

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة حسيبة بن بوعلي- الشلف
Université Hassiba Benbouali –Chlef
كلية الهندسة المدنية والمعمارية
Faculté de Génie Civil et d'Architecture
قسم الهندسة المدنية
Département de Génie-civil



Mémoire de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Présenté par

- SAIDI Bouziane
- METGHIAL Riadh

Thème

***Effet des hautes températures sur le béton lourd à base
de granulats de barytine***

Setenu le 24/06/2025, devant le jury composé de :

Djezzar Mahdjoub	Doctor	UHBC	Président
Didouche Zahia	Doctor	UHBC	Examineur
Hamrat Mustapha	Professor	UHBC	Encadrant

Promotion : 2024/2025

REMERCIEMENTS

*Nous tenons tout d'abord à remercier **ALLAH** le tout puissant de nous avoir donné le courage et la possibilité d'accomplir ce travail.*

Avant d'introduire ce document, nous aimerions exprimer notre profonde gratitude à tous ceux et celles qui ont accordé un intérêt important envers notre modeste personne.

Nous exprimons nos sincères remerciements à notre encadrant

***Pr. HAMRAT Mustapha** , pour avoir dirigé ce travail et de nous avoir donné l'occasion de réaliser ce mémoire dans de bonnes conditions.*

Nous tenons également à exprimer notre profonde gratitude au président et aux membres de jury de bien vouloir accepter d'évaluer ce travail.

*Nous manifestons nos honnêtes remerciements à **DR. NADOUR Younes**, pour son aide*

Nous adressons également nos sincères remerciements aux membres de la Faculté de Génie Civil et d'Architecture de l'UHB Chlef, enseignants et personnels administratifs avec qui nous avons eu le plaisir de faire ce mémoire.

À tous les étudiants du département de génie civil et surtout notre promotion en spécialité de matériaux 2024 – 2025

Merci à tous

Dédicace

Tout d'abord, je tiens à remercier Allah de m'avoir donné la force et le courage de mener À bien ce modeste travail.

Je tiens à dédier cet humble travail à :

À Ma tendre mère Fatîha et À mon cher père Abd'EL Kader, qui m'entourent toujours par leur tendresse et leur affection, qui m'ont toujours encouragée et soutenue dans mes études.

À Mes sœurs, Karima , Saada, Fadila et Amina, qui étaient toujours présents pour m'aider, m'encouragé et me soutenir, et m'offrir le sourire dans les pires temps.

À Mes meilleurs amis

Tous mes amis d'enfance et du long parcours scolaire et universitaire.

Tous ceux qui m'aiment et que j'aime

Riadh

Dédicace

*Ce travail est dédié **A mon père**, dont l'amour fut mon premier abri et dont l'absence est désormais mon silence le plus lourd. Pour toi, je continue.*

A ma chère Maman,

Ma raison de vivre, en témoignage de ma reconnaissance pour sa patience, son amour et ses sacrifices.

A mes filles et à mes fils,

Amira, Asma, Firdaws, Mustapha, Islam et Chahrazed, vous êtes ma plus belle source de motivation et de courage. Ce travail est aussi le vôtre, car chaque page porte un peu de votre patience, de vos sourires et de votre amour.

A ma famille,

Merci pour votre présence, vos sacrifices et votre patience.

Votre encouragement a été ma force dans chaque étape de ce parcours.

Ce mémoire est dédié à vous, avec tout ma reconnaissance.

A mes professeurs,

A ceux qui m'ont enseigné le savoir saire et qui m'ont donné de l'aide un jour, merci à vos.

Bouziane

ملخص

يُستخدم الخرسان الثقيل كمادة أساسية في المحطات النووية وفي العديد من التطبيقات الصناعية والعلمية، وهو موضوع أبحاث تهدف إلى تحسين خصائصه الميكانيكية عند درجات الحرارة العالية.

في هذه الدراسة، تم استخدام البارييتين كركام خشن لتصنيع خرسانة ثقيلة. تم تصميم واختبار نوعين من الخرسانة الثقيلة بنسبة ماء إلى إسمنت مختلفة (0.38 و 0.5)، وأطلق عليهما BLB-0.38 و BLB-0.5. تم تعريض هذين النوعين من الخرسانة الثقيلة لدرجات حرارة مختلفة (20، 250، 500 و 800 درجة مئوية). بعد التبريد، تم تحديد فقدان الكتلة بالإضافة إلى مقاومتي الضغط والشد بالانحناء للعينات.

لقد تبين أنه عند درجة حرارة 20°C، تنخفض الخصائص الميكانيكية لخلات BLB مع زيادة نسبة الماء إلى الإسمنت. فقد تم تسجيل مقاومة ضغط قدرها 60 ميغاباسكال لـ BLB-0.38، مقابل 42 ميغاباسكال لـ BLB-0.5. كما أظهر BLB-0.38 مقاومة شد بالانحناء تبلغ 7.35 ميغاباسكال، مقابل 5.51 ميغاباسكال لـ BLB-0.5.

تشير النتائج أيضًا إلى أن الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للخرسانة الثقيلة تتدهور تدريجيًا مع زيادة درجة الحرارة من 250°C إلى 800°C. حيث تصل نسبة فقدان الكتلة إلى 3.35% لـ BLB-0.5 و 3.90% لـ BLB-0.38 عند 250°C، ثم إلى 7.18% و 8.14% على التوالي عند 800°C. عند 800°C، يسجل كل من BLB-0.38 و BLB-0.5 فقدانًا في مقاومة الضغط بنسبة 65% و 56% على التوالي مقارنة بمقاومتهما الأصلية عند 20°C.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة الثقيلة، ركام البارييت، درجات الحرارة العالية، الخصائص الفيزيائية والميكانيكية

Résumé

Les bétons lourds, utilisés comme matériaux clés dans les centrales nucléaires et diverses applications industrielles et scientifiques, font l'objet de recherches visant à améliorer leurs performances mécaniques sous haute température.

Dans cette étude, la barytine a été utilisée comme granulats grossiers pour fabriquer un béton lourd. Deux bétons lourds avec deux rapports E/C différents (0,38 et 0,5) et désignés par BLB-0,38 et BLB-0,5, ont été formulés et testés. Ces deux types de béton lourd ont été exposés à différentes températures (20, 250, 500 et 800 °C. Après refroidissement, la perte de masse ainsi que les résistances à la compression et à la traction par flexion des éprouvettes ont été déterminées.

Il a été constaté qu'à 20 °C, les performances mécaniques des mélanges BLB diminuaient avec l'augmentation du rapport eau/ciment. Une résistance à la compression de 60 MPa a été enregistrée pour le BLB-0,38, contre 42 MPa pour le BLB-0,5. Le BLB-0,38 présente une résistance à la traction par flexion de 7,35 MPa, et contre 5,51 MPa pour le BLB-0,5.

Les résultats indiquent également que les propriétés physico-mécaniques des bétons lourds se dégradent progressivement avec l'augmentation de la température, de 250 °C à 800 °C. En effet, la perte de masse atteint 3,35 % pour le BLB-0,5 et 3,90 % pour le BLB-0,38 à 250 °C, puis respectivement 7,18 % et 8,14 % à 800 °C. À 800 °C, les BLB-0,38 et BLB-0,5 enregistrent une perte de résistance à la compression respectivement 65 % et 56 % par rapport à leur résistance initiale à 20 °C.

Mots clés: Béton lourd, Granulats de Barytine, Haute température, Propriétés physico-mécaniques.

Abstract

Heavyweight concrete, used as a key material in nuclear power plants and various industrial and scientific applications, is the subject of ongoing research aimed at improving its mechanical performance at high temperatures.

In this study, barite was used as coarse aggregate to produce heavyweight concrete. Two types of heavyweight concrete with different water-to-cement ratios (0.38 and 0.5), designated as BLB-0.38 and BLB-0.5, were formulated and tested. These two types of heavyweight concrete were exposed to different temperatures (20, 250, 500, and 800 °C). After cooling, the mass loss as well as the compressive and flexural tensile strengths of the specimens were determined.

It was found that at 20 °C, the mechanical performance of the BLB mixtures decreased with increasing water-to-cement ratio. A compressive strength of 60 MPa was recorded for BLB-0.38, compared to 42 MPa for BLB-0.5. BLB-0.38 exhibited a flexural tensile strength of 7.35 MPa, while BLB-0.5 showed a strength of 5.51 MPa.

The results also indicate that the physico-mechanical properties of heavyweight concrete progressively deteriorate as the temperature increases from 250 °C to 800 °C. Specifically, mass loss reaches 3.35% for BLB-0.5 and 3.90% for BLB-0.38 at 250 °C, and 7.18% and 8.14%, respectively, at 800 °C. At 800 °C, BLB-0.38 and BLB-0.5 exhibit a loss in compressive strength of 65% and 56%, respectively, compared to their initial strength at 20 °C.

Keywords: Heavyweight concrete, Barite aggregate, High temperature, Physico-mechanical properties.

REMERCIEMENTS	I
DEDICACE	II
DEDICACE	III
RESUME	V
ملخص.....	IV
ABSTRACT	VI
I. INTRODUCTION GENERAL	3
1.1. INTRODUCTION.....	5
1.2. GRANULATS LOURDS.....	5
1.2.1. LA MAGNETITE	5
1.2.2. L'HEMATITE	7
1.2.3 L'ILMENITE.....	8
1.2.4. BARYTE	10
1.2.4.1. RESERVES DE LA BARYTINE	11
1.2.4.2. METHODES DE TRAITEMENT DE MINERALE BARYTE.....	12
1.2.4.3. PROPRIETES FONDAMENTALES DE LA BARYTE.....	13
1.2.4.4. DOMAINES D'UTILISATIONS DE LA BARYTINE	14
1.3. CARACTERISATION DES BETONS LOURDS	15
1.3.1. PROPRIETES PHYSIQUES DES BETONS LOURDS.....	15
1.3.1.1. Masse volumique des bétons lourds	15
1.3.1.2. Absorption d'eau.....	16
1.3.2. PROPRIETES MECANIQUES DES BETONS LOURDS	17
1.3.2.1. Résistance à la compression des bétons lourds.....	17
1.3.2.2. Résistance à la traction par flexion.....	19
1.3.2.4. Module d'élasticité des bétons lourds.....	19
1.4. COMPORTEMENT DES BETONS EXPOSES A DE HAUTES TEMPERATURES.....	21
1.4.1. PROPRIETES PHYSIQUES DES BETONS.....	21
1.4.1.2. Perte de masse.....	23
1.4.2. PROPRIETES MECANIQUES DES BETONS.....	24
1.4.2.1 Résistance à la compression.....	24
1.4.2.2. Résistance à la traction	26
1.5. CONCLUSION	29
2.1. INTRODUCTION.....	30
2.2. MATERIAUX UTILISES.....	30
2.2.1 CIMENT.....	30
2.2.2. SABLE.....	32
2.2.3. GRANULAT DE BARYTE.....	31
2.2.4. SUPER PLASTIFIANT	32
2.2.7. EAU DE GACHAGE.....	38
2.3. FORMULATION DES BETONS	38

2.3.1 PROCEDURE DE FABRICATION DES SPECIMENS D'EPREUVE	38
2.4 PROPRIETES DU BETON A L'ETAT FRAIS	39
2.4.1. ESSAI D'AFFAISSEMENT	39
2.4.2. MASSE VOLUMIQUE	40
2.5. PROPRIETES DE BETON A L'ETAT DURCI	41
2.5.1. ESSAI DE COMPRESSION	41
2.5.2. ESSAI DE TRACTION PAR FLEXION	41
2.5.3. MODULES D'ELASTICITE	42
2.5.4. SURFAÇAGE	43
2.5.5. TRAITEMENT THERMIQUE	43
2.5.6. PERTE DE MASSE	44
3.1. INTRODUCTION	46
3.2. PROPRIETES DES BLB A L'ETAT FRAIS	46
3.2.1. <i>Affaissement des bétons lourds à base de barytine</i>	46
3.2.2. <i>Masse volumique</i>	47
3.2. PROPRIETES MECANQUES DES BLB A L'ETAT DURCI	48
3.2.1. <i>Résistance à la compression</i>	48
3.2.2. <i>Résistance à la traction par flexion</i>	49
3.2.3. <i>Module d'élasticité</i>	50
3.3. COMPORTEMENT DES BLB A HAUTE TEMPERATURE	51
3.3.1. <i>Comportement des BLB-0.5 et BLB-0.38</i>	51
3.3.1.1. <i>Perte de masse</i>	51
3.3.2.2. <i>Résistance résiduelle en compression</i>	53
3.3.2.3. <i>Résistance résiduelle à la traction par flexion</i>	56
3.4. CONCLUSION	59
CONCLUSION GENERALE	61
PERSPECTIVES	63
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	65

Liste des figures

Chapitre 01 : Revue bibliographique

FIGURE 1. 1. DENSITE DE GRANULATS LOURDS ET EFFET DE BLINDAGE DES BETONS FABRIQUES AVEC CES GRANULATS [2]	5
FIGURE 1. 2. LA MAGNETITE.	6
FIGURE 1. 3. L'HEMATITE	7
FIGURE 1. 4. L'ILMENITE.....	8
FIGURE 1. 5. CRISTAL DE BARYTE.	11
FIGURE 1. 6. PRODUCTION MONDIALE DE BARYTINE EN 2008 [15].	12
FIGURE 1. 7. CHAINE DE TRAITEMENT DE MINERAI BARYTIQUE DE BOU-CAÏD-TISSEMSILT [16].....	13
FIGURE 1. 8. MASSE VOLUMIQUE DES BETONS [7].....	16
FIGURE 1. 9. RELATION ENTRE MASSE VOLUMIQUE DU BETON ET TAUX DE BARYTINE [21]	16
FIGURE 1. 10. RELATION ENTRE POURCENTAGE D'ABSORPTION D'EAU DU BETON ET TAUX DE BARYTINE [8].	17

FIGURE 1. 11. VARIATION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION DES BETONS LOURDS [22]	18
FIGURE 1. 12. VARIATION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION (DURETE DE SCHMIDT) EN FONCTION DU RAPPORT E/C [23]	18
FIGURE 1. 13. GAIN DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION EN FONCTION DE L' AGE POUR DIFFERENTS RAPPORT E/C [24]	18
FIGURE 1. 14. VARIATION DE LA RESISTANCE A TRACTION PAR FLEXION DU BETON [22].....	19
FIGURE 1. 15. EFFET DES GRANULATS LOURDS (GRANITE ET BARYTE) SUR LES MODULES D'ELASTICITE DES BETONS [21]	19
FIGURE 1. 16. RELATION ENTRE MODULE D'ELASTICITE DU BETON ET TAUX DE BARYTINE [21].....	20
FIGURE 1. 17. RELATION ENTRE MODULE D'ELASTICITE DU BETON ET TAUX DE BARYTINE [27].....	21
FIGURE 1. 18. EFFET DE LA TEMPERATURE SUR LA MASSE VOLUMIQUE DE BETONS [30],	22
FIGURE 1. 19. PERTE DE DENSITE DES BETONS AUTOPLAÇANTS (SCC) EXPOSES A DES TEMPERATURES ELEVEES [31].	23
FIGURE 1. 20. PERTE DE MASS DES BETON DE DIFFERENT GRANULATS EN FONCTION DE LA TEMPERATURE[12]	24
FIGURE 1. 21. RESULTATS DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION DES BETONS AUTOPLAÇANTS (SCC) CONTENANT DIVERS RATIOS DE BARYTINE (4–8 MM) EXPOSES A DES TEMPERATURES ELEVEES [31].	25
FIGURE 1. 22. EFFET DE LA TEMPERATURE SUR LA RESISTANCE A LA COMPRESSION DU UHPDC OPTIMISE A BASE DE SABLE, BARYTINE ET MAGNETITE [38].	26
FIGURE 1. 23. EVOLUTION DE LA RESISTANCE RESIDUELLE RELATIVE A LA TRACTION PAR FENDAGE [39, 40].	26
FIGURE 1. 24. EFFET DE LA TEMPERATURE SUR LA RESISTANCE A LA TRACTION PAR FENDAGE DU UHPDC OPTIMISE A BASE DE SABLE, DE BARYTINE ET DE MAGNETITE [38].	27
FIGURE 1. 25. EFFET DE LA TEMPERATURE SUR LA RESISTANCE A LA FLEXION DU UHPDC OPTIMISE AVEC SABLE, BARYTINE ET MAGNETITE [38].	28

Chapitre 02 : Programme Expérimental

FIGURE 2. 1. CIMENT UTILISE	31
FIGURE 2. 2. SUPER PLASTIFIANT UTILISE	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
FIGURE 2. 3. SABLE NATUREL	31
FIGURE 2. 4. COURBES GRANULOMETRIQUES (GRANULAT DE BARYTINE ET SABLE NORMAL)	31
FIGURE 2. 5. GRANULAT DE BARYTINE 5/14.....	32
FIGURE 2. 6. ESSAI DE MASSE VOLUMIQUE.	33
FIGURE 2. 7. ESSAI DE LOS ANGELES	35
FIGURE 2. 8. ESSAI DE FRAGMENTATION DYNAMIQUE.	36
FIGURE 2. 9. PIED A COULISSE	38
FIGURE 2. 10. FABRICATION DES SPECIMENS D'EPREUVE.....	39
FIGURE 2. 11. ESSAI D'AFFAISSEMENT AU CONE D'ABRAM.	40
FIGURE 2. 12. MESURE DE LA MASSE VOLUMIQUE A L'ETAT FRAIS.	40
FIGURE 2. 13. PRESSE HYDRAULIQUE.....	41
FIGURE 2. 14. ESSAI DE TRACTION PAR FLEXION	42
FIGURE 2. 15. ESSAI DE MODULE D'ELASTICITE.....	42
FIGURE 2. 16. SURFAÇAGE DES EPROUVETTES	43
FIGURE 2. 17. FOUR A MOUFLE	44
FIGURE 2. 18. MESURE DE LA PERTE DE MASSE	45

Chapitre 03 : Résultats et interprétation

FIGURE 3. 1. ESSAI D'AFFAISSEMENT	46
FIGURE 3. 2. AFFAISSEMENTS DES BLB TESTES.....	47
FIGURE 3. 3. MASSE VOLUMIQUE	47
FIGURE 3. 4. VARIATION DE LA MASSE VOLUMIQUE DES DIFFERENTS TYPES DE BLB.....	48
FIGURE 3. 5. VARIATION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION DES DEUX TYPES DE BLB.....	49
FIGURE 3. 6. VARIATION DE LA RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION EN FONCTION DU TEMPS DES BLB TESTES	50
FIGURE 3. 7. VARIATION DU MODULE D'ELASTICITE DES BLB TESTES.	51
FIGURE 3. 8. PERTE DE MASSE DES BLB-0.5 ET BLB-0.38 EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DE CHAUFFAGE A 56 JOURS.	53
FIGURE 3. 9. RESISTANCE EN COMPRESSION (R_c) DES BLB EN FONCTION DIFFERENTES TEMPERATURES.....	54
FIGURE 3. 10. RESISTANCE RESIDUELLE EN COMPRESSION ($R_c/R_{c20^\circ C}$) DES BLB EN FONCTION DIFFERENTES TEMPERATURES.	54
FIGURE 3. 11. VUE VISUELLE DES EPROUVETTES BLB-0.5 ET 0.38 SOUMIS A DIFFERENTES TEMPERATURES.....	56
FIGURE 3. 12. PERTE DE LA RESISTANCE EN TRACTION PAR FLEXION DES BLB.	57
FIGURE 3. 13. PERTE DE LA RESISTANCE RESIDUELLE EN TRACTION PAR FLEXION DES BLB.	57
FIGURE 3. 14. FACIES DES BETONS LOURDS (BLB-0.38 ET BLB-0.5) SOUMIS A DIFFERENTES TEMPERATURES.	59

Liste des tableaux

Chapitre 01 : Revue bibliographique

TABLEAU 1. 1. CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DE LA MAGNETITE [6]	6
TABLEAU 1. 2. CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DE L'HEMATITE [7].....	7
TABLEAU 1. 3. CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DE L'ILMENITE [3].....	9
TABLEAU 1. 4. PROPRIETES FONDAMENTALES DE LA BARYTINE [13, 18].	13
TABLEAU 1. 5. COMPARAISON DES RESULTATS DES PROPRIETES DES BETONS LOURDS [21].	20

