



Université Mohamed khider –Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie civil et d'Hydraulique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies

Filière : GENIE CIVIL

Spécialité : MATERIAUX EN GENIE CIVIL

Réf. :

---

Présenté et soutenu par :

**LAAMARI Mourad**

Le : mardi 4 juin 2024

## **Amélioration des propriétés physico-mécaniques du béton à base de granulats légers soumis à haute température**

تحسين الخواص الفيزيائية والميكانيكية للخرسانة المعتمدة على الركام الخفيف عند التعرض لدرجات حرارة مرتفعة

---

Jury : - Ben Ammar Ben khadda

- Guettala Abdelhamid

Encadreur : - HACHEMI Samya

- BEN ZETTA Hicham

Année universitaire : 2024 - 2025

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

## الإهداء

الى العزيزين والدي ووالدي على تضحياتهما وتشجيعهما لي

وأسأل الله أن يحفظهما ويطيل عمرهما

جميع أفراد عائتي الصغيرة

زوجتي

أبنائي لجين - فرح - يوسف - إسلام

إخوتي وأخواتي

جميع أفراد عائتي الكبيرة وأقاربي

أصدقائي الأوفياء

زميلتي ومشجعتي وداعمتي بالقسم رغدي خولة

كل من ساعدني في إنهاء هذه المذكرة

لكل من ساهم بشكل مباشر أو غير مباشر في جعل هذا المشروع ممكنا

شكرًا لكم جميعًا

## شكر وتقدير

تم تنفيذ هذا العمل داخل مختبر مواد البناء التابع لقسم الهندسة المدنية والري

لجامعة محمد خيضر بسكرة.

أشكر الله في المقام الأول الذي أعطاني القوة والصبر والثبات لإتمام هذا العمل.

كما أعرب عن خالص شكري وامتناني لـ :

أستاذتي الفاضلة ومنيرة دربي هاشمي سامية التي بدونها لم تنجح هذه المذكرة أبدًا

أشكرها جزيل الشكر على إشرافها و تدقيقها على كل تفاصيل هذا العمل

حتى آخر كلمة منه وتكريس كل طاقتها وقتها لعملي.

الى الأخ الدكتور هشام بن زطة على كل نصائحه وتوجيهاته الثمينة لإنجاح هذا العمل

مرة أخرى شكرا لكما.

إلى أستاذي الكريم بلعربي محمد على كل دعمه طوال مشواري الدراسي.

إلى مهندس مخبر مواد البناء بقسم الهندسة المدنية والري بجامعة محمد خيضر على

التسهيل لي بتنفيذ عملي في المختبر الى زميلتي وداعمتي رغدي خولة. إلى أعضاء لجنة

التحكيم على موافقتهم بالحكم على هذا العمل. لجميع أساتذة قسم الهندسة المدنية على

رأسهم عميد الكلية ورئيس القسم.

الى موظفي إدارة قسم الهندسة المدنية بجامعة محمد خيضر أخيراً أشكر جميع الذين

شجعوا وساعدوا وساهموا في هذا العمل.

## ملخص

يعد تدهور الخرسانة نتيجة التعرض للدرجات عالية من الحرارة من المسائل التي لا يمكن غض النظر عنها والتي تؤثر بشكل كبير على سلامة المنشآت ومنه السلامة العامة للأفراد. مما يطرح تساؤلات حول أداء مختلف أنواع الخرسانة خصوصاً عند تعرضها لدرجات حرارة مرتفعة. وقد ساهمت الأبحاث النظرية والتجريبية في توسيع دائرة معارفنا للظواهر المرتبطة بسلوك الخرسانة تحت تأثير الحرارة العالية وتحديد العوامل المؤثرة على خصائصها الفيزيائية والميكانيكية.

يركز هذا العمل التجريبي على دراسة تأثير درجات الحرارة العالية التي تحاكي الحرائق على خصائص الخرسانة. مع التركيز على الخرسانة المعدلة باستخدام الطين الممدد. حيث شملت الدراسة خمس تراكيب خرسانية أربع منها معدلة باستخدام أصناف مختلفة من الطين الممدد (كركام - رمل - مسحوق). في حين تم اعتماد تركيبة خامسة خرسانية عادية كمرجع للمقارنة. منه تم تحضير 15 عينة لكل تركيبة خرسانية وقسمت العينات بدورها إلى خمس مجموعات. بحيث أخضعت كل مجموعة (3 عينات) لدورة تسخين محددة عند درجات حرارة: - 200°م , 400°م , 600°م و800°م.

بعد التسخين تم إجراء سلسلة من الاختبارات لتقييم التغيرات التي طرأت على الخرسانة. بما في ذلك قياس فقدان الكتلة، التغير في الحجم، المسامية، الكتلة الحجمية، مقاومة الضغط، سرعة الموجات الصوتية، وتقييم التشققات. وقد أظهرت النتائج تفاوتاً في سلوك التراكيب الخرسانية تحت تأثير الحرارة. حيث أظهرت بعض التركيبات المعدلة بالطين الممدد أداءً حسن مقارنة بالخرسانة العادية. من حيث احتفاظها بخصائصها الفيزيائية والميكانيكية التي تضمن الديمومة.

**الكلمات المفتاحية:** الطين الممدد، الحرارة العالية، الخصائص الميكانيكية، الخصائص الفيزيائية، التشققات، فقدان الكتلة.

## Abstract

The détérioration of concrète due to exposure to high températures Is an issue that cannot be overlooked, as it significantly affects the structural integrity of buildings and, consequently, public safety. This raises important questions regarding the performance of various types of concrete, especially when subjected to elevated températures. Both theoretical and experimental studies have contributed to expanding our understanding of the phenomena associated with concrete behavior under high thermal conditions, as well as identifying the key factors influencing its physical and mechanical properties.

This experimental study focuses on investigating the effects of elevated températures simulating fire conditions on the properties of concrete, with particular emphasis on concrete modified using lightweight expanded clay. The study involved five concrete mixtures: four modified with different forms of expanded clay (as coarse aggregate, sand, and powder), and a fifth conventional concrete mix used as a reference for comparison. A total of 15 spécimens were prepared for each concrete mix, which were then divided into five groups. Each group (comprising three specimens) was subjected to a specific Healing cycle at températures of 20°C, 200°C, 400°C, 600°C, and 800°C.

Following thermal exposure, a compréhensive séries of tests was conducted to évaluât the changes in concrete properties. These tests included measurements of mass los, volume los, porosité, bulk densité, mechanical strength, ultrasonic pulse velocity, and crack évaluation. The results revealed significant variations in the behavior of the concrete mixtures under thermal stress. Notably, some of the mixes modified with expanded clay demonstrated improved performance compared to the conventional mix, particularly in terms of retaining physical and mechanical properties that are critical for durability.

**Keywords** expanded clay, high temperature, mechanical properties, physical properties, cracking, mass loss, ultrasonic pulse velocity.

I	فهرس المحتويات
IV	قائمة الأشكال
V	قائمة الجداول
2	مقدمة عامة

## الفصل الأول: الإطار النظري والدراسة المرجعية

4	1.1. مقدمة
4	2.1. مكونات الخرسانة العادي
5	1.2.1. الركام
6	2.2.1. الاسمنت
6	1.2.2.1. تصنيف الاسمنت
7	1.1.2.2.1. تصنيف الاسمنت حسب مقاومته للضغط
7	2.1.2.2.1. تصنيف الاسمنت حسب طبيعة البيئة
7	3.2.1. ماء الخلط
7	4.2.1. الركام الخفيف
8	1.4.2.1. دور الركام الخفيف في الخرسانة
8	2.4.2.1. أصل الركام
8	1.2.4.2.1. المعالجات الفيزيائية
9	2.2.4.2.1. المعالجات الحرارية
9	3.2.4.2.1. المعالجات الكيميائية
10	3.4.2.1. جدول مقارنة بين خصائص نوعي الركام
10	4.4.2.1. خصائص الركام الخفيف
10	1.4.4.2.1. الكتلة الحجمية المنخفضة
11	2.4.4.2.1. النفاذية
12	3.4.4.2.1. المسامية
13	4.4.4.2.1. التمدد الحجمي للركام
14	3.1. الخصائص الفيزيائية لخرسانة الركام الخفيف
14	1.3.1. منطقة التداخل بين العجينة الاسمنتية والركام الخفيف
15	2.3.1. الكتلة الحجمية
15	3.3.1. الامتصاص
15	4.3.1. الحقة
16	5.3.1. قابلية التشغيل

16.....	4.I الخصائص الميكانيكية لخرسانة الركام الخفيف
16.....	1.4.I تأثير الركام الخشن الخفيف لصخور الطينية على الخواص الميكانيكية للخرسانة الخفيفة
16.....	1.1.4.I الركام الخفيف المستعمل
16.....	1.1.1.4.I ركام الصخور الطينية الخشن (بونزا)
18.....	2.1.1.4.I ركام الترمستون الخشن
18.....	2.1.4.I تصميم الخلطة
20.....	3.1.4.I الاستنتاجات
20.....	1.3.1.4.I المقاومة الميكانيكية للانضغاط
20.....	2.3.1.4.I المقاومة الميكانيكية لشد
20.....	3.3.1.4.I المقاومة الميكانيكية للانحناء
21.....	4.3.1.4.I معامل المرونة
21.....	2.4.I تأثير كمية الاسمنت لأنواع مختلفة من الخرسانة الخفيفة على الخواص الميكانيكية
22.....	3.4.I الانكماش
23.....	5.I الخصائص الحرارية لخرسانة الركام الخفيف
23.....	1.5.I نمط انتقال الحرارة داخل الخرسانة
23.....	2.5.I تقييم الخصائص الحرارية حسب تركيبة الخرسانة
25.....	3.5.I تقييم الخصائص الحرارية حسب درجة التشبع
26.....	4.5.I تقييم الخصائص الحرارية بين 5 و 50 درجة مئوية
28.....	6.I الخاتمة

## الفصل الثاني: خصائص المواد والتركيبه الخرسانية والتجارب المعتمدة

30.....	1.II مقدمة
30.....	2.II خصائص المواد والتركيبه الخرسانية والتجارب المعتمدة
30.....	1.2.II خصائص المواد
30.....	1.1.2.II الإسمنت
33.....	2.1.2.II الركام الطبيعي
33.....	1.2.1.2.II الرمل
36.....	2.2.1.2.II الحصى
40.....	3.1.2.II الركام الصناعي (الطين الممدد)
40.....	1.3.1.2.II مسحوق الطين الممدد
41.....	2.3.1.2.II الرمل الصناعي من الطين الممدد (AC 0/3 700)
43.....	3.3.1.2.II الحصى الصناعي من الطين الممدد (AN 8/15 – 500)
45.....	2.2.II التركيبه الخرسانية
46.....	1.2.2.II التركيبه الخرسانية العادية بنسبة 100% من الركام الطبيعي لـ 1م <sup>3</sup>
48.....	2.2.2.II تصنيع العينات
49.....	3.2.2.II حفظ العينات
49.....	1.3.2.2.II الحفظ الأولي داخل القوالب



49.....	2.3.2.2.II. حفظ العينات بعد إزالة القوالب.....
50.....	3.2.II. التجارب المعتمدة في الدراسة التجريبية.....
50.....	1.3.2.II. دورات التسخين والتبريد.....
51.....	1.3.2.1.II. ترتيب العينات داخل الفرن.....
51.....	2.3.2.II. اختبار فقدان الكتلة.....
52.....	3.3.2.II. اختبار تغير الحجم العينات.....
53.....	4.3.2.II. اختبار سرعة الموجات فوق الصوتية.....
54.....	5.3.2.II. اختبار المقاومة الميكانيكية بعد التعرض للحرارة.....
55.....	6.3.2.II. اختبار المسامية والكتلة الحجمية.....
56.....	7.3.2.II. فحص وتقييم التشققات.....
58.....	3.II. خاتمة.....

### الفصل الثالث: عرض وتحليل النتائج

60.....	1.III. المقدمة.....
60.....	2.III. تأثير درجات الحرارة العالية على الخواص الفيزيائية.....
60.....	1.2.III. اختبار فقدان الكتلة.....
62.....	2.2.III. اختبار تقييم فقدان الحجم.....
64.....	3.2.III. المسامية المتاحة للماء.....
66.....	4.2.III. الكتلة الحجمية.....
68.....	3.III. تأثير درجات الحرارة العالية على الخواص الميكانيكية.....
68.....	1.3.III. مقاومة الضغط.....
70.....	2.3.III. سرعة الموجات الصوتية.....
73.....	7.4.3.III. تقييم تدهور وتشقق العينات.....
79.....	4.III. الخاتمة.....
80.....	خاتمة عامة.....
81.....	المراجع.....

## الفصل الأول: الإطار النظري والدراسة المرجعية

- الشكل I.1. 1. مكونات الخرسانة العادية وترتيب نسبها التقريبي في الخلطة الخرسانية.....4
- الشكل I.2. 2. تقييم الكتلة الحجمية للخرسانة حسب معدل استبدال الرمل الطبيعي بالرمل الخفيف.....11
- الشكل I.3. 3. ثلاثة أنواع من المسامية موجودة في الركام.....12
- الشكل I.4. 4. تمزق الخرسانة بسبب التمدد الحراري للركام.....13
- الشكل I.5. 5. آليات التداخل بين العجينة والركام الخفيف.....14
- الشكل I.6. 6. العلاقة بين الاجهاد والانفعال لخرسانة استبدال الركام بركام الينوزا الخشن الخفيف مقارنة مع الخرسانة العادية.....20
- الشكل I.7. 7. العلاقة بين الاجهاد والانفعال لخرسانة استبدال الركام بركام الترمستون الخشن الخفيف مقارنة مع الخرسانة العادية.....20
- الشكل I.8. 8. العلاقة بين مقاومة الانضغاط وتركيز الاسمنت للخرسانة ذات الهبوط (5 سم).....22
- الشكل I.9. 9. الانكماش الداخلي بدلالة الزمن.....23
- الشكل I.10. 10. التوصيلية الحرارية (A) والسعة الحرارية النوعية (B) حسب الكتلة الحجمية الجافة لخرسانات الركام الخفيف.....24
- الشكل I.11. 11. التوصيلية الحرارية (A) والسعة الحرارية النوعية (B) حسب درجة تشبع خرسانات الركام الخفيف.....26
- الشكل I.12. 12. تقييم التوصيلية الحرارية (A) والسعة الحرارية النوعية (B) لخرسانة الركام الخفيف مع درجة الحرارة.....27

## الفصل الثاني: خصائص المواد والتركيبية الخرسانية والتجارب المعتمدة

- الشكل II.1. 1. منحني التدرج الحبيبي لرمل.....36
- الشكل II.2. 2. منحني التدرج الحبيبي لحصى (15/7).....39
- الشكل II.3. 3. منحني التدرج الحبيبي لحصى (25/15).....39
- الشكل II.4. 4. التحليل الحبيبي لرمل الصناعي (AC 0/3 700).....42
- الشكل II.5. 5. التحليل الحبيبي للحصى الصناعي (AN 8/15 – 500).....44
- الشكل II.6. 6. التحليل الحبيبي للحصى الصناعي (AN 15/25– 450).....44
- الشكل II.7. 7. منحني التحليل الحبيبي الشامل لمختلف أصناف الركام الطبيعي والخفيف.....45
- الشكل II.8. 8. دورات التسخين والتبريد (بمعدل تسخين 3 درجات مئوية/دقيقة).....50

## الفصل الثالث: عرض وتحليل النتائج

- الشكل III.1. 1. منحني تقييم فقدان الكتلة بالنسبة لخرسانة الركام الخفيف والخرسانة العادية.....60
- الشكل III.2. 2. منحني تقييم فقدان في الحجم بالنسبة لخرسانة الركام الخفيف والخرسانة العادية.....62
- الشكل III.3. 3. منحني تقييم تطور المسامية لخرسانة الركام الخفيف والخرسانة العادية.....64
- الشكل III.4. 4. تقييم تطور الكثافة لتركيبات خرسانية الركام الخفيف والخرسانة العادية تحت تأثير درجة الحرارة.....66
- الشكل III.5. 5. تقييم المقاومة الميكانيكية خرسانية الركام الخفيف والخرسانة العادية تحت تأثير درجة الحرارة.....68
- الشكل III.6. 6. تقييم تأثير درجات الحرارة العالية على جودة الخرسانة بالاعتماد على سرعة الموجات الصوتية.....71
- الشكل III.7. 7. منحني تطور سمك التشققات تحت تأثير درجات الحرارة العالية (ملم).....77

## الفصل الأول: الإطار النظري والدراسة المرجعية

- الجدول 1.I. جدول مقارنة بين خصائص نوعي الركام..... 10.
- الجدول 2.I. المسام المفتوح لركام ونسبة الشعيرات ذات القطر أكبر 2 ميكرون..... 12.
- الجدول 3.I. تدرج ركام الصخور الطينية الخشن (بونزا)..... 17.
- الجدول 4.I. الخصائص الكيميائية والفيزيائية لركام الصخور الطينية الخشن (بونزا)..... 17.
- الجدول 5.I. تدرج ركام الترمستون الخشن..... 17.
- الجدول 6.I. الخصائص الكيميائية والفيزيائية لركام الترمستون الخشن..... 18.
- الجدول 7.I. الخلاطات الخرسانية المستعملة في الدراسة..... 18.
- الجدول 8.I. الفحوصات المخبرية للمقاومة (الانضغاط – الأشد – الانحناء) ..... 19.
- الجدول 9.I. الفحوصات المخبرية (معامل المرونة) ..... 19.

## الفصل الثاني: خصائص المواد والتركيب الخرسانية والتجارب المعتمدة

- الجدول 1.II. التركيب الكيميائي للإسمنت (%). ..... 31.
- الجدول 2.II. الخصائص الميكانيكية للإسمنت - (NF EN 196-1) ..... 31.
- الجدول 3.II. الخصائص الفيزيائية للإسمنت..... 32.
- الجدول 4.II. الخصائص الفيزيائية لرمال الوادي..... 33.
- الجدول 5.II. الخصائص الفيزيائية للحصى المستعمل (15/7)..... 37.
- الجدول 6.II. الخصائص الفيزيائية للحصى المستعمل (25/15)..... 37.
- الجدول 7.II. البطاقة التقنية لتحليل الكيميائي للطين الممدد..... 40.
- الجدول 8.II. المكونات الكيميائية لمسحوق للطين الممدد(PL)..... 41.
- الجدول 9.II. الخصائص الفيزيائية لمسحوق للطين الممدد(PL)..... 41.
- الجدول 10.II. البطاقة التقنية 2020 – لرمال الصناعي من الطين الممدد (AC 0/3 700) ..... 42.
- الجدول 11.II. البطاقة التقنية 2020 – للحصى الصناعي من الطين الممدد بكسريه..... 43.
- الجدول 11.II. التركيب الخرسانية العادية (GN) لـ 3م1..... 46.
- الجدول 12.II. جدول التركيبات الخرسانية المعتمدة لـ 1م..... 47.
- الجدول 13.II. تصنيف جودة الخرسانة اعتمادًا على سرعة الموجات فوق الصوتية..... 54.

## الفصل الثالث: عرض وتحليل النتائج

- الجدول 1.III. مقارنة التركيب الخرسانية بالخرسانة العادية..... 69.
- الجدول 2.III. تصنيف جودة الخرسانة اعتمادًا على سرعة الموجات الصوتية..... 70.
- الجدول 3.III. تقييم جودة التراكيب الخرسانية اعتمادًا على سرعة الموجات الصوتية..... 71.
- الجدول 4.III. تدهور وتشقق العينات تحت تأثير درجة الحرارة 400°م..... 74.
- الجدول 5.III. تدهور وتشقق العينات تحت تأثير درجة الحرارة 600°م..... 75.
- الجدول 6.III. تدهور وتشقق العينات تحت تأثير درجة الحرارة 800°م..... 76.
- الجدول 7.III. نتائج سمك التشققات لجميع التراكيب حسب كل درجة حرارة..... 77.

## الفصل الأول: الإطار النظري والدراسة المرجعية

- 5..... الصورة 1.I. ركام مكسر
- 5..... الصورة 2.I. ركام دائري
- 6..... الصورة 3.I. ركام معاد التدوير
- 6..... الصورة 4.I. ركام صناعي
- 8..... الصورة 5.I. ركام خفيف

## الفصل الثاني: خصائص المواد والتركيبية الخرسانية والتجارب المعتمدة

- 31..... الصورة 1.II. الاسمنت المستخدم CEM I / 42.5 R
- 32..... الصورة 2.II. تجربة الكتلة الحجمية الظاهرية للإسمنت
- 32..... الصورة 3.II. تجربة الكتلة الحجمية المطلقة للإسمنت
- 33..... الصورة 4.II. رمل الوادي المستخدم
- 34..... الصورة 5.II. تجربة الكتلة الحجمية الظاهرية لرمل
- 34..... الصورة 6.II. تجربة الكتلة الحجمية المطلقة للرمل
- 34..... الصورة 7.II. تجربة المكافئ الرملي قبل الغسل
- 35..... الصورة 8.II. تجربة المكافئ الرملي بعد الغسل
- 35..... الصورة 9.II. تجربة التحليل الحبيبي
- 36..... الصورة 10.II. عملية غسل الحصى المستعمل
- 37..... الصورة 11.II. الكتلة الحجمية الظاهرية لحصى
- 37..... الصورة 12.II. الكتلة الحجمية المطلقة للحصى
- 38..... الصورة 13.II. تجربة تحديد القساوة لوس أنجلس
- 38..... الصورة 14.II. تجربة التحليل الحبيبي للحصى
- 39..... الصورة 15.II. مسحوق الطين الممدد
- 41..... الصورة 16.II. الرمل الصناعي من الطين الممدد
- 43..... الصورة 17.II. الحصى الصناعي من الطين الممدد
- 48..... الصورة 17.II. مراحل تصنيع الخرسانة
- 49..... الصورة 18.II. الحفظ الأولي للعينات لمدة 24 ساعة
- 49..... الصورة 19.II. حفظ العينات في الماء لمدة 28 يوم
- 51..... الصورة 20.II. وضعية وترتيب العينات داخل الفرن
- 53..... الصورة 21.II. قياس الأبعاد لتحديد فقدان الحجم
- 54..... الصورة 22.II. عملية قياس سرعة الموجات فوق الصوتية في الخرسانة
- 55..... الصورة 23.II. اختبار مقاومة العينات بجهاز مكبس هيدروليكي
- 56..... الصورة 24.II. اختبار قياس المسامية
- 57..... الصورة 25.II. فحص وتقييم الشقوق
- 57..... الصورة 26.II. ميكروسكوب ضوئي 24x نوع MPB-2

# مقدمة عامة

## مقدمة عامة

تُعد الخرسانة العادية من أكثر المواد استخدامًا في قطاع البناء نظرًا لمتانتها وتوفّر مكوناتها الأساسية التي تشمل الإسمنت والماء والركام (الناعم والخشن) وتستخدم هذه الخرسانة في أغلب العناصر الإنشائية مثل الأساسات الأعمدة الجدران الحاملة والأسقف بفضل قدرتها على تحمل الأحمال وضمان استقرار المنشآت.

ومع التزايد المستمر في المتطلبات الفنية والمعمارية الحديثة أصبح من الضروري تحسين خصائص الخرسانة العادية لتلبية احتياجات إضافية مثل تقليل الوزن الذاتي تعزيز العزل الحراري أو تحسين مقاومة الظروف البيئية ومن بين الحلول المقترحة يبرز استخدام المواد البديلة أو الإضافات المبتكرة التي تُحسن من أداء الخرسانة دون الإخلال بمقاومتها الميكانيكية.

في هذا السياق يُعتبر **الطين الممدد (Argile Expansée)** من بين أفضل الركام الخفيف والفعال الذي يمكن استخدامه كركام بديل جزئي في الخرسانة العادية حيث يتم إنتاجه عن طريق تسخين الطين في أفران خاصة عند درجات حرارة مرتفعة مما يؤدي إلى تمدده وتشكيل بنية مسامية خفيفة الوزن إن إدخال الطين الممدد في تركيبة الخرسانة يؤدي إلى توفير العديد من الخصائص الإضافية بالإضافة إلى التقليل من التدهور البيئي.

تهدف هذه الدراسة إلى تحسين خصائص الخرسانة العادية من خلال استبدال جزء من المكونات التقليدية للخرسانة بالطين الممدد (ركام أو مسحوق) بنسب محددة وذلك من أجل تقييم تأثير هذه النسب على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للخرسانة مثل الكثافة ومقاومة الضغط ويمثل هذا التوجه خطوة نحو استخدام مواد محلية متوفرة مثل الطين بطرق مستدامة وفعّالة خصوصًا في البيئات التي تتوفر فيها هذه الموارد الطبيعية.

إن التركيز في هذه الدراسة ينصبّ على إعداد تركيبات خرسانية محسّنة بالطين الممدد توفر خصائص جيدة تحت تأثير درجات الحرارة العالية من جهة وتقييم مدى ضمانها للديمومة من جهة أخرى مما قد يُساهم في تطوير مواد بناء أكثر كفاءة وملاءمة للظروف المناخية والاقتصادية المحلية.

