

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO)
Faculté du Génie de la Construction
Département de Génie Civil



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

*En vue de l'obtention du diplôme de master
de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou*

Filière : Génie Civil
Spécialité : Structures

Thème

*Etude Expérimentale D'un Béton
À Base Du Marc De Café*

Présenté par :

Mlle BOUZIANE Samia

Devant le jury composé de :

M^{me} : KHELOUI .F
M^{me} : BOUZBOUDJA.F
Mr : KACHI M. S
M^{me} : IGUETOULENE.F

Professeur à l'UMMTO
Maitre-assistante à l'UMMTO
Maitre de conférences à l'UMMTO
Maitre-assistante à l'UMMTO

Présidente
Examinatrice
Encadrant
Co -Encadrante

Promotion : 2024/2025

Remerciement

Avant tout, Toute m parfaite gratitude et remerciement à « DIEU » le clément et le miséricordieux qui m'a donné le courage, la patience et la volonté pour élaborer ce travail.

Mes vifs Remerciements reviennent en premier lieu à Madame IGUETOULENE Fatiha qui a proposé cet axe de recherche riche et passionnant ,pour son intérêt constant qu'elle a bien voulu montrer pour ce travail qu'elle a guidé par de judicieux conseils, son aide, encouragements, sa disponibilité pendant les travaux réalisés au niveau de laboratoire.

Je tien a adresser mes sincères remerciements à Monsieur KACHI Mohand Saïd pour avoir accepté l'encadrement de ce mémoire et pour ses précieux conseils ainsi que l'aide qu'il a apporté à la réalisation de ce travail.

Mes sincères remerciements vont également à Monsieur BOUAFIA Youcef, Grâce dont le dévouement, les conseils scientifiques et le suivi attentif m'ont permis de mener à bien ce projet de recherche dans de bonnes conditions.

Mes grands remerciements est et ma sympathie vont adresser aux responsables et Personnels de laboratoire Béton de L'Université Mouloud MAMMERI, en Génie Civil de TIZI OUZOU, en particulier à Monsieur BOUHERRADUA. Rachid, pour sa précieuse aide dans la réalisation de la partie expérimentale.

Mes sincères remerciements vont également à tous les enseignants du département de Génie civil de l'université de Tizi-Ouzou, qui nous ont offert tout ce savoir.

Je ne manquerais pas non plus de dire un grand merci aux membres du jury qui ont accepté d'examiné et d'évaluer ce mémoire à sa juste valeur.

SOMMAIRE

Liste Des Tableaux

Liste Des Figures

INTRODUCTION GENERALE..... 1

CHAPITRE I : BIBLIOGRAPHIE

I.1. GENERALITES SUR LE BETON.....	3
I.1.1. Définition	3
I.1.2. Historique du Béton	3
I.1.3. Composants d'un béton.....	4
I.1.3.1. Le ciment	4
I.1.3.1.1. Constituants principaux.....	5
• Clinker portland (K.....	5
• Laitier de haut fourneau (S	5
• Cendres volantes (V et W	5
Pouzzolanes naturelles (Z.....	6
I.1.3.1.2. Constituants secondaires	6
I.1.3.1.3. Classification des ciments	6
I.1.3.1.4. Principales catégories de ciments.....	7
I.1.3.2. Les granulats (sables, gravillons).....	7
I.1.3.2..1. Classe des granulats	8
I.1.3.3. L'eau.....	9
I.1.3.4. Les adjuvants.....	9
▪ Les fluidifiants (ou réducteur d'eau	9
▪ Les retardateurs de prise du ciment	10
▪ Les accélérateurs de prise du ciment	10
▪ Les entraîneurs d'air	10
I.1.3.5. Les additions minérales.....	10
Les fines actives à caractère pouzzolanique	10
• Les fines inertes comme les fillers calcaires	10
I.1.4. Les déchets	11
• Déchets dangereux.....	11
• Déchets non dangereux.....	11
• Déchets inertes.....	11
I.1.4.1. Les principaux objectifs d'utilisation des déchets	11

SOMMAIRE

I.1.4.2. Constitution chimique du déchet.....	11
I.1.4.3. Activité du recyclage des déchets en construction.....	12
• Recyclage des déchets	12
• Technique de recyclage	12
I.1.4.4. Impact du recyclage sur l'environnement	13
I.1.5. Le Marc de café.....	14
I.1.5.1. Définition	14
I.1.5.2 Historique.....	14
I.1.5.3 Composition du marc de café.....	14
I.1.5.4. Propriété du marc de café.....	17
I.1.5.4.1. Propriétés physiques du marc de café	17
▪ Le taux d'humidité	17
▪ Le Diamètre	17
▪ L'angle de talus	17
▪ La densité apparente	17
▪ La densité réelle.....	17
▪ Porosité	17
I.1.5.4.2. Les propriétés chimiques.....	18
I.2. Béton à base du Marc de Café.....	20
I.2.1. Institut (RMIT Melbourne, Australie	20
I.2.2. Université YAHIA FARES de MEDEA.....	20
I.3. Conclusion.....	21

CHAPITRE II : ETUDE EXPERIMENTALE

II.1. Introduction.....	22
II.2. Matériaux Utilisés.....	22
II.2.1. Le liant hydraulique (Ciment).....	22
II.2.1. 1. Quelques propriétés physiques du ciment	23
II.2.1. 2. Résistances caractéristique en compression du ciment.....	23
II.2.2. L'eau	23
II.2.3. Granulats.....	23

SOMMAIRE

II.2.4. Marc de café.....	23
II.3. Essais sur granulats	25
II.3.1. Analyse granulométrique	25
II.3.1.1. Description de l'essai	25
II.3.2. Masse volumique apparente et absolue.....	28
II.3.3. Module de finesse du sable (NF P18-304).....	28
II.3.4. Equivalent de sable (NF P18-598)	29
II.3.5. Porosité	30
II.3.5. 1. Définition	30
II.3.5. 2. Formule Gravimétrique de la porosité	30
II.3.5. 2.1. Calcule de la porosité des éprouvette du B/T a 28J.....	30
II.3.5. 2.2. Calcule de la porosité des éprouvettes à base de 8% du M/C à 28 jours.....	31
II.3.5. 3.Analyse et interprétation	31
II.4. Elaboration du béton au laboratoire	32
II.4.1. Formulation de béton ordinaire.....	32
II.4.2. Confection du béton.....	32
II.4.3. Présentation d'éprouvettes utilisées.....	33
II.4.4. Présentation du matériel.....	33
II.4.5. Préparation de la gâchée	34
II.4.5.1. Essai sur le béton frais	35
▪ Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams	35
II.4.5.2. Remplissage et vibration.....	37
II.4.5.3. Conservation des éprouvettes	37
II.4.5.4. La densité	38
II.4.5.1 Essai destructif.....	39
▪ Essai de compression.....	39
▪ Définition.....	39
II.5. Conclusion	39

SOMMAIRE

CHAPITRE III : RESULTATS ET INTERPRETATION

III.1. Introduction	40
III.2. Essais sur bétons	40
III.2.1. Essais sur béton frais	40
III.2.1.1. Affaissement au cône d'abrams	40
III.2.1.2. La densité	41
III.3. Essais à l'état durci	42
III.3.1. Essai de compression uni axiale	42
III.3.1.1. Principe de l'essai	42
III.3.1.2. Résultats d'essai de compression sur les bétons étudiés a 7 jours	44
III.3.1.3. Résultats d'essai de compression sur les bétons étudiés a 14 jours	44
III.3.1.4. Résultats d'essai de compression sur les bétons étudiés a 28 jours	46
III.4. Contrainte Déplacement	47
III.5. Variation massique	49
❖ La perte de masse	49
III.6. Conclusion	50
III.7. Conclusion Générale	52
III.8. Recommandation	53

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I.1 :

(a) : Le Panthéon à Rome possède la plus grande coupole en béton non armé de toute l'Antiquité.....3

(b) : Pont du Gard construit par les Romains avec des joints en mortier contenant ciment pouzzolanique3

Figure I.2: Ciment 4

Figure I.3: : Granulats du béton 7

Figure I.4: Granulats du béton : courbe granulométrique 9

Figure I.5: Le marc de café 14

Figure I.6: Le caféier et la fleur du caféier..... 15

Figure I.7: Le caféier et la fleur du caféier..... 16

Figure I.8: Grain de marc de café commercial par microscopie électronique à balayage 17

Figure I.9: : Composition chimique du café 19

Figure I.10: Résistance à la compression des BS à base du Marc de café à l'âge de 28jours 21

Chapitre II

Figure II.1: Le ciment (CPJ - CEMII /B 22

Figure II.2: Les granulats utilisés..... 23

Figure II.3: Triage et tamisage du marc de café utilisé..... 24

Figure II.4: Marc de café après tamisage 24

Figure II.5: Séchage du marc de café..... 24

Figure II.6: Séchage du marc de café..... 25

Figure II.7: Courbe Granulométrique 28

Figure II.8: Éprouvettes cylindrique utilisés..... 34

Figure II.9: Malaxeur utilise 34

Figure II.10: Table vibrante 35

Figure II.11: Mélange des matériaux après l'ajout de l'eau 36

Figure II.12: Description .d'essai. D'affaissement 37

LISTE DES FIGURES

Figure II.13: Mesure d'affaissement	37
Figure II.14: Remplissage des éprouvettes	38
Figure II.15: Conservation des éprouvettes	39
Figure II.16: Mesure de la densité du béton	39

Chapitre III

Figure III.1: Affaissement au cône d'abrams	41
Figure III.2: La densité du à base du Marc de café	41
Figure III.3: Essai de compression uni axial.	43
Figure III.4: Eprouvettes d'essai de compression	43
Figure III.5: Résistance à la compression à 7 jours.	44
Figure III.6: Rupture des éprouvettes sous sollicitation de la compression a 7 jours.....	45
Figure III.7: Résistance à la compression à 14 jours	45
Figure III.8: Rupture des éprouvettes sous sollicitation de la compression a 14 jours.....	46
Figure III.9: Résistance à la compression à 28 jours	46
Figure III.10: Rupture des éprouvettes sous sollicitation de la compression a 28J	47
Figure III.11 : Courbe de contrainte en fonction du déplacement d'une Eprouvette en béton à 7J ..	47
Figure III.12 : Courbe de contrainte en fonction du déplacement d'une éprouvette en béton contenant 4% de marc de café à 7J	48
Figure III.13 : Courbe en fonction de temps d'une eprouvette en bt à 28 Jours.....	48
Figure III.14 : Courbe en fonction de temps d'une eprouvette en b 6% MC à 28 J	49
Figure III.15: Perte de masse des BSBH a base du Marc de café.....	50

LISTE DES TABLEAUX

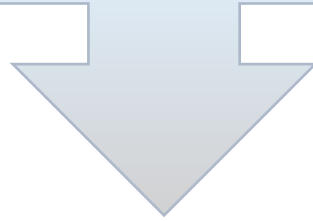
Chapitre I

Tableau.I.1 : Ordre de grandeur en proportions	4
Tableau.I.2 :Classification des ciments selon leurs résistanc	6
Tableau.I.3 : Classes des granulats selon la norme XP P 18-540	8
Tableau.I.4 : Caractéristique physique du marc de café en fonction de l'humidité.....	18
Tableau.I.5 : Composition élémentaire du marc de café.....	18
Tableau.I.6 : Les principaux composés du marc de café	20

Chapitre II

Tableau.II.1 : Composition minéralogique du ciment	22
Tableau.II.2 : Analyse granulométrique pour le sable.....	26
Tableau.II.3 : Analyse granulométrique pour le gravier 3/8.....	26
Tableau.II.4 : Analyse granulométrique pour le gravier 8/16.....	27
Tableau.II.5 : Analyse granulométrique pour une substitution de 8% du sabla par le M/C.....	27
Tableau.II.6 : Masse volumique apparente et absolue des granulats.....	28
Tableau.II.7 : Module de finesse du sable	29
Tableau.II.8 : Valeur de l'équivalent de sable	29
Tableau.II.9 : Formulations des échantillons.....	33
Tableau.II.10 : Consistance du béton	36

INTRODUCTION GENERALE



INTRODUCTION GENERALE

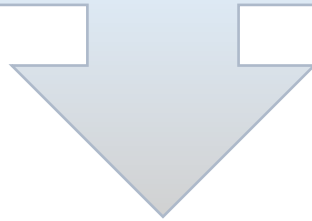
Dans le domaine de la construction, le développement des matériaux joue un rôle fondamental dans l'amélioration, de la durabilité, de la performance énergétique et de la sécurité des bâtiments. L'innovation dans ce secteur permet de créer ou de substituer des matériaux plus résistants, plus légers et plus économiques, tout en répondant aux besoins croissants d'efficacité énergétique et de réduction de l'empreinte carbone. La substitution du béton est une approche de plus en plus adoptée et un moyen efficace de répondre aux enjeux environnementaux liés à l'industrie du bâtiment. La production du béton traditionnel, en particulier celles du ciment Portland, est responsable principale d'émission de gaz à effet de serre, contribuant ainsi à l'empreinte carbone mondiale. Pour pallier cet impact, des alternatives du béton traditionnel sont en cours de développement, Le béton de chanvre, par exemple, fabriqué à partir de chaux et de fibres de chanvre, se distingue par sa légèreté, ses propriétés isolantes exceptionnelles et une empreinte carbone réduite grâce à la capacité du chanvre à capter le carbone pendant sa croissance. Une autre alternative, le béton recyclé, composé de déchets de béton broyés, permet de limiter la consommation de nouvelles ressources naturelles tout en réutilisant des matériaux provenant de la déconstruction. Les géopolymères, fabriqués à partir de résidus industriels tels que les cendres volantes ou les scories, constituent également une solution prometteuse pour remplacer le ciment Portland, offrant une résistance et une durabilité comparable.

