

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université de 8 Mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

Présenté par :

BENSOUANE Sarra

**Thème : L'effet de l'incorporation des fibres de pailles
issues de la production du sucre sur le comportement des
matériaux de construction**

Sous la direction de : **Dr. KHALDI. Nacera**

Juin 2024

REMERCIEMENTS

Avant tout, je remercie « Dieu » le tout puissant.

Je tiens à remercier l'ensemble des personnes qui ont participé au bon déroulement de mon travail, et qui m'ont permis de réaliser ce mémoire.

Je témoigne donc toute ma reconnaissance :

*À Dr **KHALDI Nacera**, directrice de ce mémoire, qui a dirigé ce travail de recherche attentivement et efficacement l'évolution de ce travail.*

*À Pr **CHERAIT Yacine**, pour son soutien, son encouragement et ses conseils.*

À l'ensemble du corps enseignants et administratif du département de génie civil et d'hydraulique de la faculté des sciences et de la technologie de l'Université 8 Mai 1945 de Guelma.

*À Messieurs : le directeur du Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique de l'université 8 Mai 1945 Guelma Pr **NOUAOURIA Mohamed Salah** et Dr **BOUDJAHM Houcine** qui m'ont accueilli au sein du laboratoire LGCH et d'architecture.*

Aux techniciennes du laboratoire pédagogique du département de génie civil et d'hydraulique de l'université de Guelma : Samira, Sihem,...

A tout le personnel de :

- *La briqueterie EL-Riadh Bendjerrah, spécialement à monsieur **HIMRI Ahmed**, **Linda**, **Ammar**, **Dounia**, **Halla** et **Ahlem** ...*
- *Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction, spécialement à **Mr KETFI Kabil***
- ***Mr OUARFALLA Rabeh** pour ses conseils et encouragements*

Merci à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.



DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

À Mes chers parents

À Mes Sœurs et mon frère

À ma défunte Grand-mère ; paix à son âme.

À Toute ma famille

À mes amies

À La promotion 2024 master 2, structures de l'université 8

Mai 1945 Guelma.

Sarra



Résumé

Cette étude s'inscrit dans une démarche de développement durable visant à valoriser les sous-produits industriels dans la fabrication de matériaux de construction. Plus spécifiquement, elle a porté sur l'incorporation de deux coproduits majeurs de l'industrie sucrière - l'écume de sucre riche en fibres cellulosiques et la mélasse riche en sucres - dans les formulations de briques, mortiers et bétons.

Une étude bibliographique approfondie a d'abord permis de synthétiser les connaissances sur la valorisation des déchets et les caractéristiques de ces matériaux. Un vaste programme expérimental combinant essais normalisés et analyses microstructurales a ensuite été mené pour évaluer l'impact de différents dosages de substitution sur les propriétés clés : résistances mécaniques (compression, flexion), transferts hydriques (absorption d'eau, humidité interne), ouvrabilité, cinétiques de prise.

Les résultats ont révélé des comportements contrastés selon la nature du substitut. L'incorporation d'écume de sucre jusqu'à 10% s'est avérée bénéfique, permettant d'améliorer significativement les résistances des briques (+18% en compression) et des mortiers, probablement grâce à un effet de renfort par les fibres cellulosiques. Cependant, au-delà de 15%, un excès de matière organique a dégradé les performances.

A l'inverse, l'ajout de mélasse s'est révélé extrêmement défavorable, entraînant des baisses importantes des résistances mécaniques (jusqu'à -90% pour les bétons), une augmentation drastique de la porosité et de l'absorption d'eau, ainsi qu'une perturbation des cinétiques de prise, quelle que soit la teneur incorporée.

Cette étude démontre donc le potentiel de valorisation contrôlée de l'écume de sucre pour développer des éco-matériaux performants et durables. Cependant, l'utilisation de la mélasse apparaît très limitée en raison de ses impacts néfastes majeurs. Des investigations complémentaires sur la microstructure, la durabilité à long terme et les aspects économiques permettront d'optimiser les formulations avant un possible transfert industriel de ces solutions éco-innovantes.

Mots-clés : Valorisation des déchets, sous-produits sucriers, écume de sucre, mélasse, briques, mortiers, bétons, propriétés mécaniques, absorption d'eau, cinétique de prise, ...

Abstract

This study is part of a sustainable development approach aimed at recovering industrial by-products in the manufacture of construction materials. More specifically, it focused on the incorporation of two major by-products of the sugar industry - cellulosic fibre-rich sugar scum and sugar-rich molasses - in brick, mortar and concrete formulations.

An in-depth literature review first made it possible to synthesize knowledge on waste recovery and the characteristics of these materials. A vast experimental program combining standardized tests and microstructural analyses was then conducted to evaluate the impact of different substitution dosages on key properties: mechanical strength (compression, bending), water transfers (water absorption, internal humidity), workability, setting kinetics.

The results revealed contrasting behaviours depending on the nature of the surrogate. The incorporation of sugar scum up to 10% has proven to be beneficial, significantly improving the strength of bricks (+18% in compression) and mortars, probably thanks to a reinforcement effect by cellulosic fibres. However, above 15%, an excess of organic matter has degraded performance.

Conversely, the addition of molasses proved to be extremely unfavourable, leading to significant reductions in mechanical strength (up to -90% for concrete), a drastic increase in porosity and water absorption, as well as a disturbance of the setting kinetics, regardless of the content incorporated.

This study therefore demonstrates the potential for controlled recovery of sugar scum to develop high-performance and sustainable eco-materials. However, the use of molasses appears to be very limited due to its major harmful impacts. Additional investigations on the microstructure, long-term durability and economic aspects will make it possible to optimize the formulations before a possible industrial transfer of these eco-innovative solutions.

Keywords: Waste recovery, sugar by-products, sugar scum, molasses, bricks, mortars, concretes, mechanical properties, water absorption, setting kinetics, etc.

ملخص

هذه الدراسة هي جزء من نهج التنمية المستدامة الذي يهدف إلى تثمين المنتجات الثانوية الصناعية في صناعة مواد البناء حيث ركزت على دمج ناتجين رئيسيين عن صناعة السكر وهما رغوة السكر الغنية بالألياف السليلوزية والدبس الغني بالسكر، في تركيبات الطوب والملاط والخرسانة.

أتاح استعراض متعمق للأعمال السابقة أولاً تجميع المعرفة حول استعادة النفايات وخصائص هذه المواد. ثم تم إجراء برنامج تجريبي واسع يجمع بين الاختبارات الموحدة والتحليلات المجهرية لتقييم تأثير جرعات الاستبدال المختلفة على الخصائص الرئيسية: القوة الميكانيكية (الضغط، الانحناء)، عمليات نقل المياه (امتصاص الماء، الرطوبة الداخلية) ...

كشفت النتائج عن سلوكيات متناقضة اعتماداً على طبيعة البديل. أثبت دمج حثالة السكر بنسبة تصل إلى 10٪ أنه مفيد، حيث يحسن بشكل كبير من قوة الطوب (+18٪ في الضغط) والملاط، ربما بفضل تأثير التعزيز بواسطة الألياف السليلوزية. ومع ذلك، فوق 15 ٪، أدى وجود فائض من المواد العضوية إلى تدهور الأداء.

على العكس من ذلك، أثبتت إضافة دبس السكر أنها غير مواتية للغاية، مما أدى إلى انخفاض كبير في القوة الميكانيكية (تصل إلى -90٪ للخرسانة)، وزيادة كبيرة في المسامية وامتصاص الماء، فضلاً عن اضطراب حركية الإخذ والتصلب، بغض النظر عن المحتوى المدمج.

لذلك توضح هذه الدراسة إمكانية التثمين الخاضع للرقابة لرغوة السكر لتطوير مواد بيئية عالية الأداء ومستدامة. ومع ذلك، يبدو أن استخدام دبس السكر محدود للغاية بسبب آثاره الضارة الرئيسية. ستمكن التحقيقات الإضافية حول البنية المجهرية والمتانة طويلة الأجل والجوانب الاقتصادية من تحسين التركيبات قبل النقل الصناعي المحتمل لهذه الحلول المبتكرة بيئياً.

الكلمات المفتاحية: تثمين النفايات، المنتجات الثانوية للسكر، رغوة السكر، دبس السكر، الطوب، الملاط، الخرسانة، الخواص الميكانيكية، امتصاص الماء، حركية الإخذ والتصلب، إلخ.

SOMMAIRE

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale

Chapitre I : Etat de l'art

I.1 Introduction	01
I.2 Approche environnementale	01
I.2.1 Notion d'environnement	01
I.2.2 Génie civil et environnement : les exigences	01
I.2.3 Notion du développement durable	02
I.2.4 Les piliers du développement durable	02
I.2.5 Les principaux Eco-matériaux utilisés dans la construction	03
I.3 Valorisation des déchets	04
I.3.1 Définition des déchets	04
I.3.2 Classification des déchets	04
I.3.3 Les déchets industriels	05
I.3.3.1 Différents types de déchets industriels	05
I.3.4 Valorisation des déchets industriels	06
I.4 La production sucrière	06
I.4.1 La canne à sucre	07
I.4.2 La betterave sucrière	07
I.4.3 Processus de la fabrication du sucre	08
I.4.4 Le raffinage	08
I.4.5 Les sous-produits de la production sucrière	09
I.5 Les matériaux de construction	09
I.5.1 Les briques	09
I.5.1.1 Définition	09
I.5.1.2 Les constituants de la brique	09
I.5.1.3 Types de brique	10
I.5.1.4 Avantages et inconvénients des briques	12

I.5.2 Le mortier	11
I.5.2.1 Définition	11
I.5.2.2 Les constituants du mortier	12
I.5.2.3 Types de mortier	13
I.5.2.4 Domaines d'application des mortiers	14
I.5.3 Le béton	14
I.5.3.1 Définition	14
I.5.3.2 Classification du béton	14
I.5.3.3 Avantages et inconvénients du béton	15
I.5.3.4 Domaines d'application du béton	15
I.6 Conclusion	16

Chapitre II : caractérisation des matériaux utilisés et méthodes expérimentales

II.1 Introduction	17
II.2 Description des matériaux	17
II.2.1 L'argile	18
II.2.1.1 Détermination des limites d'Atterberg	18
II.2.2 Le sable	21
II.2.3 Gravier	22
II.2.3.1 Caractéristiques physiques du gravier	22
II.2.3.2 Caractéristiques mécaniques du gravier	22
II.2.4 Le Ciment	23
II.2.5 Eau de gâchage	24
II.2.6 L'adjuvant	24
II.2.7 Sous-produits issues de la production sucrière	25
II.2.7.1 L'écume	25
II.2.7.2 La mélasse	26
II.3 Formulation et corps d'épreuve	27
II.3.1 La brique	27
II.3.1.1 Compositions	27
II.3.1.2 Confections des briques	28
II.3.1.3 Essais expérimentaux réalisés sur les briques préparés	28
II.3.2 Le Mortier	30

II.3.2.1 Compositions	30
II.3.2.2 Confection des éprouvettes	31
II.3.2.3 Essais expérimentaux réalisés sur les mortiers préparés	34
II.3.3 Le Béton	37
II.3.3 1 Compositions	37
II.3.3 2 Confection des éprouvettes	38
II.3.3 3 Essais expérimentaux réalisés sur les bétons préparés	40
II.4 Conclusion	41

Chapitre III : analyse et interprétation des résultats

III.1 Introduction	42
III.2 Essais sur les matériaux frais	43
III.2.1 Essai sur l'argile : la limite d'Atterberg	43
III.2.2 Essai sur les mortiers : Essai de Vicat	46
III.3 Essai de la capacité d'absorption d'eau	50
III.3.1 La brique	50
III.3.2 Les mortiers	51
III.3.3 Le béton	53
III.4 Essai de l'humidité pour mortier	54
III.5 Evolution de la résistance des différents matériaux testés	56
III.5.1 La brique	56
III.5.1.1 Essai de flexion 3 points	57
III.5.1.2 Essai de compression	57
III.5.2 Le béton	60
III.5.2.1 Essai de compression	60
III.5.3 Le mortier en mode de conservation dans l'eau	62
III.5.3.1 Essai de flexion 3 points	62
III.5.3.2 Essai de compression	68
III.5.4 Le mortier en mode de conservation à l'air libre	73
III.5.4.1 Essai de flexion 3 points	73
III.5.4.2 Essai de compression	79
III.6 Conclusion	84
Conclusion générale	
Références bibliographiques	

Références normatives

LISTE DES FIGURES

Figure I.1	Les piliers du développement durable.	03
Figure I.2	Classification des déchets.	04
Figure I.3	Différents types de déchets industriels.	05
Figure I.4	Valorisation des déchets industriels.	06
Figure I.5	Processus de fabrication du sucre.	08
Figure I.6	Processus du raffinage du sucre.	08
Figure I.7	Brique pleine.	10
Figure I.8	Brique creuse.	10
Figure I.9	Brique mono mur.	10
Figure I.10	Les constituants du mortier.	11
Figure II.1	L'argile utilisée.	18
Figure II.2	Photos de préparation des limites d'Atterberg.	18
Figure II.3	Photos de détermination de la limite de liquidité.	19
Figure II.4	Photos de détermination de la limite de plasticité.	19
Figure II.5	Résultat limite de liquidité par Datasol.	20
Figure II.6	Abaque de Casagrande par Datasol.	21
Figure II.7	Le sable utilisé.	21
Figure II.8	Gravier 15/25 utilisé.	22
Figure II.9	Gravier 5/15 utilisé.	22
Figure II.10	Ciment utilisé.	23
Figure II.11	L'adjuvant utilisé.	25
Figure II.12	L'écume utilisé.	26
Figure II.13	La mélasse utilisée.	26
Figure II.14	Composition des briques utilisées.	25

Figure II.15	Composition de la brique avec 5 % écume.	27
Figure II.16	Composition de la brique avec 10 % écume.	27
Figure II.17	Processus de fabrication des briques.	28
Figure II.18	Les briques confectionnées.	28
Figure II.19	Appareil de compression utilisé.	29
Figure II.20	Appareil de flexion utilisé.	30
Figure II.21	Moules utilisés.	32
Figure II.22	Malaxeur à mortier.	32
Figure II.23	Les étapes de confection des éprouvettes en béton.	32
Figure II.24	Les éprouvettes de mortier confectionnées.	33
Figure II.25	Table à secousses utilisé.	34
Figure II.26	Appareil de Vicat utilisé.	35
Figure II.27	Appareil d'essai de compression.	36
Figure II.28	Appareil pour essai de traction par flexion.	37
Figure II.29	Malaxeur utilisé.	38
Figure II.30	Moules utilisés.	38
Figure II.31	Les étapes de confection des éprouvettes en béton.	39
Figure II.32	Moules confectionnés.	39
Figure II.33	Essais expérimentaux réalisés sur les bétons préparés.	40
Figure III.1	Résultats pour la limite de plasticité par Datasol.	44
Figure III.2	Abaques de Casagrande par Datasol.	45
Figure III.3	La variation de la prise des mortiers en fonction du dosage de différents substituts (écume, mélasse, écume + mélasse), obtenus par l'essai de l'aiguille de Vicat	48
Figure III.4	Mode de rupture de la brique en flexion 3 points	56
Figure III.5	Variation de la résistance de flexion 3 points pour la brique en fonction de la variation du dosage de l'écume de sucre	57
Figure III.6	Mode de rupture de la brique en compression	58

Figure III.7	Variation de la résistance en compression pour la brique en fonction de la variation du dosage de l'écume de sucre	58
Figure III.8	Mode de rupture des éprouvettes par la presse	60
Figures III.9	Variation de la résistance en compression du béton en fonction du dosage de la mélasse	61
Figures III.10	Mode de rupture du mortier en flexion 3 points	62
Figures III.11	Variation de la résistance en flexion du mortier en fonction du dosage de l'écume	63
Figures III.12	Variation de la résistance en flexion du mortier en fonction du dosage de la mélasse	64
Figures III.13	Variation de la résistance en flexion du mortier en fonction du dosage de l'écume + mélasse	65
Figures III.14	Mode de rupture des éprouvettes par la presse.	68
Figures III.15	Variation de la résistance en compression du mortier en fonction du dosage de l'écume.	69
Figures III.16	Variation de la résistance en compression du mortier en fonction du dosage de la mélasse	70
Figures III.17	Variation de la résistance en compression du mortier en fonction du dosage de l'écume + mélasse	71
Figures III.18	Variation de la résistance en flexion du mortier en fonction du dosage de l'écume	74
Figures III.19	Variation de la résistance en flexion du mortier en fonction du dosage de la mélasse.	75
Figures III.20	Variation de la résistance en flexion du mortier en fonction du dosage de l'écume + mélasse	76
Figures III.21	Variation de la résistance en compression du mortier en fonction du dosage de l'écume	79
Figures III.22	Variation de la résistance en compression du mortier en fonction du dosage de la mélasse	80
Figures III.23	Variation de la résistance en compression du mortier en fonction du dosage de l'écume + mélasse	81

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1	Composition chimique de la canne à sucre.	07
Tableau I.2	Composition chimique de la betterave sucrière.	07
Tableau I.3	Avantages et inconvénients des briques.	11
Tableau I.4	Avantages et inconvénients du béton.	15
Tableau II.1	Résultats W_p .	19
Tableau II.2	Résultats W_L .	20
Tableau II.3	Propriétés du sable utilisé.	21
Tableau II.4	Caractéristiques physiques des graviers.	22
Tableau II.5	Caractéristiques mécaniques des graviers.	23
Tableau II.6	Caractéristiques mécaniques de ciment.	24
Tableau II.7	Caractéristiques chimiques de l'eau de gâchage utilisée.	24
Tableau II.8	Caractéristiques mécaniques de ciment.	25
Tableau II.9	Composition des différentes briques.	27
Tableau II.10	Composition des différents mortiers.	31
Tableau II.11	Valeurs des étalements.	34
Tableau II.12	Compositions des différents bétons.	37
Tableau III.1	Les valeurs de limites de plasticité (WP), de liquidité (WL) et de l'indice de plasticité (IP) mesurées.	43
Tableau III.2	Résultats de l'essai de l'aiguille de Vicat sur les mortiers avec différents dosages de substituts (écume, mélasse, écume + mélasse)	47
Tableau III.3	Variation de CAE de la brique en fonction du dosage de l'écume	50
Tableau III.5	Variation de CAE du béton en fonction du dosage de la mélasse	51
Tableau III.6	Variation du taux de l'humidité du mortier en fonction du dosage de substitut	54

Tableau III.7	Variation de la résistance à la flexion 3 points pour la brique en fonction de la variation du dosage de l'écume de sucre	57
Tableau III. 8	Variation de la résistance en compression de la brique en fonction du dosage de l'écume de sucre	58
Tableau III. 9	Variation de la résistance en compression du béton en fonction du dosage de l'écume de la mélasse	60
Tableau III.10	Variation de la résistance en flexion du mortier en fonction du dosage de l'écume	63
Tableau III.11	Variation de la résistance en flexion du mortier en fonction du dosage de la mélasse	64
Tableau III.12	Variation de la résistance en flexion du mortier en fonction du dosage de l'écume + mélasse	65
Tableau III.13	Variation de la résistance en compression du mortier en fonction du dosage de l'écume	68
Tableau III.14	Variation de la résistance en compression du mortier en fonction du dosage de la mélasse.	69
Tableau III.15	Variation de la résistance en compression du mortier en fonction du dosage de l'écume + mélasse	70
Tableau III.16	Variation de la résistance en flexion du mortier en fonction du dosage de l'écume	73
Tableau III.17	Variation de la résistance en flexion du mortier en fonction du dosage de la mélasse	74
Tableau III.18	Variation de la résistance en flexion du mortier en fonction du dosage de l'écume + mélasse	75
Tableau III.19	Variation de la résistance en compression du mortier en fonction du dosage de l'écume	79
Tableau III.20	Variation de la résistance en compression du mortier en fonction du dosage de la mélasse	80
Tableau III.21	Variation de la résistance en compression du mortier en fonction du dosage de l'écume + mélasse	81

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'industrie sucrière génère d'importants volumes de sous-produits tels que la mélasse et les écumes de sucre. La valorisation de ces déchets dans les matériaux de construction comme les briques, mortiers et bétons représente une opportunité intéressante d'un point de vue environnemental et économique. Cependant, les effets de l'incorporation de ces sous-produits sur les propriétés fondamentales des matériaux de construction restent mal connus et contrastés selon leur nature, leur dosage, et le type de matériau. Une meilleure compréhension de leurs impacts est nécessaire pour développer des formulations optimisées, performantes et durables valorisant ces co-produits industriels.

L'incorporation de sous-produits industriels dans les matériaux de construction est une approche de plus en plus étudiée dans le cadre du développement durable et de l'économie circulaire [AGUILAR et al., 2021] ; [SERRES et al., 2021]. Cette valorisation permet de réduire l'impact environnemental en détournant ces déchets des filières d'enfouissement ou d'incinération tout en préservant les ressources naturelles. L'industrie sucrière génère notamment d'importants volumes de sous-produits tels que la mélasse, résidu de la cristallisation du sucre, et les écumes issues du processus de clarification [CARDENAS-AGUIAR et al., 2019].

De nombreuses études ont été menées pour valoriser ces déchets sucriers comme additions dans différents matériaux à matrice cimentaire. La mélasse riche en glucides a été incorporée dans les bétons et mortiers, agissant comme retardateur de prise et réducteur d'eau, mais pouvant affecter les résistances mécaniques [MARTIRENA et al., 2017]. Les écumes, composées principalement de fibres cellulosiques et de cires, ont été investiguées comme agent entraîneur d'air et renfort dans les mortiers [KOSMATKA et al., 2002].

Dans les produits argileux, l'ajout d'écumes de sucre a montré un potentiel pour améliorer la compacité et les résistances mécaniques des briques [AJAM et al., 2009].

Cependant, les effets de ces sous-produits sur les propriétés physiques, mécaniques et hydriques des différents matériaux restent contrastés selon leur nature et leur dosage.

Ce travail vise donc à approfondir les connaissances sur l'incorporation d'écume de sucre et de mélasse dans les briques, mortiers et bétons, en étudiant de manière systématique leurs impacts sur les caractéristiques fondamentales de ces matériaux. Un large programme

expérimental couplant essais normalisés a été mis en œuvre afin d'évaluer l'influence de différents dosages de substitutions sur les résistances mécaniques.

Objectif principal :

Ce travail vise à étudier de manière approfondie et systématique l'influence de l'incorporation de deux sous-produits majeurs de l'industrie sucrière, l'écume de sucre et la mélasse, sur les propriétés physiques, mécaniques, hydriques et les cinétiques de prise des briques, mortiers et bétons. Un vaste programme expérimental combinant essais normalisés et analyses microstructurales a été mis en œuvre afin d'évaluer les effets de différents dosages de ces substituts surs :

- Les résistances mécaniques (compression, flexion).
- Les propriétés de transfert hydrique (absorption d'eau, humidité interne).
- Le comportement à l'état frais (ouvrabilité, prise)

L'objectif aussi est d'identifier les formulations optimales permettant de valoriser ces co-produits industriels tout en assurant des performances techniques satisfaisantes pour les différents matériaux de construction étudiés.

CHAPITRE I

ETAT DE L'ART

Chapitre I

État de l'art

I.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à une synthèse bibliographique dans laquelle, on présente l'approche environnementale et son lien avec le génie civil, les déchets industriels ; le recyclage et les procédés de leurs valorisations techniques

Il vise également à présenter la production sucrière et ses sous-produits, ainsi que les matériaux de construction : la brique, le béton et le mortier.

I.2 Approche environnementale

I.2.1 Notion d'environnement

L'environnement englobe une multitude de thèmes (eau, air, sols, déchets, milieux naturels, paysage, bruit, énergie, aménagement de l'espace, sécurité, etc.), concernant de nombreux secteurs (industrie, agriculture, collectivités locales, santé publique, etc.) et de multiples niveaux d'interventions (étude, conseil, expertise, contrôle, exploitation, ingénierie, maîtrise d'œuvre, etc.). [Net 1]

I.2.2 Génie civil et environnement : les exigences [Net 2]

À l'heure du développement durable, le génie civil et l'environnement semblent être inexorablement liés l'un à l'autre. Le choix des matériaux, l'exécution des travaux, la gestion des déchets... ces préoccupations nouvelles tendent à devenir les fondations indispensables à tout ouvrage. Ce n'est en effet qu'en intégrant ces exigences environnementales dans les sciences et techniques de l'ingénierie qu'il sera possible de façonner un avenir plus respectueux de la nature. Pour cela il y'a lieu de prendre en considération les points suivants :

- **Optimiser la conception des ouvrages**

L'un des défis majeurs consiste à édifier des structures plus légères et ce sans compromettre la faisabilité ou l'intégrité de l'édifice à venir.

- **Utiliser des matériaux de construction bas carbone**

Béton bas carbone, gravier recyclé, lamellé-collé, fibre de verre, de chanvre ou de lin. Privilégier des produits locaux, recyclés ou à faible impact environnemental, tels que ceux-ci, contribue à la réduction des émissions liées à la production des matières elles-mêmes.

- **Opter pour un chantier durable**

La construction d'un ouvrage requiert inévitablement des ressources pour alimenter les divers engins de chantier. Utiliser une énergie renouvelable, à l'instar du solaire photovoltaïque, de la biomasse, de la géothermie ou de l'éolien, peut justement réduire la consommation d'énergie nécessaire.

- **Gérer l'évacuation et le recyclage des matériaux de construction**

En adoptant une gestion de production pointue à chaque étape, l'industrie du génie civil peut jouer un rôle actif sur les questions environnementales. Dimensionnement des justes quantités à la source, volume de déchets générés, techniques de collecte et d'évacuation ou encore recyclage sont en l'occurrence autant de leviers qu'il est possible d'actionner.

- **Employer des techniques de construction durable**

Pourquoi ne pas construire des bâtiments fonctionnels, parfaitement sécurisés et respectueux en faisant le choix de méthodes à faible impact environnemental ? Certaines techniques, à l'image des constructions passives, des bâtiments modulaires ou des toitures végétales s'inscrivent parfaitement dans ce cadre.

