,75
0,4	2,875	3,125	2,375	2,75	1,625	2,625
0,5	3,625	4	3	3,6875	2,25	3,875
0,6	4,375	4,875	3,625	4,75	3,25	4,625
0,7	5,875	6,5	4,2	6,25	4,125	5,625
0,8	7,25	7,5	4,875	7,375	5,125	6,5
0,9	9	9,75	5,625	9,25	6	7,75

6- Déformations élasto-instantanées transversales du béton ϵ_2 el en fonction des contraintes relatives η à 120j pour les différentes séries de prismes

Cycle de charge et décharge	BAP1M1	BAP1M2	BAP2M1	BAP2M2	BOM1	BOM2
0,1	0	0	0	0	0	0
0,2	0	0	0	0	0	0
0,3	0,125	0,063	0,0625	0,13	0	0,063
0,4	0,313	0,094	0,2125	0,38	0,125	0,125
0,5	0,475	0,325	0,4125	0,64	0,625	0,375
0,6	0,638	0,863	0,5625	1,06	1,025	0,688
0,7	1,063	1,313	0,9375	1,56	1,5875	1,125
0,8	1,463	2	1,3125	2,13	2,075	2,213
0,9	1,875	4,625	1,8125	2,71	2,53125	3,438

7- Déformations élasto-instantanées totales transversales du béton ϵ_2 en fonction des contraintes relatives η à 120j pour les différentes séries de prismes

Cycle de charge et décharge	BAP1M1	BAP1M2	BAP2M1	BAP2M2	BOM1	BOM2
0,1	0	0	0	0	0	0
0,2	0	0	0	0	0	0
0,3	0,25	0,063	0,125	0,23	0	0,063
0,4	0,363	0,188	0,3188	0,47	0,3625	0,25
0,5	0,563	0,45	0,475	0,81	0,7625	0,481
0,6	0,813	1,063	0,8	1,31	1,3125	0,881
0,7	1,288	1,625	1,125	1,79	1,8125	1,375
0,8	1,625	2,625	1,5625	2,44	2,30625	2,625
0,9	2,375	5,375	2	3	2,9	3,875

8- Module de déformabilité E du béton en fonction des contraintes relatives η à 120j pour les différentes séries de prismes

Cycle de charge et décharge	BAP1M1	BAP1M2	BAP2M1	BAP2M2	BOM1	BOM2
0,1	54	57,143	37,33	41,143	50,525	52,245
0,2	45,474	47,059	32	36	44,651	46,545
0,3	42,667	43,636	28	29,793	33,882	36,923
0,4	40,762	41,739	26,353	27,429	30,968	33,032
0,5	40	40	25,455	26,667	28,235	29,091
0,6	39,273	38,919	24	24,686	25,6	25,6
0,7	36	35	23,059	23,442	22,4	23,579
0,8	34,56	33,684	20,837	21,333	21,333	21,333
0,9	30,375	31,765	20	20,25	19,636	20,571

9- Module d'élasticité E en GPa mesuré à 120j de différents bétons dans les différents modes

BAP1M1	BAP1M2	BAP2M1	BAP2M2	BOM1	BOM2
39,41	41,38	26,17	27,907	31,17	34,04

C- Résultats des essais sur les indicateurs de durabilité

1- Porosité accessible à l'eau et densité

Béton	Mode	Masse sec (g)	Msat (g)	Msat-imme(g)	Porosité (%)	Densité
BAP1 28j	M1	2280,49	2442,22	1410,79	15,68	2,21
	M2	2216,92	2359,37	1360,95	14,27	2,22
BAP2 28j	M1	2280,97	2436,95	1405,11	15,12	2,21
	M2	2318,12	2464,34	1428,08	14,11	2,24
BO 28j	M1	2301,6	2440,66	1406,71	13,45	2,46
	M2	2423,47	2549,55	1504,67	12,07	2,32
BAP1 120j	M1	2429,46	2542,22	1499,3	15,21	2,33
	M2	2256,26	2470,49	1431,75	14,00	2,17
BAP2 120j	M1	2325,38	2478,26	1435,86	14,67	2,23
	M2	2226,06	2378,4	1362,55	13,93	2,19
BO 120j	M1	2430,82	2561,36	1505,80	12,37	2,30
	M2	2452,88	2554,53	1502,60	9,66	2,33

2- Absorption par immersion dans l'eau

Béton et mode	Echan	M1	M2	M1-M2	(M1-M2)/M2	Absorption (%)
BAP1M1	28j	2465	2325	140	0,06021505	6.021
	120j	2450	2320	130	0,0560344	5.603
BAP1M2	28j	2535	2405	130	0,054054	5.405
	120j	2490	2380	110	0,04621849	4.621
BAP2M1	28j	2485	2355	130	0,0552016	5.520
	120j	2590	2465	125	0,05070994	5.070
BAP2M2	28j	2525	2430	95	0,0390946	3.909
	120j	2535	2445	90	0,03680982	3.680
BOM1	28j	2575	2445	130	0,05316973	5.316
	120j	2560	2465	95	0,0385395	3.853
BOM2	28j	2570	2460	110	0,04471545	4.471
	120j	2605	2500	105	0,042	4.20

3- Coefficient de perméabilité K_p ($m/s \cdot 10^{-6}$)

Béton	28j	120j
BAP1M1	3,4556	2,9372
BAP1M2	3,11	2,5917
BAP2M1	2,0733	1,9697
BAP2M2	1,2094	1,0366
BOM1	2,7645	2,3498
BOM2	2,4189	2,177