En outre, une alternative encore plus innovante fait son apparition : l'utilisation du marc de café. Ce déchet organique, souvent jeté après la préparation du café, est de plus en plus étudié pour ses propriétés, lorsqu'il est ajouté à des mélanges de béton, en tant que substitut partiel des granulats fins ou même du ciment, le marc de café offre des avantages écologiques notables, car il permet de recycler un déchet en grande quantité et de réduire ainsi l'impact environnemental de la production de béton. Cette solution contribue à diminuer la consommation de ressources naturelles et les émissions de CO₂ tout en apportant des caractéristiques intéressantes.

Cependant, cette transition vers des matériaux plus écologiques ne se limite pas à l'innovation technologique, elle est également soutenue par des législations et des politiques publiques qui favorisent l'adoption de solutions durables dans la construction. A l'échelle européenne, la directive sur les performances énergétiques des bâtiments et la directive sur les déchets incitent à l'utilisation de matériaux recyclés ou à faible empreinte carbone. En France, des lois

telles que celle sur la transition énergétique pour la croissance verte de 2015 et la loi Climat et Résilience de 2021 visent à réduire les émissions de gaz à effet de serre dans le secteur du bâtiment et à promouvoir l'utilisation de matériaux biosourcés ou recyclés. Ces lois encouragent la recherche et l'innovation dans les substituts au béton traditionnel et soutiennent le développement de matériaux alternatifs, tels que ceux à base de marc de café. De plus, des incitations fiscales et des subventions sont parfois proposées aux entreprises qui intègrent des matériaux écologiques dans leurs projets, facilitant ainsi la transition vers des pratiques plus respectueuses de l'environnement. Enfin, la loi du 15 juillet 1975, relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux, a jeté les bases de la gestion des déchets en France, permettant l'introduction progressive de matériaux recyclés dans la construction. Cette loi, bien qu'évoluant au fil du temps, a favorisé une prise de conscience croissante sur la nécessité de réutiliser les matériaux et de soutenir l'économie circulaire, ouvrant ainsi la voie à l'intégration des déchets recyclés dans les projets de construction. Ces initiatives législatives, couplées aux avancées technologiques, jouent un rôle essentiel dans la réduction de l'empreinte carbone du secteur de la construction, tout en favorisant une approche plus durable et circulaire pour l'avenir.

CHAPITRE I
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE



I.1. GENERALITES SUR LE BETON

I.1.1. Définition

Le béton est un matériau de construction composé principalement de ciment, de granulats (sable, gravier) et d'eau. Lorsqu'il est mélangé, il forme une pâte qui durcit au fil du temps pour devenir une substance solide et résistante, cette solidité est due à une réaction chimique appelée hydratation, qui se produit entre le ciment et l'eau. Le béton est l'un des matériaux les plus utilisés dans le monde en raison de sa polyvalence, de sa durabilité et de sa capacité à être moulé dans presque toutes les formes, il peut être utilisé dans une grande variété de constructions, des bâtiments aux infrastructures comme les ponts et les routes.

I.1.2. Historique du Béton

L'histoire du béton remonte à l'Antiquité, où les Romains ont été parmi les premiers à l'utiliser de manière avancée.

Ils ont inventé un béton durcissant dans l'eau, appelé "opus caementicium", qui a été utilisé dans la construction de nombreuses structures durables, comme le Panthéon et les aqueducs, cependant le béton moderne tel que nous le connaissons aujourd'hui n'a été inventé qu'au XIX^e siècle, grâce aux travaux de l'ingénieur britannique Joseph Aspdin. En 1824, il a breveté le ciment Portland, un ingrédient clé du béton moderne.

L'industrialisation et les progrès techniques du XX^e siècle ont permis au béton de se démocratiser, devenant ainsi un matériau essentiel dans la construction moderne.



Figure I.1: (a) : Le Panthéon à Rome possède la plus grande coupole en béton non armé de toute l'Antiquité. [1].

(b) : Pont du Gard construit par les Romains avec des joints en mortier contenant ciment pouzzolanique

I.1.3. Composants d'un béton

Le béton est un matériau de construction composite fabriqué à partir des matériaux de base qui sont : les granulats naturels (sable, gravillons) ou artificiels (granulats légers) agglomérés par une pâte (ciment, eau). Chaque constituant joue un rôle bien défini : liant hydraulique pour la pâte de ciment, remplissage atténuateur de variations volumiques et source de résistance pour les granulats. [2]. Le béton est constitué généralement de : (Tableau I-1)

Tableau I-1: Ordre de grandeur en proportions

	Eau	Air	Ciment	Granulats
Volume	14 % - 22 %	1 % - 6 %	7 % - 14 %	60 % - 75 %
Poids	5 % - 9 %	9 % - 18 %	63 % - 85 %

I.1.3.1. Le ciment [3]

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine s'hydratant en présence d'eau. Il forme une pâte faisant prise qui durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide



Figure I.2 : Ciment.

I.1.3.1.1. Constituants principaux

Les ciments courants ont pour constituant le clinker, auquel il peut être ajouté suivant leur type : du laitier de haut fourneau, des cendres volantes, de la pouzzolane naturelle.....

Dans le but de modifier certaines de leur propriétés et de proposer une gamme de produits capables de résoudre les différents problèmes qui se posent lors de la réalisation de certains ouvrages, soit en raison des conditions d'environnement.

- **Clinker portland (K)**

C'est un produit obtenu par cuisson du mélange calcaire + argile, dosé et homogénéisé et comprenant principalement de la chaux (CaO), de la silice (SiO₂) et de l'alumine (Al₂O₃).

Le mélange est en général constitué de produits naturels de carrière (calcaire, argile, marne, ...). C'est le clinker qui, par broyage, en présence d'un peu de gypse jouant le rôle de régulateur, donne les ciments « Portland ». Les quatre principaux constituants du clinker sont :

- le silicate tricalcique : Si₃CaO (ou S),
- le silicate bicalcique : Si₂CaO (ou S),
- l'aluminate tricalcique : A₃CaO (ou A),
- l'aluminate-ferrite tétracalcique : A₄CaO (ou AF).

- **Laitier de haut fourneau (S)**

Le laitier, sous-produit de fabrication de la fonte (brusquement refroidi par aspersion d'eau), est un matériau hydraulique dont la composition chimique est : l'oxyde de calcium dans des proportions allant de 40 à 50 %, la silice (25 à 35 %), l'alumine (12 à 30 %) et la magnésie ainsi que d'autres oxydes en très faibles quantités.

- **Cendres volantes (V et W)**

Les cendres volantes, produits pulvérulents de grande finesse, proviennent du dépoussiérage des gaz des chaudières des centrales thermiques. Elles peuvent être : Siliceuses (V), constituées de silice réactive (40 à 55 %) et d'alumine (20 à 30 %), ou calciques (W) avec une proportion de chaux réactive supérieure à 5 %.

- **Pouzzolanes naturelles (Z)**

Les pouzzolanes naturelles sont des produits d'origine volcanique ou des roches sédimentaires. Elles sont composées de silice réactive (dans des proportions supérieures à 25 %), d'alumine et d'oxyde de fer.

I.1.3.1.2. Constituants secondaires : Ils peuvent être :

- Soit l'un des constituants définis précédemment s'ils sont en proportion $\leq 5\%$, (Exception faite du clinker) ;
- Soit des fillers (F), leur nature exacte et leur proportion devant d'ailleurs être précisées par le fabricant dès que cette proportion dépasse 3%.

Lorsque le constituant secondaire est un filler, il s'agit de poudres minérales très fines, généralement inertes mais pouvant parfois présenter des propriétés légèrement hydrauliques ou pouzzolaniques. Ces poudres peuvent améliorer la maniabilité du ciment ; ce qui conduit à une augmentation de la maniabilité du béton.

I.1.3.1.3. Classification des ciments

Les ciments courants sont classés en fonction de leurs résistances mécaniques à la compression ; exprimées en MPa à 28 jours.

La norme spécifiant une limite inférieure et une limite supérieure dont les valeurs sont les suivantes (tableau I-2) :

Tableau I.2 : Classification des ciments selon leurs résistances (NA 42V 2013)

Classe des ciments	Résistance à 2 jours (MPa)	Résistance minimale à 7 jours (MPa)	Résistance maximale à 28 jours (MPa)
32,5	/	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$
32,5R	$\geq 13,5$	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$
42,5	$\geq 12,5$	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$
42,5R	≥ 20	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$
52,5	≥ 20	$\geq 52,5$	/
52,5R	≥ 30	$\geq 52,5$	/

Les classes « R », rapides, présentent aux jeunes âges des caractéristiques mécaniques plus élevées et trouvent leur intérêt particulièrement dans certaines circonstances telles que le bétonnage par temps froid, décoffrage rapide, préfabrication ...

I.1.3.1.4. Principales catégories de ciments

La norme P 15. 301 [4] distingue 4 catégories ; à savoir

- le ciment portland artificiel (C.P.A) qui contient au moins 97 % de clinker, le reste est du filler ;
- le ciment portland composé (C.P.J) qui contient au moins 65 % de clinker, le reste est l'un ou plusieurs des autres constituants définis précédemment ;
- Le ciment de haut fourneau (C.H.F) qui contient entre 60 et 75 % de laitier, le reste des constituants est du clinker ou un filler dans la limite de 3% de l'ensemble des constituants ;
- Le ciment de laitier au clinker (C.L.K) qui contient au moins 80 % de laitier, le reste est du clinker ou un filler dans la limite de 3% également.

I.1.3.2. Les granulats (sables, gravillons)

Les granulats sont définis comme l'ensemble de grains inertes (sable, graviers et cailloux) dont l'origine peut être naturelle ou artificielle.

Nous distinguons les granulats roulés extraits de ballastières naturelles ou de rivières, et les granulats concassés obtenus à partir des roches concassées exploitées en carrières. Les granulats sont classés selon les dimensions des grains qui les constituent et la courbe granulométrique représente la distribution, en pourcentage, des poids des matériaux passants dans des tamis de dimensions normalisées [5].



Figure I.3 : Granulats du béton.

Ils ont un rôle important dans la résistance mécanique et dans la consistance du béton selon :

- leur qualité mécanique ;
- leur capacité d'adhérence avec la pâte liante ;
- leur forme (roulés ou concassés) ;
- leur diamètre maximal.

I.1.3.2.1. Classe des granulats

Les granulats sont classés en fonction de leur granularité (distribution dimensionnelle des grains) déterminée par analyse granulométrique à l'aide de tamis.

Un granulat est désigné par sa classe granulaire exprimée par le couple d/D ou 0/D avec :

d : dimension inférieure du granulat.

D : dimension supérieure du granulat.

Tableau I.3 : Classes des granulats selon la norme XP P 18-540.

Classe	Dimension	Caractéristique
Fillers	0/D	$D < 2$ mm avec au moins 85 % de passant à 1,25 mm et 70 % de passant à 0,063 mm
Sablons	0/D	$D \leq 1$ mm avec moins de 10 % de passant à 0,063 mm
Sables	0/D	$d = 0 \leq D \leq 4$ mm
Graves	0/D	$D \geq 6,3$ mm
Gravillons	d/D	$D \geq 2$ mm et $D \leq 63$ mm
Ballasts	d/D	$d = 31,5$ mm et $D = 50$ ou 63 mm

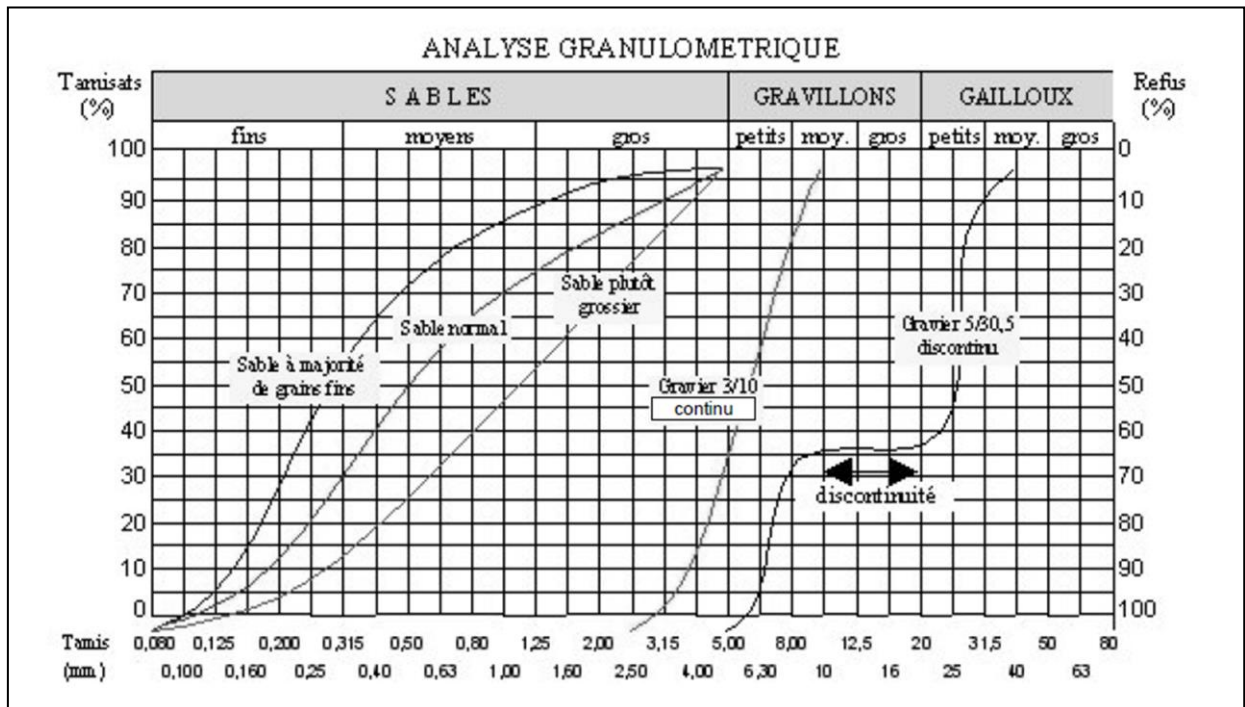


Figure I.4 : Granulats du béton : courbe granulométrique.

