

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique
Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement
Technologique-Skikda



Département de Technologie
Filière : Génie civil

Mémoire
Présenté en vue de l'obtention du diplôme de professeur de l'enseignement
secondaire technique.

Thème :

Elaboration et caractérisation d'un mortier avec un additif naturel

Présenté par : - Achiche Ikram
- Laib Ines
- Aggoune Takwa

Jury de Soutenance :

Nom et prénom	Grade	Université	Role
Biskri Yasmina	MCA	Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique-Skikda	Présidente
Belbali Assia	MCB	Université de 20 Aout skikda	Encadrante
Moudjari Maroua	MCB	Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique-Skikda	Co- Encadrante
Mirouzi Ghania	MCA	Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique-Skikda	Examinatrice

Année Universitaire : 2024/2025

Remerciements

Je remercie tout d'abord Allah, le Tout-Puissant, de m'avoir permis de mener à bien ce mémoire.

J'adresse ma sincère gratitude à mon encadrante, Mademoiselle Assia Belbali, pour son accompagnement, ses conseils et son soutien précieux tout au long de ce travail.

Mes remerciements vont également à tous les enseignants du Département de Technologie, en particulier ceux de la filière Génie Civil, pour la qualité de leur enseignement.

Je remercie chaleureusement Marouk Sarra et Maroua Modjari pour leur aide précieuse durant la réalisation de ce mémoire.

J'exprime aussi mes salutations respectueuses à Monsieur Rahmouni Salah, Chef du Département de Technologie, pour son engagement envers les étudiants.

Enfin, merci à ma famille, ainsi qu'à tous mes camarades et amis, pour leur soutien et leurs encouragements.

إهداء

(وَكَانَ فَضْلُ اللَّهِ عَلَيْكَ عَظِيمًا)

الحمد لله مكون الأكوان واحد أحد ليس له إثنان

الحمد لله حبا وشكرا وامتنانا الحمد لله على لذة الانجاز والحمد لله عند البدء وعند الختام

أقف اليوم أمامكم وقلبي يملؤه مزيج من المشاعر المتناقضة فرحة الإنجاز وحنن الفراق

بكل حب أهدي ثمرة نجاحي إلى منبع طموحي أبي وملهمتي أمي حفظهما الله الذين دعماني ووقفوا بجاني أوفى مستشارين وألطف ناصحين ولولا صبرهما على تمردي لما حققت هذا النجاح

إلى من كانت حضنا إضافيا من طمأنينة لا تنسى أمي الثانية فطومة

إلى من وهبني الله نعمة وجودهم في حياتي إلى العقد المتين إلى من قال الله فيهم (سَنَسُدُّ عَصُدَكَ بِأَخِيكَ) إخواني أخواتي

وكل عائلة عقون

إلى من كاتفتني لنسير على درب العلم طيلة الخمس سنوات إلى حبيبة القلب التي أتذكرها كلما قرأت قوله عزوجل " هارون أخي أشدد به أزري " إلى خلي وخليلي وهاروني وملجأني بعد الله إكرام الغالية

إلى رقيقة الحلم والعمل العايب إيناس

إلى الأستاذة موجاري مروة الأخت الطيبة التي منحتنا من وقتها وعلمها وصبرها دون كلل أو تردد جزاك الله عنا خير الجزاء بارك الله في علمك وعملك وجهودك الطيبة

وفي الأخير أودع سنوات أنجبت لي حياة جديدة ها أنا اليوم أرفع قبعتي تقديرا لنفسي شكرا لربي ختاماً أقول لكم إعلمو وتعلمو فالعلم يبني الهرم وخلاصة القول

وقل ربي زدني علما

تقوى عقون

إهداء

بسم الله الرحمن الرحيم قال تعالى : { يَرْفَعُ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنْكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ }
الحمد لله

الحمد لله حبا وشكرا وامتنانا على البدء و الختام ، ها قد انطوت صفحة من صفحات الحياة كان فيها الجد و الإجتهد زرعنا فيها الدراسة والتعب لنحصد التفوق والنجاح .

إلى أبي

سندي وقودتي من تعلمت منه أن الصبر طريق الوصول، شكرا لأنك كنت دائما تؤمن بي وتشجعني

حين يتعب قلبي

إلى أُمي الغالية

إلى ملاكي في الحياة إلى معنى الحب والحنان إلى بسمة الحياة وسر الوجود إلى من كان دعاؤها سر نجاحي وحنانها بلسم جراحي، إلى من أرشدتني ورافقتني ، شكراً لأنك كنت دوماً النور الذي هدايتي
وسط العتمة.

إلى ضلعي الثابت وأمني وأماني

إلى أختي الحبيبتين، رانيا ، شهرزاد الداعميتين لي... أنتما النبض الذي يرافقتني في كل خطوة، أنتم ضوء أيامي .

إلى من قيل فيه {سَنَسُدُّ عَضُدَكَ بِأَخِيكَ }

إلى أخي ورفيقي في الحياة، زكرياء ، لك مكانة خاصة في قلبي، ولك شكر لا ينتهي على كل ما كنت عليه لي من دعم ووجود حقيقي.

إلى صديقتي الأقرب

وفاء و رانيا ، كنتما دوماً أكثر من مجرد صديقتين... كنتما أختين، وملجأ في كل الأوقات. في لحظات التعب كنتما السند، وفي لحظات الفرح كنتما أول من يبتسم لنجاحي.
شكراً لقلبيكما الكبيرين، ولرفقتكما التي كانت طوق نجاة في كثير من المحطات.

إلى رفيقات المشوار

لم تكونا فقط رفيقات ، بل كنتما العون والسند، شكراً من القلب لوفائكما، دعائي لكما أن يرافقتكما النجاح في كل خطواتكم

هذا التخرج ليس لي وحدي، بل هو لكم جميعاً. أنتم من كنتم الحافز، والدافع، والدعاء الصادق.
شكراً من القلب .

إيناس العايب

إهداء

الحمد لله الذي أجرى السحاب و سخر الأسباب و هزم الأحزاب و الصلاة و السلام
على نبينا و شفيعنا وسيدنا محمد و على آله و صحبه أجمعين
الحمد لله على الذي بلغنا ثمرة السعي و تمام الرحلة و وفقنا لهذا و لولا فضل الله
علينا ما كنا من الموفقين

أهدي عملي هذا إلى حبيبي الغالي الذي لطالما حملت إسمه بكل فخر و اعتزاز إلى
الذي صنع لي بتعبه و عرق جبينه سلما ارتقيت به إلى هذا النجاح إلى أبي الغالي
إلي التي حملتني وهنا على وهن ثم حملتني على أكف الإهتمام و الدعاء إلى التي
احتوتني وقت الحاجة و دثرتني وقت الضعف إلى جنتي و روح الروح أُمي
إلى رفيق الدرب و شريك الحياة و توأم الروح إلى سكني الذي انتمي إليه و سكينتي
التي ارتاح فيها و سندي الذي ارتكز عليه دوما و أبدا إلى زوجي جلال الدين
إلى من شُدّ بهن عضدي و اشتدّ بهن أزري إلى أخواتي الغاليات
إلى أخويّ العزيزين

إلى أهل زوجي الطيبين ,نعم الاهل الكرام انتم
إلى عمي الغالي عبد السلام أبي الثاني و بوصلتي حين اضل الطريق
إلى تلك التي جعلت رحلة الخمس سنوات هيّنة لينة إلى من تقاسمت معها الدموع
و الضحكات إلى التي أنست و حشتي و اضاءت ظلمتي الى تقوتي
إلى من تقاسمت معها هذا العمل الصديقة العزيزة إيناس العايب
إلى من نلت شرف الدراسة تحت اشرافها و العمل تحت تأطيرها إلى الطيبة العزيزة
والأخت موجاري مروة بورك في عملك
إلى أم النور حبيبة روعي و أُمي الغالية
إلى بنات حلقة النور الغاليات كل بإسمها و جميل وسمها
و مسك الختام
إلى كل من علمني حرف منذ الابتدائي إلى آخر حصة دراسية و على رأسهم والدي
الغاليينا

إكرام عشيّش

Résumé

Les enjeux économiques liés à la hausse des coûts des ressources fossiles, leur raréfaction, et les impacts environnementaux inhérents à leur fabrication et à leur utilisation, conduisent les acteurs de la construction à s'orienter vers des matériaux naturels. Les ressources issues de la biomasse sont alors au premier plan, celle le kaolin (chamotte). L'incorporation de la chamotte dans le mortier permet de valoriser un déchet industriel tout en réduisant partiellement l'utilisation du sable naturel, ressource de plus en plus rare et surexploitée, mais également à améliorer certaines propriétés du matériau, telles que la stabilité dimensionnelle,

L'idée de notre étude est de valoriser le sable de carrière avec un sable de chamotte, l'objectif principal est de suivre l'effet de différents pourcentages de chamotte sur le comportement du mortier, et dans cette recherche, le sable de béton a été remplacé par un sable de chamotte à 5, 10%, 20% et 30% respectivement.

Les propriétés des granulats valorisés ainsi que l'analyse physique et mécanique des mortiers à l'état frais (l'ouvrabilité) et durcis (retrait, l'absorption d'eau par capillarité, gonflement, résistance à la compression et traction en flexion) à base de ces matériaux sont analysées et comparées aux propriétés du mortier témoin (granulats 100% naturels à l'âge de 3, 7 et 28 jours. Les résultats ont montré que l'inclusion de la chamotte dans le mélange de mortier montre clairement que l'ajout progressif du matériau étudié une amélioration notable de certaines propriétés physiques du mortier, telles que la réduction du retrait, du gonflement et de l'absorption, tout en induisant une baisse de la résistance mécanique

Donc un mortier avec incorporation de chamotte est un mortier réfractaire, idéal pour les applications nécessitant une haute résistance à la chaleur, comme les fours, les cheminées ou les foyers. La chamotte, une argile calcinée et broyée, est ajoutée au mortier pour améliorer sa résistance thermique et sa durabilité à haute température.

Mots clés : Mortier, valorisation, chamotte, résistance à la compression, résistance à la traction.

Abstract

The economic challenges linked to the rising costs of fossil resources, their scarcity, and the environmental impacts related to their production and use are pushing construction stakeholders toward natural materials. Biomass-derived resources are now at the forefront, including kaolin (chamotte).

The addition of chamotte to mortar aims not only to reduce the environmental impact of cement but also to improve certain material properties, such as dimensional stability, water resistance, and long-term durability.

The objective of our study is to enhance quarry sand by blending it with chamotte sand. The main goal is to monitor the effect of different chamotte percentages on mortar behavior. In this research, concrete sand was replaced by chamotte sand at 5%, 10%, 20%, and 30%, respectively.

The properties of the valorized aggregates, along with the physical and mechanical analysis of both fresh (workability) and hardened mortars (shrinkage, capillarity, swelling, compressive strength, and flexural tensile strength), were analyzed and compared to the reference mortar (100% natural aggregates) at 3, 7, and 28 days of curing.

The results clearly showed that the progressive inclusion of chamotte in the mortar mix significantly improved certain physical properties of the mortar, such as reduced shrinkage, swelling, and water absorption, although it led to a decrease in mechanical strength.

Therefore, mortar with chamotte incorporation is considered a refractory mortar, ideal for applications requiring high heat resistance, such as kilns, chimneys, or fireplaces. Chamotte, a calcined and ground clay, is added to mortar to enhance its thermal resistance and durability at high temperatures.

Keywords: Mortar, valorization, chamotte, compressive strength, tensile strength.

ملخص

إن التحديات الاقتصادية المرتبطة بارتفاع تكاليف الموارد الأحفورية، وندرتها، والآثار البيئية الناتجة عن تصنيعها واستخدامها، تدفع الفاعلين في قطاع البناء نحو التوجه إلى المواد الطبيعية. وتعد الموارد المستخرجة من الكتلة الحيوية في صدارة هذا التوجه، ومنها الكاولين (الشاموت). يهدف إدخال الشاموت في المونة إلى تقليل الأثر البيئي للإسمنت، بالإضافة إلى تحسين بعض خصائص المادة مثل الاستقرار الحجمي، ومقاومة الماء، والمتانة مع مرور الزمن.

تتمثل فكرة دراستنا في تمييز رمل المحاجر باستخدام رمل الشاموت، ويتمثل الهدف الرئيسي في متابعة تأثير نسب مختلفة من الشاموت على سلوك المونة. وفي هذا البحث، تم استبدال رمل الخرسانة برمل الشاموت بنسب 5%، 10%، 20% و30% على التوالي. تم تحليل خصائص الركام المُثمن، بالإضافة إلى التحليل الفيزيائي والميكانيكي للمونة في حالتها الطازجة (قابلية التشغيل) والمتصلبة (الانكماش، الشعيرية، التمدد، مقاومة الضغط، ومقاومة الشد بالانحناء)، ومقارنتها بخصائص المونة المرجعية (بمواد طبيعية 100%) عند أعمار 3، 7 و28 يوماً. أظهرت النتائج أن دمج الشاموت في خليط المونة يؤدي بوضوح إلى تحسين ملحوظ في بعض الخصائص الفيزيائية للمونة، مثل تقليل الانكماش، والتمدد، والامتصاص، مع ملاحظة انخفاض في المقاومة الميكانيكية.

لذلك، فإن المونة المحتوية على الشاموت تُعد مونة حرارية، مثالية للتطبيقات التي تتطلب مقاومة عالية للحرارة، مثل الأفران، المداخن أو المواقد. حيث تُضاف الشاموت، وهي طين مُكلسن ومطحون، لتحسين مقاومة المونة للحرارة ومتانتها عند درجات الحرارة المرتفعة.

Table des matières

Résumés	6
Abstract	7
ملخص.....	8
<i>Introduction Générale</i>	16
Introduction générale	17
<i>Chapitre I</i>	19
<i>Types de mortier</i>	19
Introduction	20
I.1 Définition	20
I.2 Composants du mortier	21
I.2.1 Le sable	21
I.2.2 Le liant	22
I.2.3 L'eau	22
I.2.4 Les adjuvants	23
I.2.5 Les ajouts.....	24
I.3 Propriétés du mortier	24
I.3.1 Fluidité.....	24
I.3.2 Le pouvoir de retenir de l'eau.....	24
I.3.3 Résistance mécanique	24
I.4 Fonctions d'un mortier	24
I.5 Les différentes utilisations du mortier	25
I.5.1 Les joints de maçonnerie	25
I.5.2 Les enduits.....	26
I.5.3 Les chapes.....	26
I.5.4 Les scellements et les calages	26
I.6 Les types de mortiers	27
I.6.1 Selon la composition	27
I.6.2 Selon leur domaine d'utilisation	29
I.6.3 En fonction de dosage de liant	31
I.7 Fabrication des mortiers	32
I.8 Caractéristiques des mortiers	32
I.8.1 Mortier à l'état frais « état plastique »	33
I.8.2 Mortier à l'état durci	33
I.8.3 Mesure de l'ouvrabilité du mortier	33
Conclusion	34

<i>Chapitre II</i>	35
<i>Généralités sur le kaolin</i>	35
II.1 Introduction	36
II.1 Minéraux argileux	36
II.1.1 La couche tétraédrique	37
II.1.2 La couche octaédrique	37
II.2. Argiles kaolinitiques	41
II.2.1 Kaolin	41
II.3.1. Kaolinite	42
II.4. Etude de la kaolinite	43
II.4.1. Morphologie de la kaolinite	43
II.4.2. Structure de la kaolinite	44
II.4.3. Transformations de la kaolinite	45
II.4.4. Phases de la kaolinite	48
II.5. Application industrielle de kaolin	50
II.6. Conclusions	52
<i>Chapitre III : Procédures expérimentales</i>	53
III .1. Introduction	54
III .2. Matériaux utilisés	54
III .3 Caractérisation des constituants	54
III .3.1 Ciment	54
III .3.2 Sable	56
III 3.3 Eau de gâchage	56
III.3.4 Adjuvant utilisé	57
III.3.5 La fumé de silice	57
III .3.6 La chamotte	58
III.4. Formulation du béton	59
III.4.1 Définition de la formulation	59
III.5. Les essais réalisés au laboratoire	63
III.5.2 Masse volumique absolue et apparente	65
III.6.2 A l'état durci	67
Conclusion	73
<i>Chapitre IV : Résultats et discussions</i>	74
Introduction	75
IV.1 Essais physiques	75
IV.1.1 La granulométrie	75

IV.1.2 L'affaissement	78
IV.1.3 La masse volumique	79
IV.1.3 Le retrait	82
IV.1.4 Le gonflement	85
IV.1.5 L'absorption par immersion	86
IV.1.6 L'absorption par capillarité	87
IV.2 Essais mécanique	89
IV.2.1 L'essai de compression	89
IV.2.2 L'essai de traction	93
Conclusion	96
Conclusion générale	97
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUE	98

Liste d'abréviation

CSTB: Centre Scientifique et Technique du bâtiment -----	10
DTU: Delhi Technological University -----	10
NF EN: Norme Française Européenne-----	16
NF P: Norme Française Partie -----	10
XP P 10-202-1: Norme Expérimentale du secteur bâtiment et travaux publics -----	10

Liste des tableaux

Chapitre II : Généralités sur le kaolin

Tableau II.1 : Phyllosilicates utilisés en industrie-----	40
Tableau II.2: Minéraux ferreux, principaux pics en diffraction X -----	42
Tableau II.3 : Utilisation industrielle du kaolin -----	51
Tableau II.4 : Principaux secteurs d'utilisation de minéraux argileux -----	51

Chapitre III : Procédures expérimentales

Tableau III.1 : Les caractéristiques techniques de ciment utilisé.....	55
Tableau III.2 : Les composants chimiques de ciment utilisé.....	56
Tableau III.3 : Les données technique du fumé de silice.....	58
Tableau III.4 : Composition chimique de la fumée de silice.....	58
Tableau III .5 : Formulation de béton de sable dosage 450 Kg/m ³ (quantité par volume)	61
Tableau III.6 : Formulation de béton de sable dosage 450 Kg/m ³ (quantité par masse)	61
Tableau III .7 : Les mélanges de béton de sable (Quantité de mélange = 1000 litres = 1m ³).....	62
Tableau III.8 : Les mélanges de béton de sable (Quantités à introduire dans le malxeur: 0.004L)	62
Tableau III.9 : Quantité global d'un mélange	63
Tableau III.10 : Evaluation de l'ouvrabilité à l'affaissement au cône Plasticité Serrage Affaissement (cm)	67

Chapitre IV : Résultats et discussions

Tableau IV.1 : La granulométrie du sable -----	3
Tableau IV. 2 : La granulométrie de la chamotte-----	4
Tableau IV.3 : Les résultats de l'essai de l'affaissement -----	5
Tableau IV. 4: Les résultats de la masse volumique apparente -----	7
Tableau IV.5 : Les résultats de la masse volumique absolue-----	7
Tableau IV.6 : Résultats du retrait des différentes formulations à 20 °C -----	8

Tableau IV .7 : Résultats du retrait des différentes formulations à 105 °C -----	9
Tableau IV.8 : Les résultats du gonflement à 1 ,3, 7 et 28 jours-----	11
Tableau IV. 9 : Les résultats de l'absorption par immersion -----	12
Tableau IV. 10 : Les résultats de l'absorption par capillarité -----	13
Tableau IV.11 : Les résultats de l'essai de compression -----	15
Tableau IV.12 : Les résultats de l'essai de la traction -----	18

Liste des figures

Chapitre I : Types de mortier

Figure I.1 : Constituants des mortiers.	20
Figure I.2 : Les composants du mortier.....	21
Figure I.3 : Echantillon de sable.....	22
Figure I.4 : L'eau	23
Figure I.5: Les joints de maçonnerie.....	25
Figure I.6 : Les scellements et les calages	26
Figure I.7 : Les types de mortier.	28
Figure I.8 : Mortier réfractaire	28
Figure I.9 : Mortier autoplaçant.....	31

Chapitre II : Généralités sur le kaolin

Figure II.1 : Représentation des tétraèdres et des octaèdres.....	38
Figure II.2 : Agencement des couches octaédriques et tétraédriques dans les phyllosilicates. Feuillet de type 1 :1 (a), feuillet de type 2 :1 (b) et feuillet de type 2 :1 avec une couche brucitique ou gibbsitique (c).....	39
Figure II.3: Morphologie d'une kaolinite bien cristallisée.....	44
Figure II. 4 : Structure foliaire de la kaolinite	45
Figure II.5 : Structure cristallographique de la kaolinite	45

Chapitre III : Procédures expérimentales

Figure III. 1 : Le ciment CRS Mokaouem Biskra.....	4
Figure III.2 : Sable de la carrière de Ain Abid wilaya de Constantine.	5
Figure III.3 : Eau potable	5
Figure III.4: Superplastifiant Walcrete77.	6
Figure III.5: La fumé de silice	6

Figure III.6 : La chamotte.....	7
Figure III.7: Série des tamis	13
Figure III.8 : La masse volumique apparente et absolue	15
Figure III.9 : L'essai de l'affaissement	16
Figure III .10 : L'essai de compression.	17
Figure III .11 : Les éprouvettes	18
Figure III.12 : L'essai de traction.....	18
Figure III.13: L'appareillage de retrait utilisé pour l'essai.....	20
Figure III.14: L'absorption par immersion.....	21
Figure III .15 : L'absorption par capillarité.....	22

Chapitre IV : Résultats et discussions

Figure IV.1: La courbe granulométrique du Sable	76
Figure IV.2 : La courbe granulométrique de la chamotte.....	77
Figure IV.3 : Variation de l'affaissement en fonction du pourcentage de chamotte ajouté au mortier.....	78
Figure IV.4 : La variation de la masse volumique apparente de chaque mélange	80
Figure IV.5 : La variation de la masse volumique apparente de chaque mélange	81
Figure IV.6 : Evolution du retrait du mortier à 20°C en fonction du taux de chamotte et de l'âge	82
Figure IV.7 : Evolution du retrait du béton de sable à 105°C en fonction du taux de chamotte et de l'âge.....	84
Figure IV .8 : La courbe de gonflement selon les jours et le pourcentage de la chamotte	85
Figure IV. 9 : L'évolution de l'absorption par immersion d'eau en fonction du temps et de pourcentage de chamotte	87
Figure IV.10 : L'évolution de l'absorption par capillarité d'eau en fonction du temps et de pourcentage de chamotte.	88
Figure IV.11 : Courbe de l'évolution de la résistance à la compression en fonction des pourcentages de chamotte à 3 jours.	90
Figure IV. 12 : Courbe de l'évolution de la résistance à la compression en fonction des pourcentages de chamotte à 7 jours.	91
Figure IV. 13 : Courbe de l'évolution de la résistance à la compression en fonction des pourcentages de chamotte à 28 jours.	92
Figure IV.14 : Courbe de l'évolution de la résistance à la traction en fonction des pourcentages de chamotte à 3 jours.....	93

Figure IV.15 : Courbe de l'évolution de la résistance à la traction en fonction des pourcentages de chamotte à 7 jours.----- 94

Figure IV.16 : Courbe de l'évolution de la résistance à la traction en fonction des pourcentages de chamotte à 28 jours.----- 95

Introduction Générale

Introduction générale

En raison de la croissance de la population mondiale, de l'urbanisation généralisée et des conditions économiques des pays en développement, le rythme de développement du secteur de la construction s'est considérablement accéléré.

Les matériaux de construction jouent un rôle crucial dans la durabilité et la performance des ouvrages de génie civil. Parmi eux, le mortier à base de ciment est largement utilisé dans les travaux de maçonnerie, de revêtement et de scellement, en raison de sa maniabilité et de sa bonne adhérence. Cependant, la fabrication du ciment portland, composant principal du mortier, engendre une consommation énergétique élevée et des émissions importantes de CO₂ ce qui en pose un enjeu environnemental majeur.

Dans ce contexte, la recherche de solutions alternatives et durables devient une priorité, notamment par l'utilisation d'ajouts minéraux naturels ou recyclés pour partiellement substituer le ciment ou le sable. La chamotte, un résidu issu de la cuisson d'argile, représente une option prometteuse. Elle est riche en silice et en alumine, et possède une structure poreuse qui peut influencer favorablement les propriétés physiques et mécaniques du mortier.