# الفصل الأول

الإطار النظري والدراسة  
المرجعية

## 1.I. مقدمة

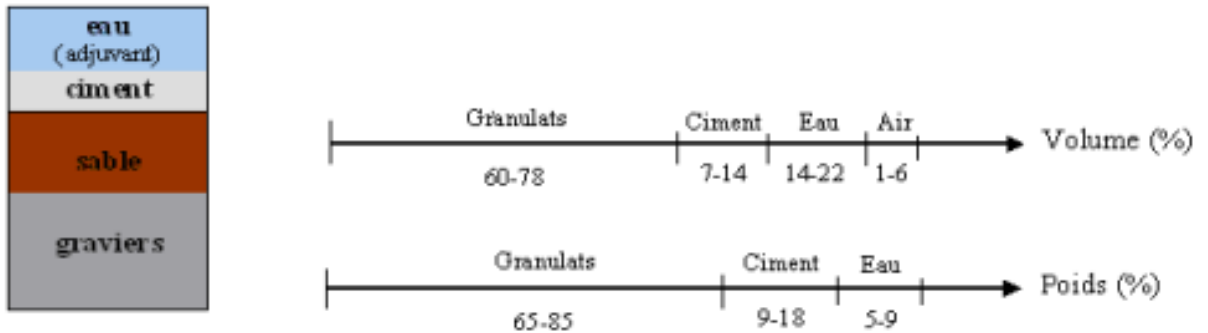
تعدّ الخرسانة مادة البناء الأساسية والمُعتمدة منذ ما يقارب قرناً من الزمان وقد احتوت في بدايتها عن أربعة مكوّنات فقط وهي الحصى والرمل والإسمنت والماء غير أن طرق إعدادها تطوّرت من مجرد عملية عادية إلى علم قائم بحد ذاته يُعرف بعلم مواد البناء [1] وقد شهدت تطورا ملحوظاً من حيث مكوّناتها وتقنيات إعدادها مما جعل دراستها من الجوانب الفيزيائية والميكانيكية ضرورة هندسية ملحة ومن بين التقنيات الحديثة في هذا المجال استخدام الركام الخفيف كبديل جزئي أو كلي للركام التقليدي بهدف تحسين أداء الخرسانة في ظروف معينة مثل درجات الحرارة العالية أو عند الحاجة لتقليل الوزن الذاتي حيث تميزت الخرسانة المُحسّنة باستخدام الركام خفيف مثل الطين الممدد أو الطوب الحراري المعاد تدويره بمجموعة من الخصائص التي تؤهلها للاستخدام في التطبيقات التي تتطلب عزلاً حرارياً أفضل خفة في الوزن وأداء ميكانيكي مقبول وتعتمد هذه الخصائص على نوع الركام وبنيته ونسبة المسامية فيه مما ينعكس على الكثافة وامتصاص الماء والمقاومة الميكانيكية والانكماش.

يهدف هذا الفصل إلى دراسة تأثير إضافة الركام الخفيف على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للخرسانة من خلال عرض تجارب مخبرية سابقة وعرض تحليل نتائجها مقارنةً بالخرسانة التقليدية وذلك من أجل تقييم سلوك هذا النوع من الخرسانة وتحديد مدى كفاءته في التطبيقات الهندسية المختلفة.

## 2.I. مكوّنات الخرسانة العادية

تتكوّن الخرسانة من مزيج من عدة مكوّنات الإسمنت والماء والرمل والحصى وغالبا ما تضاف إليها مواد مضافة حسب حاجة الاستخدام.

(الشكل 1.I). يوضح الخليط المتجانس للخرسانة [2].



الشكل 1.I. مكوّنات الخرسانة العادية وترتيب نسبها التقريبي في الخلطة الخرسانية [2]



## 1.2.I الركام

إن خواص ونوعية الركام له تأثير كبير على الخرسانة وخواصها لكونه يشغل حوالي (70 – 75) % من الحجم الكلي للكتلة الخرسانية حيث يتكون الركام من حبيبات صخرية متدرجة بالحجم منها حبيبات كبيرة كالحصى والأخرى صغيرة كالرمل حيث يضمن الركام استقرارها ومقاومتها للقوى الخارجية والعوامل الجوية كالحرارة والرطوبة فبذلك فإن الركام يعطي للخرسانة متانة أفضل بكثير من استعمال العجينة الاسمنتية لوحدها. كما تعد طبيعة الركام وكميته وشكله وتدرجه الحبيبي ونظافته وحالة سطحه ونوعه من العوامل الأساسية التي تؤثر بشكل مباشر على خصائص الخرسانة سواء في حالتها الطازجة أو بعد التصلب ووفقا لما ورد في المعيار XP P18-540 [31] فإن الركام ينقسم إلى مجموعات رئيسية من حيث التدرج الحبيبي وذلك على النحو التالي [3]:

- مواد ناعمة جدا: (Fillers) القطر الأقصى  $D < 2$  ملم مع مرور 75 % على الأقل من الحبيبات عبر منخل 1.25 ملم و 70 % عبر منخل 0.063 ملم.
- الرمال الناعمة: (Sablons) القطر الأقصى  $D \leq 1$  ملم مع أقل من 10 % من الحبيبات المارة عبر منخل 0.063 ملم.
- الرمال: (Sables) القطر  $D \leq 4$ .
- الركام الصغير: (Graves) القطر الأقصى  $D < 6.3$  ملم.
- الحصى الصغير: (Gravillons) القطر الأدنى  $d \geq 2$  والقطر الأقصى  $D \leq 63$  ملم.
- البالاست: (Ballasts) القطر الأدنى  $d \geq 31.5$  والقطر الأقصى  $D = 80$ .



صورة 2.I. ركام دائري.



صورة 1.I. ركام مكسر.



صورة I.4. ركام صناعي.



صورة I.3. ركام معاد التدوير.

### I.2.2.1. الاسمنت

الاسمنت هو مادة رابطة معدنية تُنتج من خلال إزالة ثاني أكسيد الكربون من الحجر الجيري وتحلل الطين عند درجة حرارة تقارب 1450 درجة مئوية ويتم طحنه ليصبح على شكل مسحوق ناعم غالبا ما يكون لونه رماديا وعند تفاعله مع الماء يخضع لعملية إماهة تنتج معادن مائية مستقرة جدا. يتكون الاسمنت البورتلاندي بشكل رئيسي من المركبات التالية:

- سيليكات ثلاثية الكالسيوم (أليت)  $[C_3S]$ .
- سيليكات ثنائية الكالسيوم (بيليت)  $[C_2S]$ .
- ألومينات ثلاثية الكالسيوم  $[C_3A]$ .
- ألومينوفيريت رباعي الكالسيوم  $[C_4AF]$ .
- مركبات أخرى كالكبريتات والعناصر القلوية وبعض الشوائب.

وتشكل السيليكات الكلسية ( $C_2S - C_3S$ ) حوالي 75% من كتلة الاسمنت أما الخصائص الحبيبية للإسمنت فتعبر عنها من خلال التدرج الحجمي ودرجة النعومة وتعرف هذه النعومة باسم السطح النوعي والذي قد يصل إلى 4000 سم<sup>2</sup>/غرام أو أكثر في حالة الاسمنت ذات المقاومة العالية في العمر المبكر [4].

### I.1.2.2.1. تصنيف الاسمنت

يعتمد تصنيف الاسمنت وفقا لتركيبته الكيميائية على نسبة المكونات الأخرى غير الجبس سواء أُضيفت إلى الكلنكر أو لم تضاف وبناءً على المعيار NF EN 197-1 [32] تم تحديد 27 نوعا من الإسمنت الشائعة تصنف ضمن خمسة أنواع رئيسية وهي:

- أسمنت بورتلاندي صناعي.
- أسمنت بورتلاندي مركب.
- أسمنت خبث الأفران العالية.
- أسمنت بوزولاني.

- أسمنت يحتوي على الخبث والرماد.

#### 1.1.2.2.I. تصنيف الاسمنت حسب مقاومته للضغط

ينص المعيار NF EN 197-1 [32] على تصنيف الإسمنت الشائع وفقاً لمقاومتها للضغط (المقاومة الميكانيكية) والتي يتم تحديدها طبقاً للمعيار حيث تقاس هذه المقاومة بعد 28 يوماً ويتم تصنيف الاسمنت بناءً على ذلك إلى ست فئات مقاومة مختلفة.

#### 2.1.2.2.I. تصنيف الاسمنت حسب طبيعة البيئة

تتميز بعض أنواع الاسمنت بخواص إضافية تمكنها من التكيف مع بيئات خاصة أو ظروف استخدام محددة مثل البيئات العدوانية أو ذات الرطوبة العالية أو التربة الكبريتية [5].

#### 3.2.I. ماء الخلط

وفقاً لمعيار NF EN 1008 [6] يؤدي ماء الخلط الذي مصدره حسب المعيار المياه المسترجعة من عمليات تصنيع الخرسانة أو المياه الجوفية أو مياه الصرف العمراني والصناعي المعالجة دورين أساسيين في صناعة الخرسانة:

- يمنح الخرسانة القوام المناسب في حالتها الطازجة أي أنه يؤثر على خواصها الريولوجية (التشغيل).
  - يوفر الوسط الضروري لإماهة حبيبات الاسمنت مما يضمن تفاعلات التصلب والتماسك.
- وتعد كمية الماء المستخدمة أو بشكل أدق نسبة الماء إلى الاسمنت من العوامل الحاسمة التي تؤثر بشكل كبير على خصائص الخرسانة مثل:

- درجة المسامية.
- النفاذية.
- المقاومة الميكانيكية.
- المتانة وطول عمر الخدمة

#### 4.2.I. الركام الخفيف

الركام الخفيف هو عبارة عن حبيبات ذات وزن منخفض حيث يتميز عن باقي أنواع الركام بكتلته الحجمية المنخفضة إذ تكون هذه الكتلة أقل من 1200 كغ/م<sup>3</sup> بينما تبلغ حوالي 2700 كغ/م<sup>3</sup>. [33] بالنسبة لركام الطبيعي ويرجع هذا الفرق في الكتلة الحجمية إلى المسامية العالية للركام أي إلى وجود نسبة كبيرة من الفراغات الهوائية داخل بنية الركام ويطلق على هذا الهواء اسم الهواء داخل جزيئات الركام.



صورة I.5. ركام خفيف.

#### I.1.4.2.I. دور الركام الخفيف في الخرسانة

- تقليل الوزن الذاتي للخرسانة.
- تحسين العزل الحراري والصوتي بسبب مساميته العالية.
- تعزيز كفاءة المواد الإنشائية وتقليل استهلاك المواد الخام.

#### I.2.4.2.I. أصل الركام

يوجد العديد من أنواع الركام الخفيف في حالتها الطبيعية في حين يتم إنتاج الأنواع الأخرى صناعياً من خلال عمليات كيميائية متنوعة ومن بين الركام ذو الأصل المعدني والمسامية الطبيعية تعد الحمم البركانية (البونص) والصخور الرسوبية مثل الحجر الكلسي من الأنواع الأكثر شيوعاً يتم استخراج هذه المواد من المقالع ويمكن استخدامها مباشرة في مواد البناء.

أما الركام ذو المسامية الطبيعية والأصل النباتي فهو يتكوّن غالباً من مخلفات عضوية تمثل مورداً قابلاً لإعادة التمثين في مجال البناء [07]. ومن بين الأمثلة على ذلك الخشب، سيقان الذرة، قشور جوز الهند [08]. وتبلغ كمية هذا النوع من المنتجات حوالي عشرات الآلاف من الأمتار المكعبة سنوياً وهي كمية لا تزال ضئيلة نسبياً. تتصف هذه الركامات النباتية بوجود عدد كبير من القنوات الشعرية الدقيقة مما يؤدي إلى مسامية مرتفعة غير أنها تحتوي كذلك على مواد عضوية غنية بالسليولوز ما يجعلها تتفاعل مع بعض مكونات المواد الرابطة الهيدروليكية ومن ثم يصبح من الضروري إخضاعها إلى معالجة أولية لجعلها خاملة وغير تفاعلية وتستعمل لهذا الغرض ثلاث تقنيات رئيسية [09].

#### I.1.2.4.2.I. المعالجات الفيزيائية

في هذا النوع من المعالجة يتم عزل المركبات العضوية مثل الهيمى سليولوز الموجودة في الركام عن الوسط الخارجي ويتم ذلك من خلال:

- تشريب الركام بمادة راتنجية أو شمع البرافين عملية التشريب في العمق.
- أو من خلال تغليف الحبيبة بطبقة واقية.

بالإضافة إلى ذلك يمكن تدمير الألياف السلولوزية عن طريق استخدام ملح الكالسيوم لحمض قوي مما يؤدي إلى تكوين عدد كبير من الفجوات الدقيقة داخل الركام.

#### 2.2.4.2.I. المعالجات الحرارية

تهدف هذه المعالجات إلى تدمير المكونات السليلوزية عند درجة حرارة تقارب 280 درجة مئوية كما تعمل في الوقت ذاته على تقليل خاصية امتصاص الرطوبة للركام.

#### 3.2.4.2.I. المعالجات الكيميائية

تعتمد هذه المعالجات على استبدال المجموعات الهيدروكسيلية (-OH) في المادة النباتية ب مجموعات كارهة للماء (hydrophobes) وذلك لتحقيق نفس أهداف المعالجة الحرارية أي الحد من التفاعل مع الرطوبة والماء.

كما تنتج أنواع أخرى من الركام الخفيف من خلال عملية كيميائية تعرف بالتمدد (expansion) كما هو الحال مع الطين الممدد فعند درجة حرارة تقارب 1000° تصبح جدران حبيبات الركام لينة (بلاستيكية) وتنتفخ نتيجة الغازات المنبعثة أثناء عملية حرق أحد المركبات مثل  $CO_2$ ,  $O_2$ ,  $SO_2$ ,  $SO_3$ ,  $CO$ . هذا التفاعل يجعل الركام أخف وزنا بكثير من الركام التقليدي حيث تتراوح الكثافة الحجمية الجافة بين 800 و1200 كغ/م<sup>3</sup>.

كما يرجع اختلاف الكثافة الحجمية الجافة إلى:

- درجة التمدد التي خضعت لها الحبيبات والتي تعتمد على مدة التسخين ودرجة حرارة الحرق بين 1000 و1250°.
  - والتركيب الكيميائي للركام الذي يمكن أن يساهم في تسهيل هذه العملية. ومن أهمها أنواع الركام:
    - الطين الممدد (Argile Expansée).
    - الفلين الصناعي (Polystyrène Expansé).
    - الخبث الممدد (Laitier Expansé).
    - البير لايت الممدد (Perlite Expansée).
    - الزجاج الرغوي (Verre Mousse).
    - الخبث الصناعي (Blast Furnace Slag).
- وأخيرًا كلما كانت عملية التمدد أكثر كثافة أصبح إنتاج المادة أكثر تكلفة وذلك بسبب الطاقة الكبيرة المطلوبة في أفران الحرق والمدة الزمنية اللازمة للتفاعل الكيميائي.

### 3.4.2.I. جدول مقارنة بين خصائص نوعي الركام

جدول 1.I. جدول مقارنة بين خصائص نوعي الركام.

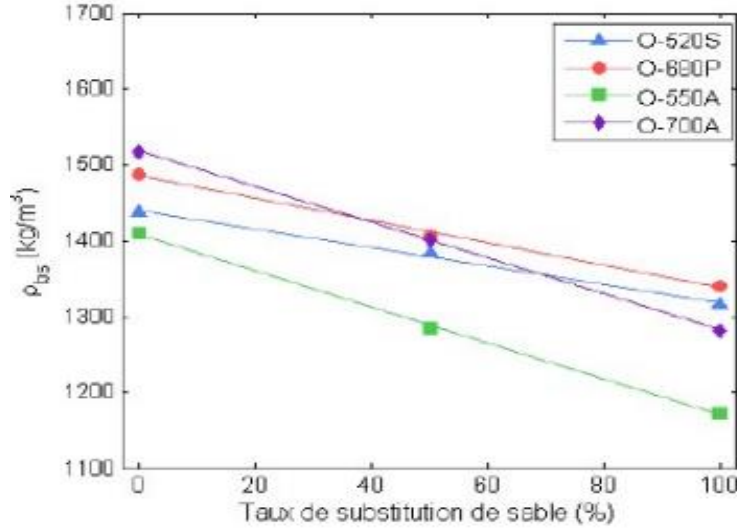
الركام الخفيف	الركام العادي	الخاصية
300 الى 1200 كغ / م <sup>2</sup>	2500 الى 2700 كغ / م <sup>2</sup>	الكتلة الحجمية
أقل	أعلى	مقاومة الضغط
ممتاز	ضعيف	العزل الحراري
مرتفع	منخفض	امتصاص الماء
مرتفعة	منخفضة	الكلفة

### 4.4.2.I. خصائص الركام الخفيف

#### 1.4.4.2.I. الكتلة الحجمية المنخفضة

يتميز هذا النوع من الركام بكتلته حجمية أقل من 1200 كغ/م<sup>3</sup> [33]. مقارنة بالحصويات العادية التي تفوق 2500 كغ/م<sup>3</sup> تعد الكتلة الحجمية الظاهرية لركام الخفيف من أهم خصائصه الأساسية حيث لها تأثيرات مباشرة وهامة على أداء الخرسانات المصنعة منه كما يمتلك معظم أنواع الركام التقليدي كثافة تتراوح بين (2.4 – 2.7) غ/سم<sup>3</sup> في حين أن كثافة الركام الخفيف تكون أقل هذا النوع من الركام ببنية مسامية كبيرة يتم استخدامه كركام خشن أو ناعم حيث يؤدي الركام الخفيف أولاً إلى انخفاض في الكتلة الحجمية للخرسانة التقليدية بنسبة تتراوح بين 20 إلى 30٪ وبفضل خفته وقد ركزت العديد من الأبحاث على استغلال الركام الخفيف بهدف تصميم خرسانة خفيفة الوزن [10-11].

ووفقاً لدراسات Nguyen في حالة استبدال الرمل النهري بالرمل الخفيف فإن ذلك يؤدي إلى زيادة مسامية الخرسانة مما ينتج عنه انخفاض في كتلتها الحجمية كما يوضح الشكل (الشكل 2.I). العلاقة بين الكتلة الحجمية للخرسانة ونسبة استبدال الرمل [12].



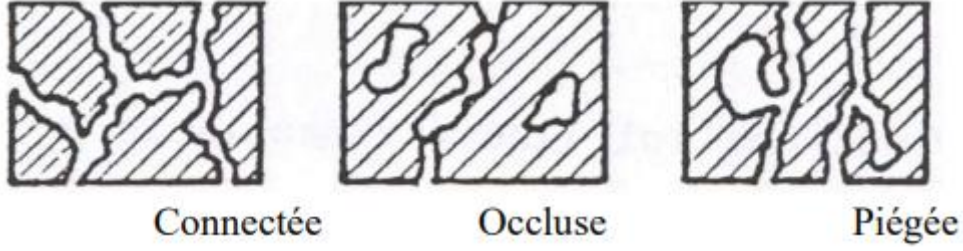
الشكل I.2. تقييم الكتلة الحجمية للخرسانة حسب معدل استبدال الرمل الطبيعي بالرمل الخفيف [12].

حيث وجد ان الكتلة الحجمية لخرسانة الحصى الخفيف عند 0% من الرمل الخفيف تتراوح بين 1410 و 1520 كجم/م<sup>3</sup>. بالنسبة للخرسانة العادية يسمح الاستبدال الكلي للرمل الطبيعي السيليسي-الكربوني برمل خفيف بتحقيق كتل حجمية جافة تتراوح بين 1170 و 1340 كجم/م<sup>3</sup>. نظرًا لأن كثافة رمل الشيست الممدد (1.6) أعلى من كثافة كل من الطين الممدد والخفاف (حوالي 1.4) فإن الاستبدال برمل الشيست الممدد يؤدي إلى انخفاض أقل في كثافة الخرسانة مقارنة بالمواد الأخرى. ويؤكد Nguyen أن استخدام الحصى ذو الكتل الحجمية المتقاربة للشيست الممدد مقابل الطين الممدد والرماد البركاني مقابل البوزولان يسمح بالحصول على خرسانة ذات كتل حجمية متشابهة [12].

#### 2.4.4.2.I. النفاذية

تمثل النفاذية قدرة المادة المسامية على السماح بمرور سائل أو غاز عبرها تحت تأثير تدرج في الضغط. هذه الخاصية لا تظهر إلا إذا كانت المادة ذات مسامية ملحوظة ومتصلة أما إذا كانت المسام غير متصلة كما في حالة الخرسانة الخلوية فإن المادة قد تكون مسامية جدا لكنها غير نفوذة لأن المسام غير مترابطة ولا تشكل مسارات مستمرة يمكن للسائل أن يتدفق من خلالها.

لذلك فإن المسامية والنفاذية مرتبطتان لكن وجود الأولى لا يعني بالضرورة وجود الثانية. كشفت دراسة تجريبية أجراها [13] عن دور البنية المجهرية في عملية الامتصاص وذلك من خلال مقارنة نوع وتوزيع أحجام المسام لأربعة أنواع من الركام الخفيف (الشكل I.3). وتحليل تأثيراتها على الامتصاص.



الشكل 3.I. ثلاثة أنواع من المسامية موجودة في الركام [11].

وقد أظهرت الدراسة أن:

- الجزء الأكبر من الماء يتم امتصاصه خلال دقائق قليلة فقط.
  - كمية الماء الممتصة لا ترتبط مباشرة بالمسامية المفتوحة الكلية بل ترتبط بشكل أساسي ب المسامية المفتوحة التي تحتوي على مسام قطرها أكبر من 2 ميكرون.
- وقد تم تأكيد هذه النتيجة من خلال مقارنة حجم السائل الأقصى الممتص من طرف الركام مع الحجم الكلي للشعيرات (capillaires) ذات القطر الأكبر من 2 ميكرون حيث وُجد أن القيمتين متقاربتان إلى حد كبير كما هو موضح بالجدول ادناه.

جدول 2.I. المسام المفتوح لركام ونسبة الشعيرات ذات القطر أكبر 2 ميكرون.

المسام المفتوح (%)	قطر المسام المفتوح $\leq 2$ ميكرون %	
55.00	68.00	بونص
53.90	11.70	الطين الممدد
37.00	34.70	الصخر الزيتي الموسع
37.00	17.60	الرماد المتكلس

#### 3.4.4.2.I المسامية

تتكوّن الخرسانة من عدة عناصر صلبة مثل الركام والمادة الرابطة بالإضافة إلى عدة أنواع من الفراغات (المسام) التي يختلف حجمها من بضعة عشرات من الأنجستروم (Å) إلى عدة ملليمترات وذلك حسب مصدر هذه المسامية.

يمتلك الركام مسامية داخلية تُعرف (intra-particule) ناتجة عن وجود هواء داخل الحبيبات وبالنظر إلى الحجم المميز للشعيرات الدقيقة حوالي عشرات الميكرو مترات فإن المسامية الخاصة بالركام تصنف كمسامية مجهرية تحتوي مصفوفة المادة الرابطة أيضا على فراغات هوائية تتكوّن أثناء تفاعل الاماهة وتصلّب الخرسانة كما يطلق على هذا الهواء اسم الهواء داخل المادة الرابطة (Air intra-liant)



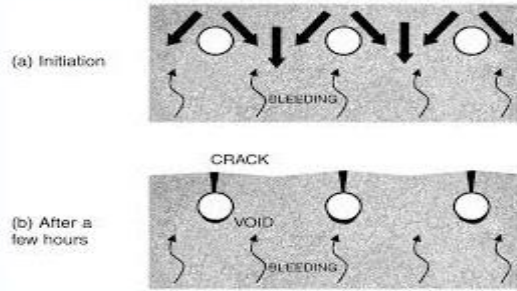
والذي يستخدم لتحديد المسامية الذاتية للمادة الرابطة ويتراوح حجم المسامات المتواجدة بين بلورات هيدروكسيد الكالسيوم بين 0.01 مايكرومتر و5 ميكرومتر في حين تتراوح أحجام المسام الناتجة عن استخدام مواد مدخلة للهواء (entraîneur d'air) بين 5 مايكرومتر و1 ملليمتر [14] وبالتالي فإن الهواء داخل المادة الرابطة يعتبر أيضا جزءًا من المسامية المجهرية.

#### 4.4.4.2.I. التمدد الحجمي للركام

التمدد الحجمي للركام هو زيادة في حجم جزيئات الركام نتيجة لعوامل داخلية أو خارجية قد يحدث هذا التمدد بسبب تفاعلات كيميائية مثل تفاعل القلويات مع السليكا أو بفعل امتصاص الماء في حالة الركام المسامي أو بسبب تغيرات في درجات الحرارة والرطوبة [15].

إن من أهم الخواص الحرارية المؤثرة للركام على خرسانة المنشآت العادية هو معامل التمدد الحراري. فكلما زاد معامل التمدد للركام كلما زاد معامل تمدد الخرسانة وهذا يعتمد على محتوى الركام في الخليط وعلى نسب الخلط. إن الاختلاف الكبير بين معامل التمدد للركام الخشن وعجينة الاسمنت الخرسانة هذه الحركة التفاوتية عند تغير درجة الحرارة تؤدي إلى تحطيم الترابط أو التلاصق بين حبيبات الركام وعجينة الاسمنت المحيطة به.