I.1.3.3. L'eau

Nécessaire à l'hydratation du ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier (effet lubrifiant). La qualité de l'eau a une influence sur les caractéristiques du béton, les eaux ne doivent contenir ni composés risquant d'attaquer chimiquement le ciment, les granulats ou les armatures, ni particules en suspension dont la quantité pourrait modifier ses qualités originelles. Il convient donc d'y apporter une grande attention surtout lors de l'emploi d'eau de rejet ou de lavage.

I.1.3.4. Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques, incorporés au béton frais en faibles quantités, permettant d'améliorer certaines de ses propriétés. Leur efficacité est liée à l'homogénéité de leur répartition dans le béton. Les principaux adjuvants [6], [7] sont :

- **Les fluidifiants (ou réducteur d'eau) :** Ces produits jouent un double rôle. Ils sont utilisés pour fluidifier le béton et permettre le maintien du rapport E/C (Eau/Ciment) constant (fixé pour une résistance souhaitée). Ils permettent aussi, dans certains cas, de réduire le rapport E/C pour avoir une meilleure résistance tout en ayant la même fluidité du béton [8].

Dans le premier cas, l'ajout du fluidifiant va permettre d'avoir des bétons de même classe de résistance mais de consistance variable ; allant d'un béton ferme, béton plastique, béton très plastique jusqu'au béton auto-plaçant. Dans le cas des bétons autobloquants, on utilise des super-plastifiants qui sont des fluidifiants très puissants.

- **Les retardateurs de prise du ciment** : dans le cas du bétonnage en temps chaud ou bien d'éléments massifs, il est conseillé d'utiliser un retardateur de prise pour freiner les réactions d'hydratation et aussi réduire la chaleur au cœur du béton, de manière à ce que les propriétés du béton soient préservées et le béton ne fissure pas. Ils sont aussi employés pour éviter toute discontinuité lors de reprises de bétonnage.
- **Les accélérateurs de prise du ciment** : pour le bétonnage en temps froid, il est conseillé d'utiliser les accélérateurs de prise pour, dans ce cas, provoquer les réactions d'hydratation et accélérer le durcissement du béton freiné par la température ambiante. Les accélérateurs de prise permettent de réduire les délais de chantier, car ils permettent d'obtenir les résistances prévues pour 28 jours à des âges avancés.
- **Les entraîneurs d'air** : ils permettent d'entraîner, à l'intérieur du béton, des microbulles d'air parfaitement réparties qui serviront d'espace d'expansion dans le béton durci. Ces microbulles permettent d'améliorer la durabilité du béton soumis à l'action du gel et du dégel. Ils améliorent la résistance du béton sous l'action des incendies.

I.1.3.5. Les additions minérales

Il existe deux catégories de fines minérales :

- **Les fines actives à caractère pouzzolanique** : ce sont des particules de faibles diamètres qui ajoutées en quantités de l'ordre de 10 % du poids de ciment, améliorent notablement les performances de résistances et de durabilité du béton grâce à leurs propriétés pouzzolaniques (cendres volantes, fumée de silice, laitier...) [9], [10].
- **Les fines inertes comme les fillers calcaires** : l'objectif dans leur utilisation est d'améliorer la compacité du béton et donc sa résistance. Elles sont également utilisées pour améliorer la consistance des bétons notamment dans le cas des bétons autoplaçants qui nécessite une forte teneur en fines pour assurer au BAP un compromis entre une bonne fluidité apportée par les fluidifiants et une bonne viscosité que l'on essaye d'avoir par l'introduction des fillers.

I.1.4. Les déchets

Un déchet est, selon la loi du 15 juillet 1975 relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux du code de l'environnement Français : *“tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau ou produit, ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon”*.

Selon les critères liés à : la nature, l'origine, le type de collecte, la composition, la consistance, l'hétérogénéité, etc..., on considère 3 grandes catégories de déchets :

- **Déchets dangereux** : ils sont potentiellement le plus polluant pour l'environnement et créant le plus de dangers pour la santé humaine. Ce déchet nécessite des précautions particulières vis-à-vis de la protection de l'environnement.
- **Déchets non dangereux** : Ce sont les déchets industriels ordinaires qui ne contiennent pas de substances toxiques ou dangereuses. Ils sont assimilables à un déchet de consommation ou à des ordures ménagères.
- **Déchets inertes** : Ils sont souvent solides (minéraux) ne subissant aucune transformation Physique ou chimique importante : pavés, sables, gravats, tuiles, béton, carrelage. Ils ne sont pas biodégradables et n'affectent pas les matières avec lesquelles ils entrent en contact d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine. Ils proviennent des chantiers de construction, mais aussi des mines et des carrières.

I.1.4.1. Les principaux objectifs d'utilisation des déchets sont

- ✓ Réduire la production des déchets ;
- ✓ Valoriser les déchets par réemploi, recyclage ou toute autre action visant à obtenir, à partir des déchets, des matériaux réutilisables ou de l'énergie ;
- ✓ Assurer l'information du public sur les effets pour l'environnement et la santé publique.

I.1.4.2. Constitution chimique du déchet

Les déchets sont pour la plupart constitués des mêmes molécules chimiques que celles des produits. Ce qui différencie les déchets des autres produits provient d'un certain nombre de particularités. Certains déchets résultent du traitement involontaire de molécules usuelles avec production de sous-produits de composition, a priori inconnu. Par ailleurs, le déchet peut se retrouver dans un milieu dont il n'est pas issu en tant que produit et de ce fait auquel il n'est pas destiné. Enfin, le mélange au hasard des déchets peut conduire à la formation de produits nouveaux.[11].

I.1.4.3. Activité du recyclage des déchets en construction

- **Recyclage des déchets**

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets et de réintroduction des matériaux qui en sont issus, dans un nouveau cycle de vie. L'un des exemples les plus connus illustrant ce procédé est celui de la fabrication de bouteilles en verre grâce aux bouteilles usagées. Le verre est recyclable à l'infini.

Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures : la réduction du volume des déchets, et donc de la limitation de la pollution qu'ils causeraient (certains matériaux mettent des décennies, voire des siècles à se dégrader) et la préservation des ressources naturelles, car la matière recyclée est utilisée à la place de celle qu'on aurait dû extraire.[12].

Le recyclage s'inscrit dans la stratégie de traitement des déchets dite des trois R :

- Réduire, qui regroupe tout ce qui concerne la réduction de la production de déchets.
- Réutiliser, qui regroupe les procédés permettant de donner à un produit usagé un nouvel usage.
- Recycler, qui désigne le procédé de traitement des déchets par recyclage.[13]

- **Technique de recyclage**

Le recyclage est l'ensemble des techniques ayant pour objectif de récupérer et traiter des déchets pour réintroduire dans le cycle de production d'un produit, les matériaux qui constituaient les déchets.

Le recyclage s'effectue en 3 étapes : la collecte des déchets par tri sélectif, la transformation et la commercialisation.[13]

Il existe 3 types de recyclage :

- a) Le recyclage chimique : qui utilise des réactions chimiques pour traiter les déchets ayant pour objectif de séparer les composants d'un même produit,
- b) Le recyclage mécanique : qui utilise des machines pour transformer les déchets comme l'utilisation de broyeur,
- c) Le recyclage organique : qui consiste après compostage ou fermentation à produire des engrais ou du carburant tel que le biogaz. [13]

I.1.4.4. Impact du recyclage sur l'environnement

La récupération des déchets touche deux impacts très importants, l'impact environnemental qui est résout par l'évacuation de ces déchets et l'impact économique qui est l'utilisation de ces derniers dans l'industrie ou dans le domaine de la construction, ces déchets ont l'avantage d'être disponibles en grande quantité et avec de faible valeur marchande [14].

Le recyclage de déchets permet de :

- ✓ Réduire l'extraction de matières premières
- ✓ Réduire des pollutions et nuisances
- ✓ Préservé de la diversité biologique et des espaces naturels
- ✓ Protection des recoures naturels
- ✓ La protection de l'atmosphère
- ✓ Contrôle et déduire des déchets dangereux

I.1.5. Le Marc de café**I.1.5.1. Définition**

Le marc de café est un « déchet de café » (Figure I.5) désigne les résidus solides restants de l'infusion du café, après avoir été moulu et extrait avec de l'eau bouillante ou de la vapeur d'eau, le marc de café constitue, selon Barbera (1965), environ les (60%) du poids initial des grains de café non torréfiés.

Il existe près de 90 variétés de café, mais deux espèces sont principalement cultivées :

Coffea canephora connu sous le nom de Robusta et *Coffea arabica*. Le café Arabica du Brésil et des pays d'Amérique du Sud représente environ 75% de la production mondiale tandis que le café Robusta du Vietnam et des pays africains représente les 25% restants. Les conditions de culture de leurs arbres sont différentes puisque le caféier *Arabica* a besoin d'ombre et de températures douces, tandis que le caféier *Robusta* peut résister à des conditions difficiles de températures et d'humidité. .[15]



Figure I.5 : Le marc de café.

I.1.5.2 Historique

S'il existe de nombreuses légendes concernant l'origine et l'utilisation du café comme boisson, la plus connue reste celle de Kaldi . Kaldi était un éleveur de chèvres éthiopien vers l'an 850 qui remarqua que ses chèvres devenaient euphoriques et restaient éveillées la nuit après avoir brouté des baies du caféier. Essayant à son tour les séries que les chèvres avaient consommées, il ressentit la même vitalité, et prépara ainsi la première boisson au café. Depuis, le café n'a cessé de se démocratiser au fil des siècles, du Jardin des Plantes de Louis XIV aux champs de bataille des soldats de la Seconde Guerre Mondiale, devenant ainsi un véritable phénomène de société. [16]

I.1.5.3 Composition du marc de café

La composition du marc de café est essentiellement faite de caféine. La caféine, aussi désignée sous les noms de théine, guarani, triméthylxanthine ou méthyl théobromine est un alcaloïde de la famille des méthylxanthines, présent dans de nombreux aliments, qui agit comme stimulant psychotrope et comme léger diurétique. La caféine a été découverte en 1819 par le chimiste allemand Friedlieb Ferdinand Runge. Il la nomma « **Caféine** » en tant que

composé chimique du café, qui en français devint caféine» La caféine est présente dans les graines, les feuilles et les fruits de différentes plantes où elle agit comme insecticide naturel, paralysant ou tuant les insectes qui s'en nourrissent [17].

La caféine, extraite des graines du caféier (Plante : Fig : I.6), est chimiquement identique la guaranine, extraite de graines de guarana, La matéine, contenue dans les infusions de feuilles de yerba maté- et La théine, contenue dans les infusions de feuilles et bourgeons de théier.

C'est donc une même molécule, de formule brute $C_8H_{10}N_4O_2$, avec les mêmes effets – mais elle n'est consommée ni seule, ni de la même manière, ni à la même concentration. Ces noms sont donc synonymes et seule change la provenance.



Figure I.6 : Le caféier et la fleur du caféier.

La durée de vie d'un caféier est d'environ 60 ans. Néanmoins après 30 ans la production de l'arbuste va diminuer peu à peu.