Chapitre 02 : Programme Expérimental

TABLEAU 2. 1. COMPOSITION CHIMIQUE ET MINERALOGIQUE DU CIMENT (%)	30
TABLEAU 2. 2. PROPRIETES PHYSIQUE DU CIMENT	30
TABLEAU 2. 3. CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DU SUPERIOR 9 WG.....	31
TABLEAU 2. 4. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU SABLE UTILISE.	32
TABLEAU 2. 5. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU SABLE ET DU GRANULAT DE BARYTINE.	33
TABLEAU 2. 6. RESULTATS ESSAIS LOS ANGLES ET FRAGMENTATION DYNAMIQUE	35
TABLEAU 2. 7. COMPOSITION DES BETONS LOURDS (BLB-0;5 ET BLB-0;38)	37

Chapitre 03 : Résultats et interprétation

TABLEAU 3. 1. AFFAISSEMENT DES DEUX TYPE DE BLB.	47
TABLEAU 3. 2. MASSE VOLUMIQUE DES BETONS.	48
TABLEAU 3. 3. RESISTANCE A LA COMPRESSION DES BLB ETUDIES.	49
TABLEAU 3. 4. RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION DES BLB TESTES.....	50
TABLEAU 3. 5. PERTES DE MASSE DES EPROUVETTES POUR BLB-0.5 ET BLB-0.5.....	52
TABLEAU 3. 6. RESISTANCE EN COMPRESSION DES BLB-0.5 ET 0.38 A 56 JOURS.	53
TABLEAU 3. 7. RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION DES BLB-0.5 A 56 JOURS.	56

Liste des Symboles

BLB	Béton lourd à base de granulat barytine
Mvap	Masse volumique apparente
Mvabs	Masse volumique absolue
M ₀	Masse du récipient vide
M	Masse totale (récipient + granulats)
V	Volume du récipient
M _s	Masse sèche des granulats (après étuvage)
SP :	Superplastifiant
C _v :	Coefficient volumétrique
f _c :	Résistance à la compression (MPa)
F :	Force appliquée ou maximale (N)
f _t :	Résistance à la traction par flexion (MPa)
L :	Longueur de l'éprouvette prismatique (mm) a : Section de l'éprouvette (mm)
E/C :	Rapport Eau/Ciment
E _c :	Module d'élasticité (GPa)
H ₂ SO ₄ :	Acide sulfurique
BaSO ₄	Formule chimique de la barytine (sulfate de baryum)
Fe ₂ O ₃ :	Formule chimique de l'hématite (oxyde de fer)
Fe ₃ O ₄ :	Formule chimique de la magnétite (oxyde de fer mixte)
FeTiO ₃ :	Formule chimique de l'ilménite (oxyde de fer et titane)
ATG	Analyse thermogravimétrique
C-S-H	Silicate de calcium hydraté
C ₃ A	Tricalcium Aluminate
C ₃ S	Tricalcium Silicate
C ₂ S .	Dicalcium Silicate

Introduction Générale

Le béton constitue un matériau essentiel en génie civil, grâce à ses excellentes propriétés mécaniques, sa durabilité et sa large disponibilité. Pour répondre aux exigences particulières de certaines structures sensibles, telles que les centrales nucléaires, les installations de radiothérapie ou les ouvrages militaires, des bétons spéciaux ont été développés, notamment les bétons lourds. Ces derniers se caractérisent par une masse volumique élevée, rendue possible par l'utilisation de granulats denses tels que la barytine, la magnétite, l'hématite ou encore l'ilménite.

La barytine, minéral naturel à haute densité, se distingue par ses propriétés physico-chimiques avantageuses pour la formulation de bétons lourds: densité spécifique élevée, faible porosité et bonne disponibilité en Algérie. Son incorporation dans le béton permet d'augmenter la masse volumique du matériau tout en renforçant son efficacité en matière de protection contre les rayonnements ionisants.

Cependant, malgré ses avantages, le comportement du béton lourd à base de Barytine en situation d'incendie reste peu documenté. Sous l'effet de températures élevées, ce type de béton peut subir d'importantes transformations physico-chimiques: déshydratation, microfissuration, perte de masse, réduction des performances mécaniques, voire éclatement explosif. Ces altérations concernent principalement la pâte de ciment. Les phénomènes, souvent observés dans les ouvrages touchés par le feu, soulèvent des interrogations quant à la stabilité et à la sécurité des structures réalisées avec ce matériau.

Dans ce contexte, le présent travail a pour premier objectif de caractériser le béton lourd formulé à partir de granulats de barytine. De plus, l'étude examine l'effet de deux rapports eau/ciment sur les propriétés physico-mécaniques de ces bétons. Le second objectif est d'analyser et de comparer l'influence des températures ambiante (20 °C) et élevées (250, 500 et 800 °C) sur les propriétés physico-mécaniques des bétons lourds. Les propriétés physico-mécaniques de ces bétons lourds sont la masse, la résistance à la compression et la résistance à la traction par flexion.

Ce mémoire s'articule sur trois chapitres:

1. Le premier chapitre constitue une revue bibliographique, dans laquelle sont abordées les caractéristiques des granulats lourds, notamment la barytine, les propriétés des bétons lourds ainsi que les effets des hautes températures sur ces bétons lourds.

Introduction Générale

2. Le deuxième chapitre est consacré à la présentation du programme expérimental, incluant les matériaux utilisés, les formulations de bétons lourds, les méthodes de confection des éprouvettes et les essais mis en œuvre.

3. Le troisième chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus après le chauffage des éprouvettes à différentes températures (20 °C, 250 °C, 500 °C et 800 °C), leur analyse ainsi qu'une comparaison avec les données de la littérature.

Enfin, une conclusion générale clôture ce mémoire en synthétisant les principaux résultats de cette étude.

Chapitre 01:
Revue bibliographique

1.1. Introduction

Dans le domaine du génie civil, le béton reste un matériau incontournable grâce à sa polyvalence, sa résistance mécanique et sa durabilité. Toutefois, certains contextes spécifiques, comme les installations nucléaires, les laboratoires radiologiques ou les structures exposées à des radiations ionisantes, nécessitent l'utilisation d'un béton à haute densité tels que le béton lourd.

1.2. Granulats lourds

Les granulats lourds permettent de produire des bétons ayant une masse volumique comprise entre 2800 et 5900 kg/m³ [1]. Ils peuvent être divisés en trois groupes, comme suit:

- Granulats à granulation naturelle (baryte, magnétite)
- Granulats naturels fragmentés mécaniquement (baryte, magnétite, hématite)
- Granulats artificiels (particules d'acier, minerais agglomérés, ferrosilicium)

Les principaux granulats lourds et les masses volumiques du béton qu'ils permettent d'obtenir, ainsi que leur effet en tant que matériau de blindage, figurent dans le figure 1.1.

Granulats	Densités [kg/dm ³]	Blindage contre
Spath pesant, baryte (BaSO ₄) (matériau cristallin et amorphe)	4,0–4,3	rayons X, rayons gamma
Magnétite (Fe ₃ O ₄)	4,65–4,8	rayons gamma
Fer oligiste, hématite (Fe ₂ O ₃) très dur	4,7–4,9	rayons gamma
Ilménite (FeTiO ₃) fer titané	4,55–4,65	rayons gamma
Ferro-phosphore sous-produits de l'extraction du phosphore	5,8–6,2	rayons gamma
Ferrosilicium sous-produits de la fabri- cation de corindon fondu, bon matériau à résistance mécanique élevée pour chapes et bétons résistant à l'abrasion	6,0–6,2	rayons gamma
Granulats ferreux	6,8–7,5	rayons gamma
Grenaille d'acier granulométrie 0,2–3 mm	7,5	rayons gamma

Figure 1. 1. Densité de granulats lourds et effet de blindage des bétons fabriqués avec ces granulats [2]

1.2.1. La magnétite

La magnétite est l'un des principaux minerais de fer [3] et correspond à un oxyde de fer de formule chimique Fe₃O₄ de couleur noir métallique à noir brunâtre (Figure.1.2). La magnétite se retrouve dans les roches ignées ou sous forme de bandes dans les roches anorthositiques. C'est un minéral ferromagnétique qui agit sur l'aiguille aimantée d'une boussole [4].



Figure 1. 2. La magnétite.

La magnétite peut être ajoutée sous forme de poudre très fine au mélange de plastique pour en augmenter le poids. Il s'agit d'un marché relativement nouveau. Il est basé sur la recherche de certains plastiques denses pour un produit à usage final spécifique où un poids élevé est nécessaire[5].

Tableau 1. 1. Caractéristiques physico-chimiques de la magnétite [6] .

Formule:	$Fe_2 + Fe_3 + 2O_4$
Couleur:	Gris noir ou noir de fer
Lustre:	Métallique, Sub-Métallique
Dureté:	5½ - 6½Spécifique
Gravité:	5.175
Système de cristal:	Isométrique
Membre de:	Spinel Group
Nom:	A l'origine appelé lodestone dès 1548 et par d'autres noms. Nommé en 1845 par Wilhelm Karl von Haidinger pour la localité de Magnesia, en Grèce (site pour lodestone).

1.2.2. L'hématite

L'hématite est un oxyde de fer de formule chimique Fe_2O_3 de couleur noir à gris acier [4]. Il se trouve sous la forme de massif ou en filon dans les roches magmatiques alcalines et dans les roches métamorphiques (Figure.1.3) [3]. Sa densité est de 5,3 et sa dureté varie de 5,5 à 6,5 sur l'échelle de Mohs [4], comme le montre le tableau 1.2.

L'hématite est utilisée dans la production de fer métallique et dans la fabrication de pigments rouges, de peinture et de colorant pour béton. L'hématite est utilisée comme abrasif dans le sablage au jet.

L'hématite est utilisée également dans les bétons de haute densité, les boues de forage pétrolier ainsi que dans les pigments minéraux comme produits anticorrosifs. L'hématite entre dans la production de fer métallique et dans la coloration du béton [6].

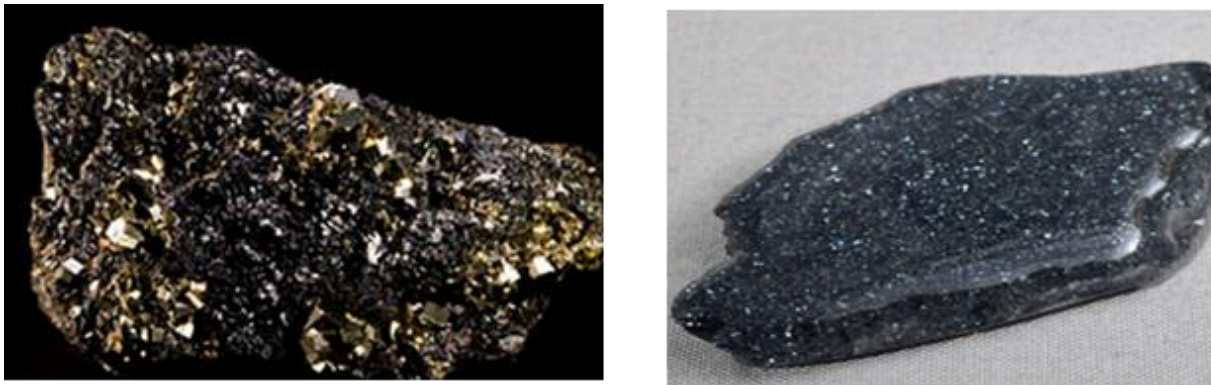


Figure 1. 3. L'hématite

Tableau 1. 2. Caractéristiques physico-chimiques de L'hématite [7]

Classification chimique	Oxyde
Couleur	Noir à gris acier à argent; rouge à brun rougeâtre à noir
Steak	Rouge à brun rougeâtre
Lustre	Métallique, submétallique, terreux
Diaphanéité Décolleté	Opaque

Mohs Dureté	5 à 6,5
Gravité spécifique	5.0 à 5.3
Propriétés diagnostiques	Strie rouge, densité
Composition chimique	Fe_2O_3
Système cristallin	Trigonal
Usages	Le minerai de fer le plus important. Pigment, séparation de médias lourds, protection contre le rayonnement, ballast, composés de polissage, une pierre précieuse mineure

1.2.3. L'ilménite

L'ilménite est un oxyde de fer et titane de formule chimique $FeTiO_3$ de couleur noir métallique à noir brunâtre et de densité de 4,7, comme l'indique la figure 1.4. Elle est commune dans les roches métamorphiques et magmatiques ignées [3]. Le tableau 1.3 présente les caractéristiques physico-chimiques de L'ilménite.



Figure 1. 4. L'ilménite.

Tableau 1. 3. Caractéristiques physico-chimiques de L'ilménite [3].

Formule chimique	FeTiO ₃
Masse formulaire ²	151,71 ± 0,004 uma Fe 36,81 %, O 31,64 %, Ti 31,55 %,
Couleur	noir de fer, brun foncé, brun noir
Classe cristalline et groupe d'espace	paratétartoédrie hexagonale ; R3
Système cristallin	trigonal
Réseau de Bravais	rhomboédrique R
Macle	possibles sur 1011 et 0001
Clivage	Aucun
Cassure	conchoïdale ; irrégulière
Habitus	massif, en rosette, grenu, micacé, compact, sable
Faciès	Tabulaire selon 0001
Echelle de Mohs	5 – 6
Trait	noir-brun
Eclat	Submétallique
Transparence	Opaque
Densité	4,72
Magnétisme	Faible

Radioactivité	Aucune
---------------	--------

1.2.4. Barytine

La barytine est l'un des minéraux industriels les plus importants. Grâce à ses applications diverses, ses réserves importantes et son exploitation intensive, elle contribue largement aux développements économique et industriel du pays. Dans cette partie, on donne un aperçu général sur la baryte et ces caractéristiques. Ce minéral est utilisé dans l'industrie chimique, pour la production des bétons lourds et dans le domaine de radioprotection contre les radiations nucléaires [6, 8].

La Barytine désigne le sulfate de Baryum naturel dont la formule chimique est $BaSO_4$. Le Baryum est un élément chimique de numéro 56 dans la classification périodique de Mendeleïev [9]. Son nom dérive du mot Grec "barns" qui signifie lourd. Le minéral de Baryum le plus répandu est la Barytine, encore appelée sulfate de Baryum [10].

Le terme de barytine est une dénomination d'usage courant dans le commerce et l'industrie pour désigner une espèce minérale bien définie : le sulfate de baryum naturel $BaSO_4$ [11].

En Algérie, la barytine se trouve dans plusieurs gisements, tels que ceux de Bou-Caïd (wilaya de Tissemsilt) et d'Aïn Mimoun (wilaya de Khenchela), actuellement en cours d'exploitation et couvrant 40 % de la demande locale.

La barytine prend la forme de cristaux aplatis ou de lamelles, comme le montre la Figure 1.5.



Figure 1. 5. Cristal de barytine.

1.2.4.1. Réserves de la Barytine

1.2.4.1.1. Les réserves nationales de la Barytine

Les gisements Barytique présentant un intérêt économique sont localisés au Nord du pays à Aïn Mimoun (W.Khenchela), Boucaïd (W.Tissemsilt), Mellal (W.Tlemcen), Mesloula (W.Tébessa) et Koudiat Safia (W.Médéa). Par ailleurs, des travaux de recherche minière ont permis de mettre en évidence plusieurs gisements dans le Sud-Ouest algérien près de Béchar. Il s'agit des gisements de Draïssa Sud-Ouest, Djebel Draïssa, Draïssa Nord-Est et Draïssa Guelb El Tahtani. Cet ensemble de gisements totalise des réserves d'environ 7 millions de tonnes de barytine [12].

Le gisement d'Ichmoul (W.Batna Nord-Est d'ALGERIE): le site minier est localisé au versant nord du djebel Ichmoul, à 12 Km au nord du chef-lieu d'Arris. La structure est considérée favorable. Des études effectuées en 1971 avaient conclu l'existence d'un corps Barytique dont le taux varie entre 30% et 50% en $BaSO_4$ et avec des réserves qui peuvent atteindre 1.548.280 tonnes [13].

En Algérie, les réserves de baryte des mines soient estimées à plus de 7 Mégatonne. Dans contexte, la présente étude s'intéresse à l'utilisation de la baryte en granulat dans le béton.

Les granulats lourds peuvent être constitués d'un ensemble de minéraux lourds tels que la barytine, l'hématite, la magnétite ou l'ilménite. Pour faire partie du matériel considéré, l'assemblage de minéraux denses doit avoir une densité supérieure à 3,5.

1.2.4.1.2. Economie, productions mondiale, marchés

La production mondiale, environ 7,77 Mt en 2008 contre 6,93 Mt en 1997, a été assurée à 84 % par quatre pays : la Chine (57 %), l'Inde (13 %), les Etats-Unis (8. %) et le Maroc (6 %), comme le montre la figure 1.6 [14]

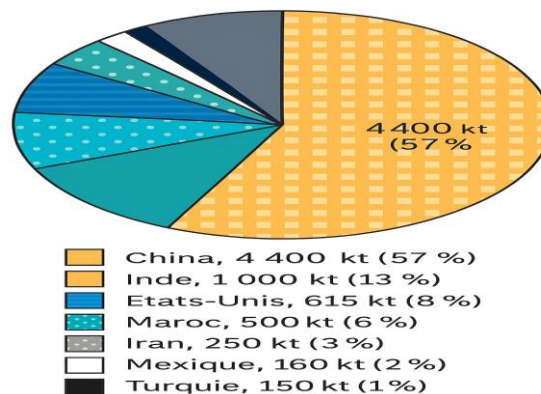


Figure 1. 6. Production mondiale de barytine en 2008 [15].

1.2.4.2. Méthodes de traitement de minérale barytine

Dans certains gisements, le minéral est suffisamment pur et peut être simplement criblé et concassé. En général, la barytine primaire est obtenue par triage manuel, ou après concentration par flottation, gravimétrie, séparation magnétique, séparation radiométrique puis séchage, broyage et classification [16].

Le Tout-venant avec une grosseur maximale de 500 millimètres et une teneur minimale de 60% en BaSO₄ passe dans Trois stations (Figure. 1.7):

-**Station de concassage:** cette étape consiste à réduire le Tout-venant jusqu'à une grosseur admise par la prochaine étape pour pouvoir l'enrichir.

- **Station d'enrichissement:** le Tout-venant réduit à une dimension inférieure à 6 mm subit une séparation gravimétrique humide dans un appareil appelé Remer-Jig de marque WEMCO.

- **Station de pulvérisation et conditionnement:** cette opération permet de transformer le concentré à un produit fini marchand conforme aux normes.

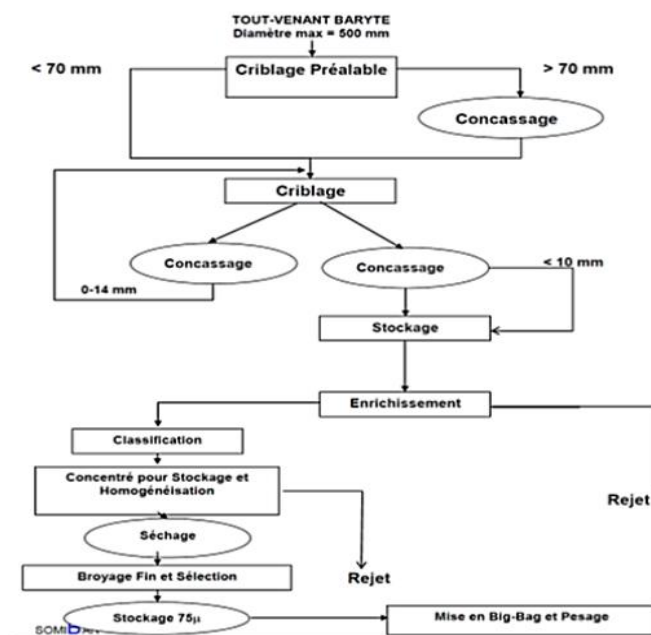


Figure 1. 7. Chaîne de traitement de minerai barytique de Bou-Caïd-Tissemsilt [16].