L'ajout de chamotte dans le mortier vise non seulement à réduire l'impact environnemental du ciment, mais également à améliorer certaines propriétés du matériau, telles que la stabilité dimensionnelle, la résistance à l'eau ou encore la durabilité dans le temps.

La condition fondamentale pour la valorisation de ces granulats est qu'ils remplissent la fonction requise dans la position qu'ils occupent et qu'ils continuent à remplir celle-ci durant toute l'existence de la construction sans manifester d'effets secondaires négatifs qui conduisent à des désordres dans l'ouvrage.

La présente étude s'inscrit dans cette démarche et porte sur l'élaboration et la caractérisation d'un mortier de ciment intégrant différentes proportions de chamotte (5, 10, 20 et 30%).

Objectif

L'objectif est d'évaluer l'effet de cet ajout naturel sur les propriétés physiques (absorption, gonflement...), mécaniques (résistance à la compression), et de déterminer la formulation optimale pour un usage durable en construction.

Les résultats de cette étude pourraient fournir des informations précieuses pour l'utilisation du sable de chamotte dans la construction.

Plan de travail

Pour bien cerner le sujet et arriver aux objectifs fixés, nous avons donc mené un plan de travail qui se compose des chapitres suivants :

- Une introduction générale qui fait définir la problématique du sujet ainsi que les objectifs visés et un plan de travail.
- Dans le premier chapitre, nous avons présenté une vision générale du mortier, où nous avons appris à connaître sa définition, ses composants, ses domaines d'utilisation, ses propriétés, ainsi que les différents types de mortiers.
- Dans le deuxième chapitre, nous avons traité d'une manière générale les minéraux argileux, puis nous avons abordé les argiles kaolinitiques, l'étude de la kaolinite, ainsi que les applications industrielles du kaolin.
- Puis, dans le troisième chapitre, nous avons mené des essais en laboratoire sur un mélange de ciment et de chamotte, afin d'étudier les propriétés physiques et mécaniques du mortier contenant un additif : la chamotte.
- Le dernier chapitre présente les résultats obtenus suite à l'élaboration du mortier enrichi en chamotte, et leur impact sur les propriétés mécaniques étudiées.
- Enfin, ce travail se termine par une conclusion générale suivie de recommandations destinées à orienter les travaux futurs.

Chapitre I :

Généralités sur les mortiers

I.1 Introduction

Les mortiers sont des matériaux de construction utilisés depuis l'Antiquité pour lier des briques, des pierres ou d'autres éléments de construction. Ils sont généralement composés de liants (comme le ciment, la chaux ou le plâtre), d'un granulé (souvent du sable) et d'eau, formant une pâte qui durcit avec le temps pour assurer la stabilité et la solidité des structures.

Les mortiers jouent un rôle essentiel dans la construction et l'entretien des bâtiments, et leur étude permet de développer des matériaux plus performants et adaptés aux défis contemporains de l'architecture et de l'ingénierie.

Il existe différents types de mortiers, chacun ayant des propriétés spécifiques adaptées à diverses applications [Kh.Bouali]. Par exemple, le mortier de ciment est couramment utilisé pour des constructions nécessitant une haute résistance mécanique, tandis que les mortiers à base de chaux sont privilégiés pour les rénovations de bâtiments historiques, car ils sont plus flexibles et permettent une meilleure respiration des murs. Les mortiers peuvent également être classés en fonction de leur composition, de leur résistance à la compression ou de leur utilisation (par exemple, mortier de jointoiement ou mortier de finition).

L'étude scientifique des mortiers comprend plusieurs domaines, notamment la chimie des matériaux, la physique des structures et la durabilité des matériaux dans des environnements spécifiques. L'amélioration des mortiers modernes, notamment en termes de durabilité, de résistance aux intempéries et d'efficacité énergétique, est un domaine de recherche continu qui implique des innovations telles que l'utilisation de matériaux écologiques, de polymères ou d'ajouts minéraux pour optimiser les performances.

I.2 Définition

Le mortier est un mélange durci d'un liant, d'un granulat fin (sable) et d'eau. Les constituants principaux des mortiers peuvent contenir en pourcentage généralement faible, des additifs ou des ajouts destinés à améliorer certaines de leurs propriétés [H.Ben Salah].

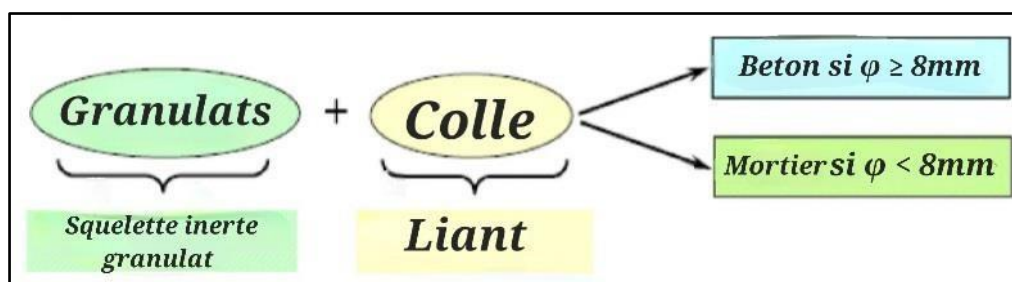


Figure I.1 : constituants des mortiers.

I.3 Composants du mortier

Comme nous l'avons mentionné précédemment que les principaux composants des mortiers sont le sable, le liant et l'eau. Depuis le début du 20^{ème} siècle, le ciment Portland est le liant le plus couramment utilisé, mais le mortier à base de chaux, qui était traditionnellement utilisé, reste employé dans certaines constructions récentes.



Figure I.2 : Les composants du mortier.

I.3.1 Le sable

Les sables sont définis comme la fraction des granulats pierreux dont les grains ont une taille comprise entre 80 μm et 5 mm. Cette définition est générale, et les limites peuvent varier selon les différentes classifications. Il s'agit également de matériaux dont le diamètre maximal est inférieur à 6,3 mm et dont la proportion passant à 80 microns ne dépasse pas 30 % [R.Kettab]. Normalement, les sables utilisés sont les sables appelés "sable normalisé". Les sables de bonne granulométrie doivent contenir des grains fins, moyens et gros. Les grains fins se disposent [N.Fardjaoui] dans les intervalles entre les gros grains pour combler les vides, ils réduisent les variations volumiques et les chaleurs dégagées. Les dosages se feront en poids plutôt qu'en volume comme c'est souvent le cas. Le diamètre maximum des grains de sable utilisés pour les mortiers est [K.Ben Boudjema. Djeroud, S.M Moussaoui]:

- a) **Extra-fins** : jusqu'à 0.8mm (en tamis), soit 1mm (en passoire).
- b) **Fins** : jusqu'à 1.6mm.
- c) **Moyens** : jusqu'à 3.15mm.
- d) **Gros** : jusqu'à 5mm.



Figure I.3 : Echantillon de sable.

I.3.2 Le liant

Le liant comme son nom l'indique, va assurer l'essentiel de la cohésion du mortier. Nous nous focaliserons ici sur les liants minéraux. Ces liants peuvent être majoritairement classés en deux familles : les liants hydrauliques (le ciment), qui durcissent sous l'action de l'eau, et les liants aériens (essentiellement la chaux aérienne), qui durcissent sous l'action de l'air (CO_2) [D.Jérome].

a. Le ciment de maçonnerie

Les ciments sont des poudres fines obtenues par cuisson à haute température et broyage d'un mélange minéral constitué de calcaire et d'argile (en général) [F.Bécher].

b. La chaux

La chaux est un carbonate de chaux (CaCO_3) obtenu par calcination d'un calcaire naturel (marne) plus ou moins pur. La présence de silicates d'alumine modifie les caractéristiques du produit après cuisson, tandis que la composition de la marne influe sur la température de calcination. Le poids spécifique de la chaux éteinte utilisée est de $2,32 \text{ g/cm}^3$.

En général, lorsque l'agent utilisé pour corriger le sable de dune ne contient pas d'éléments assurant une bonne cohésion, on recourt à des matériaux pulvérulents industriels tels que la chaux. Celle-ci joue un rôle essentiel dans l'amélioration de l'adhésivité de ces agents correcteurs au liant utilisé pour l'enrobage [R.Kettab].

I.3.3 L'eau

L'eau de gâchage est un ingrédient essentiel du béton et joue deux fonctions principales confère au mortier sa maniabilité à l'état frais (ses propriétés rhéologiques) et assure l'hydratation des grains de ciment. La quantité d'eau utilisée ou plus précisément le rapport eau/ciment a une

forte influence sur la porosité, la perméabilité, la résistance mécanique, la durabilité, la microstructure du mortier et la cinétique d'hydratation du ciment.

L'eau de gâchage peut avoir plusieurs origines, mais seule l'eau potable est présumée conforme aux exigences de la norme NF EN 1008, les autres eaux comme l'eau récupérée de la fabrication de bétons, eaux d'origine souterraine, eaux naturelles de surface et eaux de rejet industriel, eaux de mer et eaux saumâtres, doivent être soumises à des essais de contrôle préliminaires ; donc l'eau employée pour le gâchage des bétons doit être propre :

- Physiquement (pas de déchets solides, minéraux ou organiques).
- Chimiquement (valeur limitée de la quantité de sels dissous, ce qui exclut en général l'usage de l'eau de mer) [K.Ben Boudjema. Djeroud, S.M Moussaoui].



Figure I.4 : L'eau.

I.3.4 Les adjuvants

Les adjuvants sont des substances chimiques utilisées dans le béton/mortier pour modifier ses propriétés. Ils sont ajoutés en faible quantité (environ 5 % du poids du ciment) afin de modifier les caractéristiques du béton ou du mortier. Les mortiers peuvent contenir différents types d'adjuvants.

- a) Les plastifiants (réducteurs d'eau).
- b) Les entraîneurs d'air.
- c) Les modificateurs de prise (retardateurs, accélérateurs).
- d) Les hydrofuges.

Dans tous les cas, des précautions particulières doivent être prises pour obtenir des mortiers homogènes et sans ressuyage, assurant ainsi une consistance uniforme d'une gâchée à l'autre [R.Benhamida, R.Boulifa].

I.3.5 Les ajouts

Les ajouts que l'on utilise dans les mortiers sont [R.Benhamida, R.Boulifa]:

- a) Poudres fines pouzzolaniques (cendres, fumée de silice.).
- b) Fibres de différentes natures.
- c) Colorants (naturels ou synthétiques).
- d) Polymers.

I.4 Propriétés du mortier

Les propriétés principales d'une pâte de mortier sont :

I.4.1 Fluidité

Une pâte de mortier peut avoir, suivant les composants des consistances différentes, depuis sèche jusqu'à fluide. La fluidité de la pâte de mortier détermine la maniabilité c'est-à-dire le pouvoir de se poser sur une surface, avec une dépense minimale d'énergie sous forme d'une couche de densité uniforme fortement adhérent à la surface de base [F.Bechiri]. Les mortiers de maçonnerie, de travaux de finissage de bâtiment et autres sont suffisamment fluides.

I.4.2 Le pouvoir de retenir de l'eau

Il est caractérisé par la propriété de la pâte de ne pas se stratifier pendant le transport et de conserver assez d'eau dans la couche fine sur une base poreuse [F.Bechiri].

I.4.3 Résistance mécanique

La solidité du rejointoiement, la bonne ouvrabilité et un bon pouvoir de rétention d'eau donnent au rejointoiement une force maximale et par le fait même ces qualités sont plus importantes que la résistance du mortier à la compression. La résistance à la flexion est également importante, parce qu'elle détermine la capacité d'un mortier à résister à la fissuration. Les mortiers devraient toujours avoir moins de résistance que les éléments de maçonnerie pour que les fissures se produisent dans les joints, où elles peuvent être facilement colmatée [F.Bechiri].

I.5 Fonctions d'un mortier

La fonction principale d'un mortier est de liasonner les éléments de maçonnerie de manière à ce qu'ils constituent un seul bloc. Les mortiers sont des éléments indispensables à toute construction. Il peut être utile pour la plupart des travaux de construction et de rénovation en maçonnerie [R. Benhamida, R. Boulifa] :

- a) Mortiers pour enduits de couleur et d'aspect varié.

- b) Mortiers d'imperméabilisation.
- c) Mortier d'isolation thermique.
- d) Mortier de jointoiment.
- e) Mortier de ragréage.
- f) Mortier de scellement, mortier pour chape.
- g) Mortier-colle pour carrelages, sur fond de plâtre ou de ciment.
- h) Mortier de réparation.

I.6 Les différentes utilisations du mortier

I.6.1 Les joints de maçonnerie

La construction en éléments maçonnés (blocs de béton, pierres de taille, briques) nécessite leur assemblage avec un mortier qui doit présenter des caractéristiques mécaniques suffisantes pour garantir la transmission des charges et une compacité adéquate pour assurer l'étanchéité. Il est généralement recommandé d'utiliser des mortiers avec un module d'élasticité modéré, afin qu'ils puissent s'adapter aux variations dimensionnelles des éléments sans risquer de fissurer. Les mortiers de joints jouent donc un rôle crucial dans la maçonnerie, nécessitant une étude et une mise en œuvre soignées pour remplir correctement leur fonction. Cela est particulièrement vrai pour la maçonnerie apparente. La norme XP P 10-202-1 « DTU 20.1. Ouvrage en maçonnerie de petits éléments. Parois et murs. » fournit des recommandations sur les dosages appropriés pour les mortiers de jointoiment ainsi que sur les meilleures pratiques pour leur application [H.Alipacha. M.Boukerdel].



Figure I.5: Les joints de maçonnerie [H.Alipacha. M.Boukerdel].

I.6.2 Les enduits

Ce domaine d'application, qui représente l'un des secteurs les plus importants pour les mortiers. Il convient de rappeler qu'en plus des enduits traditionnels en trois couches, comme décrits dans la norme NF P 15-201 (DTU 26.1), on trouve aujourd'hui des enduits monocouches épais, ainsi que des enduits isolants, qui sont encore considérés comme non traditionnels. Ces produits font l'objet d'une procédure d'avis technique par le CSTB [H.Alipacha. M.Boukerdel].

I.6.3 Les chapes

Les chapes ont pour rôle d'assurer la mise à niveau du dallage et d'homogénéiser sa surface. Elles peuvent servir de finition, où l'on intègre souvent des produits spécifiques, ou constituer le support pour un revêtement de sol. Les chapes doivent offrir une résistance suffisante pour transmettre les charges au support et, dans certains cas, être capables de résister à l'abrasion ou au poinçonnement (comme dans les sols industriels). Selon leur type, adhérente ou flottante, elles peuvent également avoir des fonctions thermiques ou acoustiques [H.Alipacha. M.Boukerdel].

I.6.4 Les scellements et les calages

La diversité des problèmes de scellement et de calage a poussé les fabricants de mortiers industriels à développer des produits spécifiques adaptés aux différents travaux à réaliser : scellement d'éléments de couverture, d'éléments de second œuvre, de mobilier urbain, de regards de visite, ainsi que l'assemblage d'éléments préfabriqués [H.Alipacha. M.Boukerdel].

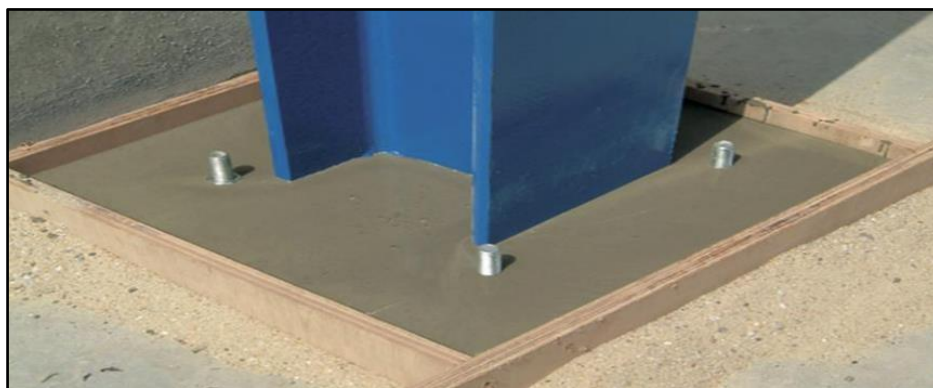


Figure I.6 : Les scellements et les calages [H.Alipacha. M.Boukerdel].

I.7 Les types de mortiers

Les types de mortiers sont choisis selon leur application comme suit :

I.7.1 Selon la composition

Il existe multiples types de mortiers avec différentes propriétés et applications, plus ou moins adaptés en fonction des usages. Les mortiers les plus fréquemment utilisés sur les chantiers sont :

a) Les mortiers de ciment

Le mortier-ciment est le produit le plus basique qui soit, indispensable pour construire un mur et lier les pierres ou briques entre elles, convient aussi pour l'assemblage de blocs en béton, pour les jointements et les scellements. Il s'agit d'un mélange classique de ciment, de sable et d'eau. Le mortier de ciment est très résistant et étanche à l'eau mais sujet à la fissuration [A.Bensaadi. H.Bensaidi].

b) Les mortiers de chaux

C'est un type de mortier où la chaux (chaux grasse ou chaux hydraulique) est utilisée comme liant et le sable est utilisé comme granulat fin. Ce mélange est couramment utilisé pour enduire les murs intérieurs et extérieurs.

Les mortiers de chaux sont gras et onctueux. Ils durcissent plus lentement que les mortiers de ciment, surtout lorsque la chaux est calcique. Il a de la souplesse mais il a moins d'imperméabilité que le ciment [A.Bensaadi. H.Bensaidi].

c) Les mortiers bâtards

Le mélange de ciment et de chaux permet d'obtenir conjointement les qualités de ces deux liants. Le ciment lui procure de la résistance, tandis que la chaux lui apporte de la souplesse. L'usage de ces deux liants donne un mortier résistant, une prise plus rapide grâce au ciment, suffisamment gras et onctueux grâce à la chaux. Le tout lui procure une facilité de prise en main. Généralement, on utilise la chaux et le ciment par parties égales ; mais on mettra une quantité plus ou moins grande de l'un ou de l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée [A.Bensaadi. H.Bensaidi].

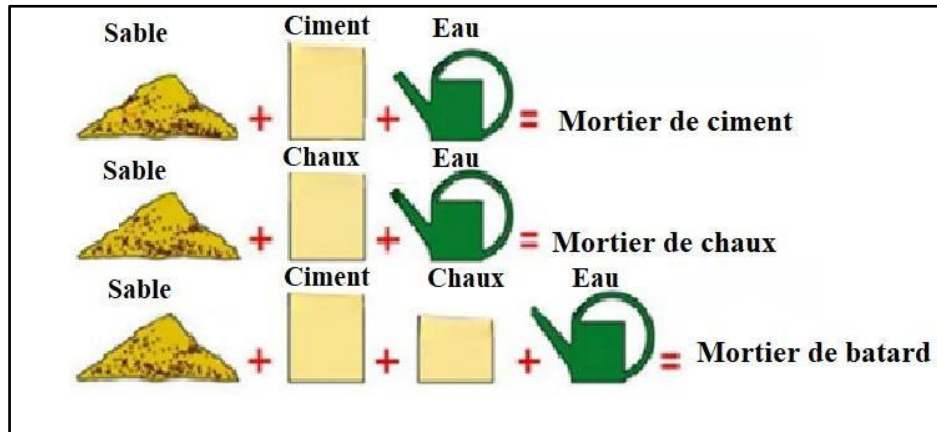


Figure I.7 : Les types de mortier.

d) Le mortier réfractaire

Le mortier réfractaire est fabriqué à partir de ciment fondu, un matériau capable de résister à des températures très élevées [A.Bensaadi. H.Bensaidi].

En toute logique, il est uniquement utilisé pour les constructions qui sont exposées à ce type de températures, à savoir pour le montage et le jointement des :

- ✓ Foyers de cheminée.
- ✓ Des barbecues maçonnés.



Figure I.8 : mortier réfractaire [R.Jules].

a. Les mortiers de prise rapide

Il est fabriqué à partir de ciment prompt, un matériau rapide et résistant, idéal pour les opérations de scellement [A.Bensaadi. H.Bensaidi].

b. Les mortiers industriels

Les mortiers industriels sont fabriqués à partir de matériaux secs soigneusement choisis, conditionnés en sacs, contrôlés en usine et offrant une grande régularité. Pour les utiliser, il

suffit d'ajouter la quantité d'eau appropriée, de mélanger et de les appliquer. Les producteurs de mortiers industriels offrent une large variété de produits adaptés à tous les besoins [O.Lachemot. M.Baik].

- Mortiers pour enduits de couleur et d'aspect varié.
- Mortiers d'imperméabilisation.
- Mortier d'isolation thermique.
- Mortier de jointoiement.
- Mortier de ragréage.
- Mortier de scellement, mortier pour chapes.
- Mortier-colle pour carrelages, sur fond de plâtre ou de ciment.
- Mortier de réparation [O.Lachemot. M.Baik].

I.7.2 Selon leur domaine d'utilisation

a. Le mortier-ciment

Ce matériau sera utile pour toutes les constructions classiques (murs, chapes, etc.), qui ne nécessitent pas l'usage d'un mortier spécifique. L'avantage du ciment est qu'il profite d'une excellente résistance à la compression. Il durcit également plus vite que la plupart des autres solutions. Les dosages courants sont de l'ordre de : 300 à 400 kg de ciment pour 1 m³ de sable. De plus un dosage en ciment insuffisant les rend pratiquement imperméables [GH.Sellami].

b. Le mortier hydrofuge

Comme son nom l'indique, le mortier hydrofuge est un mortier résistant à l'eau, qui permet d'éviter les problèmes d'humidité sur une surface. Il permet de :

- ✓ Boucher des fissures.
- ✓ Enduire un mur.
- ✓ Réaliser des chapes.

On l'utilise avant tout dans les lieux humides (salle de bain, extérieur, etc.) ou encore pour concevoir des réalisations étanches, comme un bassin de piscine [GH.Sellami].

c. Le mortier de chaux

La chaux est l'un des liants les plus utilisés dans les anciennes constructions. À tel point qu'on utilise encore fréquemment des mortiers à la chaux.

Il faut dire que ce type de mortier permet au mur de mieux respirer et dispose également de capacités hydrofuges (idéales pour les pièces humides).

L'usage de chaux dans un mortier permet généralement une application plus facile, grâce à un temps de séchage un peu plus long. Ces mortiers sont cependant plus complexes à doser que le ciment [GH.Sellami].

d. Le mortier bâtard

Le mortier dit "bâtard" est un mortier qui utilise à la fois deux types de liants différents (ciment + chaux ou deux ciments différents), généralement, à parts égales.

Un mortier bâtardé permet de Tirer parti des avantages des deux liants [GH.Sellami].:

- Plus adhérent et plastique que le ciment pur, il résiste mieux à la fissuration
- Le bon compromis pour la brique de terre cuite, la pierre mi- tendre.

e. Le mortier-colle ou ciment-colle

Il s'agit, comme son nom l'indique, d'un mortier adhésif, qui permet de coller un revêtement contre un mur ou un sol. Ce matériau est utilisé pour coller des plaquettes de parement, des carrelages muraux ou au sol, ou encore des dalles. Selon le mortier-colle choisi, l'utilisation peut se faire en intérieur et/ou en extérieur [GH.Sellami].

f. Le mortier autoplaçant

Il s'agit d'une alternative économique au coulis de ciment, offrant en plus une meilleure stabilité volumétrique. Ce produit, d'une grande fluidité, est composé de ciment, d'eau, de sable et d'adjuvants spécifiques. Il peut être pompé pour faciliter son application. Il est généralement utilisé pour remplir des conduits, des tunnels, des réservoirs souterrains, des espaces vides ou des chambres abandonnées. Le mortier autoplaçant peut être injecté pendant 2 heures sur des distances pouvant atteindre 100 mètres (avec un maximum de 3 heures) [O.Lachemot, M.Baik].



Figure I.9 : Mortier autoplaçant [O.Lachemot, M.Baik].

