

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Boudiaf - M'Sila

Faculté De Technologie

Département de Génie Civil

N° :/ 2025



DOMAINE : Technologie

FILIERE : Génie civil

SPECIALITE: Matériaux

Mémoire présenté pour l'obtention

Du diplôme de Master Académique

Par DERRAS Abir

Intitulé

*Réutilisation des produits en argile rouge
comme granulats dans le béton
– Revue bibliographique*

Soutenue devant le jury composé de

MAZA Mekki

CHIKOUCHE Med Aziz

DJEBRI Noura

Université de M'sila

Université de M'sila

Université de M'sila

Président

Encadreur

Examineur

Année Universitaire : 2024/2025



Remerciements

*Je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné
la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce
mémoire.*

*Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche
et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et
l'encadrement de*

Mr CHIKOUCHE MOHAMED AZIZ

*On le remercie pour la qualité de son encadremen
exceptionnel
pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant
ma préparatDédicacee mémoire.*

*Des remerciements son également adressés à tous les
professeurs
et aux personnels du Département de Génie Civil.*





Dédicace

Je dédie cet ouvrage

*A ma maman qui m'a soutenu et encouragé durant ces
années d'études*

*Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde
reconnaissance*

*A mes frères et Ceux qui ont partagé avec moi
tous les moments d'émotion lors de la réalisation de
ce travail*

*Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé
tout au long de mon parcours*

*A ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent
de l'amour et de la vivacité*

À l'âme pure de ma grand-mère

*A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé
et à qui je souhaite plus de succès*

A tous ceux que j'aime.



ملخص

الأسمنت، الحصى، الرمل والماء هي المكونات الرئيسية للخرسانة. ولكن بسبب الضرر الذي تسببه هذه المادة للبيئة، تعتبر ملوثة. إن استخراج الصلصال والحجر الجيري لصناعة الأسمنت يترك وراءه مناظر طبيعية موحشة. يؤدي استخراج الحصى الكبيرة أو الدقيقة إلى تدمير النظام البيئي.

لمعالجة هذه القضايا البيئية، تحاول مصانع الأسمنت تقليل بصمتها الكربونية من خلال استخدام بدائل مثل خبث الأفران، والرماد المتطاير، وغبار السيليكا. وللتقليل من استخدام الحصى الطبيعية، يوصي الباحثون باستبدالها بالنفايات مثل الخرسانة المعاد تدويرها والإطارات المستعملة وغيرها.

في هذا المشروع في السنة النهائية، قمنا بدراسة مقالات مختلفة تكشف عن استخدام النفايات من منتجات الطين الأحمر (الطوب، القرميد والبلاط الأرضي) وتأثيراتها على خصائص الخرسانة. يؤدي استبدال الحصى الطبيعية بالمواد المعاد تدويرها إلى زيادة المسامية والنفاذية وامتصاص الماء. ومع ذلك، يمكن تحسين هذه الخصائص وغيرها عن طريق الإماهة المسبقة.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة، الحصى، الاستعادة، النفايات، الطين الأحمر.

Abstract

Cement, aggregates, sand, and water are the main components of concrete. However, due to its environmental impact, this material is considered polluting. Extracting clay and limestone to make cement leaves a legacy of damage. Extracting coarse or fine aggregates destroys the ecosystem.

To address these environmental issues, cement factories are trying to reduce their carbon footprint by using substitutes such as blast furnace slag, fly ash, and silica fume. To reduce the use of natural aggregates, researchers recommend replacing them with waste materials such as recycled concrete, used tires, etc.

In this project, we studied various manuscripts describing the use of waste materials from red clay products (bricks, roof tiles, and clay tiles) and their effects on the characteristics of concrete. Replacing natural aggregates with recycled aggregates increases porosity, permeability, and water absorption. However, these and other characteristics can be improved by pre-wetting the aggregates.

Keywords: Concrete, aggregates, recovery, waste, red clay.

Résumé

Le ciment, les granulats, le sable et l'eau sont les principaux composants du béton. Cependant, en raison de son impact environnemental, ce matériau est considéré comme polluant. L'extraction d'argile et de calcaire pour la fabrication du ciment laisse des traces. L'extraction de granulats grossiers ou fins détruit l'écosystème.

Pour répondre à ces enjeux environnementaux, les cimenteries tentent de réduire leur empreinte carbone en utilisant des substituts tels que le laitier de haut fourneau, les cendres volantes et la fumée de silice. Pour réduire l'utilisation de granulats naturels, les chercheurs recommandent de les remplacer par des déchets tels que du béton recyclé, des pneus usagés, etc.

Dans ce projet de fin d'études, nous avons étudié divers manuscrits décrivant l'utilisation de déchets issus de produits en argile rouge (briques, tuiles et carreaux de terre) et leurs effets sur les caractéristiques du béton. Le remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés augmente la porosité, la perméabilité et l'absorption d'eau. Cependant, ces caractéristiques, ainsi que d'autres, peuvent être améliorées par un pré-mouillage des granulats.

Mots clés : Béton, granulats, valorisation, déchets, argile rouge.



Sommaire



Sommaire

Remerciements	
Dédicace	
Dédicace	
ملخص	I
Abstract	II
Résumé	III
INTRODUCTION GENERALE	7

CHAPITRE I Généralités sur les argiles

I.1. Définition	10
I.2. Historique	10
I.3. La formation des argiles	11
I.4. Composition des argiles	11
I.4.1. Les minéraux argileux	12
I.4.1.1. Le groupe 1 : 1	12
I.4.1.2. Le groupe 2 : 1	13
I.4.1.3. Le groupe 2 : 1 : 1	14
I.4.1.4. Les interstratifiés	15
I.5. Les différents types d'argiles	16
I.5.1. La bentonite	16
I.5.2. La Kaolinite	16
I.5.3. La montmorillonite/smectites	17
I.6. Caractérisation des argiles	18
I.6.1. La diffractométrie à rayons X	19
I.6.2. Infra rouge à transformée de Fourier	20
I.6.3. L'analyse thermique différentielle	20
I.6.4. Microscope électronique à balayage	21
I.7. Les argiles en Algérie	22

CHAPITRE II Les produits en argiles rouges

II.1. Introduction	26
II.2. La brique	26
II.2.1. Historique	26
II.2.2. Fabrication	27
II.2.2.1. Extraction	27
II.2.2.2. Préparation de l'argile	27
II.2.2.3. Le façonnage	28
II.2.2.4. Le séchage	29
II.2.2.5. La cuisson	29
II.2.3. Caractéristiques des briques	30
II.3. La tuile	31
II.3.1. La fabrication	32
II.3.1.1. L'extraction	32
II.3.1.2. La préparation de la pâte	32
II.3.1.3. Le façonnage	32
II.3.1.4. Le séchage	33
II.3.1.5. La cuisson	33
II.3.2. La production mondiale des tuiles	34
II.4. Les carreaux en céramique	34
II.4.1. Fabrication	35

II.4.1.1. Préparation des matières premières.....	35
II.4.1.2. Façonnage	36
II.4.1.3. Séchage	36
II.4.1.4. Cuisson et émaillage.....	36
II.4.1.5. Traitements ultérieurs.....	37
II.4.2. Classement des carreaux céramiques.....	37
II.4.2.1. Signification de « U »	38
II.4.2.2. Signification de « P »	38
II.4.2.3. Signification de « E »	38
II.4.2.4. Signification de « C »	38
II.5. Le marché des céramiques.....	38
II.6. Le marché des déchets.....	39

CHAPITRE III

Valorisation des déchets dans les bétons

III.1. Les déchets de briques	41
III.2. Les déchets de tuiles	48
III.3. Les déchets de carreaux céramiques	54
CONCLUSION GENERALE	66
BIBLIOGRAPHIE.....	68

Liste des figures

Titre	Page
CHAPITRE I. Généralités sur les argiles	
Figure I.1. Effet de l'eau sur certaines argiles.....	10
Figure I.2. Croquis schématique d'une feuille octaédrique.....	12
Figure I.3. Croquis schématique de la feuille tétraédrique.....	12
Figure I.4. Croquis schématique de la structure du kaolin.....	13
Figure I.5. Croquis schématique de la structure de l'halloysite hydratée.....	13
Figure I.6. Croquis schématique de la structure des smectites.....	14
Figure I.7. Croquis schématique de la structure de l'illite.....	15
Figure I.8. Croquis schématique de la structure du chlorite.....	15
Figure I.9. La bentonite.....	16
Figure I.10. Structure de la kaolinite.....	17
Figure I.11. Structure de la montmorillonite.....	18
Figure I.12. Espacements basaux des minéraux argileux homoioniques sous éthylène glycol.....	18
Figure I.13. Principe d'incidence et émergences des rayons X.....	19
Figure I.14. Spectre de diffractométrie à rayons X du silicium.....	19
Figure I.15. Les différents types de vibrations en spectroscopie infrarouge.....	20
Figure I.16. Courbe d'une analyse thermique différentielle d'un kaolin pur.....	21
Figure I.17. Principe de fonctionnement d'un microscope électronique à balayage.....	21
Figure I.18. Diagrammes de diffraction des rayons X de la fraction d'argile étudiés par Abdelmalek et coll.....	22
Figure I.19. Spectres IRTF- de l'échantillon d'argile étudié par Abdelmalek et coll.	22
Figure I.20. Analyse TG-ATD d'une argile volcanique étudié par Lahcene et coll.	23
Figure I.21. Diagrammes de diffraction des rayons X de l'argile d'Aïn Ouarka étudiés par Lahcene et coll.	23
Figure I.22. Image MEB d'un éclat de roche étudié par Lamouri et coll.	24
CHAPITRE II. Les produits en argiles rouges	
Figure II.1. Briques avec grenouille	26
Figure II.2. Fabrication artisanale des briques.	27
Figure II.3. Préparation des matières argileuses pour la Fabrication des briques.	28
Figure II.4. Façonnage des briques	29
Figure II.5. Séchage des briques.....	29
Figure II.6. Séchage des briques.....	30
Figure II.7. La tuile italienne.....	31
Figure II.8. Etapes de fabrication des tuiles.....	32
Figure II.9. Les différents types de tuiles.....	33
Figure II.10. Les carreaux en céramique.....	34
Figure II.11. Préparation de la matière première pour la fabrication des carreaux céramiques.....	35
Figure II.12. Machines d'application de l'email.....	37
Figure II.13. Ligne de production de carreaux céramiques.....	37
Figure II.14. Chiffre d'affaires des céramiques en Europe.....	39
CHAPITRE III. Valorisation des déchets dans les bétons	
Figure III.1. Relation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction des bétons élaborés par Cachim.....	42
Figure III.2. Résistance à la compression des bétons élaborés par Debieb et Kenai.....	42
Figure III.3. Absorption d'eau par capillarité des bétons élaborés par Debieb et Kenai.....	43
Figure III.4. Masse volumique des bétons élaborés par Abdur Rashid et coll.....	43
Figure III.5. Module de rupture et résistance des bétons élaborés par Abdur Rashid et coll.....	44
Figure III.6. Résistance à la compression des bétons élaborés par Adamson et coll.	44
Figure III.7. Profondeur de pénétration des ions chlorures dans les bétons élaborés par Adamson et coll....	45
Figure III.8. Mode de rupture par compression des échantillons de béton RBCA : (a) RB-0, (b) RB-25, (c) RB-50, (d) RB-75, (e) RB-100 élaborés par Ji et coll.	45
Figure III.9. Destruction des échantillons après compression uniaxiale : (a) microscope, (b) état de destruction du témoin sous un microscope, (c) destruction du RBCA sous un microscope, (d) état destructeur de l'échantillon sous un microscope, élaborés par Ji et coll.	46
Figure III.10. Analyse d'image des échantillons divisés et Effet de la taille maximale des granulats sur le périmètre d'ITZ d'après Uddine et coll.	47
Figure III.11. Courbe contrainte-déformation des bétons élaborés par Uddine et coll.	48

Figure III.12. Effet des granulats sur le temps de prise initial et final des bétons élaborés par Ceesay et Miyazawa.	49
Figure III.13. Effet des granulats sur la carbonatation la pénétration des chlorures et la masse des bétons élaborés par Ceesay et Miyazawa.	49
Figure III.14. Les caractéristiques des bétons frais élaborés par Miličević et coll.	50
Figure III.15. La résistance à la compression et la densité sèche des bétons élaborés par Miličević et coll.	50
Figure III.16. Module d'élasticité dynamique et statique des bétons élaborés par Miličević et coll.	51
Figure III.17. Perte de masse en fonctions des températures élevées des bétons élaborés par Miličević et coll.	51
Figure III.18. Gain de volume en fonctions des températures élevées des bétons élaborés par Miličević et coll.	52
Figure III.19. Perméabilité aux gaz en fonctions des températures élevées des bétons élaborés par Miličević et coll.	52
Figure III.20. Retrait du béton jusqu'à l'âge de 1 jour avant démoulage élaborés par Ogawa et coll.	53
Figure III.21. Profondeur de carbonatation dans des conditions de carbonatation accélérée élaborés par Ogawa et coll.	53
Figure III.22. Effet des granulats de déchets de tuiles sur le volume poreux des bétons élaborés par Bui et coll.	54
Figure III.23. Consommation de Ca(OH)_2 dans les bétons élaborés par Bui et coll.	54
Figure III.24. Affaissement des bétons élaborés par Roig-Flores et coll.	55
Figure III.25. Résistance à la compression des bétons élaborés par Roig-Flores et coll.	55
Figure III.26. Absorption d'eau des bétons élaborés par Roig-Flores et coll.	56
Figure III.27. Le modèle linéaire de la résistance à la compression des bétons élaborés par Keshavarz & Mostofinejad.	56
Figure III.28. Le modèle linéaire de l'absorption d'eau des bétons élaborés par Keshavarz & Mostofinejad.	57
Figure III.29. L'ouvrabilité des bétons élaborés par Daniyal & Ahmad.	57
Figure III.30. La densité des bétons élaborés par Daniyal & Ahmad.	58
Figure III.31. La résistance à la compression à 28 jours des bétons élaborés par Daniyal & Ahmad.	58
Figure III.32. Résistance relative à la compression des échantillons après exposition à des températures élevées d'après Albero et coll.	59
Figure III.33. Images des fissures des échantillons après exposition à des températures élevées d'après Albero et coll.	60
Figure III.34. Dosage en superplastifiant des bétons élaborés par Goyal et coll.	60
Figure III.35. Volume des vides des bétons élaborés par Goyal et coll.	61
Figure III.36. Relation entre le volume des vides et la perméabilité des bétons élaborés par Goyal et coll.	61
Figure III.37. Un comparatif des résultats des essais physico-mécaniques des granulats WTA, FTA et LSA élaborés par Elçi.	62
Figure III.38. Retrait des bétons WTC, FTC et LSC élaborés par Elçi.	62
Figure III.39. Variation des propriétés mécaniques des bétons WTC, FTC et LSC élaborés par Elçi.	63
Figure III.40. Résistance à la compression relatives des bétons élaborés par Anderson et coll.	64
Figure III.41. Module d'élasticité relatifs des bétons élaborés par Anderson et coll.	64

Liste des tableaux

Titre	Page
CHAPITRE I. Généralités sur les argiles	
Tableau I.1. Processus d'altération chimique.....	11
CHAPITRE II. Les produits en argiles rouges	
Tableau II.1. Exigences physiques pour les briques de construction (ASTM C62)	31
Tableau II.2. Composition des déchets de construction et de démolition selon Juan et coll.....	39
CHAPITRE III. Valorisation des déchets dans les bétons	
Tableau III.1. Résistance à la compression des béton élaborés par Cachim.....	41
Tableau III.2. Affaissement des bétons élaborés par Adamson et coll.....	44
Tableau III.3. Propriétés physique et mécanique des granulats de l'étude de Ceesay et Miyazawa.....	49



Introduction générale



INTRODUCTION GENERALE

Le précurseur du béton fut inventé, lorsque des bâtisseurs du Moyen-Orient découvrirent qu'en recouvrant l'extérieur de leurs forteresses et murs d'habitation en terre battue d'une fine couche humide de calcaire brûlé, celle-ci réagissait chimiquement avec les gaz de l'air pour former une surface dure et protectrice. Ce n'était pas du béton, mais ce fut le début du développement du ciment.

Les premiers matériaux composites à base de ciment comprenaient généralement du mortier concassé, du calcaire brûlé, du sable et de l'eau, qui étaient utilisés pour la construction en pierre, par opposition au moulage du matériau dans un moule, qui est essentiellement la façon dont le béton moderne est utilisé, le moule étant les coffrages en béton.

Aujourd'hui, le béton joue un rôle central dans la construction. C'est le matériau de construction le plus utilisé au monde pour produire des bâtiments et des infrastructures sûrs et durables. Il protège les citoyens contre les catastrophes naturelles, les phénomènes météorologiques extrêmes et les risques naturels et anthropiques.

Le béton est composé de ciment, d'eau, de granulats (sable et gravier) et parfois d'adjuvants. Le ciment agit comme liant, l'eau active la réaction chimique qui durcit le ciment, et les granulats lui confèrent volume et résistance. Des adjuvants sont ajoutés pour modifier les propriétés du béton comme les accélérateurs de prise ou les réducteurs d'eau, etc.

Les granulats sont du gravier et du sable, mélangés au ciment pour former le béton, ont un impact environnemental important. L'extraction et le traitement des granulats naturels, nécessitent une énergie et des ressources considérables, ce qui entraîne des perturbations des habitats, une pollution atmosphérique, un changement de l'écosystème et des émissions de gaz à effet de serre, etc. Les granulats recyclés, offrent une alternative plus durable en réduisant les déchets mis en décharge, la consommation d'énergie et les émissions de carbone. Les granulats recyclés sont des matériaux granulaires, comme le béton concassé. Ils sont issus de déchets de construction ou de démolition.

L'argile rouge, est un matériau terreux naturel fréquemment utilisé dans la production de produits céramiques comme les briques et les tuiles. Les déchets issus de ces procédés peuvent constituer des ressources précieuses pour diverses applications, notamment la construction et la dépollution environnementale. Les déchets des produits d'argile rouge concassés peuvent remplacer les granulats naturels dans les mélanges de béton. Cela réduit la demande en ressources naturelles et minimise l'impact environnemental de leur extraction et de leur transport.

Objectif de l'étude

Dans le secteur des produits en argile rouge, les déchets sont volumineux pour les stockés. Diverses publications et de nombreux auteurs insistent sur le fait de la réutilisation de ces produits. Quelques publications seront étudiées et analysées afin de comprendre le comportement du béton

Introduction

lorsque les produits en argile rouge comme la brique, la tuiles ou les carreaux de terre sont inclus comme granulats grossiers dans le béton.

Structure de l'étude

Afin de cerner le sujet de notre travail, on a partagé l'étude en trois chapitres ainsi qu'une introduction et une conclusion générale.

* La formation des argiles et ses composants, ainsi que la caractérisation de ces dernières comme la diffraction à rayon X ou l'infra rouge a transformé de Fourier sont relatés au premier chapitre.

* Le deuxième chapitre traite les différents produits argileux comme la brique, la tuile, et les carreaux de terre.

*Le troisième chapitre est une revue bibliographique recouvrant différentes publications sur l'utilisation des déchets des produits en argile rouge comme granulats dans les bétons.



Chapitre I

Généralités sur les argiles



CHAPITRE I

Généralités sur les argiles

I.1. Définition

Du latin « argilla », l'argile se définit comme une terre grasse et molle contenant un ensemble de particules fines ($<2\mu\text{m}$), constituées essentiellement de minéraux à structure en feuillets et présentant une plasticité à l'état humide.

Il s'agit d'une masse minérale de terre ou d'une roche fragmentaire capable de se mélanger à l'eau et de former une masse visqueuse plastique qui a la propriété de conserver sa forme lorsqu'elle est moulée et séchée. Lorsque de telles masses sont chauffées jusqu'au rougeur, elles acquièrent de la dureté et de la force. Ceci est le résultat de changements microstructurels dans l'argile et, en tant que tel, est une propriété chimique (Fig.I.1).[1]



Figure I.1. Effet de l'eau sur certaines argiles.

I.2. Historique

L'origine de la notion d'argile et de la fabrication des poteries remonte à l'antiquité la plus reculée. C'est aux périodes néolithiques que les Préhistoriens font apparaître les premières manifestations de l'art céramique. Pour la Grèce l'art du potier a atteint son apogée au Vème siècle avant J-C. Le VIème siècle avant J-C avait été caractérisé par la peinture sur céramique à figures noires sur fond rouge.

La poterie était une des branches principales du commerce grec, l'application du scaphandre autonome à l'archéologie sous-marine confirme ce fait par les très nombreuses découvertes, déjà faites, d'épaves antiques chargées d'amphores de terre cuite. Les Grecs, pour payer les produits alimentaires qu'ils devaient importer, ne pouvant vivre exclusivement de leur sol, exportaient de l'huile et des objets manufacturés. Les Grecs avaient été de bons modelers de terre cuite. Les statuettes, les produits les plus divers de ce genre étaient l'objet d'un commerce très actif. Les argiles les plus variées, les marnes, les ocres ont été les produits les plus courants utilisés dans l'Antiquité [2].

I.3. La formation des argiles

L'origine principale des argiles est liée à l'altération suivie de l'érosion, du transport et de la sédimentation, de formations géologiques et pédologiques exposées à la surface terrestre. Tous les processus superficiels résultant de l'interaction entre les roches, l'air, l'eau et les organismes sont regroupés sous le terme d'altération.

L'altération physique permet la fragmentation de la roche-mère, ensuite la percolation d'eau va progressivement modifier la composition de cette roche. Ensuite, l'altération chimique joue un rôle capital dans la formation des argiles. Les paramètres contrôlant l'altération chimique sont résumés au tableau I.1. [3]

Tableau I.1. Processus d'altération chimique.

	pH > 5	5 < pH < 9.6	pH > 9.6
Attack solution depleted in saline elements (Na, K, Ca, Mg)	Acidolysis water rich in dissolved organic acids	Hydrolysis pure water or CO ₂ -rich water	
Attack solution concentrated in saline elements		Salinolysis water charged with salts of strong acids (chlorides, sulphates)	Alcalinolysis water charged with salts of weak acids (carbonates, bicarbonates)

***L'acidolyse ;** Il se développe dans un environnement riche en matières organiques, de nature acide et est caractérisé par la présence de complexes organico-minéraux .

***L'alcalinolyse ;** Il se développe plutôt en environnement basique avec des solutions chargées en Ca ou Mg.

***L'hydrolyse ;** C'est le processus le plus répandu et le mieux connu, correspond à l'attaque d'une roche par l'eau dans des conditions de pH moyen.

***La salinolyse ;** Se produit en environnement évaporitique salin (Na, K) dans des conditions normales de pH.

Ainsi le degré d'altération et la formation des argiles dépendront de la combinaison de plusieurs facteurs qui détermineront la nature des minéraux secondaires formés. Les principaux facteurs sont : (1) Le climat (température, humidité, alternance saisonnière) qui contrôle le degré d'hydrolyse. (2) Le relief qui détermine le degré de drainage ou de confinement. (3) La nature de la roche-mère qui conditionne la séquence des minéraux formés.

I.4. Composition des argiles

La structure atomique des minéraux argileux se compose de deux unités de base, une feuille octaédrique et une feuille tétraédrique.

La feuille octaédrique est composée d'oxygènes et d'hydroxyles serrés dans lesquels les atomes d'aluminium, de fer et de magnésium sont disposés en coordination octaédrique (Fig.I.2). Lorsque l'aluminium avec une valence positive de trois est le cation présent dans la feuille

octaédrique, seuls les deux tiers des positions possibles sont remplis afin d'équilibrer les charges. Lorsque seulement les deux tiers des positions sont pourvus, le minéral est appelé dioctaédrique. Lorsqu'il y a du magnésium avec une charge positive de deux, les trois positions sont remplies pour équilibrer la structure et le minéral est appelé trioctaédrique [4].

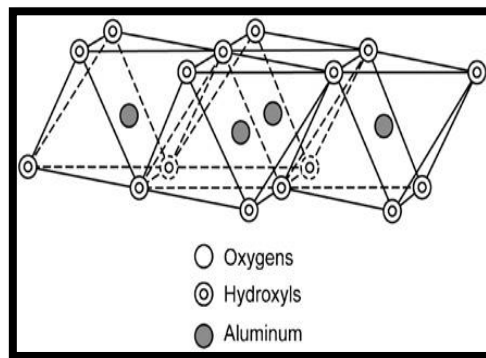


Figure I.2. Croquis schématique d'une feuille octaédrique.