1.2.4.3. Propriétés fondamentales de la baryte

Des cristaux bien individualisés. Ces minéralisations parfois colorées selon la nature des impuretés (oxydes de fer, sulfures, matières organiques...)[17].

La baryte ($BaSO_4$) est un minéral tendre mais lourd de densité égale environ à 4. Sa dureté est faible variant de 2,5 à 3,5 sur l'échelle de Mohs et son point de fusion élevée (1580 °C) [4]. Elle est extraordinairement peu soluble dans l'eau pure mais elle peut se dissoudre facilement en présence de chlorures. Elle est pratiquement insoluble à froid dans les acides et légèrement soluble dans l'acide sulfurique bouillant. Sa poudre est blanche ou parfois teintée pour les variétés les plus colorées [16]. Le tableau 1.4 récapitule les caractéristiques physico-chimiques.

Tableau 1. 4 .Propriétés fondamentales de la Barytine [13, 18].

Identification	
Masse formulaire	Ba 58,84 %, O 27,42 %, S 13,74 %, ,
Couleur	incolore, parfois blanc, jaune et rarement d'autres couleurs (violée, verdâtre, , bleuâtre)
Classe cristalline et groupe d'espace	Dipyramidale Pnma
Système cristallin	Orthorhombique

Clivage	La barytine grossière constitue divers agrégats, en général clivables.
Cassure	Irrégulière, conchoïdale
Dureté	3 à 3,5 sur l'échelle de Mohs
Trace	Blanche
Éclat	vitreux à résineux
Propriétés chimiques	
Densité	4,48
Température de fusion	Décomposition : 1 600 °C
Fusibilité	Fond à la flamme et donne une boule blanche
Solubilité	Soluble dans HI. dans H ₂ SO ₄ concentré chaud

1.2.4.4. Domaines d'utilisations de la barytine

La barytine, ou sulfate de baryum, est largement utilisée dans différents secteurs pour ses propriétés particulières : densité élevée, neutralité chimique, blancheur et absence d'abrasif. Elle sert comme charge minérale dans une grande variété de produits dont les peintures, le papier, le verre, le caoutchouc, les plastiques, les matériaux de friction ainsi que les barrières de protection contre les rayonnements.

► La barytine est utilisée principalement dans **l'industrie pétrolière** (80 %) comme additif dans les boues de forage [16].

► Dans **l'industrie chimique**, l'industrie chimique absorbe près de 16 % de la consommation mondiale. La barytine est la principale matière pour la fabrication des dérivés du baryum : carbonates, chlorures, oxydes, hydroxydes, nitrates, peroxydes et sulfates de baryum [16].

► Dans **l'industrie métallurgique**, l'oxyde de baryum permet d'améliorer le rendement du four électrique. Le chlorure de baryum est utilisé comme durcisseur d'acier et de fondant de soudure [5].

► Dans **l'industrie automobile**, la barytine est employée comme charge inerte dans les matériaux de friction, tels que les plaquettes de freins et les disques d'embrayage [16].

► Dans **l'industrie de la construction**, la barytine entre dans la fabrication des bétons denses utilisés dans la construction de ports ou de terminaux pétroliers. Ce type de béton est

également employé comme contrepoids de ponts, stabilisateur de conduits sous-marins, ballast de bateaux et barrière de protection contre d'éventuelles radiations. Il sert aussi dans la construction de laboratoires, de centrales nucléaires et de bases militaires atomiques [16]. La production annuelle de Baryte au niveau de la mine de Bou-Caïd est d'environ 20 000 tonnes par an, avec une production par jour qui peut atteindre 150 tonnes [19].

En conclusion, la mine de Bou-Caïd a une grande importance économique et industrielle pour le groupe ENOF, pour cela, le déroulement des travaux se fait d'une manière efficace vigoureux, où on a bien observé qu'il y'a une bonne homogénéisation, de la mine (le fond) jusqu'aux les différents services au niveau de l'unité, et aussi la bonne organisation entre eux.

1.3. Caractérisation des bétons lourds

Les bétons lourds sont des bétons spéciaux de haute masse volumique supérieure à 3000 Kg/m³. La formulation et la fabrication de ces bétons répondent aux spécifications demandées notamment en termes de classe de résistance à la compression, de classe d'exposition, de classe de consistance (classe d'affaissement), de dimension maximale nominale des granulats (Dmax), de classe de teneur en chlorures et de masse volumique (NF EN 206-1). Des granulats de forte densité sont utilisés pour la fabrication de ces bétons comme la barytine (sulfate de baryum), l'hématite et la magnétite (minerais à base d'oxydes de fer), des déchets ferreux, grenailles de fer ou d'acier. Grâce aux propriétés particulières qui les caractérisent tel que la haute densité, la faible abrasivité et la neutralité chimique permettant d'augmenter sa masse volumique [20].

La barytine constitue ainsi un excellent granulats pour la fabrication du béton lourd. Cependant, lorsque ces bétons sont exposés à des conditions extrêmes, notamment à des températures élevées, leur comportement peut considérablement varier. En effet, la montée en température affecte non seulement la microstructure du béton mais également ses propriétés mécaniques et physiques, pouvant entraîner des dégradations irréversibles.

1.3.1. Propriétés physiques des bétons lourds

1.3.1.1. Masse volumique des bétons lourds

En général, la densité du béton est directement proportionnelle à la densité de granulats. Certes, l'augmentation du pourcentage de granulats lourds « hématite » (HCA) augmente la densité du béton. En d'autres termes, la masse volumique est proportionnelle au pourcentage

de granulats lourds, comme l'indique la (figure. I.8), où NA représente le béton fabriqué avec de granulats ordinaires, HB représente un béton préparé avec un taux de 25% d'hématite, et HC représente un béton fabriqué avec un taux de remplacement de 50% de granulats d'hématite [7].

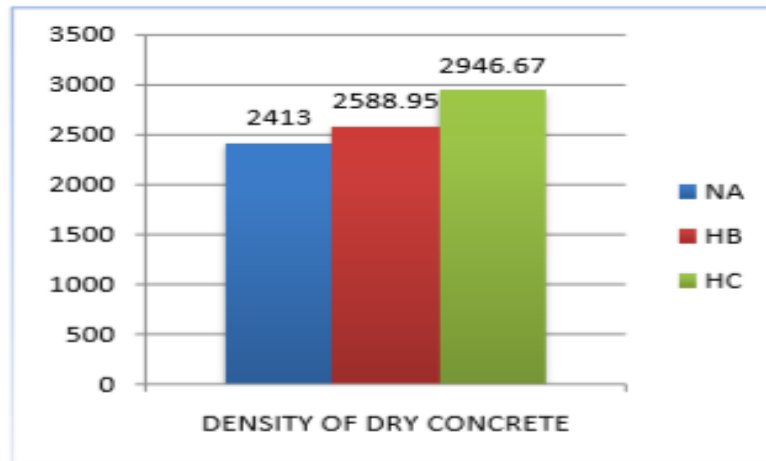


Figure 1. 8. masse volumique des bétons [7].

Par ailleurs, la masse volumique augmente avec le taux de remplacement du granulats de barytine (Figure. 1.9). La valeur maximale du poids volumique est de 3507 kg/m³ pour le béton B à E/C = 0,51 [21].

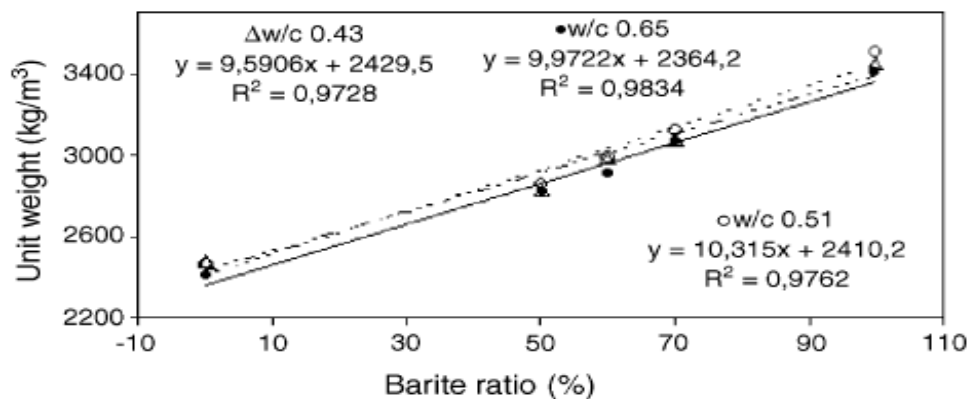


Figure 1. 9. Relation entre masse volumique du béton et taux de barytine [21]

1.3.1.2. Absorption d'eau

Il a été constaté que l'augmentation du taux de barytine dans le béton diminue le pourcentage d'absorption d'eau, ceci indique que le granulats de barytine est dense [22].

La figure 1.10 indique la relation entre la barytine et le pourcentage d'absorption d'eau. Comme indiqué sur cette figure, lorsque le taux de barytine dans le béton augmente, le

pourcentage d'absorption d'eau a diminué, ce qui indique que la barytine a une faible absorption d'eau [8].

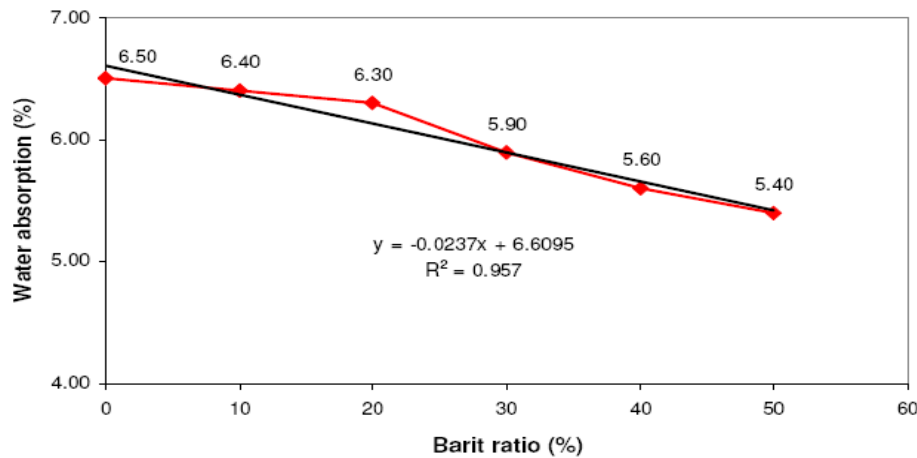


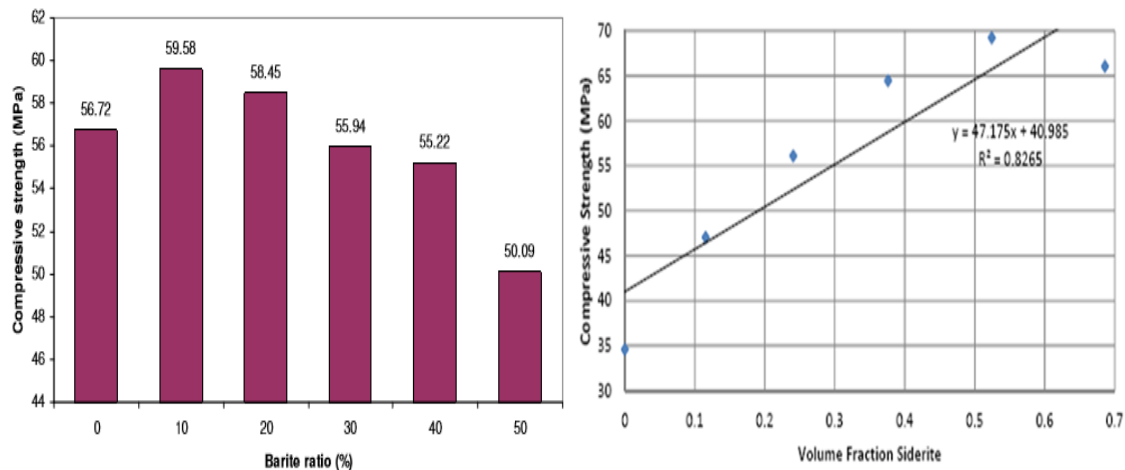
Figure 1. 10. Relation entre pourcentage d'absorption d'eau du béton et taux de barytine [8].

1.3.2. Propriétés mécaniques des bétons lourds

Plusieurs études ont été menées sur les propriétés physiques, mécaniques et de protection du béton lourd contenant des granulats de barytine [21, 23]. La barytine affecte négativement les propriétés mécaniques du béton en raison de sa faible friabilité, de sa faible adhérence et de ses défauts de transition interfaciale [8].

1.3.2.1. Résistance à la compression des bétons lourds

Il a été constaté que l'augmentation du taux de barytine tend à diminuer la résistance à la compression des bétons lourds (Fig. 1.11-a). Cependant, Esen [22] a observé que l'augmentation de la teneur en sidérite ($d = 4.1 - 4.7$) utilisée dans le béton augmente la résistance à la compression du béton (Fig.1.10-b).



(a) Baryte

(b) Sidérite

Figure 1. 11. Variation de la résistance à la compression des bétons lourds [22]

En outre, les figures 1.12 et 1.13 montrent la variation de la résistance à la compression pour les différents rapports E/C. Il a été observé que lorsque le rapport E/C (E/L) augmente, la résistance à la compression des bétons lourds diminue (Figs. 1.12 et 1.13). La figure 1.12 montre que la dureté de Schmidt diminue lorsque le rapport w/c augmente [23].

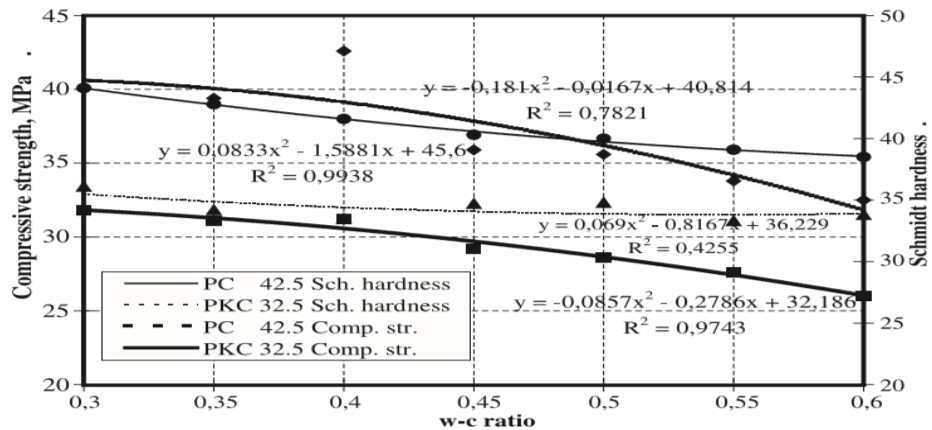


Figure 1.12. Variation de la résistance à la compression (dureté de Schmidt) en fonction du rapport E/C [23].

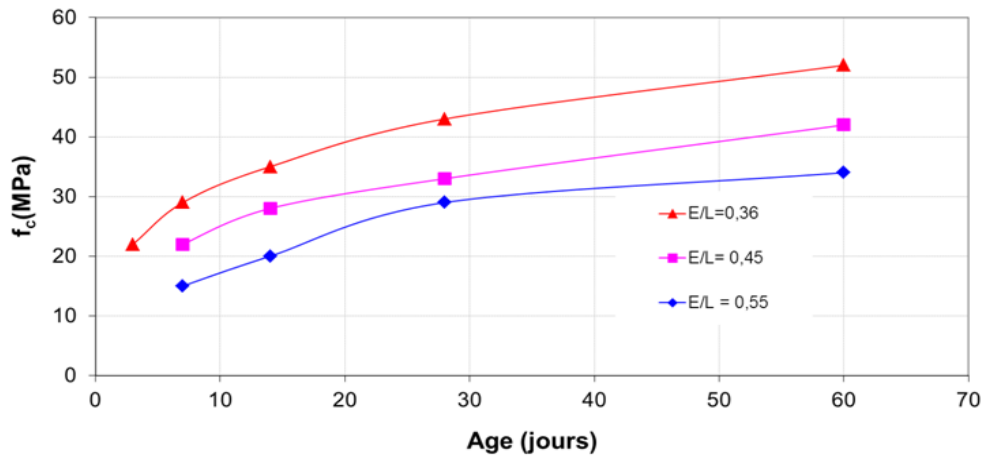


Figure 1. 13. Gain de la résistance à la compression en fonction de l'âge pour différents rapport E/C [24].

En général, la diminution de rapport E/C augmente la résistance à la compression des bétons lourds comme dans le cas des bétons ordinaires. Il a été également observé que l'utilisation de la fumée de silice augmente la résistance à la compression des bétons lourds, comme prévu dans les bétons ordinaires [22].

1.3.2.2. Résistance à la traction par flexion

Esen et Berivan [22] ont constaté que la résistance à traction par flexion des bétons lourds contenant de granulat de sidérite est plus élevée (allant jusqu'à 8,5 MPa) (Fig. 1.14-a). Cependant, il a été observé que la résistance à la traction par flexion des bétons lourds diminue lorsque le taux de barytine dans le béton augmente (Fig. 1.14-b).

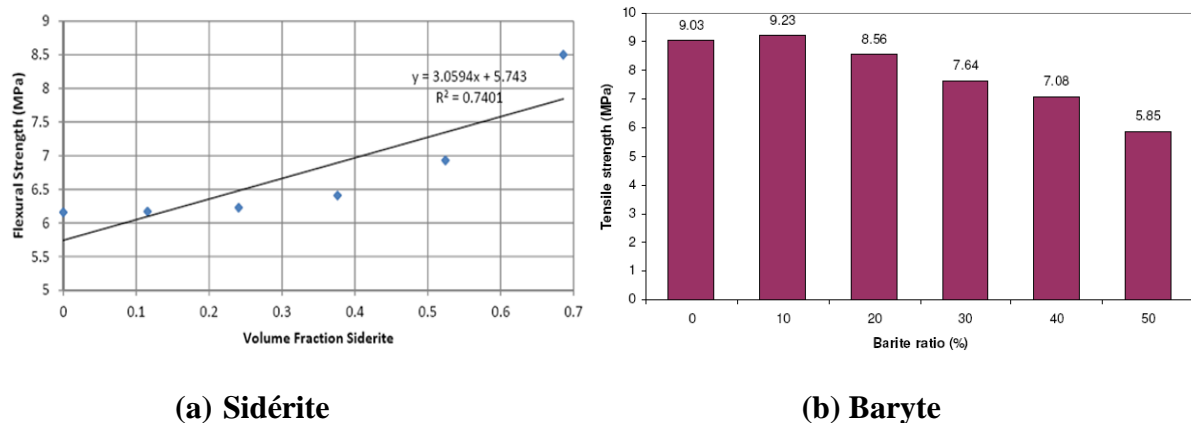


Figure 1. 14. Variation de la résistance à traction par flexion du béton [22].

1.3.2.4. Module d'élasticité des bétons lourds

En général, les granulats lourds ont tendance à présenter un module d'élasticité d'un béton lourd plus élevé. En effet, la figure 1.15 montre que les modules d'élasticité des bétons lourds à base des granulats de la granite et barytine étaient de 29,8 GPa et de 20,5 GPa, respectivement [25]. Cependant, Sakr et EL-Hakim [26] ont signalé que l'utilisation de la baryte comme granulat lourd a sensiblement amélioré le module d'élasticité d'un béton lourd de 39,6% (tableau I.5). Kilincarslan et al. [21] ont également constaté que les modules d'élasticité des bétons lourds augmentent avec le taux de barytine (Fig. I.15).