إن الأهمية من معرفة معامل التمدد الحراري هو لمنع تمزق الخرسانة. وعلى سبيل المثال فإن الكوارتز يعاني تحولاً في درجة 574م° ويتمدد فجأة بمقدار 0.85% مما يؤدي إلى تمزق الخرسانة. بالإضافة إلى التمدد الحراري للركام هنالك خواص حرارية أخرى مثل الحرارة النوعية والموصلية للركام والتي لها أهمية في المنشآت ذات الكتل الخرسانية الضخمة أو عند الحاجة إلى العزل الحراري الذي يؤثر على انتقال الحرارة في الخرسانة.



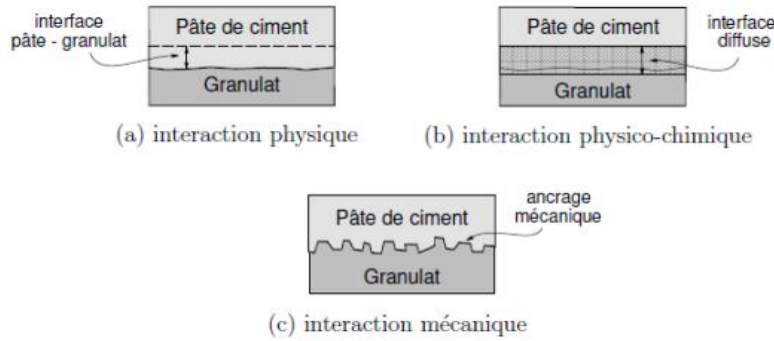
الشكل 4.I. تمزق الخرسانة بسبب التمدد الحراري للركام.

يلعب التمدد الحجمي للركام دوراً مهماً في تحديد ديمومة الخرسانة وللحفاظ على الأداء الطويل الأمد للهياكل الخرسانية ومنه يجب على المهندسين اختيار الركام بعناية وتطبيق ممارسات التصميم الجيدة للحد من تأثيرات التمدد وتقليل التشققات وتحسين مقاومة الخرسانة للظروف البيئية المختلفة.

### 3.I. الخصائص الفيزيائية لخرسانة الركام الخفيف

#### 1.3.I. منطقة التداخل بين العجينة الاسمنتية والركام الخفيف

تظهر منطقة التماس بين العجينة الإسمنتية والركام الخفيف جودة أعلى بشكل عام مقارنة بتلك الموجودة في الخرسانة التقليدية وقد قام Zhang و Gjørsv بتحديد آليات التفاعل الفيزيوكيميائي والميكانيكي بين العجينة و الركام كما هو موضح في (الشكل 5.I). حيث تتمكن العجينة الإسمنتية من النفاذ إلى المسامات والفجوات الدقيقة الموجودة على سطح الركام الخفيف مما يسهم في تكوين تثبيت ميكانيكي يعزز من قوة الالتصاق بين العجينة والركام وتعتمد فعالية هذا التفاعل على عدة عوامل من أبرزها خشونة سطح الركام حجم جزيئاته وكذلك لزوجة العجينة الإسمنتية [16].



الشكل 5.I. آليات التداخل بين العجينة والركام الخفيف.

يرتبط التفاعل الفيزيائي بقدرة الركام الخفيف المسامي على امتصاص الماء من العجينة الإسمنتية المحيطة به فعلى المستوى المجهرى يؤدي هذا الامتصاص إلى تقليل نسبة الماء إلى الاسمنت في المنطقة القريبة من سطح الركام بفعل الشفط مقارنةً بجزء العجينة الداخلي حيث أن هذا الانخفاض في نسبة الماء/الاسمنت هو العامل الرئيسي في تقليل مسامية منطقة الانتقال المحيطة بالركام الخفيف.

أما التفاعل الكيميائي فيرتبط بالنشاط البوزولاني للركام الخفيف الذي خضع للمعالجة الحرارية ووفقا لما ذكره Virlogeux و Arnould فإن هذه المعالجة والتي تستخدم عادة لتوسيع الركام الصناعي تكسب الركام خصائص بوزولانية تتناسب طردياً مع كمية الحرارة المستخدمة أثناء المعالجة.

ويعد التفاعل الميكانيكي نتيجة مباشرة للتفاعلين الفيزيائي والكيميائي حيث تسهم خشونة السطح الخارجي للركام الخفيف في تعزيز تغلغل العجينة الإسمنتية ضمن الفجوات والمسامات السطحية مما يساهم في تحسين الالتصاق بين العجينة والركام [16].

### 2.3.I. الكتلة الحجمية

تتميز خرسانة الركام الخفيف بكتلة حجمية بعد الجفاف تقل عن 2000 كغ/م<sup>3</sup> مما يوفر تقليلاً ملحوظاً في الوزن بحسب نوع المنشأ. ومع ذلك فإن مقاومتها الميكانيكية تكون عموماً أقل مقارنةً بالخرسانة التقليدية. ولهذا السبب يستخدم هذا النوع من الخرسانة في أعمال الحشو وفي العناصر الحاملة ذات المتطلبات الخفيفة وكذلك في تطبيقات العزل وإعادة التأهيل.

ووفقاً لما ذكره Virologue و Arnould فإن زيادة الوزن التي تسجلها الخرسانة الخفيفة بعد الغمر في الماء لا تتجاوز 40 كغ/م<sup>3</sup> مقابل 30 كغ/م<sup>3</sup> في حالة الخرسانة التقليدية. ويرجع هذا الفارق بشكل أساسي إلى امتلاء الفراغات داخل الملاط وليس بسبب انتقال الماء إلى داخل حبيبات الركام الخفيف. حيث تكون المسامات السطحية لهذه الحبيبات مغلقة جزئياً بفعل تغليفها بالملاط خلال الخلط وبداية التصلب نتيجة التبادل المائي بين الملاط والركام الخفيف [17].

### 3.3.I. الامتصاص

يعد الامتصاص ظاهرة فيزيائية يتم من خلالها انتقال السائل من الخارج إلى داخل وسط مسامي نتيجة الخاصية الشعرية ويؤدي هذا الامتصاص إلى زيادة في كتلة المادة. غير أن هذا الانتقال لا يحدث إلا إذا كانت المسامات داخل البنية المسامية مترابطة أي ما يُعرف بـ المسامية المفتوحة حيث تسمح بمرور الماء. في المقابل إذا كانت المادة تحتوي على مسامات مغلقة أو معزولة كما هو الحال في الخرسانة الخلوية فإن هذه المسامات لا تساهم في عملية الامتصاص ويطلق عليها اسم المسام المغلق.

وقد أظهرت دراسة تجريبية أجراها Vraquier أهمية البنية المجهرية في تحديد سلوك الامتصاص. حيث قام بمقارنة أنواع مختلفة من الركام الخفيف من حيث طبيعة المسام وتوزيعها حسب الحجم وتحليل تأثير ذلك على قدرة الامتصاص. وأشارت نتائج الدراسة إلى أن الجزء الأكبر من الماء يتم امتصاصه خلال الدقائق الأولى وأن كمية الماء الممتصة لا تتعلق بالمجمل الكلي للمسامية المفتوحة بل بالمسامية المفتوحة التي تحتوي على مسامات قطرها أكبر من 2 ميكرون وقد تم تأكيد ذلك من خلال المقارنة بين الحجم الأقصى للسائل الممتص داخل الركام وحجم المسامات التي يزيد قطرها عن 2 ميكرون حيث تبين أن القيمتين متقاربتان للغاية.

### 4.3.I. الخففة

يؤدي استخدام الركام الخفيف في الخرسانة إلى خفض الكتلة الحجمية بنسبة تتراوح بين 20% و30% مقارنة بالخرسانة التقليدية. فعلى سبيل المثال تبلغ الكثافة الحجمية للخرسانة العادية حوالي 2500 كغ/م<sup>3</sup> بينما تنخفض إلى نحو 1600 كغ/م<sup>3</sup> في حالة خرسانة الطين الممدد. وتراوح بين 600 و900 كغ/م<sup>3</sup> في خرسانة الخشب أما الخرسانة الخلوية فتتراوح كثافتها ما بين 350 و650 كغ/م<sup>3</sup>. حيث تكمن أهمية هذه الخرسانة خفيفة الوزن في سهولة استخدامها خاصة عند تصنيعها على شكل وحدات جاهزة كما أن انخفاض وزنها يُقلل من الحاجة إلى تأسيسات ثقيلة أو معقدة أثناء عملية البناء مما يسهم في خفض التكاليف وتسهيل التنفيذ [18].

### 5.3.I. قابلية التشغيل

تؤثر القدرة العالية للركام الخفيف على امتصاص الماء بشكل كبير في خصائص الخرسانة. خاصة من حيث القابلية للتشغيل في مرحلة النضج ويعتمد هذا التأثير بدرجة كبيرة على حالة الرطوبة التي يكون عليها الركام المستخدم سواء كان مشبعاً سطحياً أو جافاً. فعندما يستخدم الركام المشبع والمجفف سطحياً فإنها لا تؤثر عملياً على قابلية التشغيل لأن الماء الذي تمتصه لا يؤخذ بعين الاعتبار في حساب نسبة الماء إلى الاسمنت. من جهة أخرى أثناء تراجع الرطوبة النسبية داخل المسام الشعرية لعجينة الاسمنت المتصلبة نتيجة تفاعل الإماهة تبدأ المياه المخزنة داخل الركام الخفيف بالانتقال إلى هذه المسام. مما يسمح بحدوث إماهة إضافية هذا ما يجعل الخرسانة خفيفة الوزن أقل تأثراً بظروف المعالجة الرطبة غير المثالية مقارنة بالخرسانة العادية. أما في حالة استخدام الركام الجاف فإن امتصاصه للماء من المزيج يقلل من قابلية التشغيل وإذا تم صب الخرسانة واهتزازها قبل انتهاء الركام الجاف من امتصاص الماء فقد تتكوّن فراغات ناتجة عن الجفاف والتي تؤثر سلباً على الكثافة والمقاومة [17].

### 4.I. الخصائص الميكانيكية لخرسانة الركام الخفيف

#### 1.4.I. تأثير الركام الخشن الخفيف لصخور الطينية على الخواص الميكانيكية للخرسانة الخفيفة

اعتمدت هاته الدراسة على استبدال الركام الخشن الاعتيادي بالركام الخشن الخفيف من الصخور الطينية (بونزا) وركام مخلفات الثرمستون بنسب حجمية (25-50-75-100%). لغرض تحديد ودراسة المواصفات المهمة للخرسانة الجديدة. حيث تم اعداد نماذج من مكعبات واسطوانات قياسية حسب المعايير لتقييم مقاومة الانضغاط والشد ومعامل المرونة [19].

#### 1.1.4.I. الركام الخفيف المستعمل

##### 1.1.1.4.I. ركام الصخور الطينية الخشن (بونزا)

الركام الخفيف المستخدم في هذا البحث هو ركام الصخور الطينية ويسمى محلياً بونزا وهو ركام خشن خفيف الوزن معتمد في انتاج الكتل البنائية الخفيفة حيث يستخدم كركام ناعم بعد سحقه ومصدره الاصلي جبال تركيا حيث تتم غربلته في معامل للحصول على التدرج المطلوب تم استخدامه كركام خشن وبمقاس أقصى يبلغ (12.5 ملم) وبنسب استبدال حجمية مختلفة (25-50-75-100%) ويكون الاستبدال حجمياً للمحافظة على حجم الخلطة الطبيعي حيث تدرج ركام الصخور الطينية ضمن المعايير المطابقة للمواصفات الامريكية.

جدول 3.I. تدرج ركام الصخور الطينية الخشن (بونزا)

Sieve size	Cumulative passing %	Limit of ASTM C330-99
12.5-mm	93.6	90-100
9.5-mm	60.3	40-80
4.75-mm	12.7	0-20

جدول 4.I. الخصائص الكيميائية والفيزيائية لركام الصخور الطينية الخشن (بونزا)

Properties	Specification	Test Results	Limits of specification
Specific gravity	ASTM C127-88 <sup>(9)</sup>	1.4	-
Absorption %	ASTM C127-88 <sup>(9)</sup>	4.6	-
Dry loose unit weight, (kg/m <sup>3</sup> )	ASTM C29/C29M/97 <sup>(70)</sup>	623	-
Sulfate content (as SO <sub>3</sub> ), %	BS 3797-part 2-1981 <sup>(10)</sup>	0.1	1 (max. value)

#### 2.1.1.4.I. ركام الترمستون الخشن

استخدم كذلك ركام الترمستون المكسر الخشن الخفيف الناتج من المخلفات البنائية بعد تكسيره وبعدها تمت غربلته للحصول على التدرج المطلوب استخدم هذا الركام بمقاس أقصى يبلغ (12.5 ملم) وبنسب استبدال مختلفة (25-50-75-100%) من حجم الركام الاعتيادي هذا النوع من الركام مطابق للمواصفات الأمريكية.

جدول 5.I. تدرج ركام الثرمستون الخشن.

Sieve size	Cumulative passing %	Limit of ASTM C330-99
12.5-mm	95.2	90-100
9.5-mm	71.34	40-80
4.75-mm	17.3	0-20

جدول 6.I. الخصائص الكيميائية والفيزيائية لركام الثرمستون الخشن.

Properties	Specification	Test Results	Limits of specification
Specific gravity	ASTM C127-88 <sup>(9)</sup>	1.25	-
Absorption %	ASTM C127-88 <sup>(9)</sup>	45	-
Dry loose unit weight, (kg/m <sup>3</sup> )	ASTM C29/C29M/97 <sup>(7)</sup>	450	-
Sulfate content (as SO <sub>3</sub> ), %	BS 3797-part 2-1981 <sup>(10)</sup>	0.3	1 (max. value)

#### 2.1.4.I. تصميم الخلطة

تم تصميمها حسب الكود الأمريكي (ACI 211.1-91) لكن تم تغيير نسبة الماء الى السمنت لأكثر من حالة الى غاية الحصول على أفضل تركيبة للخلطة [19].

جدول 7.I. الخلطات الخرسانية المستعملة في الدراسة.

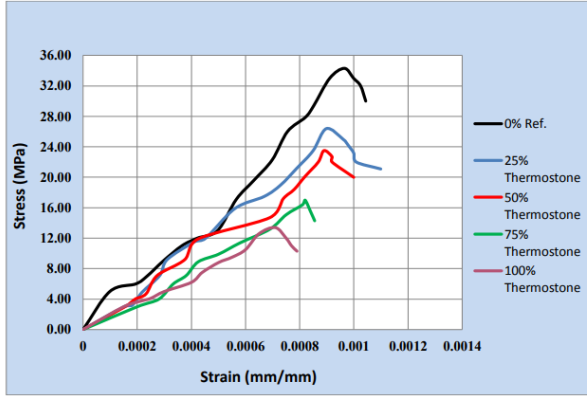
Mix. No.	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Sand (kg/m <sup>3</sup> )	Coarse aggregate %			W/C
			Normal weight	Thermostone	Claystone	
MR1	400	600	100	0	0	0.4
M2	400	600	75	0	25	0.4
M3	400	600	50	0	50	0.4
M4	400	600	25	0	75	0.4
M5	400	600	0	0	100	0.4
M6	400	600	75	25	0	0.4
M7	400	600	50	50	0	0.4
M8	400	600	25	75	0	0.4
M9	400	600	0	100	0	0.4

جدول 8.I. الفحوصات المخبرية للمقاومة (الضغط – الأشد – الانحناء).

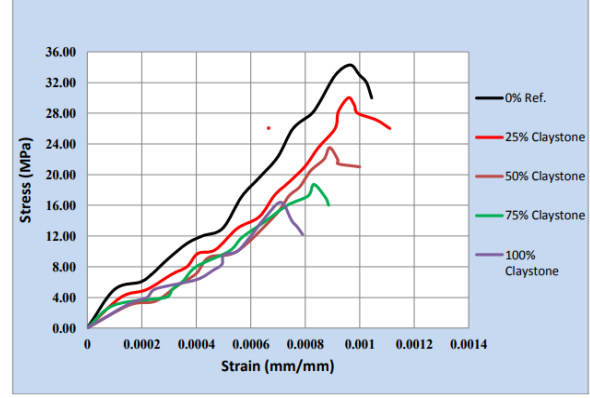
Mix. No.	Compressive Strength (MPa)	Decreasing %	Splitting Tensile Strength (MPa)	Decreasing %	Flexural Strength (MPa)	Decreasing %
MR1	42.25	-	4.77	-	5	-
M2	33.6	20.47	3.97	16.77	4.7	6
M3	23.16	45.81	3.311	30.58	4.25	15
M4	19	55	2.4	49.68	3.76	24.8
M5	15.64	62.9	1.7	64.36	3.3	34
M6	40.2	4.85	4.5	5.66	4.85	3
M7	32.4	23.31	3.1	35	4	20
M8	18.34	56.6	1.6	66.45	3.42	31.6
M9	15.5	63.31	1.3	72.74	3	40

جدول 9.I. الفحوصات المخبرية (معامل المرونة).

Mix. No.	Normalweight Coarse Agg. %	Thermostone Coarse Agg. %	Claystone Coarse Agg. %	W/C	Modulus of Elastic. (MPa)	Decreas. %	Poiss. Rat. (μ)
MR1	100	0	0	0.4	28152	-	0.232
M2	75	0	25	0.4	24360	13.46	0.221
M3	50	0	50	0.4	20132	28.48	0.216
M4	25	0	75	0.4	18679	33.64	0.194
M5	0	0	100	0.4	16920	39.89	0.187
M6	75	25	0	0.4	27076	3.82	0.228
M7	50	50	0	0.4	24022	14.67	0.22
M8	25	75	0	0.4	18372	34.73	0.186
M9	0	100	0	0.4	16630	40.92	0.177



الشكل 7.I. العلاقة بين الاجهاد والانفعال لخرسانة استبدال الركام بركام الترمستون الخشن مقارنة مع الخرسانة العادية



الشكل 6.I. العلاقة بين الاجهاد والانفعال لخرسانة استبدال الركام بركام البونزا الخشن مقارنة مع الخرسانة العادية

### 3.1.4.I. الاستنتاجات

#### 1.3.1.4.I. المقاومة الميكانيكية للانضغاط

انخفاض مقاومة الانضغاط للخرسانة بزيادة محتوى الركام الخشن الخفيف حيث وصلت أدنى قيمة لها (15.5 ميغا بسكال) وتصنف هذه القيمة ضمن مجال الخرسانة الإنشائية. حيث ان مقاومة انضغاط الخرسانة التي تحتوي على ركام الترمستون الخشن الخفيف عند نسب (25-50%) أعلى من مقاومة انضغاط خرسانة ركام البونزا الخشن الخفيف عند نسب الاستبدال ذاتها رغم الوزن النوعي الأكبر لركام البونزا. لكن يكون العكس عند نسب استبدال (75-100%) حيث تكون مقاومة انضغاط خرسانة ركام البونزا أعلى عند زيادة الركام الخشن الخفيف حيث تراجع معامل المرونة لأدنى قيمة بـ 63.31% مقارنة بالخرسانة العادية [19].

#### 2.3.1.4.I. المقاومة الميكانيكية لشد

تقل مقاومة الشد للخرسانة لكن بنسبة قليلة مقارنة بمقاومة الانضغاط حيث وصلت أدنى قيمة لها (1.3 ميغا بسكال). ان مقاومة الشد لخرسانة ركام الترمستون الخشن الخفيف المكسر عند نسبة استبدال (25%) أكبر من مقاومة الشد لخرسانة ركام البونزا الخشن الخفيف عند نسبة الاستبدال ذاته حيث تراجع معامل المرونة لأدنى قيمة بـ 72.74% مقارنة بالخرسانة العادية [19].

#### 3.3.1.4.I. المقاومة الميكانيكية للانحناء

تتخضع مقاومة الانحناء عند زيادة الركام الخشن الخفيف حيث وصلت أدنى قيمة لها (15.5 ميغا بسكال). ان مقاومة الانحناء للخلطة الخرسانية (M6) والتي تمثل استبدال الركام الخشن الاعتيادي بركام الترمستون الخشن الخفيف المكسر بنسبة (25%) أعلى من مقاومة الانحناء للخلطة



الخرسانية (M2) التي تمثل استبدال الركام الخشن الاعتيادي بركام البونزا الخشن الخفيف وعند نفس نسبة الاستبدال حيث تراجع معامل المرونة لأدنى قيمة بـ 40 % مقارنة بالخرسانة العادية [19].

#### 4.3.1.4.I. معامل المرونة

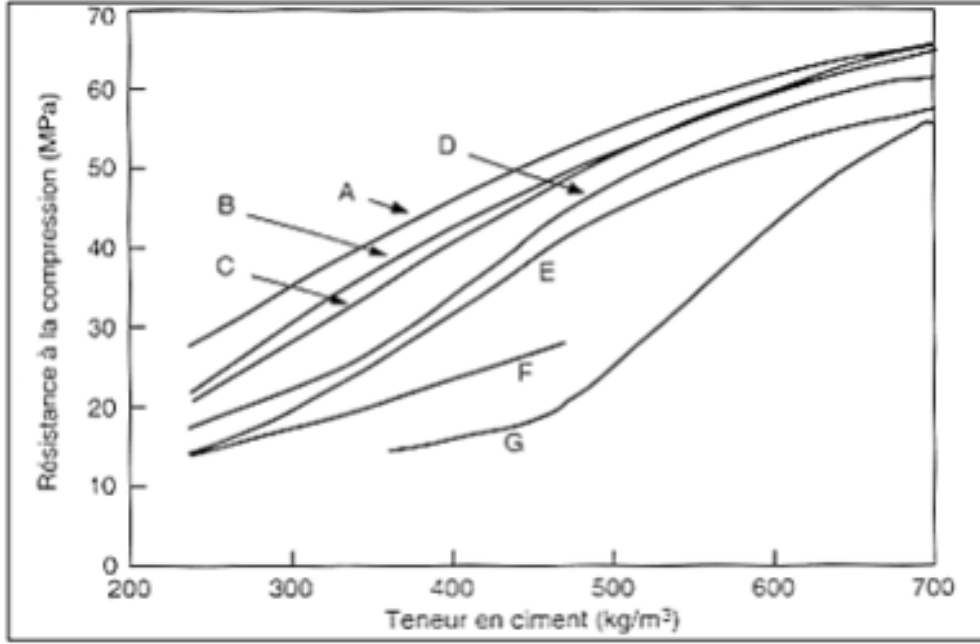
يقبل معامل المرونة الساكن بصورة تدريجية بزيادة الركام الخشن الخفيف وكذلك تبين بأن معامل المرونة لخلطات ركام الثرمستون وعند نسب استبدال (25- 50 %) أكبر من معامل المرونة لخلطات ركام البونزا. وعند نسب الاستبدال ذاتها لكن يكون العكس عند نسب استبدال (75- 100 %) ولنوعي الركام الخشن الخفيف. حيث يكون معامل المرونة لخرسانة البونزا أكبر من معامل المرونة لخرسانة الثرمستون حيث تراجع معامل المرونة لأدنى قيمة بـ 40.92 % مقارنة بالخرسانة العادية [19].

#### 2.4.I. تأثير كمية الاسمنت لأنواع مختلفة من الخرسانة الخفيفة على الخواص الميكانيكية

هذه دراسة اعتمدت على العلاقة بين مقاومة الخرسانة الميكانيكية للضغط وكمية الاسمنت وذلك بالنسبة لأنواع مختلفة من الخرسانة الخفيفة كما هو موضح في الشكل (الشكل 8.I). أدناه.

لقد تمت دراسة الخصائص للخرسانة الخفيفة على نطاق واسع من قبل العديد من الباحثين ويتمثل الفارق الرئيسي بين الخرسانة ذات الركام الخفيف والخرسانة العادية في الكتلة الحجمية المنخفضة. والتي تؤدي بدورها إلى انخفاض كل من المقاومة الميكانيكية ومعامل المرونة للخرسانة الخفيفة.

وعلى الرغم من وجود حد أقصى للمقاومة فقد تم تحقيق خرسانات خفيفة الوزن عالية الأداء بمقاومة انضغاط تتجاوز 60 ميجا باسكال مع كثافة حجمية تقل عن 1900 كجم/م<sup>3</sup> ومع ذلك فإن الآليات التي تفسر هذا المستوى من الأداء لم يتم توضيحها بشكل كامل حتى الآن [20].



**الشكل 8.I.** العلاقة بين مقاومة الانضغاط وتركيز الاسمنت للخرسانة ذات الهبوط (5 سم) المصنعة من أنواع مختلفة من الركام الخفيف **A** الرمام المتطاير+ الركام الناعم العادي / **B**: خبث الافران+ الركام الناعم العادي / **C**: الرمام المتطاير متكلس **D** : طين زيتي متكلس / **E**: أردواز ممدد / **F**: طين ممدد + رمل / **G**: خبث ممدد[20].