La couche tétraédrique dans laquelle l'atome de silicium est équidistant de quatre oxygènes ou éventuellement hydroxyles disposés en forme de tétraèdre avec l'atome de silicium au centre. Ces tétraèdres forment un réseau hexagonal répété à l'infini dans deux directions horizontales pour former ce qu'on appelle la feuille tétraédrique de silice (Fig. I.3). La feuille tétraédrique de silice et la feuille octaédrique sont reliées par le partage des oxygènes apicaux ou hydroxyles pour former ce que l'on appelle la couche minérale argileuse 1:1 (par exemple la kaolinite) ou la couche minérale argileuse 2:1 (par exemple l'illite). La disposition et la composition des feuillets octaédriques et tétraédriques expliquent la plupart des différences dans leurs propriétés physiques et chimiques.

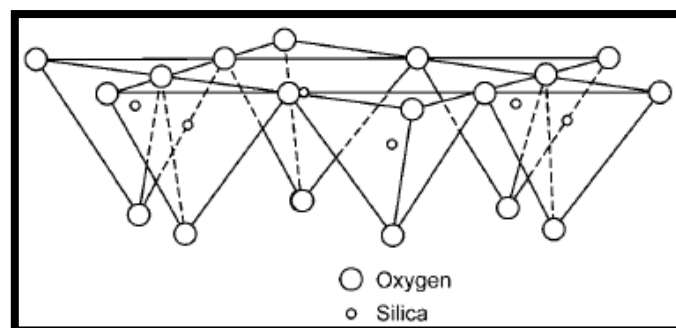


Figure I.3. Croquis schématique de la feuille tétraédrique.

I.4.1. Les minéraux argileux

Les minéraux argileux sont en général en forme de feuilles, d'où leur nom de phyllites. Ils appartiennent au groupe des phyllosilicates. Chaque cristal ou phyllite, dont l'épaisseur se mesure en micromètres, est composé de quelques centaines de feuillets empilés, qui se mesurent en nanomètres. Chaque feuillet est composé de deux, trois ou quatre couches planes associées. De ses variations viennent les différentes espèces de minéraux argileux, parmi elles :

I.4.1.1. Le groupe 1 : 1

La structure minérale de base est le kaolin est une couche d'une seule feuille tétraédrique et d'une seule feuille octaédrique. Ces deux feuilles sont combinées pour former une unité dans laquelle les pointes des tétraèdres de silice sont jointes à la feuille octaédrique. Tous les oxygènes

apicaux des tétraèdres de silice pointent dans la même direction, de sorte que ces oxygènes et/ou hydroxyles, qui peuvent être présents pour équilibrer les charges, sont partagés par les siliciums dans la feuille tétraédrique et l'aluminium dans la feuille octaédrique (Fig. I.4). Seuls les deux tiers des positions octaédriques sont remplis par un atome d'aluminium. Les atomes d'aluminium sont entourés de quatre oxygènes et de huit hydroxyles.

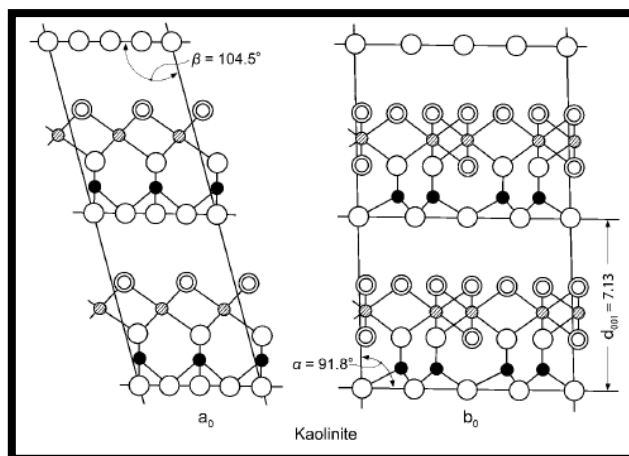


Figure I.4. Croquis schématique de la structure du kaolin.

Les minéraux du groupe du kaolin, comme la kaolinite, la dickite, la nacrite et l'halloysite sont constitués de couches dites 1:1 de feuillets octaédriques et tétraédriques combinés. Les différences entre les minéraux de kaolin sont la manière dont les couches unitaires sont empilées les unes sur les autres.

Dans la dickite, la cellule unitaire se compose de deux couches unitaires et dans la nacrite, de six couches unitaires. L'halloysite se présente sous deux formes : l'une hydratée, dans laquelle il y a une couche de molécules d'eau entre les couches, et l'autre déshydratée. La forme hydratée a un espacement basal de 10 Å (Fig. I.5) et la forme déshydratée 7.2 Å. La forme de l'halloysite est constituée de tubes allongés tandis que la forme de la kaolinite est constituée de plaques et d'empilements pseudo-hexagonaux.

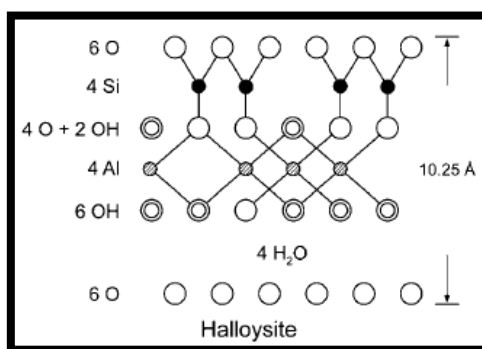


Figure I.5. Croquis schématique de la structure de l'halloysite hydratée.

I.4.1.2. Le groupe 2 : 1

Les principaux minéraux de ce type sont la montmorillonite de sodium, la montmorillonite de calcium, la saponite, la nontronite, l'hectorite et la beidellite. Les minéraux de smectite sont composés de deux feuillets tétraédriques de silice avec une feuille octaédrique centrale et sont désignés comme un minéral de couche 2:1 (Fig. I.6). Les molécules d'eau et les cations occupent l'espace entre les couches 2:1.

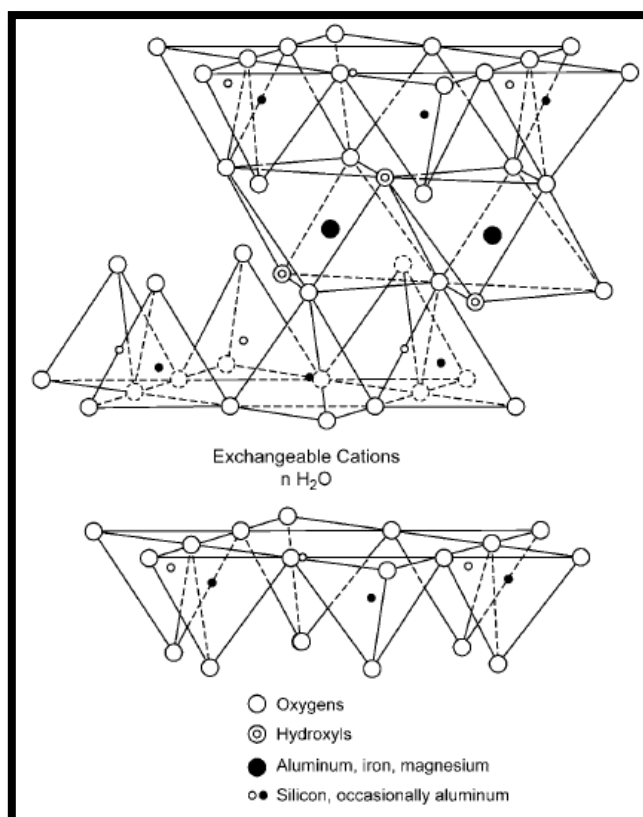


Figure I.6. Croquis schématique de la structure des smectites.

Chez les smectites, il y a une substitution considérable dans la feuille octaédrique et une partie dans la feuille tétraédrique. Dans la feuille tétraédrique, il y a substitution de l'aluminium au silicium jusqu'à 15 % et dans la feuille octaédrique, du magnésium et du fer pour l'aluminium. Si les positions octaédriques sont principalement remplies d'aluminium, le minéral de la smectite est la béidellite ; s'il est rempli de magnésium, le minéral est la saponite ; et si par le fer, le minéral est la nontronite.

Le minéral de smectite le plus courant est la montmorillonite de calcium, ce qui signifie que le déficit de charge de la couche est compensé par le cation calcium et l'eau de l'intercouche. L'espacement basal de la montmorillonite calcique est de 14.2 Å. La montmorillonite de sodium se produit lorsque le déficit de charge est équilibré par les ions sodium et l'eau et que l'espacement basal est de 12.2 Å. Les montmorillonites calciques ont deux couches d'eau en position intercalaire et les montmorillonites sodiques ont une couche d'eau.

I.4.1.3. Le groupe 2 : 1 : 1

L'illite est un mica minéral argileux, avec une structure de couche 2:1 dans laquelle le cation intercouche est du potassium (Fig.I.7). La taille, la charge et le nombre de coordination du potassium sont tels qu'il s'adapte parfaitement à l'anneau hexagonal d'oxygène des feuillets tétraédriques de silice adjacents. Cela donne à la structure une forte liaison ionique imbriquée qui maintient les couches individuelles ensemble et empêche les molécules d'eau d'occuper la position intercouche.

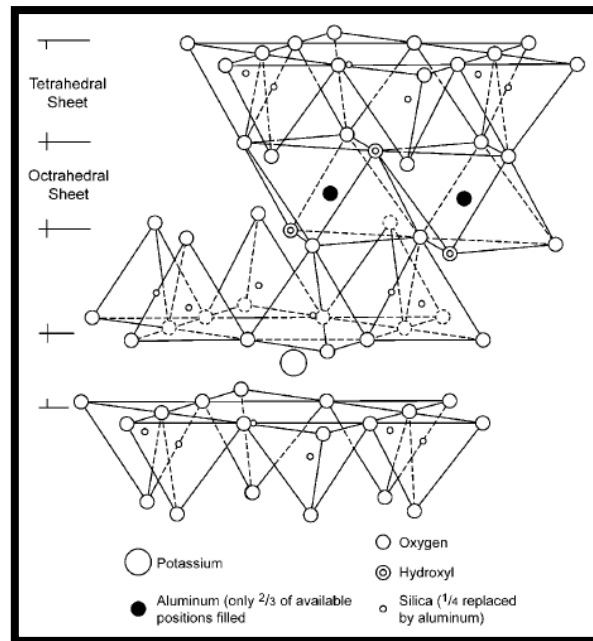


Figure I.7. Croquis schématique de la structure de l'illite.

I.4.1.4. Les interstratifiés

La chlorite comme exemple est un minéral de couche 2:1 avec une feuille de brucite intercouche $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (Fig. I.8). L'espacement basal du chlorite est d'environ $14\text{\AA}$. Le chlorite a été identifiée dans de nombreux grès sous forme de revêtements sur des grains de quartz qui apparaissent sous forme de rosettes. Le chlorite est généralement intimement mélangé à d'autres minéraux argileux, de sorte qu'elle peut être identifiée par l'espacement basal de $14\text{\AA}$ qui ne se dilate pas lorsqu'il est traité avec de l'éthylène glycol ni ne diminue à $10\text{\AA}$ lors du chauffage.

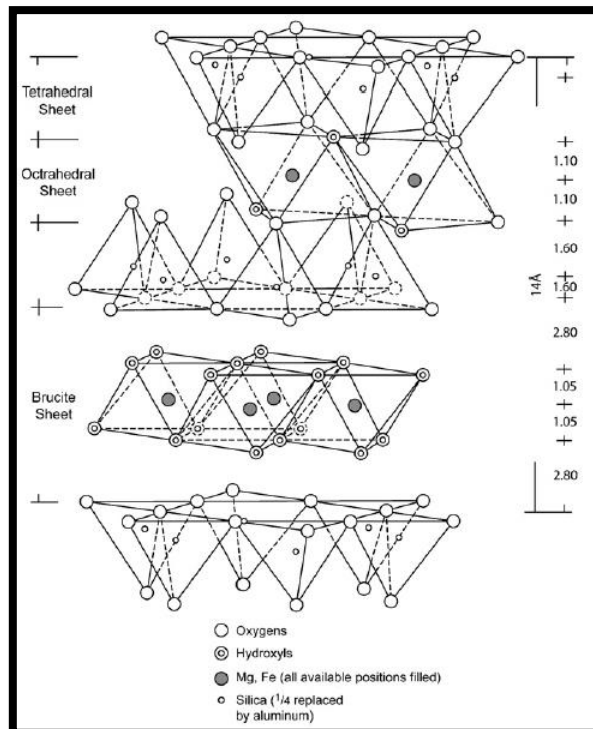


Figure I.8. Croquis schématique de la structure du chlorite.

I.5. Les différents types d'argiles

Il existe environ 30 types différents d'argiles « pures », mais la plupart de ces argiles « naturelles » sont des mélanges de différents types, ainsi que d'autres minéraux altérés [5].

I.5.1. La bentonite

La bentonite est un phyllosilicate d'aluminium absorbant, qui est essentiellement de l'argile impure composée principalement de montmorillonite.

Il existe différents types de bentonite, chacun nommé d'après l'élément dominant respectif, tel que le potassium (K), le sodium (Na), le calcium (Ca) et l'aluminium (Al). La bentonite se forme généralement à partir de l'altération des cendres volcaniques, le plus souvent en présence d'eau. Cependant, le terme bentonite, ainsi qu'une argile similaire appelée Tonstein, a été utilisé pour décrire des lits d'argile d'origine incertaine.

Il existe deux grandes classes de bentonite (Fig. I.9) : la bentonite de sodium et la bentonite de calcium. La bentonite de sodium se dilate lorsqu'elle est mouillée, absorbant jusqu'à plusieurs fois sa masse sèche dans l'eau. En raison de ses excellentes propriétés colloïdales, il est souvent utilisé dans les boues de forage pour les puits de pétrole et de gaz et pour les études géotechniques et environnementales. La bentonite calcique est un adsorbant utile des ions en solution, ainsi que des graisses et des huiles, et est l'un des principaux ingrédients actifs de la terre à foulon.



Figure I.9. La bentonite.

I.5.2. La Kaolinite

Le groupe du kaolin comprend les minéraux dioctaédriques comme la kaolinite, dickite, nacrite ainsi que les minéraux trioctaédriques antigorite, comme le chamosite, chrysotile et cronstedite,

La kaolinite est une argile plastique molle et blanche composée principalement de kaolin, un minéral qui est un silicate d'aluminium hydraté (Fig. I.10). Les différents minéraux sont polymorphes, c'est-à-dire qu'ils ont la même chimie mais des structures différentes. La structure générale du groupe de la kaolinite est composée de feuilles de silicate (Si_2O_5) liées à des couches d'oxyde d'aluminium ou d'hydroxyde ($\text{Al}_2(\text{OH})_4$) appelées couches de gibbsite, qui est un minéral silicaté stratifié avec une feuille tétraédrique reliée par des atomes d'oxygène à une feuille octaédrique d'alumine octaédrique.

La kaolinite et l'halloysite sont des structures monocouches. La kaolinite, la dickite et la nacrite se présentent sous forme de plaques ; L'halloysite, qui peut avoir une seule couche d'eau entre ses feuilles, se présente sous forme tubulaire. La kaolinite est une argile non gonflante.

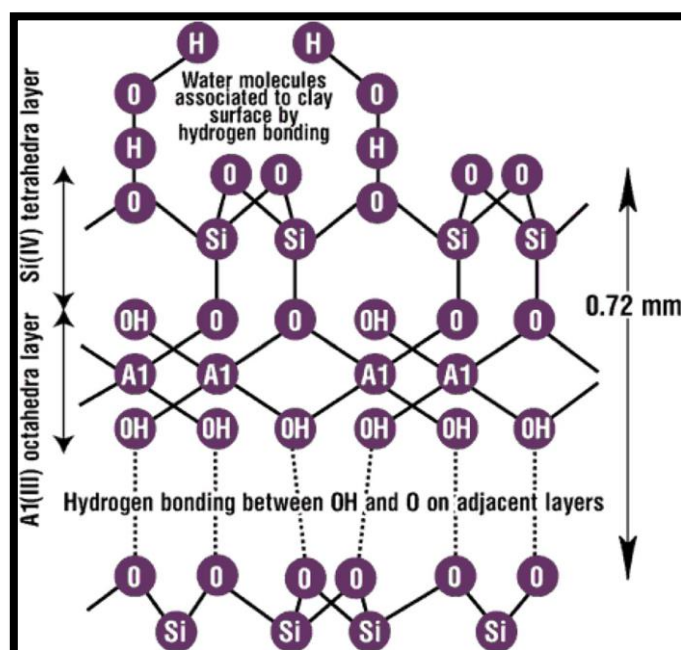


Figure I.10. Structure de la kaolinite.

I.5.3. La montmorillonite/smectites

La montmorillonite est un minéral phyllosilicate très mou qui se forme généralement en cristaux microscopiques. La montmorillonite, membre de la famille des smectite, a un réseau cristallin en expansion de 2:1 (Fig. I.11). Chimiquement, il s'agit d'hydroxyde de silicate de silicate de sodium de calcium, d'aluminium et de magnésium hydraté. L'unité structurale de base est une couche composée de deux feuilles tétraédriques pointant vers l'intérieur avec une feuille octaédrique centrale d'alumine. Les couches sont continuées dans les directions de la longueur et de la largeur, mais les liaisons entre ces couches sont faibles et ont un excellent clivage, permettant à l'eau et à d'autres molécules de pénétrer entre les couches, provoquant une expansion dans la direction de l'altitude. La teneur en eau de la montmorillonite est variable, elle augmente considérablement le volume de la montmorillonite lorsqu'il absorbe de l'eau. Cependant, certaines montmorillonites se dilatent beaucoup plus que d'autres argiles en raison de la pénétration de l'eau dans les espaces moléculaires intercouches et de l'adsorption concomitante. La montmorillonite de sodium est utilisée comme constituant majeur dans les agents non explosifs pour fendre la roche dans les carrières de pierre naturelle afin de limiter la quantité de déchets, ou pour la démolition de structures en béton où l'utilisation de charges explosives est inacceptable.

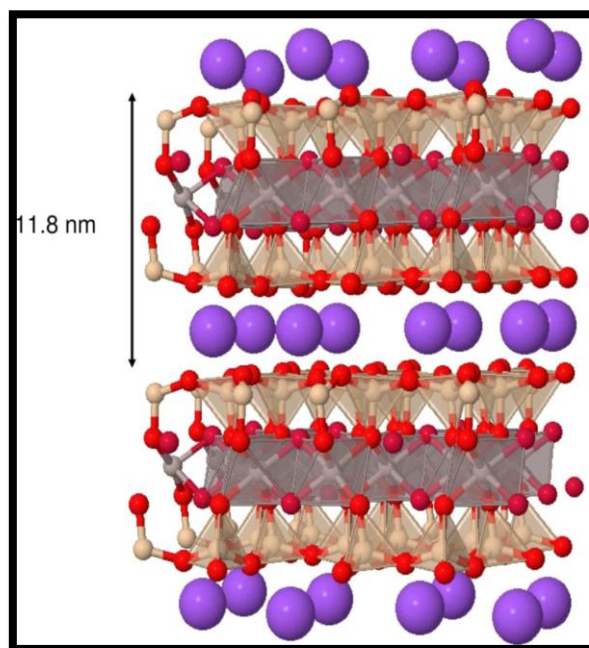


Figure I.11. Structure de la montmorillonite.

I.6. Caractérisation des argiles

Diverses substances organiques changent de couleur lors de l'interaction avec les argiles. Souvent, la couleur varie en fonction de l'identité des minéraux argileux. L'identification des composants minéraux argileux des matériaux argileux par des tests de coloration est rapide et simple, mais leur applicabilité est limitée en raison de l'interférence mutuelle des composants communs des matériaux argileux. L'adsorption au bleu de méthylène comme exemple, a été introduite par Gieseking & Janny en 1936.

Une autre réaction argileuse-organique largement appliquée est la réaction de minéraux argileux à trois couches avec de l'éthylène glycol ou du glycérol. La figure I.12 montre les relations entre les espacements basaux et la charge de la couche smectites, vermiculites et mica après saturation en éthylène glycol [6].

Avec les avancées technologiques d'autre méthodes en vue le jour. La caractérisation des minéraux argileux, est devenue grâce par exemple à la diffractométrie à rayons X ou les analyses thermogravimétriques.

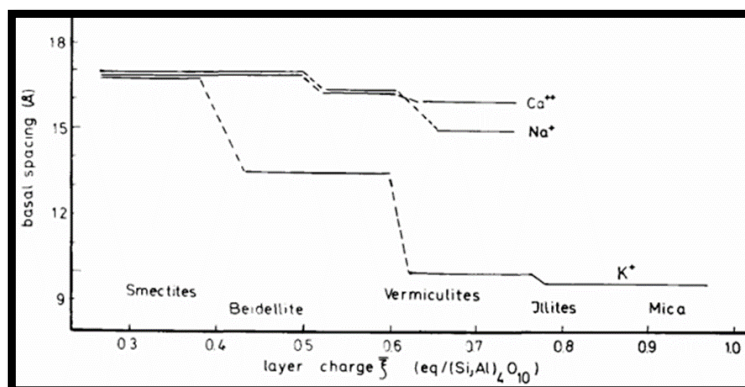


Figure I.12. Espacements basaux des minéraux argileux homoioniques sous éthylène glycol. [6]

I.6.1. La diffractométrie à rayons X

Découverts en 1895 par le physicien allemand Röntgen, les rayons X sont à la base de différentes techniques d'analyse comme la radiographie, la spectroscopie et la diffractométrie.

La production des rayons X se fait généralement par des électrons arrachés à un filament de tungstène chauffé électriquement est accélérés sous l'effet d'un champ électrique intense (tension de 50 kV) pour bombarder une anode (ou anticathode) faite de matériaux différents selon les applications visées. Les deux métaux couramment utilisés pour l'anode sont le cuivre, qui produit des rayons X de longueur d'onde $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$ et le molybdène, $\lambda = 0,709 \text{ \AA}$.

L'idée de ce test est basée sur la différence des cristaux constituant les minéraux argileux cristallographie. Un cristal peut être vu comme la répétition périodique tridimensionnelle d'éléments (atomes ou molécules), appelés nœuds, repérés par des disques noirs sur la figure I.13. Le schéma représente une coupe de plans réticulaires passant par les centres de ces éléments, espacés d'une distance d . L'angle θ (angle de Bragg) détermine l'incidence d'un faisceau parallèle de rayons X sur ces plans réticulaires. Notez que θ est le complémentaire de l'angle d'incidence usuel en optique. La différence de chemin optique entre les deux rayons lumineux particuliers représentés vaut $AC + CB = 2d \cdot \sin\theta$. Ils interfèrent de manière constructive lorsque la différence de marche est égale à un nombre entier p de longueur d'onde. C'est la loi de Bragg : $2d \cdot \sin\theta = p \cdot \lambda$

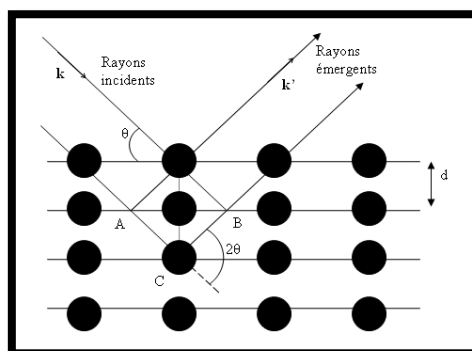


Figure I.13. Principe d'incidence et émergences des rayons X

Lorsqu'un détecteur ponctuel décrit un cercle de centre « C » à partir d'une position proche de la direction incidente définie par « k_0 », il enregistrera une raie de diffraction chaque fois qu'il sera au niveau d'une de ces surfaces coniques. Le spectre final de diffraction de la poudre peut toujours être présenté de la façon analogue à celui du silicium ci-après (Fig. I.14).

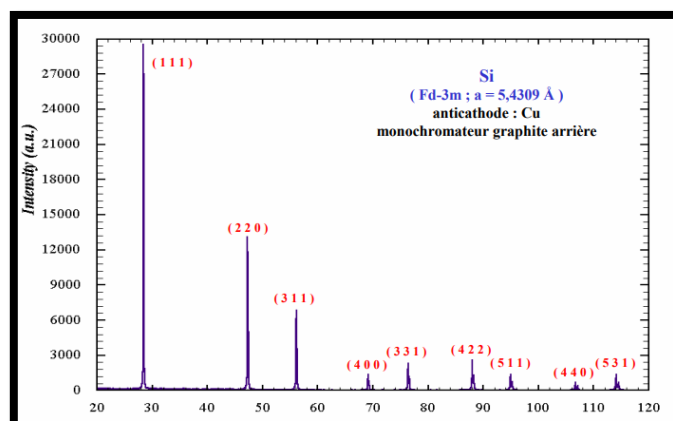


Figure I.14. Spectre de diffractométrie à rayons X du silicium

I.6.2. Infra rouge à transformée de Fourier

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier « IRTF », est utilisée dont le but de comprendre la structure de molécules individuelles et la composition des mélanges moléculaires. La lumière infrarouge est absorbée à des fréquences spécifiques directement liées aux énergies vibratoires de liaison d'atome à atome au sein de la molécule. Lorsque l'énergie vibratoire de liaison et l'énergie de la lumière infrarouge moyenne sont équivalentes, la liaison peut absorber cette énergie.