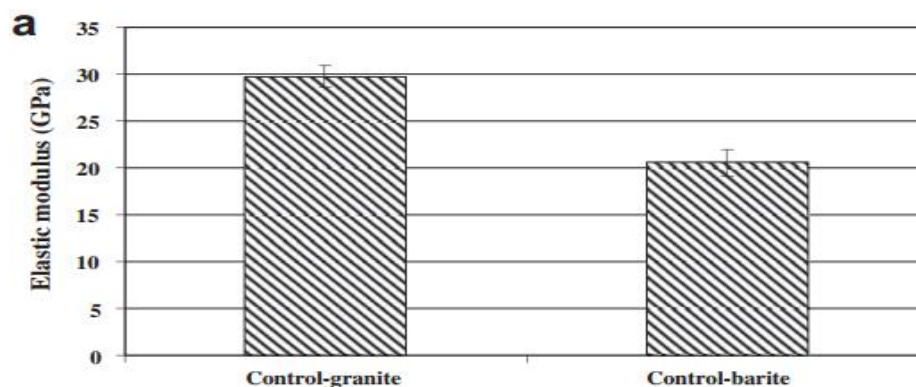
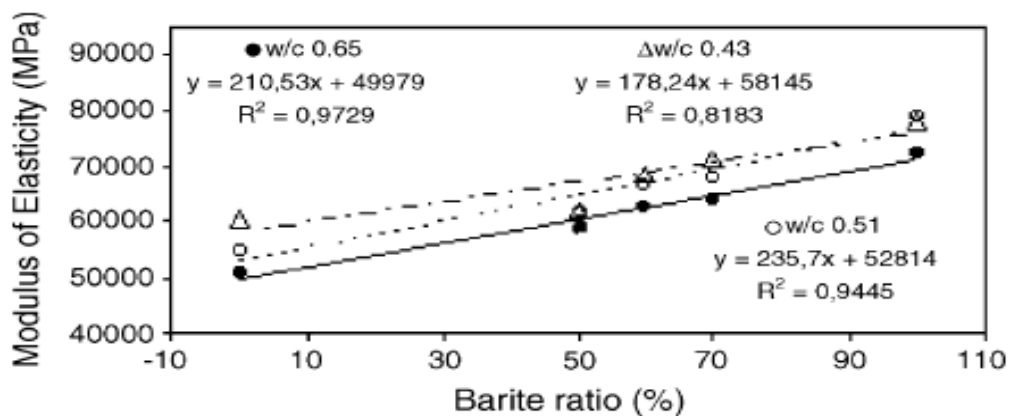


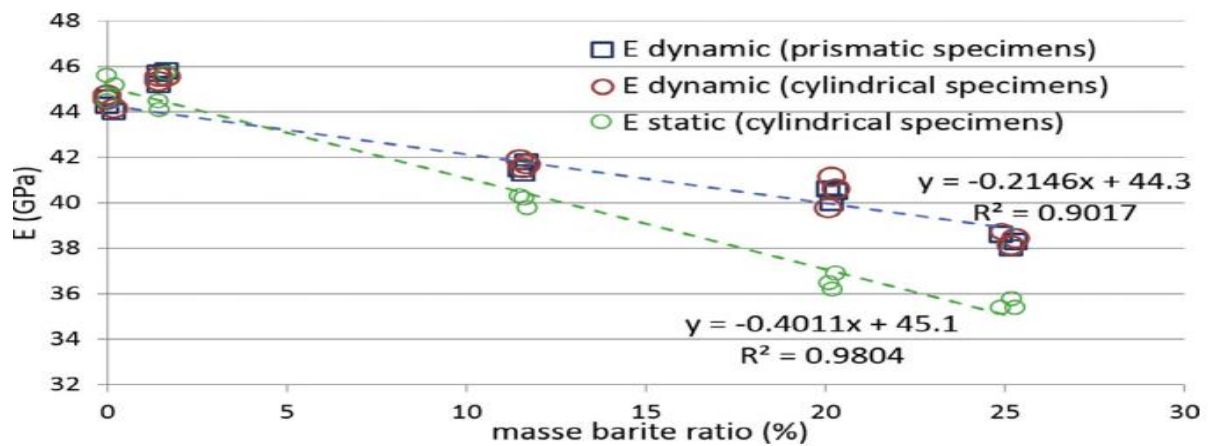
Figure 1. 15. Effet des granulats lourds (Granite et baryte) sur les modules d'élasticité des bétons [21].

Tableau 1. 5. Comparaison des Résultats des propriétés des bétons lourds [21].

Author		Current work ^a				Sakr and EL-Hakim (2005)	
Mix ratio	Cementitious content, kg/m ³	417				400	
	Water-to-cement ratio, w/c	0.48				0.40	
Properties	Coarse agg. (5–20 mm), kg/m ³	Granite = 1004	Barite = 1570	Barite = 1570	Barite = 1570	Gravel = 1125	Barite = 1510
	Fine agg. (<5 mm), kg/m ³	CFS = 727	CFS = 727	CFG = 830	TFG = 830	Gravel = 750	Barite = 1236
	Density, Kg/m ³	2244	2607	2672	2665	2350	3250
	Compressive strength, MPa	45.9	42.1	36.5	35.1	44.0	47.0
	Tensile splitting strength, MPa	3.71	2.51	1.93	1.80	2.55	2.85
	Flexural strength, MPa	–	–	–	–	3.43	4.42
Elastic modulus, GPa	29.8	20.5	21.0	18.4	20.8	29.0	

**Figure 1. 16.** Relation entre module d'élasticité du béton et taux de barytine [21].

Par ailleurs, les résultats obtenus par Saidani et al. [27] contredisent les résultats trouvés par Sakr et EL-Hakim [26] et Kilincarslan et al. [21]. Au fur et à mesure que le taux de baryte augmente dans le béton, le module d'élasticité diminue et comme l'indique la figure 1.15, le module d'élasticité diminue linéairement avec le pourcentage massique de baryte dans le béton [27].



.Figure 1. 17 .Relation entre module d'élasticité du béton et taux de barytine [27].

1.4. Comportement des bétons exposés à de hautes températures

Le béton subit de fortes modifications physico-chimiques qui influencent l'évolution de ses propriétés mécaniques avec la température. Les résultats obtenus de différentes investigations sur le comportement du béton chauffé, interprètent différemment les évolutions de ces paramètres [28].

Ces différences ne sont pas dues seulement à la nature et au type du béton mais aussi aux conditions expérimentales comme : la durée et le taux de chauffage et de refroidissement, la géométrie des éprouvettes [28].

Pour sa part, Lo Monte et Gambarova [29] ont mentionné les effets des températures élevées sur certaines propriétés mécaniques des bétons, telles que les propriétés mécaniques résiduelles. La température élevée, jouant un rôle important dans les blindages des réacteurs nucléaires, est l'un des processus de détérioration physique les plus importants, influençant la durabilité des structures en béton et réduisant la densité du béton lourd [26].

1.4.1. Propriétés physiques des bétons.

1.4.1.1. Perte de masse volumique

D'après les travaux de Bazant et Kaplan [30], il a été observé une légère diminution de la masse volumique de tous les bétons entre la température ambiante et 400 °C, en raison de l'expansion thermique du matériau et de l'évaporation de l'eau (Fig.1.18).

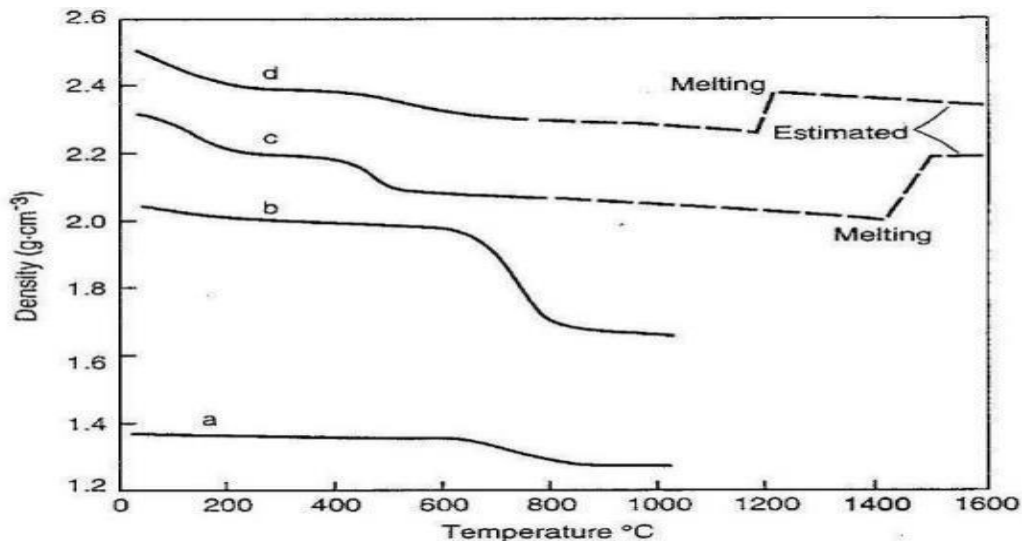
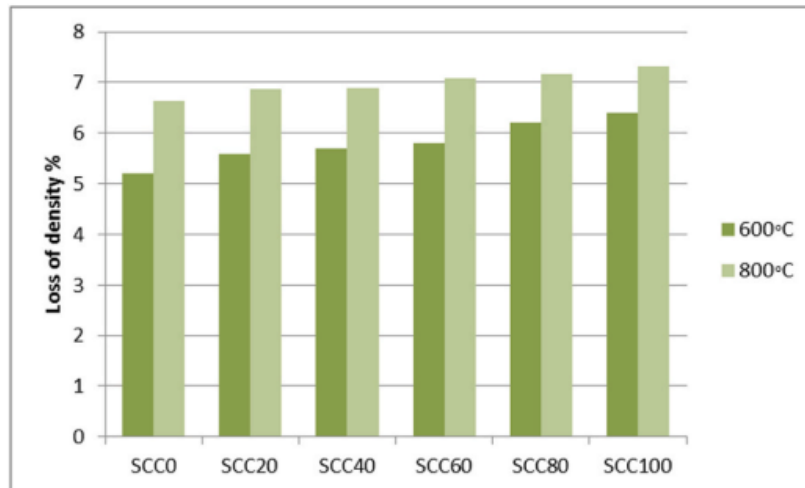


Figure 1. 18. Effet de la température sur la masse volumique de bétons [30],

La figure 1.19. illustre l'impact des températures élevées sur la perte de masse volumique des bétons auto-plaçants (BAP : SCC) à différentes concentrations de barytine (20 %, 40 %, 60 %, 80 % et 100 %). Il a été constaté que l'effet des températures élevées sur le BAP (SCC) a varié selon le type de granulats grossiers utilisés pour sa fabrication [31]. De plus, la plus faible perte de masse volumique a été observée pour le mélange SCC0, qui a subi une diminution légèrement inférieure à celle des mélanges contenant différents rapports de barytine, exposés aux hautes températures. Le BAP (SCC0) a perdu respectivement 5,2 % et 6,63 % de sa masse volumique à des températures de 600 °C et 800 °C, tandis que le SCC100 a perdu respectivement 6,4 % et 7,3 % de sa masse volumique aux mêmes températures. Ces résultats des essais ont révélé que la perte de masse volumique des échantillons SCC contenant différents ratios de barytine augmentait lentement avec l'augmentation des températures et des ratios de barytine [31].

D'autres études [32], [33] ont montré que les caractéristiques des granulats influencent fortement les propriétés du béton exposé à de hautes températures. Les bétons contenant de la barytine présentent une perte de densité plus marquée à cause de l'éclatement thermique dès 450 °C. Cette perte est liée à l'expulsion de l'eau cristalline et à la décomposition de produits d'hydratation comme la portlandite. Dès 300 °C, le C-S-H commence à se dessécher, et la portlandite se décompose entre 450 °C et 600 °C [33]. Les propriétés absorbantes et conductrices de la barytine expliquent la perte de masse importante observée dans les bétons lourds.

Ling et al. [34] ont observé une perte de masse significative des bétons lourds à base de barytine jusqu'à 300 °C, due à la forte absorption d'eau et à la conductivité thermique des granulats. La composition et la stabilité thermique de ces granulats influencent directement la perte de densité. Ces facteurs régulent le comportement du béton lourd exposé à la chaleur.



SCC0 : béton autoplaçant de référence, sans utilisation de barytine recyclée de taille 4–8 mm.

SCC20 : béton autoplaçant contenant 20 % de barytine de taille 4–8 mm en volume

Figure 1.19. Perte de densité des bétons autoplaçants (SCC) exposés à des températures élevées [31].

1.4.1.2. Perte de masse

Durant l'échauffement du béton, sa masse est soumise à une variation due à l'évaporation de l'eau et la déshydratation progressive du gel CSH [12]

La figure 1.20 regroupe les résultats d'analyses thermogravimétriques (ATG), menées par différents auteurs sur des bétons comprenant différents granulats. Globalement on observe entre 20°C et 200°C une perte de masse due à l'eau libre, entre 200 et 500°C une perte de l'eau liée chimiquement et au-delà de 500°C une perte liée aux dégradations chimiques des différents types de granulats [12].

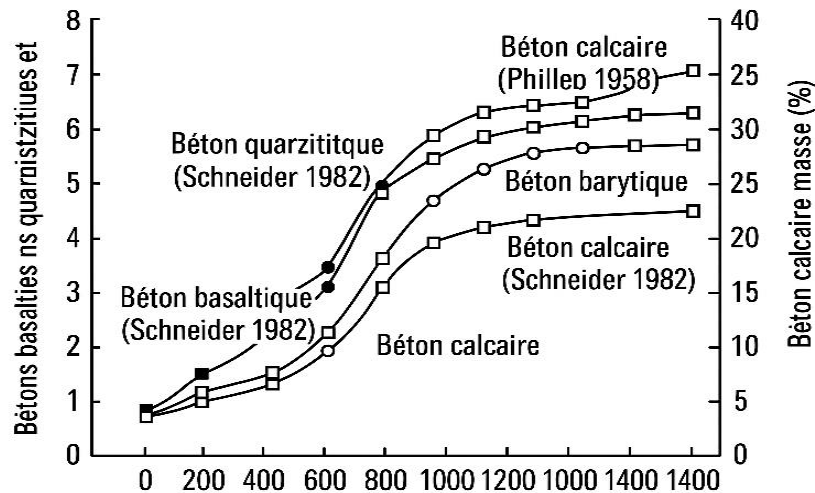


Figure 1. 20. perte de mass des béton de différent granulats en fonction de la température[12]

1.4.2. Propriétés mécaniques des bétons

Le béton se caractérise, d'un point de vue mécanique, par sa résistance à la compression, sa résistance à la traction et son module d'Young. Ces propriétés sont fortement influencées par l'élévation de la température. Cette section synthétise l'évolution de ces propriétés telle qu'observée dans plusieurs travaux de recherche.

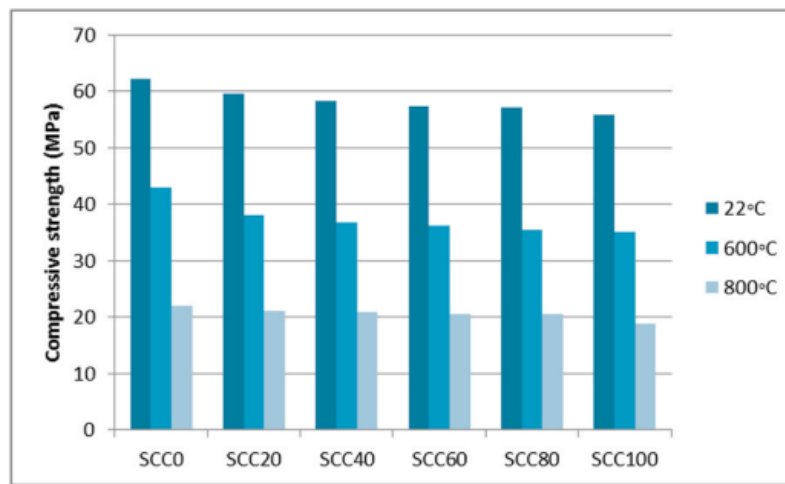
1.4.2.1 Résistance à la compression

Aslani et al. [35], et Horszczaruk et al. [36] ont observé que le béton lourd présente une résistance au feu supérieure à celle du béton ordinaire en raison de sa stabilité thermique supérieure.

Horszczaruk et Brzozowski [37] ont mené des recherches sur l'impact de températures élevées, comprises entre 300 et 800 °C, sur les caractéristiques du béton lourd. Les résultats ont révélé que le béton incorporant des granulats de barytine présentait les baisses les plus significatives de résistance à la compression à 800 °C. En revanche, aucune dégradation n'a été observée après exposition à des températures de 500 °C et 300 °C.

La figure 1.21 présente les résultats de la résistance à la compression des bétons autoplaçants (SCC) avec différents ratios de barytine après 28 jours d'exposition à des températures élevées de 22 °C, 600 °C et 800 °C dans un four électrique [31]. Selon la figure 1.21, les résultats expérimentaux ont démontré qu'une augmentation de la température de 22 °C à 600 °C ou plus entraînait une réduction de la résistance à la compression des SCC. Tawfik et al. [31] ont

constaté que la résistance à la compression du béton autoplaçant (SCC) exposé à des températures élevées présentait une forte corrélation avec les caractéristiques des granulats. La résistance à la compression du SCC contenant de la barytine diminuait à mesure que la température augmentait. À 600 °C, la résistance à la compression du SCC contenant 80 % de barytine a chuté de manière significative (de 37,82 % par rapport à la résistance initiale). Néanmoins, à 800 °C, cette résistance n'était plus que de 64,09 % de sa valeur initiale, comme le montre la figure 1. 21.



SCC0: control mix of self-compacting concrete without using waste barite size (4–8 mm).

SCC20: Self-compacting concrete containing 20% barite size (4–8 mm) by volume of coarse aggregate size (4–8 mm).

Figure 1. 21. Résultats de la résistance à la compression des bétons autoplaçants (SCC) contenant divers ratios de barytine (4–8 mm) exposés à des températures élevées [31].

Muhd Afiq Hizami et al. [38] ont constaté que la résistance à la compression des bétons composites ultra-performants densifiés (UHPdC) diminue avec l'élévation de température, notamment à 400 °C et 800 °C. À 400 °C, les bétons UHPdC à base de sable et de barytine ont montré une baisse de résistance à la compression de 19,4 % (116 MPa) et 8,8 % (105,6 MPa) respectivement. Le béton UHPdC à base de magnétite a montré une bonne stabilité thermique jusqu'à 400 °C, grâce à sa composition en Fe_3O_4 , comme le montre la figure 1.22. L'expansion thermique du sable et de la barytine provoque des fissures dans la pâte cimentaire, réduisant la résistance [32]. La barytine a un coefficient de dilatation thermique presque deux fois supérieur à celui de la magnétite [38].

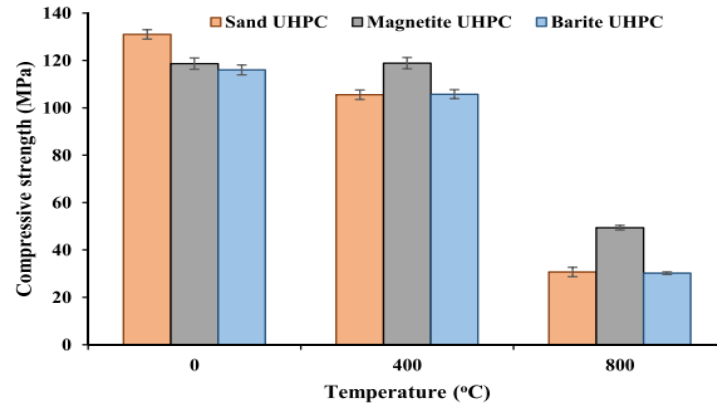


Figure 1. 22. Effet de la température sur la résistance à la compression du UHPdC optimisé à base de sable, barytine et magnétite [38].

1.4.2.2. Résistance à la traction

La résistance résiduelle à la traction diminue avec la température. Une légère baisse s'observe jusqu'à la température de 350°C, puis une chute de résistance plus importante [39, 40].