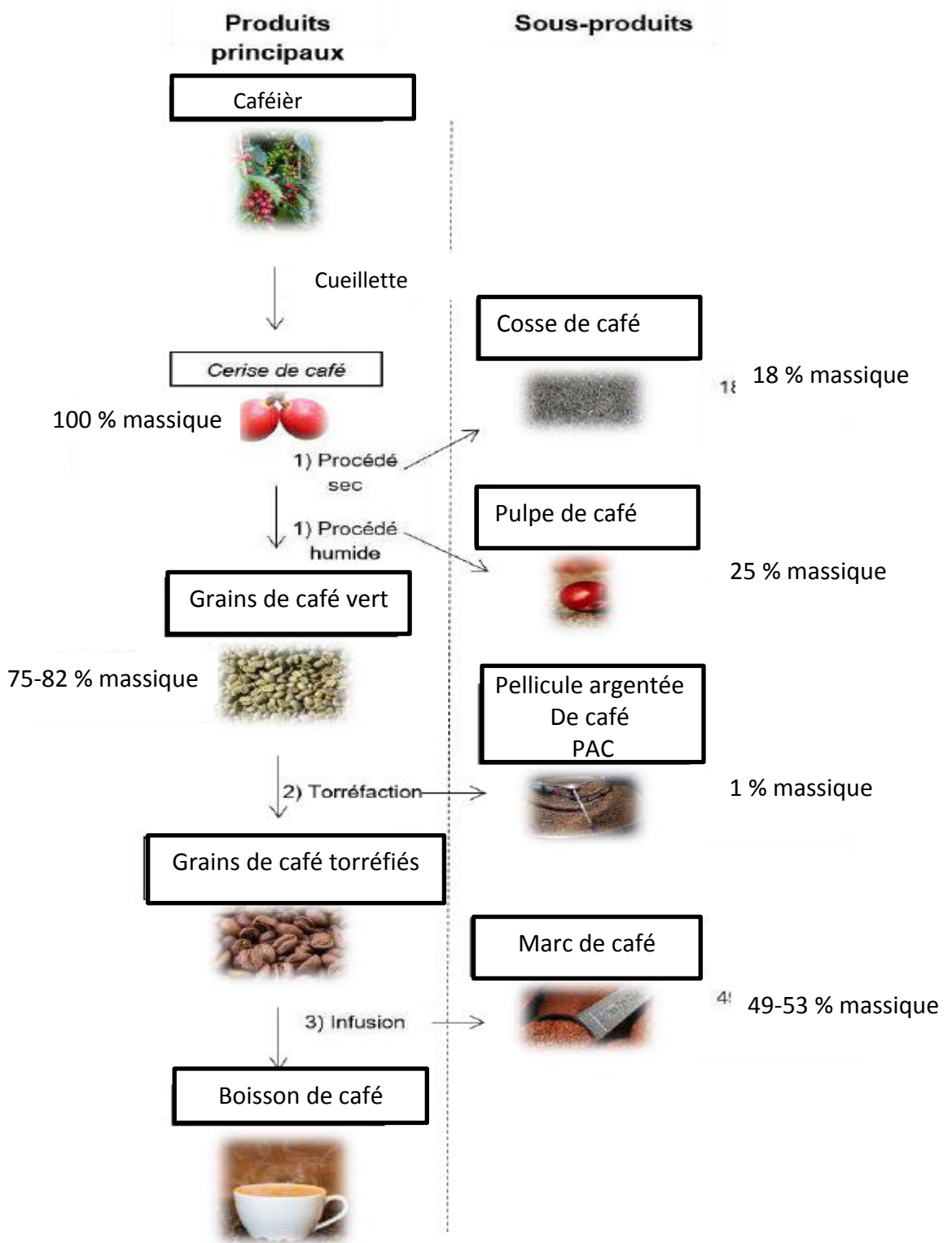


Figure 1.7 : Le caféier et la fleur du caféier. [16]

I.1.5.4. Propriété du marc de café

Le marc de café possède plusieurs propriétés, physiques, chimiques et également bioactives.

I.1.5.4.1. Propriétés physiques du marc de café

- **Le taux d'humidité :** Il varie entre 55 et 80 % [18]. Plus l'humidité est grande plus la croissance Microbienne est favorisée, donc des stratégies de conservations optimales sont nécessaire afin de récupérer une matière de qualité. Ces stratégies peuvent représenter des coûts économiques Supplémentaires pour le transport [19].
- **Le Diamètre :** Le diamètre des grains du marc de café séchés varie entre 50 et 100 μm pour le marc de Café commercial. Cependant, ce diamètre augmente avec le taux d'humidité. En effet, lorsque le marc de café devient de plus en plus humide, l'adhésion entre les grains augmente et ces derniers forment des agglomérats de plus grande taille.

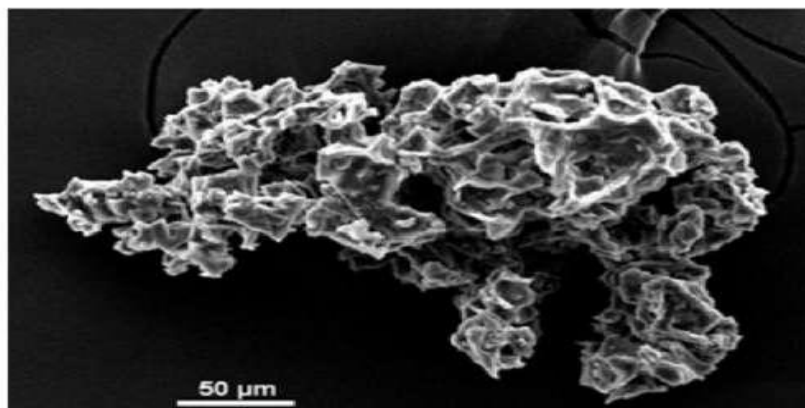


Figure I.8 : Grain de marc de café commercial par microscopie électronique à balayage

- **L'angle de talus :** Une donnée utile pour déterminer les superficies nécessaires des aires d'entreposage du Marc de café après l'avoir récupéré. L'angle de talus quant à lui reste le même, peu importe le taux d'humidité du marc de café.
- **La densité apparente :** La densité apparente du marc de café est environ $0,42\text{g/cm}^3$ [13].
- **La densité réelle :** La densité réelle est d'environ $1,16\text{g/cm}^3$.
- **Porosité :** Les grains du marc de café ne possèdent pas de micropores. En général, la porosité est de 0,63, peu importe le taux d'humidité et la taille des pores est d'environ 10 μm . [20]. Toutefois, cette porosité peut être augmentée si nécessaire en diminuant la

crystallinité du marc de café en dégradant sa matrice cellulose-lignine [20]. Enfin, la surface des grains est de charge négative [22].

Tableaux I.4: Caractéristique physique du marc de café en fonction de l'humidité (Silva et al., 2012).

Humidité (%)	Angle de talus (°)	Densité apparente (g/cm ³)	Densité réelle (g/cm ³)	Diamètre (µm)	Porosité
0,00	s.d	s.d	1,20	20-100	s.d
15,20	38,70	0,43	1,16	583,00	0,63
17,70	37,80	0,43	1,16	617,00	0,63
43,10	37,70	0,41	1,11	880,00	0,63

I.1.5.4.2. Les propriétés chimiques

Le carbone est l'élément majoritaire du marc de café. Le tableau I.5 présente la composition élémentaire du marc de café. [23]

Tableau I.5 : Composition élémentaire du marc de café.

Eléments	Quantités
Carbone (C)	49,7%
Hydrogène (H)	s.d
Azote (N)	2,3%
Oxygène (O)	s.d
Ratio H/C	s.d
C/N	22

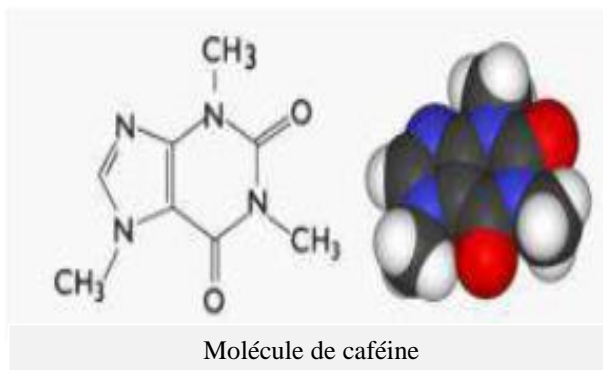


Figure I.9 : Composition chimique du café.

La composition du marc de café est essentiellement faite de polysaccharides, de lipides, de protéines, de polyphénols et de minéraux [17].

- **Matrice lignocellulosique :** Le marc de café est reconnu comme une source importante de glucine (cellulose), des hémicelluloses et de la lignine étant les principaux composants de la biomasse lignocellulosique. La teneur en lignine est faible dans les grains de café, environ 5 % cependant, après la production de café soluble, le marc de café s'enrichit en teneur de lignine [24].
- **Les glucides :** Ils sont les éléments les plus abondants dans le marc de café. Plus précisément, le marc de café contient 46,8 % de mannose, 30,4 % de galactose, 19 % de glucose et 3,8 % d'arabinose.

Ces données varient d'une étude à l'autre, cela pouvant être dû à la variété des grains de café utilisés. Dans le marc de café expresso, le galactomannane est le plus abondant et représente 50% des glucides [25].

- **Les lipides :** Les données varient principalement entre 9,3 % et 16,2 %, parfois aux alentours de 20 %, de plus, cet ordre de grandeur ne varie pas significativement entre l'arabica et le robusta. Aussi, les lipides du marc de café sont composés de 84,4 % de triglycérides [26].
- **Les protéines :** Selon les études et est de même ordre chez l'arabica ou le robusta les données varient principalement entre 6,7 et 14 %. Cependant, il se peut que ces estimations soient sur évaluées à cause de la présence d'autres composés contenant de l'azote tel que la caféine ainsi que plusieurs acides aminés. En effet, 17 acides aminés présents sont présents dans le marc de café, dont les neuf acides aminés essentiels. Ces derniers représentent presque 50 % des acides aminés présents. Il possède une forte concentration en acides aminés à chaîne latérale ramifiée (BCAA) [26]. (Tableau I.6)

Tableau I.6 : Les principaux composés du marc de café (Limousy et al., 2013)

Elément	Quantités
Glucides	45,3%
Lipides	(9,3-16,2) %
Protéines	14%
Minéraux	6 800 mg/ kg de matière sèche
Polyphénols	13-18 mg acide gallique éq

I.2. Béton à base du Marc de Café

La recherche sur l'utilisation du marc de café dans le béton a attiré l'attention de plusieurs chercheurs et institutions à travers le monde. Voici quelques-uns des principaux contributeurs à ce domaine innovant :

I.2.1. Institut ROYAL DE TECHNOLOGIE de MELBOURNE (RMIT Melbourne, Australie)

Dr RAJEEV et all [28], ont mené des recherches pionnières sur l'utilisation du marc de café dans le béton, Leur approche consiste à transformer le marc de café usagé en résidu solide par pyrolyse de marc du café à 350°C, puis à l'incorporer dans le béton pour remplacer jusqu'à 15 % du sable, améliorant ainsi la résistance du béton et réduisant son empreinte carbone. Cette méthode a été testée dans des projets réels, notamment des trottoirs dans la municipalité de Macedon Ranges et en collaboration avec l'entreprise de construction BildGroup [28].

I.2.2. Université YAHIA FARES de MEDEA

BOUKERMA et all [29] ont étudié l'effet de substitutions de (0% , 5% ,10% , 15% et 20%) de sable de dune et de concassage par les déchets de marc de café sans le transformer en biochar sur les résistances mécanique de béton de sable, ils ont trouvé que plus le pourcentage de déchet de café augmente plus les résistances mécanique diminuent.

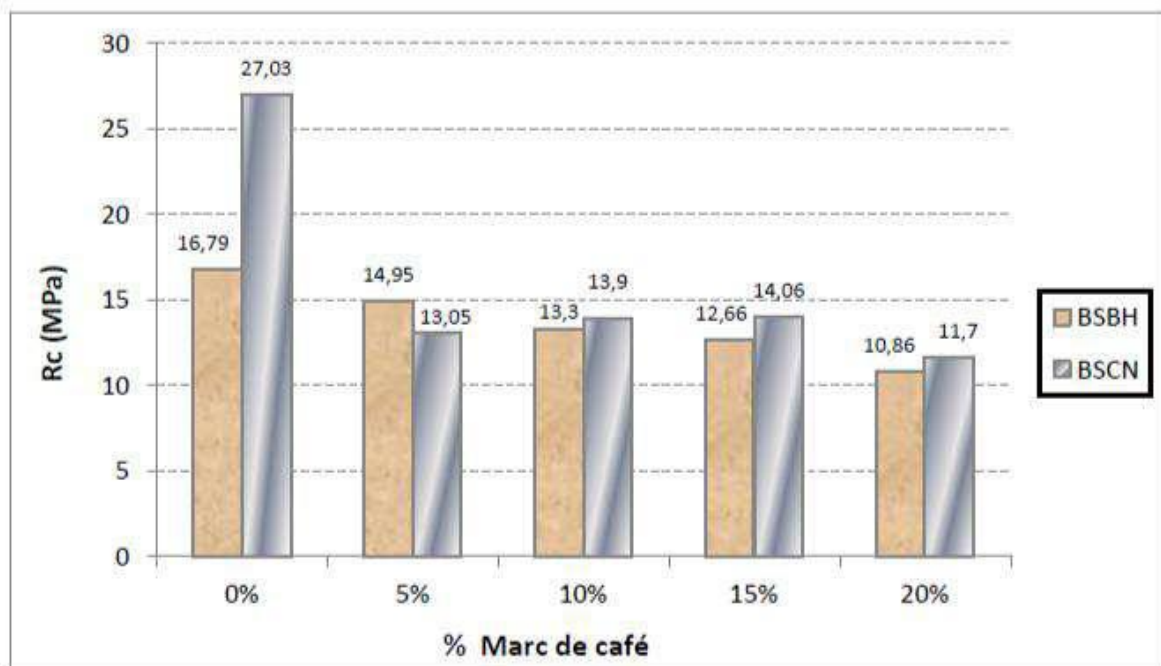


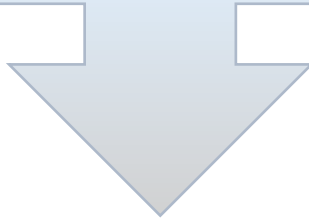
Figure1.10 : Résistance à la compression des BS à base du Marc de café à l'âge de 28jours [10].