Différentes liaisons vibrent à différentes énergies dans une molécule et elles absorbent les longueurs d'onde du rayonnement IR. La position (fréquence) et l'intensité de ces bandes d'absorption individuelles contribuent au spectre global, en créant une empreinte caractéristique de la molécule.

Les atomes des composés chimiques bougent et vibrent constamment de différentes manières. Même dans une simple molécule comme l'eau, il y a six modes de vibrations différents (Fig. I.15): Elongations symétrique et antisymétrique, déformation avec le cisaillement, balancement, torsion et rotation plane. Chacune de ces vibrations se produit à une fréquence différente qui est spécifique à la liaison chimique et au composé.

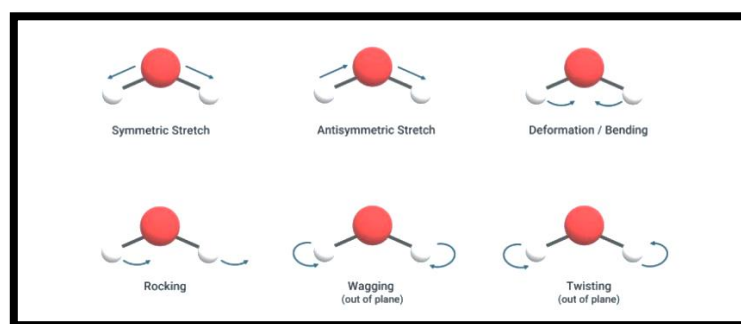


Figure. I.15. Les différents types de vibrations en spectroscopie infrarouge.

I.6.3. L'analyse thermique différentielle

L'analyse thermique différentielle est basée sur les réactions thermiques qui se produisent lorsqu'un minéral est chauffé. Les variations de températures sont reportées en fonction du temps et de la température. La courbe (Fig. I.16) enregistre l'absorption de chaleur (réactions endothermiques généralement), et aussi les recristallisations et les recombinaisons ou encore le dégagement de chaleur (réactions exothermiques).

Le dispositif d'appareillage peut être extrêmement varié, mais le principe est toujours identique ; il s'agit d'élever la température du produit à analyser et d'une substance témoin. Les analyses sont réalisées sous balayage d'un gaz inerte (l'argon) pour éviter toute réaction du matériau à étudier avec l'atmosphère du four.

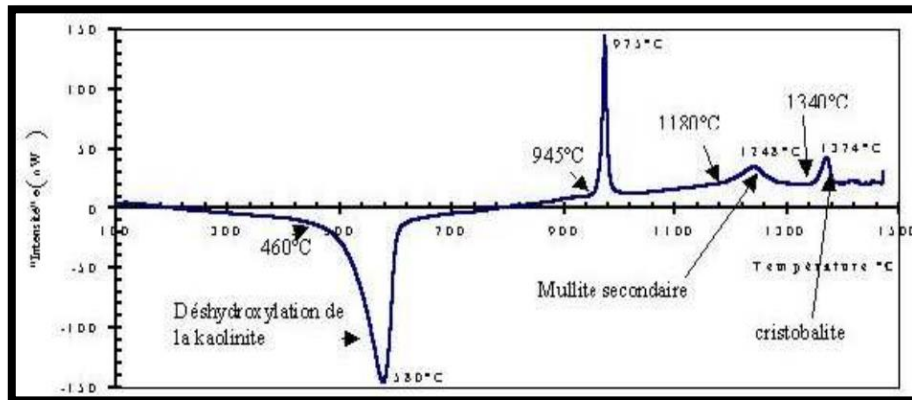


Figure I.16. Courbe d'une analyse thermique différentielle d'un kaolin pur.

I.6.4. Microscope électronique à balayage

La microscopie électronique à balayage « MEB » est une technique puissante d'observation des échantillons et en particulier de la topographie des surfaces. Elle est fondée principalement sur la détection des électrons secondaires émergents de la surface sous l'impact d'un très fin faisceau d'électrons primaires qui balaye la surface d'un échantillon et permet d'obtenir des images avec un pouvoir séparateur souvent inférieur à 5 nm, et une grande profondeur de champ.

Le MEB peut aussi utiliser, en complément de l'émission électronique secondaire, d'autres signaux émis par les interactions entre les électrons primaires et l'échantillon : les électrons rétrodiffusés, la diffraction des électrons rétrodiffusés, les électrons absorbés, les électrons transmis au travers d'une lame mince, ainsi que l'émission de photons X, parfois celle de photons proches du visible, etc. Ces interactions sont souvent significatives de la topographie ou de la composition de la surface, ou encore de l'orientation cristalline locale.

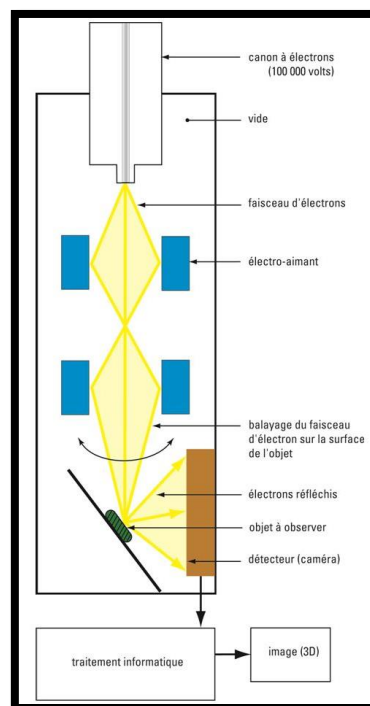


Figure I.17. Principe de fonctionnement d'un microscope électronique à balayage.

I.7. Les argiles en Algérie

Une argile de couleur gris-bleu dans la région de Jijel, a été étudiés par Abdelmalek et coll. [7]. Ils constatés une compositions minérales dominés par le quartz et la calcite associés à des quantités mineures à infimes de plagioclase, de feldspath potassique et de dolomite (Fig. I.18). La fraction argileuse est principalement composée de kaolinite (30–86 %), d'illite (11–59 %) et de chlorite (1–5 %) avec une quantité mineure de vermiculite et de smectite.

Au sud-ouest de l'Algérie, l'argile volcanique d'Aïn Ouarka a été utilisée pour extraire le vert de malachite par Lahcene et coll. [8]. L'analyse thermique différentielle de cette argile révèle l'existence d'un pic exothermique avec un maximum à 50 °C, correspondant à l'élimination de l'eau hygroscopique. Un pic endothermique relativement large dans la gamme de température (450–550 °C), avec un maximum vers 490 °C, accompagné d'une perte de masse d'environ 3,70 %. Ce pic correspond à la déshydroxylation du (OH) structural des couches octaédriques du phyllosilicate. Un autre pic endothermique est observé vers 790 °C, correspondant à une perte de masse de l'ordre de 11,15 %. Ce pic est attribuable à l'élimination de la calcite. Le phénomène endothermique important à 570 °C correspond à l'élimination de l'eau de constitution de l'argile naturelle (Fig. I.20).

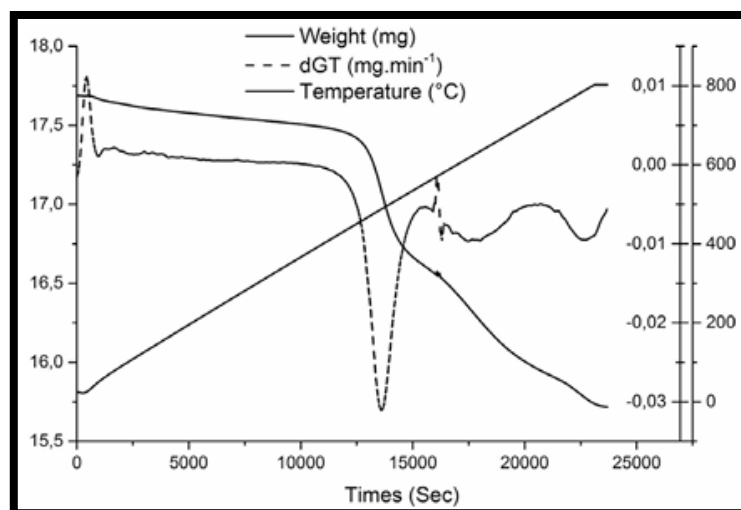


Figure I.20. Analyse TG-ATD d'une argile volcanique étudié par Lahcene et coll. [8]

Le diagramme de diffraction des rayons X (Fig. I.21) montre qu'il est constitué de trois phases minérales, dont deux correspondent à des minéraux argileux : la séricite (famille du mica) de type structural 2/1 (ou T-O-T) et le clinocllore appelé chlorite, minéraux de type 2/1/1 (ou T-O-T-O). La troisième phase détectée dans ce mélange minéral est le quartz, considéré comme une impureté non argileuse. Il s'agit de la phase la plus stable de l'oxyde de silicium (SiO_2), toujours associée aux argiles brutes.

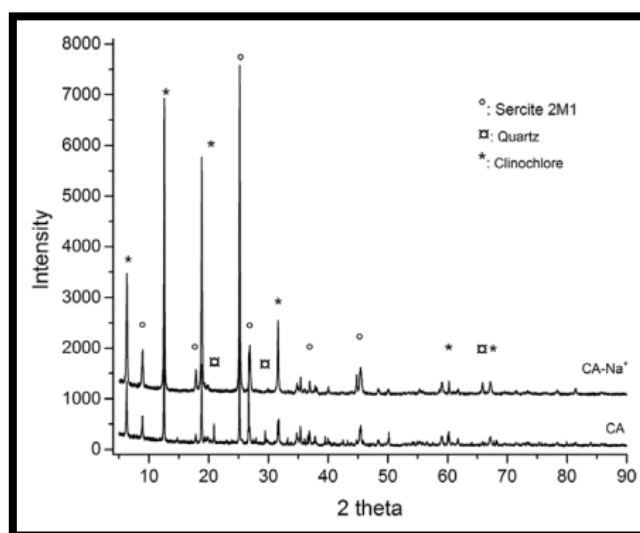


Figure I.21. Diagrammes de diffraction des rayons X de l'argile d'Aïn Ouarka étudiés par Lahcene et coll. [8]

Dans le bassin de Timgad, une formation argileuse composée de 43 à 56 % de kaolinite comme minéral argileux dominant, accompagnée de 15 à 22 % de chlorite, de 14 à 21 % d'illite, de 9 à 18 % de minéraux argileux en couches mixtes et de traces de smectite < 4 %, a été observée par Lamouri et coll. [9]. L'examen d'échantillons d'éclats de roche au MEB (Fig. I. 22) a confirmé l'abondance de la fraction argileuse composée principalement de cristaux de kaolinite. Leurs formes cristallines sont relativement proches de plaquettes hexagonales. Cependant, l'illite et le chlorite observées présentent respectivement des formes allongées à grains fins et des rosettes. Les photomicrographies ont également mis en évidence des cristaux de quartz et de calcite, tous deux présentés sous forme de petits grains.

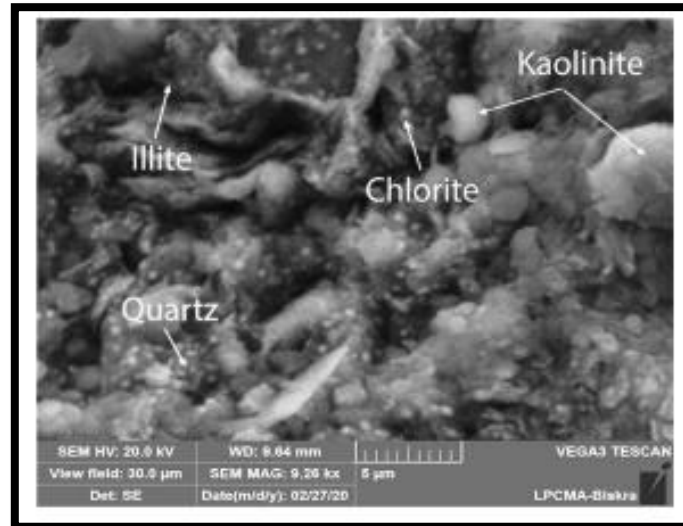


Figure I.22. Image MEB d'un éclat de roche étudié par Lamouri et coll.[9]



Chapitre II

Les produits en argiles rouges



CHAPITRE II

Les produits en argiles rouges

II.1. Introduction

L'argile se présente sous plusieurs formes, différenciées par leur couleur. Les principales argiles sont, l'argile verte, rouge, blanche et jaune. Les oligo-éléments contenus dedans changent leur aspect et leurs propriétés.

Les argiles vertes sont riches en magnésium, en silice, en aluminium et en chaux. Elles sont les plus actives de toutes les argiles et leur teneur en fer est faible. Les argiles blanches sont riches en silice. Elles ne contiennent aucune substance colorée car leur formation n'a pas été perturbée donc sa formation s'est déroulée de façon uniforme. Les argiles jaunes sont riches en oxyde de fer et en magnésium. Les argiles rouges sont riches en oxyde de fer et en oligoéléments comme la silice, le magnésium, le phosphore, le zinc ou le cuivre. Ce type d'argile est d'origine naturelle. L'argile de type illite est une argile très absorbante ou adsorbant.

L'argile rouge à un client exclusif, le secteur de bâtiment. Cette argile est l'ingrédient essentielle pour plusieurs produits. La brique, la tuile et les carreaux muraux sont les principaux produits fabriqués par cette argile.

II.2. La brique

Elle est l'un des matériaux de construction les plus anciens, et elle continue d'être l'un matériau de construction le plus populaire et le plus important en raison de son bon marché, de sa durabilité et de sa facilité de manipulation. Les briques sont utilisées pour la construction de murs extérieurs et intérieurs, de cloisons, de piliers, de semelles et d'autres structures.

La brique est de forme rectangulaire (Fig. II.1) et de taille qui peut être facilement manipulée d'une seule main. Elle est fabriquée d'argile cuite ou d'un mélange de sable et de chaux ou de béton de ciment Portland. Les briques sont couramment utilisées car elles sont économiques et facilement disponibles [10].

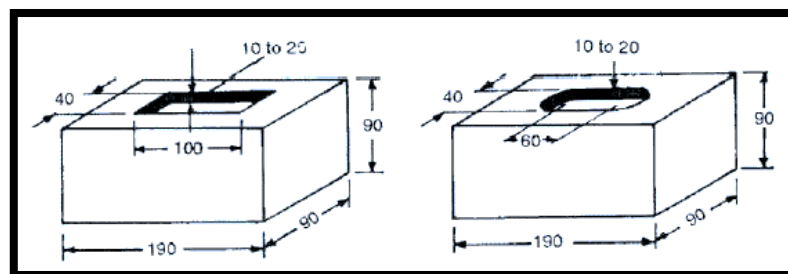


Figure II.1. Briques avec grenouille.

II.2.1. Historique

La brique servit aussi bien à l'élévation des murs mésopotamiens qu'aux décors des façades Louis XIII, en France. On prend pour sa fabrication de la terre argileuse pétrie, que l'on place ensuite dans un moule de forme parallélépipédique.

Employée dans les pays dépourvus de carrières de pierres, elle était autrefois utilisée crue (Babylone) ou après séchage au soleil (Egypte). Les Romains cuisirent l'argile pour construire des murs et élever pilastres et colonnes ; la brique était alors recouverte d'un enduit de stuc ou d'un revêtement de marbre. Elle fut employée au moyen âge pour les remplissages et les voûtes. A la renaissance, elle s'intégra au système décoratif de la construction.

II.2.2. Fabrication

Lors de la fabrication artisanale, le processus prend 20 jours depuis la livraison de la terre, jusqu'à la livraison des briques finies. La terre argileuse et sableuse sont mélangés grossièrement une première fois, humidifiés et mis en tas. Ensuite l'artisan, mélange le tas de terre en y rajoutant de l'eau et malaxe jusqu'à obtenir une boue homogène. Puis il rassemble la pâte en un tas pour être travailler. Il forme une boule de boue avec ses mains dont il remplit chaque gabarit du moule. Le moule est en métal et permet de faire les briques trois par trois comme exemple. Il dispose ensuite ses briques à plat sur un sol qu'il a préalablement recouvert d'une fine couche de poudre de brique afin qu'elles n'attachent pas (Fig. II.2). Elles doivent sécher chacune deux jours sur chaque face avant d'être stockées et empilées, en attendant qu'il y en ait suffisamment pour faire une cuisson. Pendant la saison des pluies, les briques sont recouvertes afin de les protéger des fortes pluies. Les briques sont ensuite enfournées et cuites pendant 3 nuits puis. Elles sont refroidies au four avant d'être stockées et livrées.



Figure II.2. Fabrication artisanale des briques.

Aujourd'hui, le processus de production est plus rapide [11] :

II.2.2.1. Extraction

La matière première naturelle de la brique de terre cuite est l'argile, mais il faut aussi considérer également les terres limoneuses et schisteuses, qui sont de même composition minéralogique que l'argile. Ces matières premières sont omniprésentes dans le sous-sol et ses propriétés sont différentes en fonction de l'origine géologique. Certaines briqueteries ajoutent des argiles en provenance d'autres argilières afin d'étoffer la gamme de produits. Il faut savoir que chaque produit de terre cuite nécessite une matière première appropriée.

II.2.2.2. Préparation de l'argile

La préparation comprend deux opérations principales : le broyage et le malaxage d'une part, le dosage et le mélange des matières premières d'autre part.

***Broyage et malaxage**

Ces opérations ont pour but de rendre la masse d'argile homogène et de lui conférer la plasticité nécessaire au moulage. Cette opération a également pour but aussi de réduire les inclusions solides éventuellement présentes dans l'argile.

Cette étape s'effectue dans des broyeurs mécaniques à meules verticales ou à cylindres horizontaux. Le broyeur à meules verticales est un appareil en forme de cuve dans lequel tournent deux meules qui pressent l'argile. Dans le broyeur horizontal, l'argile est laminée entre deux cylindres. Si l'on utilise du schiste - qui n'est rien d'autre qu'une argile pétrifiée - comme adjuvant, il faut le concasser et le moudre par étapes successives en une fine poudre qui sera gâchée à l'eau pour obtenir une pâte (argileuse) présentant la plasticité souhaitée. Enfin, l'argile est stockée quelque temps dans un lieu humide et sombre propice au développement des bactéries pour éliminer les débris organiques nuisibles à la qualité du produit fini.

***Dosage et mélange**

Pour obtenir une qualité optimale de la matière première, divers types d'argile sont mélangés. On peut ainsi garantir la qualité des produits en terre cuite. Les adjuvants peuvent influencer les propriétés des produits finis. Ainsi, l'ajout de pigments peut en modifier la couleur comme exemple. La préparation de la matière première s'accompagne également d'ajout d'eau ou de vapeur (Fig. II.3). L'ajout d'eau permet de garantir une mise en forme facile de l'argile, tandis que la vapeur augmente la plasticité de l'argile.



Figure II.3. Préparation des matières argileuses pour la Fabrication des briques.

II.2.2.3. Le façonnage

On distingue divers types de briques, en fonction de la manière dont elles sont mises en forme.

***Les briques pressées**

On introduit dans les moules de l'argile relativement sèche que l'on comprime vigoureusement pour lui donner la cohésion voulue. Ces produits présentent une surface grenue et une forme géométrique bien marquée.

****Les briques étirées***

Les briques pour maçonnerie ordinaire sont fabriquées par extrusion. Dans cette machine, la masse d'argile est extrudée, puis coupée à intervalles réguliers (Fig. II.4). Chaque élément forme une brique qui présente quatre faces lisses suite au coulisement dans la filière, et deux faces de sectionnement plus grossières. L'étireuse permet une production beaucoup plus rapide, et de plus, elle est parfaitement adaptée au façonnage de briques perforées. Ce mode de fabrication est également utilisé pour produire des briques de parement, mais dans ce cas, l'aspect des faces sera plus soigné.



Figure II.4. Façonnage des briques.

II.2.2.4. Le séchage

Avant d'être cuites, les briques crues doivent perdre une grande partie de leur teneur en eau. Dans cette étape, le risque serait de voir l'effondrement ou l'éclatement des briques sous la dilatation de la vapeur. Le séchage s'opère dans des chambres ou des tunnels où il se poursuit de manière régulière et rapide (Fig. II.5). On utilise l'air chaud de la zone de refroidissement du four pour le séchage des briques. La température et le taux d'humidité sont contrôlés tout au long du processus de séchage, au moyen d'un système informatique.

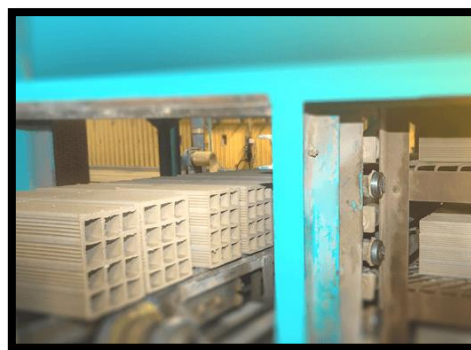


Figure II.5. Séchage des briques.

II.2.2.5. La cuisson

C'est la dernière étape avant de pouvoir devenir une brique de terre cuite. Cette phase se déroule très progressivement. La température est augmentée graduellement jusqu'à l'obtention de la température de cuisson (comprise entre 850 et 1200°C); on diminue ensuite progressivement la température jusqu'au refroidissement complet car, chaque mélange d'argile se caractérise par sa propre «courbe de cuisson». La cuisson en oxydation (avec apport d'oxygène) produit une teinte

rouge ferrugineuse. Dans une atmosphère réductrice (sans apport d'oxygène), on obtient des couleurs plus foncées. Une réduction partielle produit, quant à elle, des teintes fortement nuancées.

Aujourd'hui, on utilise un four continu de type four tunnel. Le chargement de briques par court un tunnel rectiligne sur des wagonnets et les zones de « préchauffage », de « cuisson » et de « refroidissement » se succèdent. Dans la zone de préchauffage, les briques sont portées progressivement à température. A partir d'une température comprise entre 450°C et 600°C, on ralentit la montée en température des briques. C'est autour de cette température que se produit le « point de quartz ». A cette étape de la cuisson, les briques sont très sensibles à la formation de fissures. La cuisson des briques à proprement parler se fait environ à mi-parcours du four, à une température allant de 1000°C à 1200°C (Fig II.6). Le frittage de l'argile se fait à cette température et se forme alors la structure définitive de la brique. Enfin, une troisième et dernière phase consiste à refroidir les briques. Cette opération doit s'effectuer de façon très contrôlée pour éviter tout risque de fissuration.



Figure II.6. Séchage des briques.

II.2.3. Caractéristiques des briques

L'absorption est l'une des propriétés importantes qui déterminent la durabilité des briques. Des briques très absorbantes peuvent provoquer des efflorescences et d'autres problèmes dans la maçonnerie. Selon la norme ASTM C67, l'absorption par immersion de 24 heures, l'absorption par ébullition de 5 heures et le coefficient de saturation doivent être définis.

Les briques en terre cuite sont très durables et résistantes au feu. Leurs propriétés isolantes rendent les maisons en briques plus fraîches en été et plus chaudes en hiver, comparativement aux maisons construites avec d'autres matériaux de construction.

La résistance à la compression des briques en terre cuite est une propriété mécanique importante qui détermine leur capacité de charge et leur durabilité. Elle dépend de la composition de l'argile, de la méthode de fabrication et du degré de cuisson. La résistance à la compression est déterminée en testant une demi-unité et est calculée en divisant la charge à la rupture par la section transversale (ASTM C67).

Les autres propriétés mécaniques des briques comprennent le module de rupture, la résistance à la traction et le module d'élasticité. La plupart des briques en terre cuite ont un module de rupture compris entre 3,5 et 26,2 MPa. La résistance à la traction se situe généralement entre 30 et 49 % du module de rupture. Le module d'élasticité est compris entre 10,3 et 34,5 GPa [12].

Les briques de construction en terre cuite sont classées selon des propriétés liées à la durabilité et à la résistance aux intempéries, telles que la résistance à la compression, l'absorption d'eau et le coefficient de saturation (ASTM C62). Le tableau II.1 présente les trois qualités disponibles et leurs exigences : SW, MW et NW, respectivement pour une résistance aux intempéries sévères, modérées et négligeables. Les briques de qualité SW sont destinées à être utilisées dans les zones soumises au gel, notamment au niveau du sol ou en dessous. Les briques de qualité NW sont recommandées pour les zones à l'abri du gel et les endroits secs, même en cas de températures négatives. Elles peuvent être utilisées en construction intérieure, même en l'absence de gel. Il est à noter que des résistances plus élevées, une absorption d'eau plus faible et des coefficients de saturation plus faibles sont nécessaires lorsque les conditions climatiques s'intensifient, afin de réduire les effets du gel, du dégel, de l'humidité et du séchage.