I.2.3 Notion du développement durable

La définition du concept de Développement Durable apparue dans est le Rapport de Mme Gro Harlem Brundtland, premier ministre de Norvège, en 1987 aux Nations Unies : «Our common future» «Un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs».[Net 3]

I.2.4 Les piliers du développement durable [Net 4]

Le développement durable se fonde sur trois piliers :

- **Le pilier économique** qui vise à faire diminuer l'extrême pauvreté tout en garantissant un emploi justement rémunéré pour tous ;

- **Le pilier environnemental** dont l'objectif est de veiller à la sauvegarde de l'équilibre naturel de la planète tout en limitant l'impact des activités humaines sur la planète ;
- **Le pilier social** qui garantit l'accès aux ressources et services de base à tous.

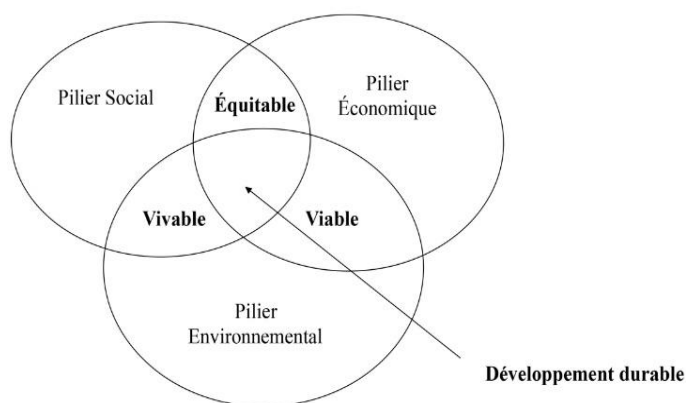


Figure I.1: Les piliers du développement durable [Net 5]

I.2.5 Les principaux Eco-matériaux utilisés dans la construction

Un matériau écologique, également appelé éco-matériau ou matériau biosourcé, est un matériau de construction qui présente le moins d'impact possible pour la santé et l'environnement lors de sa production, sa mise en œuvre et sa fin de vie. Il provient pour ses matières premières de ressources renouvelables. Recyclable ou biodégradable, sans émanations toxiques, il s'intègre dans la perspective d'une économie circulaire. [Net 6]

Dans le domaine des éco-matériaux, il est intéressant de noter comment on est revenu vers certains matériaux traditionnels comme le bois ou la brique de terre crue dont on reconnaît à nouveau les valeurs : [Net 7]

Parmi les principaux **matériaux de construction écologiques**, on trouve :

- Le bois lorsque la forêt est gérée durablement.
- L'argile avec la brique de terre cuite ou la brique de terre crue.
- La brique silico-calcaire.
- Le béton cellulaire.
- La paille.
- Le béton de chanvre.

Parmi les principaux **matériaux d'isolation écologiques**, on trouve :

- La ouate de cellulose issue du recyclage des journaux et papier.
- La laine : laine de mouton, de coton, de chanvre ou de bois.
- Le lin.

I.3 Valorisation des déchets

I.3.1 Définition des déchets

Le terme « déchet » est défini comme tout objet, matériau ou substance dérivée des activités humaines ou des fonctions des corps des êtres humains ou des animaux domestiques et qui ne répond plus à l'objectif pour lequel, il était destiné et qui ne semble plus utile aux yeux de son propriétaire, pour une utilisation à d'autres fins. [ATCHI et al., 2006]

Il devient déchet quand son propriétaire décide de s'en débarrasser en le retournant à un milieu naturel (généralement l'eau ou le sol) ou en le remettant sous la responsabilité de la communauté, de la municipalité ou de l'entité de collecte des déchets. [Net 8]

I.3.2 Classification des déchets

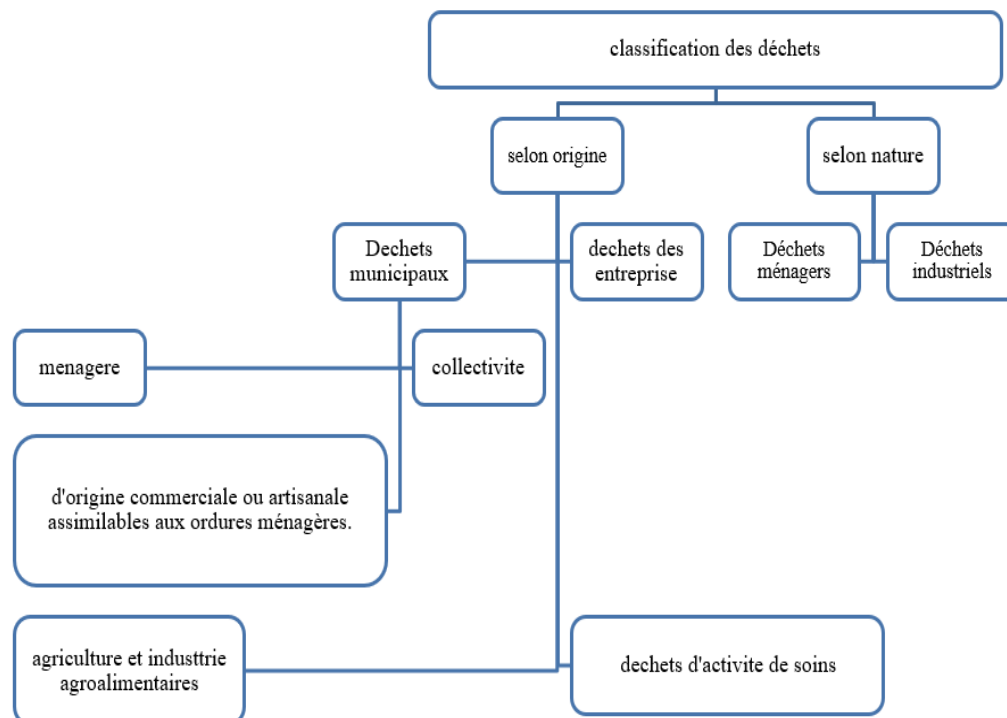


Figure I.2: Classification des déchets.

I.3.3 Les déchets industriels

Les déchets industriels sont tous les déchets provenant des processus de fabrication, de transformation, de nettoyage, d'utilisation, de maintenance ou de consommation générés par les industries ou l'activité industrielle. [Net 9]

I.3.3.1 Différents types de déchets industriels [Net 10]

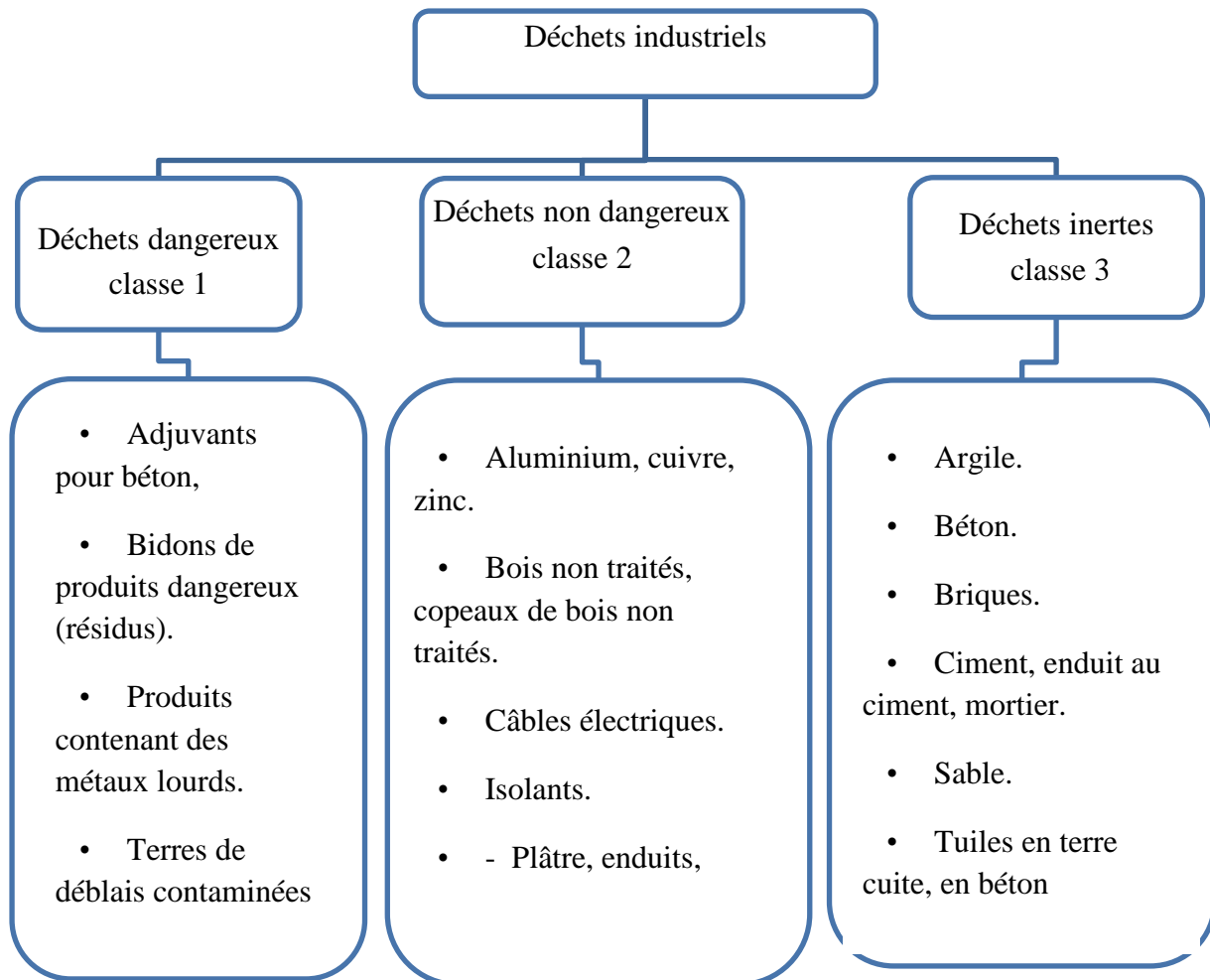


Figure I.3: Différents types de déchets industriels.

I.3.4 Valorisation des déchets industriels [Net 10]

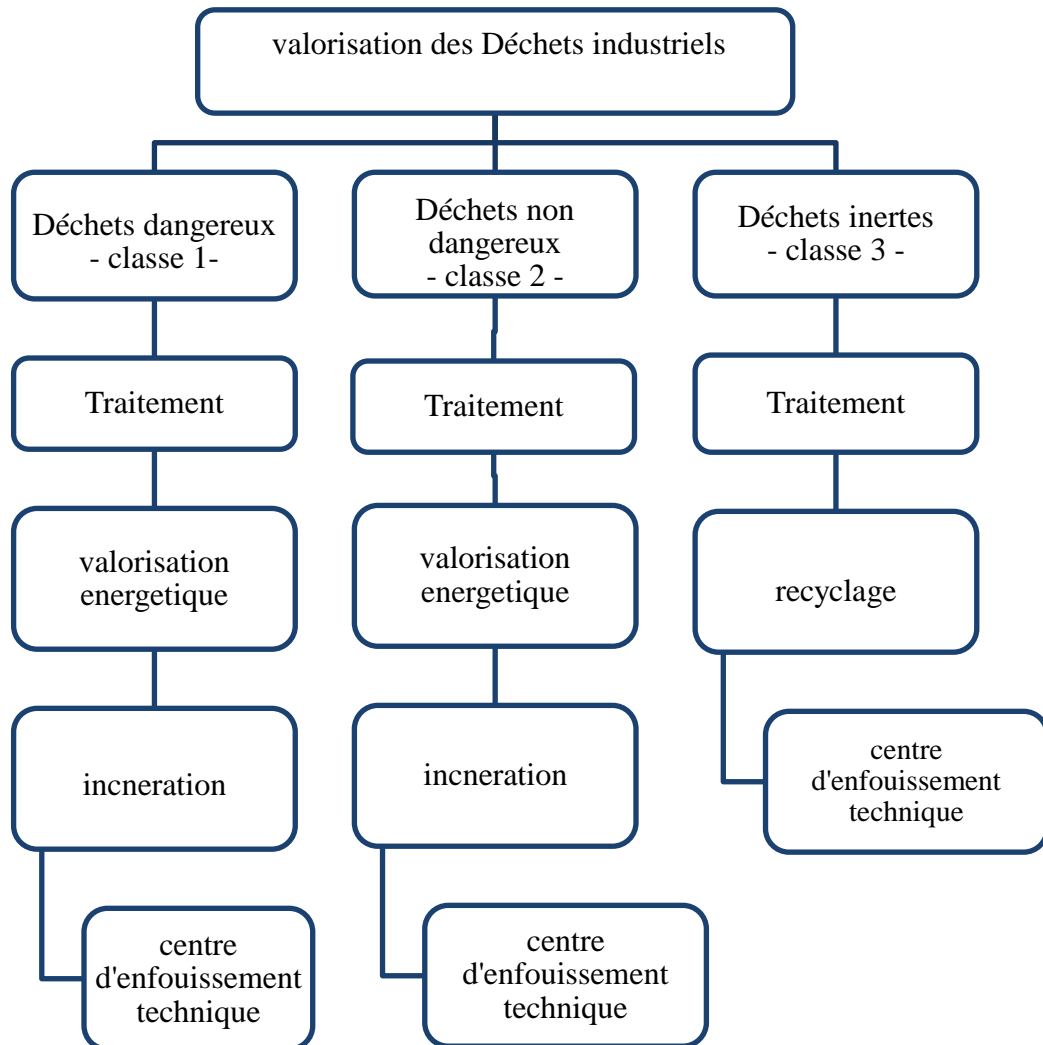


Figure I.4: Valorisation des déchets industriels.

I.4 La production sucrière

L'industrie sucrière implique la production du sucre à partir de plantes telles que : la canne à sucre ou la betterave sucrière. Elle a été développée à l'origine avec la canne à sucre dans les colonies européennes des Caraïbes et des Mascareignes, et a ensuite été abordé dans l'industrie de la betterave sucrière qui a émergé en Europe au 19^{ème} siècle.

I.4.1 La canne à sucre

La canne à sucre est une plante cultivée principalement pour ses tiges qui contiennent un jus sucré d'où on tire le sucre caractérisé par une hauteur de 2 à 5 mètres et d'un diamètre de 2 à 6 cm, cultivées dans les régions tropicales et subtropicales du monde.

La canne à sucre est cultivée comme plante annuelle avec une récolte 8 à 10 mois après la plantation. La température minimale de croissance varie entre 15°C et 18° C, avec un pH de l'ordre de 7 à 7,5.

La canne à sucre est composée de : [FEDHOUL et al., 2021]

Tableau I.1: Composition chimique de la canne à sucre.

Composant	Teneur (%)
Eau	70 %
Fibres ligneuses	14 %
Saccharose	14 %
Impuretés	2 %

I.4.2 La betterave sucrière

La betterave sucrière (*Beta vulgaris* L.), est une plante généralement cultivée pour sa racine charnu exploitée principalement pour la production de sucre. Elle est bisannuelle de la famille de chénopodiacées. Elle peut mesurer environ un mètre de haut.

La composition chimique moyenne de la betterave sucrière est présentée dans le tableau I.2. [FEDHOUL et al., 2021]

Tableau I.2: Composition chimique de la betterave sucrière.

Composant	Teneur (%)
Eau	75,9 %
Saccharose	16 %
Pulpe	5,5 %
Impuretés	2,6 %

I.4.3 Processus de la fabrication du sucre [Net 11]

Le procédé d'extraction du sucre de canne est identique à celui du sucre de betterave, à l'exception de la première phase où le jus de canne est extrait par broyage, tandis que celui de betterave est extrait par diffusion.

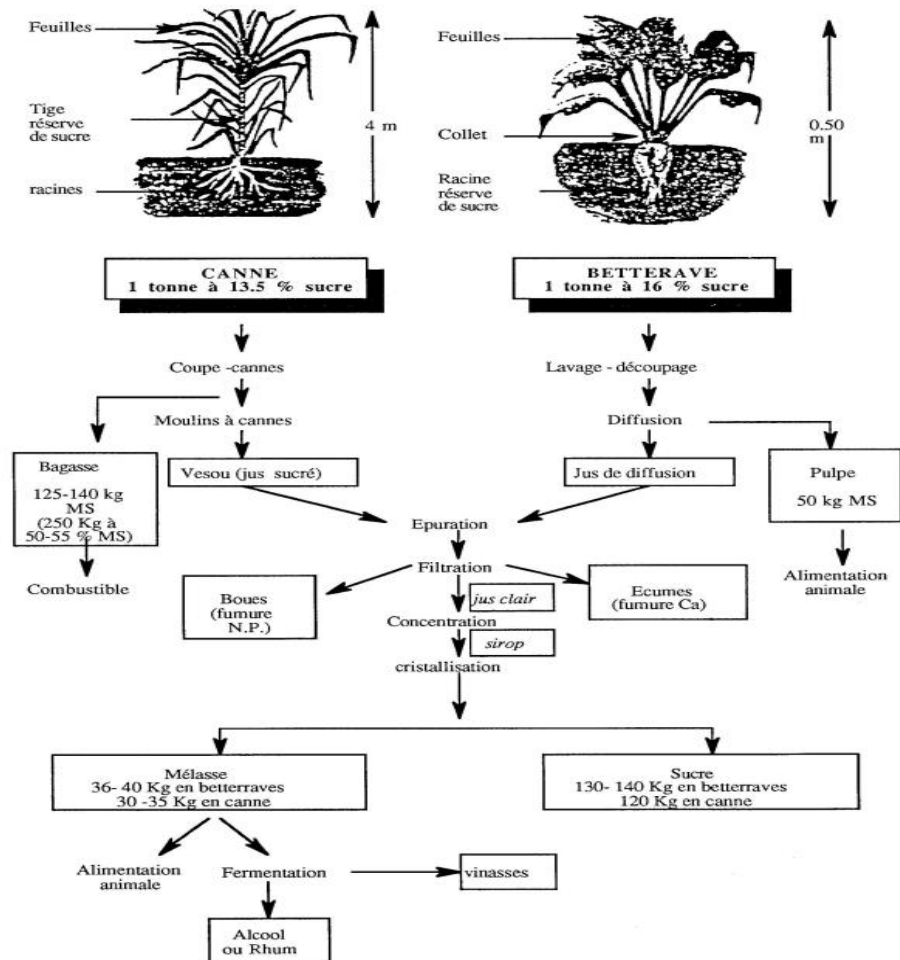


Figure I.5: Processus de fabrication du sucre.

I.4.4 Le raffinage

Le raffinage désigne en effet le processus permettant d'obtenir du sucre de canne blanc à partir du sucre de canne brut (roux) en éliminant tous les composés colorants. [Net12]

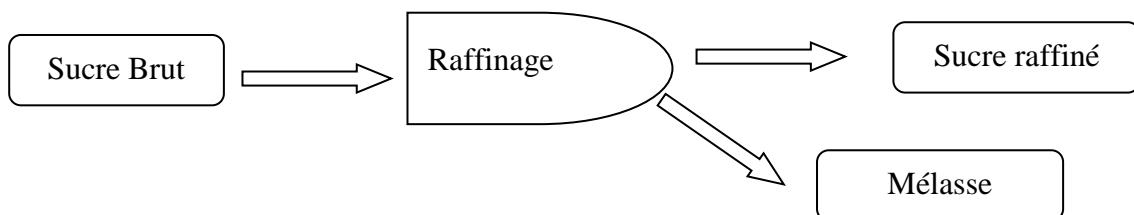


Figure I.6: Processus du raffinage du sucre.

I.4.5 Les sous-produits de la production sucrière [Net 13]

L'industrie sucrière génère plusieurs sous-produits, notamment :

- **Pulpe** : Les betteraves, une fois épuisées en sucre par diffusion dans l'eau chaude, prennent le nom de pulpes, Riches en vitamines, protéines et minéraux, elles contiennent également du sucre résiduel. Cette composition connaît aujourd'hui de nouveaux débouchés industriels : agent d'opacification des pâtes à papier, isolants à base de fibres naturelles pour la construction, filtration des effluents industriels.

- **Mélasses** : Pour la sucrerie de canne ou de betterave, le produit final non cristallisé, visqueux et très coloré, est la mélasse ; on l'utilise comme support de fermentation pour la production d'alcool, de levures ou de micronutriments ainsi que dans les aliments composés pour les animaux.

- **Bagasse** : La bagasse est un résidu ligno-cellulosique obtenu après broyage des cannes durant l'extraction du sucre et qui est aujourd'hui essentiellement utilisé comme combustible des chaudières de sucrerie.

- **Écume** : Co-produit du processus sucrier, les écumes sont recueillies lors de la purification du jus de la betterave par précipitation des impuretés. Riches en sels minéraux et particulièrement en calcium, elles sont valorisées en agriculture comme engrais organique.
Alcool et bioéthanol : L'alcool éthylique ou éthanol, plus couramment appelé « alcool », est produit soit par synthèse soit par fermentation et distillation de substrats agricoles.

I.5 Les matériaux de construction

I.5.1 Les briques

I.5.1.1 Définition

La brique est un matériau de construction qui offre une grande variété de formes, de couleurs et de résistances, et qui permet de répondre à tous les besoins actuels. Découvrons les différents types de briques et leur usage. [Net 14]

I.5.1.2 Les constituants de la brique

La matière première la plus importante pour la fabrication de la brique est l'argile (roche tendre de couleur grise ou jaunâtre avec beaucoup de grains fins et de forte liaison). La teneur d'oxyde de fer et d'oxyde de chaux composant l'argile détermine la teinte de la brique. [Net 15]

I.5.1.3 Types de brique [Net16]

- Briques pleines et perforées

Elles sont de moins en moins utilisées en construction de mur du fait de leur performance thermique dérisoire.



Figure I.7: Brique pleine.

- Briques creuses

Plus légère, elle permet une pose plus facile et plus rapide. Si elle est moins résistante en compression, elle est bien plus isolante qu'une brique pleine.

Sa structure interne (perforations verticales) lui procure de bonnes capacités de régulation de l'hygrométrie de l'air ambiant.



Figure I.8: Brique creuse.

- Briques mono mur

Récemment développée, la brique monomur, également appelée brique à joints minces, ou brique alvéolaire, est une brique à isolation répartie. En raison de sa forte épaisseur (jusqu'à 50 cm) et de sa structure multi-alvéolaire auto isolante, cette brique ne nécessite pas ou peu d'isolation complémentaire et possède une bonne inertie thermique.



Figure I.9: Brique mono mur.

I.5.1.4 Avantages et inconvénients des briques [Net 17] et [Net 18]

Tableau I.3: Avantages et inconvénients des briques

Avantages	Inconvénients
Plus solide et résistante que le parpaing.	Le prix coûte assez cher par rapport au parpaing.
Résistante au feu.	Les propriétés isolantes sont très limitées.
Résistante à l'humidité grâce à sa capacité à réguler l'humidité,	L'ajout d'un matériau isolant est nécessaire dans la plupart des cas.
Facile à poser.	
Esthétique avec ou sans enduit de façade	

I.5.2 Le mortier

I.5.2.1 Définition

Le mortier est un des matériaux de construction que l'on utilise pour solidariser les éléments entre eux, assurer la stabilité de l'ouvrage, combler les interstices entre les blocs de construction. En général le mortier est le résultat d'un mélange de sable, liant, d'eau et d'adjuvant et éventuellement d'ajout. En ce qui concerne le liant, tous les ciments et les chaux sont utilisables, leur choix et dosage sont en fonction de l'ouvrage à réaliser et de son environnement.

I.5.2.2 Les constituants du mortier [TAOUNZA et al., 2020]

Un mortier est constitué par le mélange de sable, d'un liant et d'eau.

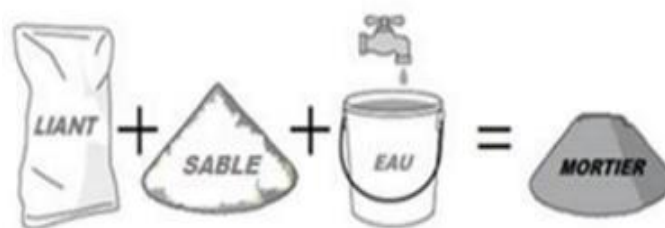


Figure I.10: Les constituants du mortier.

- Les liants

Un liant hydraulique est un liant qui se forme et durcit par réaction chimique avec de l'eau. On peut citer par exemple :

- Les ciments portlands
- Chaux hydraulique naturelles

- Le sable

Les sables proviennent de la désagrégation des roches qui constituent d'écorce terrestre, suivant leur composition ils peuvent avoir plusieurs coloris (blanc, jaune, gris, rougeâtres).

Le diamètre maximum de grains de sable utilisée pour les mortiers :

- Extra fin : jusqu'à 0,8 mm
- Fin : jusqu'à 1,6 mm
- Moyen : jusqu'à 3,15 mm
- Gros jusqu'à 3,15 mm
- Gros : jusqu'à 5mm

- L'eau de gâchage

L'eau sert à hydrater le ciment, facilite la mise en œuvre du mortier et contribue à son ouvrabilité.

- Les additifs

Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques que l'on utilise dans le cas des bétons et mortiers. Ils modifient les propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés en faible proportion.

Les mortiers peuvent comporter différents types d'adjuvants :

- Les super plastifiants (haut réducteur d'eau)
- Les entraîneurs d'air
- Les modificateurs de prise (retardateurs accélérateurs)
- Les hydrofuges

Les ajouts

Les cendres volantes, le laitier de haut fourneau granulé broyé, la fumée de silice et les pouzzolanes naturelles, telles que le schiste calciné, l'argile calcinée ou le méta kaolin sont des

matériaux qui, combinés au ciment portland, contribuent aux propriétés du béton et mortiers durci par action hydraulique ou pouzzolanique ou les deux à la fois.

I.5.2.3 Types de mortier

Les mortiers se partagent en différents types :

- **Les mortiers de ciment**

Très résistants, prennent et durcissent rapidement. Le dosage du rapport entre le ciment et le sable est en général volumétrique de 1/3.

- **Les mortiers de chaux**

Les mortiers de chaux sont gras et onctueux. Ils durcissent plus lentement et résistent moins que les mortiers de ciment.

- **Les mortiers bâtards**

Le mélange de ciment et de chaux permet d'obtenir conjointement les qualités de ces deux liants. Généralement, on utilise la chaux et le ciment par parties égales, mais des fois on prend une quantité plus ou moins grande de l'un ou l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée.

Plus grande plasticité → plus de chaux

Plus grande résistance → plus de ciment

- **Les mortiers fabriqués sur chantier**

Ils sont préparés avec le ciment et le sable du chantier. Le ciment est un ciment courant, 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.