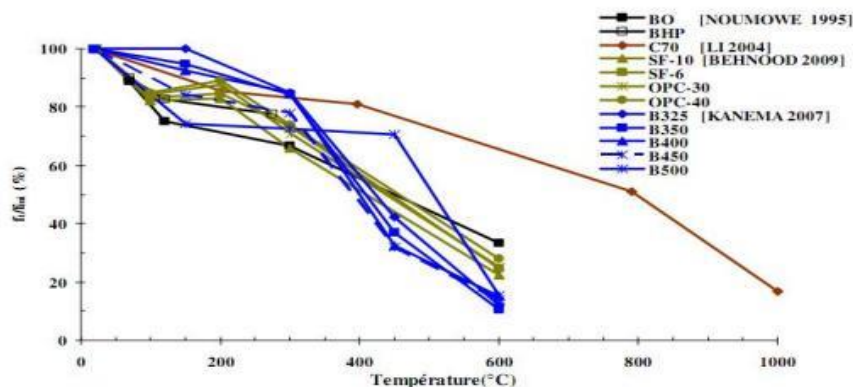


Figure 1. 23. Évolution de la résistance résiduelle relative à la traction par fendage [39, 40].

Xing [41] note une plus grande accélération de la perte de résistance entre 300 et 600°C des bétons de granulats siliceux et de granulats de silex. La perte de résistance des bétons de granulats siliceux, de silex et calcaire est respectivement de 87%, 71% et 48% à 600°C. Au delà de cette température, la perte de résistance des bétons de granulats calcaires devient plus importante et est liée à la décarbonatation [39].

Tawfik et al. [31] ont constaté que la réduction spectaculaire de la résistance au fendage des bétons autoplaçants (SCC) contenant divers ratios de barytine (4–8 mm) à 450 °C était principalement imputable à la décomposition de la matrice cimentaire lors de l'exposition à des températures élevées. De plus, la différence de déformation thermique entre le mortier de ciment et les granulats progressivement élargie. De plus, les produits d'hydratation du ciment se sont décomposés et déshydratés à haute température, contribuant ainsi au développement de

fissures dans la zone de transition du béton [31]. Dès que la température dépassait 600 °C, la résistance à la traction par fendage du béton diminuait davantage. Ceci était principalement dû à la poursuite de la décomposition du produit d'hydratation du ciment C–S–H et au début de la décomposition des granulats, ou à une transition polymorphe [31].

La figure 1.24 a montré que l'élévation de la température a provoqué une baisse marquée de la résistance à la traction par fendage des UHPdC [38]. Cette dégradation est due à la décomposition des produits d'hydratation du ciment, altérant la microstructure du béton. La perte d'intégrité structurelle a également réduit l'efficacité des fibres d'acier, diminuant encore la résistance globale. Après exposition à 400 °C, la résistance résiduelle à la traction par fendage la plus élevée a été enregistrée par l'UHPdC à base de sable, avec une valeur de 14,2 MPa, suivi de l'UHPdC à base de magnétite à 13,5 MPa, et de l'UHPdC à base de barytine à 11,9 MPa [38]. En effet, les UHPdC à base de sable, de magnétite et de barytine ont présenté des diminutions respectives de 19,2 %, 10,9 % et 17,5 % [38].

Après exposition à 800 °C, les résistances résiduelles à la traction par fendage étaient de 3,5 MPa pour l'UHPdC à base de sable, 3,8 MPa pour celui à base de magnétite, et 2,6 MPa pour celui à base de barytine (Fig.1.24), ce qui correspond à des réductions encore plus importantes, avec des pourcentages de 80,2 %, 74,9 % et 81,9 % respectivement [38].

L'UHPdC à base de barytine a montré une réduction notable de la résistance à la traction par fendage avec l'augmentation de la température. Cette diminution est liée au coefficient de dilatation thermique élevé du granulats de barytine, qui accentue la détérioration de l'intégrité microstructurale. L'UHPdC à base de magnétite, en revanche, a démontré la plus grande stabilité thermique, comme en témoignent ses valeurs de résistance résiduelle [38].

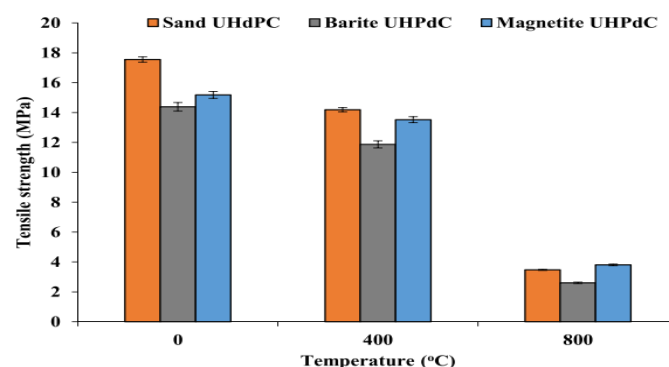


Figure 1. 24. Effet de la température sur la résistance à la traction par fendage du UHPdC optimisé à base de sable, de barytine et de magnétite [38].

1.4.2.3. Résistance résiduelle à la flexion

Il a été observé qu'une exposition à 400 °C entraînait une diminution de la résistance à la flexion du UHPdC [38]. Les UHPdC à base de magnétite et de barytine présentaient une résistance résiduelle à la flexion de 12,3 MPa, ce qui correspond à une perte de 12,4 % et de 27,6 % respectivement, comme l'illustre la figure 1.25 [38]. Cependant, l'exposition de la barytine à une température de 800 °C a entraîné une diminution significative de la résistance à la flexion par rapport à une exposition à 400 °C. L'expansion de la barytine a provoqué des fissures dans la pâte de ciment durcie, entraînant un contact insuffisant avec les fibres d'acier et une diminution générale de la capacité de flexion. Le UHPdC à base de magnétite présente une meilleure résistance à la chaleur jusqu'à 800 °C, comme en témoigne son pourcentage plus élevé de conservation de la résistance à la flexion [38].

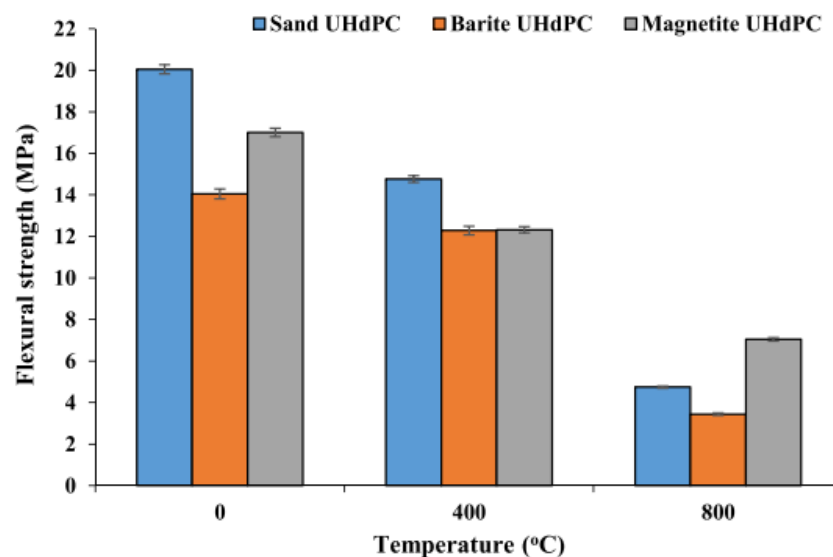


Figure 1. 25. Effet de la température sur la résistance à la flexion du UHPdC optimisé avec sable, barytine et magnétite [38].

Après exposition à 800 °C, l'UHPdC à base de magnétite conserve la plus forte résistance résiduelle à la flexion (7,0 MPa). Cette valeur représente une diminution de 58,6 % par rapport à l'échantillon non chauffé, comme le montre la figure 1.25 [38]. Les UHPdC à base de sable et de barytine affichent des résistances plus faibles, avec des baisses respectives de 76,3 % et 75,5 %. Ces pertes sont dues à l'expansion thermique des granulats, provoquant des fissures internes. L'altération des fibres d'acier à haute température aggrave encore la diminution de la résistance [38].

1.5. Conclusion

La barytine est un minéral très important qui peut être utilisée dans plusieurs domaines. La barytine est utilisée dans la confection de béton lourds, ayant une masse volumique de 3200 kg/m^3 (contre 2300 kg/m^3 pour un béton classique), permettant la réalisation d'ouvrage de protection contre les radiations (rayon x, rayon gamma et autres rayons radioactifs), ou de culées et de contrepoids.

Les recherches analysées dans ce chapitre montrent que le béton lourd, notamment à base de barytine ou de magnétite, présente une meilleure résistance au feu que le béton ordinaire grâce à sa stabilité thermique. Toutefois, une élévation de température au-delà de $400 \text{ }^\circ\text{C}$ entraîne une baisse significative de ses propriétés mécaniques, particulièrement la résistance à la compression, à la traction et à la flexion. Le béton autoplaçant (SCC) contenant de la barytine subit une dégradation progressive avec des pertes marquées à $800 \text{ }^\circ\text{C}$. L'UHPdC (béton ultra-performant densifié), bien que plus résistant, voit aussi ses performances diminuer sous l'effet des hautes températures. La barytine, avec son fort coefficient de dilatation thermique, provoque des fissures internes nuisant à la microstructure. En comparaison, la magnétite offre une meilleure stabilité thermique jusqu'à $800 \text{ }^\circ\text{C}$. Les pertes de résistance sont principalement dues à la déshydratation des produits d'hydratation du ciment et à la dégradation de l'interface pâte/granulats. À haute température, l'efficacité des fibres d'acier dans le UHPdC diminue, aggravant la perte de résistance. Ainsi, le choix du granulat lourd est déterminant pour optimiser les performances mécaniques du béton exposé à la chaleur.

Chapitre 02

Programme Expérimental

2.1. Introduction

Dans ce deuxième chapitre, les caractéristiques des matériaux utilisés pour la fabrication du béton lourd sont présentées. Ensuite, la formulation des bétons lourds ainsi que le dispositif d'essai et l'instrumentation sont décrits.

2.2. Matériaux utilisés

2.2.1 Ciment

Le ciment utilisé est un ciment Portland de classe CEM I 52.5 N (Fig. 2.1), provenant de la cimenterie d'Oued Sly (Chlef). Sa composition minéralogique et ses propriétés physiques sont présentées dans les tableaux 2.1 et 2.2, respectivement. Ce ciment présente une résistance à la compression de 52,5 MPa à 28 jours.

Tableau 2. 1. Composition chimique et minéralogique du ciment (%)

Eléments	Valeur moyenne
Composition chimique	
SiO ₂	20.20
AL ₂ O ₃	5.60
Fe ₂ O ₃	3.24
CaO	64.25
MgO	0.84
SO ₃	1.70
K ₂ O	0.67
Na ₂ O	0.18
CaO libre	1
Cl ⁻	< 0.03
RI	1.20
PAF (LOI)	1.39
Composition minéralogique	
C ₃ S	41.8
C ₂ S	33.1
C ₄ AF	10.7
C ₃ A	6-8

Tableau 2. 2. Propriétés physique du ciment

Consistance normale	26 à 28%
Temps début de prise	= 45min
Expansion	<5mm
Finesse (SSB)	3200-3800(cm ² /g)



Figure 2. 1. Ciment utilisé.

2.2.2. Sable

Le sable utilisé est un sable d'oued de la région de la willaya d'Ain Defla. Le sable est propre et arrondis < 4 mm (Fig.2.3). L'analyse granulométrique est donné par la figure 2.4.



Figure 2. 2. Sable naturel

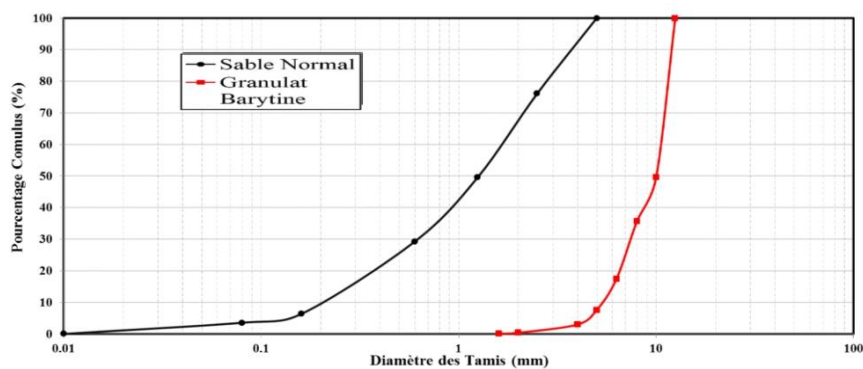


Figure 2. 3. Courbes granulométriques (granulat de barytine et sable normal).

Les résultats de l'équivalent de sable ainsi que les caractéristiques physiques du sable utilisé pour la fabrication du béton lourd sont présentés dans le tableau 2.4.

Tableau 2. 3. Caractéristiques physiques du sable utilisé.

Caractéristique physique		Sable naturel
Masse volumique absolue (g/cm ³)		2.64
Masse volumique apparente (g/cm ³)		1.56
Equivalent de Sable	ESP (%)	82
	EV (%)	88
Module de finesse		2.7

2.2.3. Granulat de barytine

Pour la confection du béton lourd, un granulat de barytine concassée de fraction 5/14, provenant de la carrière de Bou-Kaïd (Tissemsilt), a été utilisé. Les roches de barytine ont été concassées à l'aide d'un concasseur en laboratoire. La figure 2.5 illustre la procédure de fabrication du granulat de barytine. Les caractéristiques physiques et mécaniques du granulat de barytine sont présentées dans le tableau 2.5.

**Figure 2. 4.** Granulat de barytine 5/14

2.2.3.1. Masse volumique

La masse volumique d'un granulat lourd est une caractéristique fondamentale influençant considérablement les caractéristiques mécaniques des granulats et par conséquent les performances du béton.

La masse de granulat de barytine occupant un récipient donné d'un volume d'un litre d'eau selon le mode opératoire de la norme EN 1097-3 sert à caractériser la masse volumique dite apparente en vrac des granulats. La relation suivante donne la masse volumique apparente

$$(\rho_v) : \rho_v = \frac{M - M_0}{V} \quad 2.1$$

Où : M_0 est la masse du récipient, M la masse M_0 à laquelle s'ajoute celle de l'échantillon mis en place sans tassement et V le volume du récipient (Fig.2.6).



(a) masse volumique apparente. (b) masse volumique absolue

Figure 2. 5. Essai de masse volumique.

La masse volumique réelle déterminée par séchage en étuve est, elle définit par le rapport de la masse des granulats séchés en étuve et le volume qu'ils occupent dans l'eau, soit donc :

$$\rho_{rel} = \frac{M_s}{V} \quad 2.2$$

Le granulat de barytine choisis présente une masse volumique apparente de 2.43 g/cm^3 et une masse volumique réelle sèche de 3.7 g/cm^3 , comme le montre le Tableau 2.5

Tableau 2. 5. Caractéristiques physiques du sable et du granulat de barytine.

Caractéristique physique	Valeurs
Granulat de barytine	
Masse volumique absolue (g/cm^3)	3.7
Masse volumique apparente (g/cm^3)	2.43

Coefficient volumique (%)	0,34
Sable (0/4)	
Masse volumique Apparente (g/cm ³)	1,68
Masse volumique Absolue (g/cm ³)	2,66

2.2.3.2. Essais de los Anglos

Le pourcentage de grains cassés peut avoir une incidence sur l'absorption d'eau et la qualité mécanique du granulat de barytine. A l'aide de la Norme P18-573, On établit un protocole d'étude afin de d'évaluer le pourcentage de grains cassés du granulat de barytine.

On prend un échantillon de 5000 g. Les grains sont triés afin de séparer les grains entiers des grains cassés. Les grains sont pesés et on détermine le pourcentage de grains cassés. Essai Los Angeles permet de mesurer les résistances combinées à la fragmentation par chocs des boulets (Fig.2.7). Cet essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1.6 mm produite en soumettant le granulat aux chocs de boulets normalisés dans la machine Los Angeles. La valeur du coefficient Los-Angeles doit être ≤ 40 pour les granulats naturels suivant la norme NF P18 573 [42].

Le granulat de barytine présente le plus fort pourcentage avec 80% environ de grains cassés (Tableau 2.6), et par conséquent le granulat de barytine présente une faible dureté.



Figure 2. 6. Essai de Los Angeles

Tableau 2. 6. Résultats essais Los angles et Fragmentation dynamique

Caractéristique mécanique	Valeurs
Los angles (%)	80
Fragmentation dynamique (%)	55

2.2.3.3. Fragmentation dynamique

L'essai de Fragmentation dynamique permet de mesurer la résistance à la fragmentation par chocs des éléments d'un granulat selon NF P 18-574 [43]. Il consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6mm produite en soumettant le matériau aux chocs d'une masse normalisée (Fig.2.8). Cette quantité est appelée coefficient de fragmentation dynamique. Cet essai a été conçu de manière à trouver, sur un même matériau, un résultat aussi proche que possible du coefficient Los Angeles. Les résultats obtenus sont illustrés dans le tableau 2.6. Selon le résultat donné par le tableau 2.6, le granulat (5/14) est de faible résistance à la fragmentation dynamique.



Figure 2. 7. Essai de fragmentation dynamique.

2.2.4. Super plastifiant

Le superplastifiant utilisé est un adjuvant haut réducteur d'eau, appelé SUPERIOR 9 WG (Fig. 2.2). Il est formulé à base de polycarboxylates d'éther, ce qui permet d'améliorer considérablement les propriétés rhéologiques du béton frais, sans provoquer d'effet retardateur. Ce superplastifiant est utilisé à un dosage de 1% et 1.3% par rapport à la masse de ciment. Le tableau 2.3 présente les caractéristiques physicochimiques du SUPERIOR 9 WG.



Figure 2. 8. super plastifiant utilisé**Tableau 2. 7.** Caractéristiques physico-chimiques du SUPERIOR 9 WG

SUPERIOR 9 WG	Propriétés
Teneur en extrait sec	30%
Aspect	Liquide
Couleur	Brun clair
PH	6 – 6,5
Masse volumique	1,07 g/cm ³
Dosage recommandé	0,5% à 2,0%
Nature chimique	Polycarboxylate

2.2.5. Coefficient volumétrique

Le coefficient volumétrique est une grandeur numérique, qui permet de caractériser un granulat en utilisant Pied à coulisse (Fig. 2.9).

On a mesuré le diamètre de chaque grain de gravier et on le note D_i , Puis on remplit l'éprouvette de l'eau jusqu'à un volume V_1 et Enfin, on met l'échantillon dans l'éprouvette et on note le volume total V_2 .

Selon la norme NF EN 933 On calcule le coefficient volumétrique, à l'aide de la formule suivante:

$$\Sigma V = V_1 + V_2 \quad 2.3$$

On a trouvé que $C_v = 0.34$ pour baryte



Figure 2. 9. Pied à coulisse.**2.2.7. Eau de gâchage**

L'eau utilisée pour le gâchage du béton est celle du robinet, qui est considérée comme potable et exempte de toute impureté nuisible au béton. L'eau de gâchage utilisée pour la confection des bétons est une eau potable recueillie directement du robinet de laboratoire.

2.3. Formulation des bétons

A partir des matériaux décrits ci-dessus, un béton BLB-0.5 et un béton BLB-0.38 ont été formulés et dont les compositions sont données par le tableau 2.7. L'objectif est de fabriquer deux bétons lourds, composés à 100 % de granulat de barytine, avec deux rapports E/C de 0,5 et 0,38.

Tableau 2. 8. Composition des bétons lourds (BLB-0;5 et BLB-0;38).

Constituants	BLB-0.5*	BLB-0.38**
Eau (L/ m³)	200	152
Ciment (kg/m³)	400	400
Sable (kg/m³)	700	700
Granulat de barytine (kg/m³)	1480	1480
Super plastifiant (L/m³)	4 ¹	5.2 ²
E/C	0.5	0.38

*BLB-0.5 : Béton lourd à base de granulat de barytine, avec un rapport E/C de 0.5.

**BLB-0.38 : Béton lourd à base de granulat de barytine, avec un rapport E/C de 0,38.

¹:1% par rapport au poids de ciment

²:1,3% par rapport au poids de ciment

2.3.1 Procédure de fabrication des spécimens d'épreuve

Le béton a été gâché dans un malaxeur à axe vertical de 15 ℓ de capacité.

Un mode opératoire strict et identique pour tous les spécimens a été suivi :

-Malaxer des constituants (sable + granulat + ciment) pendant 1 minute

-Ajout de l'eau de gâchage avec 1/3 de SP et malaxage pendant 2 minutes.