I.3. Conclusion

Les déchets constituent un défi majeur, présent dans toutes les formes de vie biologique ainsi que dans les activités industrielles, agricoles et urbaines. Leur gestion appropriée est donc un impératif pour les collectivités. Les déchets, étant avant tout des matières, sollicitent les domaines de la biophysicochimie, de la mécanique et de la thermique pour leur traitement. L'intégration des déchets dans des processus comme la fabrication du béton représente une solution innovante permettant à la fois de valoriser ces résidus et de réduire l'empreinte environnementale de l'industrie de la construction.

Dans ce chapitre, nous avons abordé une généralité sur le béton ainsi que les catégories des déchets. Nous avons également présenté le Marc de café (définition, origine, composition, propriétés), avant de conclure par quelques modèles de comportement du béton en compression.

CHAPITRE II
ETUDE EXPERIMENTALE



II.1. Introduction

Le but du présent chapitre est de d'expliquer les différentes étapes et procédures expérimentales mis en œuvre lors de notre étude, menée au laboratoire Génie Civil de l'Université MOULOUD MAMMARI, Tizi-Ouzou.

- Dans la première partie, nous présentons les caractéristiques des différents constituants entrant dans la composition du béton ordinaire, en effectuant plusieurs tests d'identification tels que l'analyse granulométrique, la détermination de la densité et du taux d'absorption.
- La seconde partie porte sur la méthode de formulation adoptée pour les différentes compositions du béton, ainsi que les essais réalisés au cours de notre investigation sur le béton à l'état frais et à l'état durci.

II.2. Matériaux Utilisés

Les constituants de base d'un béton ordinaire (ou courant) sont le ciment, l'eau et les granulats.

II.2.1. Le liant hydraulique (Ciment)

Le ciment utilisé dans cette étude est produit par l'entreprise LAFARGE du type

CPJ CEM II / B : 65 à 79% clinker est aussi conforme à la norme Algérienne (NA) et européenne (EN 197-1).

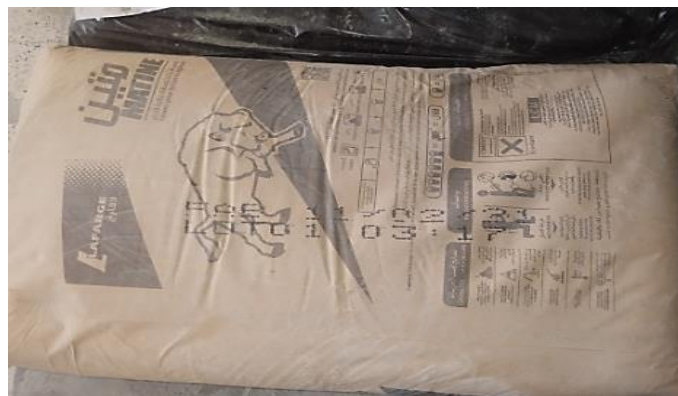


Figure II.1 : Le ciment (CPJ - CEMII /B).

Certaines caractéristiques sont présentées dans ce tableau II.1

Tableau II.1 : Composition minéralogique du ciment.

Composant	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Pourcentage	58 - 64	12 - 18	6 - 8	10 - 12

II.2.1.1. Quelques propriétés physiques du ciment utilisé

- Surface spécifique : 4 150 – 5 250 cm²/g
- Masse spécifique : $\rho = 3,1\text{g/cm}^3$
- Retrait à 28j : < 1 000 $\mu\text{m/m}$.

II.2.1.2. Résistances caractéristique en compression du ciment

- 2 jours : 10 MPa
- 28 jours : 42,5 MPa

II.2.2. L'eau

L'eau utilisée dans cette étude est l'eau de robinet, qui est une eau potable.

II.2.3. Granulats

Les granulats utilisés dans cette étude sont concassés et provient d'une carrière.

Ces granulats sont de trois classes granulaires délivrées sous les appellations commerciales suivantes :

- Sable 0/3,
- Gravier 3/8,
- Gravier 8/15.



Figure II.2 : Les granulats utilisés.

II.2.4. Marc de café

Ce sont des déchets sous forme d'une poudre (Fig.II.2) légère, leur densité est inférieure à celle de l'eau. Le marc de café usagé a été collecté dans un café situé sur les alentours de l'Université UMMTO. Le marc collecté était complètement humide, Dès la collecte, il a été trié et tamisé puis séché dans l'étuve à 105 °C pendant 24 heures au laboratoire, Ensuite, il a été placé dans un four pendant quelques minutes avant d'être laissé refroidir à température ambiante. Une fois prêt, il a été incorporé dans le béton en remplaçant partiellement le sable, selon une substitution volumique avec des pourcentages de 4 %, 6 %, 7% et 8 %.



Figure II.3 : Tamisage du marc de café utilisé.



Figure II.4 : Marc de café après tamisage.



Figure II.5 : Séchage du marc de café.

II.3. Essais sur granulats

II.3.1. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles des grains constituant l'échantillon. L'essai consiste à fractionner, au moyen d'une série de tamis, un matériau en plusieurs catégories des grains de diamètre décroissant Fig II.5.



Figure II.6 : Séchage du marc de café.

II.3.1.1. Description de l'essai

Les granulats utilisés pour préparer le béton sont de forme concassée, leur diamètre est de 0/3,3/8 et de 8/15. Une fois lavés, ces matériaux sont séchés. On emboîte les tamis les uns sur les autres dans un ordre décroissant du fond de la colonne vers le bas. En partie inférieure, on dispose un fond étanche qui permettra de récupérer les fillers. Un couvercle sera disposé en haut de la colonne afin d'interdire toute perte de matériau pendant le tamisage. On appellera tamisât le poids de matériau passant à travers un tamis donné et refus le poids de matériau retenu par ce même tamis. Le matériau étudié est versé en haut de la colonne de tamis et celle-ci est vibrée à l'aide de la tamiseuse électrique. On considère que le tamisage est terminé lorsque le refus ne varie pas. Le refus du tamis ayant la plus grande maille est pesé. Soit R1, la masse de ce refus. Le refus du tamis immédiatement inférieur est pesé avec le refus précédent. Soit R2, la masse des deux refus. Cette opération est poursuivie pour tous les tamis pris dans l'ordre des ouvertures décroissantes. Ceci permet de connaître la masse des refus cumulés R_n, aux différents niveaux de la colonne de tamis. Le tamisât présent sur le fond de la colonne de tamis est également pesé. Les résultats des différents tamisages sont présentés dans les tableaux (II.2, II.3, II.4, II.5).

Note : Pour des raisons du manque de certains tamis dans notre laboratoire, nous avons adapté notre série de tamis de façon à ce qu'elle soit la plus proche possible de celle définie par la norme (EN 933-1 et EN 933-2).

Tableau II.2 : Analyse granulométrique pour le sable.

Mailles des Tamis (mm)	Refus Partiel (g)	Refus Cumulés (g)	Refus Cumulés (%)	Tamisât Cumulés (%)
5	15,00	15	1%	99%
3,15	105,00	120	8%	92%
2,5	130,00	250	17%	83%
1,25	445,00	695	46%	54%
0,63	320,00	1 015	68%	32%
0,315	210,00	1 225	82%	18%
0,16	175,00	1 400	93%	7%
0,08	65,00	1 465	98%	2%
Fond	35,00	1 500	100%	0%

Tableau II.3 : Analyse granulométrique pour le gravier 3/8

Mailles des Tamis (mm)	Refus Partiel (g)	Refus Cumulés (g)	Refus Cumulés (%)	Tamisât Cumulés (%)
8	0,00	0	0%	100%
6,3	95,00	95	5%	95%
5	640,00	735	37%	63%
4	425,00	1 160	58%	42%
3,15	520,00	1 680	84%	16%
Fond	320,00	2 000	100%	0%

Tableau II.4 : Analyse granulométrique pour le gravier 8/16.

Mailles des Tamis (mm)	Refus Partiel (g)	Refus Cumulés (g)	Refus Cumulés (%)	Tamisât Cumulés (%)
16	40,00	40	2%	98%
12,5	425,00	465	19%	81%
10	740,00	1 205	48%	52%
8	605,00	1 810	72%	28%
Fond	690,00	2 500	100%	0%

Tableau II.5 : Analyse granulométrique pour une substitution de 8% du sable par le marc de café.

Mailles des Tamis (mm)	Refus Partiel (g)	Refus Cumulés (g)	Refus Cumulés (%)	Tamisât Cumulés (%)
5	10,00	10	1%	99%
3,15	70,00	80	5%	95%
2,5	110,00	190	13%	87%
1,25	360,00	550	37%	63%
0,63	350,00	900	60%	40%
0,315	330,00	1 230	82%	18%
0,16	205,00	1 435	96%	4%
0,08	60,00	1 495	99%	1%
Fond	5,00	1 500	100%	0%

- ✓ Les différents tableaux ci-dessus nous permettent de tracer les courbes granulométriques pour chaque type de granulats, voir figure (II.7).

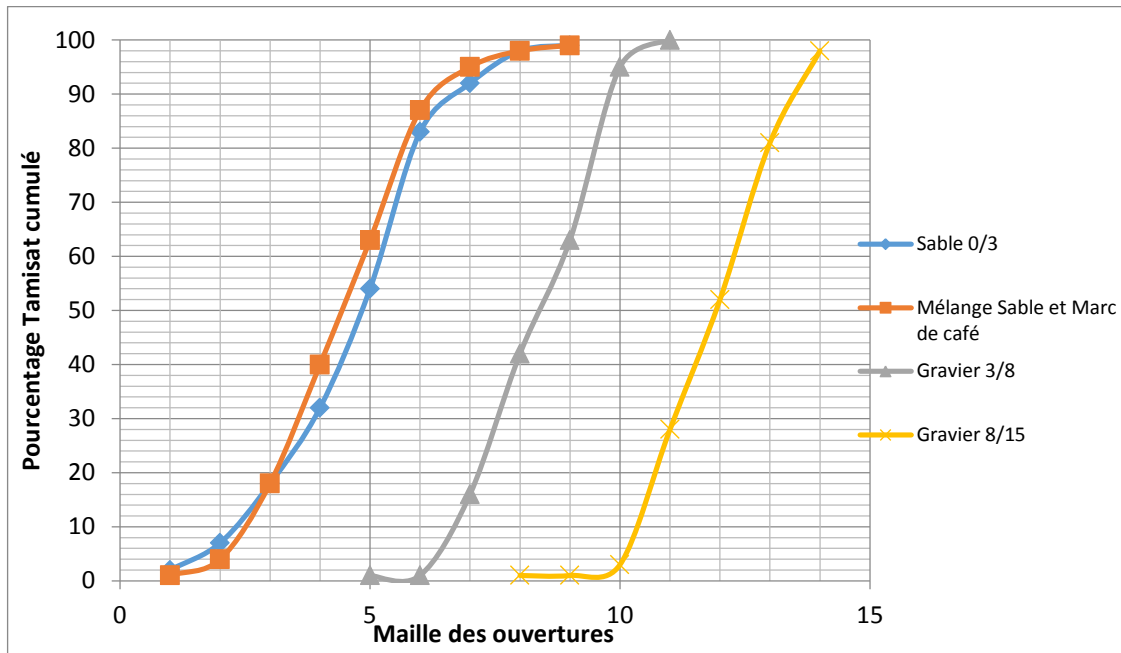


Figure II.7 : Courbe Granulométrique des différents matériaux.

II.3.2. Masse volumique apparente et absolue (NF P 18-554 et NF P 18-555)

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité de volume de ce corps. Comme on distingue le volume absolu et le volume apparent. Nos résultats sont indiqués dans le tableau II.6.

Tableau II.6 : Masse volumique apparente et absolue des granulats.

Granulats	Sable (0/3)	Gravier (3/8)	Gravier (8 /16)	Marc de café
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.66	1.54	1.49	0.80
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.64	2.54	2.54	0.40

II.3.3. Module de finesse du sable (NF P18-304)

C'est le centième de la somme des refus (exprimé en pourcentage de poids) aux tamis de 0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5, 5 mm.

Le module de finesse sert à évaluer la grosseur du sable :

- Un module de finesse élevé correspond à un sable grossier.
- Un module de finesse faible correspond à un sable fin.

$$MF \text{ d'un sable} = \frac{\text{Refus sur les tamis : } 0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5, 5}{100}$$

$$MF = \frac{\text{Refus sur les tamis : } 93 + 82 + 68 + 46 + 17 + 1}{100}$$

$$MF = \frac{307}{100} = 3.07.$$

La valeur du module de finesse dépend surtout de la teneur en grains fins du sable. Nos résultats sont indiqués dans le tableau I.7 suivant.

Tableau II.7 : Module de finesse du sable.

Granulats	Sable (0/3)	Spécifications
Module de finesse <i>Mf</i>	3.07	2,8 < <i>Mf</i> < 3,2 sable grossier 2,2 < <i>Mf</i> < 2,8 sable moyen 1,8 < <i>Mf</i> < 2,2 sable fin

II.3.4. Equivalent de sable (NF P18-598)

Cet essai est un essai de propreté, la valeur de l'Equivalent de sable. Exprime le pourcentage de fines contenues dans le sable. L'absence de fines ne permet pas d'obtenir un béton compact. L'excès de fines est défavorable dans la mesure où il augmente la demande en eau, donc le rapport E/C donc une faible valeur de la résistance.