- **Mortier industriel**

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, conditionnés en sacs, contrôlés en usine et parfaitement réguliers. Pour utiliser ce type de mortier, il suffit de mettre la quantité d'eau nécessaire et malaxer pour ensuite les mettre en œuvre.

I.5.2.4 Domaines d'application des mortiers

En général, les variétés de mortier sont liées directement par son domaine d'application qui est très vaste, une typologie des mortiers à partir de son utilisation permet de citer les catégories suivantes :

- Mortier de pose
- Mortier de joints
- Mortier pour le sol
- Pierres artificielles
- Support pour les peintures murales
- Mortier d'injection
- Mortier auto plaçant

I.5.3 Le béton

I.5.3.1 Définition

Le béton est un matériau composite aggloméré constitué de granulats durs de diverses dimensions collées entre eux par un liant. Dans les bétons courants, les granulats sont des grains de pierre, sable, gravier, cailloux et le liant est un ciment, généralement, un ciment portland. [OUKIL et al., 2017]

I.5.3.2 Classification du béton [OUKIL et al., 2017]

En général le béton peut être classé en 4 groupes, selon la masse volumique :

- Béton lourd : $> 2500 \text{ kg/m}^3$.
- Béton courant : $1800 - 2500 \text{ kg/m}^3$.
- Béton léger : $500 - 1800 \text{ kg/m}^3$.
- Béton très léger : $< 500 \text{ kg/m}^3$.

Le béton courant peut aussi être classé en fonction de la nature des liants :

- Béton de ciment (le ciment)
- Béton silicate (la chaux)
- Béton de gypse (le gypse)
- Béton asphalte ou bitumineux (bitume)

I.5.3.3 Avantages et inconvénients du béton

Tableau I.4: Avantages et inconvénients du béton.

Avantages	Inconvénients
- Peu couteux, facile à fabriquer.	- Poids propre élevé.
- Il épouse toutes les formes qui lui sont données.	- Faible isolation thermique.
- Il résiste bien au feu et aux actions mécaniques usuelles.	- Coût élevé entraîné par la destruction du béton en cas de modification d'un ouvrage.

I.5.3.4 Domaines d'application du béton [HACHEMI et al., 2017]

- Le bâtiment

Dans la construction de logements, Le béton s'est également largement imposé dans les autres secteurs de la construction : bureaux, hôpitaux, locaux, ainsi que dans grands édifices publics et les bâtiments industriels.

- Les travaux publics

a) Les ponts

Les progrès techniques et, en particulier, l'évolution des caractéristiques du béton, permettent de réaliser des portées atteignant plusieurs centaines de mètres.

b) Les tunnels

Pour les grands tunnels dont les exemples se multiplient dans le monde, le béton est, soit coulé sur place, soit utilisé dans des voussoirs préfabriqués.

c) Les barrages

Les grands barrages sont le plus souvent en béton permettant des implantations dans les sites les plus difficiles.

d) Les routes

Grâce au développement de techniques modernes : béton armé continu, dalle épaisse traitement de surface les voiries à faible trafic et aménagements urbains montrent un regain d'intérêt pour les solutions béton, qui leur assurent durabilité et faible coût d'entretien.

I.6 Conclusion

Ce chapitre a présenté un état de l'art détaillé sur différents aspects liés à la valorisation des déchets industriels, en particulier les sous-produits de l'industrie sucrière, dans les matériaux de construction comme la brique, le mortier et le béton.

Il a d'abord abordé l'approche environnementale et la notion de développement durable, soulignant l'importance d'intégrer des exigences écologiques dans le génie civil. La valorisation des déchets industriels a ensuite été introduite comme une solution permettant de réduire les impacts environnementaux.

Une partie importante a été consacrée à la présentation de l'industrie sucrière, des matières premières utilisées (canne à sucre, betterave), du processus de fabrication du sucre ainsi que des différents sous-produits générés comme la mélasse, la pulpe et la bagasse.

Enfin, les principales caractéristiques des matériaux de construction étudiés (brique, mortier, béton) ont été détaillées, incluant leur définition, composition, types, avantages/inconvénients et domaines d'application.

Ce chapitre a ainsi posé les bases théoriques et contextuelles nécessaires pour aborder l'étude de la valorisation des sous-produits sucriers, en particulier dans les matrices cimentaires et argileuses que sont le béton, le mortier et la brique.

CHAPITRE II

CARACTERISATION DES MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

Chapitre II

Caractérisation des matériaux utilisés et méthodes expérimentales

II.1 Introduction

Cette partie synthétise l'étude expérimentale réalisée durant ce travail. Nous présentons tout d'abord les différents matériaux utilisés, ainsi que le plan expérimental afin d'étudier l'influence de l'utilisation de deux sous-produits issus de la production sucrière que sont l'écume et la mélasse sur certaines propriétés physiques et mécaniques des briques, du béton et du mortier.

Les essais ont été effectués conjointement au laboratoire pédagogique du département de génie civil et d'hydraulique, et au Laboratoire de génie civil et d'hydraulique (LGCH) de l'Université 8 Mai 45 de Guelma.

II.2 Description des matériaux

Nous avons utilisé pour les essais des matériaux disponibles et très utilisés localement dont les caractéristiques ont été déterminées expérimentalement au laboratoire de génie civil et d'hydraulique (LGCH) de l'université de 8 Mai 1945 Guelma. Ces matériaux sont :

- L'argile de la briqueterie Al Riadh de Bendjerrah ;
- Un sable de la région de Tébessa (Oum Ali).
- Deux types de gravier concassés (5/15 et 15/25) provenant de la carrière SARL SAPAM de la carrière Bendjerrah de Guelma.
- Un ciment CPJ –CEM II-A 42,5 de la cimenterie de HdjarEssoud (Wilaya de Skikda).
- L'eau potable disponible au niveau du laboratoire LGCH Guelma.
- Adjuvant super plastifiant
- Les deux sous-produits issus de la production sucrière : l'écume et la mélasse

II.2.1 L'argile

L'argile utilisée dans ce travail a été obtenue à partir du gisement de la briqueterie el Riad– Bendjerrah qui se situe à environ 9 km au sud-ouest de la ville de Guelma.



Figure II.1: L'argile utilisée.

II.2.1.1 Détermination des limites d'Atterberg

Selon la norme **NF P 94-051**, les limites d'Atterberg sont des teneurs en eau pondérales, caractéristiques du sol. Elles correspondent à des comportements particuliers de celui-ci sous l'action de variation de la teneur en eau.

Ces limites sont déterminées sur la fraction de sol passant au travers du tamis 400 μ m.



Figure II.2 : Photos de préparation des limites d'Atterberg.

Les deux limites utilisées sont :

W_L : la limite de liquidité (teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état liquide et un état plastique)

W_p : la limite de plasticité (teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état plastique et un état solide).

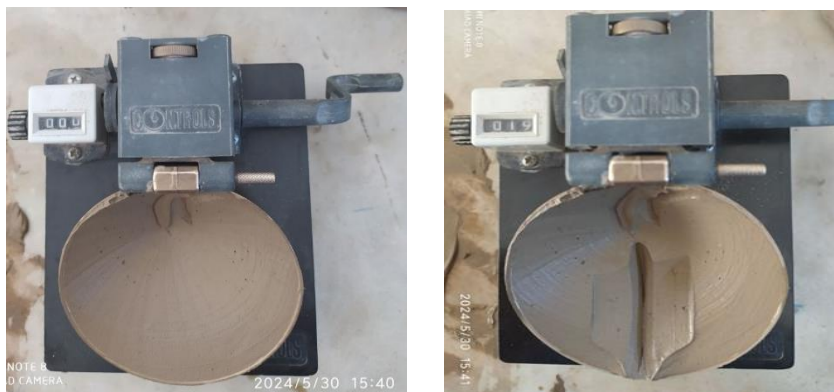


Figure II.3: Photos de détermination de la limite de liquidité.



Figure II.4: Photos de détermination de la limite de plasticité.

a- Limite de plasticité (W_p)

Tableau II.1: Résultats W_p

	1^{er} essai	2^{eme} essai
N° de la tare	9	21
Poids total humide (g)	20,78	24,07
Poids total sec(g)	19,89	22,87
Poids de la tare(g)	15,68	17,25
Poids de l'eau(g)	0,89	1,20
Poids du sol sec(g)	4,21	5,62
Teneur en en eau(g)	21,14	21,35
Moyenne (%)	21,25	

b- Limite de liquidité (W_L)Tableau II.2: Résultats W_L

	1 ^{er} essai		2 ^{ème} essai		3 ^{ème} essai	
N de coups	16		23		30	
N de la tare	40	27	200	25	36	94
Poids total humide	23,50	23,00	24,02	23,88	21,02	21,52
Poids total sec (g)	21,22	20,64	21,46	21,39	19,12	19,40
Poids de la tare (g)	16,33	15,6	15,89	15,98	14,92	14,75
Poids de l'eau (g)	2,28	2,36	2,56	2,49	1,9	2,12
Poids du sol sec (g)	4,89	5,04	5,57	5,41	4,2	4,65
Teneur en eau (%)	46,63	46,83	45,96	46,03	45,24	45,59
Moyenne (%)	46,73		45,99		45,21	

A partir des résultats obtenus, nous déterminons l'indice de plasticité

$$W_L = 46,04\%$$

$$W_p = 24,80\%$$

$$I_p = 21,25\%$$

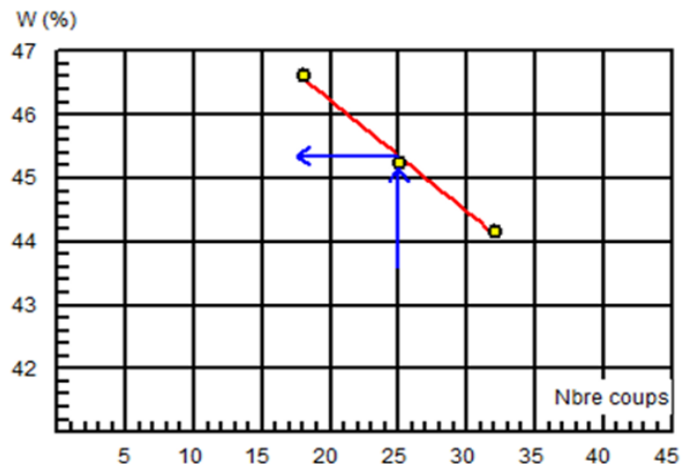


Figure I.5: Résultat limite de liquidité par Datasol.

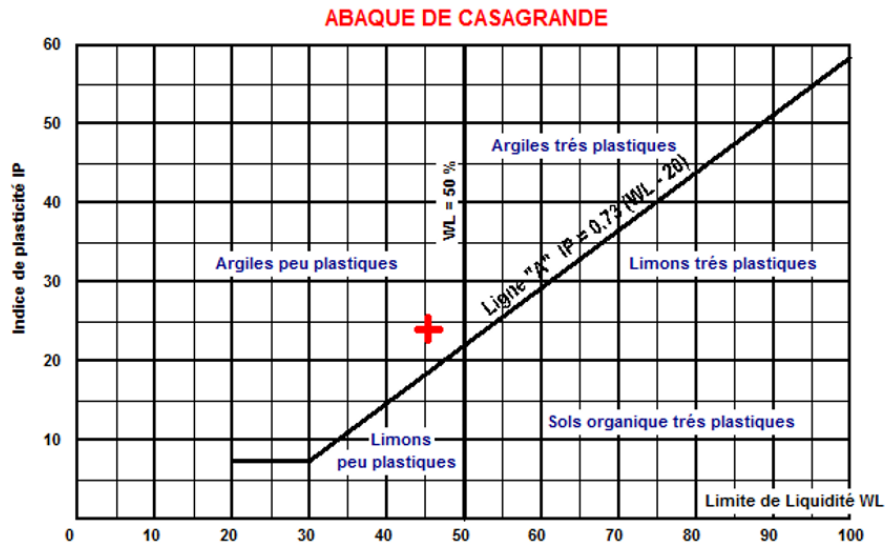


Figure I.6: Abaque de Casagrande. par Datasol.

II.2.2 Le sable

Le sable utilisé provient de Oum Ali de la région de Tébessa.



Figure II.7: Lesable utilisé.

Tableau II.3 : Propriétés du sable utilisé.

Caractéristiques	Masse volumique		Compacité	Equivalent de sable	
	Apparente (g/cm ³)	Absolue (g/cm ³)	C (%)	ESV (%)	ES (%)
	1,54	2,70	64,51	80,43	77,08

$$75 \% \leq ESV < 85 \%$$

$$70 \% \leq ES < 80\%$$

On constate que le sable est un sable propre à faible pourcentage de fines.

II.2.3 Gravier

II.2.3.1 Caractéristiques physiques du gravier



Figure II.8 : Gravier 15/25 utilisé.



Figure II.9 : Gravier 5/15 utilisé.

Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau II.4 : Caractéristiques physiques des graviers.

	5/15	15/25
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2,57	2,58
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,58	1,57
Impureté (%)	1	1,32

II.2.3.2 Caractéristiques mécaniques du gravier

Les graviers utilisés dans l'étude du béton, ont été soumis à deux essais mécaniques en laboratoire LGCH Guelma :

- **Essai de résistance au choc (essai Los Angeles)**

L'essai consiste à mesurer la résistance à la fragmentation par chocs des éléments d'un échantillon de gravier **conformément à la norme NF18-573, 90.**

- **Essai de résistance à l'usure (Essai MD)**

L'essai consiste à mesurer **NF P18-572, 90** la quantité d'éléments inférieurs à 1.6mm, en soumettant le matériau à l'usure de boulets normalisés dans la machine de Micro- deval (MD).

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau II.5 : Caractéristiques mécaniques des graviers

Caractéristiques	5/15	15/25
Coefficient de Los Angeles	24 %	29 %
Coefficient Micro-Deval « MD »	20 %	22 %

Selon le mode opératoire défini par la norme **NF P18-573, 90**, pour le coefficient de Los Angeles, le seuil est fixé à 40%. Pour les deux graviers utilisés, on constate que le coefficient $LA < 40$, nous pouvons conclure qu'ils sont utilisables pour le béton hydraulique.

Selon la norme **NF P18-572**, le seuil est fixé à 35%. Si le coefficient $MD < 35\%$: ce qui est le cas pour les deux graviers testés, Il en résulte que le gravier est acceptable pour le béton.

II.2.4 Le Ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est CPJ de classe 42.5 provenant de la cimenterie de Hdjar Essoud (CPJ-CEM II/A 42.5) ciment gris pour béton de haute performance destiné à la construction des ouvrages d'arts (ponts viaducs, tunnels,etc.).



Figure II.10 : Ciment utilisé.

Les principales caractéristiques du ciment sont illustrées sur le tableau suivant :

Tableau II.6:Caractéristiques mécaniques de ciment.

	CPJ-CEM II-A 42.5
Masse volumique absolue (g/cm ³)	3.1
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.12
Surface spécifique	3702

II.2.5 Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée provient du robinet. L'analyse chimique est représentée dans le tableau II.5, les résultats montrent qu'elle répond à toutes les exigences de norme la**NF P18-404**

Tableau II.7:Caractéristiques chimiques de l'eau de gâchage utilisée.

Paramètres	Résultat	Unité	Observation
T°	28	C°	Eau de bonne qualité chimique
PH	7.5	--	
Cl	0.1	Mg/l	
TDS	297	Mg/l	
Conductivité	541	Us/cm	
Salinité	0.2	--	

L'échantillon d'eau prélevé de réservoir du laboratoire est conforme pour le gâchage.

II.2.6 L'adjuvant

L'adjuvant utilisé est un super plastifiant haut réducteur d'eau dit « SIKAPLAST 40 PRO », conforme à la norme **NF EN934-2**, fabriqué par SIKA. Il a été développé pour optimiser la production du béton prêt à l'emploi où qualité, durabilité, performance, ouvrabilité, faible viscosité et robustesse sont requises.



Figure II.11: L'adjuvant utilisé.

Tableau II.8 :Caractéristiques mécaniques de ciment.

Paramètres	Résultat	Unité	Observation
Densité	1.06 ± 0.01	L/m ³	/
PH	4.5 ± 1	--	
Extrait sec	29 ± 1.5	%	
Equivalent oxyde sodium	≤ 1	%	
Teneur en ions chlorure	≤ 0.1	%	

II.2.7 Sous-produits issues de la production sucrière

II.2.7.1 L'écume

L'écume de sucre, également connue sous le nom de résidu de raffinage du sucre, est un sous-produit obtenu lors du processus de raffinage de la canne à sucre ou de la betterave sucrière. Pendant la cristallisation du sucre, des particules fines et des impuretés sont éliminées de la masse principale de cristaux de sucre. Cette matière résiduelle contient des fibres, de la cire, des gommes et d'autres composés organiques, formant ainsi une mousse ou une écume riche en matière organique. L'écume utilisée dans notre travail est récupérée de la raffinerie Sora sucre de la willaya de Guelma.



Figure II.12 :L'écume utilisé.

II.2.7.2 Lamélasse

La mélasse de sucre est un sous-produit visqueux et foncé obtenu après l'extraction du sucre cristallisé à partir du jus de canne à sucre ou de betterave sucrière. C'est un sirop épais riche en sucres résiduels, comme le saccharose, le glucose et le fructose, ainsi qu'en sels minéraux et en autres composés organiques. La mélasse utilisée est récupérée de la raffinerie Cevital de la willaya de Bejaia.



Figure II.13 :Lamélasse utilisée.

II.3 Formulation et corps d'épreuve :

II.3.1 La brique

II.3.1.1 Compositions

Les briques fabriquées au niveau de la briqueterie EL- RIADHBendjerrah Guelma utilise 80 % d'argile et 20 % d'eau

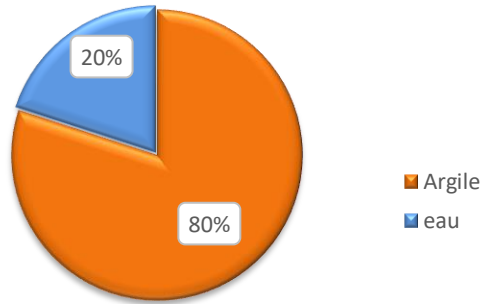


Figure II.14 : Composition des briques

A partir de ce brique de base, on a substitué une partie d'argile par des proportions variables de 0%, 5% et 10 % de sous-produit sucrière : écume.

Tableau II.9:Composition des différentes briques.

	0 %	5 %	10 %
Argile (kg)	410	387	361,66
Ecume (kg)	0	22,5	45
Eau (l)	46	46	46

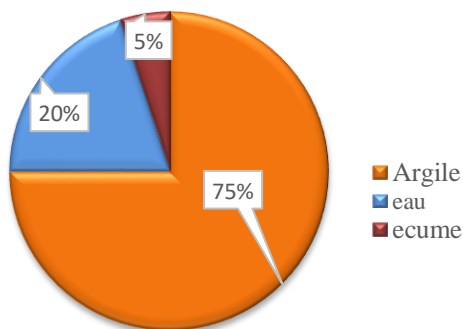


Figure II.15 : Composition de la brique avec 5 % écume.

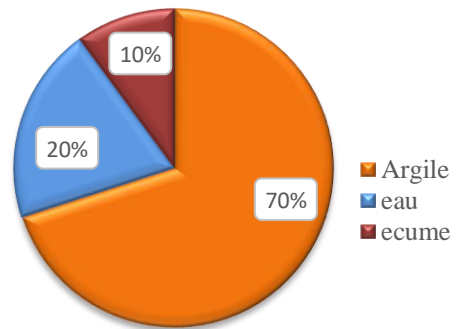


Figure II.16 : Composition de la brique avec 10 % écume.

II.3.1.2 Confections des briques

Le processus de production de brique se compose de différentes étapes :

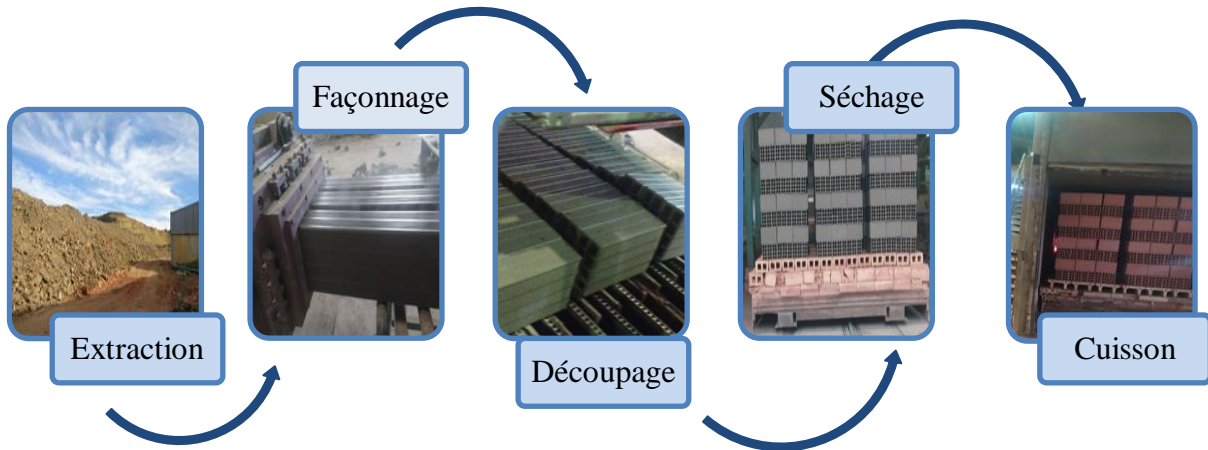


Figure II.17: Processus de fabrication des briques.



Figure II.18 : Les briques confectionnées.

II.3.1.3 Essais expérimentaux réalisés sur les briques préparés

a- Essais de caractérisation physique

- Essai d'absorption Norme NF EN 1097-6

L'essai d'absorption mesure la capacité d'un matériau à absorber l'eau. Il est généralement réalisé en immergeant l'échantillon dans l'eau pendant une période spécifiée et en mesurant la quantité d'eau absorbée par le matériau. Cette méthode permet d'évaluer la porosité du matériau et sa capacité à retenir l'eau, ce qui peut influencer la durabilité et la résistance du matériau.

$$\text{Taux d'Absorption (\%)} = \left(\frac{\text{Poids d'eau absorbée}}{\text{Poids initial de l'échantillon}} \right) \times 100 \quad \text{eq.1}$$

b- Essais de caractérisation Mécanique

- Essai de compression Norme NF EN 772-1

La norme **NF EN 772-1** est destinée' uniquement pour les éléments utilisés en maçonnerie. La résistance en compression est une propriété mécanique qui correspond à la capacité maximale admissible par une pierre naturelle lorsque celle-ci est soumise à une charge d'écrasement.

$$R_c = \frac{F}{A} \quad \text{eq.2}$$

R_c: résistance à la compression, en MPa (équivalent à N/mm²) ;

F : charge maximale atteinte, en N ;

A : surface de l'éprouvette soumise à la charge, en mm² ;



Figure II.19: Appareil de compression utilisé.

- Essai de traction par flexion Norme NF EN 722-6

La résistance à la flexion est déterminée selon la norme **NF EN 722-6** par un dispositif de flexion trois points.

La résistance à la flexion sera déterminée par la formule suivante :

$$R_f = \frac{3 F L}{2 b a^2} \text{eq.3}$$

Avec R_f : la résistance à la flexion ;

F : la force appliquée en N ;

L, a, b : Dimensions de la brique en mm



Figure II.20 :Appareil de flexion utilisé

II.3.2 Le Mortier

II.3.2.1 Compositions

Les essais sont effectués sur un mortier ayant une composition standard de ciment, sable et eau tel que le rapport pondéral ciment : sable : eau est égal à 1/3/0,55. Avec un dosage de 2 % du superplastifiant.

A partir de ce mortier de base, on a substitué une partie de ciment par des proportions variables de 0%, 5%, 10%, 15% et 20 % de l'écume, mélasses seules et combinés.

Le **tableau II.10** donne les compositions des différents mortiers par moule

Tableau II.10: Composition des différents mortiers

Pourcentage %	Sable(g)	Eau(g)	Adjuvant	Ecume	Mélasse	Ciment	
0%	1350	2475	9	/	/	450	
Écume	5%	1350	2475	9	22,5	/	427,5
	10%	1350	2475	9	45	/	405
	15%	1350	2475	9	67,5	/	382,5
	20%	1350	2475	9	90	/	360
Mélasse	5%	1350	2475	9	/	22,5	427,5
	10%	1350	2475	9	/	45	405
	15%	1350	2475	9	/	67,5	382,5
	20%	1350	2475	9	/	90	360
Combiné	5%	1350	2475	9	22,5	22,5	405
	10%	1350	2475	9	45	45	360
	15%	1350	2475	9	67,5	67,5	315
	20%	1350	2475	9	90	90	270

II.3.2.2 Confection des éprouvettes

Nous avons utilisé des moules prismatiques (4×4×16) cm³ pour la confection des éprouvettes. Le malaxage des mortiers a été effectué à l'aide d'un malaxeur à axe vertical d'une capacité de 5 litres. La palette du malaxeur pouvant tourner à deux vitesses (lente et rapide). La séquence de malaxage est conforme à la norme **EN 196-1**.



Figure II.21 : Moules utilisés.



Figure II.22 : Malaxeur à mortier.

Nous avons introduit les matières sèches en fonction des quantités fixées selon le dosage voulu au malaxeur, puis on a ajouté de l'eau et de l'adjuvant. Après malaxage, on introduit le mortier dans les moules en deux couches et pour chaque couche, on fait vibrer le moule sur une plaque vibrante pendant une (01) minute, pour éliminer les bulles d'air.