Tableau II.1. Exigences physiques pour les briques de construction (ASTM C62).

Grade	Min. Compressive Strength, Gross Area, MPa		Max. Water Absorption by 5-hr Boiling, %		Max. Saturation Coefficient	
	Average of Five Bricks	Individual	Average of Five Bricks	Individual	Average of Five Bricks	Individual
SW ¹	20.7	17.2	17.0	20.0	0.78	0.80
MW ²	17.2	15.2	22.0	25.0	0.88	0.90
NW ³	10.3	8.6	No limit	No limit	No limit	No limit

II.3. La tuile

Les tuiles sont de fines plaques d'argile à bas point de fusion utilisées à diverses fins dans les constructions. Elles ont un aspect très agréable et de bonnes propriétés de service. Les tuiles de toiture, les tuiles de sol, les tuiles murales et les tuiles de cloisonnement en sont quelques exemples.

En raison de leur masse considérable, de la main-d'œuvre nécessaire à leur fabrication, des problèmes de montage et de drainage et des coûts de transport, les tuiles de toiture ont perdu leur importance et sont recommandées localement. Les tuiles de sol sont largement utilisées dans les maisons et les bâtiments industriels (Fig.II.7). Elles sont durables et imperméables à l'eau, résistent bien à l'abrasion et se lavent facilement.

Les argiles à cuisson blanche et rouge, les argiles réfractaires et les schistes sont utilisés dans la fabrication des tuiles pour les surfaces de sol. Les tuiles pour les surfaces murales diffèrent des tuiles de sol principalement par leur conception et leur degré de cuisson. Les tuiles murales sont cuites à une température relativement basse, émaillées et cuites à nouveau dans un four à moufle à une température encore plus basse.

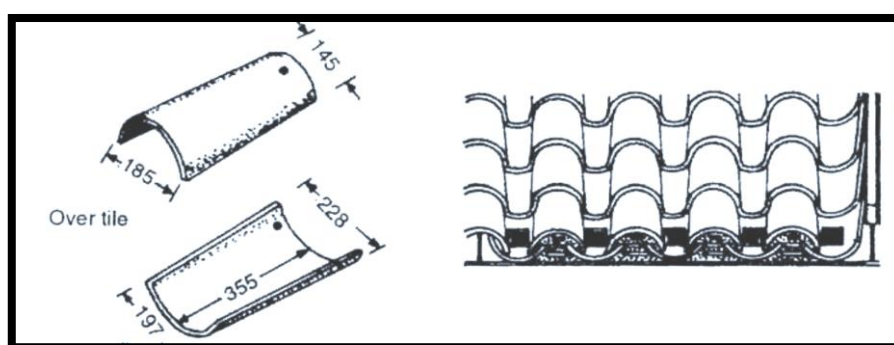


Figure II.7. La tuile italienne.

II.3.1. La fabrication

La fabrication des tuiles comprend plusieurs stades (Fig.II.8) [13]. Les gisements utilisés pour la fabrication se trouvent pratiquement à tous les étages géologiques. Les carrières sont à ciel ouvert, la plupart des tuileries travaillent à proximité des gisements.

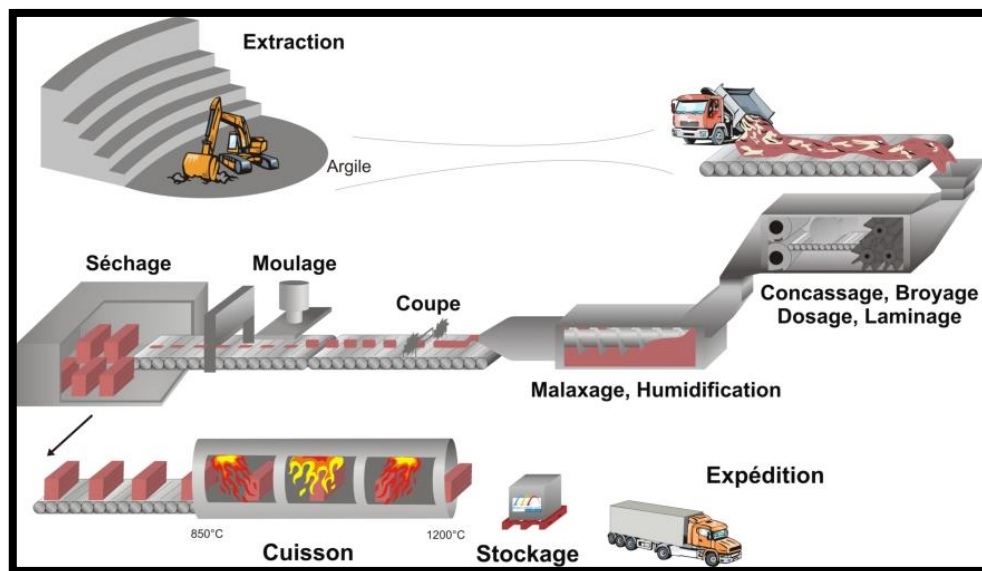


Figure II.8. Etapes de fabrication des tuiles.

II.3.1.1. L'extraction

Elle peut se faire de différentes façons, à la pelle mécanique, à l'excavateur, etc. Elle est réalisée couche par couche selon des règles légales, soucieux de préserver l'environnement. En fin de vie, les terrains sont réaménagés.

Après extraction, la terre est acheminée vers un lieu de stockage afin de la faire sécher. Cette phase permet aux fabricants de pratiquer une première homogénéisation. Cette dernière sera achevée et complétée lors de l'étape de la préparation. Pour améliorer le comportement à la fabrication d'autres éléments peuvent être ajoutés à la matière par exemple, du sable ou d'autres adjuvants.

II.3.1.2. La préparation de la pâte

La préparation de la pâte a pour but d'éliminer les impuretés, d'émietter les argiles, de former des mélanges et d'homogénéiser et d'humidifier l'ensemble. Au cours de la préparation, la pâte est rendue plastique par ajout d'eau. La plasticité d'une argile varie selon sa nature minéralogique, sa finesse et sa composition en éléments inertes (sable par exemple). L'argile ayant déjà subi une première préparation est stocké pendant plusieurs semaines dans des fosses. La préparation de la pâte est une étape primordiale qui conditionne différents aspects finaux du produit.

II.3.1.3. Le façonnage

Le façonnage (Fig.II.9) répond à deux objectifs, le premier c'est de donner à la pâte une cohésion suffisante, le second c'est d'attribuer la forme souhaitée. En terre cuite, deux procédés de façonnage cohabitent : "l'étirage" (les appareils se nomment étireuses, mouleuse ou extrudeuses

dont le débit varie de 3 à 40 t/h environ) et "le pressage" en pâte molle ou pâte dure à l'aide de moules en plâtre, en bois, en acier ou en caoutchouc. Les tuiles canal et les tuiles plates sont souvent façonnées par étirage. Il est intéressant de noter que les tuiles plates peuvent être aussi pressées.

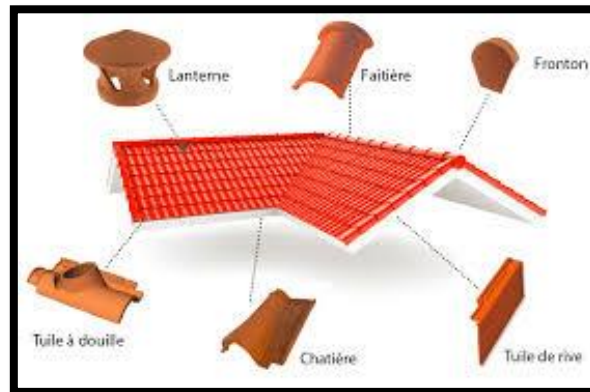


Figure II.9. Les différents types de tuiles.

II.3.1.4. Le séchage

Ayant acquis la forme définitive, il faut éliminer la presque totalité de l'eau qui a permis le façonnage, pour que celle-ci ne perturbe pas la cuisson. C'est l'opération de séchage, une opération de dessiccation extrêmement délicate. Elle demande un savoir-faire particulier car on doit veiller à la bonne humidification et ventilation des produits. Le séchage peut s'effectuer de manière naturelle à l'air libre ou être accéléré par un dispositif industriel : les séchoirs, qui accueilleront les wagons ou les nacelles chargés avec les produits crus. Il existe plusieurs types de séchoirs industriels où la circulation de l'air chaud et des produits est optimisée en fonction de la matière première, de la forme du produit et du type de chargement.

II.3.1.5. La cuisson

Une fois l'eau éliminée, les produits secs sont cuits. L'action de la chaleur provoque des modifications de masse volumique, de dureté, etc. A partir de ce moment, le phénomène de transformation de l'argile. Cette dernière étape définit les propriétés intrinsèques du produit : résistance mécanique, porosité, absorption d'eau, résistance au gel, couleurs et textures, et stabilité définitivement de sa forme.

La cuisson se fait en trois phases ; Le préchauffage (montée progressive en température), la cuisson proprement dite (entre 900°C et 1200°C selon les matières premières et les produits) et enfin le refroidissement.

La durée du cycle de cuisson est de 12 h à 48 h, elle varie selon les argiles utilisées et la température de cuisson. Les fours les plus utilisés sont les fours tunnels, qui permettent une production en continu. Les artisans utilisent des fours intermittents destinés à des petites séries, où le cycle de cuisson peut être adapté aux types de produits. Certains sont dotés de fours continus à feu mobile. Les énergies utilisées sont le charbon et le bois, ou encore l'électricité, voire des combinaisons. La chaleur dégagée par le four est réinjectée le plus souvent dans le séchoir pour optimiser les flux d'énergie. En sortant du four, comme après chaque étape du procédé de fabrication (préparation du mélange, façonnage, séchage), les produits sont contrôlés. Les produits refusés sont recyclés soit directement dans le mélange de fabrication si l'imperfection est détectée avant cuisson, soit concassé pour être réintroduit comme additif dans le mélange ou servir de remblai.

II.3.2. La production mondiale des tuiles

Le marché des tuiles de toiture est estimé à 12,31 milliards de dollars en 2024 et devrait atteindre 16,20 milliards de dollars d'ici 2029, avec une croissance de 5,65 % au cours de la période de prévision.

La croissance du marché a été entravée par la pandémie du COVID-19. En raison des confinements dans plusieurs pays, la plupart des industries ont été temporairement fermées, ce qui a eu un impact sur les secteurs du bâtiment et de la construction. Mais le secteur de la construction a connu une croissance en 2021, ce qui a permis au marché de se remettre sur pied. Le marché des tuiles est susceptible de croître car le secteur de la construction dans la région Asie-Pacifique construit davantage de logements et le gouvernement facilite la construction de bâtiments écologiques. Néanmoins, la croissance des prix des matières premières, les prix élevés des tuiles et les coûts élevés de leur installation sont susceptibles de ralentir la croissance du marché des tuiles. Le marché aura probablement des opportunités en raison du développement des tuiles solaires. La région Asie-Pacifique était le plus grand marché mondial pour les tuiles, grâce à une forte croissance de la construction dans des pays comme l'Inde, la Chine, les Philippines et l'Indonésie.

En plus d'être économiques à utiliser, les tuiles possèdent des propriétés telles que la durabilité, la légèreté et l'esthétique. Le marché des tuiles est segmenté par secteur type, secteur d'utilisation finale et secteur géographique. Par type, le marché est segmenté en tuiles en terre cuite, tuiles en béton et autres types. Par secteur d'utilisation finale, le marché est segmenté en résidentiel et non résidentiel. Le segment non résidentiel est sous-segmenté en commercial, infrastructure et industriel.

II.4. Les carreaux en céramique

Les carreaux céramiques (Fig.II.10) sont des dalles minces faites d'argiles et/ou d'autres matières inorganiques et généralement utilisées pour recouvrir des sols et des murs. Les carreaux céramiques sont usuellement façonnés par extrusion ou par pressage à sec à température ambiante, puis séchés et enfin cuits à des températures suffisantes pour développer les propriétés requises.

Selon la norme EN 14411, les carreaux céramiques sont divisés en neuf groupes, selon leur méthode de fabrication (méthode de façonnage) et leur absorption d'eau. L'absorption d'eau est liée à la porosité de la matière : une absorption d'eau élevée signifie une porosité élevée, tandis qu'une faible absorption d'eau est associée à une structure compacte et vitrifiée[14].



Figure II.10. Les carreaux en céramique.

II.4.1. Fabrication

Pour fabriquer des carreaux, on utilise des argiles hautement raffinées. On utilise, en outre, diverses substances pour l'émail.

Le procédé de fabrication des carreaux pour sols et murs consiste en une série d'étapes successives. Elle se résume en :

- *Stockage des matières premières.
- *Préparation de la pâte.
- *Façonnage.
- *Séchage de la pâte crue.
- *Préparation de l'émail et émaillage.
- *Cuisson.
- *Polissage.
- *Triage et conditionnement.

II.4.1.1. Préparation des matières premières

Les argiles sont les matières premières types utilisées dans la fabrication des carreaux pour sols et murs. La chamotte, le quartz, les feldspaths, le carbonate de calcium (calcite), la dolomite et le talc sont des matières premières non plastiques, qui jouent différents rôles dans la composition de la pâte. En associe également des oxydes métalliques et des colorants. On ajoute des électrolytes tels que le silicate ou le diphosphate de sodium pour réduire la consommation d'énergie lors du séchage par réduction d'eau.

Les composants de la pâte sont acheminés vers la zone de stockage des matières premières (Fig.II.11). Ces matières sont stockées à l'air libre, dans des entrepôts de stockage, des silos, etc. Les masses plus petites sont acheminées et stockées dans des sacs et des conteneurs, et les matières liquides dans des cuves fermées.



Figure II.11. Préparation de la matière première pour la fabrication des carreaux céramiques.

Après un broyage fin, la suspension est progressivement tamisée et stockée dans des cuves de stockage agitées. Elle est ensuite transformée soit en une pâte plastique, soit en une poudre de pressage.

Les pâte plastique ou pâtes d'extrusion sont préparées généralement dans des broyeurs à meules ou des unités de feuillette. Pour fabriquer une « pâte d'extrusion », on débarrasse la suspension de son eau dans des filtres-presses ou des filtres rotatifs, pour obtenir une teneur en eau

comprise entre 20 et 25 %. On ajoute des substances organiques ou inorganiques au mélange plastique pour en maximiser la plasticité.

Les carrelages sont le plus souvent fabriqués avec de la « poudre de pressage ». Cette poudre de pressage se fabrique par voie sèche ou par voie humide. Dans le procédé par voie humide, la suspension est aspirée par des pompes dans des cuves de stockage agitées et envoyée dans des séchoirs flash. Le séchage s'effectue à des températures comprises entre 350 et 450 °C, jusqu'à ce que la teneur en eau soit entre 5 et 9%. On ajoute des agents rhéologiques pour maximiser la caractéristique glissante de la poudre. L'utilisation d'agents liants comme la cellulose de carboxyméthyle, la méthylcellulose, l'alcool de polyvinyle etc. pour préparer la composition de la pâte est généralement inutile en raison de leur haute teneur en argiles, sauf dans des cas particuliers (notamment pour les grands formats. Le procédé par voie sèche comprend le broyage à sec dans des broyeurs à cône, à marteaux et à cylindres, suivi d'un mouillage adapté de la poudre broyée, pour obtenir une teneur moyenne en eau d'environ 5 à 7 %.

II.4.1.2. Façonnage

Les carreaux en grès et en faïence sont principalement fabriqués avec de la poudre de pressage. Cette poudre est façonnée en corps pressés dans des presses à impact à genouillère, des presses à vis ou des presses hydrauliques avec une pression d'environ 35 MPa. On emploie généralement des presses à plusieurs outils, qui sont capables de former quatre carreaux par cycle. Les produits crus pressés sont polis et placés dans le wagonnet de four tunnel ou le séchoir à rouleaux, automatiquement ou manuellement.

II.4.1.3. Séchage

Les corps pressés sont séchés principalement dans des séchoirs tunnels, des séchoirs à rouleaux ou des séchoirs verticaux. Pour chauffer le séchoir, on utilise la chaleur résiduelle du four ou des brûleurs à gaz naturel et à fioul. Le séchage s'effectue à des températures qui varient en fonction du type de technologie, par exemple entre 200 et 220 °C dans un four vertical et de 300 à 350 °C dans un four tunnel. Le séchage dure entre une et quatre heures, en fonction de la teneur en eau des produits crus. Pour éviter des fissures et des défauts d'émail à la cuisson, il faut que la teneur en eau résiduelle soit inférieure à un pour cent.

II.4.1.4. Cuisson et émaillage

Les carreaux sont fabriqués en tant que produits émaillés ou non émaillés à mono-cuisson ou en tant que produits émaillés à cuisson double, voire triple. Dans le procédé de bi-cuisson, les carreaux passent d'abord par une cuisson de biscuit qui s'effectue à des températures comprises entre 1050 et 1150 °C, dans des fours tunnels classiques ou dans des fours à rouleaux modernes, en une ou deux heures. A l'issue de cette étape, les carreaux sont triés automatiquement et transportés jusqu'à l'émaillage.

L'émail est appliqué sur les carreaux par pulvérisation ou arrosage (Fig.II.12) . Les machines à émailler sont équipées d'applicateurs pour marbrer les carreaux. Les matières premières des émaux sont souvent étirées sous forme de frites. Tous les composants d'une fritte sont déjà dosés, cuits et broyés. Les substances telles que le plomb étant liées sous forme moléculaire dans les frites, l'eau ne peut les éliminer au cours de cette étape.

La cuisson finale se déroule dans des fours à rouleaux, tunnels ou intermittents. Les carreaux émaillés sont cuits à des températures comprises entre 1050 et 1300 °C dans des fours

tunnels ou des fours à rouleaux, sans auxiliaires de cuisson. Les carreaux de forme spéciale cuisent dans des fours intermittents ou des fours tunnels à des températures pouvant aller jusqu'à 1100 °C.



Figure II.12. Machines d'application de l'émail.

II.4.1.5. Traitements ultérieurs

A l'issue de la cuisson finale, certains types de carreaux (principalement les carreaux en grès de porcelaine non émaillés) peuvent être meulés ou polis (Fig.II.13). Enfin, les carreaux sont triés, emballés et palettisés manuellement ou automatiquement. Les palettes sont revêtues d'une feuille dans une machine d'emballage serré.



Figure II.13. Ligne de production de carreaux céramiques.

II.4.2. Classement des carreaux céramiques

Le classement UPEC [15] des revêtements de sol est un classement fonctionnel d'usage de l'ensemble des revêtements de sol utilisés dans les ouvrages du bâtiment. L'UPEC, classement d'usage des revêtements de sol, est un classement fonctionnel. Il a été créé en 1959 pour les revêtements de sol plastiques et étendu par la suite aux revêtements de sol textiles, puis aux carreaux céramiques en 1983.

Les quatre lettres U, P, E et C désignent respectivement :

U : Usure due à la marche

P : Poinçonnement dû au mobilier et autres engins (objets) fixes ou mobiles

E : comportement à l'Eau,

C : comportement aux agents Chimiques courants

II.4.2.1. Signification de « U »

La lettre « U » recouvre tous les effets de la marche, qu'il s'agisse de trafic unidirectionnel ou de rotation, de piétinement debout ou assis, etc. L'usure à la marche peut s'analyser en trois effets essentiels :

- le changement d'aspect, par dépolissage (perte de brillant), encrassement, etc. ;
- l'usure proprement dite ou abrasion, avec enlèvement de matière ;
- les processus particuliers autres que les précédents.

La lettre « U » peut être affectée des 5 indices : 2, 2s, 3, 3s et 4. L'indice 1 n'est pas utilisé, car il correspondrait à un usage très modéré qui ne peut pas être pris en compte dans la pratique courante du bâtiment.

II.4.2.2. Signification de « P »

La lettre « P » (poinçonnement) prend en compte les effets mécaniques résultant de :

- la présence et de l'utilisation de mobilier ou autres objets fixes (empreintes) ou mobiles (roulés, ripés, etc.) ;
- ceux nés de la manipulation (de la chute) d'objets plus ou moins lourds.

La lettre « P » est affectée en pratique des 5 indices : 2, 3, 4, 4+ et 4s. Comme pour la lettre U, l'indice 1 n'est pas utilisé.

II.4.2.3. Signification de « E »

La lettre « E » recouvre les conséquences de la présence d'eau sur le revêtement. À la lettre E est toujours associé l'indice 3, les carreaux céramiques étant considérés comme ne présentant pas de limitation d'emploi due à l'action de l'eau.

II.4.2.4. Signification de « C »

La lettre « C » prend en compte les conséquences de l'action chimique ou physico-chimique de substances pouvant être utilisées dans certains locaux. Ces conséquences peuvent, en effet, avoir une incidence sur la durabilité du revêtement à l'usage (taches, attaques plus ou moins profondes, etc.).

La lettre « C » est affectée des indices : 0, 1, 2 et 3. Toutefois, l'indice 3 affecté à certains locaux particuliers (laboratoires, ateliers, etc.) n'est attribué à un revêtement qu'après vérifications spécifiques, en relation avec la destination précise du local (exemples : laboratoire d'analyses médicales, salon de coiffure, salle d'opération, etc.).

II.5. Le marché des céramiques

Dans l'union européen en 2013 le marché des céramiques représenté 30 milliards d'euros/an. Les matériaux les plus importants (Fig. II.14) étaient les carreaux de revêtement, les tuiles et les briques à hauteur de 24 %. Plus de 20% a été exportée vers les états unies d'Amérique, la Russie et la Suisse.

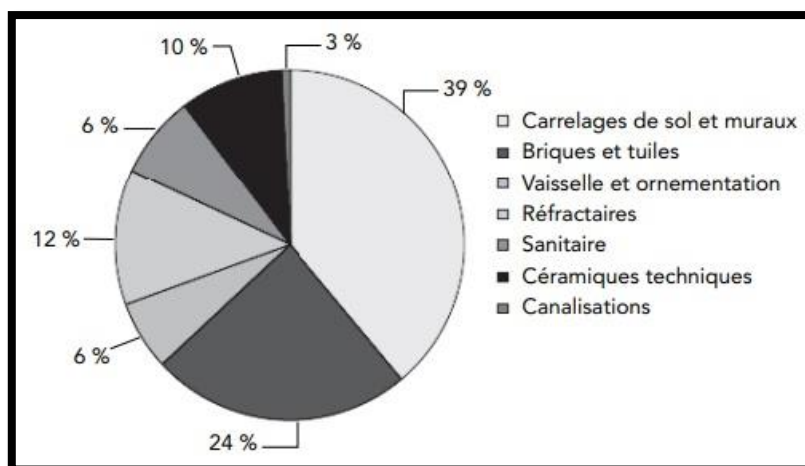


Figure II.14. Chiffre d'affaires des céramiques en Europe.

Selon le président de l'Association des céramistes algériens (ACA) [16], l'Algérie peut exporter plus de 300 millions m² de céramique car, les usines implantées en territoire national, ont un accès aisé à la matière première qui est disponible en grandes quantités. Ceci permet de conquérir le marché étranger, en particulier le marché africain.

II.6. Le marché des déchets

Selon Juan et coll. [17] les déchets générés par l'activité de construction sont environ 200 millions de tonnes de gravats produits chaque année dans l'Union européenne (UE). EN Espagne, 40 millions de tonnes sont déclarés, soit 2 kg par habitant et par jour. L'ensemble des pays européens recycle 28 %, où les Pays-Bas figurent parmi les pays européens pionniers avec 95 % des déchets de construction recyclés, suivis par l'Angleterre, avec 45 % et la Belgique, avec 87 %, dont 17 % sont utilisés dans la fabrication du béton.

Les déchets de construction et de démolition sont la fraction pierreuse et le reste (tableau II.2). La fraction la plus importante est la fraction pierreuse. Elle est composée de matériaux céramiques (briques, faïences, sanitaires, etc.), de béton, de sable, de gravier et d'autres granulats.

Tableau II.2. Composition des déchets de construction et de démolition selon Juan et coll.

MATERIALS	COMPOSITION (%)
STONY FRACTION	75
Bricks, wall tiles and other ceramic materials	54
Concrete	12
Stone	5
Sand, gravel and other aggregates	4
REST	25
Wood	4
Glass	0,5
Plastic	1,5
Metals	2,5
Asphalt	5
Plaster	0,2
Rubbish	7
Paper	0,3
Others	4



Chapitre III

Valorisation des déchets dans le béton



CHAPITRE III

Valorisation des déchets dans les bétons

Les granulats pour la confection du béton, sont extraits des carrières et transportés vers les chantiers. Cette exploitation engendre des impacts environnementaux, car elle anéantit des ressources non-renouvelables et conduit à des émissions de dioxyde de carbone.