Il existe également d'autres types de mortiers en fonction de l'utilisation [A.Bensaadi, H.Bensaidi].

- Mortier de pose.
- Mortier de joints.
- Mortier pour les crépis.
- Mortier pour le sol.
- Mortier pour les stucs.
- Pierres artificielles.
- Support pour les peintures murales.
- Mortier d'injection.
- Mortier pour les mosaïques.
- Mortier de réparation pour pierres.

I.7.3 En fonction de dosage de liant

a. Mortier normal

C'est un mortier qui contient en volume une partie de liant pour trois parties de sable normal. Avec ces proportions le liant remplit les vides du sable, c'est-à-dire $C/S = 1/3$ et $E/C = 0,5$ [A.Nacéri.I . Messaouden].

$$1 \text{ m}^3 \text{ de sable} + 1/3 \text{ liant (m}^3\text{)} = 1 \text{ m}^3 \text{ de mortier.}$$

b. Mortier maigre

Le mortier maigre, avec un faible dosage en ciment ($\frac{1}{4}$ de liant pour $\frac{3}{4}$ de sable), est plus facile à manipuler. Cependant, il présente une légère perméabilité. Il est principalement utilisé pour la maçonnerie des agglomérés, des pierres, etc [O.Lachemot, M.Baik].

$1 \text{ m}^3 \text{ de sable} + \frac{1}{4} \text{ liant (m}^3) < 1 \text{ m}^3 \text{ de mortier.}$

c. Mortier gras

Le mortier gras, avec un dosage en ciment plus élevé ($\frac{1}{3}$ de liant pour $\frac{2}{3}$ de sable), a une structure beaucoup plus dense et laisse très peu passer l'eau. Il est pratiquement imperméable. Il est principalement utilisé pour la réalisation de joints, d'enduits, etc [O.Lachemot, M.Baik].

Volume de mortier > 1 volume de sable.

I.8 Fabrication des mortiers

Ils sont préparés avec le ciment et le sable du chantier. Le ciment est un ciment courant CPA ou CPJ et parfois des ciments spéciaux comme le ciment alumineux fondu. On emploie également des chaux hydrauliques et parfois des liants à maçonner. Le sable est le plus souvent roulé (nature silico-calcaires) parfois concassé et le gâchage s'effectue à la pelle ou à l'aide d'une petite bétonnière. Ces mortiers ne sont donc pas très réguliers et les sables peuvent être différents d'une livraison à l'autre, mais de toutes façons ils doivent être propre et de bonne granulométrie. Le sable est généralement dosé en poids (ce qui est préférable), soit en volume (cas des petits chantiers). Dans ce dernier cas, il est très important de tenir compte du phénomène de foisonnement des sables [M.Thabti].

I.9 Caractéristiques des mortiers

D'après leurs propriétés, les mortiers se subdivisent en deux catégories :

- ✓ Les mortiers plastiques.
- ✓ Les mortiers durcis.

I.9.1 Mortier à l'état frais « état plastique »

La propriété la plus importante du mortier plastique est son ouvrabilité. On peut la définir comme la propriété du mortier à s'étaler à la truelle pour colmater toutes les fentes et fissures de l'élément de maçonnerie. En réalité, c'est une combinaison de plusieurs propriétés, comprenant la plasticité, la compacité et la cohérence. Bien que la classe des sables et la proportion des matériaux jouent un rôle important, c'est la teneur en eau qui détermine les valeurs finales de l'ouvrabilité du mortier [A.Bensaadi, H.Bensaidi].

I.9.2 Mortier à l'état durci

Les performances mécaniques ont été évaluées à l'aide d'éprouvettes moulées et imprimées. Les essais de flexion trois points et de compression ont été réalisés conformément à la norme NF EN 196-1.

Les éléments imprimés, initialement de dimensions $50 \times 200 \times 400 \text{ mm}^3$ et $50 \times 40 \times 400 \text{ mm}^3$, ont été découpés et polis pour obtenir des éprouvettes de $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ pour les essais de flexion et $40 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ pour les essais de compression. Les charges mécaniques ont été appliquées selon trois directions : longitudinale (X), transversale (Y) et normale (Z) [S. Rahal, A. Kaci].

I.9.3 Mesure de l'ouvrabilité du mortier

L'essai d'étalement est réalisé sur une table mobile comportant un plateau plan relié par charnières à une base rigide. Un moule en forme de tronc de cône de diamètre à la base (D_0) posé au centre du plateau.

Le moule et le plateau sont préalablement huilés. Le cône est rempli par une quantité de mortier par couches successives, chaque couche est compactée par piquage à l'aide d'une tige. On remonte verticalement le moule sans mouvement latéral et on laisse le mortier s'étaler sur la plaque métallique. En utilisant la manivelle, on applique 15 cycles de chute. Chaque cycle dure entre 1 et 3 secondes. La hauteur de chute du plateau mobile est de 15 mm [A.Bensaadi, H.Bensaidi].

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la définition du mortier, sa composition, sa fonction ainsi que ses utilisations. Nous avons également mis en lumière ses différents types en fonction du liant, de l'usage et dosage de liant utilisée. En plus de la formulation du mortier, nous avons mentionné deux façons de formuler de mortier : dosage en volume et le dosage en poids. Enfin, nous avons parlé des caractéristiques du mortier "Où avons-nous trouvé que le mortier est divisé en deux catégories : les mortiers plastiques et les mortiers durcit.

Chapitre II :
Généralités sur le
kaolin

II.1 Introduction

Les argiles et les minéraux argileux sont des minéraux industriels très importants. Il existe bien plus de cent applications industrielles documentées des matériaux argileux. Les argiles sont utilisées dans les industries de transformation, dans les applications agricoles, dans les applications d'ingénierie et de construction, dans les remédiations environnementales, en géologie, et dans de nombreuses autres applications diverses [H. H. Murray].

L'origine des argiles peut être reliée à différents processus, tels que l'altération physique et/ou chimique, la déposition in situ et les processus hydrothermal et/ou diagénèse [A.El Hachmi].

L'argile est une matière première abondante qui possède une incroyable variété d'usages et de propriétés, largement dépendantes de leur structure minérale et de leur composition. Outre la structure et la composition de l'argile, plusieurs autres facteurs jouent un rôle important dans la détermination des propriétés et des applications d'une argile. Parmi ces facteurs figurent les minéraux non argileux présents dans la composition, la présence de matière organique, le type et la quantité de sels échangeables et solubles, ainsi que la texture [H. H. Murray].

L'argile, est un aluminosilicate hydraté de la famille des phyllosilicates (silicates en feuillets), qui se présentent sous forme de petits cristaux micrométriques, en plaquettes hexagonales ou en (micro)fibres. Elle durcit par séchage ou chauffage. En plus d'un certain pourcentage de matières organiques, l'argile contient également des minéraux secondaires tels que le quartz. Ces derniers ne confèrent aucune plasticité. Selon la nature des impuretés, elles se présentent sous diverses couleurs allant du gris bleuâtre au rouge [J.BeauChamp] .

L'argile, en tant que roche, est formée d'un mélange de silicates, dits minéraux argileux (kaolinite, montmorillonite), constituée par des substances diverses sous formes de particules où le diamètre est inférieur à $2\mu\text{m}$, telles que : les carbonates (la calcite CaCO_3 , la dolomite $\text{Ca Mg}(\text{CO}_3)_2$), la silice, l'alumine, les sulfures, l'oxyde et l'hydroxyde de fer (l'hématite Fe_2O_3 , la magnétite Fe_3O_4), l'oxyde de manganèse, la matière organique [I.Belfar ,A.B.Ben Saoucha].

II.1 Minéraux argileux

Les minéraux argileux sont ubiquistes dans les sols, comme dans la plupart des autres milieux naturels. Ils sont considérés, avec la matière organique, comme des constituants fondamentaux, les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols étant directement liées à leur quantité et à leurs propriétés élémentaires (chimie et structure lamellaire). Du fait de leur petite taille (μm au nm), les minéraux argileux présentent une importante réactivité chimique

(particulièrement l'échange ionique) qui les rendent sensibles aux variations des conditions biogéochimiques du milieu. Les variations des conditions biogéochimiques influent sur leur structure cristalline et sur leurs propriétés cristallographiques.

Les minéraux argileux sont constitués d'un empilement de feuillets qui détermine le cristal. Le cristal peut être constitué de feuillets de nature identique dans le cas des minéraux argileux discrets (illite, smectite, chlorite, kaolinite). Cependant, la structure cristalline en feuillet autorise l'empilement de feuillets de natures différentes [F.Hubert].

Les minéraux argileux sont constitués de minéraux dont les particules sont essentiellement des phyllosilicates. L'élément de base constituant la structure des phyllosilicates est un feuillet bidimensionnel silicaté qui résulte de l'empilement de couches tétraédriques (T) et octaédriques (O) d'oxygènes [M.Gautier].

La distance inter-réticulaire (d) sépare 2 feuillets successifs. Les substitutions d'atomes sont fréquentes dans les feuillets. L'édifice cristallin peut être désorganisé (la cristallinité est moins bonne). D'autre part, il y a des déséquilibres au niveau des charges ; ce déséquilibre est compensé par adsorption de cations dans l'espace interfoliaire (capacité d'échange des argiles) responsable du gonflement de l'argile dans l'eau [J.BeauChamp].

Les minéraux argileux peuvent être représentés structurellement comme une unité qui relie la plaque et l'espace entre les feuilles. La plaque est généralement constituée de deux types de couches [I.Belfar, A.B.Ben Saoucha] :

II.1.1 La couche tétraédrique

Cette couche est constituée d'un tétraèdre (Fig II.1) au-dessus duquel quatre ions oxygène (O_2^-) entourent l'ion silicium (Si_4^+), à égale distance de chacun. Ce tétraèdre a une cavité entre trois sphères de contact, une couche hexagonale d'oxygène et une sphère de couche adjacente d'oxygène. L'épaisseur de la couche tétraédrique est de 4,6 Å.

II.1.2 La couche octaédrique

Il consiste en un octaèdre (Fig.II.1) avec un ion aluminium (Al_3^+) ou magnésium (Mg_2^+) au centre à égale distance avec les six hydroxydes (OH^-) aux sommets. Couches planes appelées couche octaédrique formées lorsque les octaèdres s'unissent et que la couche tétraédrique est connectée au niveau de l'oxygène. L'épaisseur de cette couche octaédrique est de 5,05 Å.

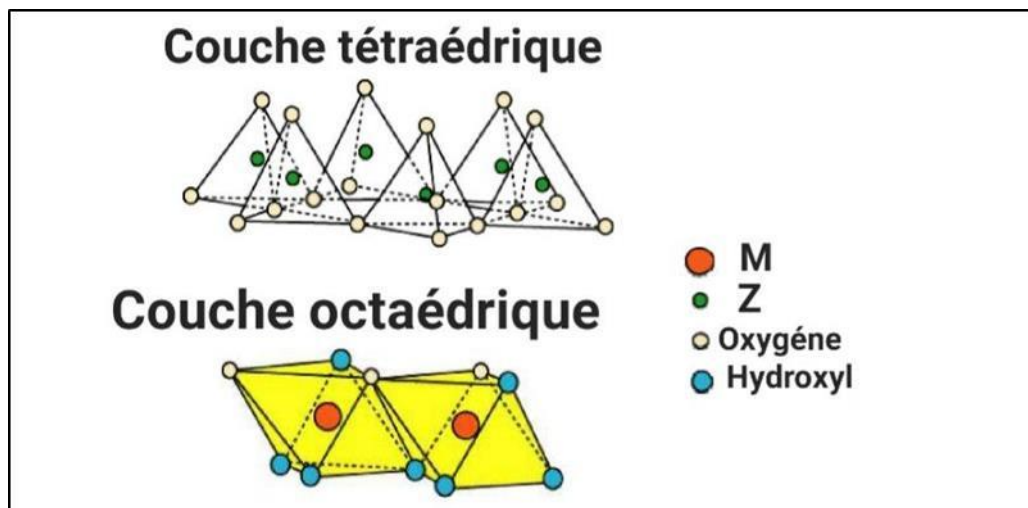


Figure II.1 : Représentation des tétraèdres et des octaèdres [M.Gautier].

Le critère le plus simple et le plus employé pour la classification est le mode d'agencement des tétraèdres et des octaèdres constitutifs des argiles, [I. Belfar, B.Ben Saoucha]. deux grandes classes sont définies :

Les argiles phylliteuses.

Les argiles fibreuses.

Les argiles phylliteuses sont les plus répandues et les plus étudiés. Il s'agit de phyllosilicates minéraux formés par l'empilement de feuillets, chaque feuillet (épaisseur de 7, 10 et 14Å) est lui-même constitué de plusieurs couches.

Les argiles fibreuses (interstratifiés) sont des minéraux dans lesquels les feuillets sont alternés ou, le plus souvent, les espaces interfoliaires sont différents.

Les phyllosilicates 1 :1 ou T-O : dont les feuillets sont constitués d'une couche tétraédrique (T) suivie d'une couche octaédrique (O), L'équidistance interfoliaire est de 7.15 Å (par exemple la kaolinite halloysite, dickite et nacrite) [N.Charles, S.Colin ,T. Gutierrez, G.Lefebvre].

Les phyllosilicates 2 :1 ou T-O-T : L'équidistance interfoliaire est de 10Å selon le contenu de l'interfeuillet. A ce type correspondent les groupes du talc, des smectites, des illites, des vermiculites et celui des micas, ces argiles peuvent se trouver dans trois situations différentes [I. Belfar, B.Ben Saoucha] :

Pas de substitution isomorphe.

Des substitutions octaédriques.

Des substitutions tétraédriques.

Les phyllosilicates 2 :1 :1 : si tous les groupes anioniques sont des groupes hydroxyles OH, la couche est complète et apparaît seule, pouvant alterner avec des feuillets silicatés comme dans les chlorites. Les chlorites sont ainsi formées d'un feuillet de type 2 :1 et d'une couche de brucite $Mg(OH)_2$ ou gibbsite $Al(OH)_3$, d'épaisseur 14 Å [M.Gautier].

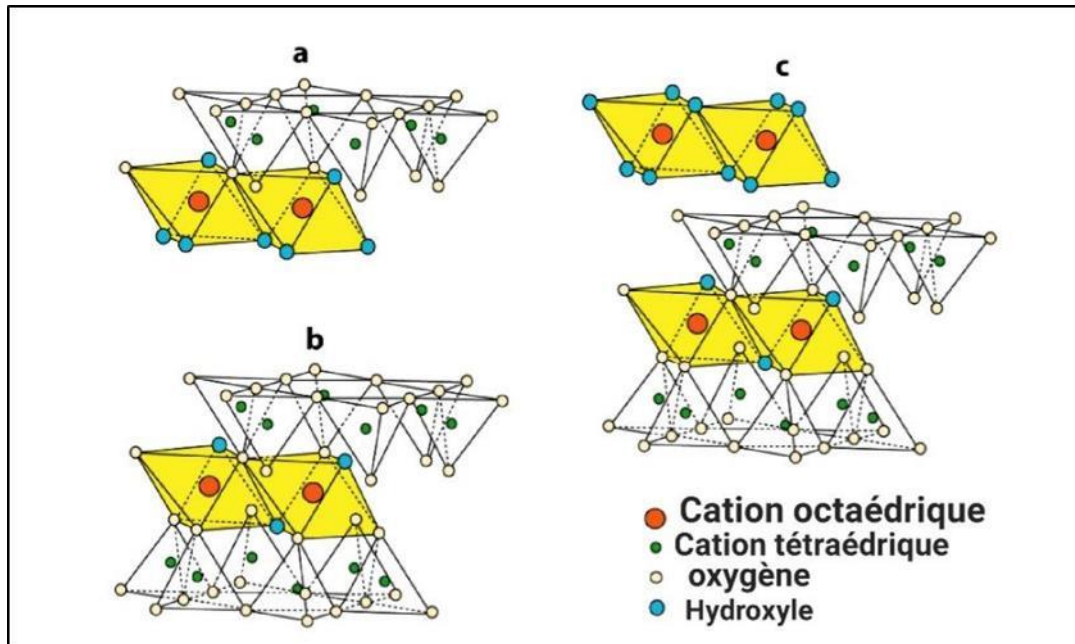


Figure II.2 : Agencement des couches octaédriques et tétraédriques dans les phyllosilicates. Feuillet de type 1 :1 (a), feuillet de type 2 :1 (b) et feuillet de type 2 :1 avec une couche brucitique ou gibbsitique (c) [M.Gautier].

Les minéraux argileux les plus utilisés dans l'industrie des réfractaires sont de type 1 :1 ou de type 2 :1 (Le tableau II.1 présente certains types de ces argiles).

La famille des minéraux phylliteux (ou phyllosilicates) est celle à laquelle appartient le plus grand nombre d'espèces. Ce sont des silicates à structures en feuillets dans lesquelles les tétraèdres occupés par des cations **T** sont liés aux octaèdres par des atomes d'oxygène ou des groupements d'hydroxyles communs. Cette famille peut se décomposer en trois sous-groupes (Tableau II.1) [A.Belbali].

Type	Groupes	Sous-groupes	Espèce
1 : 1	Kaolinite	Kaolinite	Dickite Nacrite Kaolinite Halloysite
		Serpentines	Angorite
2 : 1	Talc	Pyrophyllite	Pyrophyllite
		Talc	Talc
	Micas	Micas Dioctaédriques	Muscovite
		Micas Trioctaédriques	Phloppogite
2 : 1 : 1	Chlorites	Chlorite Dioctaédriques	Chlorite trioctaédriques
		Chlorite Trioctaédriques	Espèces différentes

Tableau II.1 : phyllosilicates utilisés en industrie

II.2. Argiles kaolinitiques

II.2.1 Kaolin

II.2.1.1. Formation du kaolin

Le terme kaolin, dérive du chinois Kao Ling" en français « haute crête », en anglais, le terme est souvent mentionné « China clay » [N.Charles, S.Colin, T.Gutierrez, G.Lefebvre]. Le kaolin est une argile blanche essentielle à la fabrication de la porcelaine chinoise. Cette matière première a été découverte en Europe, permettant ainsi la production d'une porcelaine dure similaire à celle de Chine [A.Belbali]. L'utilisation du kaolin s'est élargie et il entre aussi dans la fabrication du papier, des peintures et plastiques [F.Hubert].

Les argiles et minéraux argileux résultent principalement de l'altération des silicates primaires ou des roches volcaniques sous l'effet de processus physiques et chimiques impliquant l'eau présente à la surface de l'écorce terrestre. Certaines substances dissoutes dans cette eau en augmentent l'acidité, ce qui accélère la décomposition des minéraux primaires et la formation de kaolins dits primaires.

Helgeson et ses collaborateurs ont démontré que la dissolution du dioxyde de carbone atmosphérique lors de l'hydrolyse peut tripler la vitesse de décomposition des feldspaths potassiques et favoriser la formation de la kaolinite [Helg, Garrels, Mackenzie].

II.2.1.2. Composition chimique et minéralogique

Le kaolin est composé principalement de silice et d'alumine (forment en masse plus de 80% de l'argile), s'ajoutent les impuretés tels que : les sulfures, l'oxyde et l'hydroxyde de fer (l'hématite Fe_2O_3 , la magnétite Fe_3O_4), l'oxyde de manganèse MgO , la matière organique. Sa qualité dépend du rapport silice/alumine d'une part et de la quantité et la nature des impuretés d'autre part. L'importance du kaolin réside dans son contenu en pourcentage massique d'alumine. Si le taux d'alumine est supérieur à 38% à l'état cru, le kaolin est une argile réfractaire, dont le taux en impuretés (Fe_2O_3 , MgO , $CaO...$) est inférieur ou égal à 3% et le rapport massique SiO_2/Al_2O_3 avoisinant 1.1.

Le kaolin est généralement de couleur blanche et peut avoir d'autres couleurs (jaune, orangé, rouge ou vert). Cette coloration est due à la présence des hydroxydes de fer. La classification des kaolins se fait selon la teneur en Al_2O_3 du matériau calciné. Les argiles à faible teneur en alumine (< 30% en masse) sont utilisées dans les terres cuites tandis que les argiles riches en

alumine (> 30 % en masse) sont réservées aux céramiques réfractaires. [A.Belbali], [I.Belfar, B.Ben Saoucha].

II.3.1. Kaolinite

Le nom de kaolinite a été réservé à la partie cristalline du kaolin et de certaines argiles [Rich 95]. En industrie, les argiles constituées en majorité de kaolinite sont appelées argiles kaolinitiques. A côté de la kaolinite, les argiles kaolinitiques peuvent contenir l'halloysite. Cette dernière se distingue de la kaolinite par la présence de molécules d'eau en positions interfoliaires et par sa propriété de former des feuillets enroulés sur eux même [Meun 05]. Ces deux minéraux se trouvent en général, dans les sols développés à partir des cendres volcaniques ou des sols tropicaux. L'halloysite est formée dans un environnement où les fluides ont de hautes concentrations ioniques. Cet environnement favorise l'accroissement désordonné et rapide des feuillets. Les défauts cristallins résultants sont énormes. Ce désordre de structure favorise l'hydratation de l'halloysite [Meun 05].

La composition minéralogique d'une kaolinite, en masse à l'état pur, est de 46.5% de silice, 39.5% d'alumine et 14% d'eau et sa densité est de 2.6 g/cm³. La formule structurale théorique de la kaolinite $\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ peut être exprimée sous la forme $(2\text{SiO}_2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{H}_2\text{O})$. Elle correspond à la composition chimique pondérale : $\text{SiO}_2 \approx 46\%$; $\text{Al}_2\text{O}_3 \approx 40\%$; $\text{H}_2\text{O} \approx 14,0\%$. Une étude sur la kaolinite sera évoquée dans ce qui suit [M.Abdelhak].

II.3.2. Impuretés dans les argiles kaolinitiques

Fer : Le fer présent dans le kaolin se trouve principalement sous forme d'oxyhydroxyde et/ou d'oxyde, sauf en présence de matières organiques. Le tableau II.2 présente les différentes formes de fer dans les kaolins. Ces espèces minérales subissent des transformations durant le traitement thermique ou se combinent partiellement avec les phases silico-alumineuses dominantes. L'influence de ces minéraux sur la mullitisation des kaolins a été étudiée.

Non	Goethite	Lépidocrocite	Akaganéite	Magnétite	Hématite
Formule	$\text{FeOOH}\alpha$	$\text{FeOOH}\gamma$	$\text{FeOOH}\beta$	$\text{Fe}_3\text{O}_4\gamma$	$\text{Fe}_3\text{O}_4\alpha$

Tableau II.2: Minéraux ferreux, principaux pics en diffraction X.

Sels de chaux et de magnésie : On trouve la chaux dans les argiles sous forme de calcaire (CaCO_3) ou de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), tandis que la magnésie se présente sous forme de carbonate (MgCO_3) ou de serpentine ($2\text{SiO}_2\text{MgO} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

La présence de chaux et de magnésie réduit la plasticité des argiles tout en amplifiant leur perte lors de la cuisson. Lorsqu'elles ne parviennent pas à se fusionner, ces dernières peuvent provoquer des défauts (tels que l'éclatement des produits) lors de leur réhydratation. Lorsqu'elles se mêlent, elles ont une action fondante énergique [Jour 69] [A.Belbali].

Le quartz : joue un rôle significatif dans la résistance mécanique des pièces crues. La forme de la silice après cuisson influence également les propriétés thermiques des céramiques silicatées. En effet, le quartz et la cristobalite ont des effets différents sur la dilatation des pièces. De plus, le quartz peut entraîner une détérioration des propriétés mécaniques du produit fini en raison d'une variation dimensionnelle brusque ($\Delta L/L \approx 0.35\%$) associée à la transformation réversible du quartz α vers le quartz β observée autour de 573 °C. En revanche, la transition de la cristobalite α à β est généralement moins dommageable pour le produit final [N.Bouzidi].

Alcali : Ils sont généralement issus de la muscovite présente dans les argiles, parfois des feldspaths non dégradés. Quand la concentration en alcalis est forte, la phase vitreuse se renforce tandis que la teneur en cristobalite se réduit [A.Belbali].