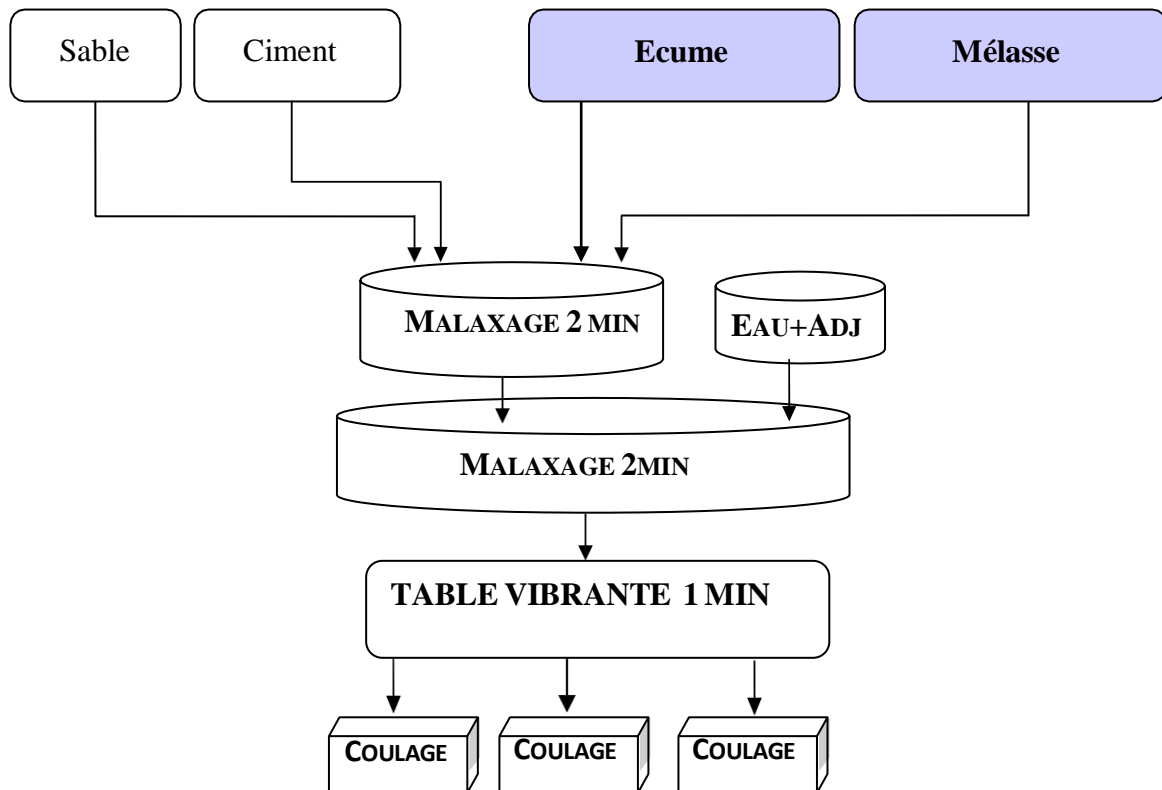


Figure II.23: Les étapes de confection des éprouvettes en mortier.

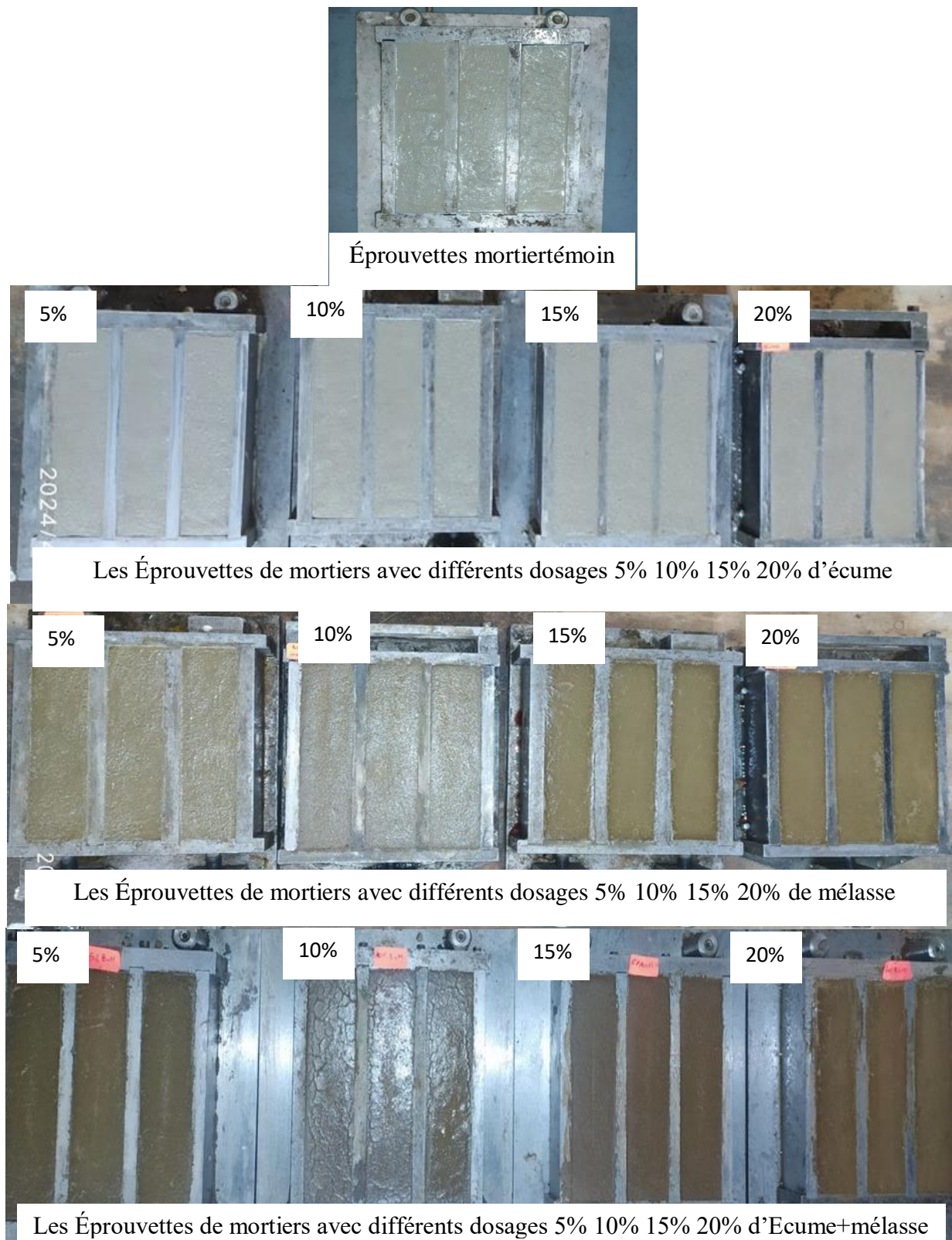


Figure II.24 :Les éprouvettes de mortier confectionnées.

II.3.2.3 Essais expérimentaux réalisés sur les mortiers préparés

Différents essais ont été effectués afin de déterminer les propriétés des mortiers d'étude, avec 2 modes de conservation qui sont:

Conservation à l'eau.

Conservation à l'air libre.

- **Ouvrabilité : essai d'étalement à la table à secousses (Norme NF EN 1015-3)**

L'essai est réalisé sur une table mobile comportant un plateau plan relié à une base rigide et un moule en forme de tronc de cône posé au centre du plateau.



Figure II.25: Table à secousses utilisé.

Tableau II.11: Valeurs des étalements.

Consistance d'utilisation	Valeurs d'étalement
Mortier raide	< 14 cm
Mortier plastique	Entre 14 cm et 20 cm
Mortier fluide	> 20 cm

- **Essai de prise**

Le temps de prise est déterminé à l'aide de l'appareil de Vicat (**Photo II.29**) muni d'une aiguille selon la norme **NF EN 196-3** à la température de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. La consistance est déterminée en mesurant l'enfoncement dans la pâte, d'une tige cylindrique sous l'effet d'une charge constante. L'enfoncement est d'autant plus important que la consistance est plus fluide. La consistance évaluée de cette manière sera appelée « consistance Vicat ».



Figure II.26:Appareil de Vicatutilisé.

- **Essai d'absorption Norme NF EN 1097-6**
- **Essai de l'humidité NF P94-50**

L'essai de l'humidité mesure la teneur en eau totale d'un échantillon de matériau, y compris l'eau libre et l'eau liée présente dans le matériau. Cette méthode permet d'évaluer la quantité d'eau présente dans le matériau après séchage à une température spécifiée, ce qui peut influencer les propriétés mécaniques et le comportement du matériau.

$$\text{Teneur en eau (\%)} = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100 \text{eq. 4}$$

Avec :

P_h : Poids du matériau humide

P_s : Poids du matériau sec

- **Essai de compression Norme NF EN 1015-11**

La résistance à la compression est la capacité d'un matériau ou d'une structure à supporter les charges qui tendent à réduire sa taille par compression (écrasement).

L'essai a été réalisé sur les moitiés des éprouvettes prismatiques obtenues après l'essai de traction par flexion.



Figure II.27:Appareil d'essai de compression.

- **Essai de traction par flexion Norme NF EN 1015-11**

L'essai de flexion permet de mesurer la résistance à la rupture d'un matériau. Cet essai est réalisé sur les éprouvettes de mortier qui sont posés entre trois points d'appuis, on applique, à une vitesse constante de 0,240 m/s un effort sur le point central avec une force croissante jusqu'à rupture.

L'essai a été réalisé sur des éprouvettes prismatiques (4x4x16) conservées dans l'eau. Elles ont été sorties 24 heures avant l'échéance de l'essai.

Les essais ont été effectués sur les mortiers à l'âge de 7 et 28 jours.

La résistance à la traction par flexion est calculée à partir de la formule :

$$R_f = \frac{1,5 FL}{B^3} \quad \text{eq.5}$$

R_f: La résistance à la traction par flexion en (MPa);

F : La charge appliquée à la rupture en (N);

L : La distance entre les appuis (L = 12 cm);

B : Le côté de la section carrée de l'éprouvette (B = 4 cm).



Figure II.28 : Appareil pour essai de traction par flexion.

II.3.3 Le Béton

II.3.3 1 Compositions

Les essais sont effectués sur le béton ayant une composition standard de béton ordinaire avec un rapport Eau/Ciment (E/C) de 0,5 et un dosage en ciment de 450 kg/m³

A partir de ce béton de base, nous avons substitué une partie de ciment par des proportions variables de 0%, 5%, 10%, 15 % de mélasse.

Tableau II.12 Compositions des différents bétons.

Mat(kg /m ³) %	Sable	Eau	Gravier 5/15	Gravier 15/25	Mélasse	Ciment
0	90,00	225	337,5	1012,5	/	450
5	90,00	225	337,5	1012,5	22,5	427,5
10	90,00	225	337,5	1012,5	45	405
15	90,00	225	337,5	1012,5	67,5	382,5

II.3.3 2 Confection des éprouvettes

En laboratoire, les éprouvettes en béton ont été réalisées à l'aide d'un équipement standard.

- Malaxeur

Le béton a été préparé dans un malaxeur de 30 litres, il comporte une pale de malaxage en alliage léger susceptible de fonctionner à trois vitesses de malaxage : 139, 285, 591 tr/mn.



Figure II.29 : Malaxeur utilisé.

- Moule normalisé

Des moules normalisés ont été utilisés, ils servent au moulage éprouvettes cubique 15×15×15 cm (pour essai de compression).



Figure II.30: Moules utilisés.

Le malaxage du béton était effectué selon la norme NF P 18-404

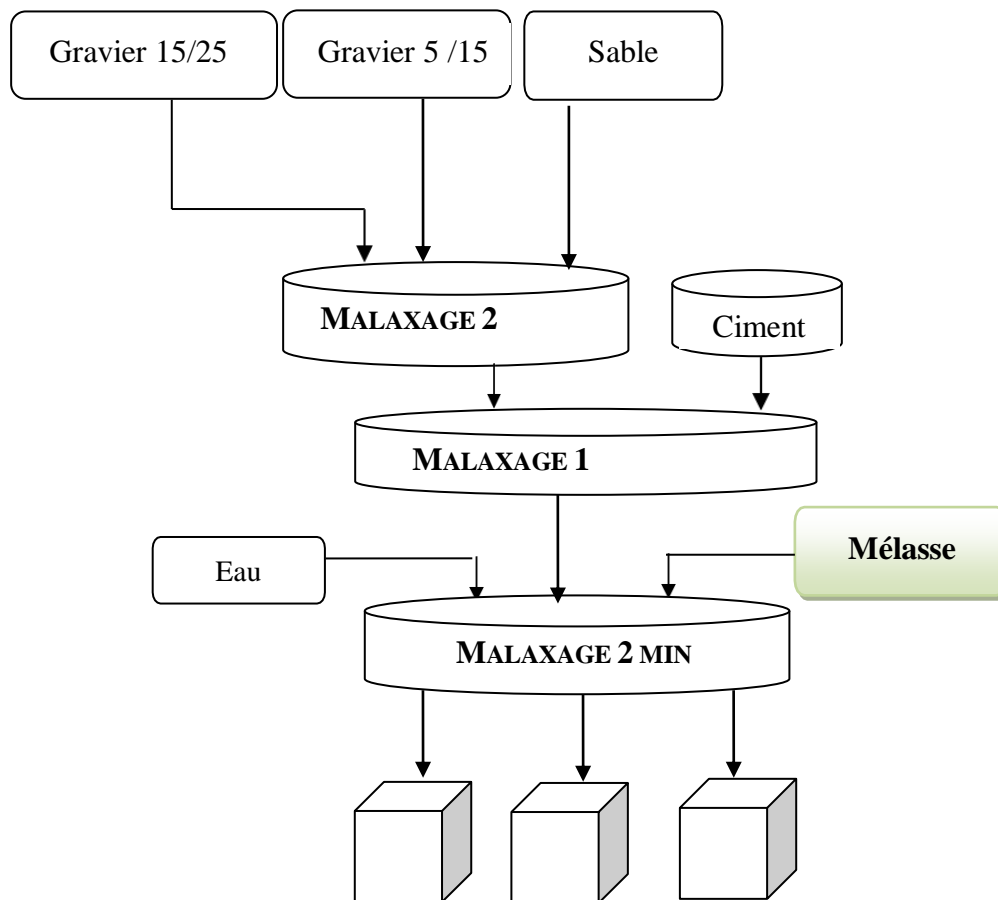


Figure II.35 : Les étapes de confection des éprouvettes en béton.



Figure II.32 : Moules confectionnés.

II.3.3 3 Essais expérimentaux réalisés sur les bétons préparés

L'organigramme suivant synthétise notre démarche :

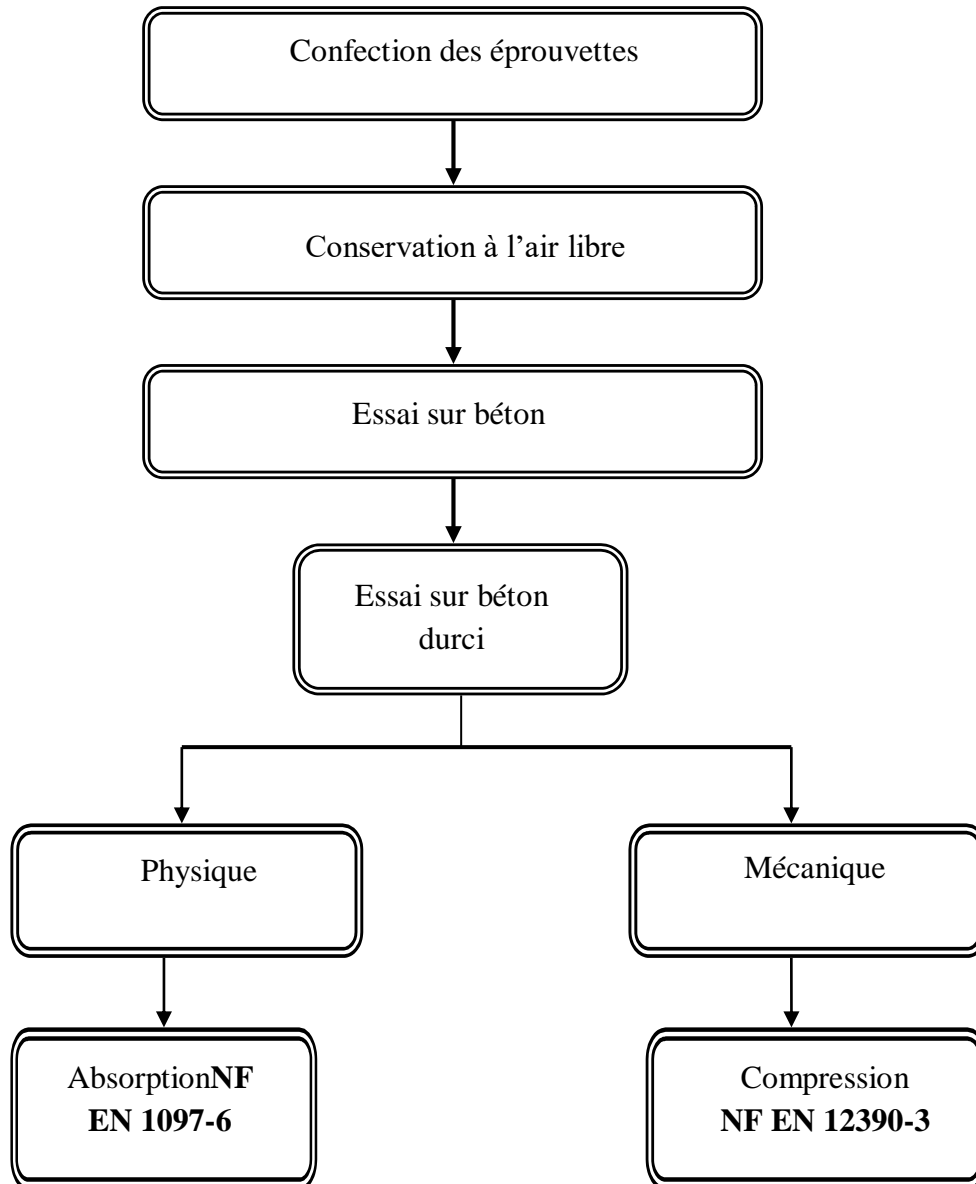


Figure II.33 :Essais expérimentaux réalisés sur les bétons préparés.

II.4 Conclusion

Ce chapitre présente l'étude expérimentale menée pour étudier l'influence de l'incorporation des sous-produits de l'industrie sucrière (écume et mélasse) sur les propriétés des matériaux de construction que sont la brique, le mortier et le béton.

Il décrit d'abord les différents matériaux utilisés (argile, sable, graviers, ciment, eau, adjuvant) et leurs caractéristiques déterminées expérimentalement.

Ensuite, pour chaque type de matériau, les compositions étudiées en ajoutant des pourcentages variables d'écume et/ou de mélasse sont détaillées, ainsi que le processus de confection des corps d'épreuve.

Les essais expérimentaux réalisés sur les différents matériaux sont alors présentés :

- Pour la brique : caractérisation physique (absorption) et mécanique (compression, flexion)
- Pour le mortier : essais à l'état frais (ouvrabilité, prise) et durci (absorption, humidité, compression, flexion)
- Pour le béton : essais de maniabilité (cône d'Abrams) et de résistance à la compression sur des éprouvettes cubiques 15x15x15 cm³

Ce programme expérimental complet vise à évaluer l'impact de ces sous-produits sucriers sur les propriétés fondamentales des matériaux cimentaires et argileux, en vue d'étudier leur potentiel de valorisation.

CHAPITRE III

ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS

Chapitre III

Analyse et interprétation des résultats

III.1 Introduction

Ce chapitre présente une analyse approfondie et une interprétation détaillée des résultats des essais expérimentaux réalisés sur les performances mécaniques, et les caractéristiques de prise des mortiers. L'objectif principal est d'évaluer l'impact de l'incorporation de deux sous-produits industriels, l'écume de sucre et la mélasse, à différents dosages de substitution.

Pour les briques, trois formulations ont été testées avec 0%, 5% et 10% d'écume de sucre en substitution. Les essais effectués portent sur la résistance à la compression, la résistance à la flexion 3 points, la capacité d'absorption d'eau ainsi que la détermination des limites d'Atterberg sur les argiles entrant dans la composition.

Concernant les bétons, quatre dosages de mélasse ont été étudiés : 0% (témoin), 5%, 10% et 15%. Les propriétés investiguées sont la résistance à la compression à différents âges (7, 14 et 28 jours) ainsi que la capacité d'absorption d'eau.

Pour les mortiers, une large gamme de formulations a été caractérisée avec différents dosages d'écume de sucre (0%, 5%, 10%, 15%, 20%), de mélasse (0%, 5%, 10%, 15%, 20%) et de leurs combinaisons. Les essais réalisés couvrent la résistance à la flexion 3 points, la résistance à la compression, la capacité d'absorption d'eau, la teneur en humidité interne ainsi que la cinétique de prise par l'essai de l'aiguille de Vicat. Ces essais ont été menés sur des éprouvettes conservées dans l'eau et à l'air libre.

Les résultats obtenus sont présentés sous forme de tableaux de valeurs et de représentations graphiques. Une analyse détaillée des évolutions des différentes propriétés en fonction des dosages de substitution est proposée pour chaque matériau. Les mécanismes physiques, chimiques et microstructuraux potentiellement responsables des variations de performances observées sont interprétés et discutés au regard des connaissances disponibles dans la littérature scientifique.

III.2 Essais sur les matériaux frais

III.2.1 Essai sur l'argile : la limite d'Atterberg

La détermination des limites d'Atterberg est une étape cruciale dans la caractérisation des propriétés des sols argileux. Ces limites permettent d'évaluer les différents états de consistance d'un sol, allant de l'état solide à l'état liquide, en passant par les états plastique et semi-solide.

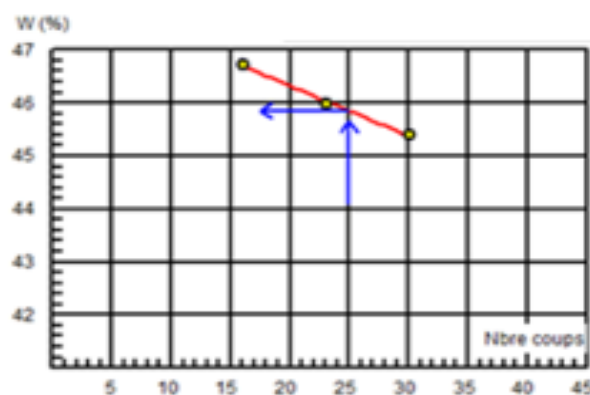
On présente les résultats obtenus lors de l'essai de la détermination des limites d'Atterberg, effectué sur une argile à laquelle ont été ajoutés différents dosages d'écume, un agent entraîneur d'air, cette argile entre dans la composition des briques testées.

Les limites de plasticité (WP), de liquidité (WL) et l'indice de plasticité (IP) ont été mesurés pour une argile témoin sans ajout d'écume, ainsi que pour des échantillons contenant 5% et 10% d'écume.

Tableau III.1 : Les valeurs de limites de plasticité (WP), de liquidité (WL) et de l'indice de plasticité (IP) mesurées.