D'un autre côté, les déchets de tous genre peuvent être très encombrants à longue durée. Ils sont de toutes catégories, parmi elles, les briques, les tuiles, etc. Elles sont fragiles et se brise facilement produisant ainsi des quantités énormes de déchets.

La solution à ces deux problèmes, est la transformation des déchets fabriqués par des argiles rouges en granulats de toutes tailles afin de les utiliser dans le squelette granulaire du béton.

Dans ce qui suit en mettras la lumière sur quelques études menaient jusqu'ici sur l'effet de l'incorporation des produits en argile rouge sur les propriétés des bétons.

III.1. Les déchets de briques

Cachim [18] a remplacé des granulats naturels avec des granulats issues de deux types de déchets de brique (A et B) à un taux de remplacement de 50 % (NA ou NB) et 100 % (AA ou BB), ainsi que des rapports eau/ciment de 0,45 et 0,5. Il a remarqué que la résistance à la compression du béton avec la brique A, donnée des valeurs plus faibles que la brique B (Tableau III.1). Pour la substitution de 50 % de granulats naturels par des briques, aucune réduction de résistance n'est observée. Pour la série NB45, une augmentation de 10 % de la résistance à 90 jours est observée. Compte tenu du fait que la résistance à la compression de la brique B est plus élevée, qu'elle a une meilleure résistance à l'écrasement et que son indice de forme est plus proche de celui des granulats naturels, ces résultats sont prévisibles.

Tableau III.1. Résistance à la compression des béton élaborés par Cachim

Age =>	f _c (MPa)			
	7	14	28	90
NN50	20.8	26.6	30.5	33.5
AA50	16.8	22.5	24.5	28.3
NA50	22.6	26.4	29.4	34.0
BB50	21.6	24.8	29.0	31.6
NB50	24.3	26.7	32.3	34.1
NN45	29.0	32.2	36.2	40.1
AA45	20.0	26.1	27.6	32.3
NA45	26.9	29.0	32.1	40.0
BB45	25.4	29.0	32.3	36.0
NB45	26.1	31.5	38.5	44.8

Les résultats de la résistance à la traction du béton sont présentés en corrélation avec ceux de la résistance à la compression sont présentées sur la Figure III.1, en même temps que la courbe de l'Eurocode 2 (EC2). Tous les résultats concordent relativement bien avec la courbe proposée, bien que les bétons avec un rapport E/C = 0,45 soient plus proches de la courbe.

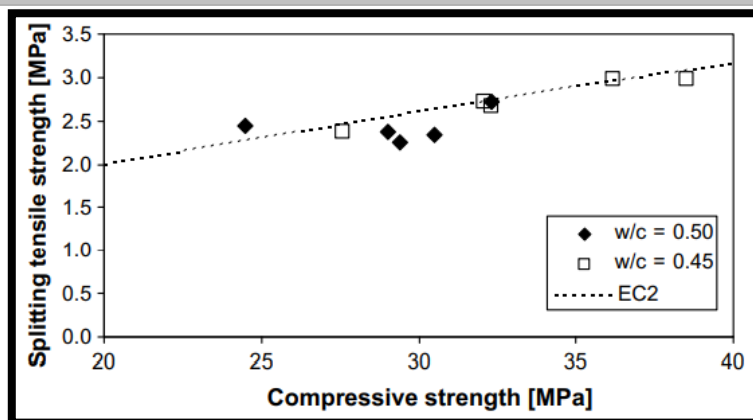


Figure III.1. Relation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction des bétons élaborés par Cachim.

Debieb et Kenai [19] ont remplacé les granulats naturels (gros et fins, ou les deux) par des briques concassées à des taux variant de 0, 25, 50, 75 ou 100 %. Il constatés que la résistance à la compression des différents mélanges était plus faible pour le béton de briques concassées comme le montre la Figure III.2. Plus le taux de substitution est élevé, plus la résistance à la compression est faible. A 28 jours, la diminution de la résistance à la compression était de l'ordre de 10 à 35 % pour le béton de gros granulats recyclés Cette diminution de résistance est due à la forte absorption d'eau des granulats fins recyclés. Par conséquent, la substitution des granulats grossiers par des granulats de briques recyclées doit être effectuée avec prudence car elle peut affecter négativement la résistance à la compression.

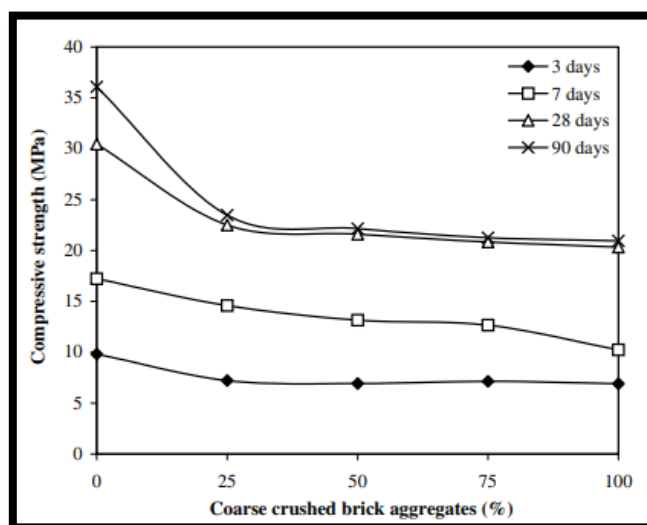


Figure III.2. Résistance à la compression des bétons élaborés par Debieb et Kenai.

Le test d'absorption d'eau qui permet de suivre l'évolution du diamètre moyen des plus gros capillaires en surface a été conduit dans la même étude. L'absorption d'eau du béton à base de granulats de briques concassées était significativement supérieure à celle du béton à base de granulats naturels. Une absorption d'eau minimale pour le béton à base de granulats recyclés a été observée à respectivement 75 % et 25 % de remplacement lors de l'utilisation de briques concassées grossières (Fig. III.3).

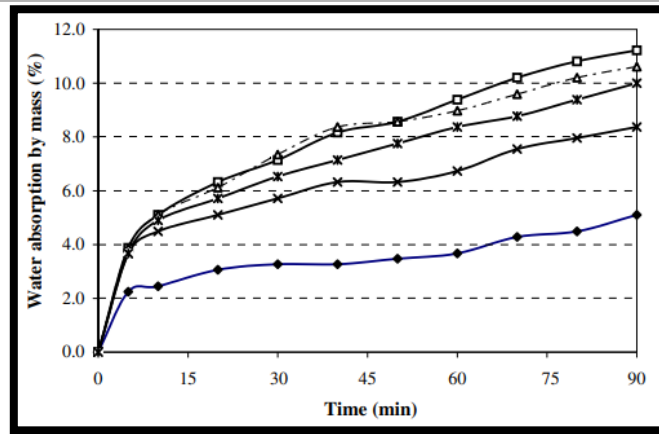


Figure III.3. Absorption d'eau par capillarité des bétons élaborés par Debieb et Kenai.

Abdur Rashid et coll. [20] ont remplacés (25, 50, 75 et 100 %) de granulats de pierre par des granulats de brique saturés en surface et secs avant d'être mélangés aux autres ingrédients. Ils remarqués que les masses volumiques du béton de granulats de pierre (M0) et du béton de granulats de brique (M100) sont respectivement de 2 449 kg/m³ et 2 096 kg/m³ (Fig. III.4). La masse volumique du béton 100 % granulats de brique le situe entre le béton normal (2 200 à 2 600 kg/m³) et le béton léger (300 à 1 850 kg/m³), Il peut donc être classé comme béton de poids moyen.

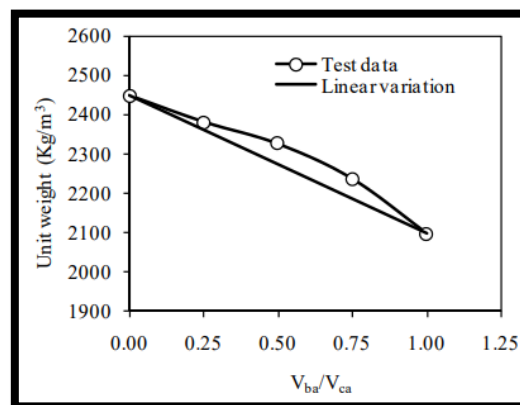


Figure III.4. Masse volumique des bétons élaborés par Abdur Rashid et coll.

Les valeurs d'essai du module de rupture (f_r) et de la résistance à la traction par fendage (f_{sp}) sont présentées en fonction du rapport V_{ba}/V_{ca} à la figure III.5. Le remplacement de granulats de pierre par des granulats de brique entraîne une diminution des valeurs de f_r et f_{sp} . Ces diminutions pour un remplacement à 100 % de granulats de pierre par des granulats de brique sont respectivement de 18,8 % et 35,8 %. Cette diminution est négligeable jusqu'à un remplacement de 25 % de granulats de pierre, au-delà duquel le taux de diminution augmente significativement. Cependant, un remplacement à 100 % de granulats de pierre a entraîné une amélioration significative de la valeur de f_r par rapport à celle d'un béton remplacé à 75 %.

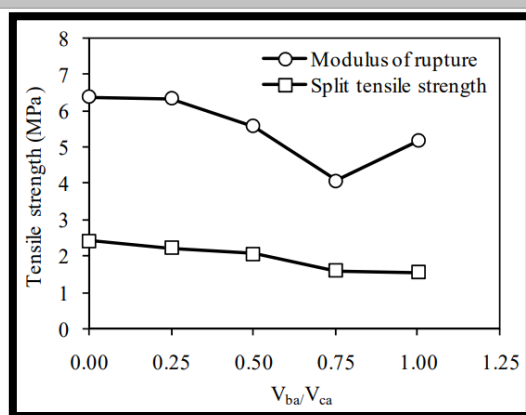


Figure III.5. Module de rupture et résistance des bétons élaborés par Abdur Rashid et coll.

Adamson et coll. [21] ont utilisé des granulats naturels et des déchets de briques trempés dans l'eau pendant 48 heures. Les granulats naturels ont été remplacés par 25 et 50 % de granulats de brique. Ils ont constaté que la maniabilité du béton augmentait avec la quantité de briques concassées sous forme de granulats grossiers (Tableau III.2). Ceci a été attribué à la plus grande porosité des granulats de brique par rapport aux granulats naturels. Des granulats plus perméables peuvent retenir davantage d'eau, ce qui améliore la maniabilité du béton frais.

Tableau III.2. Affaissement des bétons élaborés par Adamson et coll.

Mixture	Slump (mm)
Control (100% natural aggregate)	44.45
25% brick	63.50
50% brick	88.90

Quant à la résistance à la compression, les cylindres contenant des granulats de brique étaient en moyenne légèrement plus résistants que le mélange témoin, et leur résistance augmente avec la teneur en brique (Fig. III.6), ce qui pourrait s'expliquer par la résistance relativement faible des granulats naturels par rapport à celle des granulats de brique, telle que déterminée par le test d'abrasion de Los Angeles.

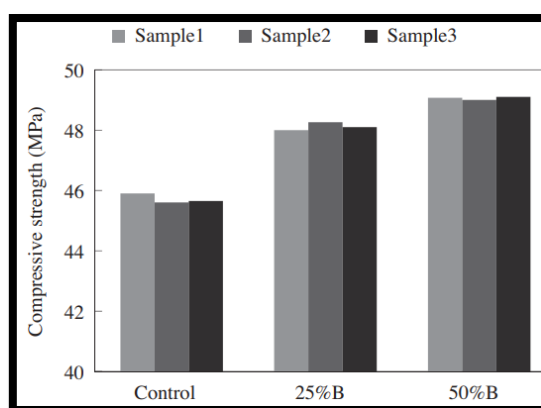


Figure III.6. Résistance à la compression des bétons élaborés par Adamson et coll.

Adamson et coll. ont remarqué que la pénétration des chlorures a augmenté avec l'augmentation de la teneur en briques. Cette augmentation était d'environ 16 % et 24 % pour des remplacements de briques de 25 % et 50 %, respectivement, après six mois d'exposition à la solution de chlorure (Fig III.7). Elle est attribuée à la plus grande porosité des granulats de briques par rapport à celle des granulats naturels.

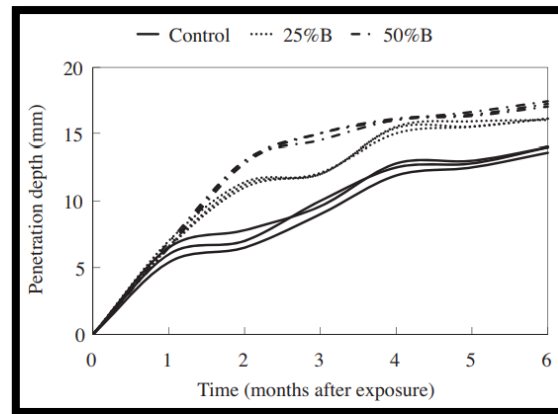


Figure III.7. Profondeur de pénétration des ions chlorures dans les bétons élaborés par Adamson et coll.

Ji et coll. [22] ont préparé des échantillons de béton avec des agrégats grossiers de briques recyclées (RBCA) à 0 %, 25 %, 50 %, 75 % et 100 %. Ils ont observé que l'intégrité du béton diminuait progressivement après la rupture par compression, avec l'augmentation de la teneur en RBCA (Fig. III.8). En raison de sa faible résistance, le RBCA était détruit lors de la compression du béton. Cependant, les agrégats sont davantage endommagés dans le béton recyclé à teneur élevée en RBCA, ce qui réduit l'intégrité du béton RBCA.

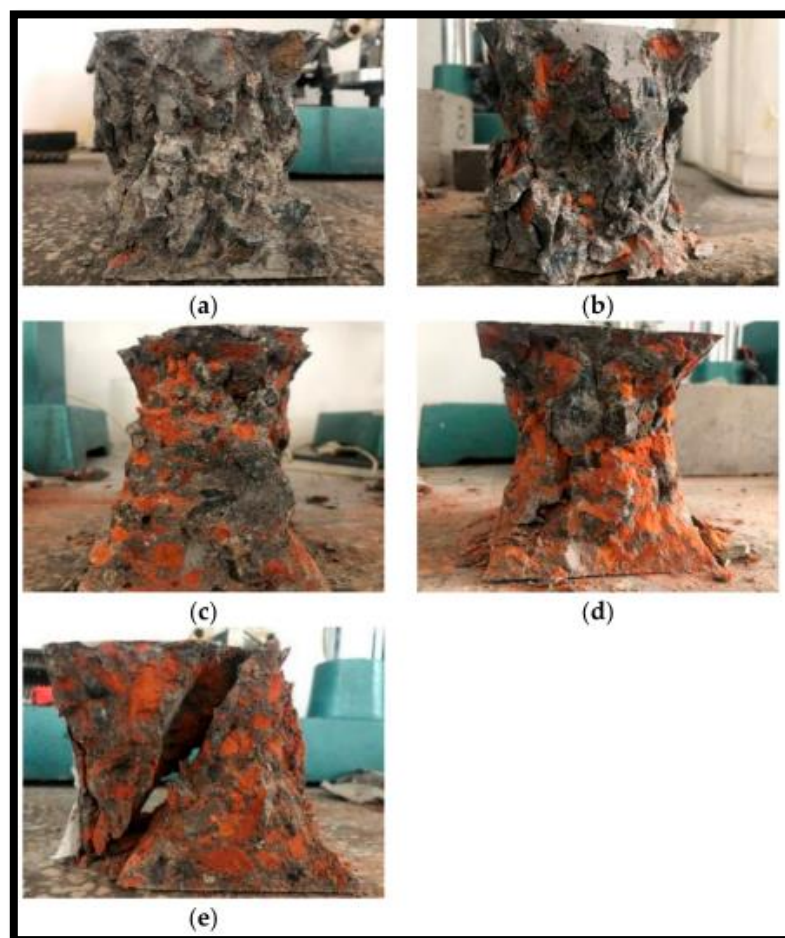


Figure III.8. Mode de rupture par compression des échantillons de béton RBCA : (a) RB-0, (b) RB-25, (c) RB-50, (d) RB-75, (e) RB-100 élaborés par Ji et coll.

D'après le microscope numérique, Ji et coll. ont observés que l'évolution des dommages du béton RBCA diffère de celle du béton ordinaire (Fig. III.9). Les dommages du béton RBCA et du béton ordinaire apparaissent initialement dans la zone de transition de l'interface. Une fois tous les dommages survenus dans la zone de transition du béton ordinaire, une zone centrale en V se forme généralement et se développe vers la zone du mortier. Cependant, les dommages du béton RBCA ont touché le granulat lui-même, et aucune zone centrale n'a été formée.

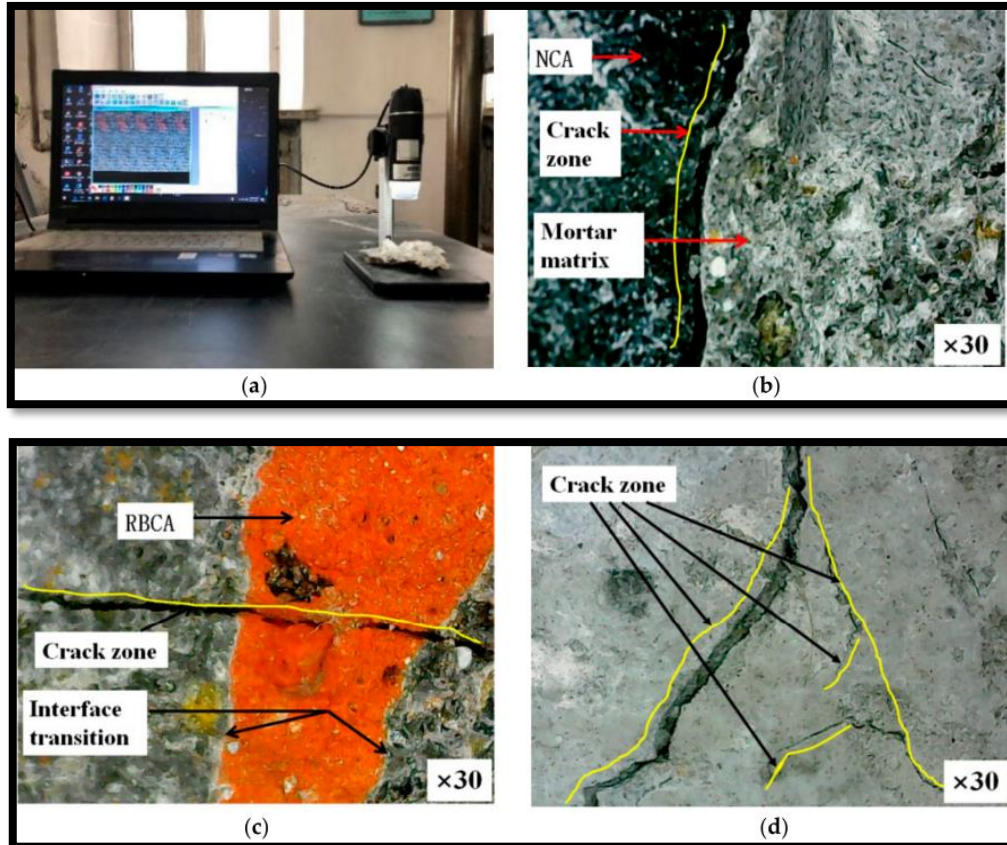


Figure III.9. Destruction des échantillons après compression uniaxiale : (a) microscope, (b) état de destruction du témoin sous un microscope, (c) destruction du RBCA sous un microscope, (d) état destructeur de l'échantillon sous un microscope, élaborés par Ji et coll.

Uddin et coll. [23] ont étudié l'effet de la taille maximale des granulats MAS (12,5 mm, 19,0 mm, 25,0 mm, 37,5 mm et 50,0 mm) sur les propriétés du béton fabriqué avec différents rapports volumique sable/granulats totaux (0,40 et 0,45), rapports E/C (0,45, 0,50 et 0,55) et teneurs en ciment (375 kg/m^3 et 400 kg/m^3). L'analyse d'image des échantillons a été effectuée pour trouver le périmètre de la zone de transition interfaciale (ITZ) autour des granulats grossiers dans les échantillons. D'après l'analyse d'image, le périmètre de l'ITZ a été calculé et a été tracé contre différents MAS comme indiqué sur la figure III.10. Le périmètre de l'ITZ autour des granulats grossiers dans le mélange de béton diminue considérablement avec l'augmentation de la MAS. Ainsi, pour les MAS plus grands, un contenu relativement plus faible de ciment sera nécessaire pour améliorer l'ITZ autour d'agrégats grossiers. En conséquence, pour une teneur en ciment plus faible, une résistance à la compression relativement plus élevée et le module de Young se trouve en cas de MAS plus gros. D'un autre côté, pour un MAS plus petit, l'ITZ sera relativement amélioré avec une plus grande teneur en ciment entraînant une augmentation de la résistance à la compression et du module de Young pour les MAS plus petits.

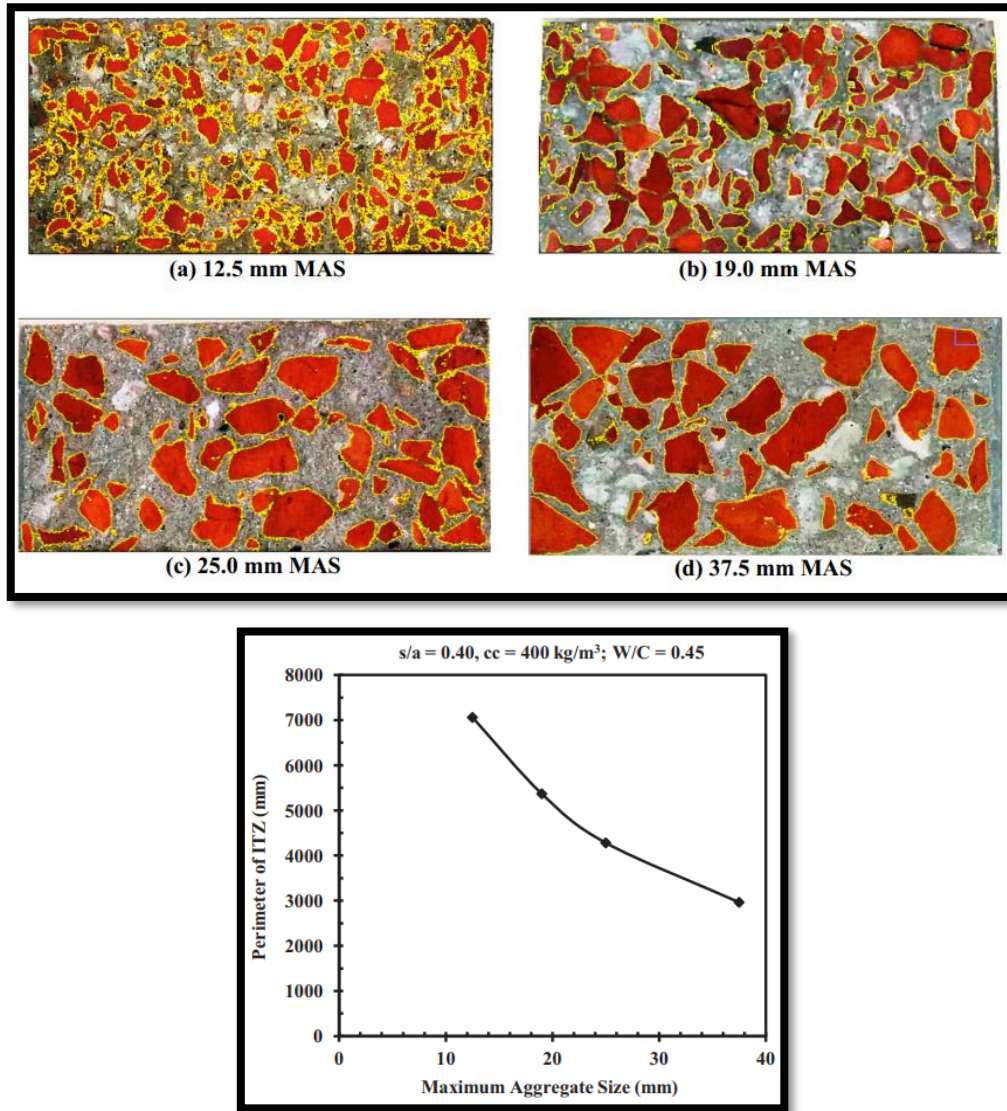


Figure III.10. Analyse d'image des échantillons divisés et Effet de la taille maximale des granulats sur le périmètre d'ITZ d'après Uddine et coll.