L'essai a donné les résultats présentés dans le tableau II-8.

Tableau II.8: Valeur de l'équivalent de sable.

Granulats	Sable (0/3)	Spécifications
Equivalent de sable visuel (ESV) (%)	77	70 à 80 pour un sable roulé > 65 pour un sable concassé

II.3.5. Porosité

II.3.5. 1. Définition

La porosité est une grandeur physique qui exprime le rapport entre le volume des vides (pores, microfissures, capillaires) et le volume total d'un matériau. Elle indique la part des vides occupées par de l'air ou de l'eau) par rapport à l'ensemble du volume.

Elle est essentielle pour évaluer les propriétés mécaniques et la durabilité d'un matériau, notamment le béton. Pour cela, nous avons opté pour la méthode gravimétrique.

II.3.5. 2. Formule Gravimétrique de la porosité (Norme NF EN 1097-3)

$$\text{Porosité} = \frac{V_{\text{vides}}}{V_{\text{total}}} \times 100$$

II.3.5. 2.1. Calcul de la porosité des éprouvette du béton témoin a 28 jours

✓ **Donnée :**

- Masse sèche $M_s = 3\,560$ g
- Masse saturée $M_{\text{sat}} = 3\,770$ g
- Densité des grains (solides) $\rho = 2.65$ g/cm³
- Densité de l'eau $\rho_e = 1.00$ g/cm³

✓ **Volume des vides**

C'est la masse d'eau retenue par saturation, donc :

$$M_{\text{sat}} - M_s = 3\,770 - 3\,560 = 210 \text{ g}$$

Puisque la densité de l'eau est de 1.0 g/cm³ :

$$V_{\text{vides}} = \frac{210}{1} = 210 \text{ cm}^3$$

✓ **Volume des solides**

$$V_{\text{solides}} = \frac{M_s}{\rho_s} = \frac{3560}{2.65} \approx 1\,343.40 \text{ cm}^3$$

✓ **Volume total**

$$V_{\text{total}} = V_{\text{vides}} + V_{\text{solides}} = 210 + 1\,343.40 = 1\,553.40 \text{ cm}^3$$

✓ **Porosité**

$$\text{Porosité} = \frac{V_{\text{vides}}}{V_{\text{total}}} = \frac{210}{1\,553.40} = 13.5\%$$

II.3.5. 2.2. Calcul de la porosité des éprouvettes à base de 8% du M/C à 28 jours

✓ **Donnée :**

- Masse sèche $M_s = 3\,310$ g
- Masse saturée $M_{\text{sat}} = 3\,460$ g
- Densité des grains (solides) $\rho = 2.65$ g/cm³
- Densité de l'eau $\rho_e = 1.00$ g/cm^{3*}

✓ **Volume des vides**

C'est la masse d'eau retenue par saturation, donc :

$$M_{\text{sat}} - M_s = 3\,460 - 3\,310 = 150 \text{ g}$$

Puisque la densité de l'eau est de 1.00 g/cm³ :

$$V_{\text{vides}} = \frac{150}{1} = 150 \text{ cm}^3$$

✓ **Volume des solides**

$$V_{\text{solides}} = \frac{M_s}{\rho_s} = \frac{3\,310}{2.65} \approx 1\,249,06 \text{ cm}^3$$

✓ **Volume total**

$$V_{\text{total}} = V_{\text{vides}} + V_{\text{solides}} = 150 + 1\,249,06 = 1\,399,06 \text{ cm}^3$$

✓ **Porosité**

$$\text{Porosité} = \frac{V_{\text{vides}}}{V_{\text{total}}} = \frac{150}{1\,399,06} = 10,7 \%$$

II.3.5. 3. Analyse et interprétation.

- Le béton témoin présente une porosité plus élevée (13,5%) et il est dans la plage normal donc il est bien formulé.
- L'introduction de 8 % de marc de café réduit la porosité de 2,8 % par rapport au béton témoin donc il a une meilleure durabilité et améliore la résistance.

II.4. Elaboration du béton au laboratoire

II.4.1. Formulation de béton ordinaire

Pour la formulation du béton ordinaire vibré (témoin) nous avons choisi la méthode de **DREUX-GORISSE** qui permet de déterminer les quantités optimales de matériaux pour 1m^3 de béton (eau, ciment, sable, gravier en kg / m^3). Cette méthode a l'avantage d'être issue de nombreuses formulations ayant été testées sur chantier et ayant donné satisfaction. Elle est très simple d'utilisation, elle ne demande que la connaissance des courbes granulométriques des granulats [2]. Le béton confectionné est un béton plastique qui aura une résistance de 25 MPa à l'âge de 28 jours.

Tableau II.9 : Formulations des échantillons.

Matériaux	Béton Témoin	Béton marque de café 4%	Béton marque de café 6%	Béton marque de café 7%	Béton marque de café 8%
Ciment (kg)	1,766	1,766	1,766	1,766	1,766
Sable : 0/3 (kg)	3,217	3,088	3,024	2,992	2,9596
Gravier : 3/8 (kg)	1,034	1,034	1,034	1,034	1,034
Gravier : 8/15 (kg)	4,01	4,01	4,01	4,01	4,01
Eau (Litre)	1,017	1,017	1,12	1,17	1,017
Marc de café	0,000	0,129	0,193	0,225	0,257

II.4.2. Confection du béton

Pour avoir des matériaux propres, démunis de toutes impuretés, les graviers ont été lavés puis séchés dans une étuve pendant 24H à une température de 105 °C. Dans ce travail quatre échantillons de béton ont été réalisés comme il est bien montré dans le tableau **II.9**.

- Béton Témoin : Béton préparé uniquement avec des granulats naturels, et sert comme référence pour notre étude.
- Béton M/C 4% : ou 4% du sable 0/3 est remplacé par le Marc de Café.
- Béton M/C 6% : ou 6% du sable 0/3 est remplacé par le Marc de Café.
- Béton M/C 7% : ou 7% du sable 0/3 est remplacé par le Marc de Café.
- Béton M/C 8% : ou 8% du sable 0/3 est remplacé par le Marc de Café.

II.4.3. Présentation d'éprouvettes utilisées

Dans ce programme expérimental, un seul types de moules ont été utilisés :

- ✓ Les éprouvettes de forme cylindriques normalisées et d'élanement (10×20) cm norme NF P 18-400, NA 2600) utilisées pour la détermination des résistances à la compression.



Figure II.8 : Éprouvettes cylindrique utilisés

II.4.4. Presentations des matériels

- Le malaxeur

Le béton a été réalisé dans un malaxeur à axe verticale d'une capacité de 60 litres (voir figure II-8). Avec des mouvements planétaires. Un temps minimum est recommandé pour assurer l'homogénéité du mélange.



Figure II.9 : Malaxeur utilise.

- **La table vibrante**

L'usage d'une table vibrante est indispensable pour éliminer une certaine quantité de bulles d'air contenu dans le béton qui pourraient par leur présence affecté les propriétés mécaniques des bétons réalisés.



Figure II.10 : Table vibrante.

II.4.5. Préparation de la gâchée

Pour chaque gâchée 03 éprouvettes cylindriques de $(10 \times 20) \text{ cm}^2$ sont confectionnées.

La préparation du béton demande plus d'attention et de précision, tous les échantillons ont été préparés dans les mêmes conditions, en suivant une certaine méthodologie ci-dessous :

1. Vérifier en premier le nombre et l'état des moules nécessaires pour l'essai, ces derniers doivent être graissés à l'aide d'une huile pour faciliter le décoffrage.
2. Peser les matériaux secs (gravier, sable, ciment, marne de café)
3. Préparer la quantité d'eau nécessaire pour la gâchée.
4. Humidifier les parois du malaxeur
5. Déverser les matériaux dans le malaxeur en commençant de plus gros diamètres au plus petit
6. Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange des matériaux sec pendant 30 secondes enivrant.
7. Introduire l'eau de gâchage et malaxer pendant 2 min.
- 8- Remplir les éprouvettes avec délicatesse afin d'homogénéiser le béton en deux couches et les vibrer à l'aide de la table vibrante pour évacuer les bulles d'air et d'éviter les cavités dans le béton frais.



Figure II.11 : Mélange des matériaux après l'ajout de l'eau

II.4.5.1. Essai sur le béton frais

L'essai que nous avons réalisé qui nous permet de mesurer l'ouvrabilité du béton est l'essai d'affaissement au cône d'Abrams selon la norme **NF P 18-451** (tableau II.10).

Tableau II.10 : Consistance du béton

Consistance du béton	Affaissement au cône (cm)	Serrage nécessaire
Très ferme	≤ 2	Vibration nécessaire
Ferme	3 à 5	Bonne vibration
Plastique	6 à 9	Vibration normale
Très plastique	10 à 15	Simple piquage
Fluide	> 16	Léger piquage

❖ Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams

Pour réaliser cet essai une plaque et un cône d'Abrams sont utilisés :

- La plaque est en acier et a une surface dure et non-absorbante ;
- Le cône d'Abrams est un cône en acier galvanisé. Il a un diamètre intérieur à sa base de 200 mm, un diamètre intérieur à son sommet de 100 mm et une hauteur de 300 mm². Il porte le nom de son inventeur Duff Abrams.
- Une tige d'acier lisse de diamètre 16 mm et à extrémité arrondie.

L'essai se déroule en suivant les étapes suivantes :

- Le cône d'Abrams est placé puis fixé sur la plaque ;
- Le cône est rempli avec du béton frais en trois fois. À chaque fois, chaque couche est piquée par 25 coups à l'aide de la tige ;
- Le cône est arasé avec une tige ;
- Le cône est levé immédiatement, verticalement et doucement en le tournant un peu pour le démouler ;
- L'affaissement du béton frais est mesuré.

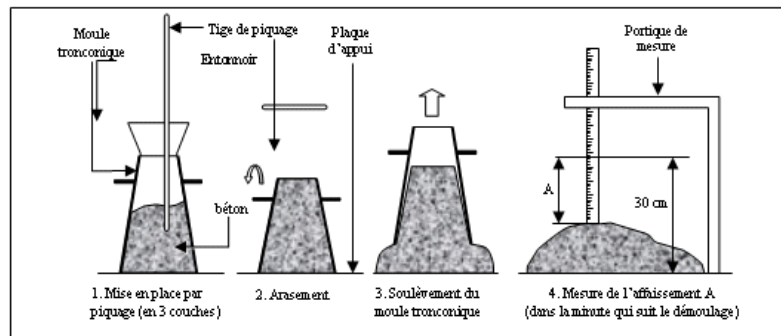


Figure 2 .11: Description d'essai d'affaissement de cône d'abrams



Figure II.13: Mesure d'affaissement.

Affaissement de béton 100% naturel : « 7.00 cm »

Affaissement de béton 4% Marc de cafe: « 3.7cm »

Affaissement de béton 6% Marc de cafe: « 3.5cm »

Affaissement de béton 7% Marc de cafe: « 3cm »

Affaissement de béton 8% Marc de cafe: « 3cm »

II.4.5.2. Remplissage et vibration

La mise en place du béton dans les moules a été faite en deux couches afin d'assurer son homogénéisation, chacune ayant été vibrée pendant 20 à 30 secondes sur une table vibrante prévue à cet effet. Une fois la vibration terminée, les moules ont été retirés de la table vibrante, puis la surface du béton a été aplanie et étalée uniformément à l'aide d'une réglette. Enfin, les moules ont été étiquetés pour identification et laissés pendant 24 heures à température ambiante.



Figure II.14: Remplissage des éprouvettes.

II.4.5.3. Conservation des éprouvettes

Après 24h de séchage, le coffrage a été retiré (opération de démoulage) à l'aide d'outils manuels appropriés (clés, marteau, tournevis, etc.) .Une fois démoulé. Toutes les éprouvettes sont immergées dans un bac à eau jusqu' au jour de l'écrasement.



Figure II.15 : Conservation des éprouvettes.

II.4.5.4. La densité

La masse volumique du béton de marc de café a été mesurée selon la norme **NF EN 12350-6**. (Fig.II.15).



Figure II.16 : Mesure de la densité du béton.

II.4.5.1 Essai destructif

❖ Essai de compression

- Définition

Un essai de compression est réalisé sur des éprouvettes cylindriques afin de déterminer la résistance à la compression moyenne du matériau, ainsi que son module d'élasticité longitudinal, ou module d'Young moyen.

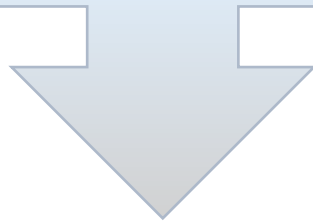
Cet essai consiste à appliquer une contrainte de compression sur les éprouvettes cylindriques posées verticalement. Les éprouvettes sont au préalable surfacées afin que le contact avec les plateaux de la presse engendre le moins de frottements possible. L'objectif principal de cet essai est la détermination de la résistance à la compression f_c (rapport entre la force appliquée / la section de l'éprouvette) du béton.

Le surfacage permet ainsi d'assurer la reproductivité et la fiabilité de l'essai et surtout de diminuer l'effet de frettage. Cet effet est dû à la diminution de l'effet de poisson due aux frottements entre les plateaux de la presse et l'éprouvette. Les parties en contact se retrouvent ainsi en tri-compression, or une éprouvette en béton résistera mieux à une sollicitation en tri-compression qu'en compression uni axiale. L'objectif étant ici d'estimer la résistance à la compression uni axiale.