Limite %	Limite de plasticité (WL)	Limite de liquidité (WP)	L'indice de plasticité (IP)
0 %	21,25 %	46,04 %	24,80 %
5 %	22,39 %	46,27 %	23,89 %
10 %	21,33 %	45,35 %	24,02%

0 %



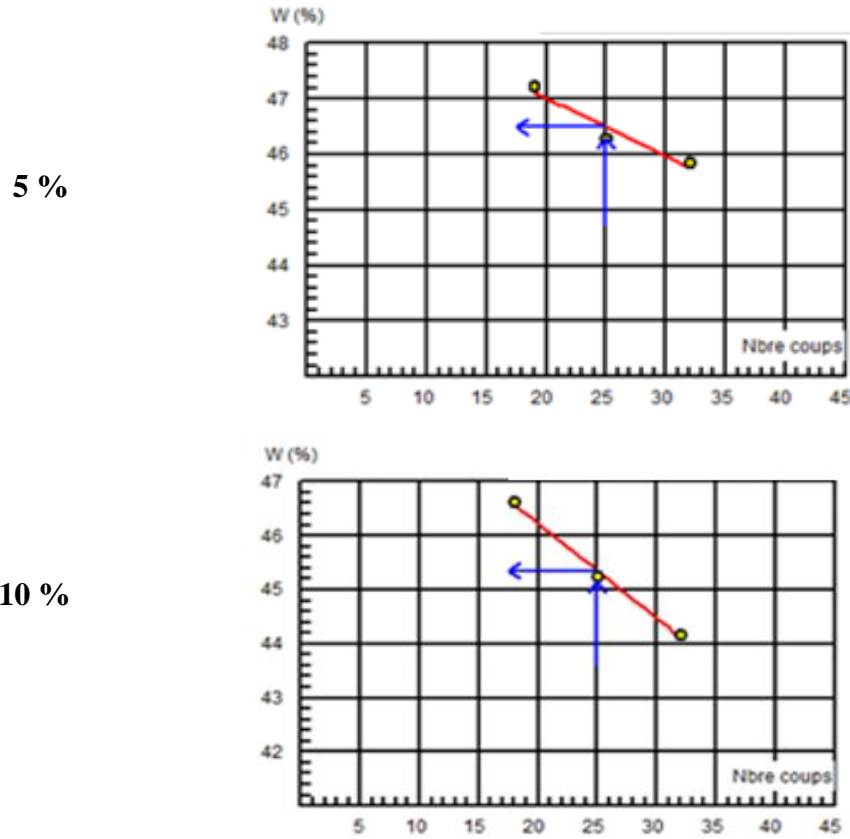
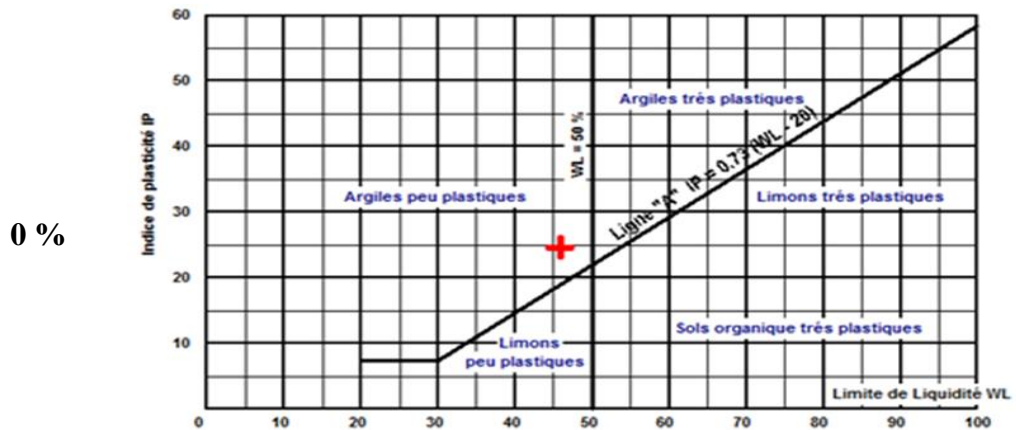


Figure III.1 : Résultats pour la limite de plasticité par Datasol



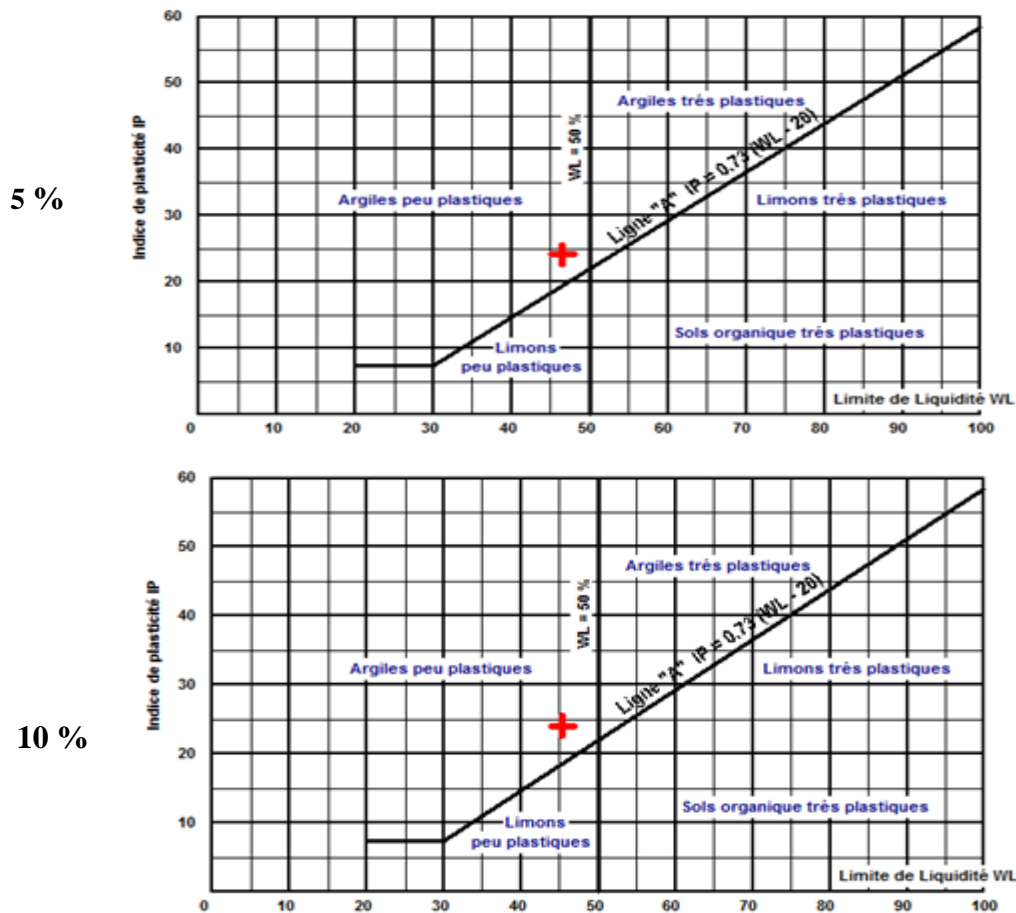


Figure III.2 : Abaques de Casagrande par Datasol

Analyse des résultats de la limite d'Atterberg

a- Limite de plasticité (W_p)

- Pour l'argile témoin (0% d'écume), la limite de plasticité est de 21,25%.
- Avec l'ajout de 5% d'écume, la limite de plasticité augmente légèrement à 22,39%.
- Avec l'ajout de 10% d'écume, la limite de plasticité reste similaire à 21,33%.

b- Limite de liquidité (WL)

- Pour l'argile témoin (0% d'écume), la limite de liquidité est de 46,04%.
- Avec l'ajout de 5% d'écume, la limite de liquidité augmente légèrement à 46,27%.
- Avec l'ajout de 10% d'écume, la limite de liquidité diminue à 45,35%.

c- Indice de plasticité (I_p)

- Pour l'argile témoin (0% d'écume), l'indice de plasticité est de 24,80%.
- Avec l'ajout de 5% d'écume, l'indice de plasticité diminue légèrement à 23,89%.

- Avec l'ajout de 10% d'écume, l'indice de plasticité reste similaire à 24,02%.

Interprétation des résultats de la limite d'Atterberg

L'ajout d'écume semble avoir un effet relativement modéré sur les limites d'Atterberg de l'argile testée. Cependant, on peut observer certaines tendances :

- L'augmentation de la limite de plasticité avec l'ajout d'écume peut être attribuée à la présence de bulles d'air qui modifient la structure et la consistance de l'argile.

- L'augmentation de la limite de liquidité avec 5% d'écume peut être liée à une modification de la structure et de la capacité de rétention d'eau de l'argile.

- La diminution de la limite de liquidité avec 10% d'écume peut être due à une quantité excessive de bulles d'air qui perturbent la structure de l'argile et réduisent sa capacité de rétention d'eau.

Les résultats obtenus sont cohérents avec les observations rapportées dans la littérature concernant l'effet des agents entraîneurs d'air sur les limites d'Atterberg des argiles.

Selon plusieurs études, l'ajout d'agents entraîneurs d'air peut modifier les limites d'Atterberg des argiles, mais l'ampleur de ces modifications dépend de la nature de l'argile et du dosage d'agent entraîneur d'air [NAEINI et al.,2011] ; [PRAKASH et al., 2004]. En général, l'incorporation de bulles d'air tend à augmenter la limite de plasticité et à diminuer l'indice de plasticité, ce qui est en accord avec les résultats obtenus.

En résumé, l'ajout d'écume en tant qu'agent entraîneur d'air a un impact modéré mais observable sur les limites d'Atterberg des argiles testées. Les résultats obtenus sont cohérents avec les observations rapportées dans la littérature scientifique, qui indiquent que les agents entraîneurs d'air peuvent modifier la structure et la consistance des argiles, entraînant des changements dans les limites de plasticité, de liquidité et l'indice de plasticité. Cependant, l'ampleur de ces modifications dépend du dosage d'agent entraîneur d'air et de la nature spécifique de l'argile.

III.2.2 Essai sur les mortiers : Essai de Vicat

Dans le cadre de l'étude des propriétés des mortiers, l'essai de l'aiguille de Vicat est couramment utilisé pour déterminer les temps de début et de fin de prise. Cet essai permet d'évaluer l'influence de différents ajouts ou substituts sur la cinétique de prise du mortier.

On présente les résultats obtenus lors de l'essai de l'aiguille de Vicat réalisé sur des mortiers incorporant différents dosages d'écume (agent entraîneur d'air), de mélasse (retardateur de prise et réducteur d'eau), ainsi que d'un mélange des deux substituts.

Les temps de début et de fin de prise ont été mesurés pour un mortier témoin sans ajout, ainsi que pour des mortiers contenant 5%, 10%, 15% et 20% d'écume, de mélasse, ou d'un mélange écume-mélasse. Les résultats sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.2: Résultats de l'essai de l'aiguille de Vicat sur les mortiers avec différents dosages de substituts (écume, mélasse, écume + mélasse)

Temps (h) Substitut	%	Heure	Début de prise	Durée(h)	Fin de prise	Durée(h)
Témoin	0	19:51	01:20	05:29	10:00	4:09
Ecume	5	08:40	13:30	04:50	18:38	09:58
	10	10:10	12:22	02:12	16:44	06:34
	15	10:00	11:42	01:42	16:00	06:00
	20	18:12	20:00	01:48	00:17	06:05
Mélasse	5	18:24	20:00	01:36	00:47	06:23
	10	19:10	20:47	01:37	22:10	03:00
	15	19:22	21:00	01:38	21:47	02:25
	20	19:37	21:30	01:53	22:05	04:28
Ecume+mélasse	5	18:16	20:30	02:14	23:50	05:34
	10	18:30	21:14	02:44	00:08	05:38
	15	18:42	20:45	02:03	22:10	03:28
	20	18:53	21:45	02:52	22:40	03:47

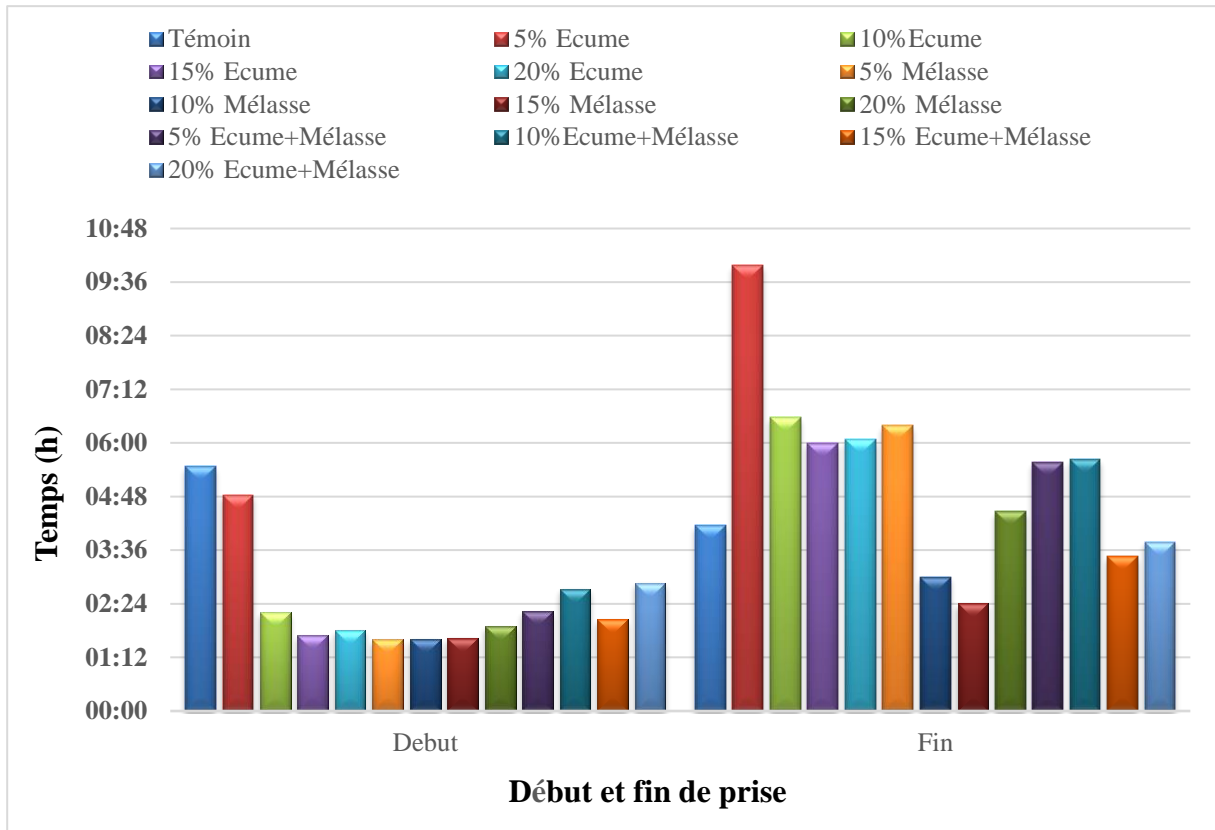


Figure III.3 : La variation de la prise des mortiers en fonction du dosage de différents substituts (écume, mélasse, écume + mélasse), obtenus par l'essai de l'aiguille de Vicat

Analyse des résultats de l'essai de Vicat

a- Écume

L'ajout d'écume accélère le début de prise par rapport au témoin (0%), et cette accélération est plus importante avec l'augmentation du dosage d'écume.

Cependant, la fin de prise est retardée par rapport au témoin, et ce retard est également plus prononcé avec des dosages d'écume plus élevés.

b- Mélasse

L'ajout de mélasse entraîne un début de prise beaucoup plus rapide par rapport au témoin, pour tous les dosages testés.

La fin de prise est également accélérée par rapport au témoin, mais dans une moindre mesure que le début de prise.

c- Écume + Mélasse

Le mélange écume et mélasse accélère le début de prise par rapport au témoin, mais dans une moindre mesure que la mélasse seule.

La fin de prise est retardée par rapport au témoin, et ce retard est plus important avec l'augmentation du dosage de substituts.

Interprétation des résultats de l'essai de Vicat

L'accélération du début de prise observée avec l'ajout d'écume peut être attribuée à l'effet de nucléation des bulles d'air introduites, qui favorise la précipitation des hydrates du ciment [NEVILLE, 1996]. Cependant, la fin de prise est retardée en raison de la diminution de la quantité d'eau disponible pour l'hydratation du ciment.

Pour la mélasse, l'accélération du début de prise peut être expliquée par l'effet de nucléation des sucres présents dans la mélasse, qui agissent comme des sites de germination pour les hydrates [RAMACHANDRAN, 1995]. De plus, la mélasse peut réagir avec les alcalins du ciment, conduisant à une accélération de l'hydratation.

Le mélange écume et mélasse semble avoir un effet combiné, où l'accélération du début de prise est moins prononcée que pour la mélasse seule, probablement en raison de la compétition entre les effets de nucléation des bulles d'air et des sucres.

Les résultats obtenus sont cohérents avec les observations rapportées dans la littérature concernant l'effet des agents entraîneurs d'air et des sucres sur la cinétique de prise des mortiers et bétons.

Selon plusieurs études, l'ajout d'agents entraîneurs d'air accélère généralement le début de prise en raison de l'effet de nucléation des bulles d'air, mais peut retarder la fin de prise en raison de la diminution de l'eau disponible pour l'hydratation [KOSMATKA et al.,2002].

De même, l'incorporation de sucres, tels que ceux présents dans la mélasse, est connue pour accélérer la cinétique de prise en agissant comme des sites de germination pour les hydrates et en réagissant avec les alcalins du ciment [RAMACHANDRAN,1995].

En résumé, l'ajout d'écume, de mélasse, ou d'un mélange des deux, modifie la cinétique de prise des mortiers, avec des effets distincts sur le début et la fin de prise. Ces résultats sont

conformes aux observations rapportées dans la littérature scientifique, et peuvent être expliqués par les propriétés physico-chimiques de ces substituts, telles que l'effet de nucléation et les interactions avec les hydrates et les alcalins du ciment. Bien que ces substituts puissent offrir certains avantages, comme l'entraînement d'air ou la réduction de la demande en eau, il est important de bien comprendre leurs impacts sur la cinétique de prise afin d'optimiser les formulations de mortiers et bétons pour les différentes applications visées.

III.3 Essai de la capacité d'absorption d'eau :(CAE)

III.3.1 La brique

Tableau III.3 : Variation de CAE de la brique en fonction du dosage de l'écume

Pourcentage	0%	5%	10%
Taux d'absorption	8,8	8,7	8,6

D'après le tableau présentant la variation du taux d'absorption d'eau pour la brique en fonction du dosage de l'écume de sucre, on peut faire l'analyse suivante :

Tout d'abord, le taux d'absorption d'eau du témoin sans substituts de l'écume de sucre (0%) est de 8,8%.

Avec l'ajout de 5% d'écume de sucre, on observe une très légère diminution du taux d'absorption à 8,7%. Cette baisse reste toutefois minime, de seulement 0,1% par rapport au témoin.

Pour un dosage de 10% de l'écume de sucre, le taux d'absorption diminue un peu plus pour atteindre 8,6%. Cependant, cette diminution reste relativement faible, de l'ordre de 0,2% comparé au témoin sans écume.

On peut donc conclure que pour les briques, l'incorporation d'écume de sucre jusqu'à 10% n'entraîne pas de modification majeure du taux d'absorption d'eau. Les variations observées sont très légères, avec une diminution maximale de seulement 0,2% à 10% de l'écume par rapport aux briques sans ajout.

Cela suggère que l'écume de sucre n'a qu'un faible impact sur la porosité et les propriétés de transfert hydrique des briques dans cette gamme de dosages. Des dosages plus élevés ou d'autres types d'additions seraient peut-être nécessaires pour modifier significativement l'absorption d'eau des briques.

Des essais complémentaires sur d'autres propriétés comme la résistance mécanique ou la durabilité permettraient de mieux cerner l'intérêt d'incorporer de l'écume de sucre dans la formulation des briques.

III.3.2 Les mortiers

Tableau III.4 : Variation de CAE de mortier en fonction du dosage de substituts

Matériaux Dosage	Mortier avec écume	Mortier avec mélasse	Mortier avec écume + mélasse
0%	4,07%	4,07%	4,07%
5%	7,22%	10,7%	11,9%
10%	5,8%	10,3%	10,4%
15%	7,8%	9,3%	8,00%
20%	7,38%	8,4%	10,6%

Ces essais ont permis d'évaluer l'impact de l'ajout de l'écume de sucre et du mélasse, seuls ou combinés, sur le taux d'absorption d'eau des mortiers par rapport à un mortier témoin sans substituts.

Les principales remarques observées sont les suivantes :

a- Mortiers avec écume

Par rapport au mortier témoin à 0% qui a un taux d'absorption de 4,07%, l'ajout d'écume de sucre entraîne dans l'ensemble une augmentation du taux d'absorption.

Cette hausse est très marquée à 5% d'écume de sucre avec 7,22% d'absorption, soit une augmentation de 77,4% par rapport au témoin.

À 10% d'écume de sucre, on observe une baisse du taux d'absorption à 5,88%, mais qui reste supérieur au témoin (+44,5%).

Les dosages de 15% et 20% d'écume de sucre donnent des taux d'absorption plus élevés, respectivement 7,8% (+91,6% par rapport au témoin) et 7,38% (+81,3%).

b- Mortiers avec mélasse

L'ajout de mélasse seule augmente aussi le taux d'absorption par rapport au témoin.

Cette hausse atteint un maximum de +163% pour 5% de mélasse avec 10,7% d'absorption.

Pour les dosages de 10% à 20%, les taux d'absorption restent supérieurs au témoin mais diminuent progressivement de 10,3% à 8,4%.

c- Mortiers avec écume + mélasse

L'incorporation conjointe d'écume de sucre et de mélasse conduit également à une forte augmentation du taux d'absorption par rapport au témoin de 4,07%.

Le pic est atteint pour 5% écume de sucre + 5% mélasse avec 11,9% d'absorption, soit une hausse de +192%.

Pour les dosages plus élevés, les taux restent élevés, aux alentours de 10%, mais sans dépasser le pic à 5%.

Synthèse :

L'incorporation de l'écume de sucre entraîne une augmentation significative du taux d'absorption, en particulier pour les dosages de 5% (+77%) et 15% (+92%). Un pic est atteint à 5%.

L'ajout de la mélasse seule provoque aussi une hausse marquée du taux d'absorption, maximale à 5% de mélasse (+163%) puis décroissante ensuite.

L'effet combiné d'écume de sucre et de mélasse conduit aux taux d'absorption les plus élevés, avec un pic de +192% pour 5% d'écume de sucre et 5% de mélasse.

Au-delà de 10% d'additions, les taux d'absorption restent supérieurs aux mortiers témoins mais ont tendance à se stabiliser, voire légèrement diminué pour les plus forts dosages.

En résumé, l'incorporation d'écume de sucre et de mélasse, deux co-produits industriels, modifie de manière très significative la compacité et les propriétés de transfert hydrique des mortiers, en particulier pour les faibles dosages jusqu'à 5-10%.

Cette baisse de compacité se traduit par des hausses spectaculaires des taux d'absorption d'eau, pouvant dépasser +150% par rapport aux mortiers témoins sans substituts.

Si ces modifications peuvent s'avérer intéressantes pour certaines applications comme les mortiers drainants, elles risquent en revanche de nuire aux performances mécaniques et à la durabilité dans d'autres cas d'usage.

Des essais complémentaires seront nécessaires pour optimiser les dosages en fonction des propriétés finales recherchées et ainsi développer des éco-mortiers valorisant ces co-produits tout en conservant des caractéristiques satisfaisantes.

III.3.3 Le béton

Tableau III.5 : Variation de CAE du béton en fonction du dosage de la mélasse.

Pourcentage	0%	5%	10%	15%
Taux d'absorption	1,82	6,2	6,4	4,3

Analyse des résultats

D'après le **tableau III.3**, le taux d'absorption d'eau du béton témoin (0% de mélasse) est de 1,82%. Lorsque la mélasse de sucre est ajoutée, on observe une augmentation significative du taux d'absorption d'eau :

- Pour un dosage de 5% de mélasse, le taux d'absorption atteint 6,2%, soit une augmentation d'environ 240% par rapport au témoin.

- Pour un dosage de 10% de mélasse, le taux d'absorption est de 6,4%, similaire à celui obtenu avec 5% de mélasse.
- Pour un dosage de 15% de mélasse, le taux d'absorption diminue légèrement à 4,3%, mais reste nettement supérieur à celui du témoin.

Interprétation des résultats

L'augmentation du taux d'absorption d'eau du béton avec l'ajout de mélasse peut s'expliquer par l'effet retardateur de prise et réducteur d'eau de la mélasse. En effet, la mélasse contient des sucres complexes qui peuvent interférer avec l'hydratation du ciment, ralentissant ainsi la prise et entraînant une porosité accrue dans la matrice cimentaire.

De plus, la mélasse agit comme un agent réducteur d'eau, ce qui peut entraîner une augmentation du rapport eau/ciment effectif dans le mélange. Cette hausse du rapport eau/ciment conduit généralement à une porosité plus élevée et, par conséquent, à une plus grande capacité d'absorption d'eau du béton.

III.4 Essai de l'humidité pour mortier

Tableau III.6 : Variation du taux de l'humidité du mortier en fonction du dosage de substitut

Matériaux Dosage	Mortier avec écume	Mortier avec mélasse	Mortier avec écume + mélasse
0%	4,06%	4,06%	4,06%
5%	4,05%	2,88%	1,86%
10%	3,62 %	1,97%	2,39%
15%	2,04%	3,5%	2,79%
20%	2,58%	3,32%	3,14%

Ces essais ont permis d'évaluer l'impact de l'ajout de l'écume de sucre et du mélasse, seuls ou combinés, sur le taux d'humidité interne des mortiers par rapport à un mortier témoin sans substitués.

Les principales remarques observées sont les suivantes :

a- Mortiers avec écume de sucre

- Par rapport au mortier témoin à 0% qui a un taux d'humidité de 4,06%, l'ajout d'écume de sucre entraîne globalement une diminution du taux d'humidité.
- Cette baisse est très faible à 5% d'écume de sucre avec 4,05% d'humidité (-0,2% par rapport au témoin).
- Elle devient plus marquée pour les dosages de 10% et 15% avec respectivement 3,62% (-10,8%) et 2,04% (-49,8%).
- À 20% d'écume de sucre, le taux d'humidité remonte légèrement à 2,58% mais reste inférieur au témoin (-36,5%).

b- Mortiers avec mélasse

- L'ajout de la mélasse seule provoque une nette diminution du taux d'humidité par rapport au témoin 4,06%.
- Cette baisse est maximale pour un dosage de 10% avec 1,97% d'humidité (-51,5%).
- Pour 5% et 15% de mélasse, les taux sont de 2,88% (-29,1%) et 3,5% (-13,8%) respectivement.
- À 20% de mélasse, le taux d'humidité remonte à 3,32% mais reste inférieur de 18,2% au témoin.

c- Mortiers avec écume de sucre + mélasse

- L'incorporation conjointe d'écume de sucre et de mélasse entraîne également une diminution marquée du taux d'humidité.
- Cette baisse est maximale pour un dosage de 5% écume + 5% mélasse avec 1,86% d'humidité (-54,2%).
- Pour 10% et 15% d'additions, les taux sont de 2,39% (-41,1%) et 2,79% (-31,3%) respectivement.
- À 20% écume + 20% mélasse, le taux remonte à 3,14% mais demeure inférieur de 22,7% au témoin.

Synthèse :

- L'incorporation de l'écume de sucre provoque une diminution globale du taux d'humidité des mortiers. Cette baisse est modérée à faible dosage (-0,2% à 5%), mais devient très significative à 10% (-10,8%) et 15% (-49,8%) d'écume de sucre.
- L'ajout de mélasse seule induit également une diminution marquée de l'humidité, maximale à 10% de mélasse (-51,5%), mais moindre aux dosages extrêmes de 5% (-29,1%) et 20% (-18,2%).
- L'effet combiné d'écume de sucre et de mélasse amplifie la baisse du taux d'humidité, avec une chute maximale de -54,2% pour un dosage de 5% écume + 5% mélasse.
- Au-delà de 15% d'additions totales, les taux d'humidité semblent remonter légèrement tout en restant bien inférieurs aux mortiers témoins (-22,7% à -36,5%).

En résumé, contrairement à l'effet observé sur l'absorption d'eau, l'ajout d'écume de sucre et/ou de mélasse dans les mortiers conduit à une baisse sensible du taux d'humidité, particulièrement pour les dosages intermédiaires de 5 à 15%. Cet effet desséchant pourrait s'avérer intéressant pour certaines applications. Là encore, ces modifications devront être corrélées aux propriétés mécaniques et à la durabilité pour le développement d'éco-mortiers optimisés.

Des essais complémentaires reliant ces modifications d'humidité aux résistances mécaniques, à la durabilité et aux cinétiques de séchage seront indispensables pour déterminer les formulations optimales d'éco-mortiers valorisant ces co-produits.

III.5 Évolution de la résistance des différents matériaux testés

III.5.1 La brique

III.5.1.1 Essai de flexion 3 points

La résistance à la flexion représente la contrainte maximale qu'un matériau peut supporter avant rupture lorsqu'il est soumis à des efforts de flexion. Dans cet essai normalisé **NF EN 772-6**, la brique est positionnée sur deux appuis et une charge est appliquée au centre jusqu'à rupture par flexion.