La variation de la contrainte avec une déformation pour le béton ayant une MAS différente a été réalisé dans la même étude (Fig.III.11). Sur la base des données, les relations de contrainte-déformation suivantes sont proposées pour les bétons.

$$\text{MAS 12.5 mm : } \frac{f_c}{f'_c} = \frac{1.9712 \times \varepsilon}{0.00193 + \varepsilon} \quad R^2 = 0.89; \quad 0 \leq \varepsilon \leq 0.0025 \quad (2)$$

$$\text{MAS 19.0 mm : } \frac{f_c}{f'_c} = \frac{1.5916 \times \varepsilon}{0.00153 + \varepsilon} \quad R^2 = 0.92; \quad 0 \leq \varepsilon \leq 0.0025 \quad (3)$$

$$\text{MAS 25.0 mm : } \frac{f_c}{f'_c} = \frac{1.7558 \times \varepsilon}{0.00188 + \varepsilon} \quad R^2 = 0.85; \quad 0 \leq \varepsilon \leq 0.0025 \quad (4)$$

$$\text{MAS 37.5 mm : } \frac{f_c}{f'_c} = \frac{1.7862 \times \varepsilon}{0.00208 + \varepsilon} \quad R^2 = 0.95; \quad 0 \leq \varepsilon \leq 0.0025 \quad (5)$$

où le f_c est une contrainte à la déformation ε et f'_c est la résistance à la compression de béton.

Uddine et coll. constatés que les courbes contrainte-déformation deviennent de plus en plus plate avec l'augmentation de la MAS, c'est-à-dire que le module de béton de Young diminue avec une augmentation du MAS.

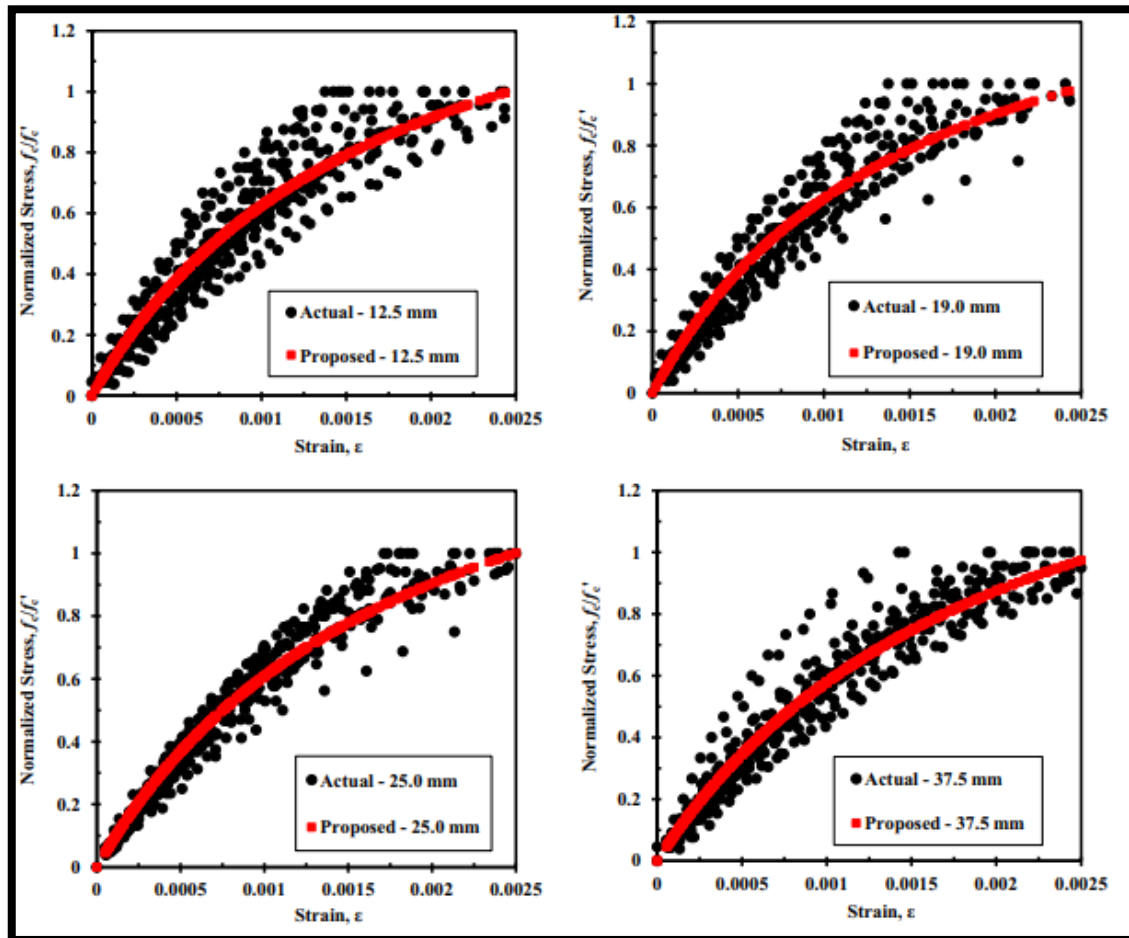


Figure III.11. Courbe contrainte-déformation des bétons élaborés par Uddine et coll.

III.2. Les déchets de tuiles

Ceesay et Miyazawa [24] ont utilisé du grès concassé (G) et des tuiles recyclées grossières (RTG) comme granulats grossiers pour les différentes proportions de béton. De plus, un entraîneur d'air (AE), un entraîneur d'air et réducteur d'eau (AEWR) et un superplastifiant (SP) ont été utilisés comme adjuvants chimiques.

Les propriétés des granulats, ainsi que le rapport eau/ciment, influencent directement les propriétés du béton frais et durci, car elles déterminent sa résistance, son maniabilité et sa durabilité. Les granulats de tuiles recyclées RTG présentent des valeurs d'absorption d'eau, d'écrasement et d'abrasion supérieures à celles des granulats classiques, mais présentent une densité et une masse volumique apparente inférieures, comme le montre le tableau III.3. Les granulats présentant de telles caractéristiques sont généralement qualifiés de granulats de mauvaise qualité en raison de leurs propriétés inférieures à celles des granulats de béton classiques. La granulométrie des granulats est un paramètre important pour déterminer la pâte nécessaire à la mise en œuvre d'un béton.

Tableau III.3. Propriétés physique et mécanique des granulats de l'étude de Ceesay et Miyazawa

Aggregate Type	Sample	Specific Gravity (g/cm ³)	Water Absorption (%)	Bulk Density (kg/m ³)	Fineness Modulus	Abrasion Value (%)	Crushing Value (%)
Fine aggregate	River sand (S)	2.59	2.55	1735	2.82	N/A	N/A
	Roof tile (RTS)	2.29	9.85	1340	2.55	N/A	N/A
Coarse aggregate	Crushed stone (G)	2.64	0.76	1615	-	11.1	9.7
	Roof tile (RTG)	2.25	9.94	1300	-	33.5	28.4

Dans la même étude l'affaissement, la teneur en air et la température du béton à granulats normaux et du béton à granulats de tuiles recyclées ont été enregistrés. Bien que les tuiles recyclées et les granulats normaux aient été utilisés en conditions sèches et saturées en surface, l'ouvrabilité du béton contenant des tuiles grossières recyclées (RTG+S) est supérieure à celle du mélange témoin. L'affaissement du béton RTG+S a augmenté de 14 % par rapport au mélange témoin. Concernant le temps de prise, les résultats montrent que le temps écoulé entre la prise initiale et la prise finale est le plus long pour le béton contenant des tuiles fines recyclées (Figure III.12). Apparemment, la différence est faible pour le temps de prise initial, mais marginale pour le temps de prise finale, notamment entre le mélange témoin et le béton RTG+S.

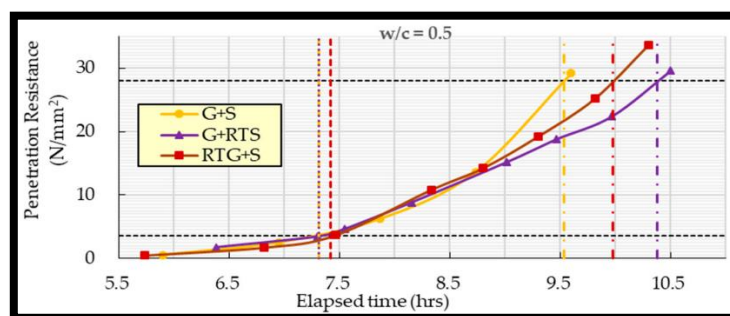


Figure III.12. Effet des granulats sur le temps de prise initial et final des bétons élaborés par Ceesay et Miyazawa.

Les résultats des tests de carbonatation du béton RTG+S étaient presque similaires à ceux du béton G+S (Figure III.13). Les profondeurs de pénétration des chlorures des bétons RTG+S et G+S étaient également similaires. La profondeur de pénétration dépendait fortement de la porosité de la matrice du béton.

De même, la Figure III.13 illustre l'évolution de la masse du béton exposé à des solutions de HCl et de Na₂SO₄. Les résultats ont montré une perte plus importante de la masse du béton exposé à l'acide chlorhydrique qu'à une solution de sulfate de sodium, avec une chute rapide au cours du premier mois.

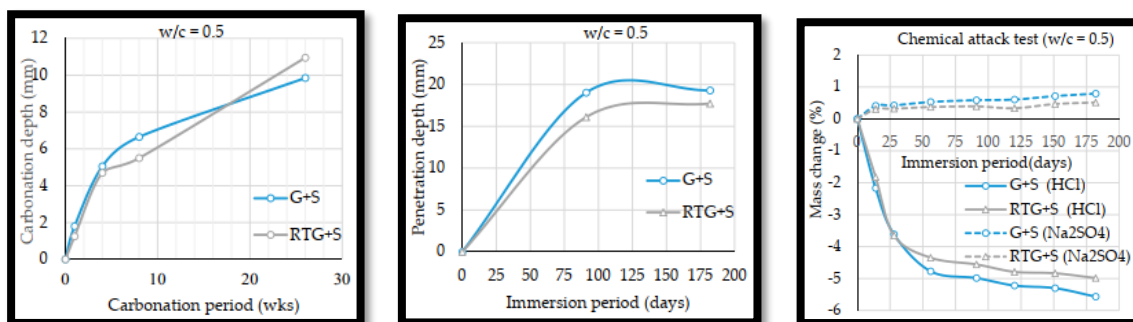


Figure III.13. Effet des granulats sur la carbonatation la pénétration des chlorures et la masse des bétons élaborés par Ceesay et Miyazawa.

Miličević et coll. [25] ont constaté que la masse volumique du béton frais se situe entre 1 815 et 2 361 kg/m³, ce qui indique que certains mélanges peuvent être classés dans la catégorie des bétons légers (Fig. III.14). Les valeurs d'affaissement varient de S1 à S5 (une ségrégation des particules est observée dans les mélanges de S5). La ségrégation dans les mélanges à consistance S5 est probablement due à l'absence de particules fines et à la variabilité des masses volumiques des granulats utilisés. Par conséquent, une quantité adéquate de particules fines doit être garantie, en fonction de la granulométrie maximale des granulats, lors de la conception d'un mélange de béton des tuiles CT. La teneur en air des mélanges de béton est élevée, elle se situe entre 2,2 et 14,4 %. Cette teneur en air plus élevée est due à des formes et structures spécifiques des particules de de tuiles concassées. La composition granulométrique influençant également la disposition des particules fines et grossières dans le béton, il est probable que la teneur en air pourrait être améliorée en améliorant la composition granulométrique des granulats utilisés, ce qui sera pris en compte lors de la conception des compositions optimales du mélange.

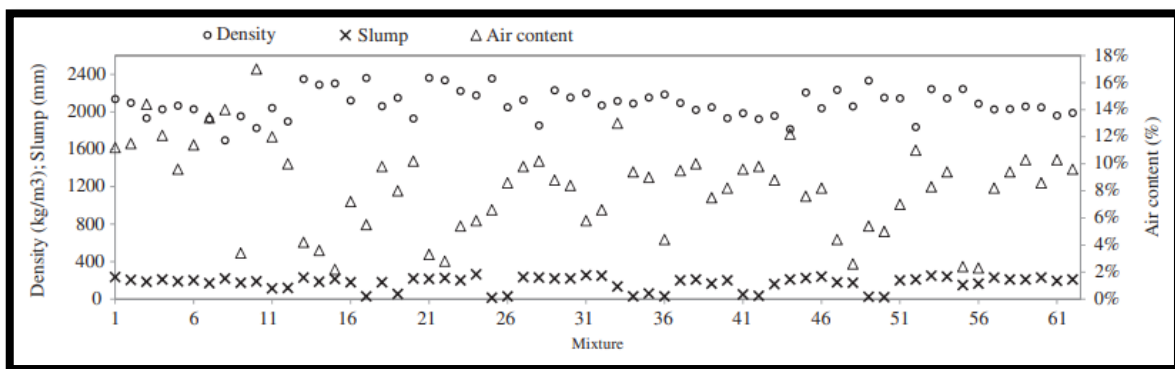


Figure III.14. Les caractéristiques des bétons frais élaborés par Miličević et coll.

La Figure III.15 montre que les résistances à la compression des bétons contenant des granulats CT diminuent avec l'augmentation du pourcentage de CT (La ligne pointillée représente la limite entre les granulats de béton normal et léger). A 28 jours, la diminution de la résistance à la compression était de l'ordre de 10 à 35 % pour le béton recyclé à gros granulats. L'utilisation de tuiles concassées comme granulats a entraîné une perte de 40 % de la résistance à la compression. En termes de résistance, le béton produit à partir de ces granulats n'est pas aussi performant que les bétons produits à partir de granulats naturels. Cependant, ce béton conserve une résistance qui le rend adapté à certaines applications, avec l'avantage supplémentaire d'une densité bien plus faible.

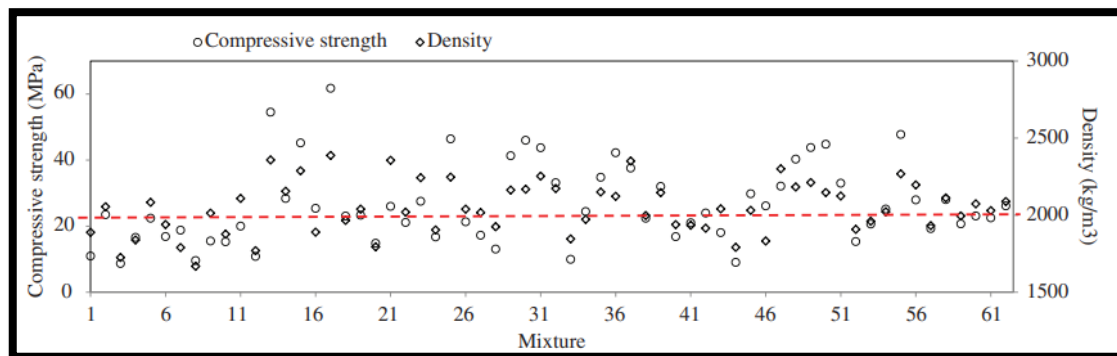


Figure III.15. La résistance à la compression et la densité sèche des bétons élaborés par Miličević et coll.

Dans la même étude de Miličević et coll. [50] Ils ont constaté que le module d'élasticité statique d'un béton courant présentant des résistances normalisées est compris entre 27 000 et

39 000 N/mm², selon la classe de béton. La Figure III.16 montre que la valeur médiane du module d'élasticité statique est de 18 323 N/mm² pour les mélanges de béton testés avec des tuiles utilisées comme granulats, soit environ 30 à 50 % inférieure au module d'élasticité du béton courant. Le module d'élasticité dynamique a été déterminé en calculant la vitesse d'une impulsion ultrasonore à travers le béton. Les échantillons CT présentent des vitesses d'impulsion ultrasonore inférieures à celles des bétons couramment utilisés à base de granulats naturels, ce qui peut indiquer l'apparition de défauts, de fissures, de porosités plus importantes et d'autres irrégularités.

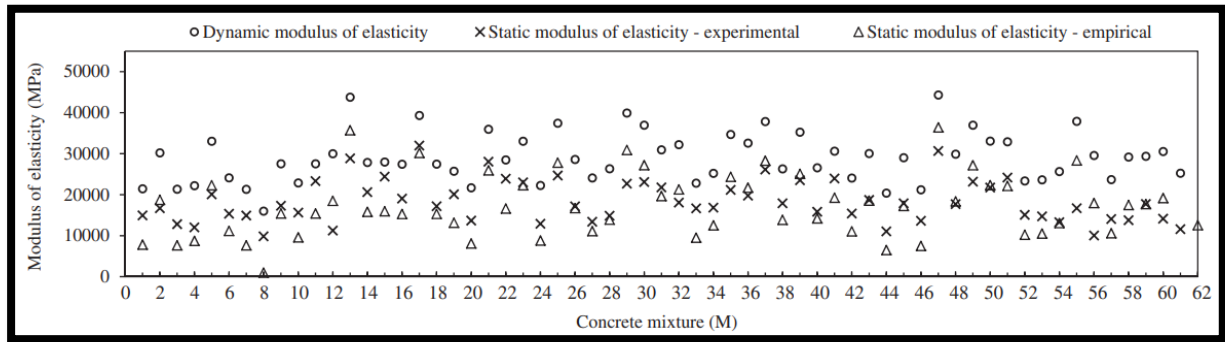


Figure III.16. Module d'élasticité dynamique et statique des bétons élaborés par Miličević et coll.

Comme la plupart des matériaux, le béton change de masse sous l'effet de la température. Miličević et coll. [26] ont élaboré un mélange témoin (MR) contenant des granulats calcaires grossiers NA. 20 % et 40 % de NA ont été remplacés par des granulats grossiers de déchets de tuiles CT dans les mélanges BM19 et BM35.

La masse résiduelle, soit le pourcentage de la masse restante par rapport à la masse initiale avant chauffage, était d'environ 98 % pour tous les échantillons exposés à 200 °C (Figure III.17). Après exposition des échantillons à des températures de 600, 800 et 1 000 °C, le MR a perdu une masse significative par rapport à sa masse initiale, tandis que les mélanges contenant des granulats CT ont montré une meilleure résistance à la perte de masse due au chauffage.

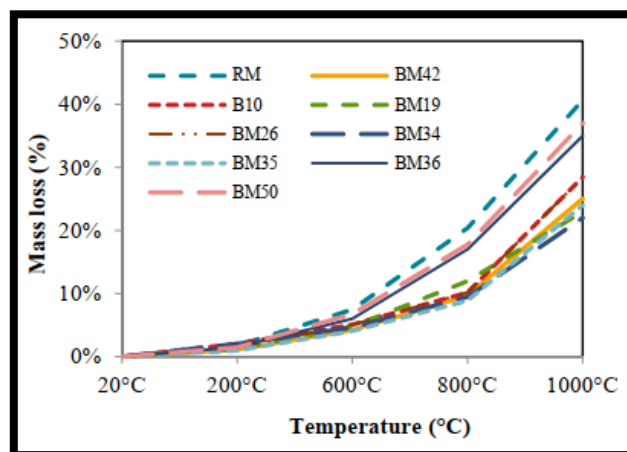


Figure III.17. Perte de masse en fonctions des températures élevées des bétons élaborés par Miličević et coll.

Le béton change de volume lorsqu'il est exposé à différentes températures. Par conséquent, le volume de chaque échantillon a été mesuré avant et après exposition à des températures élevées. Les résultats (Fig. III.18) indiquent que le béton contenant du CT comme granulat présente une variation de volume environ 25 % inférieure à celle due à une exposition à des températures élevées. Comme un incendie provoque des contraintes dans une construction, les contraintes résultantes sont plus élevées pour le mélange RM. Si l'espace nécessaire à la variation de longueur

est insuffisant, des moments secondaires peuvent apparaître, provoquant l'effondrement de la construction.

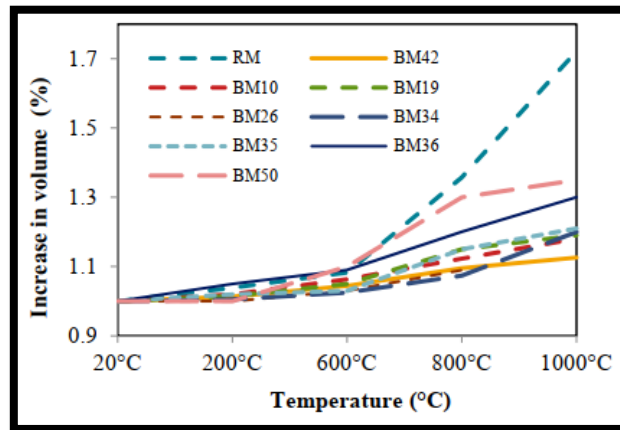


Figure III.18. Gain de volume en fonctions des températures élevées des bétons élaborés par Miličević et coll.

Miličević et coll. ont aussi constaté que le RM présente un coefficient de perméabilité aux gaz inférieur à celui des mélanges contenant des granulats CT (Fig. III.19), ce qui en fait le béton le plus adapté à la perméabilité aux gaz après exposition à haute température. La perméabilité aux gaz est jusqu'à 47 fois plus élevée après une exposition à des températures supérieures à 600 °C qu'après une exposition à 200 °C. Ceci est dû à l'apparition de fissures dans le béton. Miličević et coll., ont remarqué que des fissures superficielles apparaissent sur les échantillons de béton RM après une exposition à une température de 600 °C, et leur nombre augmente continuellement avec la température lorsqu'ils sont exposés à 800 et 1 000 °C. Avec tous les autres mélanges contenant des granulats CT, les fissures superficielles n'apparaissent qu'après une exposition à une température de 800 °C. Ils supposent que les fissures sont plus petites et moins nombreuses dans les échantillons contenant CT en raison de la teneur plus faible en carbonate de calcium de ces granulats par rapport à la dolomite.

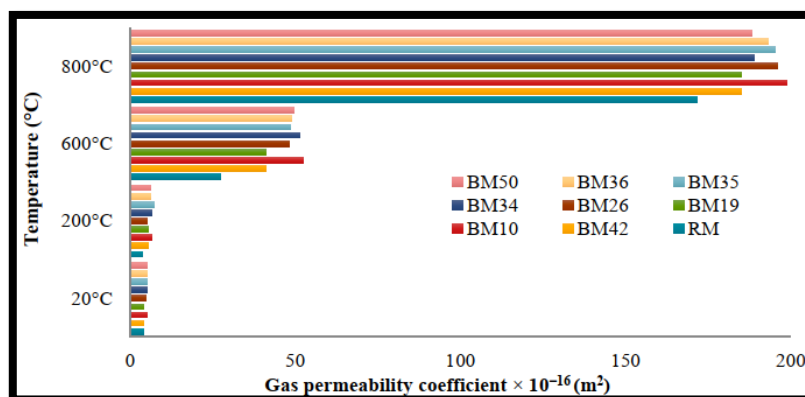


Figure III.19. Perméabilité aux gaz en fonctions des températures élevées des bétons élaborés par Miličević et coll.

Ogawa et coll. [27] ont élaboré un béton étuvé à partir de cendres volantes FA et de déchets de tuiles PCWA. Les taux de remplacement des granulats grossiers naturels par du PCWA étaient de 0 %, 10 % et 20 % en volume (appelés G0, G10, G20). Ils ont constaté qu'à l'exception de HF20-G10 (20% FA, 10% PCWA), le retrait du béton avec PCWA était inférieur à celui sans PCWA (Fig. III.20). Ce résultat implique que le PCWA peut réduire efficacement le retrait endogène en fournissant l'eau interne à la matrice du mortier auto-desséchée par hydratation. Pour le béton FA, un taux de remplacement de PCWA de 20 % pourrait réduire le retrait endogène davantage qu'un taux de remplacement de 10 %.

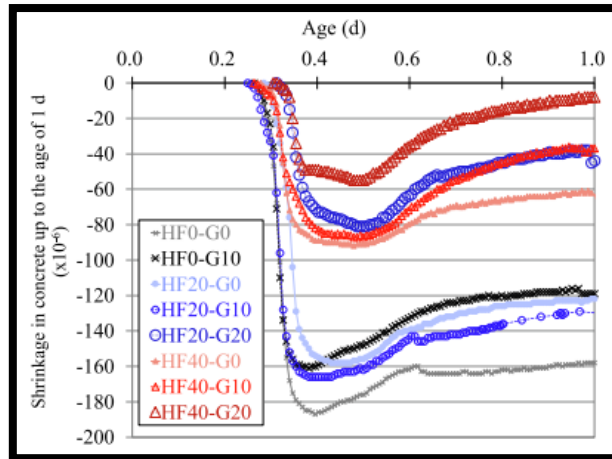


Figure III.20. Retrait du béton jusqu'à l'âge de 1 jour avant démoulage élaborés par Ogawa et coll.