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la démarche suivie pour la confection des différents spécimens de la provenance des matériaux, à la caractérisation et enfin au coulage et murissement des bétons témoins et bétons de marc de café. Les différents résultats des essais mécaniques à la compression obtenus seront présentés dans le chapitre suivant..

CHAPITRE III
RESULTATS ET INTERPRETATION



III.1. Introduction

Ce chapitre sera consacré à la présentation et l'interprétation des résultats expérimentaux relatifs aux bétons témoin et béton substitué par le marc de café avec ses différents pourcentage (4% ,6% ,7% ,8%). Cette démarche est proposée dans le but d'évaluer l'apport de ce matériaux organique, issues de déchets de café et de définir le meilleure pourcentage du point de vue résistance.

Les résultats des différents essais fait sur le béton frais et durci sont rassemblés ci -après et les valeurs données sont les moyennes arithmétiques des trois résultats d'essais.

III.2. Essais sur bétons

III.2.1.Essais sur béton frais

Avant de valider une composition d'un béton, il est indispensable de vérifier que les propriétés du béton à l'état frais obéissent à certains critères ;

III.2.1.1. Affaissement au cône d'abrams

Pendant la confection des éprouvettes, nous avons remarqué que tous les types des bétons à base du Marc de café, sont peu compacts par rapport au béton témoin, et présentent une difficulté de mélange en fonction des pourcentages de la substitution du sable par le Marc de café (Fig :III.1) , ce dernier (le marc du café) joue un rôle d'obstacle dans le mélange et présente une certaine absorption d'eau lors du malaxage ce qui mène à la diminution de la maniabilité. Ceci confirme que l'incorporation de déchets de café entraîne une diminution de la maniabilité.

L'affaissement d'un béton peut prendre différentes formes :

- Un effondrement complet du béton ;
- Un affaissement par cisaillement, la partie supérieure du béton cisaille et glisse latéralement ;
- Un véritable affaissement, le béton s'abaisse simplement, en gardant plus ou moins de forme.

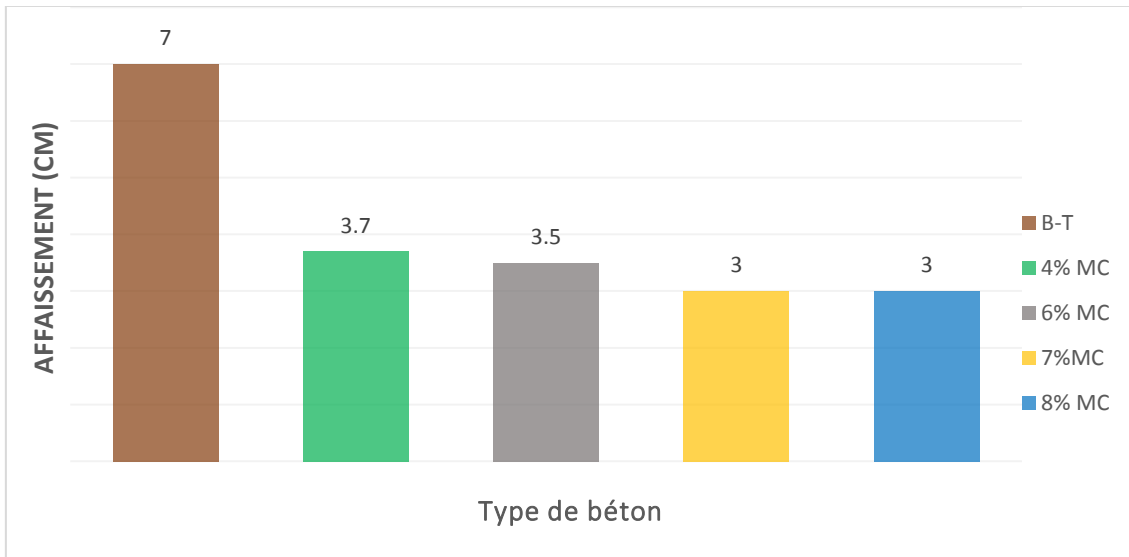


Figure III.1: affaissement au cône d'Abram

III.2.1.2. La densité

La densité des différents bétons réalisés est résumée dans la figure suivante :

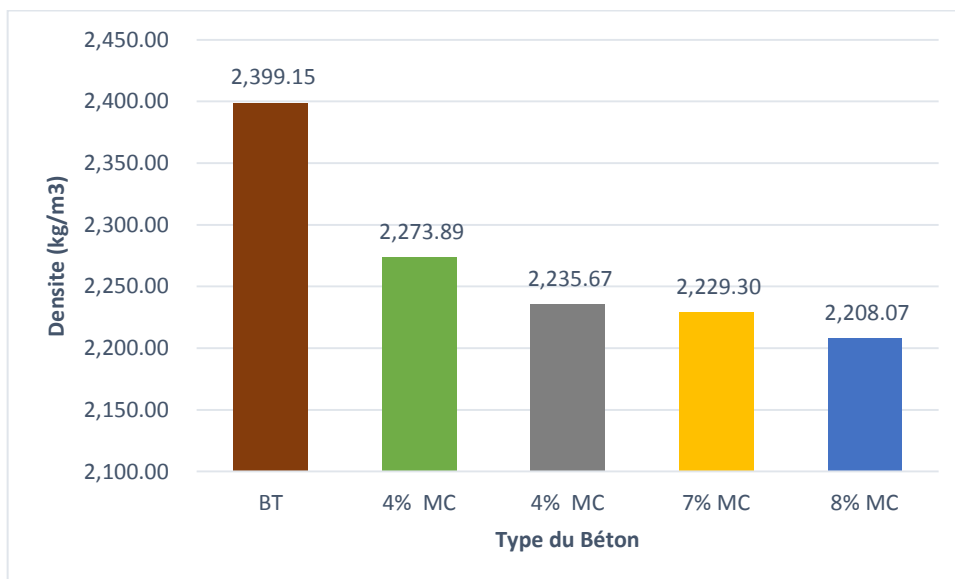


Figure III.2: La densité du à base du Marc de café.

Nota :

BT : Béton témoin

MC : Marc de café

Les figures précédentes montrent que la substitution du sable par le marc de café a un impact négatif sur la densité du béton. En effet, on observe une diminution progressive de la densité à mesure que la teneur en marc de café augmente. Ce résultat, à la fois logique et attendu, s'explique par la densité plus faible du marc de café comparée à celle du sable qu'il remplace, ce qui confirme que l'incorporation croissante de déchets de café entraîne une réduction de la densité du béton.

III.3. Essais à l'état durci

De la même façon que le béton frais, les résultats des différents essais réalisés sur béton durci sont résumés comme suit :

III.3.1. Essai de compression uni axiale (NF P 18-406)

III.3.1.1. Principe de l'essai

Les essais de compression sont effectués sur des éprouvettes cylindriques (10 x 20) cm²

A l'aide d'une presse hydraulique de capacité maximale 2000 kN (voir figure III.2).

Les éprouvettes confectionnées, sont donc ajustées entre les deux plateaux de la presse. Le plateau supérieur étant fixe, le plateau inférieur sur lequel est posée l'éprouvette est mobile. En remontant celui-ci écrase le corps de l'éprouvette contre le plateau supérieur.

La résistance en compression a été évaluée suivant la norme NF P 18-406. L'effort est appliqué progressivement à vitesse de chargement constante (soit 2,5 MPa/s). pour chaque étape de chargement, la valeur de l'effort vertical ainsi que la déformation correspondante sont enregistrées, et ce jusqu'à la rupture totale de l'éprouvette qui se traduit par l'arrêt de la presse.

L'essai de compression est ainsi achevé. La force maximale F est donnée dès que la rupture est enclenchée. Cette force est enregistrée et la contrainte de rupture en compression est obtenue par la formule suivante :

$$\sigma_C = \frac{4 \times F_{MAX}}{\pi D^2}$$

- F max : désigne la force à la rupture en compression
- D: le diamètre de l'éprouvette.



Figure III.3 : Essai de compression uni axial



Figure. III.4 : Eprouvtes d'essai de compression

III.3.1.2. Résultats d'essai de compression sur les bétons étudiés a 7 jours

Pour chaque essai, les résultats est la moyenne de 3 mesures present sur 3 éprouvette à l'âge de 7 ,14 et 28 jours. Les résultats sont illustrés dans les figures suivantes :

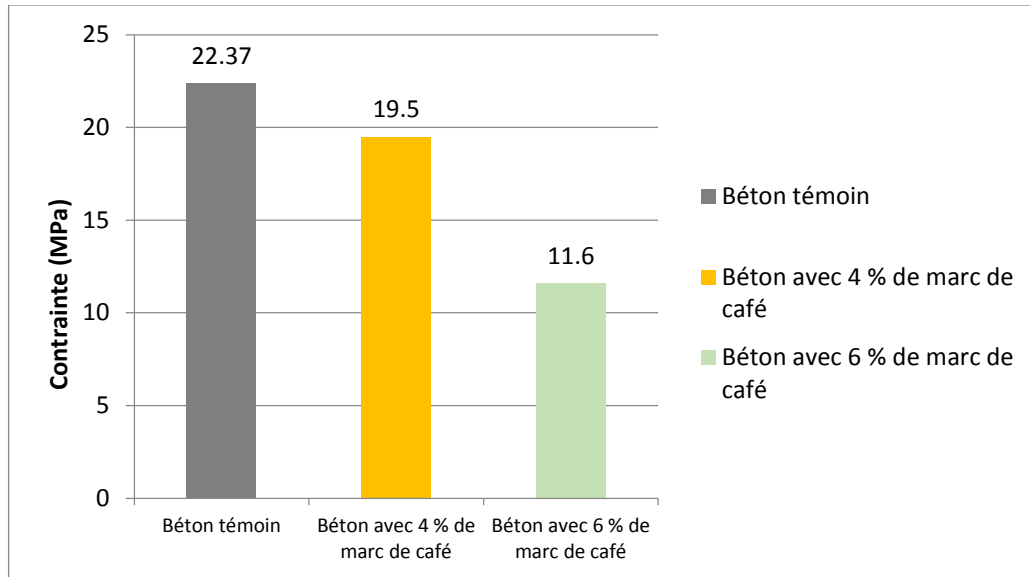


Figure III.5 : Résistance à la compression à 7 jours

- ❖ La figure ci-dessus (Fig. III.1), représentant les résultats expérimentaux à 7 jours, montre que l'incorporation du marc de café en substitution partielle du sable dans le béton a un effet défavorable sur ses performances mécaniques. Une diminution progressive de la résistance a été observée en fonction du taux de marc de café substitué. Pour un taux de substitution de 4%, la baisse des performances atteint environ 13 %, tandis qu'elle avoisine 48 % pour un dosage de 6 %. Ces résultats indiquent que l'augmentation de la quantité de marc de café entraîne une dégradation plus marquée des propriétés mécaniques du béton.

Par ailleurs, les éprouvettes contenant 7 % et 8 % de marc de café n'ont pas présenté de résultats exploitables, en raison d'un durcissement incomplet. Cette insuffisance est vraisemblablement due à la teneur élevée en marc de café, laquelle retarde le processus d'hydratation et, par conséquent, le développement des propriétés mécaniques.



Figure III.6: Rupture des éprouvettes sous sollicitation de la compression a 7 jours

III.3.1.3. Résultats d’essai de compression sur les bétons étudiés a 14 jours

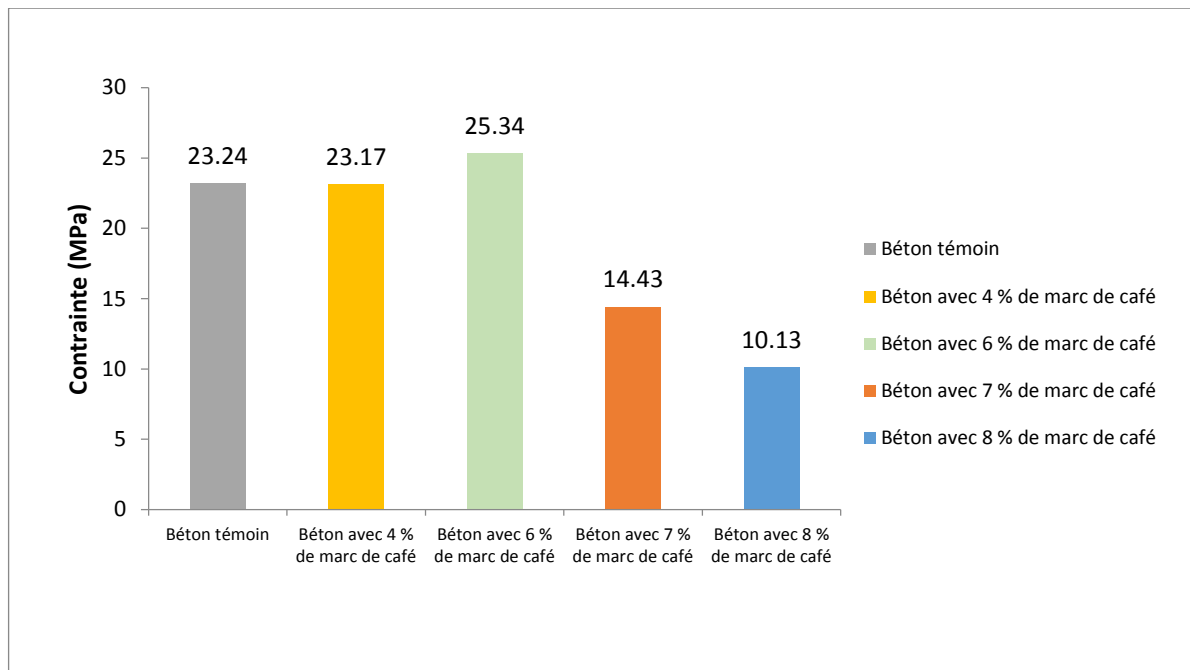


Figure III.7. : Résistance à la compression à 14 jours.