-Ajout du reste (2/3) de SP et malaxer pendant 30 secondes

- Mesurer de l'affaissement au cône d'Abrams

Le remplissage des moules s'effectue par deux couches, chacune est mise sous vibration à l'aide d'une aiguille vibrante pendant une vingtaine de seconde, enfin on fait un surfacage avec une truelle manuelle. L'affaissement au cône d'Abrams et la masse volumique sont déterminées pour chaque gâchée.

Trente-deux éprouvettes cubiques (10x10x10) et quatre cylindriques pour (15x 30) et Trente-deux éprouvettes prismatique de (7x7x28) ont été fabriqués.

La figure 2.10 montre la fabrication des corps d'épreuve. Les spécimens d'épreuve sont ensuite décoffrés 24 h après le coulage et conservées dans l'eau pendant 56 jours (Fig. 2.10).



a. Bétonnage.

b. Décoffrage.

Figure 2. 10. Fabrication des spécimens d'épreuve

2.4 Propriétés du béton à l'état frais

2.4.1. Essai d'affaissement

C'est l'essai le plus couramment utilisé car il est très simple à mettre en œuvre au laboratoire et au niveau des chantiers. Il s'agit de constater l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son poids propre. Selon la norme NF P 18 -451[44], l'essai consiste à remplir de béton un moule en tôle tronconique, le remplissage s'effectue en trois couches tassées avec une tige en acier de 16mm de diamètre et dont l'extrémité est arrondie, à raison de 25 coups par couche. On soulève ensuite le moule avec précaution et on mesure l'affaissement (Fig. 2.11).



Figure 2. 11. Essai d'affaissement au cône d'Abram.

2.4.2. Masse volumique

L'essai de la masse volumique est réalisé sur un béton frais selon la norme : NF EN 12350-6 [45]. Le béton frais est mis en place dans un récipient rigide et étanche à l'eau, puis pesé (Fig.2.12).



Figure 2. 12. Mesure de la masse volumique à l'état frais.

2.5. Propriétés de béton a l'état durci

2.5.1. Essai de compression

Les essais de compression sont réalisés sur des éprouvettes cubiques (10 x 10 x 10) cm³, selon la norme EN12390-3 [46]. Les mesures ont été effectuées à 28 et 56 jours avec une presse de capacité maximale de 3000 kN (Fig.2.13). La vitesse de chargement était de 0,5 MPa/s.

La résistance à la compression est calculée par la formule suivant

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad 2.4$$

Où :

f_c : est la résistance en compression, exprimée en méga-pascals (Newtons par millimètres carrés N/mm²) ;

F : est la charge maximale, exprimée en Newtons (N) ;

A_c : est l'aire de la section de l'éprouvette sur laquelle la force de compression est appliquée (mm²).



Figure 2. 13. Presse hydraulique

2.5.2. Essai de traction par flexion

L'essai de traction par flexion 3 points est réalisé sur des éprouvettes prismatiques (7x7x28cm), suivant la norme NF P 18.407. L'essai est effectué sur une machine, d'une capacité de 200 KN, et ayant une vitesse de chargement de 0.1 MPa par seconde (Fig.2.14). La résistance à la traction (par flexion) correspond à la contrainte maximale calculée par la formule suivante :

$$f_t = \frac{1.5 \times F \times L}{a^3}$$

2.5

f_t : Résistance à traction la flexion exprimée en MPa.

F : Force de rupture exprimée en N.

a : dimension de la section (a = 70 mm).

L : Longueur de la spécimen (L= 210 mm)



Figure 2. 14. Essai de traction par flexion.

2.5.3. Modules d'élasticité

Le module d'élasticité (E_c) a été évalué au moyen d'un test de compression sur des éprouvettes cylindriques 15×30 cm (Fig.2.15), à l'aide d'un extensomètre conformément à la norme ASTM C-469 [47].

Le module d'élasticité de chaque mélange BLB a été testé à 56 jours. Deux échantillons ont été préparés pour chaque essai, en prenant leur moyenne arithmétique.



Figure 2. 15. Essai de module d'élasticité

2.5.4. Surfaçage

Afin de garantir la fiabilité des résultats, les surfaces sur lesquelles s'applique la charge doivent être planes et parallèles. Les cylindriques ont été soumis à une rectification mécanique des deux faces transversales à l'aide d'une rectifieuse électrique à disque abrasif (Fig. 2.16).



Figure 2. 16. Surfaçage des éprouvettes

2.5.5. Traitement thermique

Pour étudier le comportement à haute température des bétons, il est nécessaire d'appliquer des traitements thermiques. Pour cela, les éprouvettes subissent un traitement lent ($4^{\circ}\text{C}/\text{min}$), correspondant à la vitesse recommandée par la RILEM [48] pour les dimensions d'éprouvettes utilisées et afin de déterminer les propriétés mécaniques des bétons étudiés.

Afin de réaliser ces cycles de chauffage, on a utilisé un four d'une capacité ($25 \times 23 \times 18 \text{ cm}^3$) (Fig.2.17). Il est piloté par un régulateur connecté à un thermocouple placé dans le four. Une ventilation est associée au chauffage pour brasser l'air et ainsi avoir une température uniforme dans le four.

Les échantillons sont soumis à des différentes températures (250°C , 500°C et 800°C), une stabilité d'une heure est appliquée afin d'homogénéiser la température au sein des éprouvettes, puis un refroidissement jusqu'à la température ambiante. Le choix de ces températures est fait par rapport au comportement des différents composants de la matrice cimentaire et la capacité du four.

La période de chauffage était de une heure à chaque augmentation de température pour permettre au béton à l'intérieur des échantillons d'atteindre la température requise. Après chaque étape du traitement thermique, les échantillons ont été pesés pour calculer la perte de masse et calculer la résistance résiduelle en compression et résistance résiduelle à la traction par flexion.



Figure 2. 17. Four à moufle

2.5.6. Perte de masse

Pour la détermination de l'évolution de la perte de masse en fonction du cycle de chauffage-refroidissement, les éprouvettes sont pesées avant et après chaque cycle de chauffage-refroidissement. Les éprouvettes issues du chauffage sont pesées directement afin d'éviter tout phénomène de réhydratation avec le milieu ambiant. L'essai consiste donc à déterminer la perte de masse qu'ont subie les éprouvettes lors du chauffage par rapport à leur état initial (état avant le chauffage), Elles sont pesées à l'aide d'une balance électronique ayant une précision de 0.1g, comme montre la figure 2.18. La perte de masse exprimée en pourcentage est obtenue de la façon suivante :

$$\text{Perte de masse} = \frac{M_0 - M_t}{M_0} \times 100 (\%) \quad 2. 6$$

Avec :

M_0 : la masse de l'éprouvette à la température ambiante (avant le chauffage),

M_t : la masse de l'éprouvette refroidie après le cycle de chauffage-refroidissement.



Figure 2. 18. Mesure de la perte de masse.

Chapitre 03

Résultats et interprétation

3.1. Introduction

Dans ce chapitre, on présente les résultats obtenus lors des expériences de façon à pouvoir les interpréter. L'analyse portera d'abord sur les propriétés des deux types de bétons lourds à base de barytine (BLB-0.5 et BLB-0.38) à l'état frais et à l'état durci. Ce chapitre vise également à étudier le comportement de ces deux types de BLB sous différents cycles de chauffage-refroidissement (20 °C, 250 °C, 500 °C et 800°C). L'analyse des résultats qui concernent la perte de masse, la résistance en compression et la résistance à la traction par flexion sous différentes températures.

3.2. Propriétés des BLB à l'état frais

Les propriétés des BLB à l'état frais sont caractérisées par l'affaissement au Cône d'Abrams et la masse volumique

3.2.1. Affaissement des bétons lourds à base de barytine

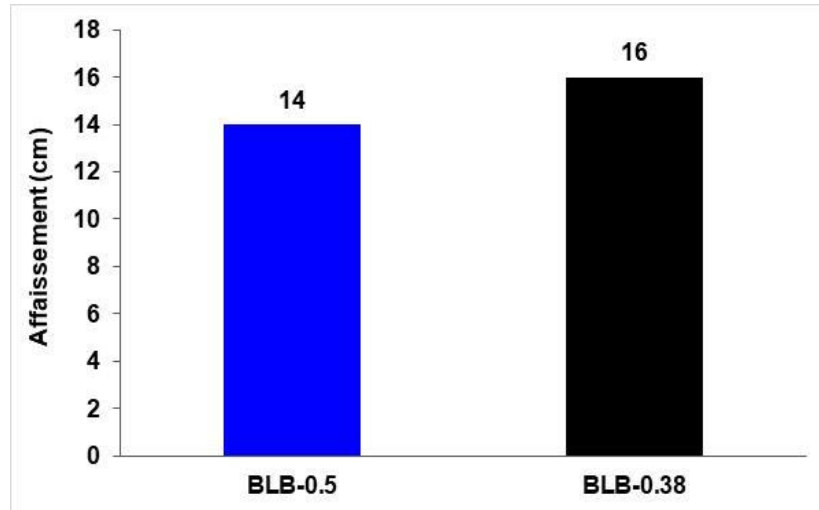
Les résultats sur le comportement à l'état frais des bétons lourds à base de barytine (BLB) sont présentés dans le tableau 3.1 et illustrés par les figures 3.1 et 3.2. La figure 3.2 illustre un affaissement plus prononcé pour la formulation BLB-0,38 ($E/C = 0,38$), mesuré à 16 cm, par rapport à la formulation BLB-0,5 dont l'affaissement atteint 14 cm. L'amélioration de l'ouvrabilité (BLB-0,38), observée bien que le rapport eau-ciment soit plus faible, résulte principalement d'un dosage optimal en superplastifiant. Ce dernier permet de compenser efficacement la réduction de la teneur en eau, tout en assurant une bonne fluidité du mélange.



Figure 3. 1. Essai d'affaissement

Tableau 3. 1. Affaissement des deux type de BLB.

Béton	Affaissement (cm)
BLB-0.5	14
BLB-0.38	16

**Figure 3. 2.** Affaissements des BLB testés.

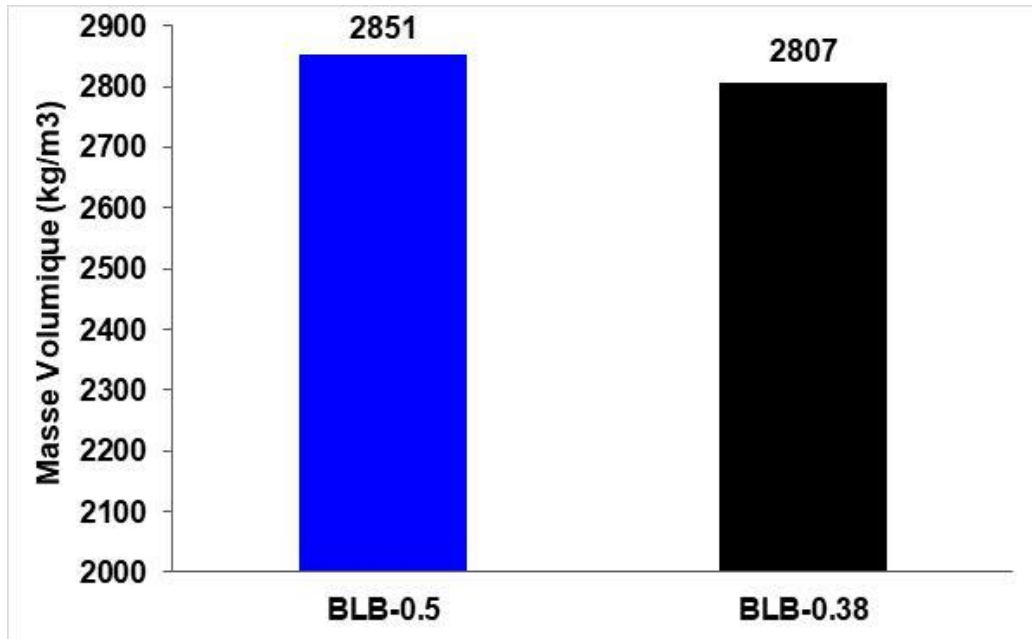
3.2.2. Masse volumique

Les résultats de la masse volumique à l'état frais, présentés dans le tableau 3.2 et les figures 3.3 et 3.4, révèlent que le BLB-0,5 atteint une valeur de 2851 kg/m³ contre 2807 kg/m³ pour le BLB-0,38. Cette légère différence de densité entre les deux formulations s'explique principalement par leur rapport E/C différent : le BLB-0,5, possédant un rapport eau/ciment plus élevé (0,5), contient d'avantage d'eau, ce qui contribue à augmenter sa masse volumique. En revanche, le BLB-0,38, bien que moins dense, bénéficie potentiellement d'une microstructure plus compacte grâce à son faible rapport E/C (0,38). Ces valeurs confirment néanmoins le caractère particulièrement lourd de ces bétons à base de barytine, tout en soulignant l'influence notable du dosage en eau sur leurs propriétés physiques à l'état frais.

**Figure 3. 3.** Masse volumique

Tableau 3. 2. Masse volumique des bétons.

Béton	Masse volumique (kg/m ³)
BLB-0.5	2851
BLB-0.38	2807

**Figure 3. 4.** Variation de la masse volumique des différents types de BLB.

3.2. Propriétés mécaniques des BLB à l'état durci

3.2.1. Résistance à la compression

Le tableau 3.3 et la figure 3.5 présentent les résultats de résistance à la compression des deux formulations de béton lourd à base de barytine (BLB) aux âges de 28 et 56 jours. Les données montrent une nette supériorité des performances mécaniques du BLB-0.38 par rapport au BLB-0.5, avec des résistances respectives de 52 MPa et 60 MPa à 28 et 56 jours, contre seulement 39 MPa et 42 MPa pour le BLB-0.5. Cette différence marquée, de l'ordre de 33% à 28 jours et 43% à 56 jours, s'explique principalement par l'effet bénéfique du rapport E/C plus faible (0.38) du BLB-0.38 (Fig.3.5), conduisant à une microstructure dense et donc à une meilleure résistance. En plus, la meilleure résistance du BLB-0.38 est principalement attribuée à la matrice cimentaire du béton lourd, malgré la friabilité du granulat de barytine.

Par ailleurs, le taux de gain de résistance entre 28 et 56 jours est plus élevé pour le BLB-0.38 (+15,4 %) que pour le BLB-0.5 (+7,7 %), ce qui confirme l'avantage des formulations à faible rapport E/C en matière de développement de la résistance à long terme. Ces résultats soulignent

l'importance cruciale du contrôle du rapport eau-ciment pour l'optimisation des propriétés mécaniques des bétons lourds à base de barytine.

Tableau 3. 3. Résistance à la compression des BLB étudiés.

Type de Béton		Age (jours)	
		28	56
BLB-0.5	f_{cj} (MPa)	39	42
BLB-0.38	f_{cj} (MPa)	52	60

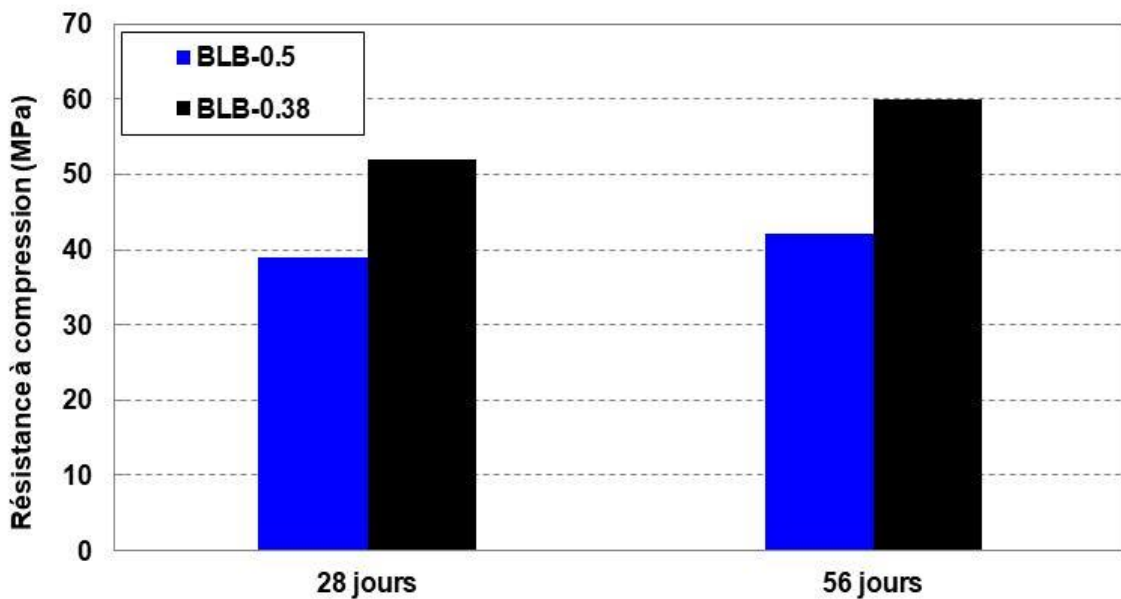


Figure 3. 5. Variation de la résistance à la compression des deux types de BLB.

3.2.2. Résistance à la traction par flexion

Les résultats de résistance à la traction par flexion, présentés dans le tableau 3.4 et illustrés sur la figure 3.6, mettent en évidence des différences significatives entre les deux formulations de béton lourd à base de barytine (BLB). Le BLB-0,38 affiche des performances mécaniques nettement supérieures, avec des résistances de 6,43 MPa à 28 jours et 7,35 MPa à 56 jours, contre respectivement 4,59 MPa et 5,51 MPa pour le BLB-0,5. Cet écart notable de l'ordre de 40 % à 28 jours et de 33 % à 56 jours, confirme l'influence déterminante du rapport E/C sur la résistance à la traction par flexion.

L'évolution des résistances des BLB entre 28 et 56 jours révèle un gain mécanique similaire pour les deux formulations (environ 20%), ce qui suggère un comportement comparable dans le temps malgré la différence initiale de performance. Ces résultats soulignent que la réduction du rapport E/C de 0.5 à 0.38 permet non seulement d'améliorer la résistance à la compression (comme

observé précédemment) mais également à la résistance à la traction par flexion, confirmant ainsi l'avantage global des formulations à faible E/C pour les bétons lourds à base de barytine.

Tableau 3. 4. Résistance à la traction par flexion des BLB testés.

Type de Béton		Age (jours)	
		28	56
BLB-0.5	f_{tj} (MPa)	4.59	5.51
BLB-0.38	f_{tj} (MPa)	6.43	7.35

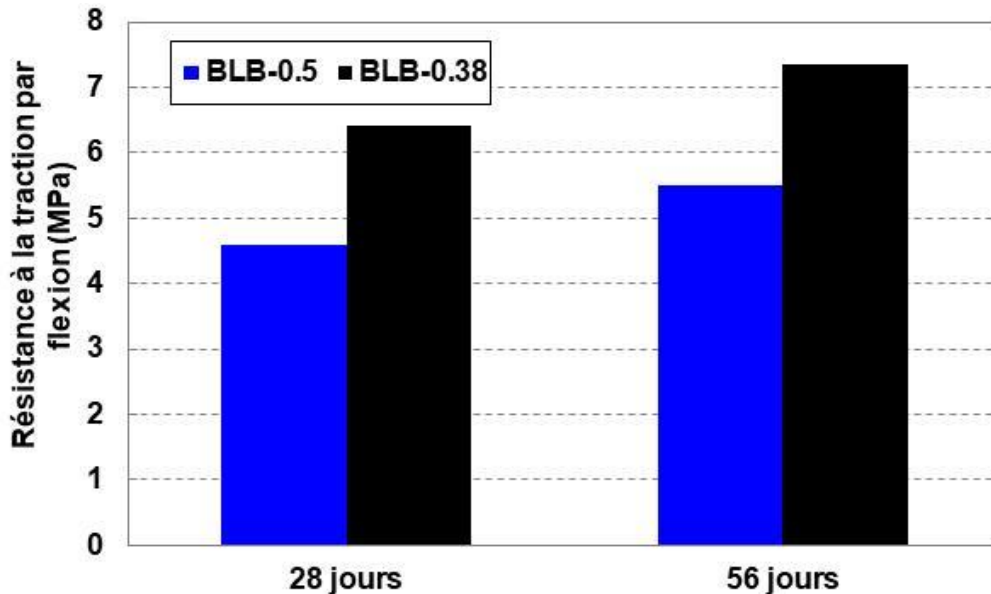


Figure 3. 6. Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction du temps des BLB testés

3.2.3. Module d'élasticité

Les résultats du module d'élasticité à 56 jours, illustrés par la figure 3.7, indiquent des valeurs de 24 GPa pour le BLB-0.38 contre 22 GPa pour le BLB-0.5, ce qui correspond à une augmentation de 9 %. Ces valeurs du module d'élasticité apparaissent relativement faibles comparées aux écarts observés pour les autres propriétés mécaniques. Cette diminution de module d'élasticité est due à la friabilité des granulats de barytine. La friabilité du granulat de barytine constitue le principal facteur limitant l'amélioration du module d'élasticité du béton lourd BLB, malgré l'optimisation de la matrice cimentaire (E/C=0.38). Ces observations mettent en évidence que le module d'élasticité du béton dépend principalement de la qualité du granulat.