Figure III.4 : Mode de rupture de la brique en flexion 3 points

Tableau III.7 : Variation de la résistance à la flexion 3 points pour la brique en fonction de la variation du dosage de l'écume de sucre

Dosage	0%	5%	10%
Résistance (Mpa)	0,73 ±0.004	0,83±0.003	0,76±0,002

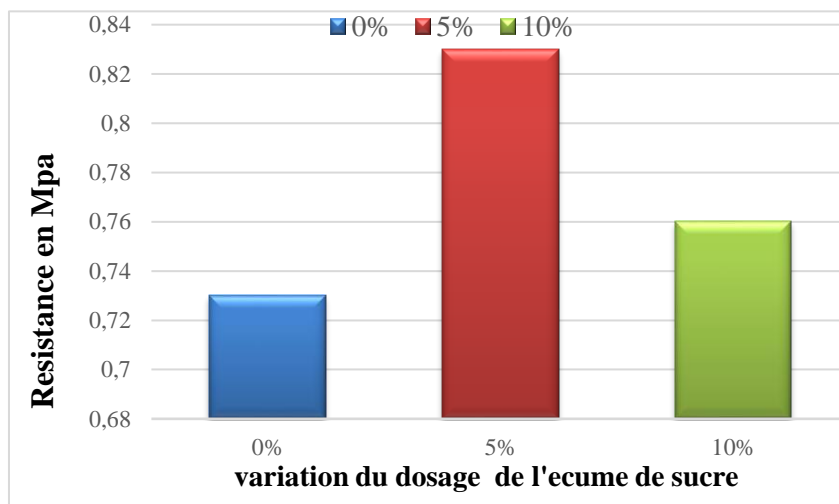


Figure III.5 : Variation de la résistance de flexion 3 points pour la brique en fonction de la variation du dosage de l'écume de sucre

Cette figure présente les résultats des essais de flexion 3 points pour des briques en fonction de différents dosages d'écume de sucre (0%, 5% et 10%).

Le dosage de 5% d'écume de sucre donne la meilleure résistance en flexion de $0,83 \pm 0,04$ MPa.

III.5.1.2 Essai de compression

La résistance à la compression représente la contrainte maximale qu'un matériau peut supporter avant rupture lorsqu'il est soumis à des efforts de compression simple NF EN 772-1. C'est une propriété essentielle pour les matériaux de construction.



Figure III.6 : Mode de rupture de la brique en compression

Tableau III. 8. Variation de la résistance en compression de la brique en fonction du dosage de l'écume de sucre

Dosage	0%	5%	10%
Résistance (Mpa)	2,99±0.001	3,53±0,002	2,89±0,001

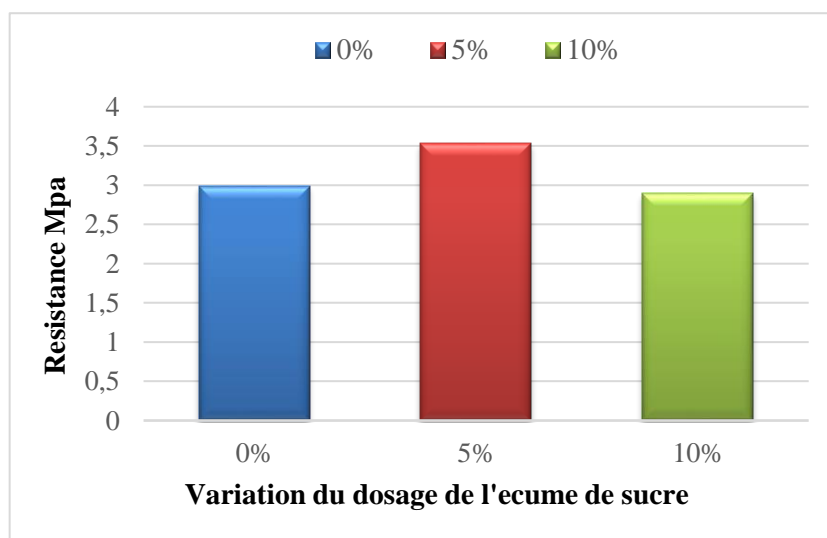


Figure III.7 : Variation de la résistance en compression pour la brique en fonction de la variation du dosage de l'écume de sucre

Ces figures présentent les résultats des essais de flexion 3 points pour des briques en fonction de différents dosages d'écume de sucre (0%, 5% et 10%).

Le dosage de 5% d'écume de sucre donne également la meilleure résistance en compression de $3,53 \pm 0,19$ MPa.

Ici aussi, le dosage optimal semble être de 5% avec une augmentation de 18% par rapport au témoin. L'effet de remplissage des pores par l'écume permet de renforcer la cohésion du matériau

Les dosages 0% et 10% ont des résistances en compression similaires, autour de 2,9 MPa.

Analyse et interprétation

D'après ces résultats, l'ajout de 5% d'écume de sucre semble être le dosage optimal pour améliorer à la fois la résistance en flexion et en compression des briques. Ceci peut s'expliquer par un effet de remplissage des pores par les bulles d'écume qui densifie la structure.

Un dosage de 10% ne semble pas apporter d'amélioration significative par rapport au mélange sans écume.

Pour une étude plus approfondie, il serait intéressant de tester d'autres dosages intermédiaires entre 5% et 10% pour déterminer le seuil optimal. Des essais complémentaires sur d'autres propriétés comme la porosité, l'absorption d'eau, etc. permettraient aussi d'évaluer plus complètement l'impact de l'écume de sucre.

En résumé, l'incorporation d'écume de sucre à un dosage modéré de 5% semble être une voie prometteuse pour améliorer les performances mécaniques des briques, à la fois en compression et en flexion. Cependant, un dosage trop élevé s'avère défavorable.

Des investigations complémentaires sur la microstructure (porosité, distribution des bulles d'écume) et le comportement à d'autres sollicitations (cisaillement, fatigue, thermique, etc.) permettraient d'affiner le dosage optimal et de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu.

III.5.2 Le béton

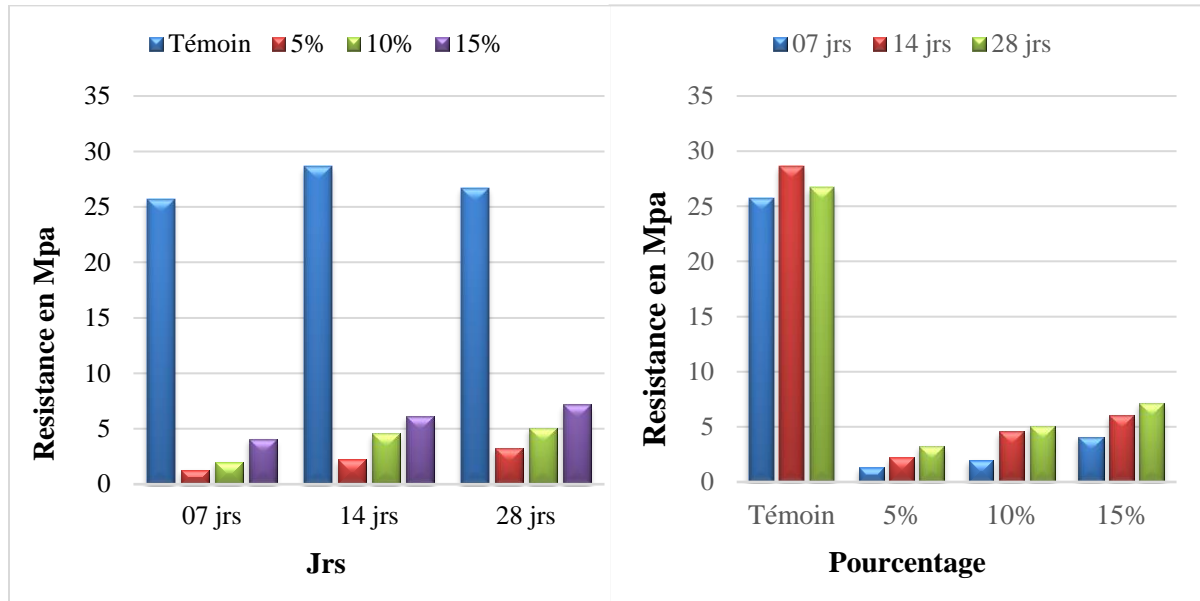
III.5.2.1 Essai de compression



Figure III.8 : Mode de rupture des éprouvettes par la presse

Tableau III.9 : Variation de la résistance en compression du béton en fonction du dosage de la mélasse

Jr Dosage %	7	14	28
Témoin	25,70±0,02	28,65±0,03	26,70±0,03
5%	1,292±0,01	2,2105±0,04	3,2705±0,04
10%	2,01±0,01	4,59±0,04	5,07±0,03
15%	4,081±0,03	6,073±0,04	7,175±0,04



En fonction de l'âge du béton

En fonction du dosage de mélasse

Figures III.9 : Variation de la résistance en compression du béton en fonction du dosage de la mélasse

Analyse et interprétation

a- Analyse des résultats en fonction de l'âge

Pour le béton témoin (sans substitut), on observe une augmentation de la résistance en compression entre 7 et 14 jours, passant de 25,70 MPa à 28,65 MPa. Cependant, la résistance diminue légèrement à 28 jours (26,70 MPa), probablement en raison de la variabilité inhérente aux essais.

Pour tous les dosages de substitut (5%, 10% et 15%), la résistance en compression augmente avec l'âge, ce qui est conforme au comportement attendu du béton.

b- Analyse des résultats en fonction du dosage de substitut

À tous les âges (7, 14 et 28 jours), la résistance en compression diminue de manière significative avec l'ajout de substitut, par rapport au béton témoin.

Cette diminution de la résistance est plus prononcée pour les dosages élevés de substitut. Par exemple, à 28 jours, la résistance passe de 26,70 MPa pour le témoin à seulement 3,27 MPa pour un dosage de 5%, et 7,17 MPa pour un dosage de 15%.

Les résultats obtenus sont cohérents avec les observations rapportées dans la littérature concernant l'effet de l'ajout de mélasse sur les propriétés mécaniques des bétons et mortiers.

Plusieurs études ont montré que l'incorporation de mélasse, en tant que retardateur de prise et réducteur d'eau, peut avoir un impact négatif sur la résistance en compression des bétons et mortiers, en particulier à des dosages élevés [AÏTCIN et al., 2011]. Cela peut être attribué à la perturbation de l'hydratation du ciment et à la modification de la structure de la pâte de ciment par les sucres présents dans la mélasse.

En résumé, l'ajout de mélasse en tant que substitut dans les mélanges de béton entraîne une diminution significative de la résistance en compression, en particulier à des dosages élevés. Cette diminution est cohérente avec les observations rapportées dans la littérature scientifique, qui attribuent cet effet à la perturbation de l'hydratation du ciment et à l'augmentation du rapport eau/ciment effectif en raison de l'action réductrice d'eau de la mélasse.

Bien que la mélasse puisse offrir certains avantages, tels que le retardement de la prise et la réduction de la demande en eau, il est essentiel de bien comprendre son impact sur les propriétés mécaniques du béton afin d'optimiser les formulations et d'assurer les performances requises pour les différentes applications. Une étude approfondie des interactions entre la mélasse et les autres composants du béton, ainsi que des essais complémentaires, pourraient permettre de mieux contrôler ces effets et d'exploiter les bénéfices potentiels de la mélasse tout en maintenant des résistances adéquates.

III.5.3 Le mortier en mode de conservation dans l'eau

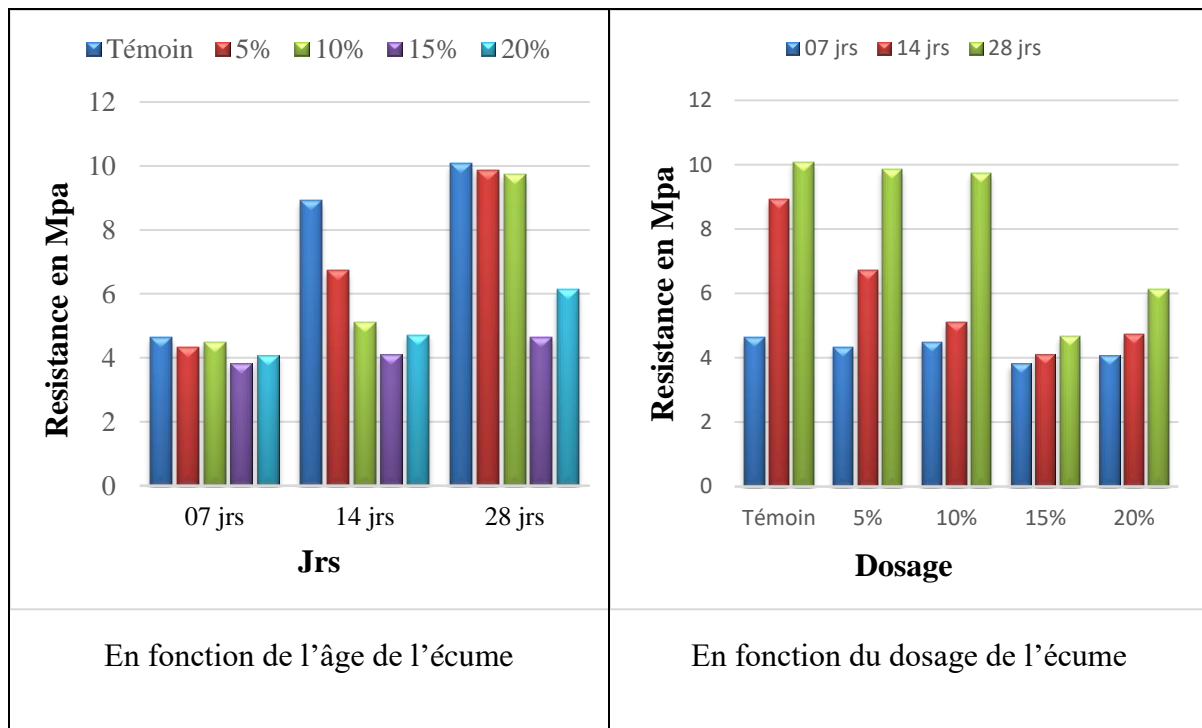
III.5.3.1 Essai de flexion 3 points



Figure III.10 : Mode de rupture du mortier en flexion 3 points

Tableau III.10 : Variation de la résistance en flexion du mortier en fonction du dosage de l'écume

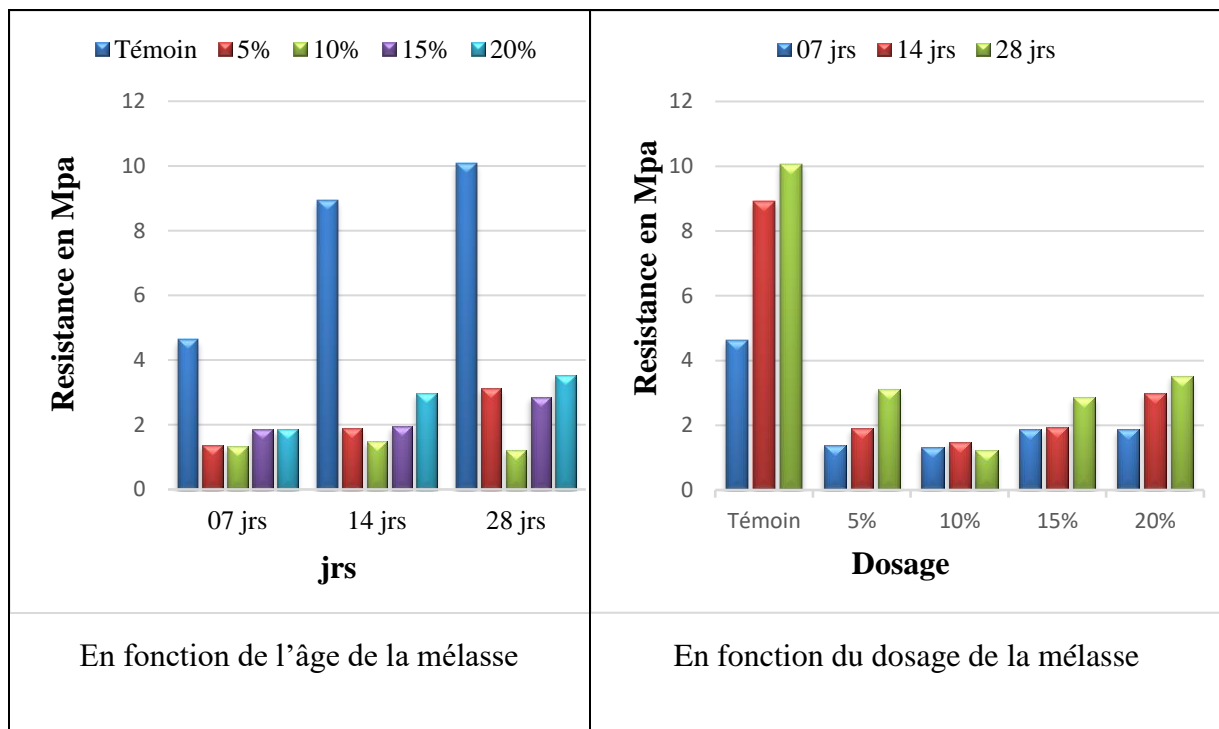
Age (Jours) \ Ecume (%)	07	14	28
Témoin	4,630±0,55	8,920±0,8	10,076±1,03
5 %	4,321±0,01	6,730±0,2	9,86±0,71
10 %	4,495±0,4	5,099±1,3	9,74±0,28
15 %	3,820±0,09	4,115±0,3	4,650±0,12
20 %	4,075±0	4,72±0,06	6,13±0,70



Figures III.11 : Variation de la résistance en flexion du mortier en fonction du dosage de l'écume

Tableau III.11 : Variation de la résistance en flexion du mortier en fonction du dosage de la mélasse

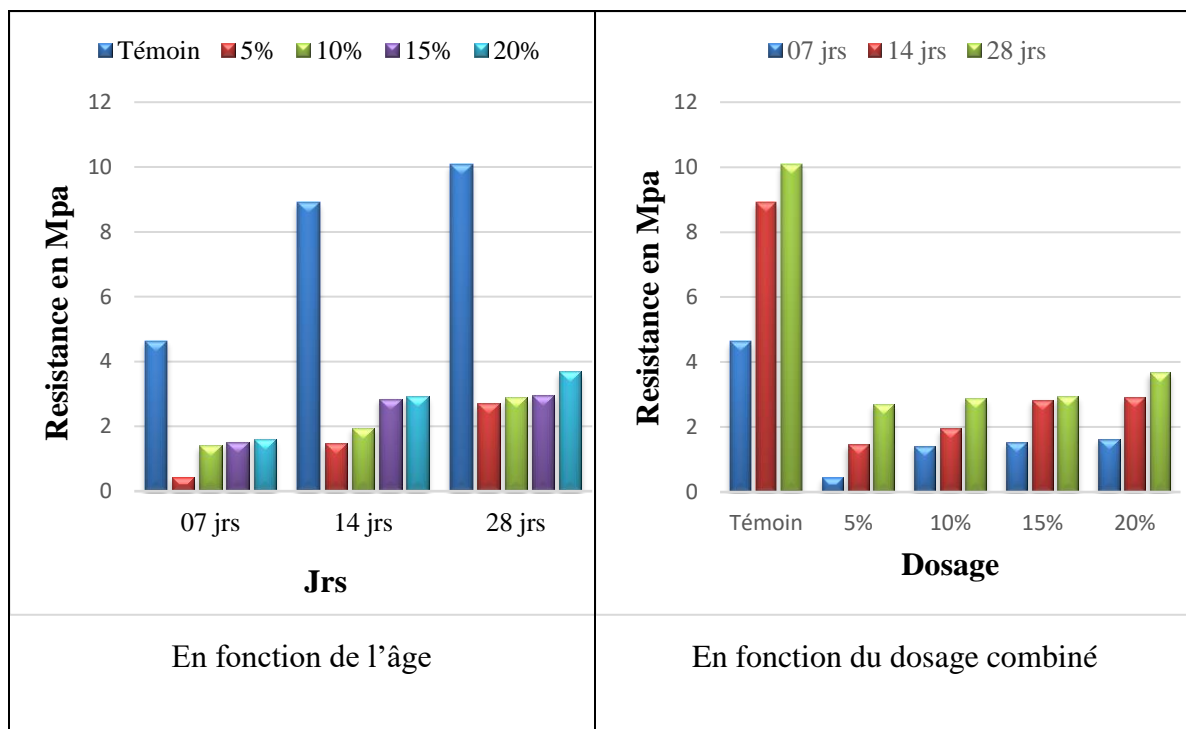
Age (Jrs) \ Mélasse (%)	07	14	28
Témoin	4,630±0,55	8,920±0,8	10,076±1,03
5 %	1,375±0,05	1,902±0,004	3,115±0,07
10 %	1,32±0,4	1,490±0,6	1,216±0,01
15 %	1,860±0	1,940±0,03	2,860±0,01
20 %	1,868±0,02	2,970±0	3,525±0,02



Figures III.12 : Variation de la résistance en flexion du mortier en fonction du dosage de la mélasse.

Tableau III.12 : Variation de la résistance en flexion du mortier en fonction du dosage de l'écume + mélasse

Age (Jours) Ec+ M (%)	07	14	28
Témoin	4,630±0,55	8,920±0,8	10,076±1,03
5 %	0,44±0,73	1,475±0,09	2,710±0,05
10 %	1,418±0,64	1,952±0	2,889±0,03
15 %	1,519±0,02	2,840 ±0,02	2,951±0,10
20 %	1,612±0,07	2,916±0,01	3,682±0,4



Figures III.13 : Variation de la résistance en flexion du mortier en fonction du dosage de l'écume + mélasse.

Analyse et interprétation

a- Effet de l'écume

L'ajout d'écume semble avoir un effet négatif sur la résistance à la flexion, particulièrement à des teneurs élevées (15-20%). Comparé au témoin, on observe :

- À 7 jours, une légère diminution de 7% pour 15% d'écume et 12% pour 20%.
- À 14 jours, une diminution plus marquée de 54% pour 15% d'écume et 47% pour 20%.
- À 28 jours, une diminution de 54% pour 15% d'écume et 39% pour 20%.

Donc :

- Jusqu'à 10% d'écume, les résistances restent proches du témoin à tous les âges
- À 15%, on note une baisse d'environ 54% de la résistance à 28 jours par rapport au témoin.
- À 20% d'écume, la diminution est moindre avec environ 39% de perte à 28 jours.

Cet effet peut s'expliquer par l'introduction de bulles d'air dans le mélange, ce qui diminue la compacité et donc les propriétés mécaniques.

b- Effet de la mélasse

L'ajout de mélasse entraîne une forte diminution de la résistance à la flexion, quel que soit le dosage ou l'âge :

À 28 jours, une diminution de 69% pour 5% de mélasse, 88% pour 10%, 72% pour 15% et 65% pour 20%.

Donc :

Quel que soit le dosage, l'ajout de mélasse entraîne des chutes très importantes des résistances à la flexion par rapport au témoin, à tous les âges.

Cet effet très néfaste de la mélasse sur la résistance peut être attribué à son action retardatrice sur l'hydratation du ciment [RAMACHANDRAN, 1995].

c- Effet combiné écume + mélasse

Le cumule des deux ajouts amplifie la diminution de résistance, particulièrement à jeune âge :

- À 7 jours, une chute de 90% pour 5% d'ajouts combinés.
- À 28 jours, une diminution de 73% pour 5% et 63% pour 20%.
- Le mélange écume/mélasse conduit également à des baisses importantes des résistances en flexion comparé au témoin, quel que soit l'âge.

Interprétation des résultats

L'incorporation d'écume de sucre jusqu'à 10% ne semble pas dégrader significativement la résistance en flexion des mortiers conservés dans l'eau.

Au-delà de 15%, l'excès de matière organique introduit probablement des défauts microstructuraux et de la porosité, fragilisant le mortier comme rapporté dans d'autres études [NAANNU et al., 2022].

La présence de mélasse, riche en sucres, semble avoir un effet extrêmement néfaste sur le développement des résistances en flexion des mortiers.

Elle perturbe probablement de manière significative les réactions d'hydratation et la structuration de la matrice cimentaire.

Le mélange semble cumuler les effets néfastes de l'écume de sucre et de la mélasse sur le développement des résistances.

Néanmoins, les valeurs restent légèrement supérieures à la mélasse seule, suggérant un effet un peu moins dommageable de l'écume par rapport à la mélasse riche en sucres perturbateurs.

En résumé

L'écume de sucre seule à dosage modéré (<10-15%) ne dégrade pas de manière significative les résistances en flexion des mortiers conservés dans l'eau.

En revanche, l'ajout de mélasse, seule ou combinée à l'écume, entraîne des chutes drastiques des résistances en flexion, probablement en perturbant fortement l'hydratation de la matrice cimentaire.

Un dosage maximal d'environ 10% d'écume de sucre semble être un compromis acceptable, mais l'ajout de mélasse doit être limité au maximum.

Ces résultats sont cohérents avec la littérature sur l'incorporation de fibres cellulosiques et de sucres dans les matrices cimentaires.

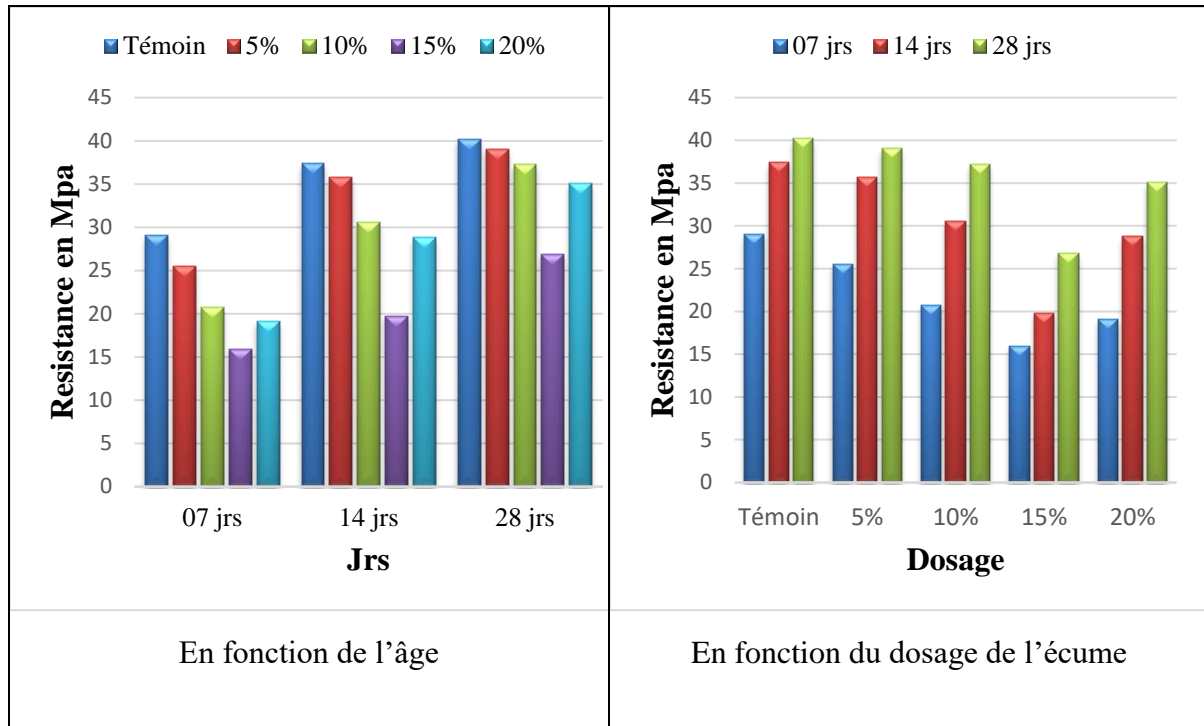
III.5.3.2 Essai de compression



Figure III.14 : Mode de rupture des éprouvettes par la presse.