### 3.4.I. الانكماش

الانكماش هو تقلص في حجم العجينة الرابطة والنتاج عن الجفاف الداخلي بسبب استهلاك الماء أثناء عملية الإماهة ويعرف أيضا باسم انكماش الإماهة.

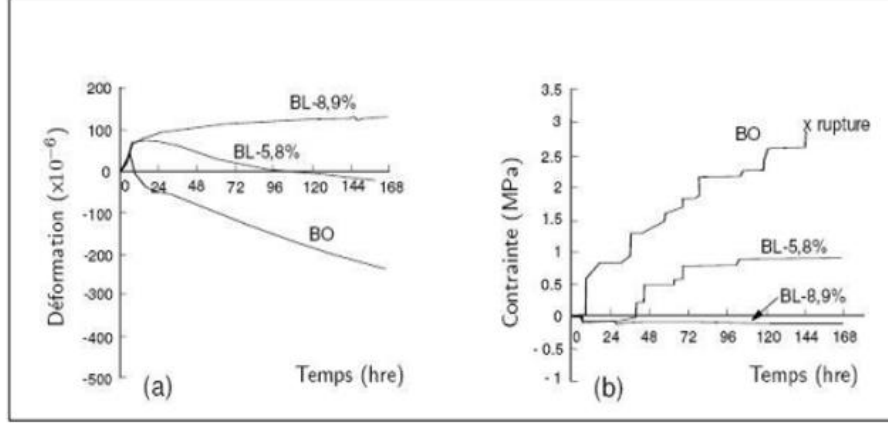
- تأثير الركام خفيف الوزن ومحتواه المائي على تقليل الانكماش الذاتي والإجهادات المقيدة في الخرسانة العالية المقاومة يعد دلالة واضحة على فعاليته كوسيلة للمعالجة الداخلية. هذا السلوك يُظهر بوضوح أن الجفاف الداخلي لمسام الخرسانة الناتج عن عملية الإماهة يولد قوة دافعة يتم من خلالها نقل الماء من مسام الركام خفيف الوزن إلى المسام شبه الجافة في المصفوفة الإسمنتية.

- لم يحدث أي انكماش ذاتي في الخرسانة خفيفة الوزن المحتوية على الركام خفيف الوزن المشبع ومع ذلك يجب الإشارة إلى أنه قد لوحظ تمدد في الخرسانة نتيجة تفاعل إماهة إضافي للإسمنت ناتج عن تزويد الركام خفيف الوزن للمصفوفة الإسمنتية الكثيفة بالماء الداخلي [20].

- لقد ثبت أن الاستبدال الجزئي للركام العادي بالركام خفيف الوزن المشبع كان فعالاً في القضاء تماماً على الانكماش الذاتي في الخرسانة عالية المقاومة [21].

- يتم تقييم الانكماش بالقيمة النهائية وفقاً لنسبة الاسمنت والماء بالإضافة إلى طبيعة الركام الخفيف المستخدم.

يظهر الشكل (الشكل 9.I). بعض النتائج حول فعالية الركام الخفيف في الحد من الأضرار الناجمة عن الانكماش الذاتي من خلال مقارنة تشوهات الخرسانة العادية مع نوعين من الخرسانة المشبعة كليًا وجزئيًا [22].



الشكل 9.I. الانكماش الداخلي بدلالة الزمن

(a): التشوه الحر / (b): الاجهادات الناتجة عن الانكماش / (BL 8.9 %): خرسانة خفيفة مع ركام مشبع (BL 5.8 %): خرسانة خفيفة مع ركام مشبع جزئياً.

## 5.I. الخصائص الحرارية لخرسانة الركام الخفيف

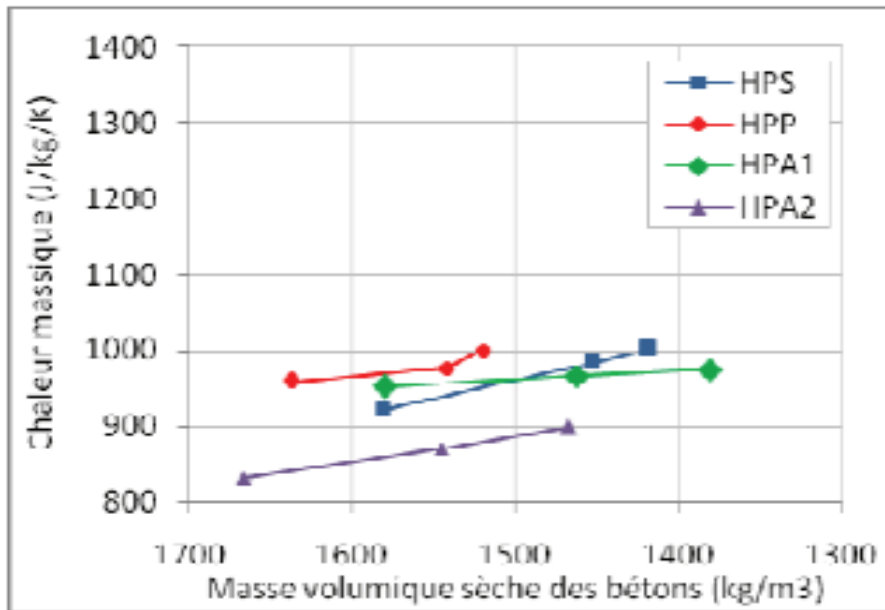
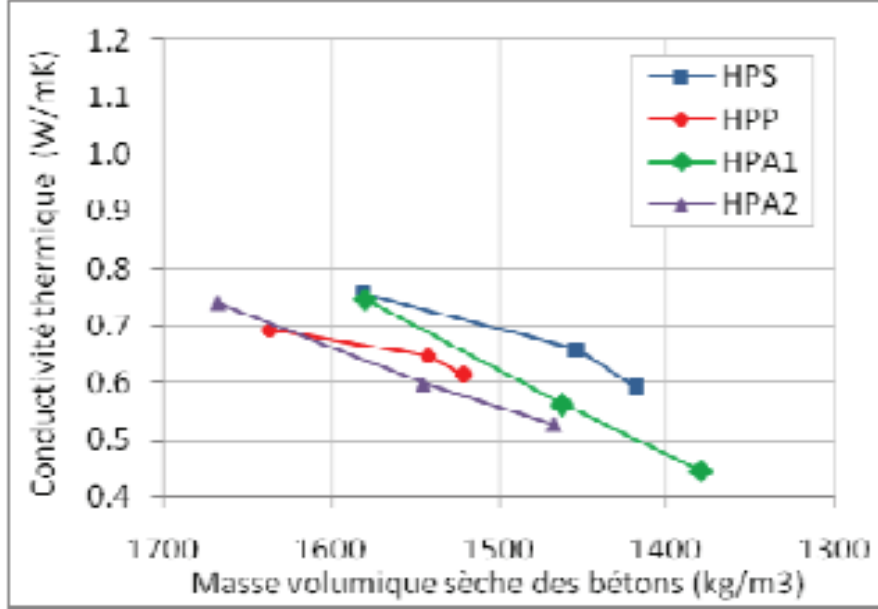
### 1.5.I. نمط انتقال الحرارة داخل الخرسانة

تمثل التبادلات الحرارية ظاهرة نقل الطاقة على شكل حرارة نتيجة لوجود اختلاف موقعي في درجة الحرارة. يعرف الانتقال الحراري على أنه الطاقة المنقولة من الوسط ذي درجة الحرارة الأعلى إلى الوسط ذي درجة الحرارة الأدنى. في عملية انتقال الحرارة هناك عاملان رئيسيان هما (تدرج الحرارة والتدفق الحراري). حيث يعبر الأول عن الطاقة الحرارية المخزنة في جزيئات المادة بينما يعكس الثاني حركة هذه الطاقة من منطقة إلى أخرى. حيث يعبر عن انتقال الحرارة داخل المادة نفسها (الخرسانة) دون انتقال الكتلة بالتوصيل الحراري.

### 2.5.I. تقييم الخصائص الحرارية حسب تركيبة الخرسانة

يوضح الشكل (الشكل 10.I). تطور كل من التوصيلية الحرارية (A) والسعة الحرارية النوعية (B) المقاسة على عينة جافة وذلك وفقاً لمعدل استبدال رمل النهر بالرمل الخفيف. بفضل المسامية التي توفرها الرمال الخفيفة تنخفض التوصيلية الحرارية للخرسانة مع زيادة الكسر الحجمي للرمل الخفيف وبالنسبة لأقصى كسر حجمي للرمل الخفيف (50% للبوزولان و100% للسيشت) يتراوح انخفاض التوصيلية الحرارية بين 11.7% و41.3% حسب نوع الرمال الخفيفة المستخدمة حيث أدنى قيمة للتوصيلية

الحرارية وهي (0.44 واط/م كلفن) تم الحصول عليها في خرسانة الطين 4/10A بنسبة 100 % من الرمل الخفيف [23].



الشكل 10.I. التوصيلية الحرارية (A) والسعة الحرارية النوعية (B) حسب الكتلة الحجمية الجافة لخرسانات الركام الخفيف.

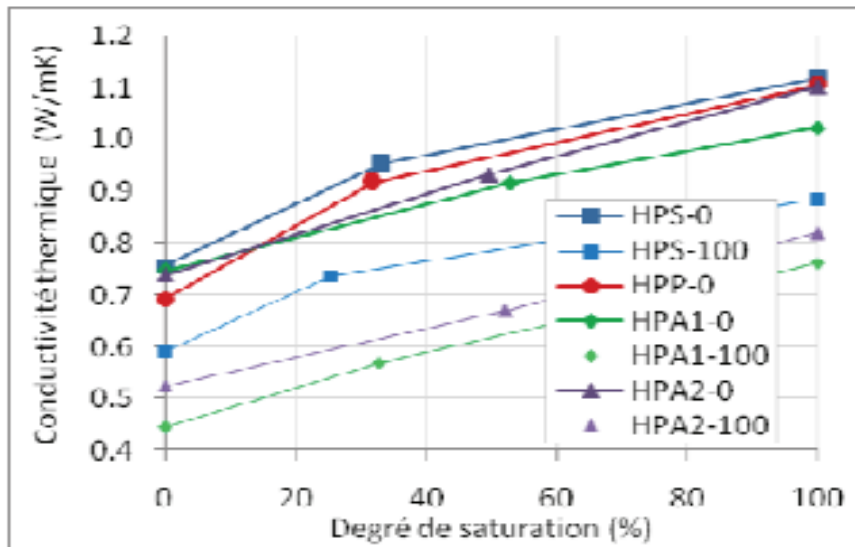
حيث تبين عندما تزداد نسبة الرمل الخفيف تزداد السعة الحرارية النوعية لخرسانة الركام الخفيف. في الواقع تنتج عملية التوصيل الحراري في المادة المسامية عن مساهمة كل من الجزء الصلب والمسام المترابطة. مع العلم أن التوصيلية الحرارية للهيكل الصلب أعلى من تلك الخاصة بالهواء يؤدي ازدياد حجم الرمل الخفيف إلى زيادة حجم المسام داخل الركام. وبالتالي داخل الخرسانة وكنتيجة لذلك في مادة أكثر مسامية تقل مساحة التوصيل في الجزء الصلب وتزداد في الهواء وبما أن التدفق الحراري يتناسب مع مساحة التوصيل فإن ذلك يعني أنه يلزم طاقة أكبر (أي سعة حرارية نوعية أعلى) لرفع درجة حرارة خرسانة أكثر مسامية [23].

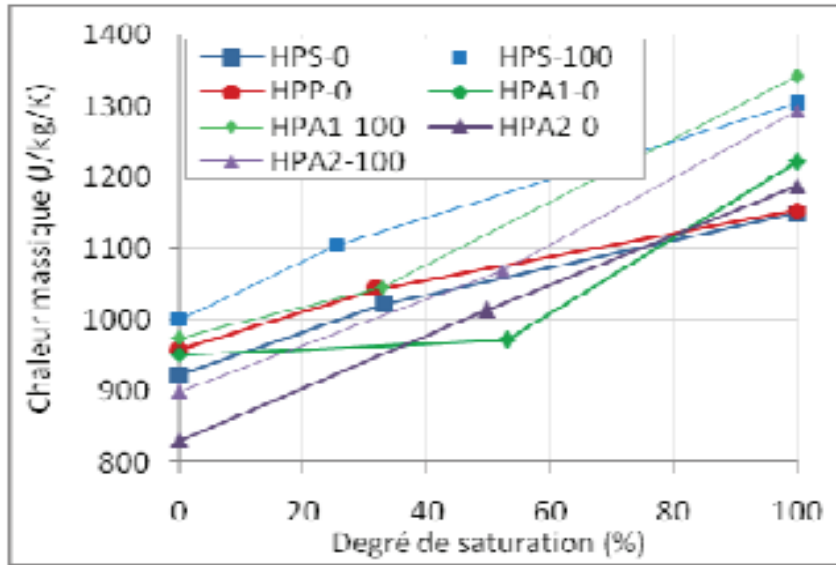
### 3.5.I. تقييم الخصائص الحرارية حسب درجة التشبع

تعرض تأثيرات درجة تشبع الخرسانة على خصائصها الحرارية في الشكل (الشكل 11.I). حيث يتم الحصول على القيمة المتوسطة من خلال حفظ العينة في رطوبة نسبية 50 % ودرجة حرارة 20° حتى الوصول إلى التوازن الرطوبي.

يتراوح الازدياد الكتلي للماء الناتج عن تكاثف بخار الماء داخل الخرسانة (50%) بين 3.8 الى 6.5 % ما يعادل درجة تشبع تتراوح من 25 إلى 53 % حسب نوع الخرسانة.

ونظرا إلى أن التوصيلية الحرارية والسعة الحرارية النوعية للماء أعلى من تلك للهواء فمن الطبيعي أن تزداد التوصيلية الحرارية والسعة الحرارية النوعية لخرسانة الركام الخفيف مع ارتفاع درجة التشبع. حيث تبين أن تغير الخصائص الحرارية حسب درجة التشبع يكون تقريبًا خطيًا حيث تزداد التوصيلية الحرارية بنسبة تتراوح بين 37 ال 70 % والسعة الحرارية النوعية بنسبة تتراوح بين 20 الى 44 % وذلك حسب التركيبة [23].

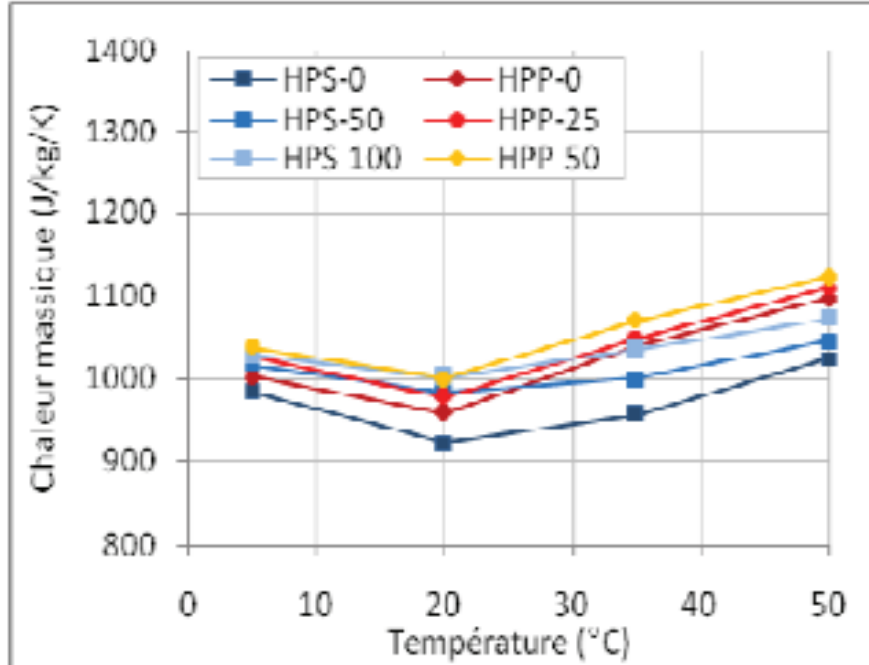
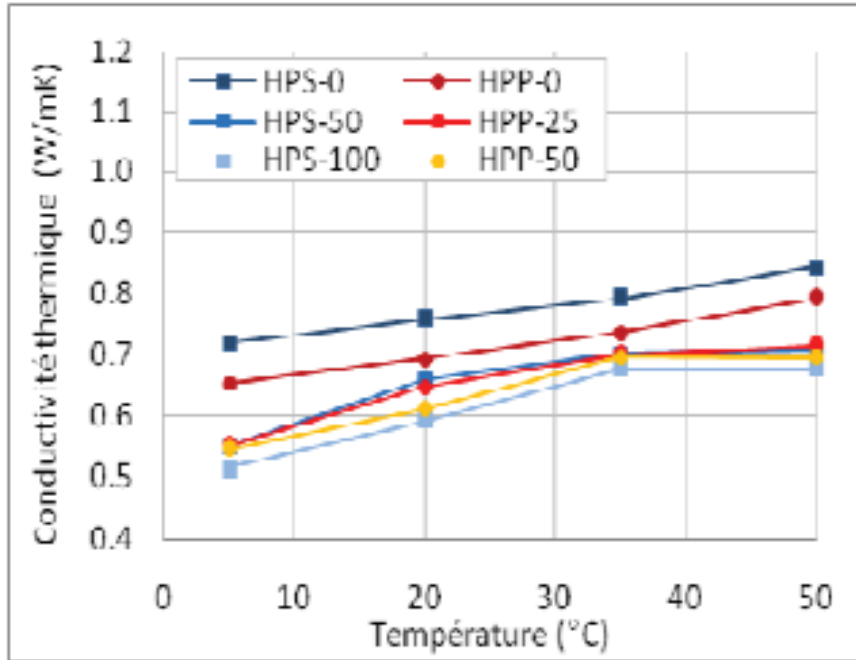




الشكل 11.I. التوصيلية الحرارية (A) والسعة الحرارية النوعية (B) حسب درجة تشبع خرسانة الركام الخفيف.

#### 4.5.I. تقييم الخصائص الحرارية بين 5 و 50 درجة مئوية

يوضح الشكل (الشكل 12.I) تطور الخصائص الحرارية لخرسانة الركام الخفيف حسب درجة الحرارة. حيث انه عند ارتفاع درجة الحرارة من 5 الى 50 درجة مئوية تزداد التوصيلية الحرارية بنسبة تتراوح بين 17 الى 31 % حسب نوع الخرسانة وتُعد هذه الزيادة في التوصيلية الحرارية أكبر بـ 1.5 مرة في الخرسانات التي تحتوي على الرمل الخفيف. حيث تصل إلى أقصى قيمة لها بين 35 و 50 درجة مئوية بالنسبة لجميع تركيبات الخرسانة تنخفض السعة الحرارية النوعية حتى تصل إلى أدنى قيمة لها عندما تتراوح درجة الحرارة بين 5 و 20 درجة مئوية ثم تعاود الارتفاع مع استمرار ارتفاع درجة الحرارة حتى 50 درجة مئوية حيث تشهد السعة الحرارية النوعية زيادة تتراوح بين 7 الى 14 % حسب أنواع الخرسانة المختلفة.



الشكل 12.I. تقييم التوصيلية الحرارية (A) والسعة الحرارية النوعية (B) لخرسانة الركام الخفيف مع درجة الحرارة.

يمكن تفسير تغير التوصيلية الحرارية بكمية الماء المحتجزة داخل الخرسانة في الواقع حتى في الخرسانة المجففة في الفرن تبقى كمية من الماء محصورة داخل المسام المغلقة بالإضافة إلى الماء المرتبط بالجزيئات الصلبة. حيث يمثل الجزء الصاعد من المنحنى زيادة التوصيلية الحرارية للماء المحبوس مما يؤدي بدوره إلى رفع التوصيلية الحرارية للمادة أما القيمة القصوى فتربط بانخفاض عدد الروابط الناقلة للحرارة نتيجة تحلل المركبات المائية وإزالة الماء المرتبط في الخرسانة. من جانبه يقترح تفسيراً آخران ظاهرة توصيلية المادة المسامية الحرارية تعتمد على توصيل الجزء الصلب وكذلك الهواء الموجود في المسام وتحكم التوصيلية داخل المسام بواسطة توصيل الهواء والإشعاع الحراري أما التوصيلية الناتجة عن الإشعاع فهي تتغير وفقاً للدرجة الثالثة من درجة الحرارة إلا أنه بين 5 و 50 درجة مئوية تزداد التوصيلية الحرارية بشكل خطي مع درجة الحرارة [23].

### 6.I. الخاتمة

تظهر دراسة الخرسانة المحسنة بإدخال الركام الخفيف لا سيما دور الركام الخفيف أن هذه المادة لم تعد مجرد خيار بديل بل أصبحت عنصراً محورياً في تطوير خرسانة إنشائية ذات أداء متقدم فبمأن الركام المكون الأكبر حجماً فهو يحدد بدرجة كبيرة الخصائص الميكانيكية والفيزيائية للخرسانة مثل مقاومة الضغط، الكتلة الحجمية العزل الحراري وقابلية التشغيل وقد أثبتت الدراسات أن استبدال الركام التقليدي بركام خفيف ذي بنية مسامية عالية يوفر مزايا متعددة تشمل تقليل الوزن الذاتي للمنشآت تحسين العزل الحراري وتعزيز التماسك في منطقة الانتقال بين العجينة والركام كما أن الأداء الحراري والسعة الحرارية النوعية لهذه الخرسانة تتأثر بعوامل عدة مثل نسبة الرطوبة ودرجة الحرارة ومعدل الاستبدال مما يستلزم تصميماً دقيقاً يأخذ في الحسبان نسب المكونات والظروف البيئية المحيطة. إن تطوير خرسانة عالية الأداء لا يتحقق فقط من خلال تعديل نسب الخلط بل يتطلب فهماً معمقاً للخصائص الفيزيائية والكيميائية لمكونات الخلطة وخاصة الركام هذا الفهم يُعد ركيزة أساسية في تصميم مواد بناء مستدامة تلبي متطلبات المشاريع الهندسية الحديثة سواء من حيث الأداء الإنشائي أو الكفاءة والديمومة.



# الفصل الثاني

خصائص المواد والتركيبية الخرسانية  
والتجارب المعتمدة

## 1.II. مقدمة

تلعب خصائص المواد المستعملة في التجارب دوراً محورياً في تحديد سلوك الخلطة الخرسانية ومدى توافقها مع المتطلبات الإنشائية ويكتسي هذا الجانب أهمية خاصة في الأبحاث والتجارب المخبرية التي تهدف إلى تقييم أداء الخرسانة وتحسين خصائصها حيث أن اختيار المواد وتحديد نسبها بدقة يمثل الخطوة الأساسية لتحقيق نتائج ذات موثوقية علمية.

في هذا الفصل سيتم استعراض الخصائص الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية للمواد الأولية المستعملة في الخلطة الخرسانية وذلك بناءً على التجارب المخبرية المحددة لكل مادة حسب المعيار الخاص بها كما سيتم ربط هذه الخصائص بتأثيرها المباشر على خصائص الخرسانة المتصلبة من حيث القوة والديمومة وتعتمد فعالية هذه التركيبة على النسب الدقيقة للمكونات الأساسية كالإسمنت، الركام، الماء ونسب استبدال بعض المكونات.

حيث نركز على خصائص المواد الطبيعية التقليدية والمواد الصناعية التي أحدثنا تعديل بإدخال نسبها مثل الركام المعالج حرارياً (الطين الممدد بمختلف اصنافه مسحوق، رمل، حصى) وقد تم تصميم التركيبة الخرسانية باستخدام طريقة (Dreux-Gorisse) لضبط نسب المزيج بما يضمن توازن الخلطة وتحقيق الأداء المطلوب.

## 2.II. خصائص المواد والتركيبية الخرسانية والتجارب المعتمدة

### 1.2.II. خصائص المواد

#### 1.1.2.II. الإسمنت

الإسمنت المستخدم في دراستنا هو الإسمنت البورتلاندي العادي الصنف **CEM I / 42.5 R** المعتمد من طرف (AFAQ) وفقاً لمواصفات **ISO 9001** نوعته حوالي 4000 سم<sup>2</sup>/غ من إنتاج المصنع المحلي (ش.ذ.أ - البسكرة للإسمنت) وتتمثل خصائصه المختلفة في الجداول التالية حسب الوثيقة التقنية للمصنع.



صورة 1.II. الاسمنت المستخدم CEM I / 42.5 R

- يوضح الجدول 1.II. نسب التركيب الكيميائي للإسمنت كما يوضح الجدول 2.II. الخصائص الميكانيكية للإسمنت حسب المعيار NF EN 196-1 المعلن من طرف المصنع من جهة أخرى (الجدول 3.II). يظهر ملخصا للخواص الفيزيائية للإسمنت بعد التجارب المخبرية المنجزة بمخبر ميكانيك مواد البناء التابع لكلية الهندسة المدنية كلا حسب المعيار المحدد له.