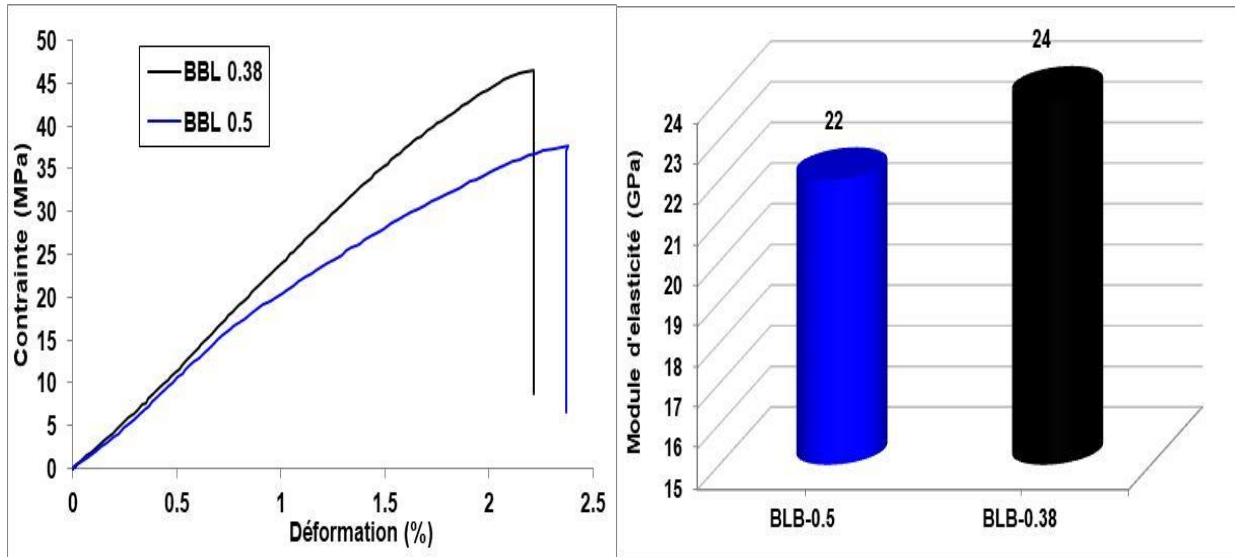


Figure 3. 7. Variation du module d'élasticité des BLB testés.

3.3. Comportement des BLB à haute température

Cette partie traite des propriétés physico-mécaniques des bétons BLB-0.5 et BLB-0.38 soumis à des températures élevées. L'étude porte sur la perte de masse, la résistance à la compression et la résistance à la traction par flexion. Toutes ces propriétés résiduelles sont comparées aux propriétés initiales mesurées à 20 °C.

3.3.1. Comportement des BLB-0.5 et BLB-0.38

3.3.1.1. Perte de masse

La perte de masse des éprouvettes cubiques ($10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$) permet notamment de quantifier l'eau libre et l'eau liée présentes avant et après chauffage dans les éprouvettes de BLB-0.5 et BLB-0.38. En effet, les tableaux 3.5 et le figure 3.8 présentent les valeurs de masse avant et après chauffage à 56 jours.

Tableau 3. 5. Pertes de masse des éprouvettes pour BLB-0.5 et BLB-0.5.

Type de Béton	Mesures	Température (°C)			
		20°C	250°C	500°C	800°C
BLB-0.5	Masse (g)	2987	2887	//	//
		3017	//	2863	//
		3010	//	//	2794
	Perte (%)	//	3.35	5.10	7.18
BLB-0.38	Masse (g)	3101	2980	//	//
		3165	//	2960	//
		2961	//	//	2720
	Perte (%)	//	3.90	6.48	8.14

À travers l'ensemble des résultats présentés dans la figure 3.8, on constate que le comportement en compression à haute température des bétons lourds (BLB-0.38 et BLB-0.5) se divise en trois domaines.

Premier domaine (20°C–250°C) : Pour le béton BLB-0.5, les éprouvettes cubiques enregistrent une perte de masse de 3,35 % à 250 °C. Le béton BLB-0.38 enregistre, quant à lui, une perte de masse de 3,90 %. Cette perte de masse est principalement due de l'évaporation de l'eau libre contenue dans les pores et l'eau liée chimiquement, comme le confirment Ali et Lubloy [49] et Ismail et Lubloy [50].

Deuxième domaine (250 °C – 500 °C) : cette phase se caractérise par une variation modérée de la perte de masse à 500°C, avec des valeurs de 5,10 % pour le BLB-0.5 et de 6,48 % pour le BLB-0.38, respectivement. Ces pertes sont attribuables à la déshydratation du gel C-S-H et à la décomposition du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) en CaO et CO_2 . Ces dégagements gazeux entraînent une porosité accrue et une dégradation de la microstructure du béton lourd, contribuant ainsi de manière significative à une perte de masse importante [51]. À 500 °C, l'eau de cristallisation contenue dans l'hydrate de silicate de calcium (C-S-H) et dans l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) est quasiment totalement évacuée, comme l'indiquent Dan et al. [52].

Troisième domaine (500°C–800°C) est marqué par une forte augmentation de perte de masse. A 800°C, les BLB-0.5 et BLB-0.38 ont perdu 7,18% et 8,14 % de leurs masses, respectivement. La perte de masse des bétons lourds (BLB-0.5 et BLB-0.38) est principalement due à la déshydratation complète du gel C-S-H, à la décomposition de la portlandite (Ca(OH)₂) et, en partie, à celle du gypse. Cette perte est accentuée par la porosité induite par les dégagements gazeux (H₂O, CO₂), ce qui entraîne une décomposition progressive de la pâte de ciment [50].

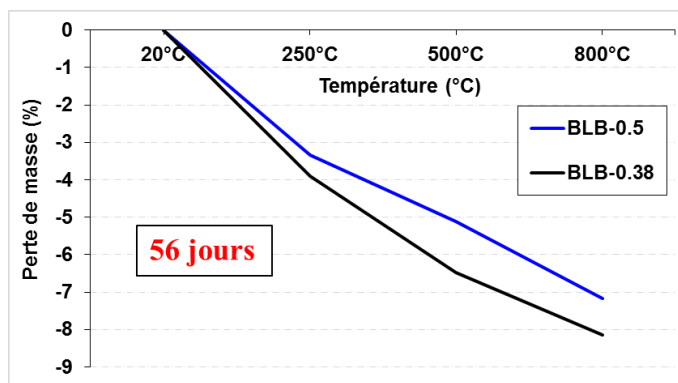


Figure 3. 8. Perte de masse des BLB-0.5 et BLB-0.38 en fonction de la température de chauffage à 56 jours.

3.3.2.2. Résistance résiduelle en compression

Les tableaux 3.6 et la figure 3.9 regroupent les résistances en compression obtenues à différents traitements thermiques pour les bétons lourds à 56 jours.

Tableau 3. 6. Résistance en compression des BLB-0.5 et 0.38 à 56 jours.

Type de Béton	Mesures	Température (° C)			
		20°C	250°C	500°C	800°C
BLB-0.5	Résistance (MPa)	41	47	34	18
	R _c /R _{c20°C}	1,00	1,15	0,83	0,44
	Perte (%)	/	+14.63	-17.07	-56.10
BLB-0.38	Résistance (MPa)	60	62	39	21
	R _c /R _{c20°C}	1.00	1.03	0.65	0.35
	Perte (%)	/	+3.33	-35	-65.0

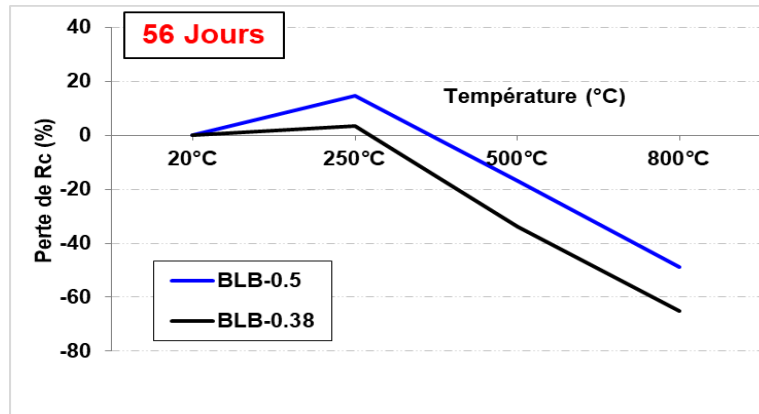


Figure 3. 9. Résistance en compression (R_C) des BLB en fonction différentes températures.

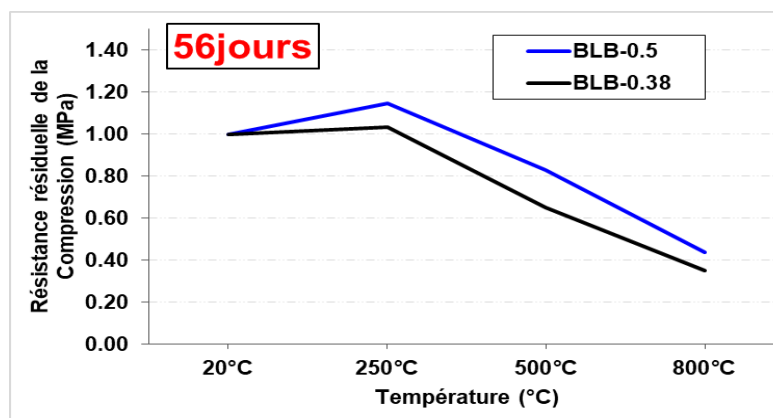


Figure 3. 10. Résistance résiduelle en compression ($R_C/R_{C20^\circ C}$) des BLB en fonction différentes températures.

À travers l'ensemble des résultats présentés dans la figure 3.9, on constate que le comportement en compression à haute température des bétons lourds se divise en trois domaines.

Premier domaine (20°C–250°C). Cette phase est caractérisée par une hydratation secondaire et une activation de superplasticifiant sous l'effet des hautes températures [52]. A 250°C, le béton lourd BLB-0.5 présente une augmentation significative de la résistance à la compression (+14,63 %) par rapport aux échantillons exposés à une température de 20 °C, ce qui peut être attribué à un effet de curage thermique. La chaleur favorise la poursuite des réactions d'hydratation incomplètes ($E/C=0.5$), densifiant la matrice cimentaire. En revanche, le BLB-0.38, plus compact en raison de son faible rapport E/C , présente une légère amélioration (+3,33 %). Cela suggère que sa microstructure est déjà bien optimisée à l'état initial, et donc moins sensible à l'effet bénéfique du chauffage modéré ($E/C=0.38$).

En outre, les conditions hydrothermales favorisent la réhydratation de la pâte de ciment, ce qui permet de former davantage de C-S-H (silicate de calcium hydraté) thermiquement stable,

d'améliorer l'adhérence entre les granulats et le mortier, et de réduire la décomposition du C-S-H à haute température [52-54]. Cela conduit ainsi à une augmentation de la résistance à la compression résiduelle, comme le confirment Dan Wu et al [53] et Sim et al. [54].

Second domaine (250°C–500°C). Durant cette plage thermique intermédiaire, on enregistre une dégradation de la résistance à la compression des bétons lourds. A 500°C, la résistance à la compression du BLB-0.5 chute de 41 MPa et 34 MPa, soit une diminution de 17,07%. Le BLB-0.38 subit une perte plus marquée de résistance, passant de 60 MPa à 39 MPa, soit une perte de 35.0%. Cette diminution prononcée résulte principalement de la décomposition des hydrates (notamment les phases C-S-H et la portlandite (CH)) et de l'accroissement de la microfissuration au sein de la matrice cimentaire. La déshydratation des produits d'hydratation et les différences de dilatation thermique entre les constituants du béton engendrent des contraintes internes qui fragilisent progressivement la microstructure, comme l'indiquent Sikora et al. [55].

Troisième domaine (500°C–800°C) correspond à une détérioration accélérée de la microstructure des bétons lourds. À 800°C, la résistance à la compression de BLB-0.5 a diminué de 56.1 % et de 65 % pour le BLB-0.38. Cette perte spectaculaire de la résistance à la compression s'explique par la destruction accrue du lien entre la pâte de ciment et les granulats, la désagrégation complète de la matrice cimentaire consécutive à la décomposition des phases minérales stables (transformation du $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en CaO), ainsi que par l'augmentation exponentielle de la porosité [55, 56].

Pour l'analyse visuelle, les BLB-0.5 et BLB-0.38 exposés à des températures de 250, 500 et 800 °C ont été sélectionnés, et des photographies de leurs surfaces sont présentées dans la figure 3.11.

Quelques fissures fines et courtes visibles ont été observés sur la surface des BLB exposés à une température de 250 °C, tandis qu'après exposition à 500 °C, plusieurs fissures ouvertes et courtes ont été constatées. Il est clairement visible que le nombre de fissures et de défauts à la surface des échantillons augmente avec la température. Cependant, les dommages observés sur les BLB-0.38 et BLB-0.38 étaient des fissures nombreuses ouvertes et plus longues et quelques écaillages sur l'éprouvette à 800°C, comme le montre la figure 3.11.

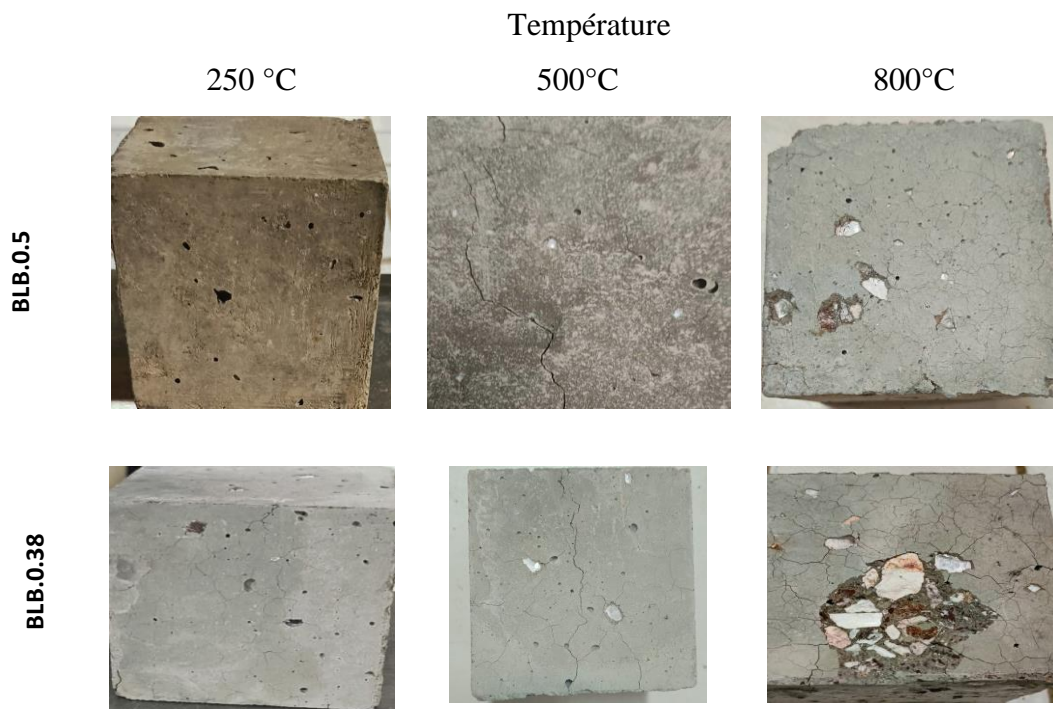


Figure 3. 11. Vue visuelle des éprouvettes BLB-0.5 et 0.38 soumis à différentes températures.

3.3.2.3. Résistance résiduelle à la traction par flexion

Les valeurs de la résistance à la traction par flexion obtenues à température ambiante et après différents traitements thermiques sont présentées dans le tableau 3.7 et la figure 3.12.

Tableau 3. 7. Résistance à la traction par flexion des BLB-0.5 à 56 jours.

Type de Béton	Mesures	Température (°C)			
		20°C	250°C	500°C	800°C
BLB-0.5	Résistance (MPa)	6.00	2.11	0.62	0.51
	$R_t/R_{t20°C}$	1.00	0.35	0.10	0.085
	Perte (%)	/	-64.80	-89.67	-91.50
BLB-0.38	Résistance (MPa)	8.00	3.09	1.23	0.87
	$R_t/R_{t20°C}$	1.00	0.40	0.15	0.11
	Perte (%)	/	-61.38	-84.62	-89.12

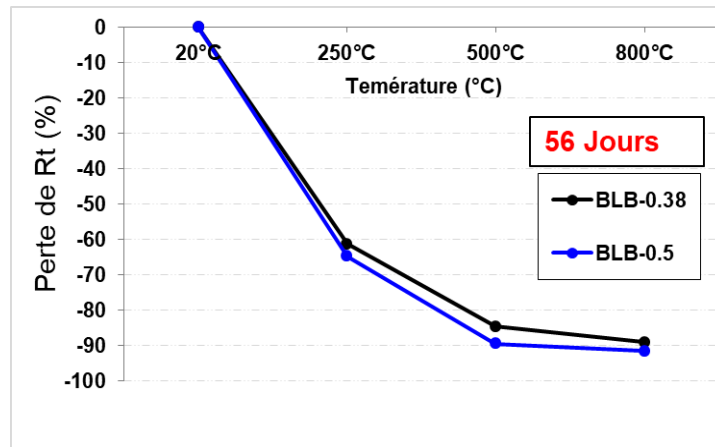


Figure 3. 12. Perte de la résistance en traction par flexion des BLB.

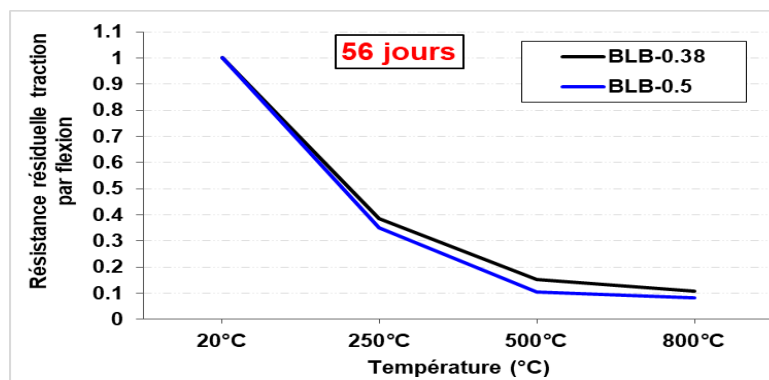


Figure 3. 13. Perte de la résistance résiduelle en traction par flexion des BLB.

Selon les résultats présentés dans la figure 3.12, on observe que le comportement en traction par flexion à haute température des bétons lourds se décompose en trois phases.

Premier domaine (20°C–250°C) : A 250°C, la perte de résistance du BLB-0.5 est de 64.80% contre 61.38% pour le BLB-0.38, comme le montre le tableau 3.7. Cette baisse initiale importante résulte principalement de l'évaporation de l'eau libre et de l'eau chimiquement liée, de l'intensification du retrait de la pâte de ciment, ainsi que de l'apparition de microfissures dans la matrice cimentaire, comme l'indiquent Sikora et al. [55].