Matière organique : Les argiles renferment souvent des substances organiques issues de la dégradation de la végétation (feuilles, branches, etc). Lors de la cuisson, les substances organiques entraînent une diminution de la masse. En outre, en tant qu'agents réducteurs, elles interviennent sur les sels ferreux, les rendent solubles et favorisent leur élimination [A.Belbali].

II.4. Etude de la kaolinite

II.4.1. Morphologie de la kaolinite

La kaolinite possède une structure cristalline relativement régulière, avec des cristaux dont les dimensions varient sensiblement. Leur diamètre est compris entre 0,04 et 5 μm , tandis que leur épaisseur va de 10 à 200 nm. Les cristaux se présentent généralement sous forme de plaquettes hexagonales (comme illustré dans la Figure II.3), mais peuvent aussi être allongés ou se réduire en simples losanges. Ces cristaux sont délimités par des faces basales (001) et des faces latérales (110) et (020). Les faces latérales comportent des groupes Si-OH ou Al-OH, qui peuvent se dissocier de manière amphotérique en fonction du pH de l'environnement [F.Rouabhia].

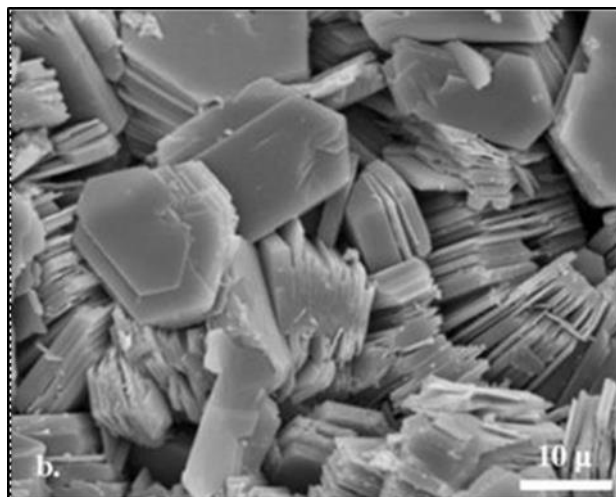


Figure II.3: Morphologie d'une kaolinite bien cristallisée [A.Belbali].

II.4.2. Structure de la kaolinite

La kaolinite fait partie de la famille des phyllosilicates hydratés et présente une structure de type 1:1, avec une distance basale d'environ 7 Å. Elle est dioctaédrique, ce qui signifie que dans chaque couche octaédrique, un site sur trois est vide, formant ainsi un site lacunaire, tandis que les deux autres sites sont occupés par des cations d'aluminium [F.Rouabhia].

Les feuillets élémentaires de la kaolinite sont constitués d'un empilement alterné d'une couche de tétraèdres de silice et d'une couche d'octaèdres d'hydroxyde d'aluminium. Les faces basales de ces feuillets présentent deux types : soit des ions oxygène organisés en un réseau hexagonal, soit des groupements hydroxyles disposés de manière compacte. La kaolinite cristallise dans un système cristallographique triclinique de type C1. Selon les analyses structurales, les paramètres cristallographiques de la maille sont les suivants : $a \approx 5,16 \text{ \AA}$, $b \approx 8,95 \text{ \AA}$, $c \approx 7,41 \text{ \AA}$, $\alpha \approx 91,7^\circ$, $\beta \approx 104,9^\circ$, $\gamma \approx 89,9^\circ$ [F.Rouabhia].

Dans la structure de la kaolinite, les charges sont réparties de manière à ce que le feuillet élémentaire soit électriquement neutre. Ainsi, l'espace interfoliaire ne contient pas de cations. Le plan d'oxygène d'un feuillet se trouve en face des groupes hydroxyles du feuillet voisin, ce qui entraîne un clivage facile le long du plan (001), produisant des lamelles inélastiques. En raison de sa structure finement cristallisée, il est difficile de déterminer si les variations de composition sont dues à des substitutions ou à des impuretés, bien qu'il semble que les substitutions soient très limitées [F.Rouabhia].

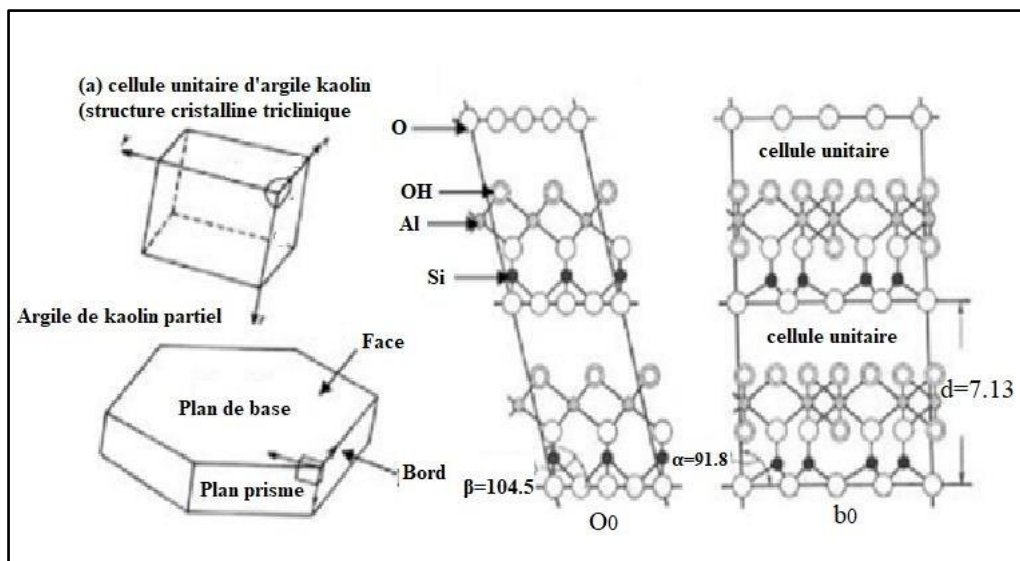


Figure II. 4 : structure foliaire de la kaolinite [A.Belbali].

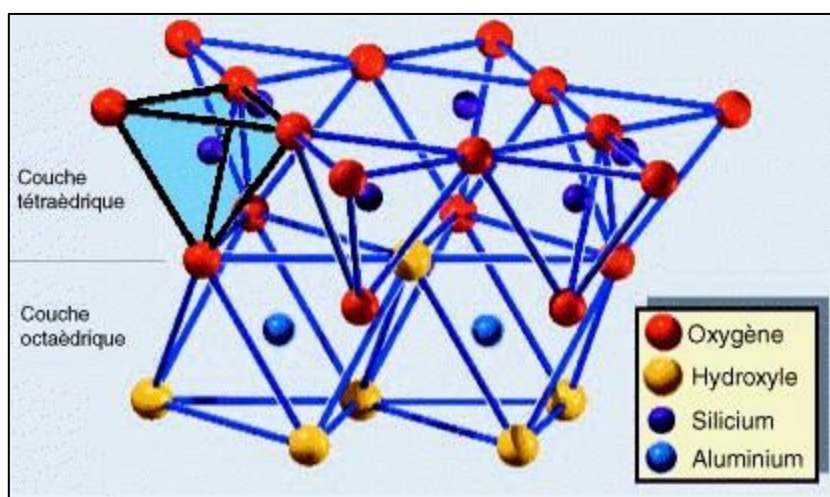


Figure II.5 : structure cristallographique de la kaolinite [Alip 79]

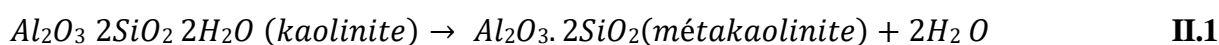
II.4.3. Transformations de la kaolinite

Lors du traitement thermique, l'argile kaolinitiques subit une série de transformations significatives et irréversibles à chaque plage de température, ce qui conduit à des matériaux présentant des caractéristiques structurales, physiques, mécaniques et thermodynamiques complètement différentes. Le traitement thermique des kaolins peut entraîner jusqu'à quatre types de changements [Chen 00, Brin 57, Bell 95].

La déshydratation, qui est un processus exothermique, n'est pas une transformation fondamentale dans le cadre du traitement thermique. Elle survient autour de 120°C et est causée par l'élimination

de l'eau hygroscopique. Ce phénomène entraîne un rapprochement des particules, mais sans altérer la structure cristalline [A.Belbali].

Le deuxième changement est un processus endothermique qui survient à partir de 600°C, appelé déshydroxylation. C'est une réaction où les groupes hydroxyles structuraux sont éliminés de la kaolinite. Ce phénomène se manifeste par un pic endothermique observé entre 400 et 600°C, avec un pic spécifique à 497,80°C pour le kaolin DD3. Cette transformation conduit à la conversion de la kaolinite en méta-kaolinite avec la libération de l'eau de constitution, selon la réaction suivante [Chen 00, Brin 57, Bell 95] :



Le départ de l'eau intégrée dans la structure provoque un retrait rapide accompagné d'une modification de la structure cristalline, entraînant ainsi des transformations irréversibles lorsque la température dépasse 500°C. Ce processus est régulé par la diffusion de l'eau le long des plans des feuillets, ce qui conduit à une désorganisation progressive de la structure, partant des couches externes des feuillets cohérents vers leur intérieur [Dion 94].

L'élimination de l'eau de constitution entraîne un retrait rapide de la matière, accompagné d'une modification de la structure cristalline, ce qui conduit à des transformations irréversibles après une cuisson au-delà de 500°C. Ce processus d'élimination de l'eau est régi par la diffusion à travers les plans des feuillets, où une désorganisation progressive de la structure a été observée, débutant à partir de l'extérieur des ensembles cohérents de feuillets et s'étendant vers l'intérieur [A.Belbali].

La déshydroxylation affecte principalement les feuillets octaédriques $Al(O, OH)_6$, mais a peu d'impact sur les feuillets tétraédriques SiO_4 . On suppose que les groupes hydroxyles situés à l'extérieur sont davantage exposés aux influences extérieures que ceux situés à l'intérieur. En conséquence, les hydroxyles externes des couches octaédriques sont plus facilement éliminés lors du chauffage. Les hydroxyles qui subsistent jouent un rôle crucial dans la stabilité de la structure globale en maintenant l'intégrité des feuillets tétraédriques SiO_4

[Chen 04, Lee 99] [H.Bounib]. Plusieurs chercheurs ont utilisé des techniques telles que la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) et la spectrométrie de résonance magnétique nucléaire (RMN) à l'état solide pour les isotopes ^{29}Si et ^{27}Al afin d'analyser la métakaolinite après le phénomène de déshydroxylation. Ils ont trouvé que, après ce processus

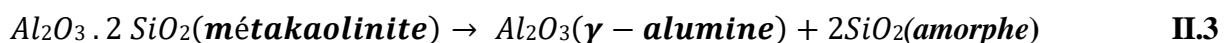
endothermique, environ 10 % des groupes hydroxyles restent présents dans la structure de la métakaolinite. Cela signifie que bien que la déshydroxylation élimine une grande partie des hydroxyles, une petite proportion subsiste encore dans la phase transformée, ce qui peut influencer les propriétés du matériau [Brow 85, Joue 01, Lee 99].

La déshydroxylation se complète uniquement à des températures élevées, comprises entre 900°C et 1000°C. Elle est également affectée par divers facteurs, tels que la taille des particules, le degré de cristallinité de la kaolinite, la pression de vapeur à haute température, la vitesse de chauffage et la présence d'impuretés [H.Bounib].

La troisième étape, qui correspond à un effet exothermique observé à 980°C, entraîne une transformation structurale sans perte de masse. Cette transformation est attribuée à la cristallisation de l'alumine γ ou de la promo-mullite (mullite primaire). Selon certains chercheurs [Joue 84], la formation de l'alumine γ est une étape essentielle pour la mullitisation, tandis que d'autres soutiennent que la méta-kaolinite se transforme d'abord en une structure de type spinelle, libérant de la silice amorphe, comme le montrent les réactions suivantes [A.Belbali] :



Ou

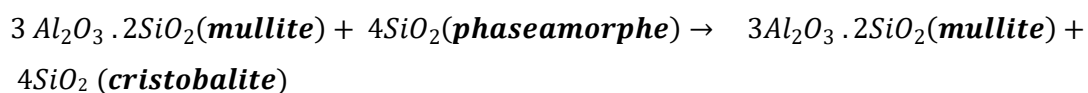
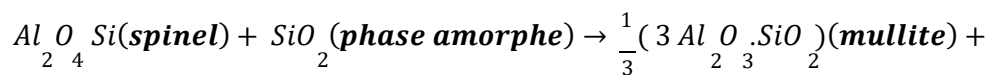


Lee et Moon [Lee 98] ont observé la formation de la mullite dès 940°C, tandis que Thomas et Liu [Liu 94] n'ont détecté des cristaux de cette phase qu'après une heure de traitement à 1150°C. La formation de la mullite et la transformation de la silice en cristobalite ne dépendent pas seulement de la température, mais aussi du taux d'alumine et des impuretés présentes dans l'argile kaolinitiques [Boch 01].

La silice subit une transformation partielle en cristobalite, tandis qu'une autre fraction se combine avec des fondants pour former un verre complexe qui enveloppe les cristaux de mullite. Selon Lalithanbika, un contenu élevé en phase vitreuse favorise la cristallisation et la croissance de la mullite. Par ailleurs, Okada a confirmé que la présence de zones riches en

alumine encourage la formation de la phase spinelle. En étudiant un xerogel SiO₂-Al₂O₃, ils ont démontré que la quantité de cette phase augmente avec la teneur en Al₂O₃ du matériau initial. [A.Belbali].

À 1050 °C, la phase spinelle se transforme en mullite, tandis que la silice amorphe se convertit en cristobalite, entraînant un pic exothermique. Entre 1200 et 1250 °C, la formation de la mullite se produit, généralement accompagnée d'un léger pic exothermique. Ce phénomène résulte de la transformation rapide de la silice en cristobalite et de la réaction entre Al₂O₃ et SiO₂ pour former de la mullite. La distinction entre la mullite et la pro-mullite se trouve dans leur morphologie et la taille des cristaux. [A.Belbali].



À 1600 °C, la silice se présente sous forme amorphe, ce qui favorise considérablement la formation de la mullite [A.Belbali].

II.4.4. Phases de la kaolinite

II.4.4.1. Métakaolinite

La métakaolinite ne produit pas de pics lors de la diffraction aux rayons X, mais génère un dôme très étendu. Situé autour de 3.8 Å. Cela implique une absence de structure sur le long terme, donc c'est un Formé sur des données jusqu'en octobre 2023. Cependant, la diffraction d'électrons révèle qu'il persiste encore quelques Caractéristiques de cristallinité : une organisation à courte portée est maintenue.

La déshydroxylation affecte le feuillet Al (O, OH) octaédrique, mais n'a aucun impact. Sur le feuillet SiO₄ tétraédrique, 10 % des hydroxyles subsistent même à une température de 920°C dans la métakaolinite [Make 85, Roch 90], se référant aux hydroxyles internes, ceux de la couche tétraédrique, facilitant l'acquisition de diagrammes de diffraction électronique.

II.4.4.2 Spinelle

Apparaît à 920 °C et persiste jusqu'à 1150 °C [Okad.86]. Elle se forme avant le pic exothermique associé à la formation de la mullite à 980 °C. En raison de sa petite taille et de sa faible cristallinité, la nature exacte de la phase spinelle $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ a été difficile à déterminer [Brin.59]. La composition chimique de la phase spinelle varie selon les sources :

$3\text{SiO}_2 \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow$ Réseau cationique composé d'Al et de Si [Srik.90, Brin.59, Yama.62].

$2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$ [Chak.78, Chak.91].

$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (Alumine- γ) [Brow.85, Mazu83]

II.4.4.3 La mullite

La mullite, ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) est un matériau de plus en plus important dans les applications électroniques, optiques et structurelles à haute température. Ce composé chimique se distingue dans de nombreuses industries en raison de ses propriétés uniques, telles que sa stabilité à haute température et sa capacité à résister dans des environnements difficiles. Sa solubilité solide varie entre 58 % et 76 % d'alumine, en fonction de l'organisation des vides d'oxygène et de la méthode de préparation utilisée. De plus, la mullite présente un comportement de fusion incongruente, ce qui en fait un matériau particulièrement important pour les applications industrielles. D'un point de vue structurel, le mélange au niveau atomique est idéal pour la préparation à basse température (inférieure à 1000°C), mais pour les processus nécessitant une densification à des températures plus élevées (comme 1250-1500°C), les précurseurs ségrégués sont plus appropriés. En termes de propriétés mécaniques, la mullite polycristalline conserve 90 % de sa résistance à température ambiante jusqu'à 1500°C, ce qui la rend très résistante à la déformation et à l'expansion thermique. En outre, elle possède un faible coefficient diélectrique, ce qui lui permet d'être utilisée dans des applications de substrats de haute performance et dans des matériaux optiques, notamment dans son utilisation comme matériau de fenêtre dans la gamme de l'infrarouge moyen [Ilhan A. A- Daniel M. D-Mehmet .S].

II.4.4.4 La phase vitreuse

À des températures comprises entre 1200 et 1300°C, certaines composantes de la kaolinite, notamment la silice, commencent à fondre et forment une phase vitreuse [Brindley_Nakahira]. Cette phase vitreuse est principalement composée de silice (SiO_2) et d'alumine (Al_2O_3), avec des traces possibles d'oxydes métalliques comme le fer et les alcalins [Brindley_Nakahira]. La

quantité de phase vitreuse dépend de la température et du temps de chauffage [Brindley _ Nakahira].

✓ **Effet de la phase vitreuse sur les propriétés des matériaux En céramique**

La phase vitreuse améliore la cohésion, réduit la porosité, ce qui augmente la résistance mécanique et diminue l'absorption d'eau [Worr]. Dans les matériaux réfractaires : Une quantité excessive de phase vitreuse peut être nuisible car elle réduit la résistance thermique et chimique du matériau [Worr].

II.5. Application industrielle de kaolin

Le kaolin est utilisé dans de nombreuses applications. C'est un minéral unique qui reste chimiquement inerte sur une plage relativement large de pH et possède un excellent pouvoir couvrant lors de son utilisation comme pigment ou agent d'étirement pour les applications de revêtement et de bouchage. Il est également non abrasif et possède une faible conductibilité thermique et électrique. Ses deux plus importantes applications sont le couchage du papier pour masquer les fibres de la pâte à papier et la production de produits céramiques de haute qualité. Il est également utilisé dans de nombreux autres processus industriels : pour la fabrication de peinture armature de renforcement des fibres de verre ainsi que pour la fabrication des produits cosmétiques et pharmaceutiques (Tableau II.3). Le kaolin fond à des températures élevées ; par conséquent, on l'utilise comme isolant thermique. La structure particulière du kaolin permet de l'utiliser comme pigment de couche dans le papier, ce qui augmente la brillance, le lissé et la blancheur du papier tout en prévenant le dégorgement de l'encre. Le kaolin est également utilisé comme matière de charge et revêtement pour les articles en carton et les encres. En raison de sa plasticité, de sa couleur pâle et de sa résistance. Le kaolin est largement utilisé dans la fabrication des ustensiles en porcelaine, des isolants électriques, des sanitaires et des matériaux réfractaires [Ants 01, Ogac 05]. L'usage du kaolin dans l'industrie des réfractaires provient du fait qu'il présente l'avantage d'être très peu onéreux et disponible en gisements facilement exploitables [Koll 02, Saad 93]. Le kaolin calciné (chamotte) est utilisé dans la formulation de ces matériaux pour réduire les retraits et augmenter la réfractarité [Murr 00]. Le tableau I.4 donne un aperçu général sur les différentes formes d'utilisation du kaolin avec leurs domaines industriels.

Rôle	Utilisation
Couchage	Couchage de papier, peinture, encre
Charge	Charge minérale de papier, caoutchouc, plastiques, polymères, adhésif, textiles
Matières premières	Catalyseurs, fibre de verre, ciment industrie du bâtiment, céramique, plâtre, filtre, émaux, fonderie, production des composés chimiques d'aluminium, production de zéolite
Diluant, adsorbant ou transporteur	Polissage, engrais, insecticide, détergent, produits pharmaceutiques, produits de beauté, tannerie de cuirs.

Tableau II.3 : Utilisation industrielle du kaolin [Murr 99]

A partir de plusieurs références s'étalant de 1966 à 2007, Wetshondo [Wets 12] a rassemblé les principaux groupes de matériaux argileux et leurs applications industrielles (Tableau II.4).

Groupe	Minéral type	Principales applications
Kaolinite-serpentine	Kaolinite Halloysite	Charge minérale, revêtement et coloration des papiers, caoutchouc, céramique, pharmacologie
Smectites	Montmorillonite Bentonite	Pharmacologie, catalyse chimique, composites organo-minéraux, liants des fonderies, céramique, industrie des hydrocarbures, cosmétiques (savons, pommades, champoings, crèmes)
	Talc Pyrophyllite	Céramique, fibres organo-minéraux, cosmétique, métallurgie
Minéraux fibreux	Palygorskite (attapulgite) Sépiolite	Agro-alimentaire, charge minérale, pharmacologie, fertilisant
Argiles banales « Ball clay »	Kaolinite + illite +quartz + oxydes, ...	Céramique, charge minérale, ...

Tableau II.4 : Principaux secteurs d'utilisation de minéraux argileux [Wets 12]

II.6. Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons présenté une vue d'ensemble détaillée sur les minéraux argileux, en mettant l'accent sur leurs origines, leurs structures cristallines et leurs propriétés physico-chimiques. Nous avons ensuite orienté notre étude vers une catégorie particulière de ces minéraux : les argiles kaolinitiques. Une attention particulière a été accordée à la kaolinite, principal constituant de ces argiles, à travers l'analyse de sa composition, sa genèse, ainsi que ses comportements dans différents contextes. Enfin, nous avons examiné les diverses applications industrielles du kaolin, notamment dans les domaines de la céramique, du papier, des cosmétiques et des matériaux de construction, en soulignant son importance économique et technologique.

Chapitre III :
Procédures
expérimentales

III .1. Introduction

Dans ce chapitre, on présente les différents matériaux utilisés pour la préparation des échantillons et la procédure expérimentale suivie. Ce chapitre est consacré également à la description des dispositifs d'élaboration en premier lieu et des techniques de caractérisation par la suite.

L'étude a pour objectif de déterminer le pourcentage optimal de chamotte à intégrer dans le mortier, afin d'allier une résistance mécanique acceptable et une bonne performance thermique. Toutefois, il est important de noter que l'incorporation de chamotte peut affaiblir la résistance mécanique du matériau. L'enjeu principal consiste donc à formuler un mortier à la fois résistant aux hautes températures et mécaniquement durable, assurant ainsi la stabilité des structures. Ce chapitre est consacré aux essais en laboratoire réalisés sur le sable, la chamotte, le ciment, ainsi que sur le mortier à l'état frais et à l'état durci, au niveau de laboratoire LNHC SKIKDA.

III .2. Matériaux utilisés

Le matériau étudié est un mortier composé de sable, ciment, eau et fumé de silice comme ajout et un adjuvant. Le matériau a été choisi pour pouvoir comparer le comportement thermomécanique et voir si une transposition des résultats est possible d'un matériau à l'autre.

III .3 Caractérisation des constituants

- Ciment CRS de Biskra
- Sable de carrière Ain Abid Constantine
- Eau de gâchage
- Fumé de silice
- Adjuvant

III .3.1 Ciment

Le **ciment** CEM I 42.5N-LH/SR5 NA442 **CRS SAC** est un **ciment** gris résistant aux sulfates, résultat de la mouture d'un clinker contenant un faible taux d'aluminates de calcium avec une proportion de gypse inférieure à celle d'un ciment portland. C'est un **ciment** conforme à la norme en vigueur (NA 442 :2013). Les caractéristiques techniques de ciment Mokaouem et la composition chimique du ciment (%) sont illustrés dans les tableaux **III-1 et III-2**.