Ils ont également observé que la profondeur de carbonatation du HF40-G0 était supérieure à celle de tout autre mélange, quelle que soit la durée de carbonatation (Fig. III.21). Ainsi, la cure interne par PCWA a permis de réduire efficacement la profondeur de carbonatation du béton contenant 40 % de cendres volantes, tandis qu'aucun effet significatif du PCWA n'a été observé pour le béton contenant 20 % de FA. De plus, le taux de carbonatation après 4 ou 8 semaines a diminué par rapport à celui observé avant 4 ou 8 semaines, sauf pour le HF40-G0. Cela implique que la cure à la vapeur et le stockage à 60 % d'humidité relative ont rendu la couche superficielle du béton poreuse, entraînant une carbonatation rapide, tandis que le stockage à long terme a eu relativement moins d'influence sur le béton, entraînant une carbonatation lente.

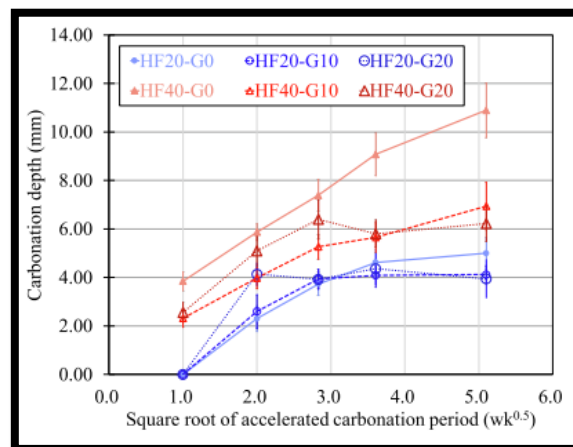


Figure III.21. Profondeur de carbonatation dans des conditions de carbonatation accélérée élaborés par Ogawa et coll.

Avec les mêmes matériaux (cendres volantes FA, granulats de déchets de tuiles RTWA), Bui et coll. [28] ont suivi le volume poreux pendant 728 jours. Les volumes poreux totaux des bétons de cendres volantes de référence (FA0-RTWA40 et FA40-RTWA40) étaient inférieurs à ceux des bétons sans ces granulats (FA0-RTWA0 et FA40-RTWA0) à tous les âges (Fig. III.22), à l'exception de FA40-RTWA40 à 364 et 728 jours, en raison des augmentations significatives du volume poreux dans FA40-RTWA40 à 364 et 728 jours. La réduction du volume poreux total des bétons utilisant des granulats de déchets de tuiles l'on expliqués par l'eau interne de ces granulats qui pénètre dans les pores de la pâte et contribue à l'hydratation du ciment dans les bétons de référence et de classe F aux cendres volantes, ainsi qu'à la réaction pouzzolanique dans ces bétons. Par conséquent, les produits d'hydratation supplémentaires générés remplissent les pores de ces bétons. Ce résultat indique selon eux qu'un remplacement de 40 % des granulats grossiers normaux

par des granulats de déchets de tuiles a fourni suffisamment d'eau de cure interne pour l'hydratation du ciment et la réaction pouzzolanique dans les bétons de référence et aux cendres volantes, afin de densifier la structure poreuse.

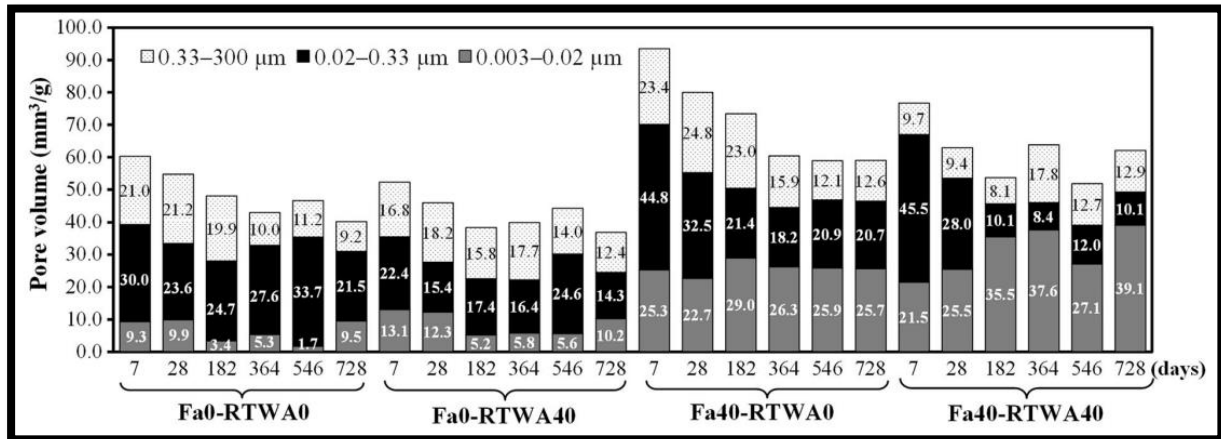


Figure III.22. Effet des granulats de déchets de tuiles sur le volume poreux des bétons élaborés par Bui et coll.

Bui et coll., ont constaté dans cette étude que la consommation de Ca(OH)_2 par réaction pouzzolanique augmentait avec le temps, sauf pour le béton à base de cendres volantes utilisant des granulats de déchets de tuiles (FA40-RTWA40) à 28 jours. Cependant, la consommation de Ca(OH)_2 par réaction pouzzolanique des cendres volantes dans le béton utilisant des granulats de déchets de tuiles (FA40-RTWA40) est supérieure à celle du béton sans ces granulats (FA40-RTWA0) pour tous les temps de cure. La consommation de Ca(OH)_2 par la réaction pouzzolanique des cendres volantes dans FA40-RTWA40 a augmenté de manière significative à 7 jours par rapport à celle de FA40-RTWA0, indiquant que le durcissement interne avec remplacement de 40 % des granulats par des granulats de déchets de tuiles a accéléré la réaction pouzzolanique des cendres volantes dans le béton à 7 jours et plus, et a entraîné une augmentation de la consommation de Ca(OH)_2 (Fig. III.23).

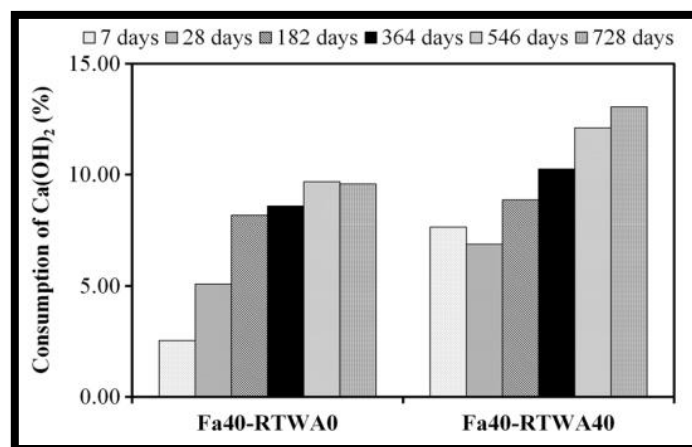


Figure III.23. Consommation de Ca(OH)_2 dans les bétons élaborés par Bui et coll.

III.3. Les déchets de carreaux céramiques

Roig-Flores et coll. [29] ont préparé des bétons en remplaçant 20, 50 et 100 % de gravier calcaire naturel par du gravier recyclé issu de déchets de carrelage céramique (CSCA). Il constaté que les granulats recyclés présentaient une résistance à l'usure significativement supérieure à celle des particules de calcaire naturel, comme en témoigne la perte de masse enregistrée après les essais

Micro-Deval (3,76 % pour les granulats recyclés grossiers, contre 24,05 % pour le gravier naturels).

Les valeurs d'affaissement déterminées immédiatement après le malaxage du béton (10 min) augmentaient progressivement avec l'augmentation des quantités de gravier recyclé. Cette variation est attribuée aux différences de forme entre les granulats naturels et recyclés (des particules plus rondes améliorent l'ouvrabilité) et aux corrections de la quantité totale d'eau dans le système plus importante dans les bétons à granulats recyclé (Fig. III.24).

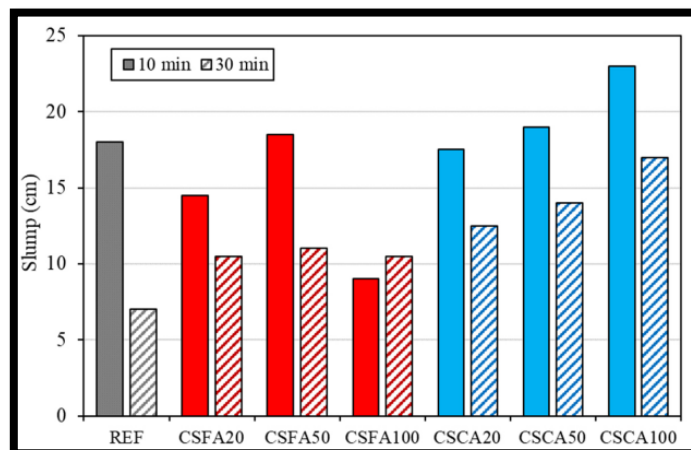


Figure III.24. Affaissement des bétons élaborés par Roig-Flores et coll.

Les résultats de résistance à la compression (Fig. III.25) obtenus en remplaçant le gravier naturel par du CSCA se sont progressivement améliorés et étaient similaires à ceux du béton de référence, voire supérieurs avec une substitution complète (CSCA100). Cette résistance accrue a été attribuée non seulement à la plus grande dureté des particules de CSCA, mais aussi à une meilleure maniabilité avec l'augmentation des pourcentages de substitution.

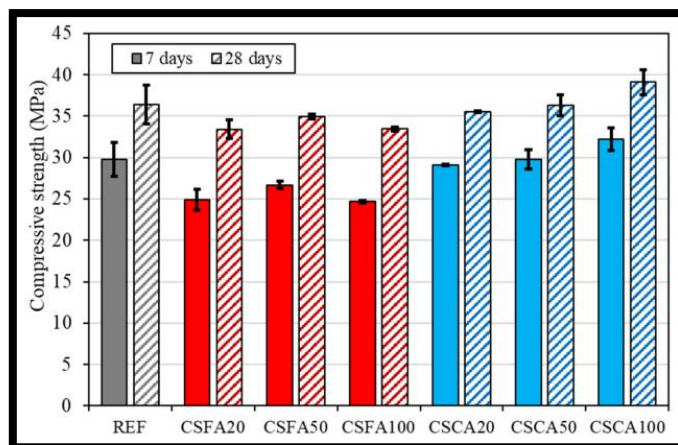


Figure III.25. Résistance à la compression des bétons élaborés par Roig-Flores et coll.

Suivant la même logique que la résistance à la compression, les profondeurs de pénétration maximales (Fig. III.26) ont été considérablement réduites lors de l'utilisation du CSCA. Tous les échantillons de béton, pouvaient être utilisés dans n'importe quelle classe d'exposition établie dans le code espagnol des structures car, selon les spécifications établies, les profondeurs de pénétration maximales étaient généralement inférieures à 30 mm (aucune valeur individuelle supérieure à 40 mm).

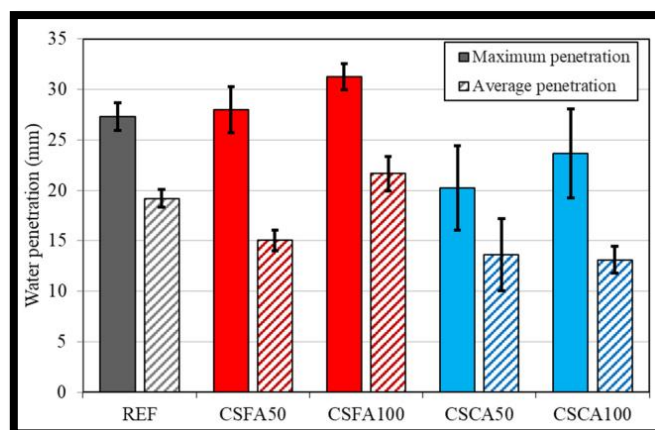


Figure III.26. Absorption d'eau des bétons élaborés par Roig-Flores et coll.

Keshavarz & Mostofinejad [30] ont remplacé du gravier concassé de 5 à 10 mm de diamètre par des granulats grossiers en céramiques rouges à des concentrations de 0, 25, 50, 75 et 100 %.

Le diagramme montre que la résistance à la compression des bétons modifiés, augmente avec le pourcentage de remplacement du gravier conventionnel par des déchets céramiques (Fig. III.27). En effet, les céramiques forment de meilleures liaisons avec la pâte de ciment que les graviers naturels, ce qui améliore la résistance à la compression du béton avec l'augmentation du remplacement des déchets céramiques. Cependant, la résistance à la compression de ce type de béton ne dépasse pas 29,3 % par rapport au béton de référence.

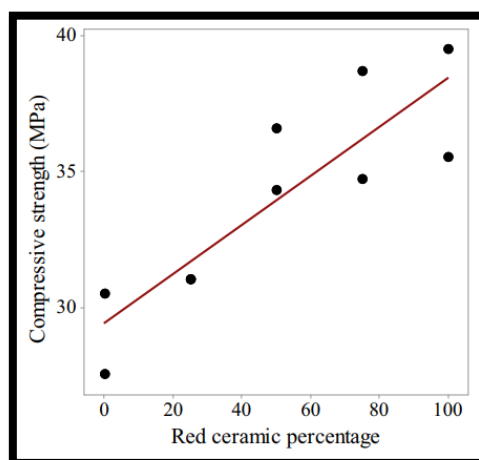


Figure III.27. Le modèle linéaire de la résistance à la compression des bétons élaborés par Keshavarz & Mostofinejad.

L'absorption d'eau du béton témoin a augmenté jusqu'à 91 % lorsque 100% des granulats naturelles ont été remplacé. Ceci est grâce à la forte absorption d'eau des déchets céramiques rouges. En général, le remplacement croissant des déchets de céramique rouge par du gravier entraîne une augmentation de l'absorption d'eau du béton, ce qui constitue évidemment un inconvénient des bétons contenant des déchets de céramique rouge (Fig. III.28).

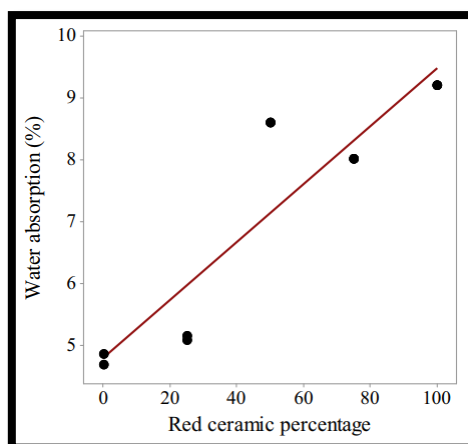


Figure III.28. Le modèle linéaire de l'absorption d'eau des bétons élaborés par Keshavarz & Mostofinejad.

Daniyal & Ahmad [31] ont remplacé 10 à 50 % de granulats grossiers en quartzite naturel, et des rapports E/C de 0,4, 0,5 et 0,6. Ils ont remarqué que l'ouvrabilité du béton frais diminue avec l'augmentation de la quantité de carreaux et de granulats grossiers (Fig. III.29). Cette diminution peut s'expliquer par une absorption d'eau plus importante par les carreaux et par la forme plus anguleuse des granulats de carreaux de céramique. Le degré d'ouvrabilité est très faible pour un rapport E/C de 0,4, considéré comme inapproprié pour une utilisation dans le béton. Il est considéré comme faible pour un rapport E/C de 0,5 et est élevé pour un rapport E/C de 0,6.

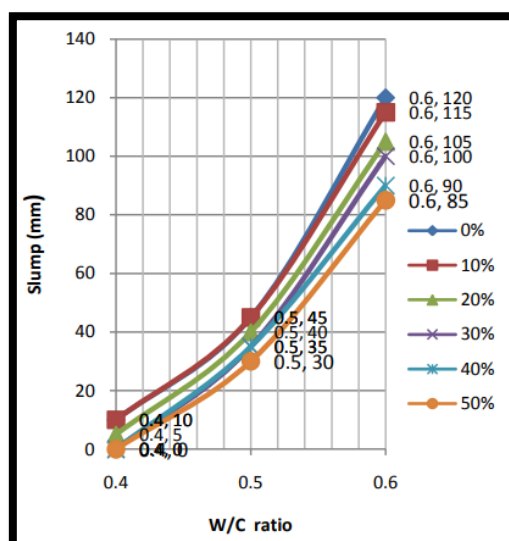


Figure III.29. L'ouvrabilité des bétons élaborés par Daniyal & Ahmad.

La masse volumique de ces mêmes bétons diminuée à mesure que l'on augmente la quantité de granulats recyclé (Fig. III.30). Ce ci est dû à la diminution du poids unitaire du carrelage, comme exemple pour 50 % de remplacement de carrelage céramique, cette diminution s'est avérée être d'environ 3,4 % pour un rapport E/C de 0,4, 2,7 % pour un rapport E/C de 0,5 et 3,1 % pour un rapport E/C de 0,6. Par conséquent, ils affirment que l'utilisation de ce déchet entraîne une diminution du poids unitaire et améliore ainsi la capacité portante des structures.

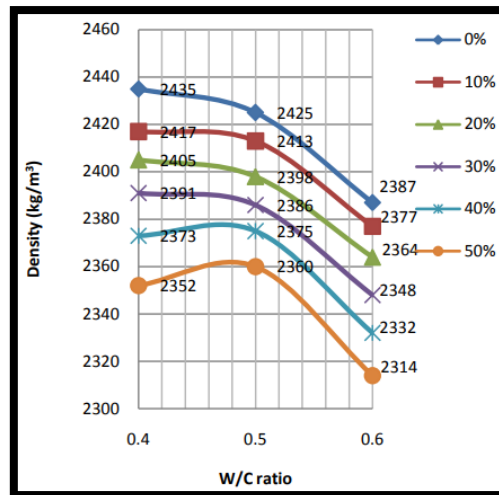


Figure III.30. La densité des bétons élaborés par Daniyal & Ahmad.

Quant à la résistance à la compression (Fig. III.31), elle s'est améliorée pour un rapport E/C de 0,4 jusqu'à 20 % de granulats grossiers de déchets de carrelage par rapport au béton de référence et au-delà la résistance à la compression diminue. Pour un rapport E/C de 0,5 la résistance diminue après 30 % de granulats grossiers de déchets de carrelage, par rapport au béton de référence. Cependant, pour un rapport E/C de 0,6, la résistance à la compression est légèrement améliorée jusqu'à une teneur en granulats grossiers de 40 %. L'une des raisons de la diminution de la résistance des échantillons est l'augmentation de la quantité des déchets. Les granulats de carreaux, en particulier de grande taille, présentent des formes floconneuses, car leur utilisation augmente la teneur en granulats floconneux du béton, ce qui entraîne une diminution de la résistance. Une autre raison pourrait être le manque d'adhérence des granulats au béton, en raison de la surface lisse des granulats.

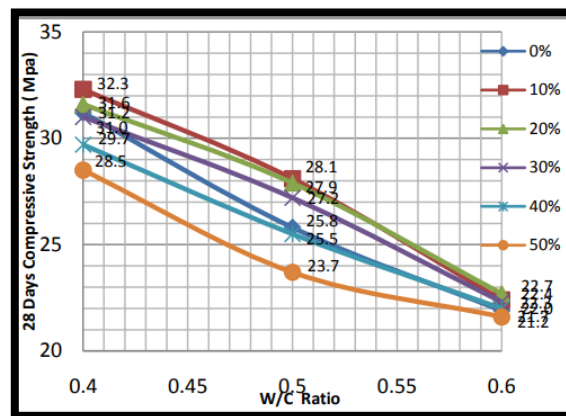


Figure III.31. La résistance à la compression à 28 jours des bétons élaborés par Daniyal & Ahmad.

Albero et coll. [32] ont étudié l'effet de la cure et la température élevée sur des échantillon à 50% et 100% de remplacement des granulats naturels calcaires par des déchets. Ils ont noté une amélioration plus significative avec le remplacement total du gravier (CSCA100). De plus, tous les échantillons ont montré une réduction progressive de la résistance avec l'augmentation des températures (Fig. III.32). Cette perte est due à cinq facteurs différents : Le grossissement des pores, la pression de vapeur, la contrainte dans l'ITZ, la décomposition de la portlandite et du gel CSH et la fissuration résultant de la réhydratation de la chaux.

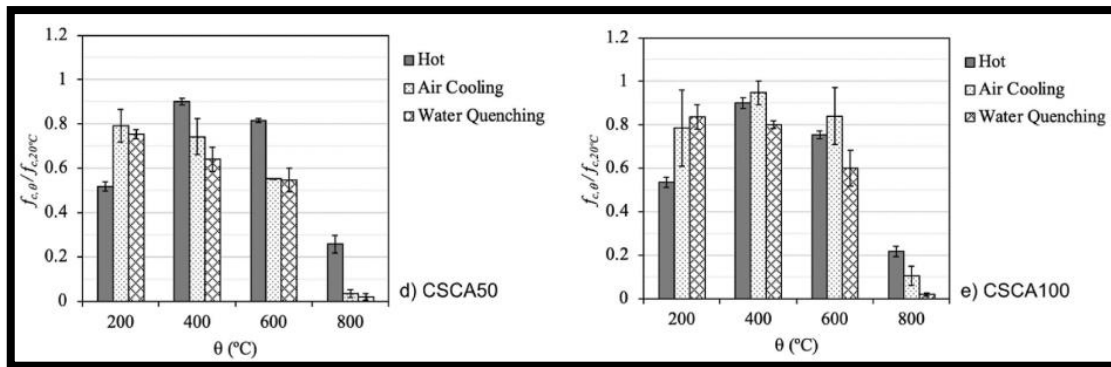


Figure III.32. Résistance relative à la compression des échantillons après exposition à des températures élevées d'après Albero et coll.

Les images de fissuration observées après refroidissement à l'air étaient homogènes dans tous les échantillons, avec moins de fissuration observée dans le béton CSA100. A 200 °C, aucune fissuration n'a été observée dans aucun des échantillons de béton. A 400 °C, tous les échantillons, à l'exception du CSA100, ont déplacé une face légèrement fissurée ou plus. Bien que presque tous les cubes aient présenté des fissures sur les quatre faces à 600 °C, seuls deux des cubes de l'échantillon CSA100 ont présenté des fissures mineures, et aucune fissure n'a été distinguée dans le troisième. Tous les échantillons se sont complètement fissurés et se sont effrités au toucher après avoir été exposés à 800 °C.

Au niveau macroscopique, aucune différence significative n'a été observée entre les fissures de refroidissement à l'air ou à l'eau. Des fissures mineures se sont formées dans les échantillons refroidis à l'eau à 200 °C, et les fissures ont progressivement augmenté avec la température jusqu'à la dégradation totale de l'échantillon après avoir été exposé à 800 °C (Fig. III.33).

Albero et coll. concluent que moins de fissures ont été observée dans le béton CSA100 par rapport aux autres échantillons, quelle que soit la température ou la méthode de refroidissement appliquée. Ainsi, le remplacement total du gravier naturel par les granulats recyclés CS a amélioré la résistance résiduelle et réduit significativement la fissuration du béton recyclé après exposition à des températures élevées.