الجدول 1.II. التركيب الكيميائي للإسمنت (%)

CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	المركبات الكيميائية
61.12	15.20	298	4.90	1.50	2.89	0.75	0.12	المحتوى (%)

الجدول 2.II. الخصائص الميكانيكية للإسمنت - (NF EN 196-1)

بعد 28 يوم	بعد 7 أيام	الخاصية
43.50	36.12	المقاومة الميكانيكية (MPa)
5.45	3.20	مقاومة الانحناء (MPa)

الجدول 3. II. الخصائص الفيزيائية للإسمنت.

الكتلة الحجمية الظاهرية (غ/سم <sup>3</sup> )	0.969	(EN 1097-3)
الكتلة الحجمية المطلقة (غ/سم <sup>3</sup> )	3.02	(EN 197)
المساحة النوعية (غ/سم <sup>3</sup> )	4000	(حسب البطاقة التقنية للمصنع)
بداية و نهاية زمن الشد	240 - 170	(حسب البطاقة التقنية للمصنع)



صورة 2. II. تجربة الكتلة الحجمية الظاهرية للإسمنت.



صورة 3. II. تجربة الكتلة الحجمية المطلقة للإسمنت.

## 2.1.2.II. الركام الطبيعي

### 1.2.1.2.II. الرمل

الرمل المستخدم في دراستنا هو رمل الوادي لمنطقة ليوة حيث التصنيف الحجمي للرمل المستخدم هو 5/0.



صورة 4.II. رمل الوادي المستخدم

- يوضح الجدول 4.II. ملخصا للخصائص الفيزيائية لرمل الوادي المستخدم كلا حسب المعيار المحدد له كما يوضح الشكل 1.II. الخصائص الهندسية لرمل وفقا للمعيار EN 933-1 / EN 933-2.

جدول 4.II. الخصائص الفيزيائية لرمل الوادي.

(NF P 18-554)	1.58	الكتلة الحجمية الظاهرية (غ/سم <sup>3</sup> )
(NF P18-555)	2.60	الكتلة الحجمية المطلقة (غ/سم <sup>3</sup> )
(NF P18-598)	قبل الغسل (ESV=45..6) بعد الغسل (ESV=77.28)	المكافئ الرملي (%)
(NF EN 18-304)	2.49 الرمل متوسط	معامل النوعية



صورة 6. II. تجربة الكتلة الحجمية المطلقة للرمل.



صورة 5. II. تجربة الكتلة الحجمية الظاهرية لرمل.



صورة 7. II. تجربة المكافئ الرملي قبل الغسل.

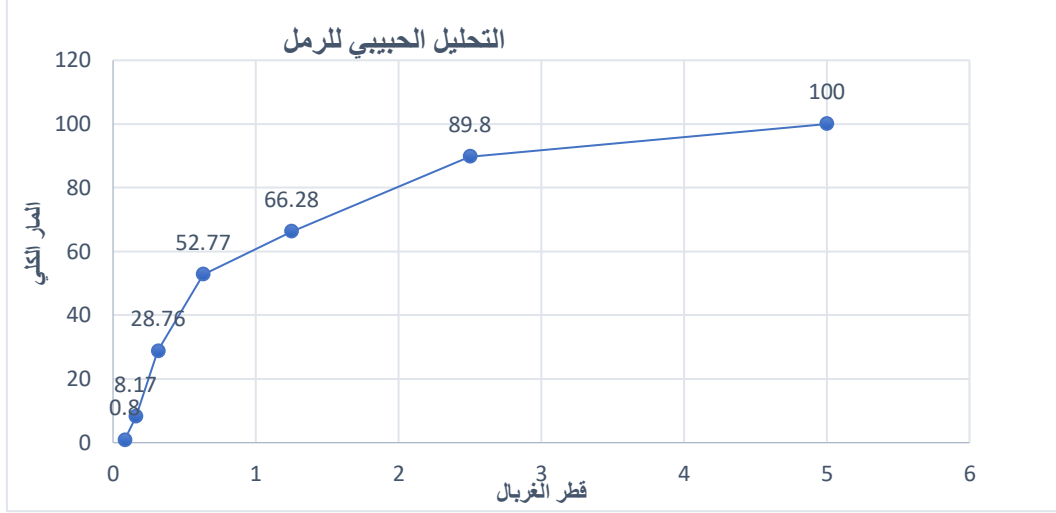


صورة 8.ii. تجربة المكافئ الرملي بعد الغسل.



صورة 9.ii. تجربة التحليل الحبيبي.

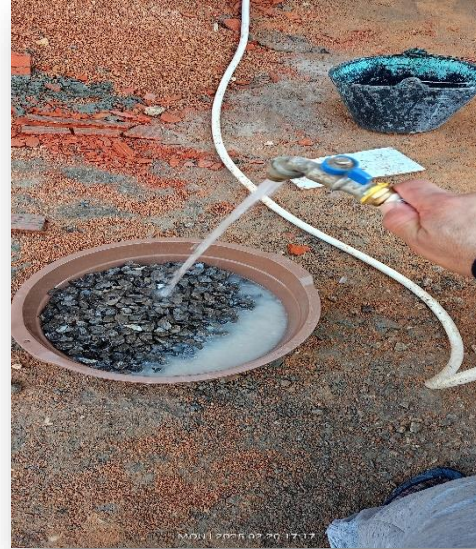
يظهر الشكل التالي التحليل الحبيبي للرمل.



الشكل 1.11. منحنى التدرج الحبيبي للرمل.

## 2.2.1.2.11. الحصى

تم استخدام كسرين من الحصى المكسر في دراستنا في (7/15 – 15/25) حصى محجرة عين التوتة حيث تم غسله لإزالة الشوائب والعناصر الناعمة.



صورة 10.11. عملية غسل الحصى المستعمل



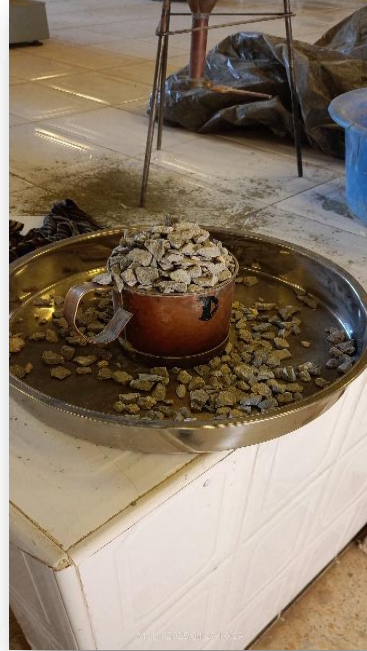
- يوضح الجدول 5.II. والجدول 6.II. ملخصا للخصائص الفيزيائية والميكانيكية للحصى المستخدم ذو الكسر (15/7) و (25/15) على التوالي كلا حسب المعيار المحدد له كما يوضح الشكل 2.II. و الشكل 3.II. الخصائص الهندسية لكسري الحصى وفقا للمعيار EN933-1 / EN 933-2.

جدول 5.II. الخصائص الفيزيائية للحصى المستعمل (15/7).

(NF P 18-554)	1.43	الكتلة الحجمية الظاهرية (غ/سم <sup>3</sup> )
(NF P18-555)	2.61	الكتلة الحجمية المطلقة (غ/سم <sup>3</sup> )
(NF EN 18-573)	22.04	معامل لوس انجلس (%)

جدول 6.II. الخصائص الفيزيائية للحصى المستعمل (25/15).

(NF P 18-554)	1.35	الكتلة الحجمية الظاهرية (غ/سم <sup>3</sup> )
(NF P18-555)	2.63	الكتلة الحجمية المطلقة (غ/سم <sup>3</sup> )
(NF EN 18-573)	22.04	معامل لوس انجلس (%)



صورة 12.II. الكتلة الحجمية المطلقة للحصى.

صورة 11.II. الكتلة الحجمية الظاهرية للحصى.



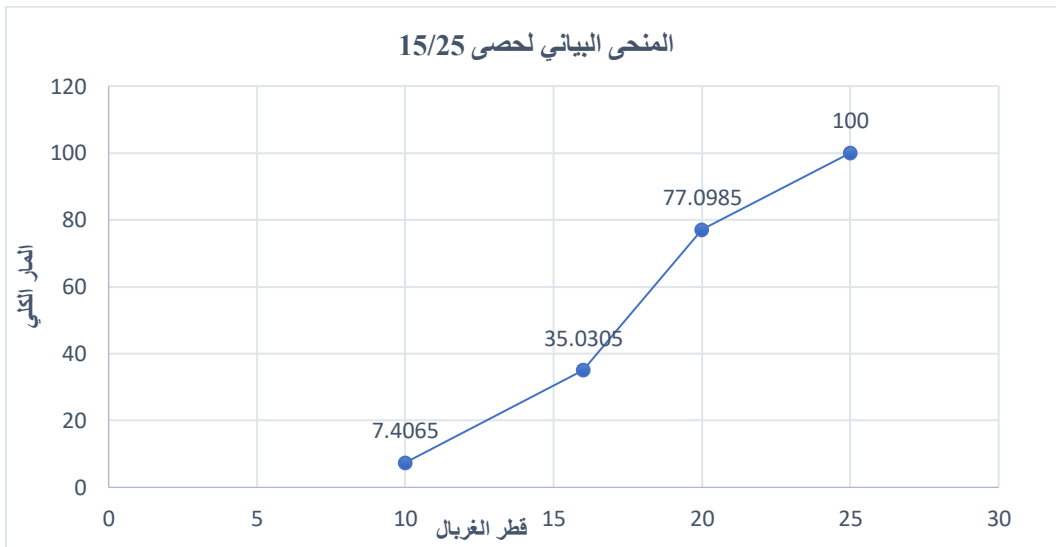
صورة II.13. تجربة تحديد القساوة لوس أنجلس.



صورة II.14. تجربة التحليل الحبيبي للحصى.



الشكل II.2. منحنى التدرج الحبيبي لحصى (15/7).



الشكل II.3. منحنى التدرج الحبيبي لحصى (25/15).

### 3.1.2.II. الركام الصناعي (الطين الممدد)

#### 1.3.1.2.II. مسحوق الطين الممدد

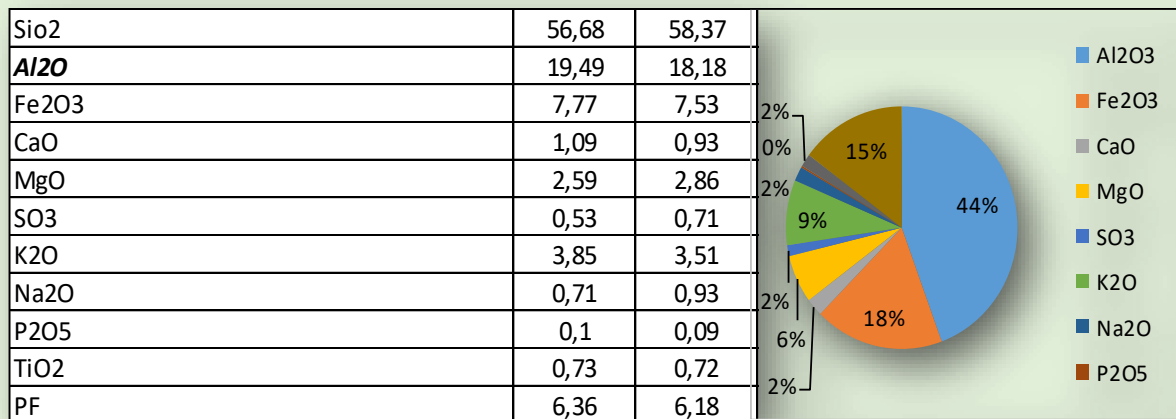
مسحوق الطين الممدد هو مادة حبيبية ناعمة أقطارها أقل من 0.08 ملم تنتج عن طريق طحن حبيبات الطين الممدد او بقايا الركام المكسر ويستخدم هذا المسحوق في تطبيقات متعددة أبرزها إنتاج الخرسانة خفيفة الوزن وتحسين خصائصها مثل العزل الحراري والصوتي.



صورة 15.II. مسحوق الطين الممدد.

- يلخص كل من الجدول 7.II. والجدول 8.II. والجدول 9.II. الخصائص الكيميائية والفيزيائية على التوالي لمسحوق للطين الممدد PL المستخدم حسب البطاقة التقنية للمصنع.

جدول 7.II. البطاقة التقنية لتحليل الكيميائي للطين الممدد.



جدول 8.II. المكونات الكيميائية لمسحوق للطين الممدد (PL).

المكونات الكيميائية لمسحوق للطين الممدد (PL)									
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>
58.11	18.58	2.07	7.80	0.69	2.61	0.98	3.46	0.12	0.75

جدول 9.II. الخصائص الفيزيائية لمسحوق للطين الممدد (PL).

2.40	الكتلة الحجمية المطلقة (غ/سم <sup>3</sup> )
1.12	الكتلة الحجمية الظاهرية (غ/سم <sup>3</sup> )
3700	المساحة النوعية (غ/سم <sup>3</sup> )

### 2.3.1.2.II. الرمل الصناعي من الطين الممدد (AC 0/3 700).

رمل الطين الممدد هو ناتج طحن حبيبات الطين الممدد إلى حبيبات ذات أقطار تشبه الرمل الطبيعي حيث يتميز ببنية خفيفة ومسامية يستخدم هذا الرمل في تطبيقات البناء والخرسانة خفيفة الوزن وكذلك في أعمال الردم وتحسين التربة. حيث تحتفظ جميع أصناف الركام الصناعي الناتجة عن الطين الممدد بما فيها الرمل الصناعي على نفس التركيبة الكيميائية.

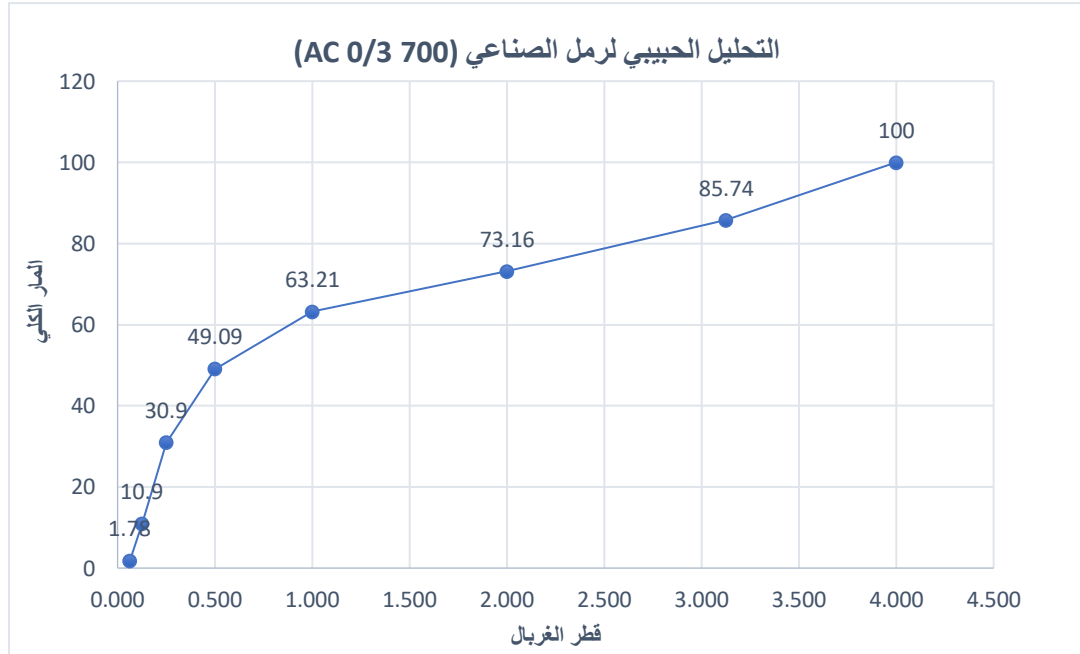


صورة 16.II. الرمل الصناعي من الطين الممدد.

- الجدول 10.II. هو توضيح شاملا للخصائص الفيزيائية لرمل الصناعي من الطين الممدد (AC 0/3 700) المستخدم في الدراسة والشكل 4.II. يلخص الخصائص الهندسية وفقا للمعيار (EN933-1 / EN 933-2).

جدول 10. II. البطاقة التقنية 2020 – لرمل الصناعي من الطين الممدد (AC 0/3 700).

الخاصية	القيمة / المعلومة
الاختبارات	بين 650 و 850
شكل الركام	مكسر (نتاج عن التكسير)
الكتلة الحجمية الظاهرية	740 كغ/م <sup>3</sup>
الكتلة الحجمية الحقيقية	1620 كغ/م <sup>3</sup>
مقاومة التجمد/الذوبان	غير محددة ( / )
معامل التناسق (معامل الارتباط)	2.18
نسبة المواد الناعمة	14.26 %
معامل الصقل المسرع	غير محدد ( / )
معامل النعومة	2.28
الرطوبة في فصل الصيف	أقل من 5%
امتصاص الماء بعد 5 دقائق	12.80 %
امتصاص الماء بعد 30 دقيقة	16.02 %
امتصاص الماء بعد 24 ساعة	24.60 %



الشكل 4. II. التحليل الحبيبي لرمل الصناعي (AC 0/3 700)

### 3.3.1.2. II. الحصى الصناعي من الطين الممدد (AN 8/15 – 500).

هو مادة خفيفة الوزن تصنع من الطين الطبيعي بعد تسخينه في أفران دوارة تحت درجات حرارة عالية مما يؤدي إلى تمده وتكون بنية داخلية مسامية ويتخذ شكل حبيبات كروية أو شبه كروية ويستخدم في تطبيقات البناء كركام خفيف في الخرسانة.

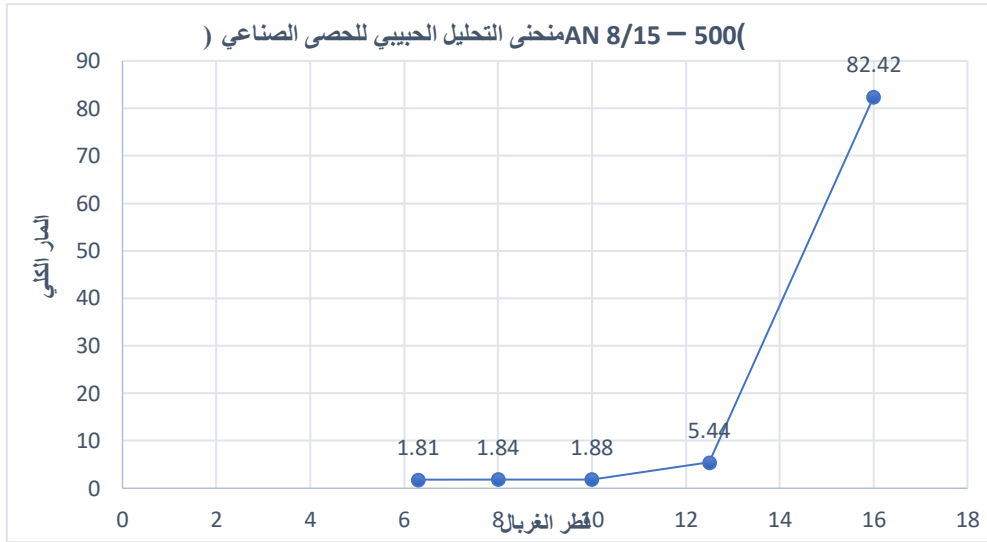


صورة II.17. الحصى الصناعي من الطين الممدد

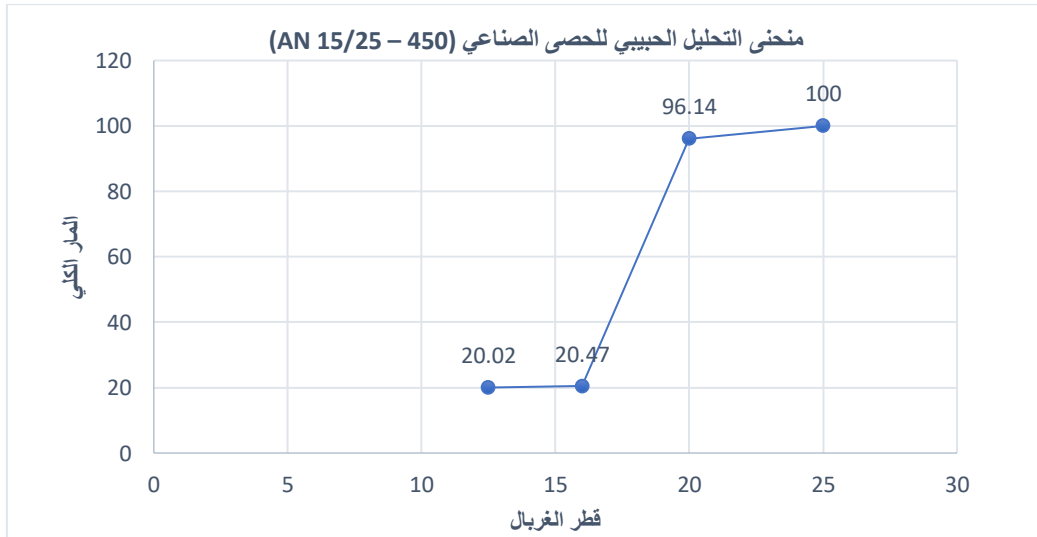
جدول II.11. البطاقة التقنية 2020 – للحصى الصناعي من الطين الممدد بكسريه.

الخاصية	(15/8) القيمة / المعلومة	(25/15) القيمة / المعلومة
الاختبارات	بين 500 و 600	بين 450 و 550
شكل الركام	عقدي (Nodulaire)	A.C
مقاومة السحق (في الحالة السائبة)	4.25	3.37
الكتلة الحجمية الظاهرية	528 كغ/م <sup>3</sup>	500 كغ/م <sup>3</sup>
الكتلة الحجمية الحقيقية	900 كغ/م <sup>3</sup>	835 كغ/م <sup>3</sup>
مقاومة التجمد/الذوبان	غير محددة ( / )	غير محددة ( / )
معامل التناسق (معامل الارتباط)	1.70	1.67
نسبة المواد الناعمة	غير محددة ( / )	غير محدد
معامل الصقل المسرع	غير محدد ( / )	غير محددة ( / )
معامل النعومة	غير محدد ( / )	غير محددة ( / )
الثبات الحجمي	غير محدد ( / )	غير محدد ( / )
الرطوبة في فصل الصيف	أقل من 3%	أقل من 3%
امتصاص الماء بعد 5 دقائق	3.88 %	5.08 %
امتصاص الماء بعد 30 دقيقة	4.12 %	6.67 %
امتصاص الماء بعد 24 ساعة	13.60 %	14.46 %
تفاعل القلويات - التفاعل القلوي	غير محدد ( / )	غير محدد ( / )

- من خلال الجدول II.11. تتلخص الخصائص الفيزيائية لحصى الصناعي (AN 8/15 – 500) والحصى الصناعي (AN 15/25 – 450) من الطين الممدد المستخدم في الدراسة والشكل II.5. زائد الشكل II.6. يبين الخصائص الهندسية وفقا للمعيار EN933-1 / EN 933-2.



الشكل 5. II. التحليل الحبيبي للحصى الصناعي (AN 8/15 – 500)

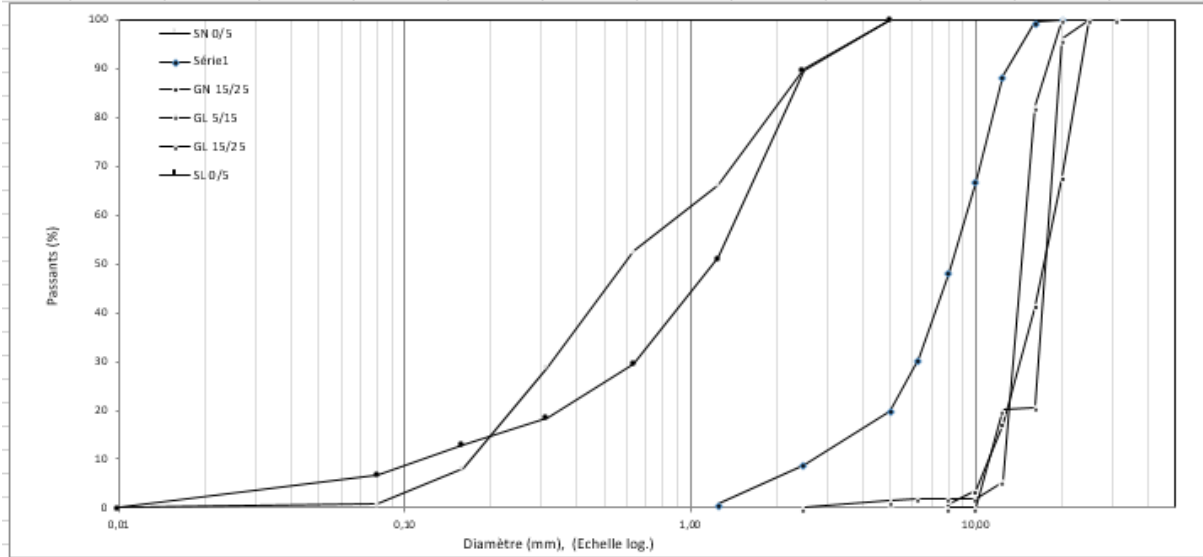


الشكل 6. II. التحليل الحبيبي للحصى الصناعي (AN 15/25 – 450)

### - منحني التحليل الحجمي الشامل

تعرض النسب المئوية التراكمية للمواد المارة لجميع أصناف الركام على شكل منحني تحليبي حجمي كما هو موضح في الشكل 7. II.