Figure III 1: Le ciment CRS Mokaouem Biskra

Propriétés physiques	Consistance normale (%)	25 à 28
	Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g) (NA231)	3200 à 3800
	Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1000
	Expansion (mm)	≤ 2.0
	Chaleur d'hydratation	< 270 j/g
Analyse chimique	Pert au feu (%) (NA5042)	0.5 à 3%
	Teneur en sulfates (SO ₃)%	1.8 à 3
	Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1.2 à 3
	Teneur en chlorures (NA5042) (%)	0.01 à 0.05
Composition minéralogique	Taux d'aluminate C ₃ A	< 3.0 %
Temps de prise à 20°	Début de prise (min)	>60
	Fin de prise (min)	240à400
Résistance à la compression	2 jours (Mpa)	≥10
	28 jours (Mpa)	≥42 .5

Tableau III.1 Les caractéristiques techniques de ciment utilisé

Eléments	Garanties NA.442	Teneur %	Moyenne obtenue
SiO ₂	/	20-22	21.45
Al ₂ O ₃	/	5-6	05
Fe ₂ O ₃	/	2-6	05
CaO	/	55-65	64
MgO	/	1-130	1.25
K ₂ O	/	0.3-0.6	0.4
Na ₂ O	/	0.1-0.16	0.05
SO ₃	≤ 3.5%	1.8-2.5	2
Cl	≤ 0.1%	0-0.01	0.008
PAF(NA235)	/	≤5	3.5
CaO L	/	0.8-2.2	0.9
Résidus insolubles	/	≤5	≤5

Tableau III.2 : Les composants chimiques de ciment utilisé

III .3.2 Sable

Le sable, principal composant granulaire, joue un rôle déterminant dans les propriétés du béton et du mortier. Dans notre étude expérimentale, nous avons utilisés un sable de carrière extrait de la carrière de Ain Abid (wilaya de Constantine). Les caractérisations granulométriques et physiques ont été conduites en conformité avec les normes algériennes en vigueur et les standards européens correspondants



Figure III.2 : Sable de la carrière de Ain Abid wilaya de Constantine.

III 3.3 Eau de gâchage

L'eau de gâchage est l'eau ajoutée au mélange de liant et de granulats afin de déclencher la prise du mortier et de lui conférer sa plasticité, ce qui conditionne son ouvrabilité. La qualité de cette eau doit impérativement répondre à la norme algérienne qui se base à la norme européenne NF EN 1008, qui fixe les exigences relatives à sa composition et à sa pureté pour garantir la bonne prise et la durabilité du mortier ou du béton [T. Mimia].



Figure III.3 : Eau potable

III.3.4 Adjuvant utilisé

Un superplastifiant est un type d'adjuvant utilisé dans les mortiers pour améliorer leur ouvrabilité (fluidité) sans augmenter la quantité d'eau. Cela permet d'obtenir un béton plus résistant, plus durable, et plus facile à mettre en place, tout en réduisant le rapport eau/ciment.



Figure III.4: Superplastifiant Walcrete77.

III.3.5 Le fumé de silice

La silice en fumée est un coproduit issu de la production du silicium et de divers alliages de silicium. Il s'agit d'une silice amorphe, quasi pure, pouvant contenir un faible pourcentage d'impuretés (figure III.5) [Y. Biskri].



Figure III.5: La fumé de silice

Les caractéristiques techniques de superplastifiant et ses compositions chimiques sont illustrés dans les tableaux **III-3** et **III-4**.

Etat physique	Poudre
Couleur	Argent
Granulométrie	De 0,05 à 0,15 μm
Densité	Environ 0,3
Solubilité dans l'eau	Insoluble

Tableau III.3 : Les données technique du fumé de silice

SiO ₂	> 95 %
CaO	< 0,5
MgO	< 1 %
Fe ₂ O ₃	< 1 %
Al ₂ O ₃	0,5 %
Autres composants	Des traces

Tableau III.4 : Composition chimique de la fumée de silice

III .3.6 La chamotte

C'est un kaolin de Djebel Debbagh (région de Guelma), calciné à 1350°C pendant deux heures. Dans notre étude, nous avons utilisé une chamotte de récupération industrielle (unité de céramique de Guelma). C'est un résidu de broyage dont la taille varie de 1 μm à 3mm. Elle est de couleur gris (Figure III.6). Elle est formée principalement de mullite et de cristobalite. Les travaux de Kolli [Koll 07] donnent des proportions 70% et 30% respectivement.



Figure III.6 : La chamotte

III.4. Formulation du béton

III.4.1 Définition de la formulation

L'élaboration d'un mortier implique de déterminer les ratios des divers composants, dans le but d'obtenir un béton optimisé au niveau de sa structure granulaire et dont les caractéristiques correspondent aux exigences techniques et financières. Donc, toutes les techniques de formulation du béton ne sont pas d'une science exacte, c'est pourquoi une analyse théorique ne mène qu'à une compréhension partielle du problème. Une recherche expérimentale axée sur la mise en œuvre de gâchées successives va permettre d'ajuster et de rectifier la formulation théorique [SABLOCRETE]. Il convient de présenter deux types de formulations, l'une théorique et l'autre expérimentale, basées sur les deux critères principaux des bétons structuraux:

- La résistance mécanique.

- La maniabilité (facilité de mise en œuvre) Pour préparer notre béton de réparation dans notre étude expérimentale, nous avons suivi deux phases distinctes. Pour l'étape initiale : élaborer un mélange de béton de sable ayant une composition fondamentale. Cette formulation se base sur la méthode expérimentale, débutant avec une sélection d'une certaine quantité de ciment, un dosage spécifique de sable et un rapport E/C stable [K.Gadri. and A. Guettala]. Dans le béton, les granulats ont une fonction de structure tandis que la pâte (habituellement le ciment mélangé à l'eau) garantit, initialement, l'adhérence et l'écoulement. De plus, elle sert de colle pour lier les granulats et conférer une certaine longévité au matériau durci. L'un des premiers enjeux lors de la préparation d'un béton est la densité du squelette granulaire,

qui correspond au quotient du volume solide sur le volume total du mélange. Il est crucial d'atteindre une densité maximale pour réduire autant que possible la porosité [SABLOCRETE]. Toutefois, définir cette compacité maximale n'est pas simple et nécessite une modélisation approfondie. À partir de données expérimentales, Caquot a réussi à établir une relation mathématique qui lie le volume des vides d'un mélange granulaire ayant une compacité maximale à son étendue granularité (d/D_{max}) [SABLOCRETE]. Pour ce mélange optimisé, la formule de caquot se présente de la manière suivante :

$$V = V_0 \left(\frac{d}{D_{max}} \right)^{\frac{1}{5}} \quad \text{III.1}$$

V : Volume des vides présente dans le mélange granulaire

V₀ : Valeur expérimentale située entre 0,7 et 0,8 ;

d : La taille du plus petit grain dans la distribution granulaire ;

D_{max} : La taille du plus grand grain de la distribution granulaire.

Cette formule est le fondement de plusieurs techniques de préparation du béton qui visent généralement à établir une courbe granulaire standard [SABLOCRETE].

• **Importance du rapport eau/ciment (FORMULATION)**

Le dosage de l'eau et du ciment constitue un paramètre essentiel dans la formulation du béton. En effet, l'ouvrabilité et la résistance du mélange dépendent fortement de ces deux éléments. Un rapport eau/ciment élevé améliore l'ouvrabilité, facilitant ainsi le remplissage des moules et la mise en place du béton. Cependant, ce rapport doit être soigneusement maîtrisé, car un excès d'eau peut nuire à la résistance finale du béton. Généralement, le rapport massique eau/ciment « moyen » est fixé à 0,55, car il offre un bon compromis entre ouvrabilité et résistance du béton. En effet, ce rapport permet d'obtenir un béton suffisamment plastique pour remplir facilement les coffrages tout en conservant une résistance mécanique satisfaisante.

Cependant, un rapport eau/ciment trop élevé entraîne le phénomène de ressuage, qui se manifeste par l'apparition d'une flaque d'eau à la surface du béton frais. Ce phénomène est dû à la séparation de l'eau excédentaire qui remonte à l'interface entre les granulats et la pâte de ciment. Lorsque cette eau s'évapore, elle laisse des vides entre les granulats et la pâte, ce qui réduit la résistance du béton durci [Marc-Olivier Prévost].

Quantités par volume								
	E/C	V. de sable						
	0,44	623,68					634,84	
		0,00	5%	10%	20%	30%		
Composant	%	V, absolu L					P, spécifique	m³
Sable 0/4	100%	623,68	592,49	561,31	498,94	436,57	2,60	Kg
Chamotte		0,00	31,18	62,37	124,74	187,10	2,50	
Fumé de silice	6%	11,16	11,16	11,16	11,16	11,16	2,24	Kg
Ciment	/	145,16	145,16	145,16	145,16	145,16	3,10	Kg
Eau	/	200	200	200	200	200	1	Kg
Adj	1%	/					/	Kg
Total		980	980	980	980	980	/	Kg

Tableau III 5 : Formulation de béton de sable dosage 450 Kg/m3 (quantité par volume)

Quantité par masse					
	0%	5%	10%	20%	30%
Composition pondérale	Taux de substitutions				
1621,56	1540,48	1459,41	1297,25	1135,09	
0,00	77,96	155,92	311,84	467,76	
25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	
450,00	450,00	450,00	450,00	450,00	
200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	
4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	
2296,56	2297,94	2294,83	2288,59	2282,35	

Tableau III.6 : Formulation de béton de sable dosage 450 Kg/m3 (quantité par masse)

Quantité de mélange = 1000 litres = 1m3											
N°	Notation	Désignation	Taux substitution de chamotte	E /C	C (Kg/m3)	E (L)	Fume de silice (Kg/m ³)	Sable 0/4 (Kg/m ³)	La Chamotte (Kg/m ³)	Adjuvant (Kg/m ³)	Masse volumique réelle
1	M0	Béton témoin	0%	0,49	450	220	25	1 622	0	4,50	2 321
2	M1	M0+5% de la chamotte	5%	0,49	450	220	25	1 540	78	4,50	2 313
3	M2	M0+10% de la chamotte	10%	0,49	450	220	25	1 459	156	4,50	2 310
4	M3	M0+20% de la chamotte	20%	0,49	450	220	25	1 297	312	4,50	2 304
5	M4	M0+30% de la chamotte	30%	0,51	450	230	25	1 135	468	4,50	2 308

Tableau III 7 :Les mélanges de mortier (Quantité de mélange = 1000 litres = 1m3)

Quantités à introduire dans le malxeur: 0.004 L											
N°	Notation	Type de fibres	Taux substitution de chamotte	E /C	C (Kg/m3)	E (L)	Fume de silice (Kg/m ³)	Sable 0/4 (Kg/m ³)	La Chamotte (Kg/m ³)	Adjuvant (Kg/m ³)	
1	M0	Béton témoin	0%	0,44	1,800	0,880	0,100	6,486	0,000	0,018	
2	M1	M0+5% de la chamotte	5%	0,44	1,800	0,880	0,100	6,162	0,312	0,018	
3	M2	M0+10% de la chamotte	10%	0,44	1,800	0,880	0,100	5,838	0,624	0,018	
4	M3	M0+20% de la chamotte	20%	0,44	1,800	0,880	0,100	5,189	1,247	0,018	
5	M4	M0+30% de la chamotte	30%	0,44	1,800	0,920	0,100	4,540	1,871	0,018	
Quantité globale des agrégats					9,000	4,440	0,500	28,215	4,054	0,090	

Tableau III.8 : Les mélanges de béton de sable (Quantités à introduire dans le malxeur: 0.004L)

III.5. Les essais réalisés au laboratoire

III.5.1 L'analyse granulométrique

L'analyse granulométrique consiste à déterminer la taille des grains ainsi que leur répartition en pourcentage pondéral au sein de l'échantillon. Cette méthode s'applique à tous les granulats dont la dimension nominale ne dépasse pas 90 mm, excepté les fillers. Il convient de distinguer la granulométrie, qui mesure la taille des particules, de la granularité, qui décrit l'organisation dimensionnelle des grains dans un agrégat [R. Dupain. J.C.Saint-Arroman].

L'essai consiste à classer les grains de l'échantillon à l'aide d'une série de tamis superposés, dont les dimensions des mailles décroissent du haut vers le bas. Le matériau analysé est disposé sur la partie supérieure des tamis, puis la séparation des particules est obtenue par vibration manuelle de la colonne de tamis [R. Dupain, J.C. Saint-Arroman]. Avant le criblage, l'échantillon est rincé sur un tamis de 0,063 mm afin d'éliminer les fines et d'éviter l'agglomération des particules, qui pourrait fausser les résultats. L'analyse de la granulométrie est effectuée sur la partie qui n'a pas passé le tamis de 0,063 mm (figure III.7).



Figure III.7: Série des tamis

Préparation de L'échantillon

La quantité à employer doit satisfaire à diverses exigences qui sont opposées : Pour que l'échantillon soit représentatif, il en faut une quantité relativement importante. On doit utiliser une quantité suffisamment petite pour que la durée de l'épreuve soit raisonnable et que les tamis ne se retrouvent pas obstrués au point d'être non fonctionnels. On s'assurera spécifiquement que l'élimination signalée en grammes sur chaque tamis à la fin du processus de tamisage ne dépasse pas

$$\frac{A\sqrt{d}}{200}$$

III.2

A : la surface du tamis en mm²

d : la dimension des mailles du tamis en mm.

Dans la pratique, la masse de la prise d'essai sera au moins de 200 g et telle que :

$$M_1 \geq \frac{D^2}{100}$$

III.3

Pour des agrégats ayant une densité absolue située entre 2 et 3 g/cm³ (où M₁ est donné en Kg et D en mm.

Pour des granulats de densité différente, on visera à obtenir un volume de l'échantillon équivalent à celui utilisé pour les granulats standard [R. Dupain. J.C.Saint-Arroman]..

Dans le cadre de notre étude, nous avons effectué une analyse granulométrique **sur** deux échantillons différents le premier est du sable, le second est de la chamotte.

III.5.2 Masse volumique absolue et apparente

La détermination des masses volumiques apparente et absolue des matériaux granulaires (tels que le sable, le gravier ou le ciment) est cruciale en génie civil, notamment pour l'élaboration précise des bétons et mortiers (figure III.10) [D.Dubain.S.Poudevigne].

A. La masse volumique Absolue (ρ_a)

La masse volumique absolue (ρ_a) représente la masse de matière solide (hors vides intergranulaires et pores ouverts) contenue dans un volume donné de matériau. L'essai consiste à déterminer la masse d'un échantillon séché, puis à mesurer le volume réel occupé par ses particules solides, généralement par immersion dans un liquide inerte (eau ou autre fluide non réactif) [D.Dubain.S.Poudevigne]. Et pour mesurer cette masse volumique Suivez les étapes ci-dessous:

Mesurer une quantité de substance sèche.

- Insérer ce matériau dans une fiole ou un pycnomètre rempli d'eau.
- Estimer le volume d'eau déplacé (qui représente le volume solide du matériau).

Utilisez cette formule :

$$\rho_a = \frac{M_{\text{matière sèche}}}{v_{\text{total}}}$$

III.4

B. La masse volumique apparent (ρ_{app})

La masse volumique apparente tient compte des vides entre les particules. Elle est définie comme le rapport entre la masse sèche du matériau et son volume global, incluant à la fois les grains solides et les espaces interstitiels [D.Dubain.S.Poudevigne].



Figure III.8 : La masse volumique apparente et absolue

Et pour mesurer cette masse volumique apparente Suivez les étapes suivantes :

- Verser le matériau sec dans un récipient de volume connu sans tasser (méthode dite "à l'état lâche").
- Peser le matériau dans le récipient.

Appliquer cette formule :

$$\rho_{app} = \frac{M_{matière\ sèche}}{v_{total}}$$

III.5

III.6. Les essais réalisés au laboratoire sur mortier

III.6.2 A l'état durci

A. L'essai de compression

Mesurer la contrainte maximale supportable par un matériau soumis à une charge de compression uni axiale jusqu'à sa rupture complète (voir figure III.12). [R. Dupain. J.C.Saint-Arroman].



Figure III 10 : L'essai de compression.

L'expérience implique d'exercer progressivement une pression axiale sur un échantillon (qui peut être un cube, un cylindre ou un prisme) ; figure III.13 jusqu'à ce qu'il se brise. Le calcul de la résistance se fait par le rapport de la charge maximale tolérée et de l'aire de la section de l'éprouvette [R. Dupain. J.C.Saint-Arroman].

$$\sigma_c = \frac{F_{max}}{A}$$

III.6



Figure III 11: Les éprouvettes après durcissement.

A. L'essai de traction

L'essai a pour but :

- Évaluer la résistance à la traction indirecte du béton sablonneux.

- Examiner le comportement du matériau sous tension, en complément des informations recueillies lors de l'essai de compression.
- Apporter des renseignements pour la conception et l'étude des structures en béton de sable, en considérant sa vulnérabilité à la traction (figure III.14) [R. Dupain. J.C.Saint-Arroman].



Figure III.12 : L'essai de traction

- L'expérimentation implique l'exercice d'une pression sur un cylindre de béton de sable disposé horizontalement.
- Le poids de compression génère des tensions de traction qui sont perpendiculaires à l'orientation de la charge appliquée.
- L'évaluation de la résistance à la traction indirecte se base sur la charge maximale exercée lors de la rupture de l'échantillon [R. Dupain. J.C.Saint-Arroman].

✓ **Calcul de la résistance à la traction indirecte**

La résistance à la traction est calculée en appliquant la formule :

$$R = \frac{3}{2} \cdot \frac{F \cdot L}{a^3} \quad \text{III.7}$$

Où :

F : est la force maximale

L : la longueur de l'échantillon,

a : la dimension du côté de la section transversale carrée

Et le facteur $3/2$ est une constante

B. Retrait

On peut définir le retrait du béton comme la déformation d'un élément en béton qui est exempt de toute contrainte mécanique externe, dans un environnement thermodynamique stable [A .Itim, K.Ezziane, Kadri E].

Dans le cadre de ce travail, un essai de retrait a été réalisés sur des éprouvettes de mortier, aussi bien de référence que modifiées par une substitution partielle du sable par de la chamotte à différents pourcentages. La figure IV.4 présente l'appareillage utilisé pour la réalisation de cet essai.



Figure III.13: L'appareillage de retrait utilisé pour l'essai.

C. Le gonflement

L'essai de gonflement a pour objectif d'évaluer la variation dimensionnelle des éprouvettes de mortier au fil du temps, lorsqu'elles sont exposées à un environnement humide. Cette variation, exprimée en pourcentage, traduit l'expansion volumique du matériau due principalement à l'absorption d'eau ou à des réactions internes retardées. Dans notre étude, des éprouvettes prismatiques de mortier contenant différentes proportions de chamotte (0 %, 5 %, 10 %, 20 %, 30 %) ont été préparées, puis conservées dans des conditions standardisées (température de 20 ± 2 °C et humidité relative ≥ 95 %).

Les mesures de gonflement ont été effectuées aux âges de 1, 3, 7 et 28 jours afin d'observer l'évolution du comportement dimensionnel à court et moyen terme.

Appareil utilisé

Le dispositif utilisé pour mesurer le taux de gonflement est un comparateur mécanique de haute précision, couplé à un cadre de mesure pour déformations longitudinales, conforme à la norme NF P15-433 (ou la norme équivalente EN 12617-4). Cet appareil permet de détecter des variations de longueur avec une précision de l'ordre du centième de millimètre, assurant ainsi la fiabilité des données recueillies [Neville, A. M].

D. L'absorption par immersion

Dans le cadre de ce travail, le coefficient d'absorption n'a pas été calculé de manière classique (sous forme de pourcentage). À la place, nous avons adopté une approche expérimentale basée sur le suivi de l'évolution de la masse des éprouvettes en fonction du temps après immersion totale dans l'eau.

Les échantillons de mortier, préparés avec différentes proportions de chamotte (0 %, 5 %, 10 %, 20 %, 30 %), ont été préalablement séchés à température constante jusqu'à masse stable. Ensuite, ils ont été immergés dans de l'eau distillée (figure III.14), et leur masse a été mesurée à des intervalles de temps réguliers (par exemple : 10 min, 30 min, 1 h, 2 h, 4 h, 24 h, 48 h).

Ces mesures ont permis de tracer des courbes d'absorption (masse en fonction du temps) pour chaque formulation. L'analyse de ces courbes montre que l'absorption d'eau diminue avec l'augmentation du pourcentage de chamotte, traduisant l'effet positif de la chamotte sur la réduction de la porosité accessible et donc sur la durabilité du matériau.

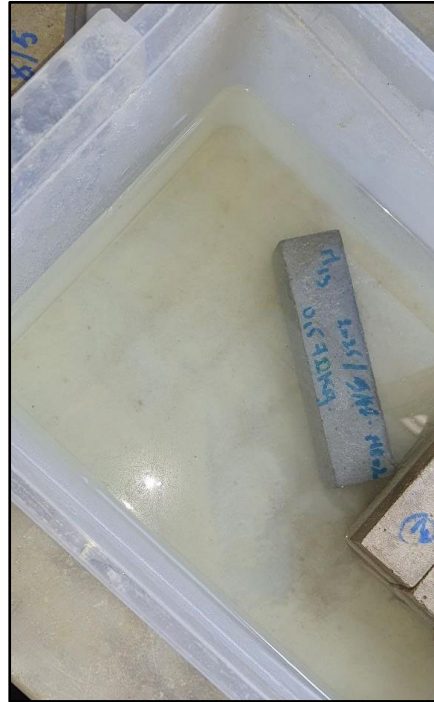


Figure III.14: L'absorption par immersion.

E. L'absorption par capillarité

L'essai d'absorption par capillarité vise à évaluer la capacité d'un matériau poreux à absorber l'eau par effet capillaire, c'est-à-dire en l'absence de pression, grâce à l'attraction des pores fins. Cette propriété est essentielle pour estimer la porosité connectée et la sensibilité du matériau à l'humidité ascensionnelle.

Dans notre approche expérimentale, le coefficient d'absorption capillaire n'a pas été calculé sous forme d'un débit d'absorption ($\text{g}/\text{mm}^2/\text{min}^{1/2}$). À la place, nous avons suivi la variation de la masse des éprouvettes en fonction du temps au contact avec l'eau, sur une période donnée. Les éprouvettes de mortier, préparées avec différents teneurs en chamotte (0 %, 5 %, 10 %, 20 %, 30 %), ont été séchées à masse constante, puis mises en contact avec de l'eau à leur base, sur une hauteur limitée (quelques millimètres) (figure III.15), conformément aux principes de l'essai. La masse a été relevée à intervalles réguliers (par exemple : toutes les 10, 30, 60 minutes, jusqu'à 24 h), permettant de tracer des courbes d'absorption capillaire (masse en fonction du temps).

Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté les matériaux utilisés et les méthodes d'analyse qui nous permettent de faire la caractérisation physique et mécanique de nos matières premières.

L'analyse des résultats des caractéristiques des différents matériaux étudiés dans ce chapitre nous conduit à faire les remarques suivantes :

Le ciment, l'eau de gâchage ainsi que sable de carrière sont appropriées pour la confection des mortiers.

La courbe d'analyse granulométrique des deux sables (carrière et chamotte), Vu les résultats obtenus, les deux types de sables satisfait aux conditions requises pour être utilisés dans la confection de mortier ;

En conclusion, les différents mélanges ont été confectionnés à base de ces matériaux afin d'apprécier les caractéristiques des granulats de chamotte ainsi que leur influence sur les performances mortier.

Chapitre IV :
Résultats et
discussions

Introduction

Ce chapitre constitue le noyau du travail expérimental de ce mémoire. Il est consacré à la présentation et à l'analyse des résultats relatifs aux principales propriétés physico-mécaniques du mortier, avec et sans substitution partielle du sable par la chamotte. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'influence de cette substitution sur le comportement global du mortier à travers une série d'essais en laboratoire portant sur la résistance à la compression, la résistance à la traction, le retrait, le gonflement, la capillarité et la masse volumique.

Cette étude s'inscrit dans une démarche de valorisation de matériaux alternatifs et durables, en intégrant la chamotte comme composant partiel dans la formulation du mortier, afin de réduire l'exploitation des ressources naturelles et de promouvoir des solutions plus respectueuses de l'environnement.