4- Attaques sulfatiques

a- variation de masse dans l'eau douce (%)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
SCC1	0	5	4,8	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5,2	5	5	5	5,2	5,4	5,4	5,4	5,4	5,6	5,4
SCC2	0	5	5,4	5	5	6	6	5	6	5,4	5	5,4	5	5	5,7	6	5,7	5,7	5,9	5,9	5,9	5,9	6,1	6,1	6,1
OC	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4,2	4	4	4	4,4	4,4	4,2	4,2	4,6	4,6	4,6

b- variation de masse dans le Na₂SO₄(%)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
SCC1	0	3	2,9	3	4	4	5	5	5	4,9	5	5,1	5	5	5,1	5	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,5	5,5	5,5
SCC2	0	3	4,1	4	4	5	5	6	6	6,7	7	6,9	7	7	7,3	7	7,3	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6
OC	0	3	3,5	4	4	5	5	6	6	6	6	6	6	6	6,2	6	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4

c- variation de masse dans le H₂SO₄(%)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
SCC1	0	-2	-2	-2	-2	-6	8	-8	-7	-8	12	-13	13	14	16	17	17	-21	22	23	-23	26	-28	30	-31
SCC2	0	-3	-3	-3	-2	-4	5	-5	-5	-5	-8	-8,1	-9	-9	11	12	13	-15	16	17	-17	18	-19	20	-20
OC	0	-2	-3	-3	-3	-5	7	-7	-7	-7	12	-13	14	14	16	17	17	-20	20	21	-21	24	-25	27	-27

**d- Variation de la résistance à la compression de différents bétons
selon les différents milieux d'immersion en MPa**

Mode	Milieu	Béton	Résistance à 28j	Rc 28 d'immersion	Rc à 06 mois d'immersion	% de diminution après		Différence après	
			avant immersion			28j	06 mois	28j	06 mois
Air libre M1	5%Na2SO4	BAP1	53	38,65	29,14	72,92%	54,98%	27,08%	45,02%
		BAP2	37	33,23	24,31	89,81%	65,70%	10,19%	34,30%
		BO	40	28,6	19,06	71,50%	47,65%	28,50%	52,35%
	5%H2SO4	BAP1	53	10,41	5	19,64%	9,43%	80,36%	90,57%
		BAP2	37	15,21	7,2	41,10%	19,45%	58,90%	80,55%
		BO	40	12,03	4,5	30,07%	11,25%	69,93%	88,75%
	Eau douce	BAP1	53	51	53	96,22%	100%	3,78%	0,00%
		BAP2	37	41	45,6	110,81%	123,24%	-10,81%	-23,24%
		BO	40	38	40,5	95,00%	101,20%	5,00%	-1,20%
Eau M2	5%Na2SO4	BAP1	52	40,19	36,95	77,28%	71,05%	22,72%	28,95%
		BAP2	41	34,28	28,7	83,60%	70%	16,40%	30,00%
		BO	45	32,27	31,57	71,71%	70,15%	28,29%	29,85%
	5%H2SO4	BAP1	52	13,65	5,47	26,25%	10,51%	73,75%	89,49%
		BAP2	41	16,22	6,3	39,56%	15,30%	60,44%	84,70%
		BO	45	11,11	6,94	24,68%	15,42%	75,32%	84,58%
	Eau douce	BAP1	52	52	56,6	100,00%	108,84%	0,00%	-8,84%
		BAP2	41	43,11	46,9	105,14%	114,39%	-5,14%	-14,39%
		BO	45	37,23	42,96	82,73%	95,44%	17,27%	4,56%

e- Notice technique du MEDAFLOW30 utilisé

Bidon de 10 kg / 3203,720A

NOTICE TECHNIQUE Version 03 Edition Janvier 2018 2 1 1 9

MEDAFLOW 30

Conforme à la norme EN 934-2 tab 1, tab 3.1 et tab 3.2 et NA 17052-2 **Super plastifiant-haut réducteur d'eau**

Description

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

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

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

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

Domaines D'application

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

Propriétés

Grâce à ses propriétés le MEDAFLOW 30 permet :

Sur béton frais :

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

Sur béton durci :

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

Écoulement au cône de Marsh (ASTM C939)

Caractéristique

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

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

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

 Zone Industrielle Oued Smar - BP 85 Oued Smar - 16270 Alger
 Tél: (213) 021516681 & 82
 Fax: (213) 021516422 & 021516523
 www.granitex.dz - E-mail: granitex@granitex.dz

3.5 l dans un m³

MEDAFLOW 30

Conforme à la norme EN 934-2 tab 1, tab 3.1 et tab 3.2 et NA 17052-2

Super plastifiant-haut réducteur d'eau

PV d'essais conforme aux normes, établi par le CNERIB en 22AVR2012

Mode D'emploi

Le MEDAFLOW 30 doit être ajouté après un temps préalable de malaxage et après l'ajout total de l'eau de gâchage.

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

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

Dosage :

Plage de dosage recommandée :
0,5 à 2,0 % du poids de ciment soit 0,46 à 1,85 litre pour 100 Kg de ciment.

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

Conditionnement Et Stockage

Le MEDAFLOW 30 est conditionné en bidons de 11Kg, fûts de 230 et cubiques de 1100kg.

Délai de conservation :

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

Lors d'une exposition du produit au soleil, sa couleur est sujette à changer de ton.

Précautions D'emploi

Manipulation non dangereuse.

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

NB : La couleur des produits à base de Polycarboxylates d'Ether (PCE) lors d'une exposition aux UV, est sujette à changer de ton, mais qui n'a aucune incidence sur les propriétés et les effets de l'adjuvant.

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



Zone industrielle Oued Smar - BP 85 Oued Smar - 16270 Alger
Tél: (213) 021516681 & 82
Fax: (213) 021516422 & 021516523
www.granitex.dz - E-mail: granitex@granitex.dz