الشكل 7.II. منحنى التحليل الحبيبي الشامل لمختلف أصناف الركام الطبيعي والخفيف.

## 2.2.II التركيبية الخرسانية

في إطار دراستنا الحالية تم اعتماد طريقة Dreux-Gorisse في تصميم الخلطة الخرسانية المعتمدة نظراً لدقتها في تحقيق توازن مثالي بين المكونات الأساسية للخرسانة حيث تساعد هذه الطريقة على تحسين الأداء الميكانيكي للخرسانة وضمان تجانسها وجودتها لأنها تأخذ بعين الاعتبار خصائص المواد المستعملة وظروف العمل لذلك فهي تشكل أداة فعالة لضبط التركيبة المثلى حسب متطلبات أي مشروع حيث تحصلنا من خلالها على الكمية الدقيقة لكل مكون الخاص بواحد متر مكعب من الخرسانة كما تم اعتماد هذه التركيبة كأحد التركيبات الخمسة محل الدراسة على أن تكون هي التركيبة المرجعية من باب المقارنة بباقي التركيبات الأربعة .

### 1.2.2.II التركيبية الخرسانية العادية بنسبة 100% من الركام الطبيعي لـ 1م<sup>3</sup>

جدول 11.II. التركيبية الخرسانية العادية (GN) لـ 1م<sup>3</sup>

مكونات 1 م <sup>3</sup>		
E/C	الكمية (كغ/م <sup>3</sup> )	المكونات
	197.74	الماء
	350	الاسمنت
0.56	603.11	الرمل
	370.45	الحصى 7/15
	814.71	الحصى 15/25

تم إعداد أربعة تركيبات خرسانية مختلفة حيث تم فيها استبدال جزء من الركام التقليدي بالطين الممدد بأصنافه المختلفة (مسحوق، رمل، حصى بكسرين (15/7 و 25/15) بنسب مختلفة يهدف هذا التنوع في نسب الاستبدال إلى دراسة تحديد تأثير الطين الممدد على خصائص الخرسانة المتصلبة من حيث الكثافة والامتصاص والمقاومة الميكانيكية وذلك بغرض تحديد التركيبة المثلى التي تحقق أفضل توازن بين الأداء والفعالية.

حيث كانت نسب الاستبدال كما يلي ويليها جدول مكونات التراكيب الخرسانية المعدلة:

- التركيبة الأولى GL/SL: 10% حصى خفيف + 10% رمل خفيف.
- التركيبة الثانية GL/PL: 10% حصى خفيف + 05% مسحوق خفيف.
- التركيبة الثالثة SL/PL: 10% رمل خفيف + 05% مسحوق خفيف.
- التركيبة الرابعة GL/SL/PL: 10% حصى خفيف + 05% مسحوق خفيف + 10% رمل خفيف.
- التركيبة الخامسة GN: (0% حصى خفيف + 0% مسحوق خفيف + 0% رمل خفيف) الخرسانة المرجعية.

جدول 12.ii. جدول التركيبات الخرسانية المعتمدة لـ 1م

حصى خفيف 25/15	حصى خفيف 15/7	رمل خفيف 40	مسحوق خفيف 14.95	الحصى 25/15 733.21	الحصى 15/7 333.39	الرمل 542.76	الإسمنت 350	الماء 197.74	المكونات
									التركيبية
33.10	15.11	40	/	733.21	333.39	542.76	350	197.74	GL/SL
33.10	15.11	/	14.95	733.21	333.39	603.07	332.23	197.74	GL/PL
/	/	40	14.95	814.71	333.39	542.76	332.23	197.74	SL/PL
33.10	15.11	40	14.95	733.21	333.39	542.76	332.23	197.74	GL/SL/PL
/	/	/	/	814.71	370.45	603.11	350	197.74	GN

## 2.2.2.II. تصنيع العينات

من أجل تجاربنا المخبرية استخدمنا قوالب مكعبة بأبعاد  $10 \times 10 \times 10$  سم<sup>3</sup> وقوالب مكعبة بأبعاد  $5 \times 5 \times 5$  سم<sup>3</sup> هذه الأخيرة مصنوعة من المعدن (الفلوآذ) وهي مادة غير نافذة وغير ماصة ولا تتفاعل مع المواد الرابطة حيث أن العينات المكعبة ذات الأبعاد  $10 \times 10 \times 10$  سم<sup>3</sup> خصصت لاختبارات تغير الحجم وفقدان الكتلة واختبارات سرعة الموجات الصوتية والمقاومة الميكانيكية تحت تأثير دورات الحرارة أما العينات ذات الأبعاد  $5 \times 5 \times 5$  سم<sup>3</sup> فهي مخصصة لقياس المسامية والكثافة.

تم خلط الخرسانة باستخدام خلاط ذو محور عمودي وحركة كوكبية وقد تم تصنيع الخرسانة العادية وفقا

للمعيار **NF P 18-404**

تتم عملية تصنيع الخرسانة التي اتبعناها على النحو التالي:

- تشبييع الركام الخفيف بالماء لمدة 24 ساعة
- تنظيف وترطيب أولي للخلاط للحد من امتصاص إضافي لماء الخلط من قبل جدران الخلاط.
- إدخال المكونات الصلبة بدءًا من الأكبر حجمًا إلى الأصغر (الحصى، الرمل، الإسمنت).
- الخلط الجاف لمدة دقيقة واحدة.
- إضافة الماء والخلط لمدة 3 دقائق
- تفريغ الخلاط.



صورة II.17. مراحل تصنيع الخرسانة.

### 3.2.2.II. حفظ العينات

#### 1.3.2.2.II. الحفظ الأولي داخل القوالب

بعد صب الخرسانة داخل القوالب تُترك العينات في مكانها داخل القوالب لمدة 24 ساعة وذلك في بيئة المختبر و يتم تغطية السطح العلوي لجميع العينات بغلاف بلاستيكي بهدف منع التبخر السريع للماء و تجنب الانكماش الأولي وضمان ظروف نضج ابتدائية جيدة.



صورة II.18. الحفظ الأولي للعينات لمدة 24 ساعة.

#### 2.3.2.2.II. حفظ العينات بعد إزالة القوالب

تم إخضاع جميع العينات المستخدمة في هذه الدراسة لنفس أسلوب المعالجة وظروف الحفظ وذلك وفقاً للمعيار NF P 18-404 وبموجب هذا المعيار تم غمر العينات في الماء لمدة 28 يوماً حيث يهدف هذا النوع من المعالجة إلى ضمان ترطيب مثالي للخرسانة ومنع تشكل الشقوق الناتجة عن الجفاف والحفاظ على تشبع الخرسانة بالماء للحصول على نسبة عالية من تفاعلات الاماهة.



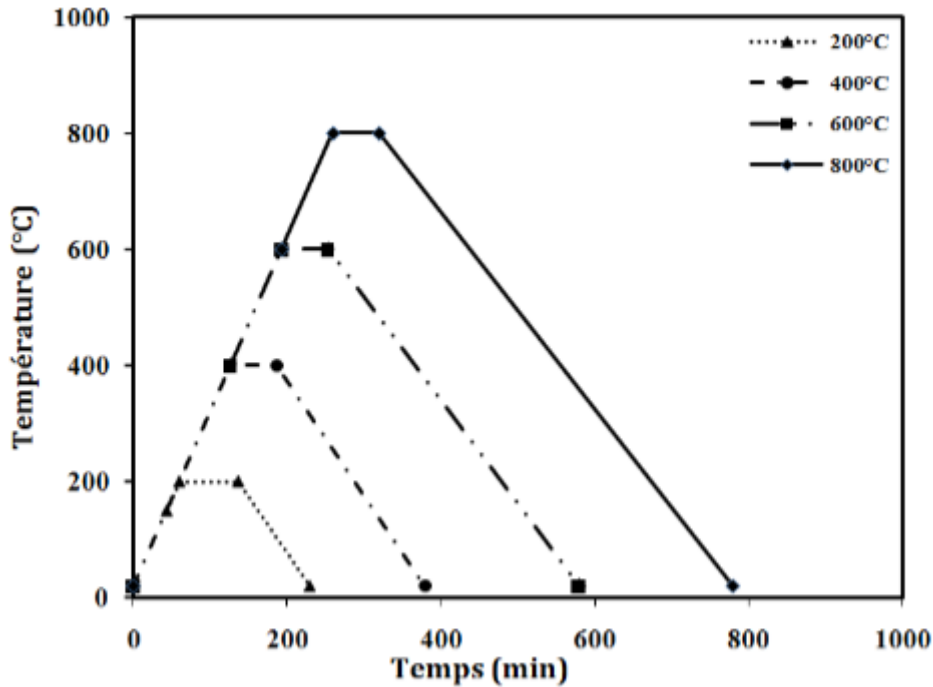
صورة II.19. حفظ العينات في الماء لمدة 28 يوم.

### 3.2.II. التجارب المعتمدة في الدراسة التجريبية

تم إجراء جملة من التجارب المخبرية على التركيبات الخمسة المختلفة بما فيهم العادية حيث نهدف إلى دراسة بعض الخصائص الحيوية للخرسانة تحت تأثير درجات حرارة مرتفعة (200°م، 400°م، 600°م و800°م) مثل فقدان الكتلة والمسامية ومقاومة الانضغاط وسرعة الموجات الصوتية ومعرفة مدى التحسن في هذه الخصائص تحت تأثير اضافة نسب من الركام الخفيف (الطين الممدد).

### 1.3.2.II. دورات التسخين والتبريد

من أجل معرفة وتحديد سلوك الخرسانة عند درجات الحرارة المرتفعة تم استخراج العينات الخرسانية وتركها لمدة 24 ساعة في الهواء الطلق بعد الانتهاء من المعالجة المائية التي دامت 28 يوم وذلك بهدف تقليل محتواها المتبقي من الرطوبة قبل الخضوع للمعالجة الحرارية بعد ذلك تم تعريض هذه العينات لخمسة دورات من التسخين والتبريد حيث تم رفع درجة الحرارة من 20°م إلى الدرجات الحرارية المستهدفة (200°م, 400°م, 600°م و800°م) وقد تم تثبيت درجة الحرارة عند كل مستوى لمدة ساعة (60 دقيقة) لضمان تجانس توزيع الحرارة داخل العينات ثم تركت العينات لتبرد تدريجيا حتى تصل إلى درجة الحرارة البيئية. تم اعتماد سرعة تسخين متوسطة ثابتة تبلغ 3 درجات مئوية في الدقيقة لجميع أنواع الخرسانة المستخدمة في هذه الدراسة حيث تعد 20°م درجة الحرارة المرجعية المعتمدة.



الشكل 8.II. دورات التسخين والتبريد (بمعدل تسخين 3 درجات مئوية/دقيقة).

### 1.3.2.1.II. ترتيب العينات داخل الفرن

من أجل تنفيذ دورة التسخين تم استخدام فرن قابل للبرمجة يتيح للمستخدم إمكانية إعداد برامج حرارية مسبقة كما يسمح بتسجيل درجات الحرارة داخل الفرن حيث يسع لتسعة عينات بأبعاد  $10 \times 10 \times 10$  سم<sup>3</sup> وتسعة عينات إضافية من نفس الخلطة الخرسانية بأبعاد  $5 \times 5 \times 5$  سم<sup>3</sup> وقد تم ترتيب العينات داخل الفرن حسب الصورة 20.II. بطريقة تضمن توزيعا متجانسا للحرارة.



صورة 20.II. وضعية وترتيب العينات داخل الفرن.

### 2.3.2.II. اختبار فقدان الكتلة

يعد فقدان الكتلة معيارا أساسيا يستخدم لتقييم مدى تدهور الخرسانة عند تعرضها لدرجات عالية من الحرارة لأن العمليات المرتبطة بتبخر الماء والإماهة ونزع الإماهة داخل عجينة الاسمنت أثناء تسخين الخرسانة تؤدي إلى تغييرات واضحة في كتلتها. يتم احتساب قيمة فقدان الكتلة بناء على المتوسط الحسابي لقياسات ثلاث عينات بأبعاد  $10 \times 10 \times 10$  سم<sup>3</sup> لكل دورة حرارية. عقب الانتهاء من هذه الدورة توزن العينات مرة أخرى لتحديد الكتلة النهائية ومن ثم يحسب فقدان الكتلة باستخدام العلاقة التالية:

$$dm = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100, \quad (\%)$$

حيث:

- ✓ dm نسبة فقدان الكتلة (%)
- ✓ mi الكتلة الابتدائية (غ)
- ✓ mf الكتلة النهائية (غ)

### 3.3.2.II. اختبار تغير الحجم العينات

يعد اختبار فقدان الحجم أحد المؤشرات الهامة لتقييم سلوك الخرسانة تحت تأثير الأحمال الحرارية العالية حيث يستخدم لتقدير مدى التغيرات الحجمية التي تطرأ على العينة نتيجة التمدد أو التقلص الحراري والتشققات الداخلية وفقدان الماء المرتبط كيميائياً وفيزيائياً. يتم إجراء الاختبار على عينات خرسانية منتظمة الشكل مثل المكعبات حيث تجفف أولاً للوصول إلى حالة الرطوبة الثابتة ثم تقاس أبعادها بدقة قبل التعرض للحرارة بعد ذلك تسخن العينات تدريجياً إلى درجات حرارة محددة مثل 200م° 400م° 600م° 800م° باستخدام فرن حراري ذكي حيث يحتفظ بدرجة الحرارة المطلوبة لفترة زمنية ثابتة (ساعة) لضمان التوزيع الحراري المنتظم حيث تقاس الأحجام باستخدام أدوات دقيقة مثل القدم القنوية للضمان الدقة في القياس وتفسر نتائج الاختبار في ضوء التغيرات الفيزيائية الحاصلة في البنية المجهرية للخرسانة مثل تحلل هيدروكسيد الكالسيوم تفكك المركبات الهيدروليكية وتكوّن التشققات الدقيقة مما يؤدي إلى انكماش أو تمدد حجمي.

يتم حساب فقدان الحجم النسبي باستخدام العلاقة التالية:

$$dm_{Gr} = \frac{m_{i,Gr} - m_{t,Gr}}{m_{i,Gr}} \times 100, \quad (\%)$$

حيث:

- dm- فقدان الكتلة للركام. (%)
- mi Gr- كتلة العينة عند درجة حرارة المرجعية (غرام).
- mt Gr- كتلة العينة بعد دورة التسخين و التبريد (غرام).





صورة II.21. قياس الابعاد لتحديد فقدان الحجم.

#### II.4.3.2. اختبار سرعة الموجات فوق الصوتية

يعرف هذا الاختبار باختبار الموجات فوق الصوتية ويستخدم لتقييم التجانس الفيزيائي للخرسانة ومدى تدهورها كما يمكن استخدامه لتقدير عمق الشقوق في الخرسانة. الهدف الأساسي من هذا الاختبار هو الحصول على معلومات دقيقة حول جودة الخرسانة التي خضعت لإجهادات حرارية. الجهاز يقوم بقياس الزمن الذي تستغرقه نبضة موجية للمرور عبر المادة المختبرة. يعتمد مبدأ هذا الاختبار على قياس الوقت اللازم لانتقال موجة طولية عبر مسافة محددة داخل الخرسانة حيث يتم حساب سرعة الموجات فوق الصوتية باستخدام العلاقة التالية:

$$\frac{l}{t} = V$$

حيث:

- ✓ V سرعة الموجة فوق الصوتية (متر/ثانية)
- ✓ l طول المسار الذي تقطعه الموجة (متر)
- ✓ t زمن انتقال الموجة (ثانية)



صورة II.22. عملية قياس سرعة الموجات فوق الصوتية في الخرسانة.

- تصنف جودة الخرسانة بناءً على جدول (جدول II.13). [24].

جدول II.13. تصنيف جودة الخرسانة اعتمادًا على سرعة الموجات فوق الصوتية.

Vitesse des ondes sonique (m/s)	Qualité du béton
> 4500	Excellente
3500 – 4500	Bonne
3000 – 3500	Médiocre
2000 – 3000	Faible
< 2000	Très faible

### II.5.3.2. اختبار المقاومة الميكانيكية بعد التعرض للحرارة.

تعتمد مقاومة الخرسانة للضغط بعد التعرض لدرجات حرارة مرتفعة على عدة عوامل من أبرزها تركيبية الخرسانة (طبيعة المكونات. نسبة الماء إلى الاسمنت. المسامية عمر الخرسانة. حالة الإجهاد التي كانت عليها الخرسانة أثناء الحريق) كما أن سرعة ارتفاع درجة الحرارة ومدة التعرض للتسخين لهما تأثير مباشر على المقاومة الميكانيكية.

فلتقييم هذه المقاومة تم إخضاع كل 3 عينات من نفس التركيبية إلى درجة حرارة معينة على النحو التالي (200°م, 400°م, 600°م و800°م) ومنه حساب مقاومة الضغط على أساس المتوسط الحسابي لثلاث عينات. تم تنفيذ اختبار الضغط باستخدام مكبس هيدروليكي ذي قدرة قصوى تبلغ 3000 كيلو نيوتن وبسرعة تحميل ثابتة مقدارها 5 كيلو نيوتن/ثانية تم تطبيق الاجهاد حتى لحظة انهيار العينة ومنه تسجيل أقصى جهد وحُسبت مقاومة الانضغاط ( $f_c$ ) وفق العلاقة التالية:

$$R_c = F/S$$

حيث:

- ✓  $R_c$  مقاومة الضغط (ميغا باسكال).
- ✓  $F$  الحمولة القصوى قبل الانهيار (نيوتن).
- ✓  $S$  مساحة المقطع العرضي للعينة (م<sup>2</sup>).



صورة II.23. اختبار مقاومة العينات بجهاز مكبس هيدروليكي.

### II.6.3.2. اختبار المسامية والكتلة الحجمية.

من المعروف أن الخرسانة مادة ذات طبيعة مسامية تحتوي على فراغات تؤثر بشكل كبير على خصائصها الميكانيكية وعلى متانتها. كما تتميز الخرسانة ذات المسامية المنخفضة بحماية أكبر من العوامل البيئية العدوانية وبالتالي فإن المسامية تعدّ من المعايير الأساسية في تحديد البنية المجهرية للخرسانة. حيث تجرى اختبارات المسامية لجميع دورات المعالجة الحرارية. وتم في هذه الدراسة استخدام طريقة الوزن الهيدروستاتيكي [AFREM 1997] والتي تعطينا تقدير المسامية المفتوحة حيث يقاس أولاً وزن العينات (5×5×5 سم<sup>3</sup>) وهي في حالتها الجافة بعد المعالجة الحرارية ثم توضع في حوض مائي إلى أن تصل إلى درجة التشبع بالكامل ومنه تجفف العينة بلطف باستخدام قطعة قماش لإزالة الماء السطحي دون التأثير على الماء داخل المسام القريبة من السطح عندها يقاس وزنها وهي مشبعة في الهواء وبعدها تعلق العينة في ميزان هيدروستاتيكي لقياس وزنها أثناء الغمر في الماء.

تحسب المسامية المفتوحة باستخدام العلاقة التالية:

$$P = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sat} - M_{sat}^{imm}} \times 100, \quad (\%)$$

حيث:

- ✓  $M_{sat}$  : الكتلة المشبعة (غ).
- ✓  $M_{sec}$  : الكتلة الجافة (غ).
- ✓  $M_{sat}/imm$  : الكتلة المشبعة بعد الغمر (غ).



صورة II.24. اختبار قياس المسامية.

### II.7.3.2. فحص وتقييم التشققات

تعد الشقوق الناتجة عن تعرض الخرسانة لدرجات حرارة مرتفعة من المؤشرات الأساسية لتدهور البنية الداخلية وفقدان التماسك البنيوي ويعتمد تقييمها ضمن اختبارات الأداء الحراري للخرسانة يشمل التقييم تحديد موقع الشقوق وكثافتها واتساعها باستخدام أدوات مثل المجهر اليدوي الذي يوفر تكبيراً يسمح بفحص ورصد الشقوق الدقيقة التي لا ترى بالعين المجردة وقياس اتساعها تقريباً باستخدام مسطرة المجهر المدرجة. يتم تصنيف الشقوق بناءً عن سمكها ما يتيح التمييز بين الشقوق الناتجة عن التمدد الحراري أو انفصال الركام كما توفر معلومات مبكرة لمستوى التدهور وتعتبر هذه التقنية رغم بساطتها جزءاً مهماً وتستخدم غالباً لتحليل السلوك البنيوي للخرسانة بعد التعرض الحراري.



صورة II.25. فحص وتقييم الشقوق.



صورة II.26. ميكروسكوب ضوئي 24x نوع MPB-2 .

### خاتمة

تعد دراسة خصائص المواد المكونة للخرسانة من الركائز الأساسية في مجال الهندسة المدنية لما لها من تأثير مباشر على جودة المنشآت ومتانتها على المدى الطويل. إن فهم السلوك الفيزيائي والميكانيكي لهذه المواد خاصة الحساسة منها يتيح تحسين تصميم الخلطات الخرسانية بما يحقق الأداء الأمثل في مختلف شروط الاستخدام. من جهة أخرى تمثل التركيبة الخرسانية عاملاً حاسماً في تحقيق التوازن بين المقاومة والديمومة حيث يساهم ضبط نسب الركام والإسمنت والماء بالإضافة إلى المواد المضافة في تحسين خصائص الخرسانة. أما من الناحية التجريبية فإن اعتماد منهاج المعايير المعترف بها مثل معايير ASTM AFREM يضمن دقة النتائج وقابليتها للمقارنة ويسمح بتقييم سلوك المواد تحت تأثير مختلف الظروف التشغيلية والبيئية.

في ضوء ما سبق فإن الربط المنهجي بين الخصائص الأساسية للمواد والتصميم الأمثل للخلطات والتقييم المخبري الدقيق يشكل قاعدة علمية متينة لتطوير خرسانة مستدامة تلبي متطلبات المشاريع الهندسية الحديثة.

## الفصل الثالث

### عرض وتحليل النتائج

### 1.III. المقدمة

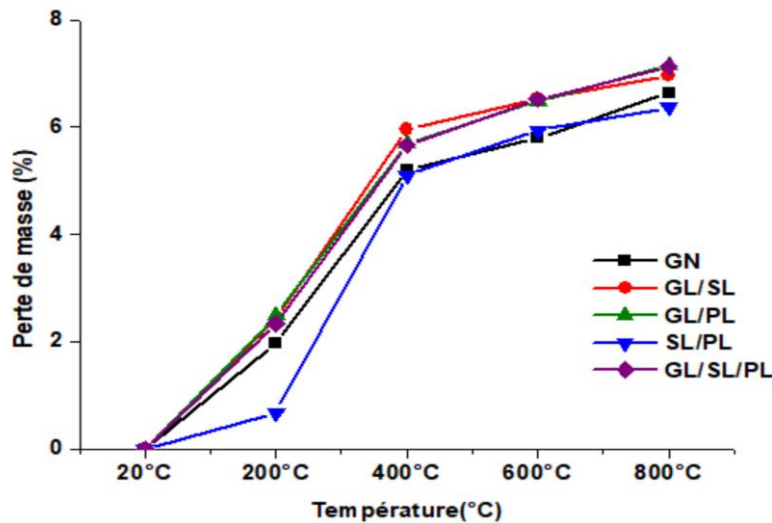
يتناول هذا الفصل عرضاً تحليلياً ومناقشة مفصلة لتأثير درجات الحرارة العالية (من 20°م إلى 800°م) على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للخرسانة وذلك من خلال مقارنة أربعة تركيبات خرسانية ذات نسب استبدال مختلفة من الركام الخفيف (الطين الممدد) بالخرسانة العادية ذات الركام التقليدي حيث نتطرق أولاً لعرض نتائج الاختبارات (اختبار فقدان الكتلة، اختبار فقدان الحجم، اختبار سرعة الموجات فوق الصوتية، اختبار مقاومة الضغط، اختبار المسامية والكثافة وأخيراً فحص وتقييم التشققات) التي اخضعت لها العينات بعد تعريضها لدورات حرارية من التسخين والتبريد يلي ذلك مناقشة وتحليل النتائج المتعلقة بأداء جل التركيبات الخرسانية بما في ذلك الخرسانة العادية من حيث خصائصها الفيزيائية والميكانيكية بهدف تقييم سلوكها تحت تأثير الحرارة وتقييم أداء نوعية الركام المستخدم.