Les résultats sont présentés sous forme de tableaux et de courbes afin de faciliter les comparaisons entre les différentes formulations et de visualiser les évolutions en fonction du temps de cure et des taux de substitution. Une analyse critique et argumentée de ces résultats est proposée, dans le but de mieux comprendre l'impact de l'ajout de chamotte sur la microstructure du mortier et sur ses performances globales.

IV.1 Essais physiques

IV.1.1 La granulométrie

A. Sable

Tamis ouverture (mm)	Masse de refus (Kg)	Masse de refus cumulé (Kg)	Pourcentage refus (%)	Pourcentage cumulé (%)
4	0.100	0.100	10	90
2	0.182	0.282	28.2	71.8
1	0.290	0.572	57.2	42.8
0.5	0.182	0.754	75.4	24.6
0.25	0.158	0.912	91.2	8.8
0.125	0.072	0.984	98.4	1.6
0.063	0.014	0.998	99.8	0.2
Fond de tamis	0.02	1	100	0

Tableau IV.1 : La granulométrie du sable

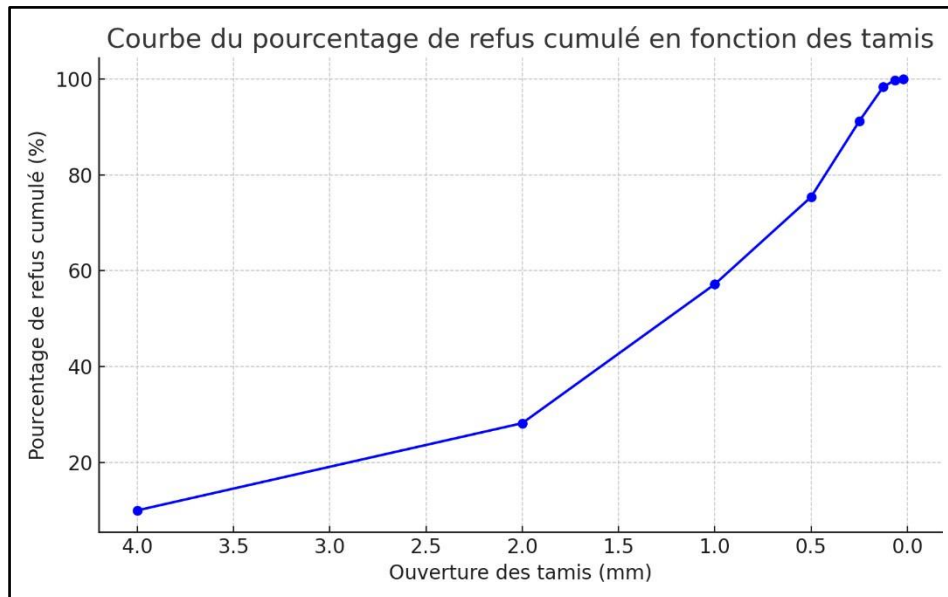


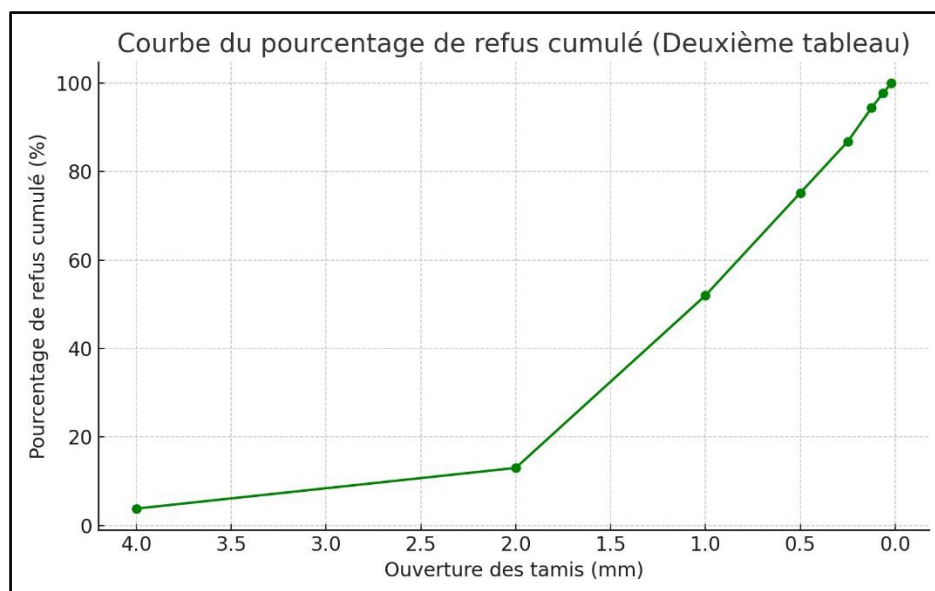
Figure IV 1: La courbe granulométrique du Sable.

➤ L'interprétation

La figure IV.1 illustre la courbe granulométrique du sable utilisé dans nos essais. Cette courbe montre une distribution progressive et régulière des particules, sans discontinuités notables, ce qui traduit une bonne qualité de classement du sable. On remarque que la majorité des particules se situe entre 0,125 mm et 2 mm, ce qui correspond à une granulométrie typique d'un sable moyen, bien adapté à la formulation de bétons et mortiers. De plus, la faible présence de particules grossières (supérieures à 4 mm) confirme que le sable est propre et bien lavé, exempt d'impuretés grossières. Cette répartition granulométrique équilibrée permet une bonne compacité, améliore la maniabilité du mélange et contribue à la résistance mécanique finale du matériau. En conclusion, le sable analysé présente une granulométrie adéquate, conforme aux exigences des normes, et se révèle parfaitement adapté aux applications dans les matériaux de construction.

B. La chamotte

Tamis ouverture (mm)	Masse de refus (Kg)	Masse de refus cumulé (Kg)	Pourcentage refus cumulé (%)	Pourcentage refus cumulé (%)
4	0.038	0.038	3.8	96.2
2	0.092	0.13	13	87
1	0.390	0.52	52	48
0.5	0.232	0.752	75.2	24.8
0.25	0.116	0.868	86.8	13.2
0.125	0.076	0.944	94.4	5.6
0.063	0.034	0.978	97.8	2.2
Fond de tamis	0.02	1	100	0

Tableau IV 2 : La granulométrie de la chamotte.**Figure IV.2 : La courbe granulométrique de la chamotte.****➤ L'interprétation**

La figure IV.2 illustre la courbe granulométrique de la chamotte utilisée dans nos formulations. Elle montre une répartition relativement continue, bien que moins régulière que celle d'un sable naturel. La majorité des particules se situent entre 0,125 mm et 2 mm, ce qui correspond à une chamotte moyennement broyée. La faible présence de particules très fines (inférieures à 0,063 mm) limite les risques d'excès d'eau et de retrait, tandis que l'absence de grosses particules (supérieures à 4 mm) contribue à une meilleure compacité dans les mélanges.

Cette granulométrie est généralement favorable à l'incorporation dans les matrices cimentaires, car elle permet un bon enrobage des grains et améliore la microstructure de la pâte. Une distribution bien contrôlée des particules de chamotte est essentielle pour optimiser les propriétés mécaniques et la durabilité des mortiers ou bétons contenant ce matériau recyclé.

IV.1.2 La masse volumique

Afin de caractériser les propriétés physiques du sable utilisé dans la formulation du mortier, deux types de masses volumiques ont été déterminés :

A. La masse volumique apparente

Elle a été mesurée à l'aide d'un pycnomètre. Cette mesure représente la densité réelle du sable sans tenir compte des vides entre les grains.

Le tableaux IV.4 présente une synthèse comparative des résultats obtenus lors des essais de la masse volumique apparente pour les différentes formulations étudiées.

Tableau IV 4: Les résultats de la masse volumique apparente

La masse volumique apparente				
Les mélanges	Densité(g/cm³)	Densité(kg/m³)	Volume(cm³)	masse(g)
0%	2703	2.703	600	1622
5%	2567	2.567	600	1540
10%	2432	2.432	600	1459
20%	2162	2.162	600	1297
30%	1892	1.892	600	1135

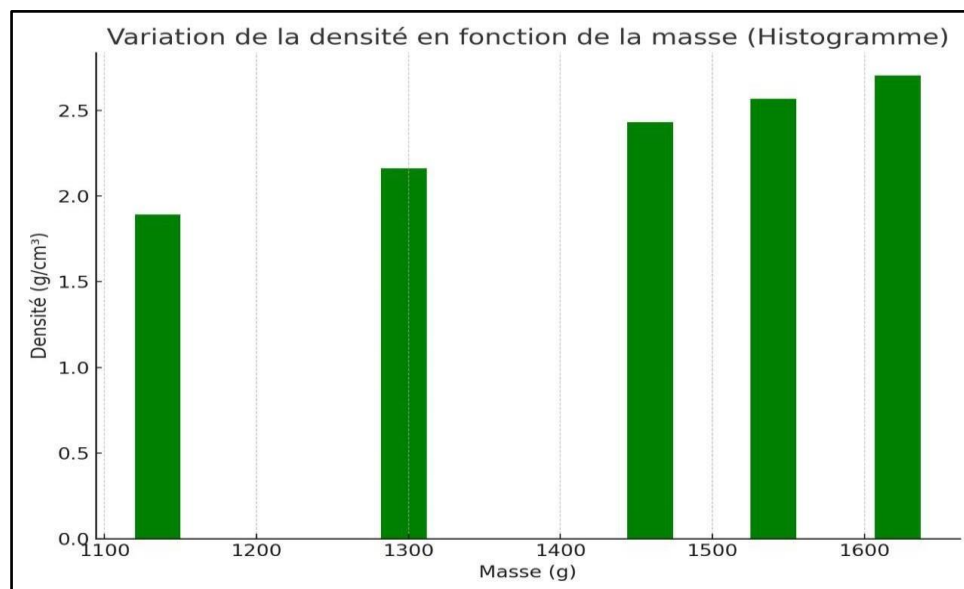


Figure IV.4 : La variation de la masse volumique apparente de chaque mélange

➤ L'interprétation

Le graphique ci-dessus représente un histogramme illustrant la variation de la densité en fonction de la masse. Les données montrent une relation proportionnelle entre la masse (exprimée en grammes) et la densité (en g/cm³), c'est-à-dire que la densité augmente de manière progressive avec l'augmentation de la masse.

Les valeurs de masse varient entre 1100 g et 1600 g, tandis que la densité passe d'environ 1,9 g/cm³ à 2,7 g/cm³. Cette augmentation de densité peut être interprétée comme le résultat d'une modification de la structure interne de la matière ou d'un accroissement plus rapide de la masse par rapport au volume, entraînant ainsi une densité plus élevée.

On peut donc conclure que la densité dépend de façon significative de la masse dans ce contexte, ce qui confirme l'existence d'une corrélation physique directe entre ces deux grandeurs.

B. La masse volumique absolue

Le tableau IV.3 présente une synthèse comparative des résultats obtenus lors des essais de la masse volumique absolue pour les différentes formulations étudiées.

la masse volumique absolue			
Les mélanges	Densité (Kg/m ³)	Densité (g/cm ³)	La masse (g)
0%	1.504	1504	1622
5%	1.420	1420	1540
10%	1.339	1339	1459
20%	1.177	1177	1297
30%	1.018	1018	1135

Tableau IV.5 : Les résultats de la masse volumique absolue

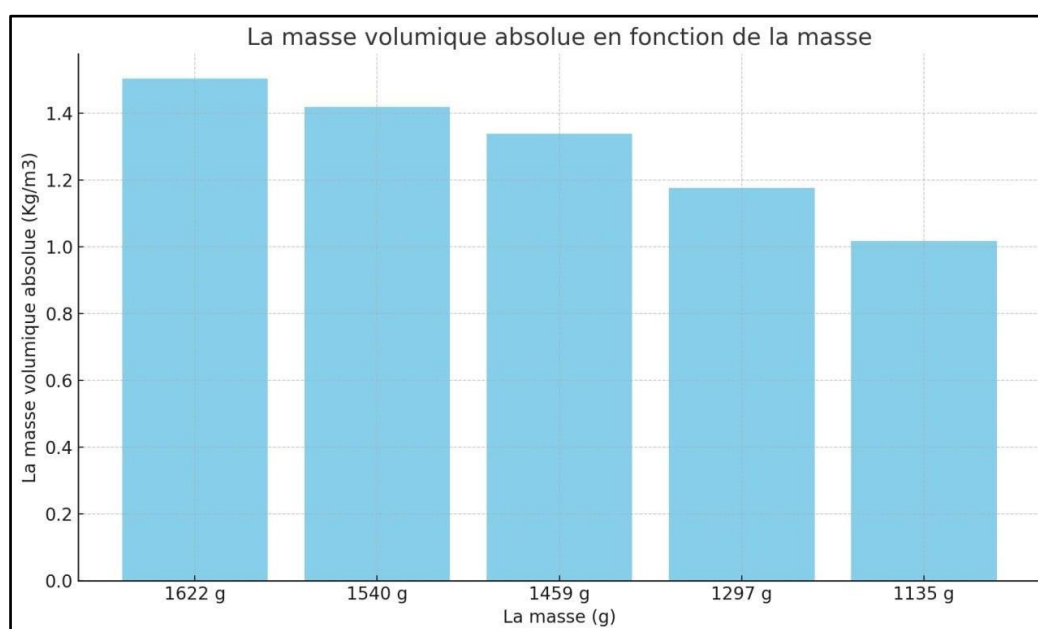


Figure IV.5 : La variation de la masse volumique apparente de chaque mélange

➤ L'interprétation

Le graphique ci-dessus illustre la variation de la masse volumique absolue (en kg/m³) en fonction de la masse (en g). On observe une tendance décroissante de la masse volumique absolue lorsque la masse diminue.

Les valeurs indiquent que pour une masse de 1622 g, la masse volumique atteint environ 1,5 kg/m³, tandis qu'elle chute à environ 1,0 kg/m³ pour une masse de 1135 g. Cette diminution progressive suggère que, malgré la réduction de la masse, le volume associé ne diminue pas de manière proportionnelle, ce qui entraîne une baisse de la densité absolue.

Cette observation peut être interprétée comme une variation dans la structure interne ou la porosité du matériau, ce qui influe directement sur sa masse volumique. Il est donc essentiel de prendre en compte cette évolution dans l'analyse des propriétés physiques du matériau étudié.

IV.1.3 Retrait

Les tableaux IV.2 et IV.3 présente une synthèse comparative des résultats obtenus lors des essais de retrait effectués à 20 °C et à 105 °C pour les différentes formulations étudiées.

Retrait à 20°					
Âge	Témoin	5%	10%	20%	30%
1 jour	450	420	410	390	370
4 jours	700	670	640	600	560
7 jours	830	800	770	720	680
14 jours	900	870	835	790	750
28 jours	950	920	880	840	800

Tableau IV.6 : Résultats du retrait des différentes formulations à 20 °C

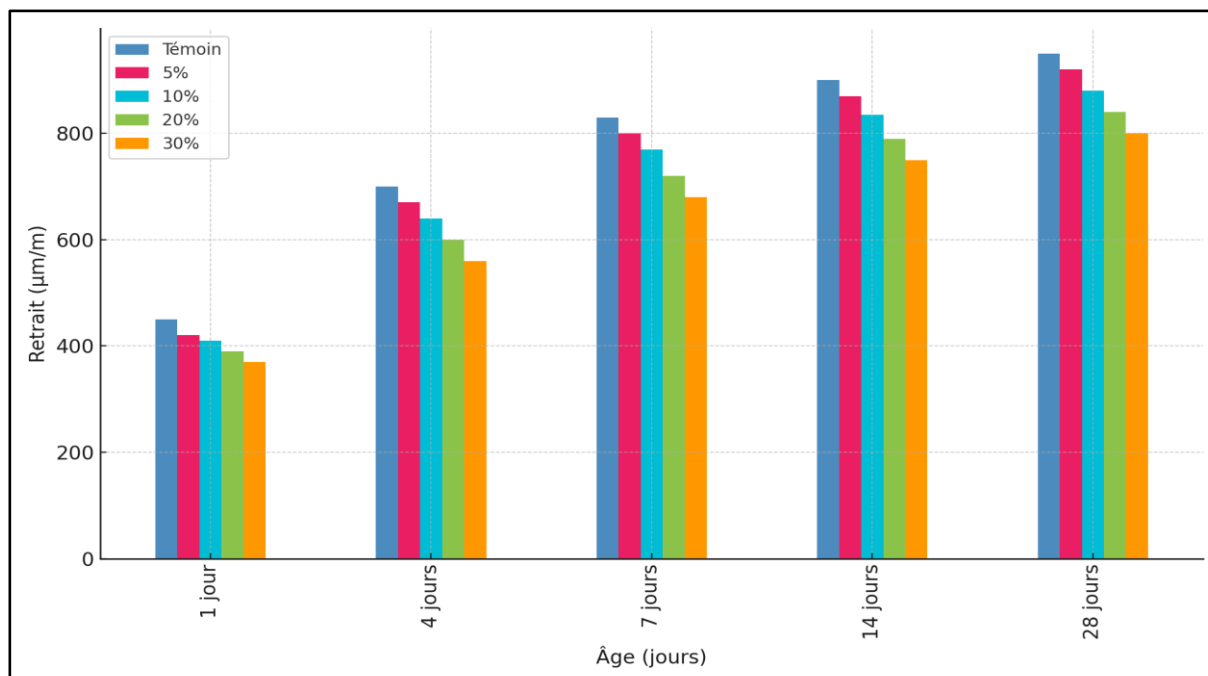


Figure IV.6 : Évolution du retrait du mortier à 20°C en fonction du taux de chamotte et de l'âge

➤ L'interprétation

Le graphique (figure IV.6) représente l'évolution du retrait (en $\mu\text{m}/\text{m}$) d'un mortier avec différents pourcentages de chamotte utilisée en substitution partielle du sable (0%, 5%, 10%, 20%, 30%) à différents âges (1, 4, 7, 14 et 28 jours).

Les résultats montrent que le retrait augmente avec le temps, mais diminue lorsque la proportion de chamotte augmente. L'échantillon témoin (0% chamotte) présente les valeurs de retrait les plus élevées, atteignant $950 \mu\text{m}/\text{m}$ à 28 jours. À l'inverse, un taux de 30% de chamotte réduit ce retrait à $800 \mu\text{m}/\text{m}$.

Cette réduction peut être attribuée au comportement relativement inerte de la chamotte et à sa structure granulaire, qui limite l'absorption d'eau et réduit les variations dimensionnelles dues au séchage. La présence de chamotte contribue également à une meilleure répartition des contraintes internes dans le matériau.

Retrait à 105°					
Âge	Témoin	5%	10%	20%	30%
1 jour	1880	1450	2240	2180	3060
4 jours	1100	1200	1040	1815	3035
7 jours	1063	1170	1015	1740	2950
14 jours	1000	1140	990	1680	2880
28 jours	950	1115	960	1600	2800

Tableau IV.7 : Résultats du retrait des différentes formulations à 105 °C

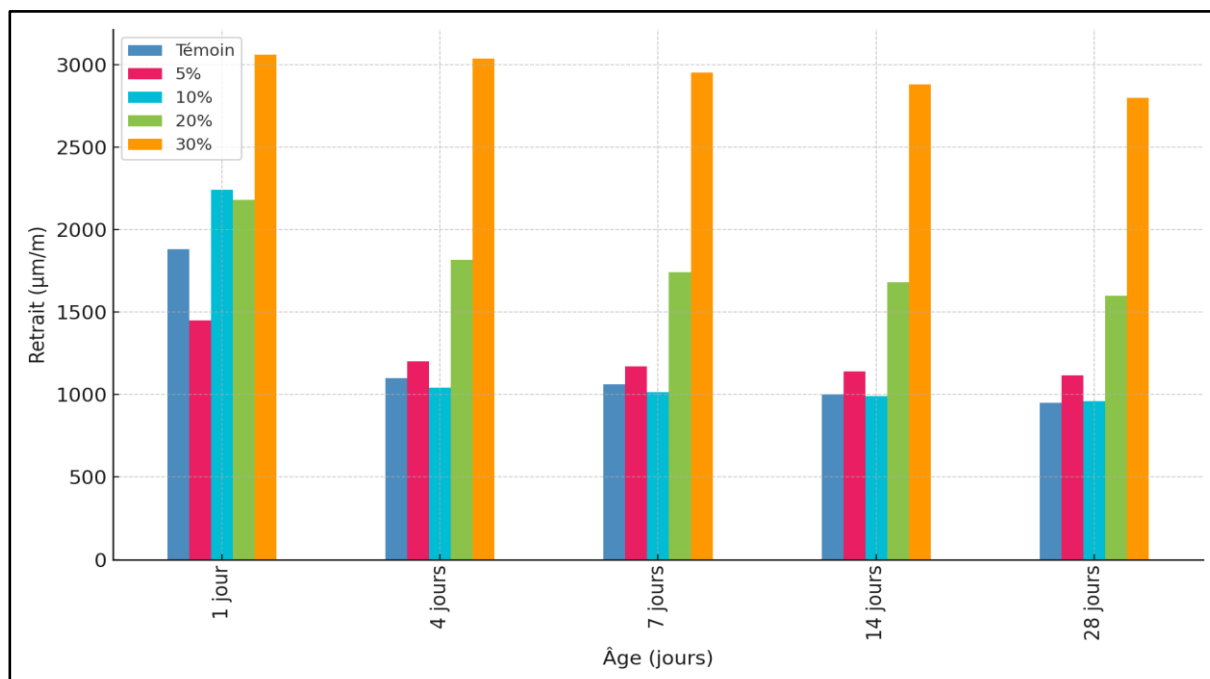


Figure IV.7 : Evolution du retrait du béton de sable à 105°C en fonction du taux de chamotte et de l'âge

➤ L'interprétation

Le graphique (figure IV.7) illustre l'évolution du retrait (exprimé en $\mu\text{m/m}$) des éprouvettes de mortier, mesuré à différents âges (1, 4, 7, 14 et 28 jours), en fonction de plusieurs taux de substitution partielle du sable par de la chamotte (5 %, 10 %, 20 % et 30 %), sous une température constante de 105°C.

L'analyse des résultats met en évidence une diminution progressive du retrait avec l'âge pour l'ensemble des formulations testées. Cette tendance est typique du comportement de dessiccation des matériaux cimentaires soumis à une température élevée, caractérisé par un retrait initial rapide suivi d'un ralentissement progressif au fil du temps.

Il est également observé qu'à des taux de substitution faibles (5 % et 10 %), les valeurs de retrait sont proches, voire inférieures, à celles du mortier témoin. Ce comportement pourrait être attribué à l'effet de la chamotte en tant que filler, contribuant à améliorer la compacité de la matrice et à réduire la perméabilité, limitant ainsi l'évaporation de l'eau.

En revanche, à partir d'un taux de 20 % de chamotte, le retrait augmente de manière significative, atteignant un maximum à 30 %. Cette élévation du retrait peut être expliquée par l'augmentation de la porosité induite par un excès de chamotte, favorisant une perte plus importante d'humidité sous l'effet de la chaleur.

En conclusion, il apparaît qu’une substitution modérée du sable par la chamotte (inférieure ou égale à 10 %) présente un effet bénéfique sur la réduction du retrait, tandis qu’un taux élevé (> 20 %) entraîne une augmentation notable de ce phénomène.

IV.1.4 Le gonflement

Le tableau IV.8 regroupe de manière synthétique les données expérimentales issues de l’essai d’absorption par immersion.