Tableau III.13 : Variation de la résistance en compression du mortier en fonction du dosage de l'écume

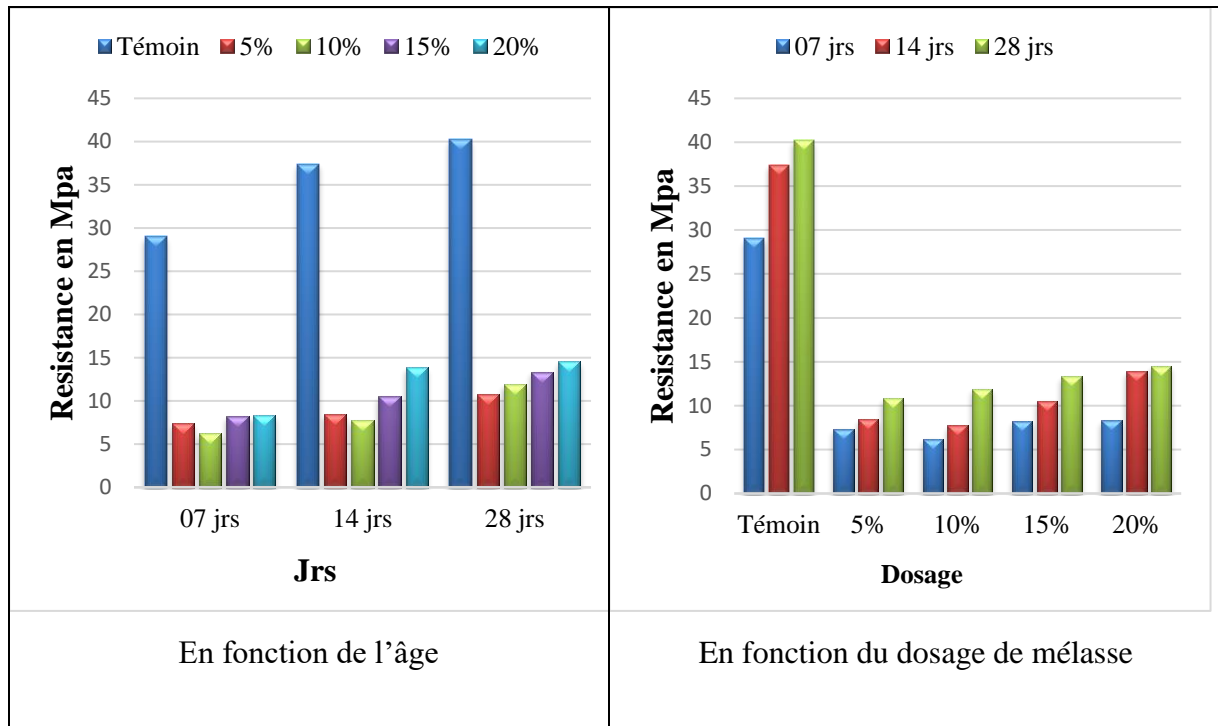
Age (Jours) Ec (%)	07	14	28
Témoin	29,04±1,3	37,40±0,8	40,23±0,64
5 %	25,5±1,67	35,73±0,4	39,05±0,55
10 %	20,741±0,79	30,54±0,01	37,26±0,96
15 %	15,92±0,58	19,74±0,08	26,83±0,02
20 %	19,07±0,07	28,77±0,5	35,09±0



Figures III.15: Variation de la résistance en compression du mortier en fonction du dosage de l'écume.

Tableau III.14: Variation de la résistance en compression du mortier en fonction du dosage de la mélasse.

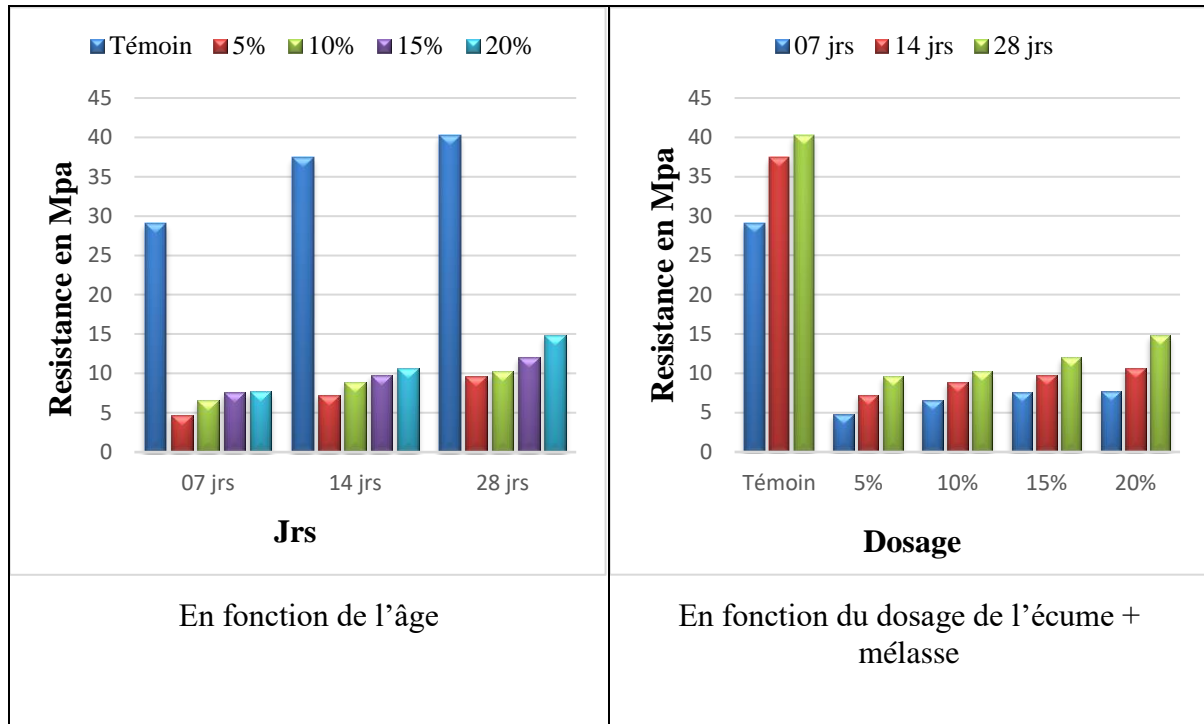
Age (Jours) \ Mélasse (%)	07	14	28
Témoin	29,04±1,3	37,40±0,8	40,23±0,64
5 %	7,34±0,1	8,46±0,07	10,8±0,1
10 %	6,22±0,06	7,72±0,04	11,88±0,05
15 %	8,24±0	10,54±0	13,36±0,2
20 %	8,32±0,08	13,87±1,03	14,53±0



Figures III.16: Variation de la résistance en compression du mortier en fonction du dosage de la mélasse

Tableau III.15 : Variation de la résistance en compression du mortier en fonction du dosage de l'écume + mélasse

Age (Jours) E+ M (%)	07	14	28
Témoin	29,04±1,3	37,40±0,8	40,23±0,64
5 %	4,75±0,1	7,23±0,09	9,61±0,05
10 %	6,52±0,02	8,82±0,01	10,22±0
15 %	7,58±1,2	9,70±0,03	12,05±0
20 %	7,71±0,96	10,63±0,06	14,77±0



Figures III.17 : Variation de la résistance en compression du mortier en fonction du dosage de l'écume + mélasse

Analyse et interprétation de la résistance à la compression

a- Effet de l'écume

Des tendances similaires à la flexion sont observées, avec une diminution de la résistance proportionnelle au dosage en écume, surtout marquée à court terme :

En comparant les résistances à la compression à 7, 14 et 28 jours par rapport au témoin, on observe que :

- À 7 jours, l'ajout d'écume entraîne une diminution de la résistance proportionnelle au pourcentage d'ajout (5% : -12%, 10% : -29%, 15% : -45%, 20% : -34%).
- À 14 jours, la tendance se maintient avec une diminution de 5% pour 5% d'écume, 18% pour 10%, 47% pour 15% et 23% pour 20%.
- À 28 jours, la diminution est de 3% pour 5% d'écume, 7% pour 10%, 33% pour 15% et 13% pour 20%.

On peut donc conclure que l'ajout d'écume diminue la résistance à la compression du mortier, et cet effet est d'autant plus marqué que le pourcentage d'ajout est élevé, surtout à court terme (7 jours). Cependant, l'effet semble s'atténuer légèrement avec le temps de cure.

b- Effet de la mélasse

Comme en flexion, l'ajout de mélasse affecte très négativement la résistance à la compression à tous les âges, avec une diminution allant jusqu'à 70%.

Comparé au témoin, l'ajout de mélasse entraîne une forte diminution de la résistance à la compression, quelle que soit la teneur :

- À 7 jours, la diminution varie de 75% pour 5% de mélasse à 71% pour 20%.
- À 14 jours, la diminution est de 77% pour 5%, 79% pour 10%, 72% pour 15% et 63% pour 20%.
- À 28 jours, la diminution reste importante, allant de 73% pour 5% à 64% pour 20%.

L'effet de la mélasse sur la diminution de la résistance à la compression est donc très marqué et persistant dans le temps.

c- Effet combiné

L'effet cumulé de l'écume et de la mélasse est encore plus dommageable pour la résistance à la compression que pour la flexion.

Avec l'ajout combiné de mélasse et d'écume, on observe également une forte diminution de la résistance à la compression par rapport au témoin :

- À 7 jours, la diminution varie de 84% pour 5% d'ajouts à 73% pour 20%.
- À 14 jours, elle est de 81% pour 5%, 76% pour 10%, 74% pour 15% et 72% pour 20%.
- À 28 jours, la diminution reste élevée, allant de 76% pour 5% à 63% pour 20%.

L'effet combiné de la mélasse et de l'écume semble donc légèrement plus important que l'effet de la mélasse seule sur la diminution de la résistance à la compression.

En résumé, l'ajout d'écume, de mélasse ou de leur combinaison entraîne une diminution significative de la résistance à la compression du mortier, particulièrement à court

terme. L'effet de la mélasse semble prédominer sur celui de l'écume. Pour obtenir une résistance optimale, il est donc recommandé de limiter, voire d'éviter l'ajout de ces composés.

Ces résultats sont en accord avec les observations rapportées dans la littérature concernant l'influence des adjuvants à base de sucres et des agents entraîneurs d'air sur les propriétés des mortiers et bétons [RAMACHANDRAN, 1995].

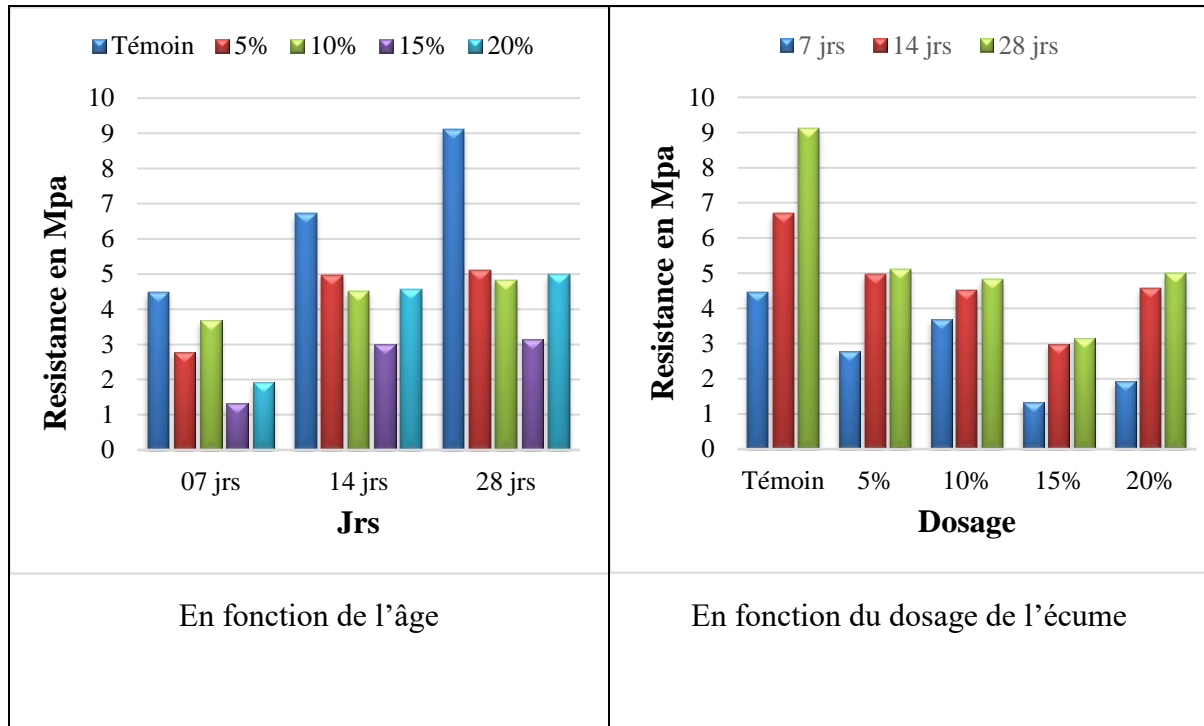
Cependant, il faudrait également étudier d'autres propriétés du mortier (ouvrabilité, durabilité, etc.) pour avoir une vision complète de l'impact de ces ajouts avant de formuler des recommandations définitives.

III.5.4 Le mortier en mode de conservation a l'air libre

III.5.4.1 Essai de flexion 3 points

Tableau III.16 : Variation de la résistance en flexion du mortier en fonction du dosage de l'écume

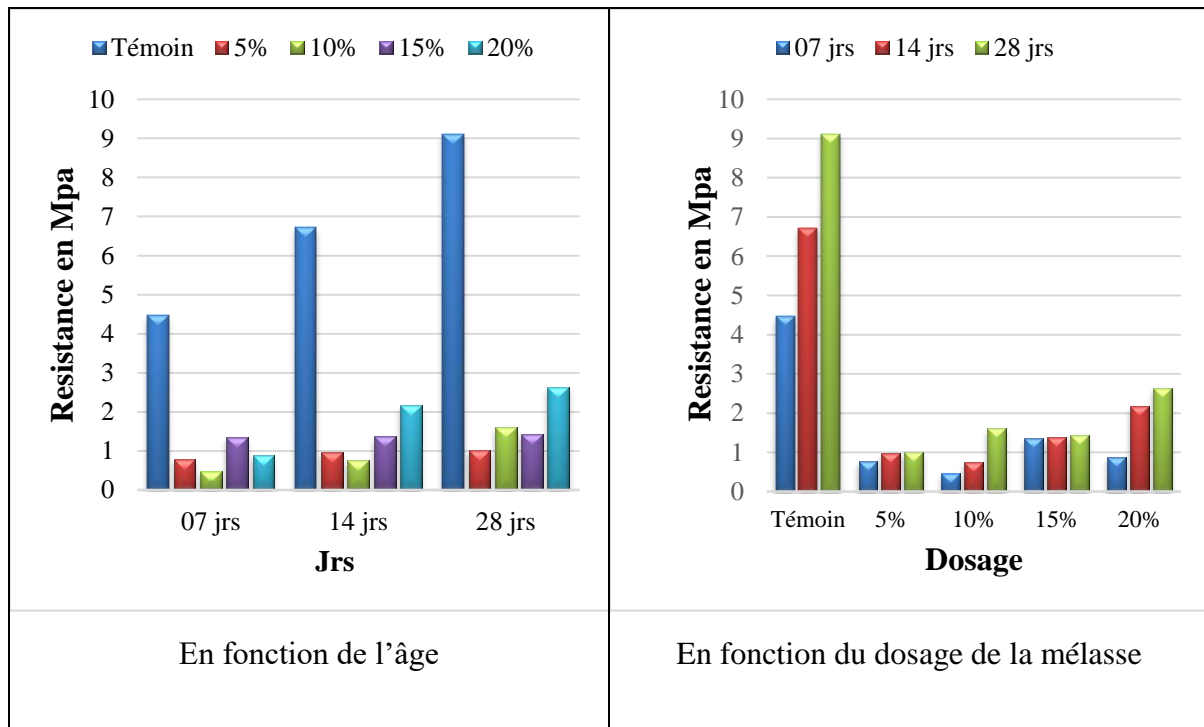
Age (Jours) Ecume (%)	07	14	28
Témoin	4,472±0,06	6,719±0,10	9,112±0,40
5 %	2,779	4,968±0,01	5,105±0,10
10 %	3,685	4,506±0,27	4,818±0,56
15 %	1,326	2,988±0,41	3,149±0,03
20 %	1,93±0,03	4,560	4,986±0,87



Figures III.18 : Variation de la résistance en flexion du mortier en fonction du dosage de l'écume

Tableau III.17 : Variation de la résistance en flexion du mortier en fonction du dosage de la mélasse

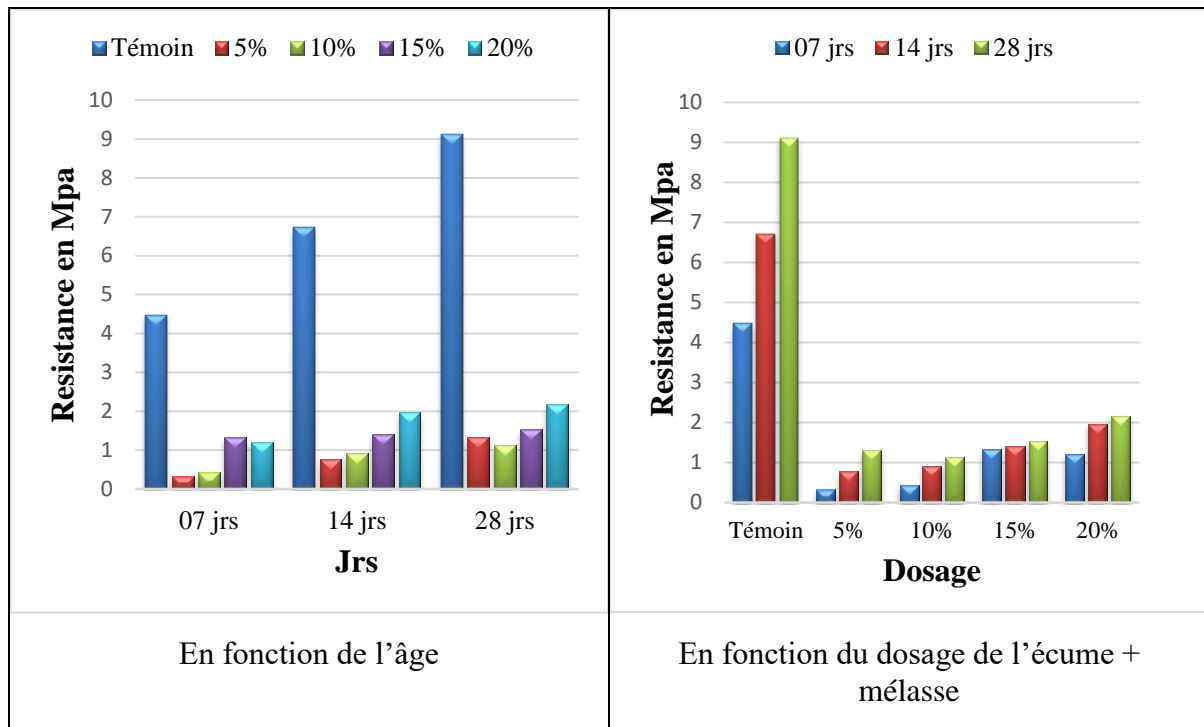
Age (Jours) \ Mélasse (%)	07	14	28
Témoin	4,472±0,06	6,719±0,10	9,112±0,40
5 %	0,779	0,981±0,01	1,006±0,17
10 %	0,468	0,753	1,614
15 %	1,347	1,375	1,439±0,06
20 %	0,875±0	2,17±0,01	2,64±0,09



Figures III.19 : Variation de la résistance en flexion du mortier en fonction du dosage de la mélasse.

Tableau III.18: Variation de la résistance en flexion du mortier en fonction du dosage de l'écume + mélasse

Age (Jours) E+ M (%)	07	14	28
Témoin	4,472±0,06	6,719±0,10	9,112±0,40
5 %	0,32	0,773±0,06	1,316±0,04
10 %	0,440±0	0,910	1,123
15 %	1,33±0,03	1,40±0,06	1,54
20 %	1,214±0,04	1,964	2,164±0,05



Figures III.20 : Variation de la résistance en flexion du mortier en fonction du dosage de l'écume + mélasse

Ces figures présentent les valeurs de la résistance à la flexion de mortiers incorporant différents dosages d'écume de sucre, de mélasse ou un mélange écume + mélasse, pour des éprouvettes conservées à l'air libre et testées à 7, 14 et 28 jours.

Analyse des résultats de la flexion

a- Écume seule

- À 7 jours, l'ajout d'écume diminue la résistance à la flexion par rapport au témoin, et cette diminution est plus importante avec l'augmentation du pourcentage d'écume.
- À 14 jours, on observe une amélioration de la résistance à la flexion par rapport à 7 jours, mais les valeurs restent inférieures au témoin.
- À 28 jours, la résistance à la flexion continue d'augmenter mais reste inférieure au témoin, sauf pour 20% d'écume qui est similaire au témoin.

Donc :

Jusqu'à 10% d'écume, on observe une baisse initiale de la résistance à 7 jours, suivie d'une amélioration progressive jusqu'à 28 jours.

À 15% et 20% d'écume, les résistances restent très inférieures au mortier témoin, quels que soient les âges.

b- Mélasse seule

- L'ajout de mélasse diminue considérablement la résistance à la flexion à tous les âges et pour tous les pourcentages, par rapport au témoin.
- On observe une légère augmentation de la résistance avec l'âge, mais les valeurs restent très faibles comparées au témoin.

Donc :

- Pour tous les dosages, les résistances sont très faibles à 7 et 14 jours (≤ 2 MPa), bien en-deçà du témoin.
- Une légère amélioration est notée à 28 jours, mais les valeurs restent faibles ($\leq 2,6$ MPa), sauf pour 5% de mélasse.

c- Écume + Mélasse :

- Le mélange écume et mélasse diminue également la résistance à la flexion par rapport au témoin.
- Une légère augmentation est observée avec l'âge, mais les valeurs restent inférieures au témoin.

Donc :

- Comme pour l'écume seule, on constate une baisse initiale de résistance à 7 jours.
- Entre 7 et 28 jours, les résistances augmentent mais restent inférieures au témoin pour tous les dosages.

Interprétation des résultats :

L'écume de sucre, riche en fibres cellulosiques, semble apporter un effet de renforcement progressif de la matrice cimentaire jusqu'à 10%, conformément à d'autres études.

Cependant, au-delà de 15%, l'excès de matière organique crée probablement de la porosité supplémentaire et fragilise le mortier [NAANNU et al., 2022].

La mélasse seule, riche en sucres, semble avoir un effet très néfaste sur le développement des résistances du mortier, sans doute en perturbant la prise et l'hydratation du liant.

Le mélange écume + mélasse semble être moins défavorable que la mélasse seule mais reste inférieur à l'écume de sucre pour les gains de résistance.

En résumé,

L'incorporation d'écume de sucre seule à des dosages modérés ($\leq 10\%$) permet d'améliorer la résistance à la flexion des mortiers, probablement grâce à un effet de renfort par les fibres.

À l'inverse, l'ajout de mélasse seule conduit à une dégradation très marquée des résistances, quelle que soit la teneur.

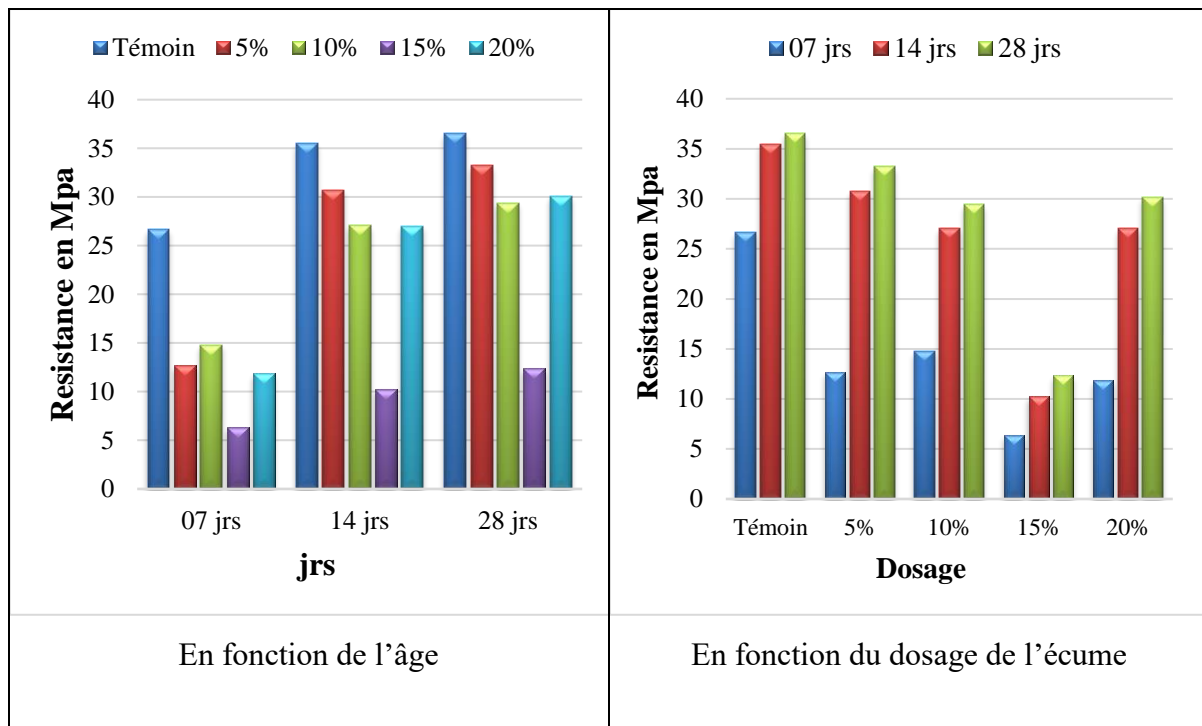
Le mélange écume + mélasse semble atténuer l'effet défavorable de la mélasse seule, mais reste inférieur aux gains apportés par l'écume de sucre.