### 2.III. تأثير درجات الحرارة العالية على الخواص الفيزيائية

نركز في هذه الدراسة على تحليل سلوك الخرسانة العادية وباقي التركيبات الخرسانية الاربعة المعدلة بنسب من الركام الصناعي (مسحوق او ركام من الطين الممدد) كما هو موضح في الجدول 16.II. عند تعرضها لسلسلة من دورات التسخين والتبريد 20°م, 200°م, 400°م, 600°م و 800°م

#### 1.2.III. فقدان الكتلة

عند تعرض الخرسانة لدرجات حرارة مرتفعة يحدث تدهور في بنيتها الميكرو-هيكلية مما يؤدي إلى انخفاض في الكثافة الكلية للمادة. ولتحليل سلوك فقدان الكتلة تم وزن العينات قبل وبعد كل دورة من دورات التسخين والتبريد بهدف تحديد هذا الفقدان في الكتلة مع تغير درجات الحرارة حيث نستعرض في الشكل 1.III. ملخصاً لتغيرات فقدان الكتلة للخرسانة العادية وباقي التركيبات الاربعة المعدلة بنسب من الركام الصناعي (الطين الممدد) تبعاً لدرجات الحرارة المختلفة.



الشكل 1.III. منحنى تقييم فقدان الكتلة بالنسبة لخرسانة الركام الخفيف والخرسانة العادية



- تبعاً لما يوضحه الشكل III.1 الذي يلخص تطور فقدان الكتلة والتي لوحظت على التركيبات الخرسانية الخمسة بما في ذلك العادية والمعدلة باستخدام نسب من الطين الممدد بعد التعرض لدرجات حرارة مرتفعة حيث نستخلص ما يلي:

- هناك اتجاه تصاعدي في فقدان الكتلة لكل التركيبات بما في ذلك العادية بالتوازي مع زيادة درجة الحرارة. حيث نسجل زيادة طفيفة ومستمرة في فقدان الكتلة مع ارتفاع درجة الحرارة مع بقاء كل القيم تحت نسبة 3%.

- كما يتبين انه هناك ثلاثة مجالات لتطور فقدان الكتلة حيث كانت كما يلي:

- المجال الأول من 20°م إلى 200°م.

يلاحظ عند تسخين العينات إلى 200°م حدوث فقدان طفيف في الكتلة حيث تسجل كل من التركيبات GL/PL, GL/SL/PL, GL/SL أعلى قيم فقدان الكتلة 2%, 3% و 2% على التوالي. بينما تسجل التركيبة SL/PL أقل فقدان في الكتلة يقدر بـ 1% مما يشير إلى مقاومة حرارية أولية جيدة. الخرسانة العادية (GN) أظهرت فقدان في الكتلة بنسبة 2% مما يدل على بداية تأثر وتبخّر الماء الحر في المسام وكذا تبخر الماء الشعيري الموجود في الطبقة السطحية للمادة بالإضافة إلى فقدان الإترنجيت [1].

- المجال الثاني من 200°م إلى 400°م

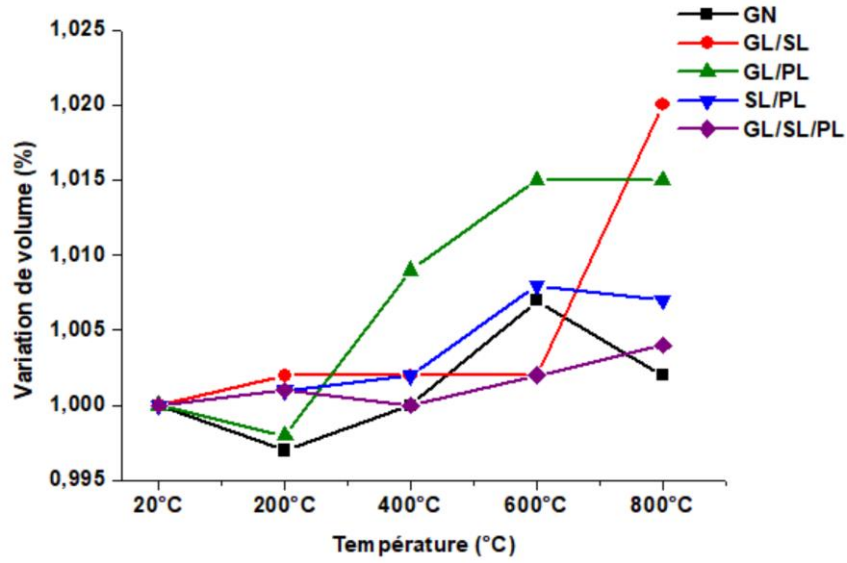
نلاحظ أنه هناك قفزة كبيرة في نسب فقدان الكتلة لجميع التركيبات حيث سجل جميعها قيمة فوق 5% وتميزت التركيبة GL/SL بأعلى قيمة 6% أما التركيبة GN أظهرت فقداناً أقل نسبياً 5% ويعود هذا الفقدان إلى تحرر الماء المرتبط داخل مركبات الإماهة من نوع C-S-H حيث يكون تبخر الماء في هذه المرحلة قد بلغ مستوى متقدماً بالإضافة أيضاً إلى تحلل الجبس (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O) في المدى الحراري بين 110°م و 170°م ويعتبر انطلاق الماء المرتبط كيميائياً هو العامل الرئيس وراء الكتلة الكبيرة المفقودة من المادة ضمن هذه المرحلة الحرارية [25-26-27]

- المجال الثالث من 400°م إلى 800°م

تتقارب القيم بين كل التركيبات الخرسانية وتكون محصورة في المجال 6 و 7% لتسجل GL/SL/PL و GL/PL القيم الأعلى عند الدرجة 800°م و SL/PL القيمة الأقل عند الدرجة 600°م أما GN فقدت نسبة 6% من كتلتها والملاحظ هو زيادة فقدان الكتلة بشكل ملحوظ لجميع التركيبات عند الدرجة 800°م مقارنة بالمرحلتين السابقتين ويرتبط هذا الفقدان بعملية تفكك بنية C-S-H وإزالة الهيدروكسيل (-OH) من مركب البورتلانديت [25 - 26] من جهة وتحلل كربونات الكالسيوم من جهة أخرى.

### 2.2.III. تقييم التغير في الحجم

يعد التغير في الحجم أحد المؤشرات المهمة لتقييم سلوك الخرسانة تحت تأثير درجات الحرارة المرتفعة حيث يعكس التغيرات الفيزيائية والبنوية التي تطرأ على المادة نتيجة تفكك المكونات الداخلية وفقدان الرطوبة وانكماش العجينة الإسمنتية حيث نهدف إلى تقييم التغير في الحجم لأربعة تراكيب خرسانية معدلة بنسب مختلفة من الطين الممدد مقارنة بالخرسانة العادية وتقييم مدى تحسن أداء الخرسانة عند تعرضها للحرارة مما يساهم في تطوير خلطات خرسانية أكثر كفاءة واستدامة في ظروف التشغيل القاسية.



الشكل 2.III. منحني تقييم فقدان في الحجم بالنسبة لخرسانة الركام الخفيف والخرسانة العادية

- من خلال الشكل 2.III. نلاحظ أن معظم التركيبات الخرسانية أظهرت سلوكا عاديا نحو التمدد الحراري مع ارتفاع درجة الحرارة ولكن بدرجات متفاوتة حسب التركيبة والبنية المجهرية للخرسانة باستثناء التركيبين GN و GL/PL.

- عند درجة الحرارة 200°م

يظهر تباين طفيف في تغير الحجم حيث لوحظ انكماش صغير في تركيبة GN و GL/PL حيث قدر بـ 0.2% و 0.3% وهو ما قد يكون نتيجة فقدان الرطوبة السطحية أو إعادة توزيع الماء الشعيري داخل

العجينة الإسمنتية بينما سجلت باقي التراكيب تمعدا أقصاه 0.2% عند التركيبة GL/SL.

- في المجال الحراري 200°م-600°م

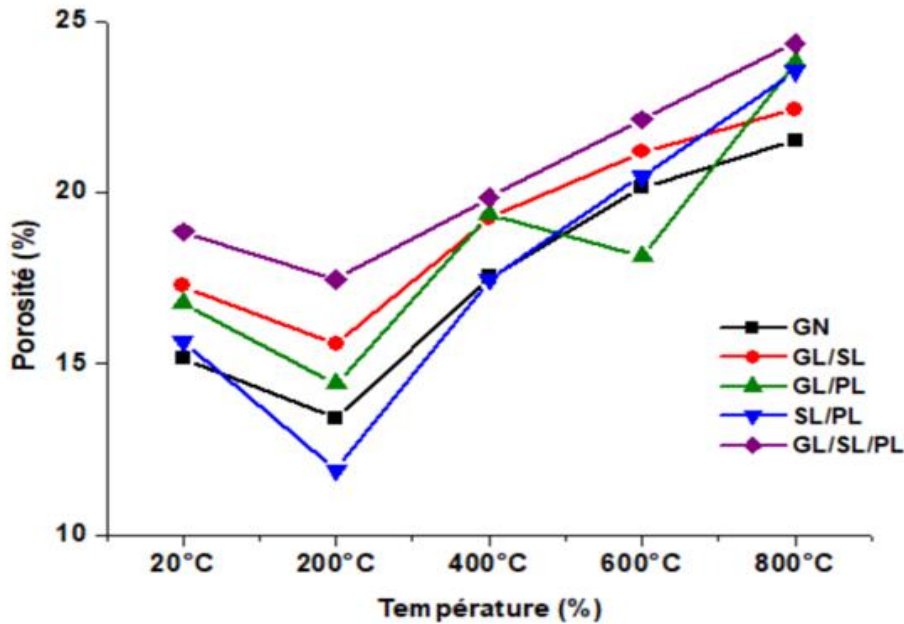
استمرار التزايد في التمدد لكل التراكيب الخرسانية باستثناء التركيبة GL/SL/PL التي سجلت انخفاض طفيف عند الدرجة 400°م قدر بـ 0.10 % كما لوحظ على التركيبة GL/PL تسارعا واضحا في التمدد حيث سجلت أعلى قيمة 1.5 % مما يدل على تأثير مكونات الطين الممدد وبدء تفكك مكونات C-S-H وتحلل المركبات الطينية ومنه ينتج توسعا في البنية المجهرية من جهة أخرى سجلت التركيبة GL/SL استقرار تام على طول هذا المجال الحراري.

- عند درجة الحرارة 800°م

سجلت التركيبة GL/SL ذروة التمدد بنسبة 2 % ما يدل على تفكك شديد في البنية المجهرية وانخفاض في الكثافة البنيوية لي تليها التركيبة GL/PL بنسبة 1.5 % بالمقابل كل من التركيبين SL/PL و GN سجلت انخفاضا معتبرا في التقلص الحجمي وهو سلوك يمكن تفسيره بسبب الانكماش الداخلي

### 3.2.III. المسامية المتاحة للماء

تعد المسامية من الخصائص الفيزيائية المهمة في الخرسانة حيث تؤثر بشكل مباشر على خواصها الميكانيكية والديمومة. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تطور مسامية خمسة تركيبات خرسانية إحداها خرسانة عادية GN وأربع تركيبات معدلة بالطين الممدد GL/SL/PL, GL/PL, GL/SL عند تعرضها لدرجات حرارة مرتفعة.



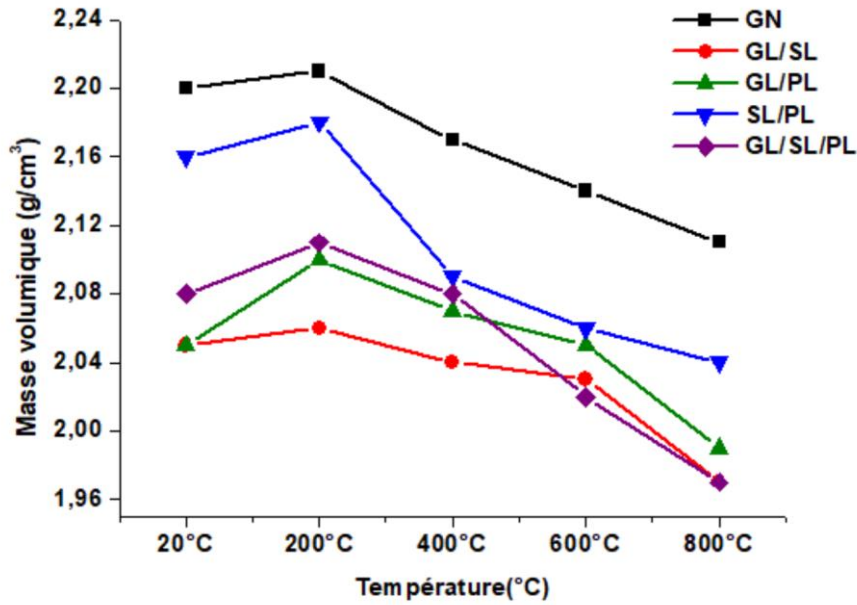
الشكل 3.III. منحني تقييم تطور المسامية لخرسانة الركام الخفيف والخرسانة العادية

- يعرض الشكل 3.III ملخصا لتطور المسامية المتاحة للخرسانة العادية وباقي التركيبات الأربعة المعدلة بنسب من الطين الممدد تبعا لدرجات الحرارة المختلفة حيث نستنتج ما يلي:

- عند درجة الحرارة 200°م
- جميع التركيبات بما في ذلك العادية تأثرت سلبا وسجلت تراجع ملحوظ قد يكون نتيجة انكماش العجينة الاسمنتية في بداية التسخين بسبب فقدان الرطوبة وإلى تقارب صفائح هادرات سلكيات الكالسيوم (CSH) الناتج عن تبخر الماء الممتص على السطح[28]
- سجلت التركيبة SL/PL أعلى نسب التراجع قدر بـ 24 % ما يعني وجود حساسية كبيرة لهذه التركيبة تجاه التسخين المبكر عكس التركيبتين GL/SL/PL و GL/SL التي سجلتا أقل نسب الانخفاض على التوالي 7, 10 % مما يدل على مقاومة أفضل للبنية المسامية عند التسخين الابتدائي.
- الخرسانة العادية GN سجلت انخفاضا في المسامية بنسبة 12 % بسبب احتمال حصول تقلص في الفراغات الشعرية بسبب التبخر الجزئي للماء وبدء الانكماش.
- عند درجة الحرارة 400°م
- تظهر كل التراكيب زيادات واضحة في المسامية مما يعكس تكسير الروابط المائية داخل العجينة الإسمنتية وتكوين مسامات جديدة.
- أظهرت أربعة تركيبات زيادة متوسطة في المسامية تراوحت بين 11, 16 % مما يفسر بداية تحلل الهيدروكسيدات وتوسع المسامات باستثناء التركيبة GL/SL/PL التي سجلت أقل نسبة 5 % حيث أظهرت مقاومة نسبية بسبب تماسك بنيتها التي هي حوصلة مزيج أصناف الطين الممدد (حصى + رمل + مسحوق).
- في المجال الحراري 400°م-800°م
- تواصل جميع التراكيب الارتفاع الكبير في المسامية ما يعكس تدمير كبير في البنية الهيكلية للخرسانة.
- سجلت التركيبتين SL/PL و GN أعلى نسب الارتفاع في المسامية عند 600°م و 800°م تراوحت بين أقصى و أدنى كما يلي 31, 50 %.
- تميزت التركيبة GL/PL بانخفاض عند الدرجة 600°م قدر بـ 8.05 %.
- حققت التركيبة GL/SL/PL أفضل النتائج على طول هذا المجال الحراري ربما يعود ذلك إلى مسحوق الطين الممدد الذي يعتبر كمادة ناعمة تساعد على مملا الفراغات.

### 4.2.III. الكتلة الحجمية

تعد الكتلة الحجمية من الخصائص الفيزيائية الأساسية التي تؤثر بشكل مباشر على أداء الخرسانة وسلوكها تحت الأحمال المختلفة فهي تأثر في مقاومة الخرسانة والعزل الحراري والقدرة على تحمل الظروف البيئية القاسية كما أن التحكم في كثافة الخرسانة يساهم في تحسين كفاءتها الإنشائية. حيث يوضح الشكل 4.III تطور الكتلة الحجمية لجميع التركيبات الخرسانية محل الدراسة تبعاً لتعرضها لسلسلة من المعالجة الحرارية.



الشكل 4.III. تقييم تطور الكثافة لتركيبات خرسانة الركام الخفيف والخرسانة العادية تحت تأثير درجة الحرارة

يتضح من خلال المنحنيات أن تطور الكتلة الحجمية يمر بمجالين مهمين تزايد من 20°م إلى 200°م يليه تناقص من 200°م إلى 800°م حيث يتخذ سلوك معاكس لسلوك المسامية السالف ذكره حيث نلخص ما يلي:

- عند درجة الحرارة 200°م

- يتبين أن جل التركيبات الخرسانية بما في ذلك العادية سجلت ارتفاعاً طفيفاً ملموساً في الكتلة الحجمية.
- تميزت الخرسانة العادية بأعلى كتلة حجمية عند كل من الدرجة 20°م و 200°م حيث قدرت نسبة الزيادة بـ 0.5% ولكنها ليست الأكبر من حيث نسبة التزايد.
- التركيبة GL/PL تسجل أعلى نسب التزايد قدر بـ 2% عند الدرجة 200°م مما قد يعود إلى تحسين التماسك أو تمدد خفيف للمواد المضافة في المراحل المبكرة للحرارة.

- احتلت كل من الخرسانة العادية والتركيبية GL/SL المراتب الأخيرة من حيث نسبة التزايد الذي قدر بـ 0.5%.

- في المجال الحراري 200م-800م

- كل التراكيب المعدلة سجلت ارتفاع كبير في نسبة فقدان الكتلة الحجمية عند الدرجة 800م حيث قدرت بـ 6% عند التركيبية SL/PL مما يدل على تأثير هذه التركيبات بشدة عند درجات الحرارة العالية ربما نتيجة ضعف التجانس أو تحلل المكونات العضوية للطين الممدد.

- تظهر كل من التراكيب GL/SL/PL و GL/SL و GN استقرارا نسبيا عند الدرجة 400م.

- يبدأ الانخفاض الأكبر انطلاقا من الدرجة 600م ويبلغ أقصاه عند الدرجة 800م عند كل التراكيب وهو ما يعكس بداية تحلل المواد الرابطة وفقدان الماء الكيماوي.

- تنفرد التركيبية GL/PL بأقل نسب الانخفاض عند الدرجة 800م حيث قدر بـ 3%.

### 3.III. تأثير درجات الحرارة العالية على مقاومة الضغط

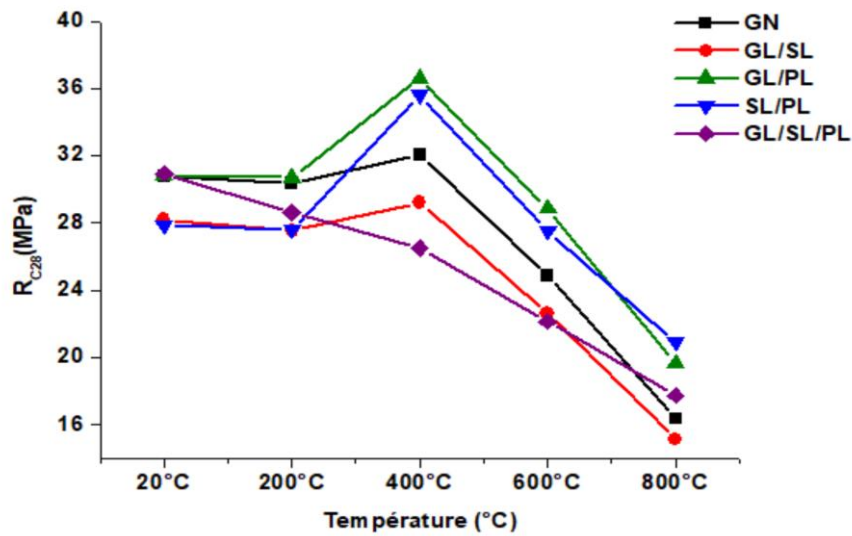
#### 1.3.III. تقييم مقاومة الضغط

يوضح الشكل 5.III تطور المقاومة الميكانيكية لجميع التركيبات الخرسانية تحت تأثير سلسلة من الدورات الحرارية حيث:

- عند درجة الحرارة المرجعية 20م

- تسجل جميع التركيبات قيم متقاربة من المقاومة الميكانيكية لضغط.

- التركيبية GL/SL/PL تحقق أعلى مقاومة أولية تليها التركيبية GL/PL ثم التركيبية GN في حين أن GL/SL-SL/PL أقل نسبيا.



الشكل 5.III. تقييم المقاومة الميكانيكية خرسانة الركام الخفيف والخرسانة العادية تحت تأثير درجة الحرارة

- عند درجة الحرارة 200°م

- من خلال المنحنيات يلاحظ حدوث انخفاض طفيف في المقاومة عند 200°م حيث تنخفض قيم المقاومة المسجلة لكل التركيبات الخرسانية بما في ذلك العادية مقارنة بقيم المقاومة عند الدرجة 20°م أقصاه في التركيبة GL/SL/PL بنسبة 7 % تليها GL/SL بنسبة 2% لتسجل GL/PL ادنى نسب نقصان في المقاومة 1 % و يعود هذا الانخفاض إلى التمدد الحراري للماء الذي يؤدي إلى إضعاف الروابط بين صفائح CSH وتباعدها.

- عند درجة الحرارة 400°م

- في هذا المجال الحراري الممتد من 200°م إلى 400°م يظهر سلوك متباين يتمثل في ارتفاع معتبر للمقاومة لكل من التركيبات الأربعة GL/SL,SL/PL,GN حيث سجلت ارتفاع على الترتيب قدر بـ 14, 19, 28 و 4% بينما التركيبة GL/SL/PL سجلت انخفاض معتبر في المقاومة بنسبة 14 % حيث يعتقد أن الزيادة في المقاومة عند الدرجة 400°م حسب بعض الدراسات أنها ناتجة عن مغادرة الماء من البنية الدقيقة للخرسانة مما يساهم في تعزيز قوى التماسك من خلال تقارب صفائح CSH [29-26]

- في المجال الحراري 400°م-800°م

- بعد تجاوز الدرجة 400°م تبدأ المقاومة في التراجع لجميع التراكيب الخرسانية حيث تسجل قيم انخفاض جد معتبرة.

- عند بلوغ الدرجة 600°م يصبح الانخفاض في المقاومة واضحا في جميع الخلطات حيث سجلت GL/SL/PL أعلى نسبة النقصان قدرت بـ 28 % تليها كل من GL/SL و GN بتدهور يفوق 19 % بينما قدمت التركيبة SL/PL أقل نسبة النقصان وفضلها 1 % هذا ما يثبت ان بعض التركيبات المعدلة بإضافة الركام الخفيف تفقد قدر معتبرا أقل من الخرسانة العادية في المقاومة وهو سلوك متكرر ومثبت في الدراسات العلمية السابقة.

- بالتزامن مع الوصول لدرجة 800°م تظهر جميع الخلطات نقصان جد كبير حيث تفقد قدرا كبيرا جدا من المقاومة لتصل الى قيم تقل عن 21 ميغا باسكال حيث تفقد كل من GN و GL/SL و GL/SL/PL اعلى النسب من مقاومتها على الترتيب التالي 47, 46 و 43% بينما تسجل التركيبة SL/PL افضل أقل نسب التدهور قدر بـ 25 % ومنه يظهر ان التركيبات المعدلة بإضافة الركام الخفيف تفقد قدر أقل من المقاومة مقارنة بالخرسانة العادية ويرجع هذا الانخفاض الحاد إلى الأضرار والتدهور على مستوى البنية الهيكلية للخرسانة جراء فقدان كل أصناف الماء وتكون التشققات وعدم التجانس في التشوهات بين العجينة الإسمنتية والركام [28].

- مقارنة التركيبات الخرسانية بالخرسانة العادية

يظهر الجدول 1.III. ملخصاً لمقارنة التركيبات الخرسانية بالخرسانة العادية.

الجدول 1.III. مقارنة التركيب الخرسانية بالخرسانة العادية

مقارنة كل تركيبة معدلة مقابل الخرسانة العادية GN				الحرارة
GL/SL/PL	SL/PL	GL/PL	GL/SL	
تدهور أعلى	أداء مشابه تقريباً	أفضل مع تحسن طفيف	تدهور أكبر	200°
تدهور أكبر واضح	أفضل بكثير	أفضل	تدهور أقل	400°
أسوأ	أفضل	أفضل	تدهور مماثل	600°
أفضل قليلاً	أفضل بكثير	أفضل	تدهور مقارب جداً	800°

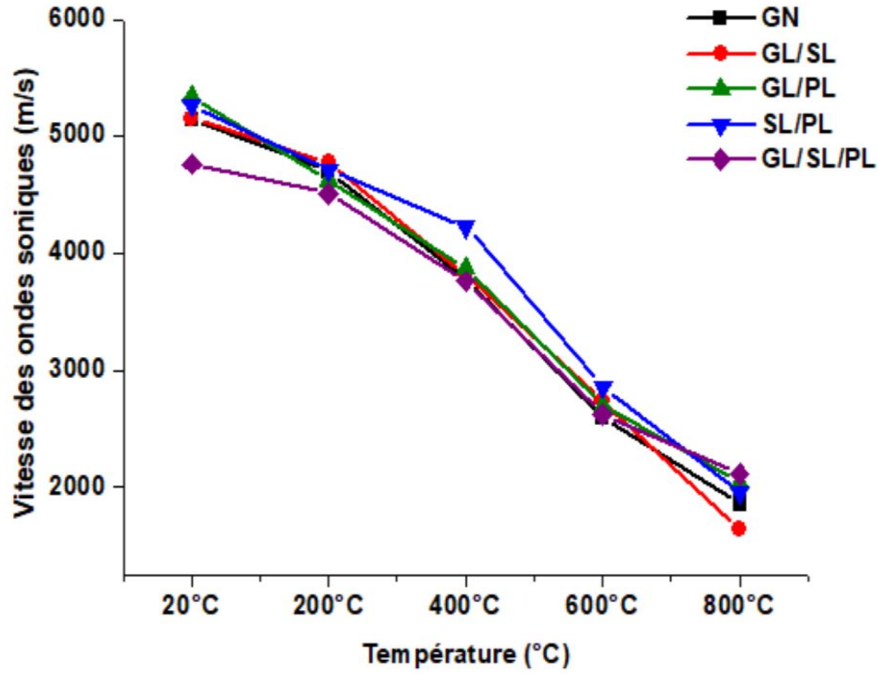
2.3.III. سرعة الموجات الصوتية

تعد تقنية قياس سرعة انتشار الموجات الصوتية أحد أنجع اختبارات التقييم الغير تحطيمي للعينات الخرسانية لما توفره من معلومات دقيقة على مدى جودة الخرسانة دون اللجوء الى تحطيم العينة ووفقاً لتصنيف [29] فإن جودة الخرسانة يمكن تحديدها من خلال قياس سرعة الموجات الصوتية كما هو مبين في الجدول 2.III.