Le gonflement					
	0%	5%	10%	20%	30%
1	1,2	1	0,9	0,6	0,5
3	1,3	1,05	0,93	0,63	0,52
7	1,4	1,1	0,95	0,65	0,55
28	1,5	1,15	1	0,7	0,6

Tableau IV.8 : Les résultats du gonflement à 1 ,3, 7 et 28 jours

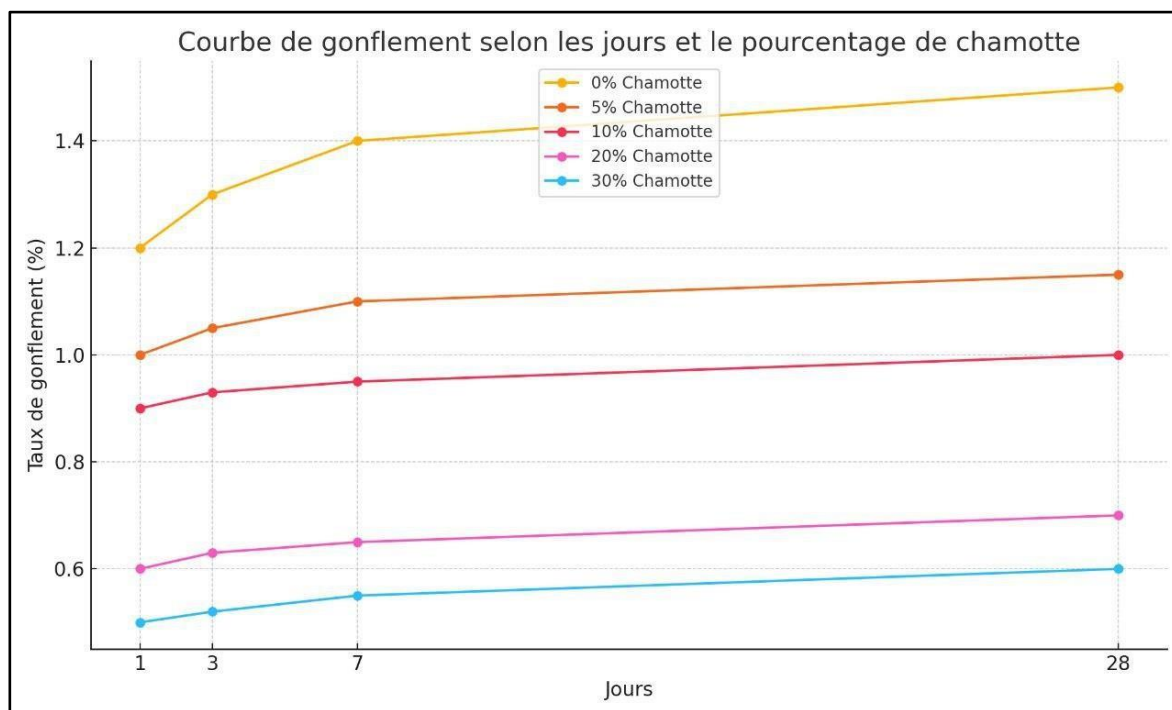


Figure IV 8 : La courbe de gonflement selon les jours et le pourcentage de la chamotte.

➤ L'interprétation

Le graphique présenté illustre l'évolution du taux de gonflement des échantillons au cours du temps (1, 3, 7 et 28 jours) en fonction du pourcentage de chamotte ajouté (0 %, 5 %, 10 %, 20 %, 30 %). Il est clairement observé que le taux de gonflement diminue à mesure que le pourcentage de chamotte augmente. L'échantillon sans chamotte (0 %) présente le taux de gonflement le plus élevé, atteignant environ 1,45 % après 28 jours, alors que l'échantillon contenant 30 % de chamotte affiche une valeur bien plus faible avoisinant les 0,6 %. Cette réduction du gonflement peut être attribuée à la nature inerte, stable et faiblement réactive de la chamotte, qui agit comme un squelette rigide au sein de la matrice et limite ainsi les variations dimensionnelles dues à l'humidité ou aux contraintes internes. Par conséquent, l'ajout de chamotte contribue significativement à l'amélioration de la stabilité dimensionnelle des matériaux, ce qui est essentiel pour leur durabilité à long terme.

IV.1.5 L'absorption par immersion

Le tableau IV.9 regroupe de manière synthétique les données expérimentales issues de l'essai d'absorption par immersion.

L'absorption par immersion					
	Témoin	5%	10%	20%	30%
0 h	0.570 Kg	0.576 Kg	0.536 Kg	0.550 Kg	0.543 Kg
15min	0.570 Kg	0,576 Kg	0.536 Kg	0.551 Kg	0.544 Kg
30 min	0.572 Kg	0.577 Kg	0.537 Kg	0.551 Kg	0.545 Kg
1 h	0.576 Kg	0.578 Kg	0.539 Kg	0.553 Kg	0.545 Kg
2 h	0.579 Kg	0.580 Kg	0.540 Kg	0.554 Kg	0.546 Kg
3 h	0.584 Kg	0.581 Kg	0.542 Kg	0.555 Kg	0.547 Kg
4 h	0.589 Kg	0.583 Kg	0.543 Kg	0.556 Kg	0.549 Kg
6 h	0.594 Kg	0.585 Kg	0.545 Kg	0.557 Kg	0.550 Kg

Tableau IV 9 Les résultats de l'absorption par immersion

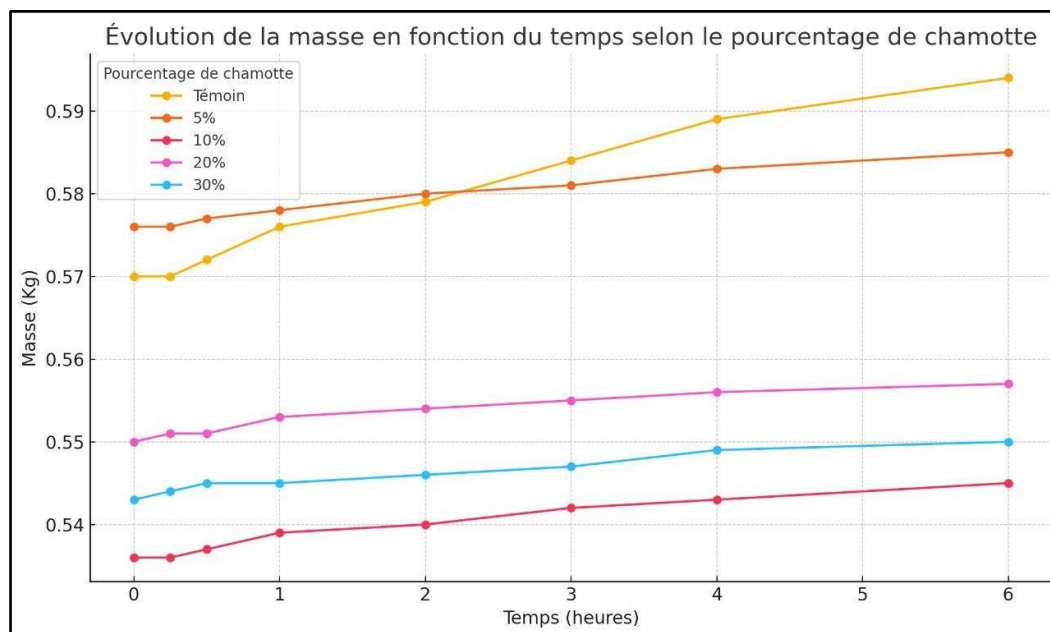


Figure IV 9 : La variation de masse en fonction du temps et pourcentage de la chamotte dans l'essai d'absorption d'eau par immersion.

➤ L'interprétation

Le graphique représentant l'évolution de la masse en fonction du temps selon le pourcentage de chamotte montre clairement que l'incorporation de chamotte réduit significativement la prise de masse des échantillons au fil du temps, traduisant une diminution de l'absorption d'eau ; en effet, plus le pourcentage de chamotte est élevé, plus la masse finale reste faible, ce qui s'explique par la nature peu absorbante de la chamotte qui confère au matériau une meilleure stabilité dimensionnelle et une plus grande résistance à l'humidité.

IV.1.6 L'absorption par capillarité

L'absorption capillaire est une caractéristique de l'humidité qui indique la capacité d'une pierre à prendre en charge un volume d'eau par unité de temps et de surface, lorsqu'un seul côté entre en contact direct avec l'eau. L'absorption d'eau par capillarité, mesurée en $\text{g/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$, est déterminée de manière expérimentale pour les pierres naturelles utilisées comme matériaux de construction conformément à la norme NF EN 772-11.

Le tableau IV.10 regroupe de manière synthétique les données expérimentales issues de l'essai d'absorption par capillarité.

La capillarité					
	Témoin	5%	10%	20%	30%
0 h	0.534 Kg	0.558 Kg	0.540 Kg	0.552 Kg	0.534 Kg
15min	0.534 Kg	0,558Kg	0.540 Kg	0.553 Kg	0.534 Kg
30 min	0.534 Kg	0.559 Kg	0.541 Kg	0.554 Kg	0.535 Kg
1 h	0.535 Kg	0.560 Kg	0.541 Kg	0.555 Kg	0.536 Kg
2 h	0.536 Kg	0.561 Kg	0.543 Kg	0.556 Kg	0.538 Kg
3 h	0.537 Kg	0.562Kg	0.544 Kg	0.557 Kg	0.539 Kg
4 h	0.538 Kg	0.564 Kg	0.545 Kg	0.558 Kg	0.540 Kg
6 h	0.539 Kg	0.566 Kg	0.547 Kg	0.560 Kg	0.542 Kg

Tableau IV 10: Les résultats de l'absorption par capillarité

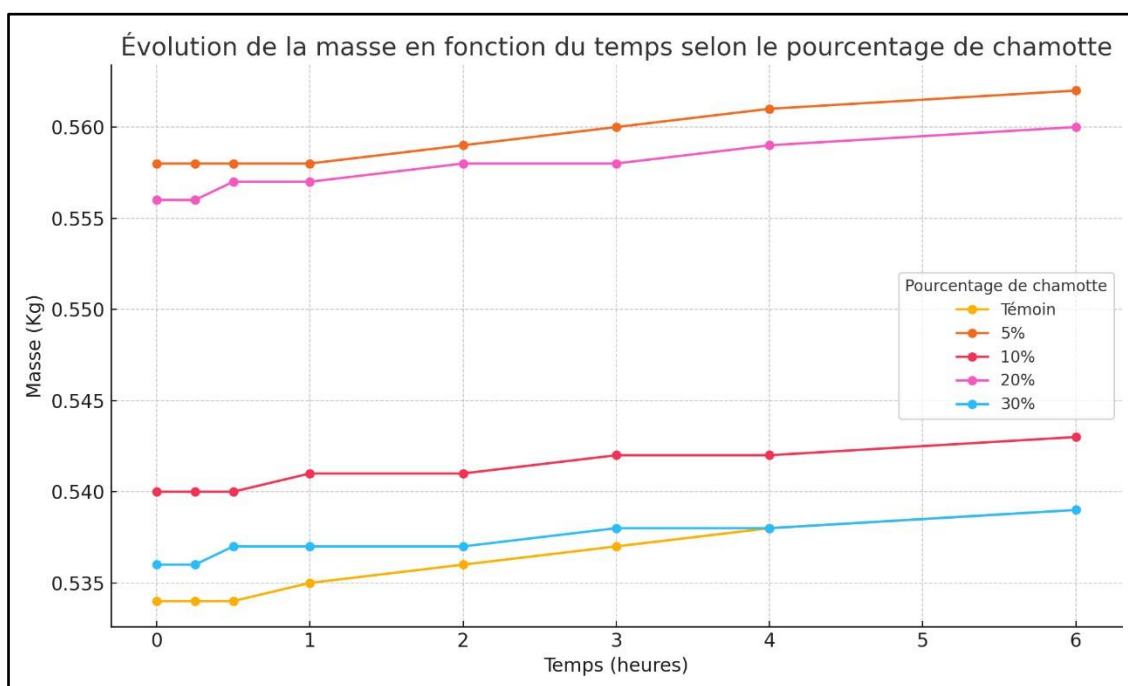


Figure IV.10 : La variation de masse en fonction du temps et pourcentage de la chamotte dans l'essai d'absorption d'eau par capillarité.

➤ L'interprétation

Le graphique illustre l'évolution de la masse des échantillons en fonction du temps selon différents pourcentages de chamotte (0 %, 5 %, 10 %, 20 %, 30 %). Il en ressort que l'absorption de masse diminue progressivement avec l'augmentation du pourcentage de chamotte.

L'échantillon témoin (sans chamotte) présente une augmentation plus marquée de la masse au fil des heures, tandis que les échantillons contenant de plus fortes proportions de chamotte montrent des variations plus faibles. Cette tendance s'explique par la nature peu poreuse et faiblement absorbante de la chamotte, qui limite la pénétration de l'humidité dans le matériau. Ainsi, plus la teneur en chamotte est élevée, plus le matériau gagne en stabilité dimensionnelle et en résistance à l'humidité, ce qui est favorable pour des applications nécessitant une bonne durabilité.

IV.2 Essais mécanique

IV.2.1 L'essai de compression

On résume les résultats obtenus de l'essai de compression dans le tableau IV.11:

Les mélanges	Essai de compression				
	Témoin	5%	10%	20%	30%
Resistance à 3 Jours (N/mm ²)	43.828	42.313	41.640	35.609	32.171
Resistance à 7 Jours (N/mm ²)	56.920	50.640	47.187	49.359	41.249
Resistance à 28 Jours (N/mm ²)	68.094	70.594	58.469	73.157	55.625

Tableau IV.11 : Les résultats de l'essai de compression

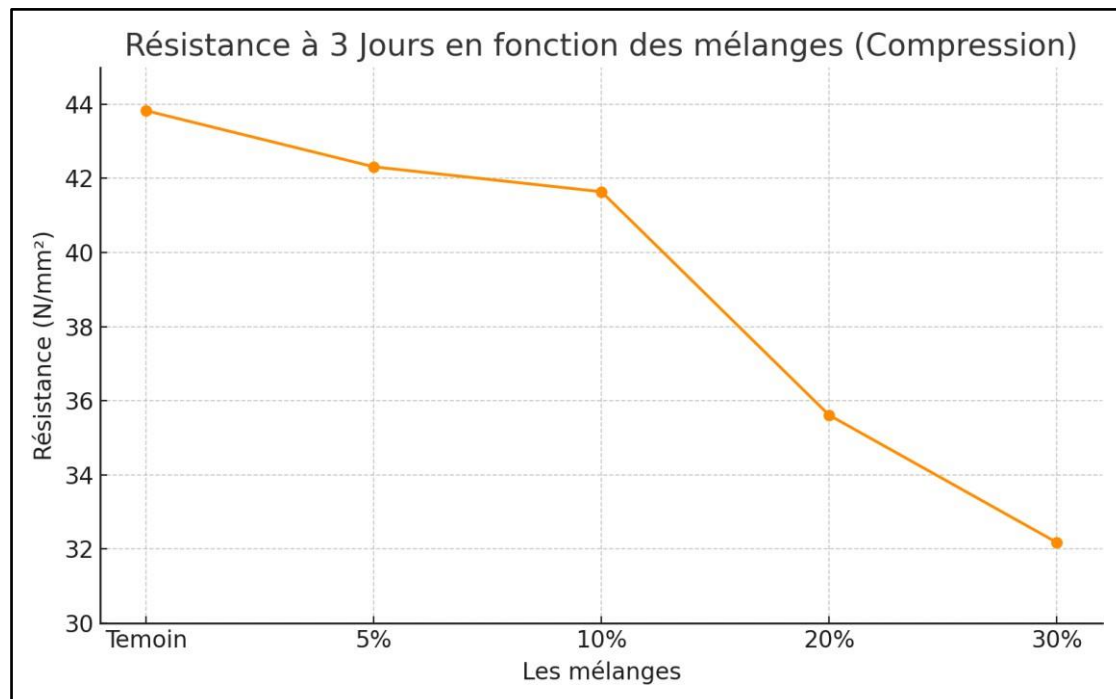


Figure IV.11 : Courbe de l'évolution de la résistance à la compression en fonction des pourcentages de chamotte à 3 jours.

➤ L'interprétation

La figure IV.11 est une courbe qui représente l'évolution de la résistance à la compression en fonction des pourcentages de substitution par la chamotte (ou tout autre matériau ajouté) à l'âge de 3 jours.

La courbe montre une diminution progressive de la résistance à la compression à mesure que le pourcentage de la substitution augmente. La résistance passe de 43,828 N/mm² (Témoin) à 32,171 N/mm² pour 30% de mélange.

Cette baisse importante indique que l'ajout de la chamotte retarde l'hydratation du ciment et diminue l'activité pouzzolanique aux jeunes âges. Cela se traduit par une perte d'efficacité mécanique significative à court terme.

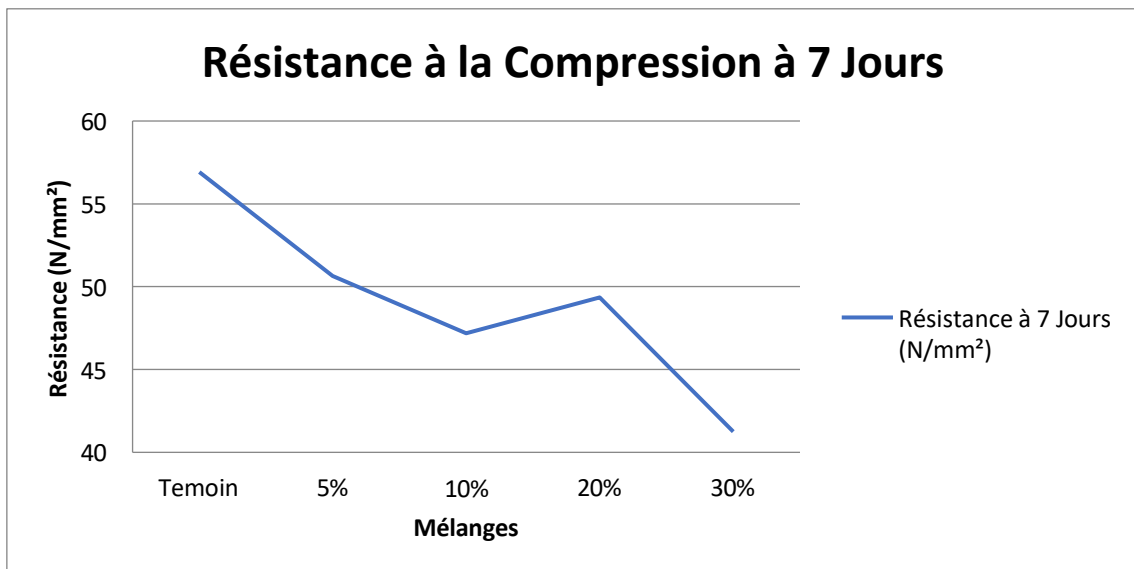


Figure IV 12 : Courbe de l'évolution de la résistance à la compression en fonction des pourcentages de chamotte à 7 jours.

➤ L'interprétation

La figure IV.12 est une courbe qui représente l'évolution de la résistance à la compression en fonction des pourcentages de substitution par la chamotte (ou tout autre matériau ajouté) à l'âge de 7 jours. La courbe confirme cette tendance, avec une résistance qui diminue également avec l'augmentation du taux de substitution. Cependant, on note une légère amélioration à 20%, suggérant une stabilisation temporaire du comportement mécanique. Néanmoins, à 30%, la résistance chute de nouveau.

Cette évolution indique que, bien que la chamotte puisse développer une certaine réactivité à moyen terme, l'effet global reste négatif. Les hautes teneurs en chamotte semblent compromettre la compacité et la cohésion de la matrice cimentaire.

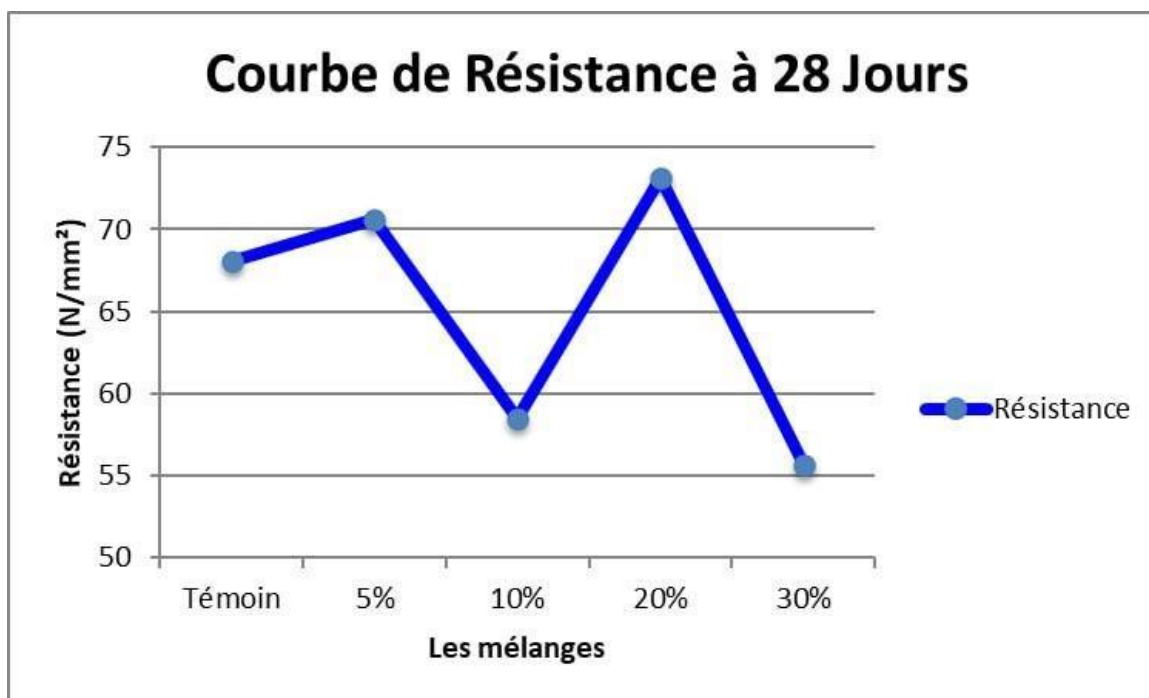


Figure IV 13 Courbe de l'évolution de la résistance à la compression en fonction des pourcentages de chamotte à 28 jours.

➤ L'interprétation

La figure IV.13 est une courbe qui représente l'évolution de la résistance à la compression en fonction des pourcentages de substitution par la chamotte (ou tout autre matériau ajouté) à l'âge de 28 jours.

La courbe de résistance à la compression à 28 jours met en évidence l'effet des différents pourcentages d'ajout sur les performances mécaniques du mélange de base. L'échantillon témoin, sans aucun ajout, présente une résistance de 68,1 N/mm², servant ainsi de référence. L'incorporation de 5 % a entraîné une légère amélioration de la résistance, atteignant 70,6 N/mm². Toutefois, à 10 %, une diminution significative est observée, avec une résistance réduite à 58,5 N/mm², ce qui traduit un effet défavorable de ce taux sur la structure du matériau. En revanche, l'ajout de 20 % s'est avéré optimal, offrant la meilleure performance avec une résistance maximale de 73,2 N/mm². À l'opposé, un taux de 30 % a conduit à une nette dégradation des propriétés mécaniques, la résistance chutant à 55,6 N/mm². Ces résultats suggèrent que l'optimisation de la résistance à la compression passe par un dosage maîtrisé, avec un maximum d'efficacité observé à un taux d'ajout de 20 %, tandis que des proportions inférieures ou supérieures compromettent les performances du matériau.