Second domaine (250°C–500°C) : Durant cette phase la dégradation de la résistance à la traction par flexion s'accroît considérablement, avec une chute de 89,67% pour le BLB-0.5 (6,00 MPa à 0,62 MPa) et de 84,62% pour le BLB-0.38 (8,00 MPa à 1,23 MPa) à 500°C. Cette réduction sévère est provoquée par la décomposition progressive des hydrates (phases C-S-H et portlandite) et l'augmentation marquée de la porosité, qui altère profondément la cohésion de la matrice cimentaire et les granulats [50, 57].

Troisième domaine (500°C–800°C) : À 800 °C, les résistances résiduelles atteignent des valeurs critiques : 0,51 MPa pour le BLB-0.5 (soit une perte de 91,50 %) et 0,87 MPa pour le BLB-0.38 (soit une perte de 89,12 %).

Cette chute spectaculaire de résistance est liée à la décomposition complète du C–S–H ainsi qu'à la déstructuration de la matrice cimentaire, comme le prouvent Suha et Lubloy [50] et Sikora et al. [55].

Par ailleurs, les échantillons BLB-0.5 et BLB-0.38, chauffés à des températures de 250, 500 et 800 °C, ont été choisis pour l'analyse visuelle. Les images de leurs surfaces sont illustrées dans la figure 3.14.

À 250 °C, de petites fissures ainsi que des pores ont été observés à la surface des éprouvettes (BLB-0.38 et BLB-0.5), comme le montre la figure 3.14. À 500 °C, des modifications de la microstructure de la pâte de ciment ont été constatées, accompagnées de fissures apparaissant à la surface des granulats, et partiellement dans les zones de transition interfaciale, plutôt que dans la pâte de ciment elle-même (Fig.3.14). À 800 °C, une intensification marquée de la formation de macrofissures dans la matrice cimentaire a été observée (Fig.3.14). En plus des fissures présentes dans les granulats, des fissures traversant la pâte de ciment et se prolongeant à travers les zones de transition interfaciale (ZTI) ont été relevées. Une augmentation significative de la largeur des fissures le long des ZTI a également été constatée. Un écaillage important a été observé pour le BLB-0.38, tandis que le BLB-0.5 présente un écaillage nettement moindre. Ces défauts contribuent à une dégradation significative de la microstructure des bétons lourds.

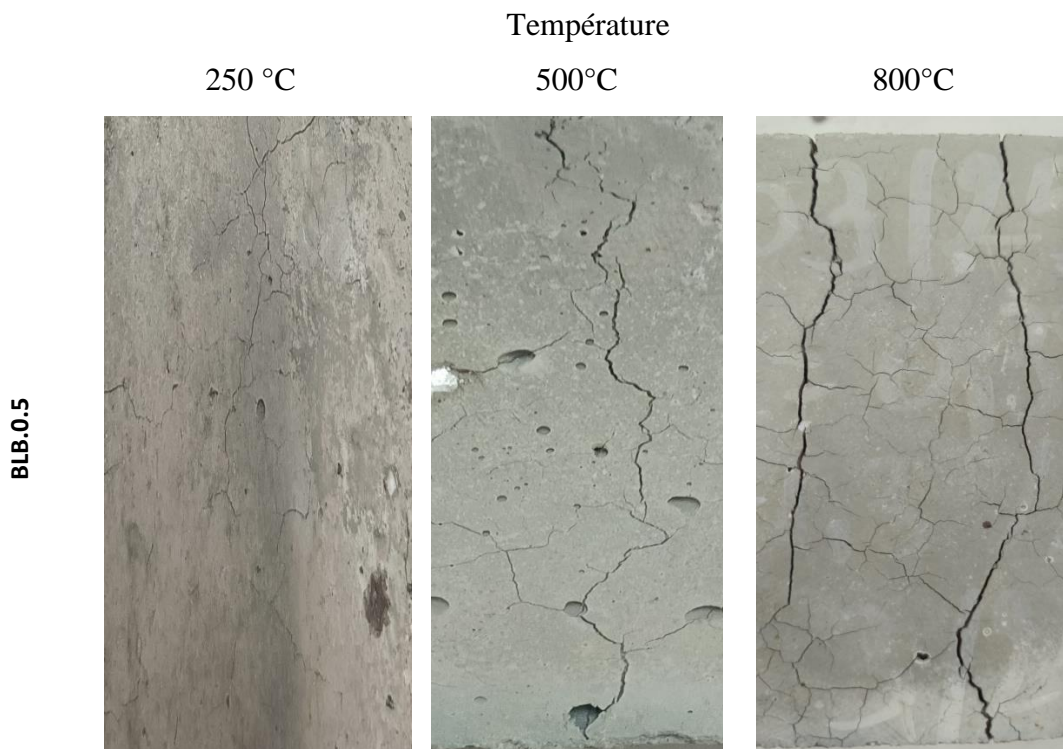




Figure 3. 14. Faciès des bétons lourds (BLB-0.38 et BLB-0.5) soumis à différentes températures.

3.4. Conclusion

Ce chapitre étudie la caractérisation et comportement des bétons lourds BLB-0.5 et BLB-0.38 soumis à différents cycles de chauffage-refroidissement (250 °C, 500 °C et 800 °C). D'après les résultats obtenus, on peut tirer les conclusions suivantes:

1. Caractérisation des bétons lourds

- On note des affaissements de 16 cm et 14cm pour BLB-0.38 et BLB-0.5, respectivement.
- La masse volumique est légèrement affectée par le rapport Eau/Ciment, on enregistre 2851 kg/m³ pour BLBO-0.38 et 2807 kg/m³ pour le BLB-0.5.
- Une résistance à la compression de 52 MPa et 60 MPa a été enregistrée pour le BLB-0.38 à 28 et 56 jours, respectivement, contre seulement 39 MPa et 42 MPa pour le BLB-0.5.
- Le BLB-0,38 présente une résistance à la traction par flexion de 6,43 MPa à 28 jours et de 7,35 MPa à 56 jours, contre respectivement 4,59 MPa et 5,51 MPa pour le BLB-0,5.
- Le module d'élasticité des bétons lourds est significativement influencé par le granulats de barytine. On note une valeur de 24 GPa pour le BLB-0.38, contre 22 GPa pour le BLB-0.5.

2. Comportement des bétons lourds BLB-0.5 et BLB-0.38 soumis à différents cycles de chauffage-refroidissement (250 °C, 500 °C et 800 °C).

- La perte de masse augmente avec l'élévation de la température, atteignant une perte de masse de 7,18 % et 8,14 % à 800 °C pour BLB-0.5 et BLB-0.38, respectivement.

- Les résistances à la compression des mélanges BLB-0.38 et BLB-0.5 atteignent un pic à 250 °C, avec respectivement 62 MPa et 47 MPa. À 800 °C, les résistances résiduelles chutent à 21 MPa pour le BLB-0.38 (soit une diminution de 65 %) et à 18 MPa pour le BLB-0.5 (soit une perte de 56.10 %).
- À 250 °C, le BLB-0.5 enregistre une perte de résistance de 64,80 %, contre 61,38 % pour le BLB-0.38. À 800 °C, les résistances résiduelles à la traction par flexion chutent à des niveaux critiques, atteignant 0,51 MPa pour le BLB-0.5 (soit une diminution de 91,50 %) et 0,87 MPa pour le BLB-0.38 (correspondant à une perte de 89,12 %).
- À 250 °C, l'apparition de petites fissures et de pores a été observée à la surface des éprouvettes BLB-0.38 et BLB-0.5. En revanche, à 800 °C, une intensification notable de la formation de microfissures au sein de la matrice cimentaire a été constatée pour ces mêmes éprouvettes.

64.80 91.5

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Dans notre étude, des essais seront menés sur des bétons lourds à base de granulats de barytine afin de répondre à deux objectifs. Il s'agit dans un premier temps de caractériser des bétons lourds à base de granulats de barytine d'un point de vue mécanique. Puis, dans un deuxième temps d'étudier le comportement des bétons lourds exposés à des températures élevées (250, 500 et 800 °C).

1. L'ensemble des essais réalisés dans la première partie montre les résultats suivants:

- Le BLB-0.38 a montré une augmentation de la maniabilité par rapport à celle BLB-0.5, On note des affaissements de 16 cm et 14 cm pour BLB-0.38 et BLB-0.5, respectivement.
- Une résistance à la compression de 60 MPa a été enregistrée pour le BLB-0.38, contre 42 MPa pour le BLB-0.5.
- Le béton BLB-0,38 développe une résistance à la traction par flexion de 7,35 MPa, et 5,51 MPa pour le BLB-0,5.
- Le module d'élasticité des bétons lourds est fortement influencé par la nature du granulats de barytine, avec une valeur de 24 GPa pour le BLB-0.38, contre 22 GPa pour le BLB-0.5.

2. Les résultats de comportement des bétons lourds à base de granulats de barytine soumis à hautes températures montrent que :

- La perte de masse s'accroît avec la hausse de la température, atteignant 3,35 % pour BLB-0.5 et 3,90 % pour BLB-0.38 à 250 °C, puis 7,18 % et 8,14 %, respectivement, à 800 °C.
- À 250 °C, le béton lourd BLB-0.5 présente une augmentation significative de la résistance à la compression (+14,63 %) par rapport aux échantillons exposés à 20 °C. En revanche, le BLB-0.38 montre une amélioration plus modérée (+3,33 %). À 800 °C, la résistance résiduelle en compression est de 21 MPa pour le BLB-0.38 et de 18 MPa pour le BLB-0.5.
- À 250 °C, la perte de résistance à la traction par flexion du BLB-0.5 est de 64,80 %, contre 61,38 % pour le BLB-0.38. À 800 °C, cette perte de résistance atteint 91,50 % pour le BLB-0.5 et 89,12 % pour le BLB-0.38.
- Quelques fines fissures sont apparues sur les BLB exposés à 250 °C, tandis qu'à 300 °C, de nombreuses fissures ouvertes ont été observées. Les défauts augmentent visiblement avec la température. Sur les échantillons BLB-0.38, les fissures étaient plus longues et accompagnées de quelques écaillages à 800 °C.

Perspectives

Le bilan des travaux réalisés nous permet à présent d'évoquer des points qui restent à développer:

- Le comportement des bétons lourds à base de fibres polypropylènes exposés à des hautes températures.
- L'étude de la durabilité de béton lourd contenant de la baryte à différents taux.

Références bibliographiques

Référence Bibliographique

- [1] B. ZABI, S. BOURROUROU, Utilisation du filler du sable de dune dans le domaine TBP, université Ghardaia, 2022.
- [2] K. Hermann, Passacaglia; Chaconne: g-moll; D-moll; Piano, Schott1996.
- [3] Y. Osmar, Physical and mechanic characteristics of heavyweight concrete produced using barite. University of Süleyman Demirel, Master Thesis,(in Turkish), 2002.
- [4]] CONSOREM (2016). Granulats denses, Fiche d'information minérale N°12, Sagueno-Lac Saint-Jean
- [5] F. Temur, Heavy concrete. University of Sakarya, Civil Eng (in Turkish) (2004).
- [6] I. Akkurt, C. Basyigit, S. Kilincarslan, B. Mavi, A. Akkurt, Radiation shielding of concretes containing different aggregates, Cement and concrete composites 28(2) (2006) 153-157.
- [7] B.S. Singh, K. Ramana, Mechanical properties of heavy weight concrete using heavy weight coarse-aggregate as hematite (Fe58 high grade iron ore), PAN 15(1.5) (2014) 100.
- [8] M.A. González-Ortega, S. Cavalero, A. Aguado, Influence of barite aggregate friability on mixing process and mechanical properties of concrete, Construction and Building Materials 74 (2015) 169-175.
- [9] P. DJ, IUPAC Wire, Chemistry and Cultural Heritage 40(2) (2018) 29.
- [10] Superprof 2020 :<https://www.superprof.fr/ressources>. Yann Léguillon. Quelles sont les caractéristiques du numéro atomique 56 : le baryum ?
- [11] Rapport BRGM R 37775 DMM-RMI-93, "Mémento roches et minéraux industriels", 1993.
- [12] T. Belgacem, Les ressources de l'Algérie, Outre-Terre 47(2) (2016) 152-164.
- [13] E.A. Moussaoui, Essais de valorisation du minerai plombo-barytique du gisement d'Ichemoul (W. Batna) par flottation, Alger, Ecole Nationale Polytechnique, 2015.
- [14] Marteau.P 2014.Barytine Fiche détaillées, Novembre 2014 p01.
- [15] Industrial Minerals Form and Research, 2017. Barite Miners in Nigeria Receive Government Boost; Call for Import Ban to Be Reinstated. Retrieved from. <http://imformed.com/barite-miners-in-nigeria-receive-government-boost-call-for-import-ban-to-be-reinstated/>.
- [16] Albouy L, Rousseau C (1993). Roches et minéraux industriels, la barytine, Mémento.
- [17] Marteau.P 2014.Barytine Fiche détaillées, Novembre 2014 p01.
- [18]] ENOF 2015. Rapport géologique du champ minier Mizab Ain Mimoun 2015. Documentation del'entreprise, p06.
- [19] T. Batouche, Caractérisation et traitement du minerai Barytique d'Ain Mimoun pour l'obtention d'un concentré de haute qualité, 2021.
- [20] E. Bouali, Formulation des bétons lourds, Application dans les fondations profondes, CY Cergy Paris Université, 2020.
- [21] S. Kilincarslan, I. Akkurt, C. Basyigit, The effect of barite rate on some physical and mechanical properties of concrete, Materials Science and Engineering: A 424(1-2) (2006) 83-86.
- [22] Y. Esen, B. Yilmazer, Investigation of some physical and mechanical properties of concrete produced with barite aggregate, Sci. Res. Essays 5(24) (2010) 3826-3833.
- [23] İ.B. Topçu, Properties of heavyweight concrete produced with barite, Cement and Concrete Research 33(6) (2003) 815-822.
- [24] C. Andrade, C. Alonso, A. Arteaga, P. Tanner, Metodologia basata Sulla resistività elettrica per la stima della vita di servizio delle armature metalliche nel calcestruzzo, L'Industria italiana del cemento 71(764) (2001) 330-339.
- [25] T.-C. Ling, C.-S. Poon, Feasible use of recycled CRT funnel glass as heavyweight fine aggregate in barite concrete, Journal of cleaner production 33 (2012) 42-49.
- [26] K. Sakr, E. El-hakim, Effect of high temperature or fire on heavy weight concrete properties, Cement and concrete research 35(3) (2005) 590-596.
- [27] K. Saidani, L. Ajam, M.B. Ouezdou, Barite powder as sand substitution in concrete: Effect on some mechanical properties, Construction and Building Materials 95 (2015) 287-295.
- [28] Saadi-Imen these température BHP 2017

Référence Bibliographique

- [29] F.L. Monte, P.G. Gambarova, Thermo-mechanical behavior of baritic concrete exposed to high temperature, *Cement and Concrete Composites* 53 (2014) 305-315.
- [30] Z. Bažant, M.F. Kaplan, *Concrete at high temperatures: material properties and mathematical models*, (No Title) (2018).
- [31] T.A. Tawfik, M. Slaný, M.T. Palou, Influence of heavyweight aggregate on the fresh, mechanical, durability, and microstructural properties of self-compacting concrete under elevated temperatures, *Journal of Building Engineering* 80 (2023) 108104.
- [32] L. Witte, J. Backstrom, Properties of heavy concrete made with barite aggregates, *Journal Proceedings*, 1954, pp. 65-88.
- [33] Y. Dong, *Fire safety design of concrete structure*, BeiJing: Science Press, 2001.
- [34] T.C. Ling, C.S. Poon, High temperatures properties of barite concrete with cathode ray tube funnel glass, *Fire and materials* 38(2) (2014) 279-289.
- [35] F. Aslani, F. Hamidi, Q. Ma, Fire performance of heavyweight self-compacting concrete and heavyweight high strength concrete, *Materials* 12(5) (2019) 822.
- [36] E. Horszczaruk, P. Sikora, K. Cendrowski, E. Mijowska, The effect of elevated temperature on the properties of cement mortars containing nanosilica and heavyweight aggregates, *Construction and Building Materials* 137 (2017) 420-431.
- [37] E. Horszczaruk, P. Brzozowski, Investigation of gamma ray shielding efficiency and physicomechanical performances of heavyweight concrete subjected to high temperature, *Construction and Building Materials* 195 (2019) 574-582.
- [38] M.A.H. Abdullah, R.S. Rashid, A. Alnutayfat, Determination of the mechanical properties and gamma-neutron shielding effectiveness of ultra-high performance dense concrete (UHPC) exposed to high temperatures, *Case Studies in Construction Materials* 22 (2025) e04157.
- [39] A. Noumowe, *Comportement des bétons ordinaire et à hautes performances soumis à haute température: application à des éprouvettes de grandes dimensions*, Cergy-Pontoise, 2013.
- [40] A. Behnood, M. Ghandehari, Comparison of compressive and splitting tensile strength of high-strength concrete with and without polypropylene fibers heated to high temperatures, *Fire Safety Journal* 44(8) (2009) 1015-1022.
- [41] Z. Xing, *Influence de la nature minéralogique des granulats sur leur comportement et celui du béton à haute température*, Université de Cergy Pontoise, 2011.
- [42] NF P 18 573, *Essai Los Angeles*, 1990.
- [43] NF P 18-574, *fragmentation dynamique*, 1990.
- [44] NF.P.18-451, *Bétons essai d'affaissement*, (1981).
- [45] NF EN 12350-6, *Essai pour béton frais partie 6: Masse volumique*, 1999.
- [46] NF EN 12390-3, *Part 3: Compressive strength of test specimens*, 2003.
- [47] ASTM-C469, *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*1.
- [48] R. TC, *Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures—part 1: introduction; part 2: stress–strain relation: and part 3: compressive strength for service and accident conditions*, *Mater Struct* 28(181) (1995) 410-414.
- [49] S.I.A. Ali, É. Lublőy, Fire resistance properties of heavyweight magnetite concrete in comparison with normal basalt-and quartz-based concrete, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 147(21) (2022) 11679-11691.
- [50] S.I.A. Ali, E. Lublőy, Effect of elevated temperature on the magnetite and quartz concrete at different W/C ratios as nuclear shielding concretes, *Nuclear Materials and Energy* 33 (2022) 101234.
- [51] S.A. Memon, S.F.A. Shah, R.A. Khushnood, W.L. Baloch, Durability of sustainable concrete subjected to elevated temperature—A review, *Construction and Building Materials* 199 (2019) 435-455.
- [52] D. Wu, Z. Liu, Z. Chen, Q. Wu, Q. Tao, Effects of high temperatures to mechanical and gamma ray shielding properties of radiation shielding concrete with Serpentine and Ascharite aggregate, *Construction and Building Materials* 486 (2025) 142015.
- [53] S. Sim, J.H. Rhee, J.-E. Oh, G. Kim, Enhancing the durability performance of thermally damaged concrete with ground-granulated blast furnace slag and fly ash, *Construction and Building Materials* 407 (2023) 133538.

Référence Bibliographique

- [54] H. Singh, A.K. Tiwary, S. Singh, Experimental investigation on the performance of ground granulated blast furnace slag and nano-silica blended concrete exposed to elevated temperature, *Construction and Building Materials* 394 (2023) 132088.
- [55] P. Sikora, K. Cendrowski, E. Horszczaruk, E. Mijowska, The effects of Fe₃O₄ and Fe₃O₄/SiO₂ nanoparticles on the mechanical properties of cement mortars exposed to elevated temperatures, *Construction and Building Materials* 182 (2018) 441-450.
- [56] G.S. Anunike, M. Tarabin, O.A. Hisseine, Assessment of the mechanical, radiation shielding, and durability of ultra-high-performance concrete for radiation shielding: A review, *Construction and Building Materials* 474 (2025) 140896.
- [57] H. Fares, A. Noumowe, S. Remond, Self-consolidating concrete subjected to high temperature: Mechanical and physicochemical properties, *Cement and Concrete Research* 39(12) (2009) 1230-1238.