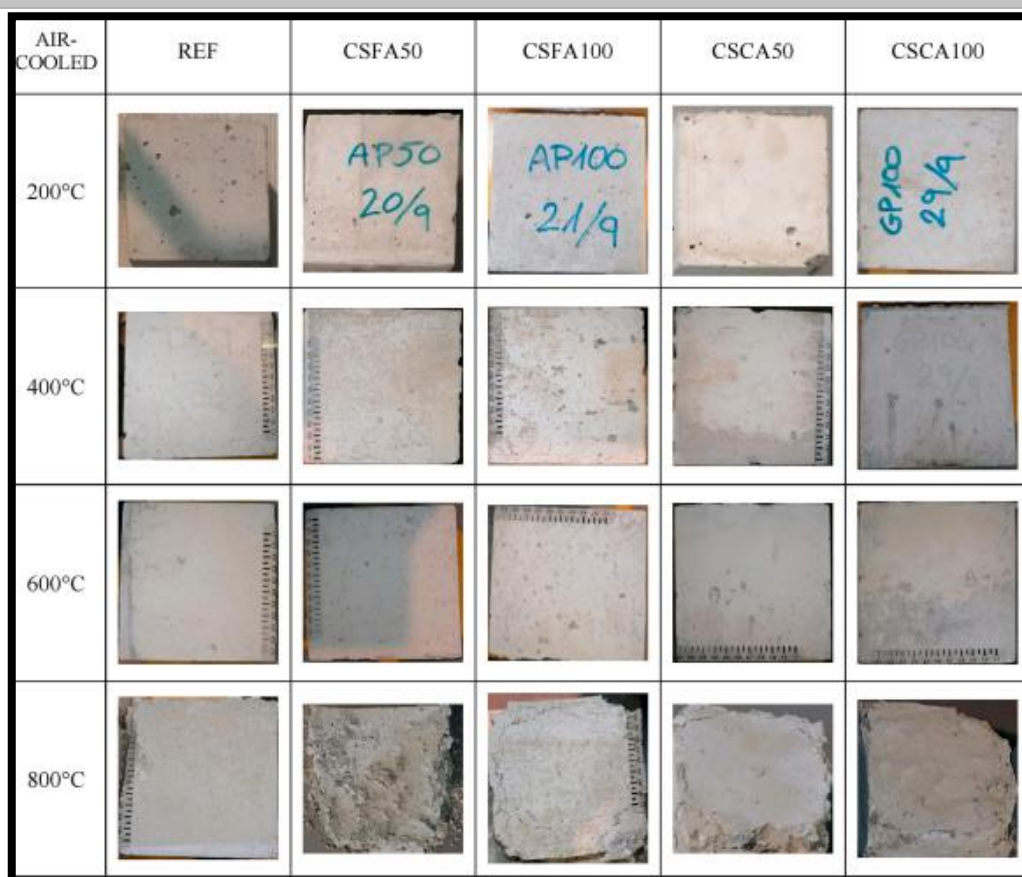


Figure III.33. Images des fissures des échantillons après exposition à des températures élevées d'après Alberro et coll.

Goyal et coll. [33] ont remarqué que l'augmentation des déchets de carreaux céramique à 5% d'intervalle jusqu'à 25%, conduit à une augmentation de la demande en agents réducteurs d'eau (Fig. III.34). Cette augmentation de la demande en superplastifiants est due à la forte absorption d'eau des granulats céramiques. La réduction de l'ouvrabilité liée à l'incorporation de déchets céramiques pourrait être due à une rugosité et une angularité de surface plus importantes des particules céramiques.

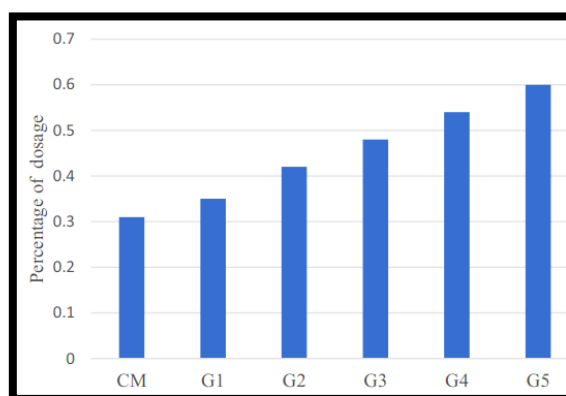


Figure III.34. Dosage en superplastifiant des bétons élaborés par Goyal et coll.

Quant au volume des vides (Fig. III.35) les auteurs ont observé une augmentation avec l'introduction des granulats recyclés. La génération de vides plus importants pourrait être due à la nature poreuse des granulats céramiques.

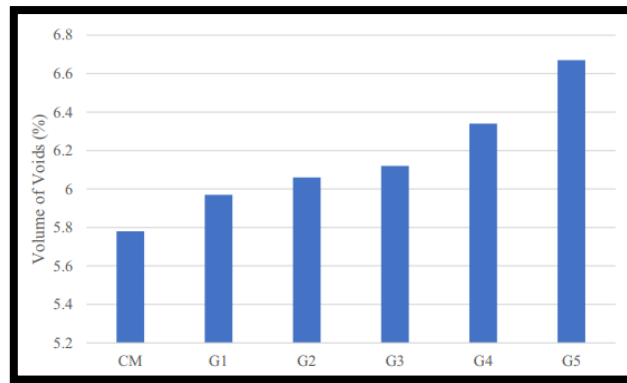


Figure III.35. Volume des vides des bétons élaborés par Goyal et coll.

La nature poreuse de la céramique et de la forte présence de vides, ont eu des répercussions sur la perméabilité des bétons de déchets céramiques. La profondeur de pénétration d'eau mesurée pour le mélange témoin était de 41 mm, et pour tous les mélanges céramiques, une profondeur supérieure a été mesurée. Les résultats concernant le volume de vides et la perméabilité présentent des tendances similaires, ce qui signifie que les vides sont une cause de forte pénétration d'eau. Goyal et coll. ont observé que la perméabilité et les vides sont fortement corrélés avec $R = 0,9179$ (Fig. III.36).

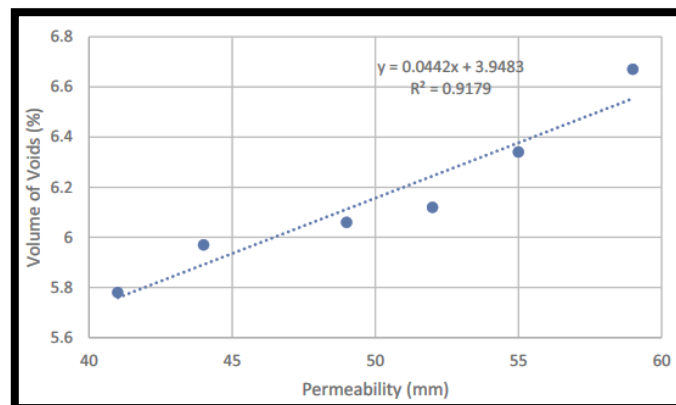


Figure III.36. Relation entre le volume des vides et la perméabilité des bétons élaborés par Goyal et coll.

Elçi [34] a constaté que les carreaux muraux (WTA) contiennent de la calcite qui se décompose complètement à près de 950 °C. Cette décomposition entraîne l'élimination du CO_2 et la formation d'une structure poreuse. En revanche, la température de cuisson plus élevée des carreaux de sol (FTA) rend la structure plus dense. Par conséquent, les granulats des carreaux muraux présentent une densité particulaire (PD) plus faible et des valeurs d'absorption d'eau (WA) plus élevées que celles des carreaux de sol (Fig. III.37).

La résistance mécanique des granulats de carrelage a été évaluée par les essais de concassage de Los Angeles (LA) et d'abrasion Micro Deval (MD). Aucune différence majeure n'a été constatée dans le test de Los Angeles. Cependant, la résistance à l'usure était de 37,84 % pour les WTA. La durabilité du WTA, du FTA et du LSA (granulats naturels calcaire) a été évaluée par des tests de gel-dégel (FT) et de sulfate de magnésium (MS). Aucune différence significative n'a été constatée entre les résultats des tests de gel-dégel. La perte de poids après les tests était comprise entre 0,01 et 0,15 % pour tous les granulats. La perte de poids après les tests de sulfate de magnésium était respectivement de 44,84 % pour le WTA, 7,43 % pour le FTA et 0,88 % pour le LSA. Les granulats WTA sont très sensibles au test de sulfate de magnésium. Il est donc nécessaire d'évaluer soigneusement les granulats WTA avant leur utilisation dans la fabrication du béton.

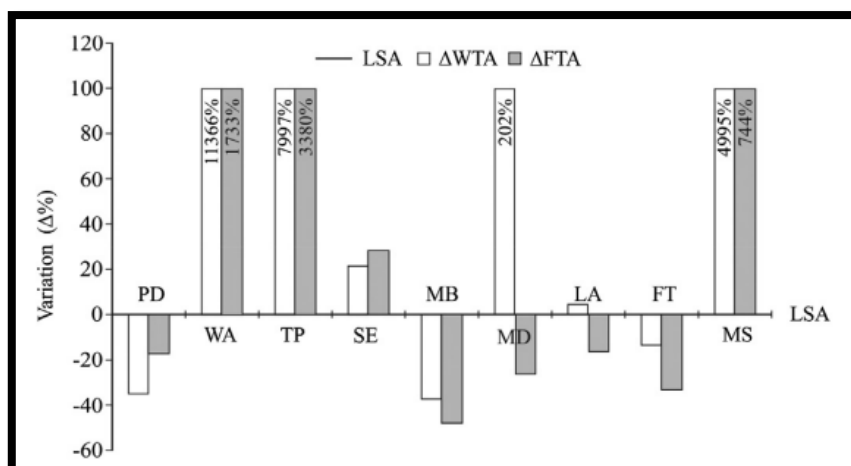


Figure III.37. Un comparatif des résultats des essais physico-mécaniques des granulats WTA, FTA et LSA élaborés par Elçi.

Dans les bétons élaborés dans cette étude, le retrait des bétons de carreaux de sol (FTC) et carreaux muraux (WTC) est respectivement 1,37 et 2,42 fois supérieur à celui des bétons à granulat calcaire LSC. Cela est dû à leur taux d'absorption d'eau élevé (Fig. III.38).

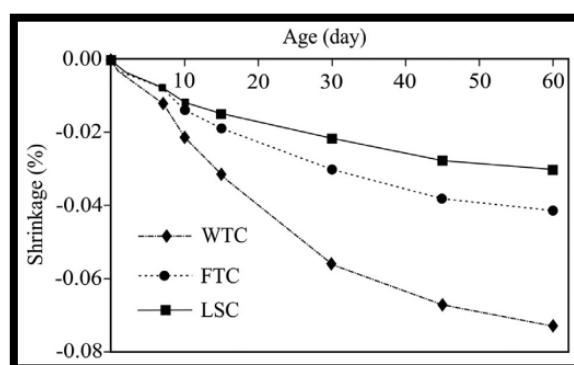


Figure III.38. Retrait des bétons WTC, FTC et LSC élaborés par Elçi.

La résistance à la compression (CS) du WTC s'est avérée inférieure à celle du LSC, tandis que celle du FTC s'est avérée supérieure à celle du LSC (Fig. III.39). La résistance à la traction par fendage BS a été jugée similaire à celle du LSC. La résistance à la flexion TS du WTC s'est avérée supérieure à celle du FTC et du LSC. Le WTC et le FTC présentent une résistance à l'abrasion supérieure à celle du LSC. Cette situation s'explique par le fait que les granulats de carrelage poreux ont permis une meilleure liaison entre la pâte de mortier et les particules de carrelage que les granulats calcaires. La vitesse d'impulsion ultrasonore UPV et la conductivité thermique TC du WTC et du FTC ont donné des valeurs significativement inférieures à celles du LSC en raison de leur rapport de porosité plus élevé.

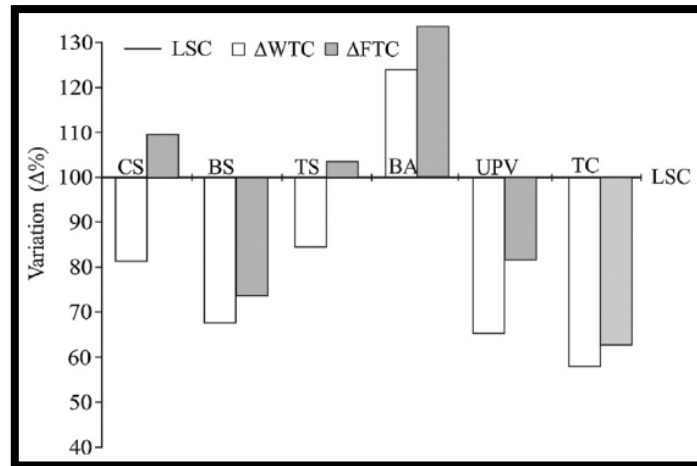


Figure III.39. Variation des propriétés mécaniques des bétons WTC, FTC et LSC élaborés par Elçi.

Anderson et coll. [35] ont remplacé des granulats grossiers et étudié quelques propriétés avec trois matériaux différents à base de carreaux de céramique usagés, avec des ratios de remplacement de 20 %, 25 %, 35 %, 50 %, 65 %, 75 %, 80 % et 100 %.

Dans les séries de carreaux de sol et de mur, ils ont démontré que le taux de remplacement des granulats a peu d'effet sur la résistance à la compression des échantillons, avec une diminution maximale de la résistance de 4,3 % et 5,6 % dans les échantillons avec remplacement à 100 % des carreaux de sol et de mur par rapport au béton de référence. La série de carreaux usagés présente également des résultats encourageants, mais la résistance diminue plus significativement que celle des carreaux vierges (Fig. III.40).

Dans les résultats du module d'élasticité pour la série de carreaux de sol, Ils ont constaté que le module d'élasticité maximal était de 27,4 GPa pour les échantillons à remplacement intégral, soit 26,9 % de plus que les 21,6 GPa mesurés pour le béton de référence. En revanche, les séries de carreaux muraux et de carreaux de rebut ont montré une variation minimale avec le remplacement (Fig. III.41).

Cela indique que la liaison entre les matériaux dans la zone de transition interfaciale, c'est-à-dire la région entourant immédiatement les particules de granulats dont la microstructure de la pâte de ciment est différente de celle de la pâte de ciment dans la masse de ciment, n'est pas aussi forte que celle des granulats naturels. Cela peut être dû à plusieurs facteurs, tels que la surface plane et lisse des granulats céramiques, leur forme anguleuse et l'absorption d'eau, mais la texture de surface est probablement l'élément le plus important. Le matériau utilisé pour les carreaux de céramique dans cette étude est, plan et lisse sur au moins deux de ses faces (dessus et dessous). De plus, la surface supérieure des carreaux est émaillée et, par conséquent, encore plus lisse que la surface inférieure. Il est probable que cette faible cohésion entre la pâte de ciment et les granulats des carreaux de céramique explique la réduction des résistances.

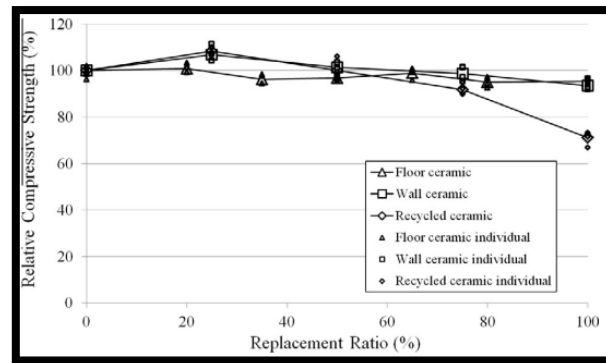


Figure III.40. Résistance à la compression relatives des bétons élaborés par Anderson et coll.

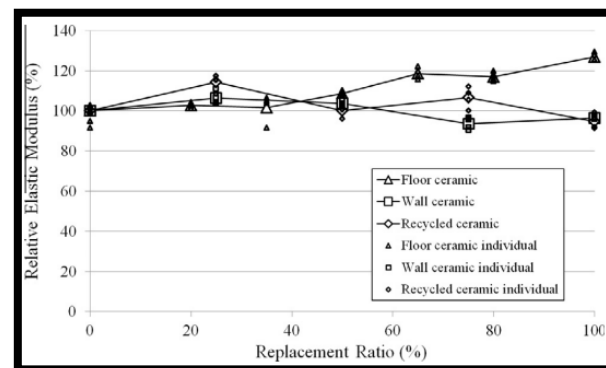


Figure III.41. Module d'élasticité relatifs des bétons élaborés par Anderson et coll.



Conclusion générale



CONCLUSION GENERALE

La production de béton consomme une grande quantité de ressources non renouvelables et cause une grave pollution environnementale. Le béton est composé de sable, de gravier, de ciment et d'eau, qui sont difficiles à obtenir. De plus, l'augmentation de la population a entraîné une augmentation de l'activité de construction et de la consommation de ressources naturelles. Les ressources en sable et en pierre se sont progressivement épuisées et l'exploitation minière est devenue plus difficile.

Le concept de développement durable inclut la conservation de l'énergie, la protection de l'environnement et la protection des ressources naturelles non renouvelables. En raison de l'espace limité des décharges et du coût élevé des granulats naturels, l'application des déchets concassés comme nouveau matériau doit être étudiée. La réutilisation et le recyclage des déchets sont une méthode de conservation de l'énergie dans la société moderne. La réutilisation des briques, des tuiles ou des céramiques comme granulats réduit le problème du stockage des déchets, préserve les ressources naturelles, réduit les coûts de nettoyage et d'élimination des sites et procure des avantages sociaux et économiques significatifs.

De nombreux articles de recherche ont présenté des résultats révélant diverses applications pour les granulats recyclés produites par de l'argile rouge. Elles sont réduites en poudres, en granulats fins ou en granulats grossier. Cette synthèse bibliographique est un aperçu de quelques études menés sur le recyclage des produits en argile rouge comme granulats pour béton. Les points suivants résument certaines des caractéristiques du béton fabriqué avec ces granulats :

* Le niveau de remplacement des granulats naturelles affecte les propriétés du produit final. Ainsi, L'utilisation des granulats recyclés est principalement axée sur des fins non structurelles.

*La porosité du béton augmente avec l'augmentation des granulats recyclés, ce qui accroît l'absorption d'eau, la perméabilité à l'eau du béton et le module d'élasticité.

*La porosité et l'absorption d'eau élevée, peuvent être réduites par le pré-mouillage des granulats est ce qui améliore le comportement.

*Les granulats céramiques recyclés, présentent des valeurs de force adhésive avec le liant plus élevées par rapport au granulat conventionnel.

*La résistance au retrait de séchage s'améliore avec l'augmentation de la quantité d'argile pré-humidifiées, en raison de la libération d'eau pré-stockée dans les granulats.

L'introduction de ces granulats en simultané avec des adjuvants entraineurs d'air ou des superplastifiant permet d'améliorer les caractéristiques des bétons. L'utilisation des fines comme la cendre volante ou les matériaux pouzzolanique est une voie à prospecter dans ce genre de produit.



Références bibliographiques



BIBLIOGRAPHIE

- [1]- Duggal, S. K. (2017). Building materials. 3rd Ed. New age international limited publishers.
- [2]- Momot, J. (1963). Historique et évolution du terme même d'argile. Publications de la Société Linnéenne de Lyon, 32(6), 174-176.
- [3]- DHOSSOUVI, I. (2017). ETUDE DU PHENOMENE DE GONFLEMENT LIE A LA PERMEABILITE DES ARGILEUX SOLS
- [4]- Murray, H. H. (2006). Applied clay mineralogy: occurrences, processing and applications of kaolins, bentonites, palygorskite-sepiolite, and common clays. Elsevier
- [5]- Adeyemo, A. A., Adeoye, I. O., & Bello, O. S. (2017). Adsorption of dyes using different types of clay: a review. Applied Water Science, 7, 543-568.
- [6]- Lagaly, G. (1981). Characterization of clays by organic compounds. Clay minerals, 16(1), 1-21.
- [7]- Abdelmalek, B., Reikia, B., Youcef, B., Lakhdar, B., & Nathalie, F. (2017). Mineralogical characterization of Neogene clay areas from the Jijel basin for ceramic purposes (NE Algeria-Africa). Applied Clay Science, 136, 176-183.
- [8]- Lahcene, D., Behilil, A., Zahraoui, B., Benmehdi, H., Belhachemi, M., & Choukchou-Braham, A. (2019). Physicochemical characterization of new natural clay from south west of Algeria: Application to the elimination of malachite green dye. Environmental Progress & Sustainable Energy, 38(4), 13152.
- [9]- Lamouri, B., Labadi, S. A., Boukoffa, M., Chouaf, I., Djouder, H., Djaiz, F., & Bouabsa, L. (2022). A preliminary mineralogical and physicochemical characterization of the Neogene clays from the Timgad Basin (Massif of Aurès, NE Algeria): potential use in the manufacturing of bricks and ceramic industry. SN Applied Sciences, 4(5), 149.
- [10]- Duggal, S. K. (2017). Building materials. Routledge. [11]- https://www.brique.be/media/1263/fabrication_brique.pdf#:~:text=La%20brique%20est%20un%20mat%C3%A9riau%20de%20construction%20qui,s%E2%80%99agglom%C3%A8rent%20pour%20former%20une%20masse%20%C3%A0%20caract%C3%A8re%20pierreux.

Références bibliographiques

- [12]- Mamlouk, M. S., & Zaniewski, J. P. (2018). Materials for civil and construction engineers. 4eme Ed, Pearson Education limited..
- [13]- <https://montaigu-en-vendee.fr/uploads/Poir%C3%A9/pdf/Tuilerie-fabrication.pdf>
- [14]- https://aida.ineris.fr/sites/aida/files/documents-bref/cer_bref_1206_VF_0.pdf consulté le 01/05/2015. [15]- EN 14411, (2016), Carreaux céramiques - Définitions, classification, caractéristiques, évaluation et vérification de la constance de performance et marquage.
- [16]- <https://www.algerie-eco.com/2022/01/06/ceramique-un-potentiel-a-l'export-de-300-millions-m%C2%B2/> consulté le 02/05/2025
- [17]- Juan, A., Medina, C., Guerra, M. I., Morán, J. M., Aguado, P. J., Isabel, M., & Rodríguez, O. (2010). Re-use of ceramic wastes in construction. Ceramic materials, 197-214.
- [18]- Cachim, P. B. (2009). Mechanical properties of brick aggregate concrete. Construction and Building Materials, 23(3), 1292-1297.
- [19]- Debieb, F., & Kenai, S. (2008). The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. Construction and building materials, 22(5), 886-893.
- [20]- Abdur Rashid, M., Salam, M. A., Kumar Shill, S., & Hasan, M. K. (2012). Effect of replacing natural coarse aggregate by brick aggregate on the properties of concrete. Dhaka University of Engineering & Technology journal, 1 (3), 17-22.
- [21]- Adamson, M., Razmjoo, A., & Poursaee, A. (2015). Durability of concrete incorporating crushed brick as coarse aggregate. Construction and building materials, 94, 426-432.
- [22]- Ji, Y., Wang, D., & Wang, L. (2022). Numerical and experimental investigation of recycled brick coarse aggregate concrete. Applied sciences, 12(18), 9035.
- [23]- Uddin, M. T., Mahmood, A. H., Kamal, M. R. I., Yashin, S. M., & Zihan, Z. U. A. (2017). Effects of maximum size of brick aggregate on properties of concrete. Construction and Building Materials, 134, 713- 726.
- [24]- Ceesay, A. B., & Miyazawa, S. (2019). Strength development and durability of concrete containing recycled roof tile aggregate. Recycling, 4(3), 29.
- [25]- Miličević, I., Štirmer, N., & Bjegović, D. (2017). Relation between the compressive strength and modulus of elasticity of concrete with crushed brick and roof tile aggregates. Structural concrete, 18(2), 366- 375.

Références bibliographiques

modulus of elasticity of concrete with crushed brick and roof tile aggregates. *Structural concrete*, 18(2), 366- 375.

[26]- Miličević, I., Štirmer, N., & Banjad Pečur, I. (2016). Residual mechanical properties of concrete made with crushed clay bricks and roof tiles aggregate after exposure to high temperatures. *Materials*, 9(4), 295.

[27]- Ogawa, Y., Bui, P. T., Kawai, K., & Sato, R. (2020). Effects of porous ceramic roof tile waste aggregate on strength development and carbonation resistance of steam-cured fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, 236, 117462.

[28]- Bui, P. T., Ogawa, Y., Nakarai, K., Kawai, K., & Sato, R. (2017). Internal curing of Class-F fly-ash concrete using high-volume roof-tile waste aggregate. *Materials and Structures*, 50, 1-12.

[29]- Roig-Flores, M., Reig, L., Albero, V., Hernández-Figueirido, D., Melchor-Eixea, A., Pitarch, Á. M., & Piquer, A. (2023). Utilisation of ceramic stoneware tile waste as recycled aggregate in concrete. *Buildings*, 13(8), 1968.

[30]- Keshavarz, Z., & Mostofinejad, D. (2019). Porcelain and red ceramic wastes used as replacements for coarse aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, 195, 218-230.

[31]- Daniyal, M., & Ahmad, S. (2015). Application of waste ceramic tile aggregates in concrete. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 4(12), 12808-12815. [32]- Albero, V., Reig, L., Hernández-Figueirido, D., Roig-Flores, M., Melchor-Eixea, A., Piquer, A., & Pitarch, A. M. (2024). Fire and postfire compressive strength of recycled aggregate concrete made with ceramic stoneware. *Journal of Building Engineering*, 89, 109363.

[33]- Goyal, R. K., Agarwal, V., Gupta, R., Rathore, K., & Somani, P. (2022). Optimum utilization of ceramic tile waste for enhancing concrete properties. *Materials Today: Proceedings*, 49, 1769-1775.

[34]- Elçi, H. (2016). Utilisation of crushed floor and wall tile wastes as aggregate in concrete production. *Journal of Cleaner Production*, 112, 742-752.

[35]- Anderson, D. J., Smith, S. T., & Au, F. T. (2016). Mechanical properties of concrete utilising waste ceramic as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 117, 20-28.