IV.2.2 L’essai de traction

On résume les résultats obtenus de l’essai de traction dans le tableau IV.12:

Les mélanges	Essai de traction				
	Témoin	5%	10%	20%	30%
Resistance à 3 Jours (N/mm ²)	12.562	12.188	12.187	10.125	9.750
Resistance à 7 Jours (N/mm ²)	16.688	16.563	14.813	14.625	13.875
Resistance à 28 Jours(N/mm ²)	24.375	23.625	19.125	17.75	16.5

Tableau IV.12 : Les résultats de l’essai de la traction

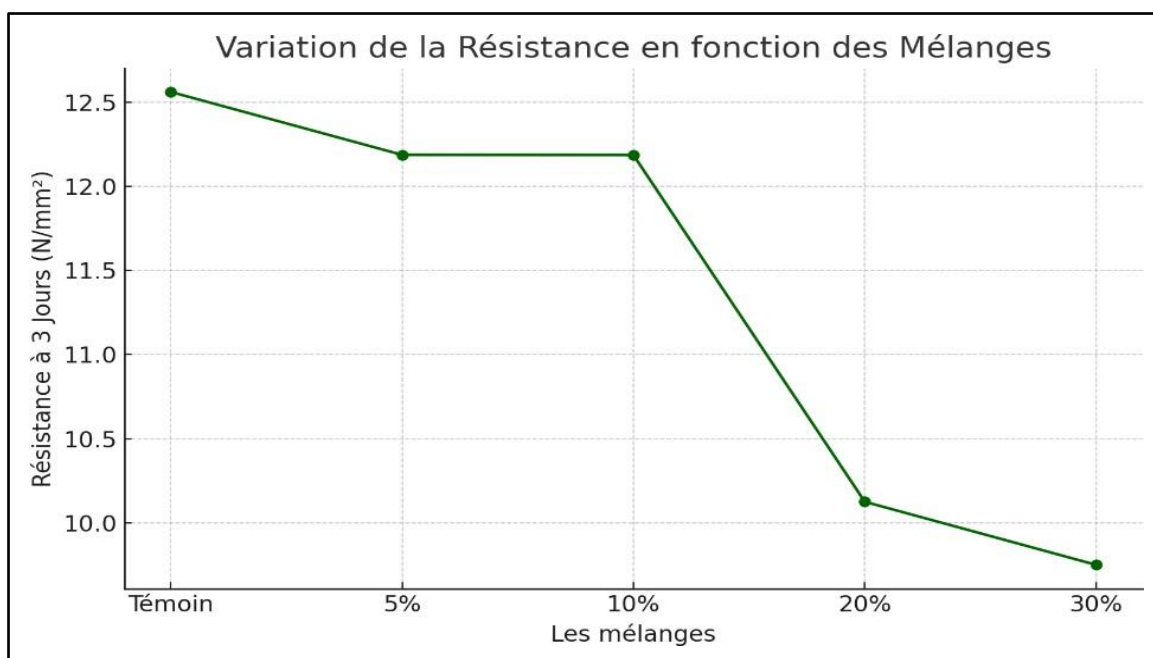


Figure IV.14 : Courbe de l’évolution de la résistance à la traction en fonction des pourcentages de chamotte à 3 jours.

➤ **L’interprétation**

La figure IV.14 est une courbe représente la l’évolution de la résistance à la traction à 3 jours en fonction des différents teneurs en chamotte. La courbe met en évidence une diminution progressive de la résistance à la traction avec l’augmentation du pourcentage de chamotte. On observe une chute marquée à partir de 20 %, ce qui suggère que l’ajout de chamotte retarde le gain de résistance en traction à court terme.

Cette perte de performance s'explique par le caractère peu réactif de la chamotte aux premiers jours d'hydratation, ce qui compromet l'adhérence entre les particules et fragilise la matrice cimentaire.

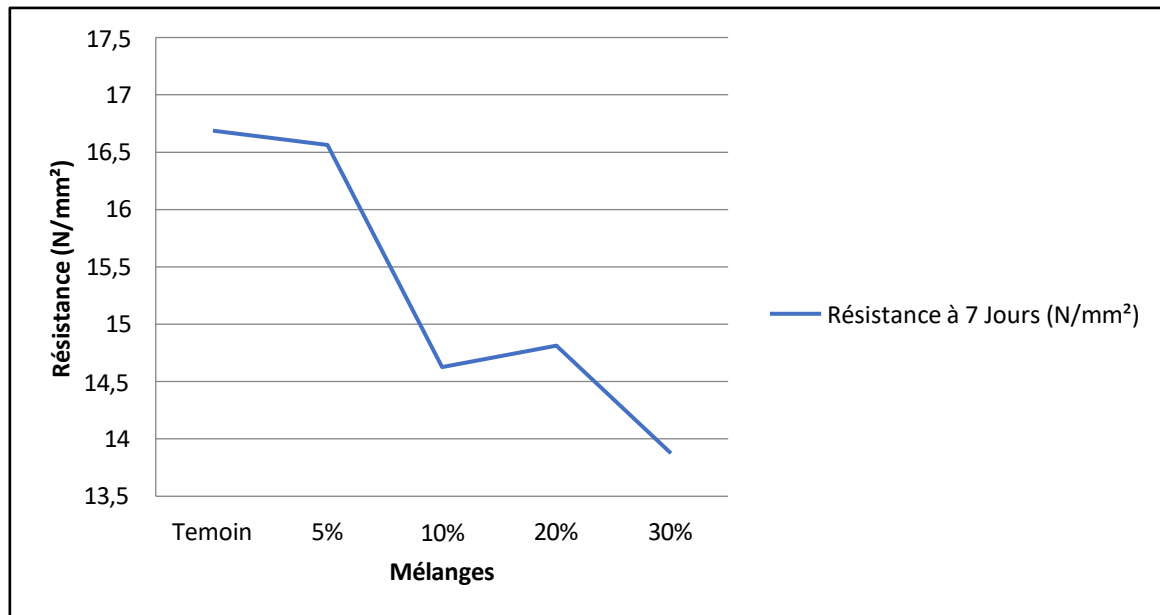


Figure IV.15 : Courbe de l'évolution de la résistance à la traction en fonction des pourcentages de chamotte à 7 jours.

➤ L'interprétation

La figure IV.15 est une courbe qui représente l'évolution de la résistance à la traction à 7 jours en fonction des différentes teneurs en chamotte. La courbe corrigée des résultats à 7 jours confirme cette tendance baissière. La résistance chute de 16,688 N/mm² (témoin) à 13,875 N/mm² (30 % de chamotte).

On remarque une légère stabilisation, voire un redressement modéré autour de 20 %, traduisant un effet de densification temporaire ou une contribution retardée de la chamotte sous forme pouzzolanique.

Malgré cette amélioration ponctuelle, la tendance générale reste négative, indiquant que la chamotte nuit aux propriétés de traction, surtout à fort dosage.

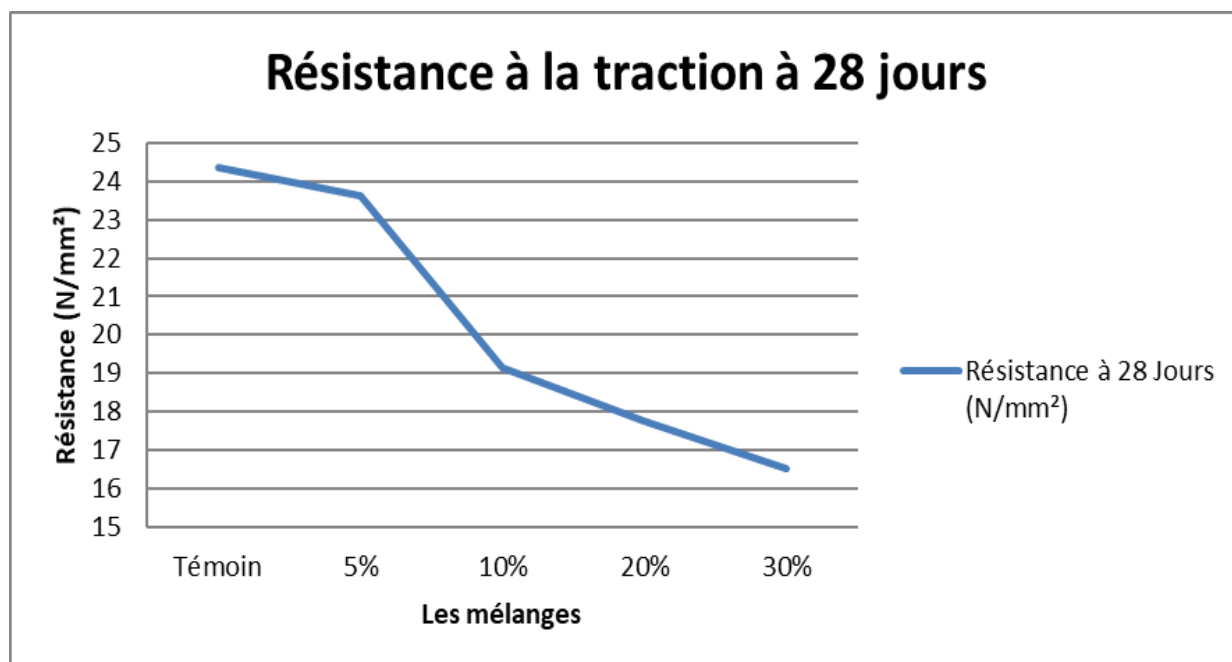


Figure IV.16 : Courbe de l'évolution de la résistance à la traction en fonction des pourcentages de chamotte à 28 jours.

➤ L'interprétation

La figure IV.16 est une courbe qui représente l'évolution de la résistance à la traction à 28 jours en fonction des différents teneurs en chamotte. La courbe de la résistance à la traction à 28 jours met en évidence une diminution progressive de la performance mécanique en fonction de l'augmentation du pourcentage d'ajout dans le mélange. L'échantillon témoin, sans aucun ajout, présente la valeur de résistance la plus élevée, estimée à environ 24 N/mm². L'ajout de 5 % entraîne une légère baisse de la résistance, indiquant un début d'effet négatif sur la cohésion du matériau. À partir de 10 %, la diminution devient plus marquée, avec une résistance avoisinant les 19 N/mm², ce qui traduit une dégradation significative des propriétés de traction. Cette tendance se confirme avec des taux plus élevés : à 20 %, la résistance continue de baisser, et à 30 %, elle atteint sa valeur minimale d'environ 16 N/mm². Ces résultats montrent clairement que l'ajout progressif du matériau étudié impacte négativement la résistance à la traction, sans qu'aucun pourcentage n'offre une amélioration par rapport au témoin. Il en découle que, contrairement à la résistance à la compression, la résistance à la traction est sensible à la présence de l'ajout, et ce, dès les faibles taux.

Conclusion

Ce chapitre met en évidence l'effet de la substitution partielle du sable par la chamotte sur les propriétés physico-mécaniques du mortier. Les essais réalisés montrent que l'ajout progressif de chamotte influence significativement le comportement du matériau.

Sur le plan physique, la chamotte modifie la granulométrie sans nuire à la maniabilité jusqu'à 30 %. Elle entraîne une diminution de la densité (apparente et absolue) et améliore la stabilité dimensionnelle à 20 °C, bien qu'un retrait plus important soit observé à 105 °C pour des taux supérieurs à 20 %, probablement en lien avec la porosité.

D'un point de vue hydrique, la chamotte améliore la résistance à la pénétration de l'eau, grâce à sa faible porosité et absorption, renforçant ainsi la durabilité du mortier.

Sur le plan mécanique, une baisse de la résistance à la compression est notée aux jeunes âges, mais une amélioration est visible à 28 jours pour un taux de 20 %. En revanche, la résistance à la traction diminue régulièrement, indiquant une faible cohésion interne liée à l'ajout de chamotte.

En conclusion, la chamotte constitue une alternative intéressante au sable, avec un taux optimal autour de 20 %. Des recherches complémentaires sont toutefois nécessaires pour améliorer l'adhérence et la résistance à la traction.

Conclusion générale

Au terme de ce travail consacré à l'élaboration et à la caractérisation d'un mortier de ciment avec un ajout naturel, la chamotte, nous avons mené une étude complète combinant aspects théoriques et expérimentaux, dans le but d'évaluer l'influence de cet ajout sur les propriétés physiques et mécaniques du mortier.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté le mortier dans sa globalité, en abordant ses types, ses utilisations et les exigences techniques auxquelles il doit répondre. Le deuxième chapitre a été dédié à l'étude de la kaolinite, matière première de la chamotte, en mettant en évidence ses caractéristiques physico-chimiques et ses domaines d'application.

Le troisième chapitre a porté sur l'aspect expérimental : plusieurs formulations de mortiers avec des teneurs variables en chamotte ont été préparées et soumises à une série d'essais en laboratoire (LNHC Skikda), notamment des tests de résistance à la compression et à la traction, retrait, gonflement et absorption.

Enfin, le dernier chapitre a été consacré à l'analyse et à l'interprétation des résultats obtenus. Ces derniers ont révélés ce qui suit :

La résistance à la compression et à la traction diminue avec l'augmentation du pourcentage de chamotte, ce qui s'explique par une structure plus poreuse et une cohésion réduite du mortier.

En revanche, le retrait diminue progressivement à mesure que la teneur en chamotte augmente, en particulier à une température de 105°C, ce qui représente un atout pour les applications à haute température.

Le gonflement diminue également avec l'augmentation du taux de chamotte, traduisant une meilleure stabilité dimensionnelle.

De plus, le taux d'absorption a montré une baisse significative avec l'ajout croissant de chamotte, ce qui est bénéfique en termes d'imperméabilité et de durabilité.

En conclusion, l'ajout de chamotte permet une amélioration notable de certaines propriétés physiques du mortier, telles que la réduction du retrait, du gonflement et de l'absorption, tout en induisant une baisse de la résistance mécanique. Le défi principal réside donc dans la détermination d'un pourcentage optimal de chamotte qui assurerait un compromis adéquat entre performance thermique et durabilité mécanique. Des recherches futures pourraient approfondir ces résultats en intégrant d'autres additifs ou en explorant le comportement du mortier dans différentes conditions de service

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [**A.kaci, S.Rahal**] : A.Kaci, S.Rahal «Perfomance mécanique des morties de ciment bas cabone imprémable .» paris, Laboratoire du mécanique et matériaux du génie civil (L2MGC): CY Cergy Paris université , 2024.
- [**M.Abdelhak**] : Abdelhak, MOUMEN. «Syntheses de polytetrahydrofuranne catalyees par le kaolin de guelma.» annaba , chimie : universite badji mokhtar-annaba faculte des sciences, 2007-2008.
- [**A. BELBALI**] : Assia, Belbali. *Contribution à l'élaboration d'un carbure à partir de la chamotte de Kaolin*. Sétif : Université Ferhat Abbas - Sétif 1 , 21 Avril 2021.
- [**F.Bachiri**] : F.Bachiri «Effet de la nature du sable sur les propriétés des mortiers .» Guelma, Génie civil: 'Université de Guelma Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénierie, 2010.
- [**Baik.M, LACHEMOT.O**] : Baik.M, LACHEMOT.O. «Etude du comportement physico_mécanique d'un mortier écologique renforcé par des fibres métalliques.» Tizi Ouzou, Génie Civil: UNIVERSITE Mouloud MAMMERI Tizi Ouzou Faculté : Génie de la Construction , 2021/2022 .
- [**Beauchamp, Jacques**] : Beauchamp, Jacques. «Les argiles .» France : Université de Picardie Jules Verne, 15 October 2005.
- [**BELFAR.I, BEN SAOUCHA. B**] : BELFAR.I, BEN SAOUCHA. B. « Etude et caractérisation de la composition minéralogique des argiles de la région de soubola.» M'sila, Chémie : Université Mohammed Boudiaf M'sila faculté des science , 2022.
- [**Ben Salah. H**] : Ben Salah, HADJI. *Etudes des propriétés physico-mécaniques et durabilité d'un béton de sable à haute performance : expérimentation et statistique* . Biskra: Université Mohamed Khider –Biskra, 10/10/2022.
- [**Boukerdel.M, Alipacha.H**] : Boukerdel.M, Alipacha.H. «Variation des dosages des déchets de brique sur la réséstance en compression d'un mortier .» Tiaret , Génie civil : université Ibn khaldoun Tiaret faculté des science appliqué , 2017.
- [**Bouzidi .N**] : Bouzidi, Nedjima. «Influence des impuretés des kaolins sur les propriétés des produits de cuisson.» Béjaia/ Algérie : entre l'université de Béjaia, Algérie et l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint -Étienne, 23 Septembre 2012.
- [**Charles .N, Colin .S, Gutierrez .T, Lefebvre .G**] : Charles.N, Colin.S, Gutierrez.T, Lefebvre.G «Kaolin et argiles kaoliniques Mémento Rapport final.» France , Février 2018.

- [Douce. J]** : Douce, Jérôme. *Les mortiers : Un peu d'histoire et principales applications actuelles*. France: Saint Gobin Weber, Septembre 2016.
- [F.hubert]** : F.hubert. « modelisation des diffractogrammes de minéraux argileux en assemblages complexes dans deux sols de climat tempere. implications mineralogique et pedologique.» université du poitiers, 2008.
- [F.Rouabhia]** : Fatima, Rouabhia. «Elaboration et caractérisation d'une matrice inorganique (silicate) destinée à l'inclusion d'un polymère .» Guelma, Département de Génie des Procédés: Université 8 Mai 1945 Guelma Faculté des Sciences et de la Technologie, 2018.
- [H.Bounib]** : H.Bounib. «elaboration et caracterisation microstructurale et mecanique des refractaires a base de kaolin dd3 et la dolomite (5-20% poids).» sétif, institut d'optique et de mécanique de précision: universite ferhat abbas-setif 1, 31/10/ 2013.
- [A.El hachmi]** : A.El hachmi. «Argile et minéraux argileux: propriétés physico-chimiques et propriétés et propriétés COLLOÏDES.» université Abdelmalek Essaadi - Master fondamentale Chimie, 2013.
- [H. Bensaadi, A. Bensaid]** : Hanane, Bensaadi, Asma Bensaid. «Etude du comportement des mortiers de ciment à base d'un mélange de la chamotte–fumée de silice.» Tiaret, Génie civil : université ibn khaldounde tiaret, 2016/2017.
- [N.Fardjaoui]** : Nor El houda Fardjaoui. *synthèse des aluminosilicates de type géopolymères et zéolite LTA à partir des kaolins. Application à l'adsorbition des métaux lourds et des colorants textiles*. Guelma: Université 8 Mai 1945, 2018.
- [I.Massaouden, A.Nacéri]** : I.Massaouden, A.Nacéri. «Effet de l'activation mécanique du laitier de haut fourneau sur le comportement mécanique du mortier .» M'sila , Génie Civil : Université de M'sila faculté des science et science de l'ingénieur , 2006.
- [Kh.Bouali]** : Khaled, Bouali. *Elaboration et Caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajouts de déchets de briques réfractaires*. oumerdes: Université m'Hamed Bougara, 2013/2014.
- [S.Khaouni]** : Khaouni, Sofiane. «Modélisation et surveillance des systèmes dynamiques hybrides par automates hybrides.» Sétif: l'Université Ferhat ABBAS - Sétif 1, 18-jui-2018.
- [Ilhan A. Aksay, Daniel M. Dabbs and Mehmet Sarikaya]** : A. Aksay, Daniel M. Dabbs and Mehmet Sarikaya. «Mullite for Structural, Electronic, and Optical Applications.» Washington, Materials Science and Engineering and Advanced Materials Technology Center, Washington Technology Center: University of Washington, Seattle, Washington , Octobre 1991.
- [M, Thabti]** : M, Thabti «Mesure des caractéristiques des mortiers et bétons par les Ultrasons.» Guelma, Génie Civil & Hydraulique: Présenté à l'Université 8 Mai 1945 de Guelma Faculté des Sciences et de la Technologie , 2021.

- [M.GAUTIER]** : M.GAUTIER «Interactions entre argile ammoniée et molécules organiques dans le contexte du stockage des déchets. Cas de molécules à courtes chaînes.» France, physique et chimie de la terre : Université d'Orléans , 2008.
- [R.Kettab]** : mitiche, Kettab Ratiba née *Contribution à la valorisation du sable de dunes.* Alger: Ecole National Polytechnique , 2006/2007.
- [M. CHOUAF]** : M, CHOUAFA «Comportement du Kaolin à l'enrichissement par flottation. Cas de la mine de Tamazert - Jijel.» Annaba: Université Badji Mokhtar Annaba , 2016.
- [R.MOUSSAOUI, BEN BOUDJEMAA. K DJERROUD.M R]** : MOUSSAOUI, BEN BOUDJEMAA. K DJERROUD.M «Influence des fibres métalliques (issues de l'unité BCR) sur le comportement mécanique et physico-chimique des mortiers.» 2013. Bejaia, génie civil: L'université Abderrahmane MIRA de Bejaia Faculté de technologie, s.d.
- [H. H .MURRAY]** : H. H. MURRAY, *Applied clay mineralogy : occurrences, processing and applications of kaolins, bentonites, palygorskitesepiolite, and common clays.* U.S.A: Elsevier B.V, 2007.
- [Nakahira, Brindley]** : Nakahira, Brindley «The structure of kaolinite and metakaolinite.» Constantine: the Philosopher University, 2007.
- [R.Benhamida, R Boulifa R]** : R.Benhamida.R Boulifa. «CONTRIBUTION A L'ETUDE DES CARACTERISTIQUES MECANIKES DES MORTIERS FIBRES PAR DES FIBRES PLASTIQUES (ISSUES DES DECHETS INDUSTRIELS).» Ouargla, Génie civil et hydraulique : Université Kasdi Merbah Ouargla FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES, 2019 / 2020 .
- [RABIA.H, CH.RABAH]** : RABIA.H, CH.RABAH. «Valorisation du kaolin de Tamazert pour les besoins de la céramique.» Alger, Génie Minier : Ecole Nationale Polytechnique , juin 2015.
- [RIBOLZI, Jules]** : RIBOLZI, Jules *Conception d'un four et d'un ralentisseur à effet Zeeman pour une expérience avec des atomes de strontium.* Lyon, Science de la matière: École Normale Supérieure de Lyon Université Claude Bernard Lyon I, 2021.
- [SELLAMI.Gh]** : SELLAMI.Gh «Comportement des mortiers renforcés par fibres de Diss, étude expérimentale, analyse statistique, mathématique et optimisation. .» Guelma , Génie Civil & Hydraulique : Université 8 Mai 1945 de Guelma Faculté des Sciences et de la Technologie , 2023.
- [Ogac 05]** : A. A. Ogacho, B. O. Aduda, F. W. Nyongesa. «Thermal shock behaviour of akaolinite refractory prepared using a natural organic binder, J. Mater. Sci.» 2005: 8276-8283.
- [Chen 00]**: C.Y. Chen, G.S. Lan, W.H.Tuan. «Microstructural evolution of mullite during the sintering of kaolin powders compacts, Ceram. Int. 26.» 2000: 715-720.

- [Brin 59]:** G.W. Brindley, G.W. Nakahira. «The Kaolinite Mullite Reaction Serie II.» 1959: 314-318.
- [Brin 57]:** G.W. Brindley, M. Nakahira. « Kinetics of dehydroxylation of kaolinite and halloysite, J. Am. Ceram. Soc. 40 .» 1957: 314-318.
- [Jour 69] :** Jourdain, A. «La technologie des produits réfractaires, Edition gautier villars,paris.» 1969: 40.
- [Saad 93]:** L. Saadi, E. Jabry, R. Moussa, M. Gomina. «Etude des propriétés physicochimiques et mécaniques de matériaux céramiques élaborés à partir d'une argile du Maroc :Partie I, Silicates Industriels, 3-4.» 2000: 51-57.
- [Bell95]:** M. Bellotto, A. Gualtieri, G. Artioli, S.M. Clark. «Kinetics study of the kaolinite mullite reaction sequence. I kaolinite dehydroxylation, Physics and chemistry of minerals, V.» 1969: 40.
- [Koll02]:** M. Kolli, M. Hamidouche, K. Loucif, H. Osmani, M/A. Majoubi, N. Bouaouadja, M. Gonon, G Fantozzi. «Caractérisation Rhéologique des kaolins de Djebel Debbagh, 6ème Congrès de la Société Algérienne de Chimie .» 2002: 6-62.
- [Murr 00]:** Murray, H.H. «Traditional and new applications for kaolin, and palygorskite.» 2000: 207-221.
- [Brin 57]:** Nakahira, Brindley. «The structure of kaolinite and metakaolinite.» Constantine: the Philosopher University, 2007.
- [Ants01] :** V.N. Antsiferov, S.E. Porozova, V.Y. Bekker, A. Comparative. «Characterization of kaolins of provenance from the prosyanovskoe and kyshtymkoe Deposits Subjected to Mechanochemical Activation .» 2001: 369-371.
- [Lee98] :** W. Lee, R. Moore. «Evaluation of in –situ refractaire in the 20 the centry.» *Journal of the American ceramic society, Vol 81, N°6*, 1998: 1385-1410.