Un dosage optimal d'environ 5 à 10% d'écume de sucre semble le plus adapté pour améliorer la résistance en flexion des mortiers, conformément à la littérature sur les additions cellulosiques.

III.5.4.2 Essai de compression

Tableau III.19 : Variation de la résistance en compression du mortier en fonction du dosage de l'écume

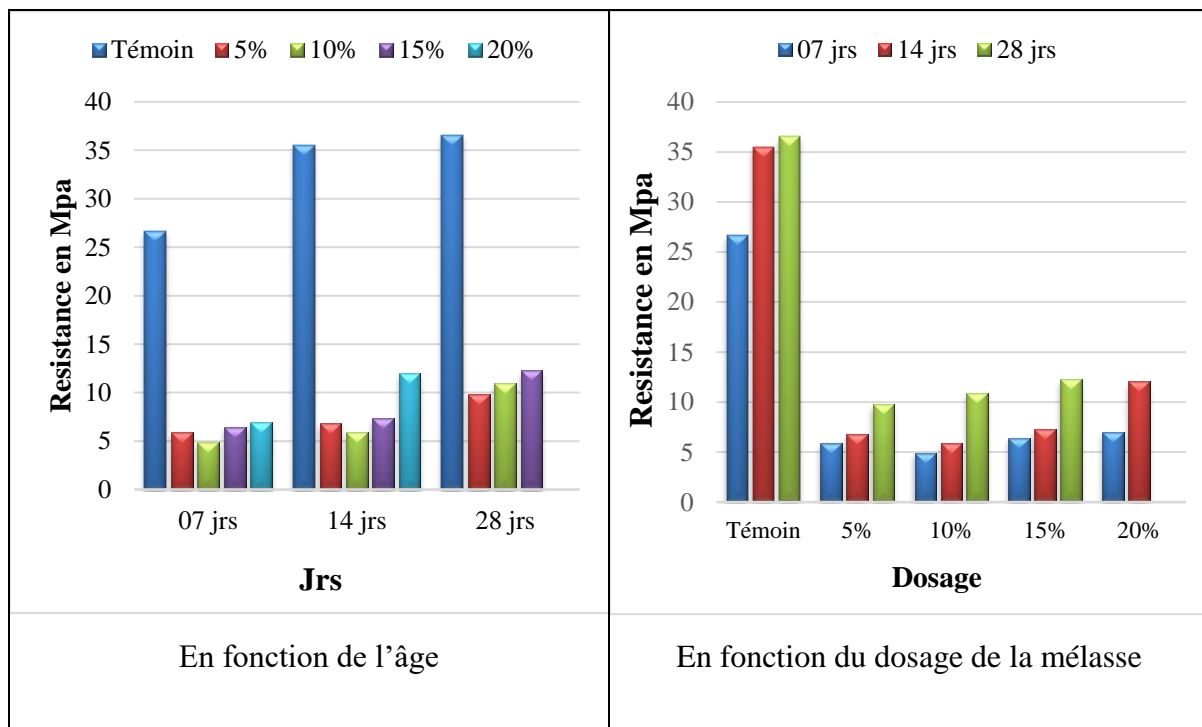
Age (Jours) Ecume(%)	07	14	28
Témoin	26,65±1	35,50±0,86	36,56±0,54
5 %	12,66±0,46	30,73±0,34	33,25±0,6
10 %	14,77±0	27,06±1,05	29,40±0,68
15 %	6,34±0,32	10,26±0,44	12,35±0,05
20 %	11,83±0,05	27,01±0,36	30,12±0,12



Figures III.21: Variation de la résistance en compression du mortier en fonction du dosage de l'écume

Tableau III.20 : Variation de la résistance en compression du mortier en fonction du dosage de la mélasse

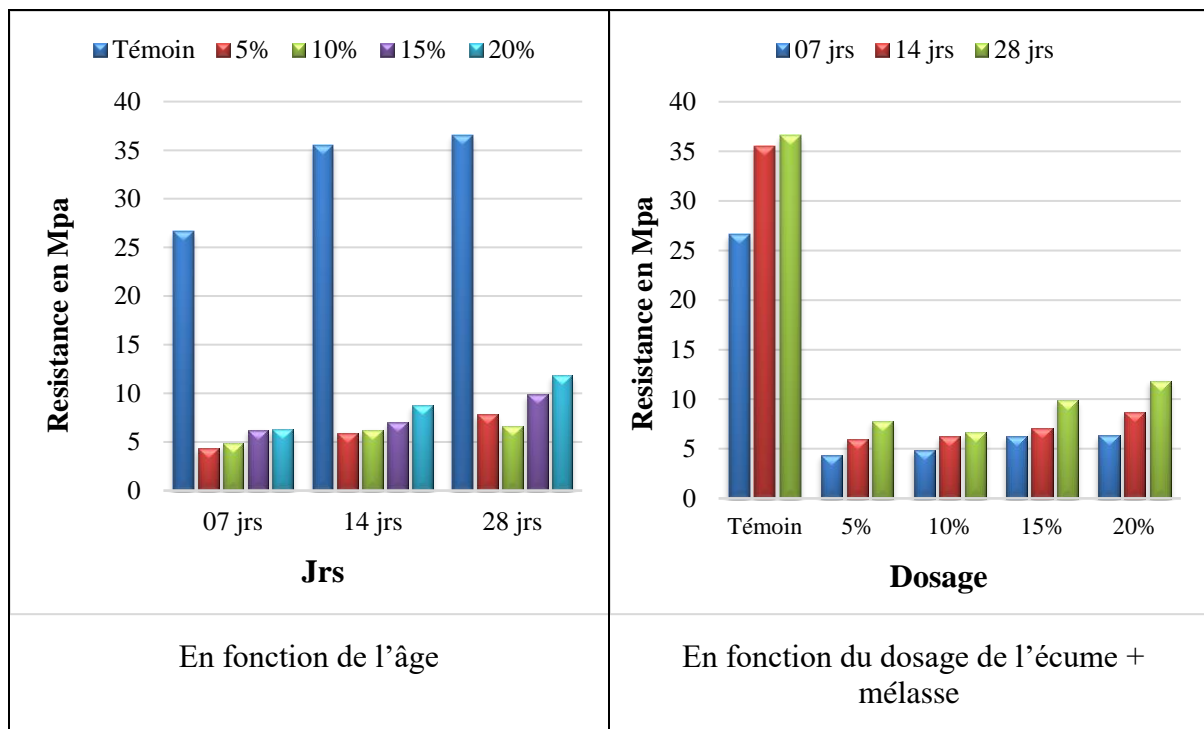
Age (Jours) Mélasse (%)	07	14	28
Témoin	26,65±1	35,50±0,86	36,56±0,54
5 %	5,92±0,06	6,83±0,09	9,78±0,05
10 %	4,92±0,16	5,87±0,05	10,92±0,16
15 %	6,44±0,42	7,33±0,30	12,27±0,14
20 %	6,99±0,47	12,04±0,18	12, 62±0,08



Figures III.22 : Variation de la résistance en compression du mortier en fonction du dosage de la mélasse

Tableau III.21: Variation de la résistance en compression du mortier en fonction du dosage de l'écume + mélasse

Age (Jours) E+ M (%)	07	14	28
Témoin	26,65±1	35,50±0,86	36,56±0,54
5 %	4,36±0,42	5,93±0,38	7,82±0,07
10 %	4,87±0,16	6,23±0,1	6,64±0,08
15 %	6,21±0,79	7,02±0,33	9,87
20 %	6,32±0,44	8,72±0,25	11,85±0,06



Figures III.23 : Variation de la résistance en compression du mortier en fonction du dosage de l'écume + mélasse

Analyse des résultats de la compression :**a- Écume de sucre seule**

À 7 jours, l'ajout d'écume diminue la résistance à la compression par rapport au témoin.

À 14 jours, la résistance à la compression s'améliore pour tous les pourcentages d'écume, mais reste inférieure au témoin, sauf pour 5% d'écume.

À 28 jours, la résistance continue d'augmenter mais reste inférieure au témoin pour les pourcentages supérieurs à 5%.

Donc :

Jusqu'à 10% d'écume, on observe une baisse modérée des résistances à la compression par rapport au mortier témoin, de l'ordre de 15-20% à 28 jours.

À 15% d'écume, les résistances chutent fortement avec des baisses de 62% à 7 jours et 66% à 28 jours.

20% d'écume semble être un dosage limite, avec des pertes réduites à 18% à 28 jours.

b- Mélasse seule

L'ajout de mélasse diminue considérablement la résistance à la compression à tous les âges et pour tous les pourcentages, par rapport au témoin.

Une légère augmentation est observée avec l'âge, mais les valeurs restent très faibles comparées au témoin.

Donc :

Pour tous les dosages de mélasse, les résistances à la compression sont très affectées, en particulier aux jeunes âges (7 et 14 jours).

À 28 jours, les baisses de résistance restent significatives : -73% pour 5%, -70% pour 10%, -66% pour 15% et -66% pour 20%.

c- Écume + Mélasse

Le mélange écume et mélasse diminue également la résistance à la compression par rapport au témoin.

Une légère augmentation est observée avec l'âge, mais les valeurs restent inférieures au témoin pour tous les pourcentages.

Donc :

Le mélange écume/mélasse entraîne également des baisses marquées des résistances par rapport au témoin.

Les pertes à 28 jours sont de 79% pour 5%, 82% pour 10%, 73% pour 15% et 68% pour 20%.

Interprétation des résultats :

L'écume de sucre, riche en fibres cellulosiques, semble avoir un effet modéré sur les résistances jusqu'à 10%, probablement grâce à un effet de renfort [CLARAMUNT et al., 2011]. Mais au-delà, l'excès organique crée des porosités dégradant fortement les propriétés [NAANNU et al., 2022].

La mélasse, riche en sucres solubles, semble perturber de manière significative le processus d'hydratation et la structuration de la matrice cimentaire, entraînant de lourdes pertes de résistances.

Le mélange écume/mélasse semble cumuler les effets néfastes des deux composés, aboutissant aux plus fortes baisses de résistance observées.

En résumé,

L'incorporation d'écume de sucre à dosages modérés (< 10-15%) semble être la moins pénalisante pour les résistances en compression des mortiers.

L'ajout de mélasse, seule ou combinée à l'écume, engendre des baisses très marquées des résistances, probablement en perturbant fortement l'hydratation.

Un dosage maximal d'environ 10% d'écume de sucre semble être un compromis acceptable pour limiter les pertes de résistance en compression à 15-20%.

L'utilisation de ces sous-produits sucrés dans les mortiers devra être contrôlée finement pour éviter des dégradations trop importantes des propriétés mécaniques.

Ces résultats sont cohérents avec la littérature sur l'incorporation de fibres cellulosiques et d'ajouts organiques riches en sucres dans les matrices cimentaires.

III.6 Conclusion

Ce chapitre a permis d'évaluer de manière approfondie l'impact de l'incorporation de deux sous-produits industriels, l'écume de sucre et la mélasse, sur les propriétés fondamentales des briques, bétons et mortiers.

Pour les briques, l'ajout d'écume de sucre jusqu'à 10% n'a eu qu'un effet modéré sur la capacité d'absorption d'eau. Un dosage optimal de 5% a permis d'augmenter significativement les résistances à la compression (+18%) et à la flexion, probablement grâce à un effet de remplissage des pores par les bulles d'air. Cependant, des taux supérieurs à 10% se sont avérés défavorables.

Concernant les bétons, l'incorporation de mélasse a entraîné une augmentation drastique de la capacité d'absorption d'eau (+240% à 5%), en raison d'une perturbation de l'hydratation du ciment et d'une hausse du rapport eau/ciment effectif. Les résistances mécaniques en compression ont également été très affectées avec des baisses pouvant atteindre 90% à 28 jours pour 15% de mélasse.

Pour les mortiers, les essais ont révélé des comportements contrastés selon le type de substitution. L'ajout d'écume de sucre seule à des dosages modérés ($\leq 10-15\%$) n'a eu qu'un impact limité sur les résistances mécaniques, l'absorption d'eau et l'humidité interne, avec même une possible amélioration des résistances grâce à un effet de renfort par les fibres cellulosiques. Cependant, au-delà de 15%, un excès de matière organique a dégradé les performances.

À l'inverse, l'incorporation de mélasse seule, riche en sucres perturbateurs, a entraîné des baisses très importantes des résistances mécaniques et des augmentations considérables de la capacité d'absorption d'eau et de l'humidité interne, quelle que soit la teneur. Ces effets ont été amplifiés pour les mélanges Ecume+mélasse, cumulant les impacts néfastes des deux substituts.

Les essais de l'aiguille de Vicat ont également mis en évidence des modifications significatives des cinétiques de prise par ces ajouts, avec une accélération du début de prise mais un retard de la fin de prise, en accord avec la littérature.

En conclusion, cette étude a permis de démontrer que l'incorporation contrôlée d'écume de sucre, riche en fibres cellulosiques, jusqu'à des dosages de l'ordre de 5-10%, peut s'avérer bénéfique pour les résistances mécaniques des briques et des mortiers, tout en préservant des propriétés hydriques acceptables. Cependant, l'ajout de mélasse, bien que pouvant apporter certains bénéfices sur l'ouvrabilité, doit être limité au maximum en raison de ses effets très défavorables sur les résistances, la compacité et la durabilité de ces matériaux.

Des formulations optimisées incorporant de l'écume de sucre à des taux modérés semblent donc une voie prometteuse pour le développement de matériaux de construction éco-sourcés et performants, valorisant ces co-produits industriels tout en répondant aux exigences d'usage.

Des investigations complémentaires sur la microstructure, la durabilité à long terme et le comportement face à d'autres sollicitations permettraient d'affiner ces formulations. La valorisation de ces sous-produits représente un enjeu économique et environnemental important pour ces filières industrielles.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Cette étude a permis d'évaluer de manière approfondie l'influence de l'incorporation de deux sous-produits majeurs de l'industrie sucrière, l'écume de sucre et la mélasse, sur les propriétés fondamentales des briques, mortiers et bétons. Un vaste programme expérimental, combinant essais normalisés et analyses microstructurales, a été mené afin de caractériser les effets de différents dosages de substitution sur les résistances mécaniques, les propriétés de transfert hydrique, les cinétiques de prise de ces matériaux.

On peut conclure :

Pour les briques, l'ajout contrôlé d'écume de sucre jusqu'à 5% s'est avéré bénéfique, permettant d'augmenter significativement les résistances en compression (+18%) et en flexion, probablement grâce à un effet de remplissage des pores par les bulles d'air. Cependant, des dosages supérieurs à 10% ont eu un impact défavorable. L'incorporation d'écume n'a eu qu'un effet modéré sur la capacité d'absorption d'eau des briques.

Dans le cas des bétons, l'incorporation de mélasse a entraîné une augmentation drastique du taux d'absorption d'eau (+240% à 5% de mélasse), en raison d'une perturbation de l'hydratation du ciment et d'une hausse du rapport eau/ciment effectif. De plus, les résistances mécaniques en compression ont été très affectées, avec des baisses pouvant atteindre 90% à 28 jours pour un dosage de 15% de mélasse.

Pour les mortiers, les résultats ont révélé des comportements contrastés selon le type de substitut. L'ajout d'écume de sucre seule à des dosages modérés ($\leq 10-15\%$) n'a eu qu'un impact limité, voire bénéfique, sur les résistances mécaniques grâce à un potentiel effet de renfort par les fibres cellulosiques. Néanmoins, au-delà de 15%, un excès de matière organique a dégradé les performances. À l'inverse, l'incorporation de mélasse seule, riche en sucres perturbateurs, a entraîné des baisses très importantes des résistances mécaniques, des augmentations considérables du taux d'absorption d'eau et de l'humidité interne, quelle que soit la teneur. Ces effets néfastes ont été amplifiés pour les mélanges associant écume et mélasse.

Les essais de caractérisation des cinétiques de prise par l'aiguille de Vicat ont également mis en évidence des modifications significatives induites par ces ajouts, avec une accélération du début de prise mais un retard de la fin de prise, en accord avec les observations rapportées dans la littérature scientifique.

En conclusion, cette étude a permis de démontrer que l'incorporation contrôlée d'écume de sucre, riche en fibres cellulosiques, jusqu'à des dosages de l'ordre de 5-10%, peut s'avérer bénéfique pour les résistances mécaniques des briques et mortiers, tout en préservant des propriétés hydriques acceptables. Cependant, l'ajout de mélasse doit être limité au maximum en raison de ses effets très défavorables sur les résistances, la compacité et la durabilité de ces matériaux cimentaires et argileux.

Des formulations optimisées incorporant de l'écume de sucre à des taux modérés constituent donc une voie prometteuse pour le développement de matériaux de construction éco-sourcés et performants valorisant ce co-produit industriel, sous réserve de garantir leur durabilité à long terme.

Perspectives

Plusieurs pistes d'études complémentaires peuvent être envisagées :

Approfondir les investigations microstructurales (porosité, distribution des fibres/bulles d'air) pour mieux comprendre les mécanismes d'action de l'écume de sucre et ses interactions avec la matrice cimentaire/argileuse.

Étudier le comportement de ces matériaux modifiés face à d'autres sollicitations comme le gel/dégel, les cycles de séchage/humidification, les attaques chimiques, etc. afin d'évaluer pleinement leur durabilité.

Optimiser les formulations en explorant des dosages intermédiaires et des combinaisons plus complexes d'écume, de mélasse et d'autres adjuvants pour atteindre un compromis optimal entre performances mécaniques, transferts hydriques et ouvrabilité.

Évaluer les impacts environnementaux (énergie, émissions CO₂) et les coûts de production de ces éco-matériaux valorisant les sous-produits sucriers afin d'en étudier la viabilité technico-économique.

Développer des démonstrateurs à plus grande échelle (prototypes, ouvrages pilotes) pour valider le passage au stade industriel et commercial.

La poursuite de ces travaux pluridisciplinaires en partenariat avec les industriels concernés permettrait de concrétiser la valorisation de ces déchets sucriers dans des produits innovants, créant ainsi de nouvelles filières de revalorisation à fort potentiel économique et bénéfiques environnementaux.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

[AGUILAR et al., 2021] : AGUILAR, P., et al. (2021). Construction and Demolition Waste Recycling in Concrete: A Review. *Materials*, 14(13), 3452.

[AİTCIN et al., 2011] : AİTCIN, P.-C., & Mindess, S. (2011). *Sustainability of Concrete*. CRC Press.

[AJAM et al., 2009] : AJAM, L., et al. (2009). Characterization of the behavior of composites portland cement-ecumes of sugar in mortar. *Construction and Building Materials*, 23(2), 752-760.

[ATCHI et al., 2006] : ATCHI, S., et BOUYAHIA, M. (2006). « Recyclage des matériaux de construction », mémoire pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie civil, Ecole Nationale Polytechnique, P3.

[CARDENAS-AGUIAR et al., 2019] : CARDENAS-AGUIAR, E., et al. (2019). Characterization of Sugar Industry Residues in Mexico: An Attempt for Sustainable Disposal. *Sustainability*, 11(18), 5019.

[CLARAMUNT et al., 2011] : CLARAMUNT, J., ARDANUY, M., García-Hortal, J. A., & Tolêdo Filho, R. D. (2011). The hornification of vegetable fibers to improve the durability of cement mortar composites. *Cement and Concrete Composites*, 33(5), 586-595.

[FEDHOUL et al., 2021] : FEDHOUL, D., et OULMAS, S. (2021). « Contribution à l'étude de niveau de la consommation du sucre dans la wilaya de Tizi-Ouzou », mémoire master, université mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, P11,12.

[HACHEMI et al., 2017] : HACHEMI, N., et BOUSSA, A. (2017) « Influence des différentes granulométries du sable sur le comportement mécanique du béton », mémoire master, Université Boumerdess, P10.

[KOSMATKA et al., 2002] : KOSMATKA, S.H., et al. (2002). *Design and Control of Concrete Mixtures*, 7th Ed., Portland Cement Association.

[KOSMATKA et al.,2002]. : KOSMATKA, S. H., KERKHOFF, B., & PANARESE, W. C. (2002). *Design and Control of Concrete Mixtures* (14th ed.). Portland Cement Association.

[MARTIRENA et al., 2017] : MARTIRENA, F., GUNNING, P., & Alujas, A. (2017). Valorisation of sugar cane molasses as additive for cementitious products. *Construction and Building Materials*, 154, 459-471.

[NAANNU et al., 2022] ; NAANNU, P. D., CHANDRA, S., GUNNESWARA Rao, T. D., & Sasmal, S. (2022). Effect of sugarcane bagasse ash and cellulose fibres on the strength properties of cement mortar composite. *Silicon*, 14(3), 871-879.

[NAEINI et al.,2011] : NAEINI, S. A., & JAHANFAR, M. A. (2011). Effect of Salt Solutions on the Atterberg Limits of a Natural Dispersive Soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 29(5), 877-886.

[NEVILLE,1996] NEVILLE, A. M. (1996). *Properties of Concrete* (4th ed.). Longman Group Limited.

[OUKIL et al., 2017] : OUKIL, Y., et OUKIL, A. (2017) « Formulation et caractérisation d'un béton de sable à partir des déchets minéraux », mémoire master, Université Bouira, P5,7.

[PRAKASH et al., 2004] : PRAKASH, K., & SRIDHARAN, A. (2004). Free Swell Ratio and Coefficients of Secondary Compression of Clays. *Geotechnical Testing Journal*, 27(5), 1-10.

[RAMACHANDRAN,1995] : RAMACHANDRAN, V. S. (1995). *Concrete Admixtures Handbook* (2nd ed.). Noyes Publications.

[SERRES et al., 2021] : SERRES, N., Feugeas, F., & Saiyouri, N. (2021). Valorization of Industrial By-Products in Cement Based Materials. *Applied Sciences*, 11(9), 4226.

[TAOUNZA et al., 2020] : TAOUNZA, M., et KESSAI, F. (2020). « Effet des agents agressifs sur le comportement des mortiers autoplaçant à base de marbre recycles », mémoire master, Université Saad Dahlab blida 1, P16.

Netographie

- [Net1]: https://elearning.univeloued.dz/pluginfile.php/21032/mod_resource/content/1/chapitre%201%20D%C3%A9finitions%20mdif.pdf consulté 20/03/2024
- [Net2] : [Génie civil et environnement : les nouvelles exigences - Tout ce qu'il faut savoir sur le génie civil \(metier-genie-civil.com\)](#) consulté 19/03/2024
- [Net3] : [Notions de développement durable | Infociments](#) consulté 20/03/2024
- [Net4] : [Développement durable : définition, objectifs et initiatives \(selectra.com\)](#) consulté 20/03/2024
- [Net5]: <https://books.openedition.org/emsha/docannexe/image/997/img-1.jpg> consulté 20/03/2024
- [Net6]: <https://www.travaux-de-renovation.be/eco-materiaux-renovation-ecologique.htm> consulté 20/03/2024
- [Net7]: https://www.m-habitat.fr/terrassement-et-fondation/maconnerie/les-eco-materiaux-materiaux-de-construction-ecologiques-4095_A consulté 22/03/2024
- [Net8]: <https://moodle.univ-ouargla.dz/course/info.php?id=12688&lang=ar> consulté 20/03/2024
- [Net9]: <https://www.metier-genie-civil.com/genie-civil-environnement-nouvelles-exigences/> consulté 20/03/2024
- [Net10]: https://document.environnement.brussels/opac_css/electfile/IF_BATEX_Fiche4.3_Dechets_FR.pdf consulté 20/03/2024
- [Net11]: [Ms.Eln.AMEUR BERRAHOU.pdf \(univ-tlemcen.dz\)](#) consulté le 24/05/2024
- [Net12]: [Sucre raffiné ? Sucre non raffiné ? De quoi parle-t-on ? | Cultures sucre \(cultures-sucre.com\)](#) consulté 25/05/2024
- [Net13]: [Fiche_08_Melasse.pdf \(lescoproduits.fr\)](#) consulté le 24/05/2024
- [Net14] : [Tout savoir sur la brique de construction \(renovationtravaux.fr\)](#) consulté le 24/05/2024
- [Net15] : <https://forum-btp.blogspot.com/2013/09/les-briques.html> consulté le 25/05/2024

[Net16]:<https://www.toutsurlebeton.fr/mise-en-oeuvre/quelles-sont-les-dimensions-dune-brique/>consulte le 25/05/2024 consulté 20/03/2024

[Net17]:<https://www.toutsurlebeton.fr/mise-en-oeuvre/quelles-sont-les-dimensions-dune-brique/>consulté le 25/05/2024

[Net18]:<https://www.toutsurlebeton.fr/mise-en-oeuvre/quelles-sont-les-dimensions-dune-brique/>consulté le 25/05/2024

REFERENCES

NORMATIVES

Références Normatives

- **NF P 94-051** : Détermination de la limite d'Atterberg
- **NF P18-573, 90** : Résistance au choc (essai Los Angeles)
- **NF P18-572** : Résistance à l'usure (Micro-Deval)
- **NF EN934-2** : Adjuvant pour béton, mortier et coulis – adjuvant pour béton définition, exigences, conformité, marquage et étiquetage, septembre 2002.
- **NF-P 18.303** : L'eau de gâchage
- **NF EN 1097-6** : Essai d'absorption
- **NF EN 772-1** : Caractérisation mécanique de la brique, essai de compression
- **NF EN 722-6** : Caractérisation mécanique de la brique, essai traction par flexion
- **NF EN 1015-3** : Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 3 : Détermination de la consistance du mortier frais (avec une table à secousses). 1999.
- **NF EN 196-3** : Méthodes d'essais des ciments – Partie 3 : Détermination du temps de prise et de la stabilité. Septembre 2017
- **NF P94-50** : Essai de l'humidité
- **EN 196-1** : Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances. Septembre 2016
- **NF EN 1015-11** : Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 11 : détermination de la résistance en flexion et en compression du mortier durci. 2000