الجدول 2.III. تصنيف جودة الخرسانة اعتماداً على سرعة الموجات الصوتية [29].

جودة الخرسانة	سرعة الموجات الصوتية م/ثا
ممتازة	≥4500
جيدة	3500 – 4500
متوسطة	3000 – 3500
ضعيفة	2000 – 3000
ضعيفة جداً	< 2000





الشكل 6.III. تقييم تأثير درجات الحرارة العالية على جودة الخرسانة بالاعتماد على سرعة الموجات الصوتية

- انطلاقاً من قيم سرعة الموجات الصوتية المتحصل عليها يتم تحديد جودة كل تركيبة خرسانية كما هو مبين في الجدول 3.III.

الجدول 3.III. تقييم جودة التراكيب الخرسانية اعتماداً على سرعة الموجات الصوتية.






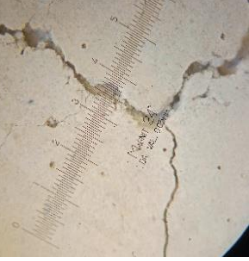


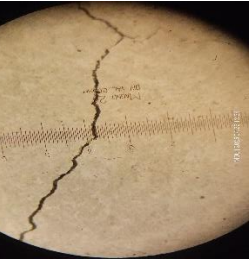


GN	GL/SL/PL	SL/PL	GL/PL	GL/SL	الحرارة م°
الجودة	الجودة	الجودة	الجودة	الجودة	
ممتازة	ممتازة	ممتازة	ممتازة	ممتازة	20
ممتازة	ممتازة	ممتازة	ممتازة	ممتازة	200
جيدة	جيدة	جيدة	جيدة	جيدة	400
ضعيفة	ضعيفة	ضعيفة	ضعيفة	ضعيفة	600
ضعيفة جداً	ضعيفة	ضعيفة جداً	ضعيفة	ضعيفة جداً	800

- من خلال الجدولين 3.III / 4.III والشكل 6.III. نلاحظ
- جميع التراكيب الخرسانية المعدلة والعادية تتخذ نفس السلوك انطلاقاً من جودة ممتازة الى ضعيفة او ضعيفة جداً بالموازاة مع ارتفاع درجة الحرارة من 20°م الى 800°م.
  - جميع التراكيب الخرسانية المعدلة والعادية تحافظ على نفس الجودة (ممتازة - ممتازة - جيدة - ضعيفة) حسب المنحى التصاعدي لدرجة الحرارة الى غاية الدرجة 600°م.
  - في المجال الحراري محل دراستنا سجلت التركيبة GL/PL أفضل جودة بممتازة عند الدرجة 20°م كما سجلت التركيبة (GL/SL) أسوأ جودة بضعيفة جداً عند الدرجة 800°م.
  - سجلت كل من التركيبين GL/SL/PL و GL/PL أداء أفضل عند الدرجة 800°م بجودة ضعيفة على عكس باقي التراكيب التي سجلت جودة ضعيفة جداً.
  - عند الدرجة 200°م لوحظ على جميع التراكيب تفاوت طفيف في فقدان الجودة يراوح بين 5 , 13%
  - سجلت جميع التركيبات تفاوت طفيف فيما بينهم عند كل دورة من دورات التسخين كانت على الترتيب التالي 20 , 27 % عند 400°م , 45-49 % عند 600°م , 56-68 % عند 800°م.


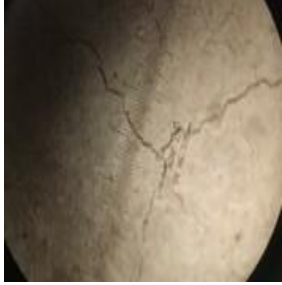







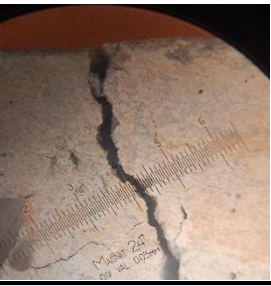






### 3.3.III. تقييم تدهور وتشقق العينات

- تعد التشققات الناتجة عن تعرض الخرسانة لدرجات الحرارة المرتفعة من المؤشرات الأساسية لتدهور البنية الداخلية وفقدان التماسك البنيوي ويعتمد تقييمها ضمن اختبارات الأداء الحراري للخرسانة يشمل التقييم تحديد كمية الشقوق في المساحة السطحية للعيينة واتساعها باستخدام أدوات مثل المجهر اليدوي حيث يسمح هذا الفحص برصد الشقوق الدقيقة التي لا ترى بالعين المجردة وقياس اتساعها تقريبا باستخدام مسطرة المجهر المدرجة يتم تصنيف الشقوق بناء عن عرضها ما يتيح تتبع التغيرات في البنية السطحية للعيينة بدقة تساعد هذه الطريقة في التمييز بين الشقوق كما توفر معلومات مبكرة لمستوى التدهور وتعتبر هذه التقنية رغم بساطتها جزءاً مهماً وتستخدم غالباً لتحليل السلوك البنيوي للخرسانة بعد التعرض للإجهادات الحرارية حيث نركز في دراستنا على تقييم تدهور العينات اساساً على دراسة و تحليل التشققات عبر الخطوات التالية:
- اختيار العينات الأكثر تضرراً.
  - اختيار المجالات الحرارية الأكثر قسوة 400°م, 600°م و 800°م
  - تحديد كمية الشقوق في المساحة السطحية للعيينة.
  - عرض فتحة الشق.
  - مقارنة نتائج عرض الشقوق للتراكيب بالخرسانة العادية في نفس المجال الحراري.





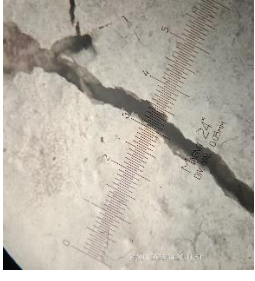



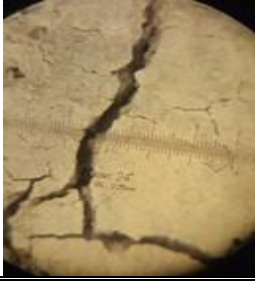



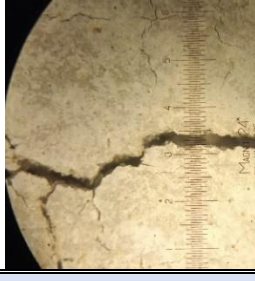







الجدول 5.III. تدهور وتشقق العينات تحت تأثير درجة الحرارة 400°

عند الدرجة 400°م			
عرض فتحة الشق	موقع الشقوق في مساحة	كثافة التشققات في المساحة	العينة
<b>التركيبية -1- ( GL/SL )</b>			
			
<b>التركيبية -2- ( GL/PL )</b>			
			
<b>التركيبية -3- ( SL/PL )</b>			
			
<b>التركيبية -4- ( GL/SL/PL )</b>			
			
<b>التركيبية -5- ( GN )</b>			
			

الجدول 6.III. تدهور وتشقق العينات تحت تأثير درجة الحرارة 600°

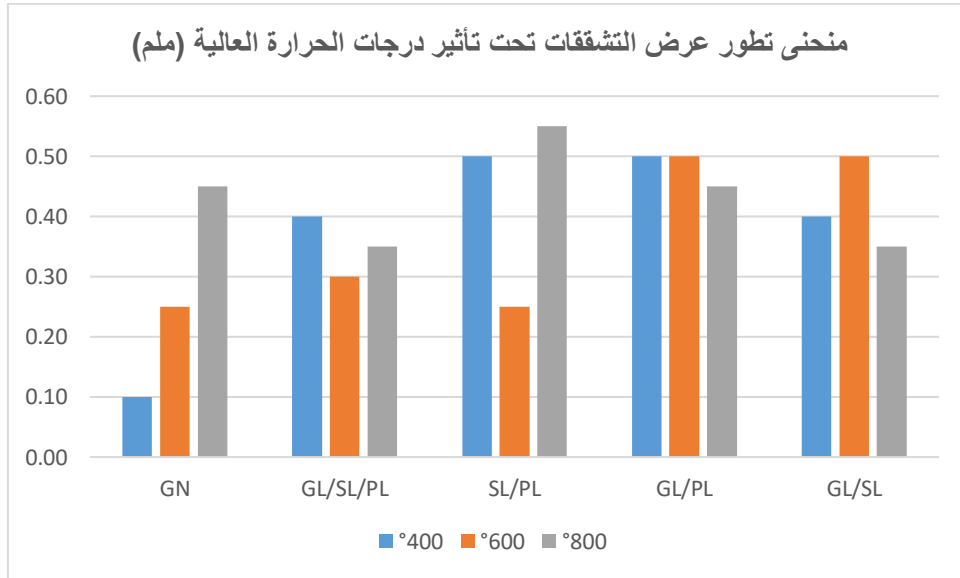
عند الدرجة 600°م			
عرض فتحة الشق	موقع الشقوق في مساحة	كثافة التشققات في المساحة	العينة
التركيبية -1- ( GL/SL)			
			
التركيبية -2- ( GL/PL)			
			
التركيبية -3- ( SL/PL)			
			
التركيبية -4- ( GL/SL/PL)			
			
التركيبية -5- ( GN)			
			

الجدول 7.III. تدهور وتشقق العينات تحت تأثير درجة الحرارة 800°

عند الدرجة 800°م			
عرض فتحة الشق	موقع الشقوق في مساحة	كثافة التشققات في المساحة	العينة
<b>التركيبية -1- (GL/SL)</b>			
			
<b>التركيبية -2- (GL/PL)</b>			
			
<b>التركيبية -3- (SL/PL)</b>			
			
<b>التركيبية -4- (GL/SL/PL)</b>			
			
<b>التركيبية -5- (GN)</b>			
			

الجدول 8.III. نتائج عرض التشققات لجميع التراكيب حسب كل درجة حرارة.

التركيبية الخرسانية					الحرارة
GN	GL/SL/PL	SL/PL	GL/PL	GL/SL	
0,10	0,40	0,50	0,40	0,40	400°م
0,25	0,30	0,25	0,50	0,50	600°م
0,45	0,35	0,60	0,50	0,35	800°م



الشكل 7.III. منحنى تطور عرض التشققات تحت تأثير درجات الحرارة العالية (ملم)

من خلال الشكل الشكل 7.III. يتضح ما يلي:

- التركيبية العادية شهدت زيادة تدريجية في عرض التشققات مع ارتفاع درجة الحرارة حيث أظهرت تأثيرًا واضحًا بالحرارة دون أي تحسن في مقاومتها للتشققات مما يجعلها الأسوأ أداءً عند درجات الحرارة العالية.

- التركيبية GL/SL/PL أظهرت أداءً متوسطاً حيث نستنتج أن استخدام الطين الممدد بجميع أشكاله يحسن من مقاومة التشقق مقارنة بالخرسانة العادية خاصة عند 800°م حيث تقلص عرض التشققات مقارنة بالخرسانة العادية هذا يشير إلى أن المزيج المركب يحسن من الأداء الحراري.

- التركيبة SL/PL سجلت أداء متفاوت على الرغم من الانخفاض الملحوظ في التشققات عند 600° إلا أن الارتفاع الحاد عند 800° يظهر تدهور بنية المادة بفعل الحرارة قد يعود ذلك الى المسحوق الذي قد يؤدي إلى ضعف التماسك الداخلي.

- التركيبة GL/PL تظهر أداء مستقر ومقاومة جيدة نسبيا لارتفاع الحرارة مع ثابت يدل على استقرار البنية الذي يبرر أن إضافة الركام الخفيف يحسن من توزيع الإجهادات الحرارية ويقلل التشققات.

- التركيبة GL/SL تبدي أداء متوازن رغم الزيادة عند 600°. إلا أن التحسن الملحوظ عند 800° يدل على قدرة التركيبة على التكيف مع الإجهادات الحرارية العالية مما يعكس دور الرمل في ملء الفراغات وتحسين التماسك.

### 4.III. الخاتمة

تعد الدراسة التحليلية العلمية الصحيحة لنتائج الاختبارات التجريبية الفاصل الأساسي لتحديد المدى الأفضل للأداء والكفاءة للعناصر الخرسانية في مجال الهندسة المدنية. لما له من تأثير مباشر على المتانة على المدى الطويل. حيث تطرقنا في هذا الفصل الى عرض وتحليل النتائج المحصل عليها من خلال التجارب المخبرية من اجل فهم السلوك الفيزيائي والميكانيكي للخرسانة محل الدراسة والمعدلة بنسب من الطين الممدد سواء كان ركام او رمل او مسحوق مما يتيح تحسين التصميمات الخرسانية مستقبلا. حيث استخلصنا أن الخرسانة المعدلة بالطين الممدد تظهر سلوكًا مستقرًا نسبيًا عند التعرض للحرارة العالية وهذا بفضل الركام الخفيف عالي المسامية. كما لا يمكن تحديد تركيبة تتفوق في جميع الخصائص المختبرة بل هناك تفوق فردي لكل تركيبة في خاصية معينة الا اننا نستطيع التميز أن التركيبة SL/PL كانت الأكثر فاعلية في الأداء نسبيًا على جميع الخصائص.



خاتمة عامة

## خاتمة عامة

من خلال الدراسة المعمقة بدايتنا بالدراسة المرجعية ومرورا بخصائص المواد المستعملة حتى الوصول الى تحليل النتائج لتحديد مدى فاعلية الركام الخفيف من الطين الممدد في تحسين الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للخرسانة العادية حيث تبين لنا ما يلي:

### - على مستوى تأثير درجات الحرارة العالية على الخواص الفيزيائية

- **فقدان الكتلة** خرسانة الركام الطبيعي تظهر في معظم الحالات فقداناً في الكتلة أقل مقارنة بالخرسانة المعدلة بالركام الصناعي (الطين الممدد) وهذا يفسر إلى أن الخرسانة ذات الركام الطبيعي تحتوي على كمية ماء أقل من تلك التي تحتوي على الركام الصناعي (الطين الممدد) وذلك نتيجة تشبع الركام بالماء.

- **تقييم التغير في الحجم** الخرسانة المعدلة بالطين الممدد تظهر سلوكاً حرارياً مستقرًا نسبيًا حيث تؤدي البنية المسامية للركام إلى تحسين تقليل التمدد الحجمي مقارنة بالخرسانة التقليدية مما يجعلها أقل حساسية للإجهادات الحرارية.

- **الكتلة الحجمية** الخرسانة المعدلة بالطين الممدد يمكن أن تحتفظ بقدر كبير من كتلتها الحجمية عند درجات حرارة معتدلة الى غاية 400°م لكنها تصبح أكثر ضعفا عند درجات الحرارة المرتفعة التي تفوق 600°م.

### - على مستوى تأثير درجات الحرارة العالية على الخواص الميكانيكية

- **مقاومة الضغط** استبدال الركام التقليدي بركام خفيف مثل الطين الممدد يمكن أن يحسن من مقاومة الضغط الخرسانة للحرارة في بعض التركيبات خاصة في GL/PL

- **سرعة الموجات الصوتية** جل التركيبات الخرسانية ضلت ذات جودة جيدة لغاية الدرجة 400°م على عكس ما ميز المجال الثاني الممتد من 400°م الى 800°م الذي شهدت فيه كل التراكيب انخفاضا رهيب لسرعة الموجات الصوتية حيث كان أقل من 2860 م/ثا.

- **التشققات** تبدأ الشقوق في الظهور تدريجياً ثم تزداد فتحة الشقوق بشكل كبير وملحوظ مع زيادة درجات الحرارة مما يفسر حدوث تفتت وانهيار وفقدان في المادة قد يؤثر على الكتلة الإجمالية للعينة.

- وعليه نستخلص أن الخرسانة المعدلة بالطين الممدد تظهر سلوكاً مستقرًا نسبيًا عند التعرض للحرارة العالية وهذا بفضل الركام الخفيف عالي المسامية. كما لا يمكن تحديد تركيبة تتفوق في جميع الخصائص المختبرة بل هناك تفوق فردي لكل تركيبة في خاصية معينة الا اننا نستطيع التمييز أن التركيبة SL/PL كانت الأكثر فاعلية في الأداء نسبيًا على جميع الخصائص.

## قائمة المراجع

- [1] Gilles Chanvillard. Concepts avancés de formulation des bétons basés sur la science des matériaux, Article de doctorat.
- [2] John Wiley and Sons, Taylor F, Thompson S, 1912. A treatise on concrete plain and reinforced, New York.
- [3] Feret R. la compacité des mortiers hydrauliques, Annales des Ponts et Chaussées, Série 7, vol. 4, 1893, pp. 5-164.
- [4] Sidi Mohammed El Amine BOUKLI HACENE. la contribution à l'étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de Tlemcen. Thèse de doctorat.
- [5] Granulats- Définitions, conformité, spécifications, indice de classement P 18-540.
- [6] Normalisation française NF EN 1008, Eau de gâchage – Spécification pour l'échantillonnage, l'essai et l'évaluation de l'aptitude de l'eau, y compris l'eau recyclée, à être utilisée dans le béton, Association Française de Normalisation (AFNOR), tour Europe cedex 7 92049, Paris, 2003.
- [7] HERRMANN, A.S. NICKEL, J. and RIEDEL, U. Construction materials based upon biologically renewable resources – from components to finished parts. Polymer Degradation and Stability, 1998, vol.59, pp.251-261.
- [8] KHEDARI, J. CHAROENVAI, S. and HIRUNLABH, J. New insulating particleboards from durian peel and coconut coir. Building and Environment, 2003, vol.38, pp.435-441.
- [9] PIMENTIA, P. CHANDELLIER, J. RUBAUD, M. DUTRUEL, F. et NICOLE, H. Etude de la faisabilité des procédés de construction à base de bétons de bois. Cahiers du CSTB, janvier – février, 1994, n° 346.
- [10] Shink, M. (2003). Compatibilité élastique, comportement mécanique et optimisation des bétons de granulats légers.
- [11] Cérézo, V. (2005). Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique. Institut National des Sciences Appliquées, Lyon.
- [12] Nguyen, L. H. (2013). Béton de structure à propriétés d'isolation thermique améliorées : approche expérimentale et modélisation numérique. Cergy-Pontoise. pp.
- [13] Shink, M. (2003). Compatibilité élastique, comportement mécanique et optimisation des bétons de granulats légers.
- [14] GAGNE, R. Durabilité et réparation du béton, (chapitre 2). Cours Maîtrise de Génie civil, Sherbrooke : Université de Sherbrooke, Canada, 2004, 34 p.
- [15] [https://uomus.edu.iq/NewDep.aspx?depid=5&newid=65256&utm\\_source=chatgpt.com](https://uomus.edu.iq/NewDep.aspx?depid=5&newid=65256&utm_source=chatgpt.com)

- [16] Mémoire de Master Thème : Les bétons à granulats légers l'Université 08 Mai 1945 de Guelma Présenté par : SENE Licka Khadidiatou DIEYE Khadijatou.
- [17] Mémoire de Génie Civil Ain-Temouchent : Etude de l'influence des granulats pouzzolaniques sur les caractéristiques mécaniques des bétons légers, 2017-2018, réalisé par BENZINA Ahlem et HACHEM Nafissa.
- [18] VERONIQUE. C, Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique, thèse doctorale, université lyon, 2005.
- [19] Muyasser M. J. 1, Aljubory Emad K. A.2 1 effect of lightweight coarse aggregate from claystone and thermostne on physical and mechanical properties of concrete.
- [20] Lydon ; Résistance à la compression du béton avec granulats légers en fonction du dosage en ciment ;1982.
- [21] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884601006081>.
- [22] Bentur. A; Prevention of autogenous shrink-age in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates; Cement and Concrete Research, 31:1587-1591; 2001.
- [23] L. H. Nguyen, A. L. Beaucour, S. Ortola, A. Noumowé Université de Cergy-Pontoise, L2MGC, EA 4114, F - 95000 Cergy-Pontoise [le-hung.nguyen@u-cergy.fr](mailto:le-hung.nguyen@u-cergy.fr).
- [24] [Whitehurst, 1966] Whitehurst E.A., Evaluation of concrete properties from sonic Tests, ACI Monograph No. 2, ACT, Detroit (Michigan, USA), 1966.
- [25] [Noumowe et al., 1996] Noumowe A.N, Clastres P., Debicki G., Costaz J.L., Thermal stresses and water vapor pressure of high performance concrete at high température, Proceedings, 4th International symposium on utilization of High-strength/High- Performance Concrete, Paris France, 1996.
- [26] [Hager, 2004] Hager, I., Comportement à haute température des bétons à haute performance évolution des principales propriétés mécaniques, Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et Ecole Polytechnique de Croatie, 2004.
- [27] [Xing 2011] Z. Xing. "Influence de la nature minéralogique des granulats sur leur comportement et celui du béton à haute température", Thèse de Doctorat, Génie Civil, Université de Cergy-Pontoise, 2011.
- [28] [Hachemi, 2015] Hachemi S., Etude du Comportement du béton soumis à haute température : Influence du type de béton et de la nature des constituants, Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider ,2015.
- [29] [Whitehorse, 1966] Whitehurst E.A., Evaluation of concrete properties from sonic Tests, ACI Monograph No. 2, ACT, Detroit (Michigan, USA), 1966.

[30] **Normalisation française XP P18-540**, Béton – Constitution, spécifications, production et conformité, Association Française de Normalisation (AFNOR), tour Europe cedex 7 92049, Paris, 2011.

[31] **Normalisation française NF EN 197-1**, Ciment – Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants, Association Française de Normalisation (AFNOR), tour Europe cedex 7 92049, Paris, 2012. Le présent document définit et présente les spécifications de 27 ciments courants différents, de 7

[32] **Normalisation française NF EN 13055-1**, Granulats légers – Partie 1 : Granulats légers pour béton, mortier et coulis, Association Française de Normalisation (AFNOR), tour Europe cedex 7 92049, Paris, 2016.

[33] **Normalisation française P 18-560**, Analyse granulométrique par tamisage, Association Française de Normalisation (AFNOR), tour Europe cedex 7 92049, Paris, 1990.

[34] **Normalisation française P18-404**, essais d'étude de convenance et de contrôle confection et conservation des éprouvettes, Association Française de Normalisation (AFNOR), Paris, 1981.

[35] **Norme Européenne Norme Française NF EN 12390-3**, Essai pour béton durci Partie 3 : Résistance à la compression sur éprouvettes, ISSN 0335-3931, l'Association Française de Normalisation (AFNOR), avenue Francis de Pressensé - 93571 Saint-Denis La Plaine Cedex, 2003.

[36] **Normalisation française P 18-418**, Béton, Auscultation sonique – mesure du temps de propagation d'ondes soniques dans le béton, Association Française de Normalisation (AFNOR), tour Europe cedex 7 92049, Paris, 1989.

[37] **Normalisation française P 18-554**, Granulats – mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et des cailloux, Association Française de Normalisation (AFNOR), tour Europe cedex 7 92049, Paris, 1990

[38] **Normalisation française NF P18-404**, *Essais d'étude de convenance et de contrôle – Confection et conservation des éprouvettes*, Association Française de Normalisation (AFNOR), Paris, 1981.

[39] **Norme Française NF P18-598** *Granulats – Détermination de l'équivalent de sable*, Association Française de Normalisation (AFNOR), avenue Francis de Pressensé - 93571 Saint-Denis La Plaine Cedex, [année]. (*Remplacée par NF EN 933-8 en août 1999*).

[40] **Norme Française NF P18-573** Granulats – Essai de Los Angeles, Association Française de Normalisation (AFNOR), avenue Francis de Pressensé - 93571 Saint-Denis La Plaine Cedex, décembre 1990. (Norme annulée, remplacée par NF EN 1097-2)