❖ Les résultats expérimentaux après 14 jours, présentés dans la figure III.7 précédente indiquent que la substitution du sable par le marc de café à un taux de 4 % permet d’obtenir une résistance mécanique comparable à celle du béton témoin. Une substitution à 6 % entraîne même une amélioration notable, avec une augmentation de la résistance d’environ 13 %.

En revanche, des taux plus élevés, tels que 7 % et 8 %, provoquent une diminution significative de la résistance. Ces observations suggèrent que le taux de substitution optimal se situe à 6 %.



Figure III.8.: Rupture des éprouvettes sous sollicitation de la compression à 14 jours.

III.3.1.4. Résultats d’essai de compression sur les bétons étudiés à 28 jours

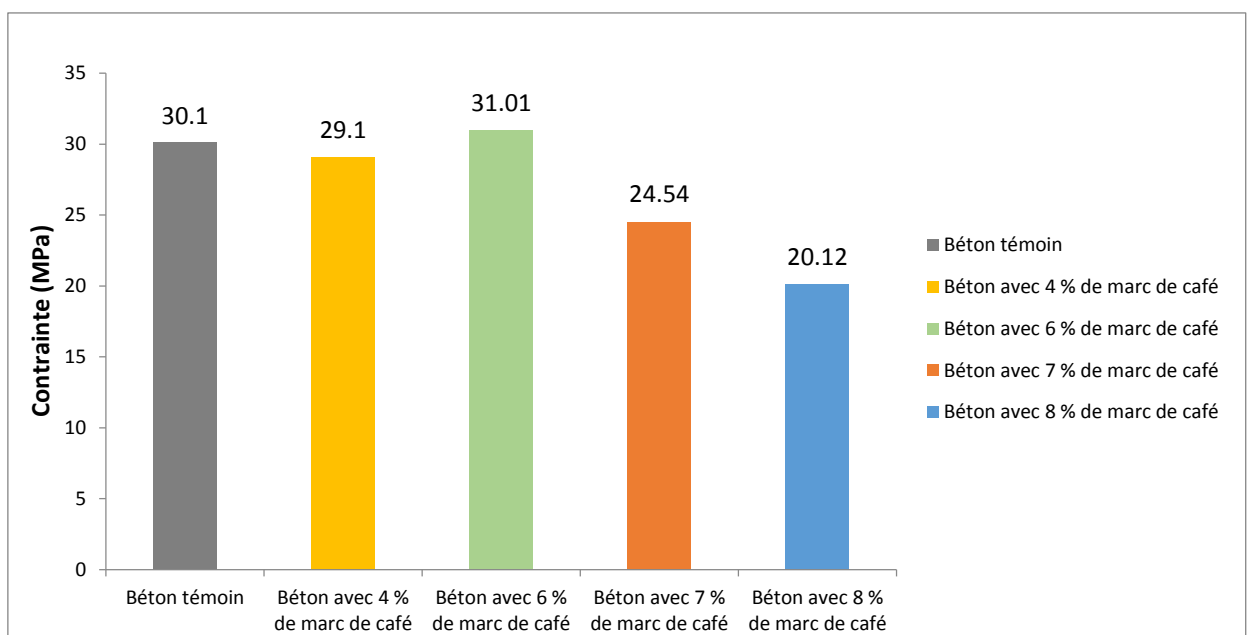


Figure III.9. : Résistance à la compression à 28 jours.

❖ Les résultats obtenus à 28 jours montrent une augmentation progressive de la résistance en fonction de l'âge, suivant une tendance similaire à celle observée à 14 jours.

On note toutefois des variations selon les pourcentages de substitution :

- À 4 %, la résistance reste approximativement équivalente à celle du béton témoin, ce qui suggère un impact limité de la substitution à ce taux.
- Une diminution notable de la résistance est observée pour les taux de 7 % et 8 %.
- En revanche, une augmentation de la résistance est constatée pour le taux de 6 %.



Figure III.10.: Rupture des éprouvettes sous sollicitation de la compression a 28 jours.

III.4. Contrainte Déplacement

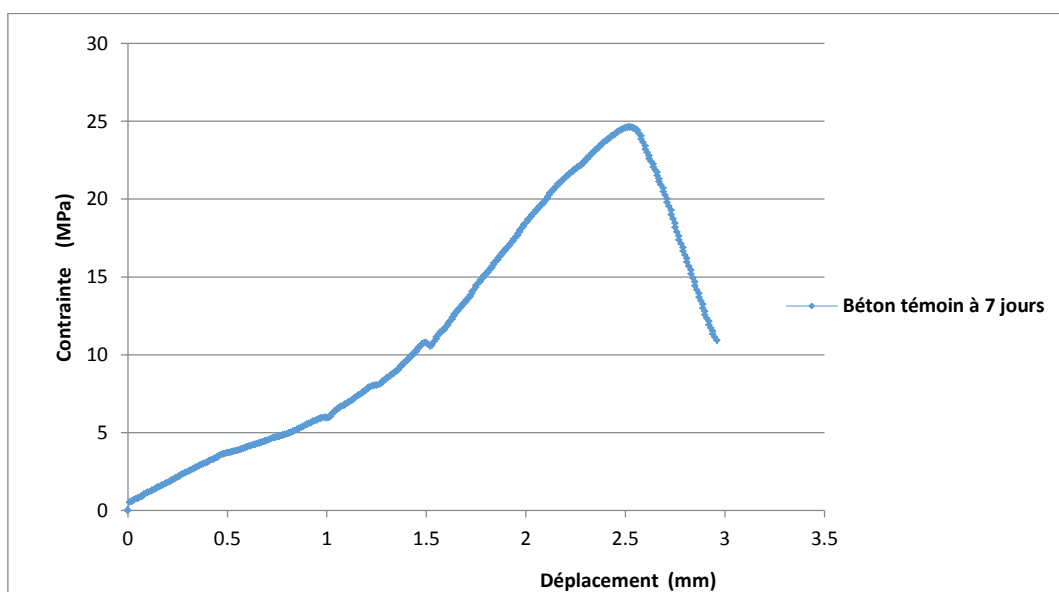


Figure III.11 : Courbe de contrainte en fonction du déplacement d'une Eprouvette en B/T à 7jours

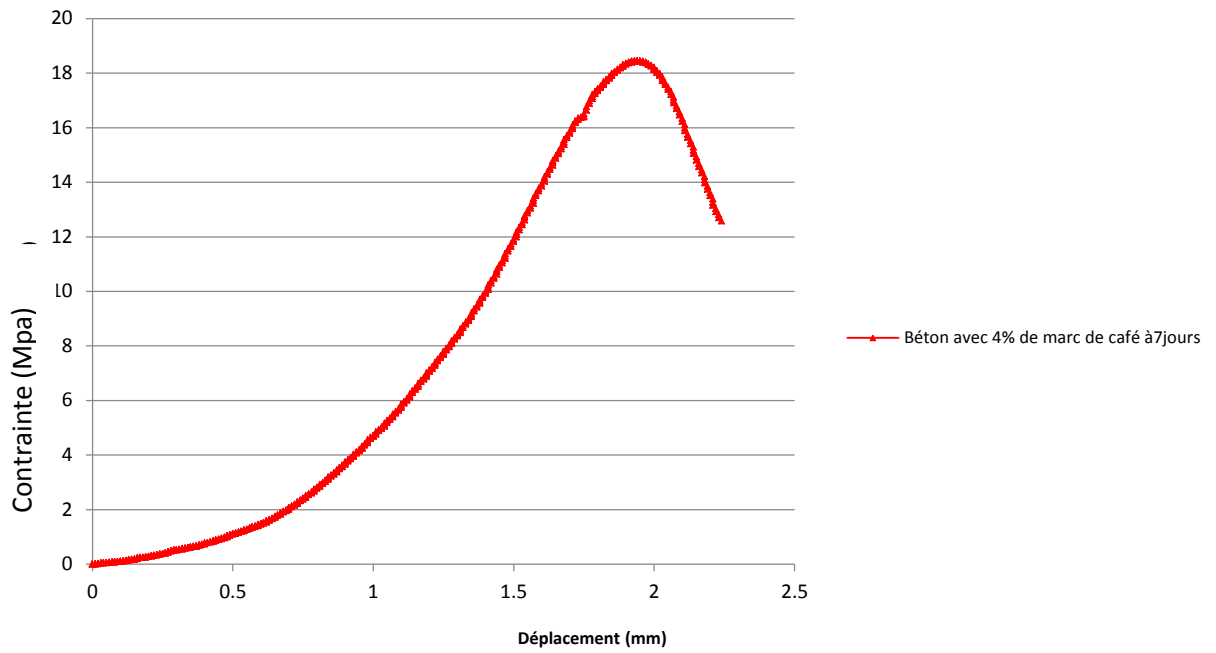


Figure III.12 : Courbe de contrainte en fonction du déplacement d'une Éprouvette en béton contenant 4% de marc de café à 7jours

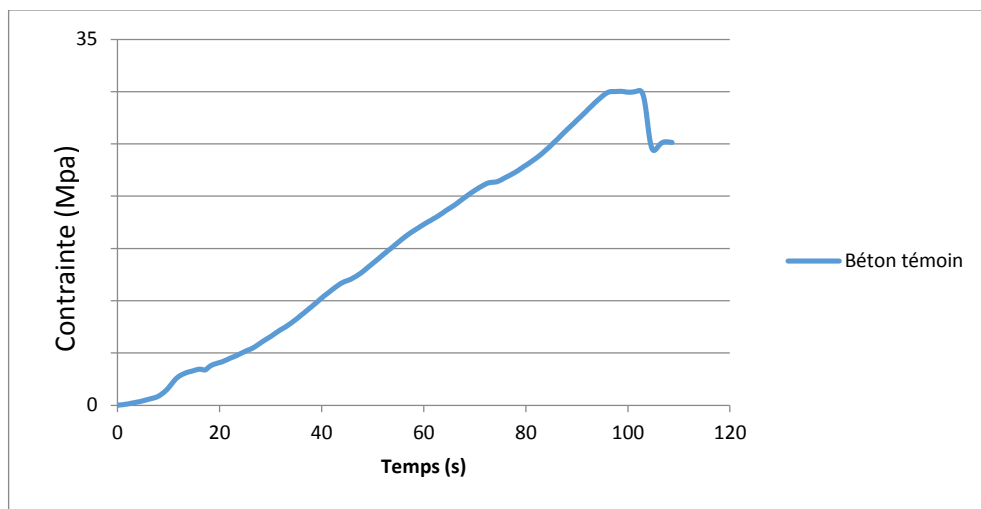


Figure III.13 : Courbe de contrainte en fonction de temps d'une eprouvette en B/T à 28 Jours

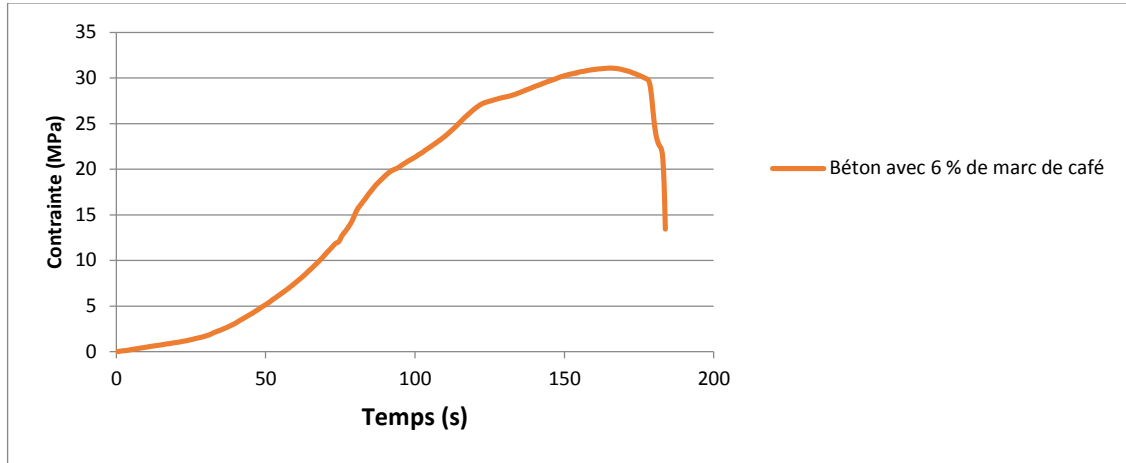


Figure III.14 : Courbe de contrainte en fonction de temps d'une éprouvette en béton de 6% MC à 28 J

- ❖ Les figures ci-dessus montrent les courbes contrainte-déplacement et contrainte-temps des échantillons. Le comportement est déterminé par un essai de compression uni axiale. D'après ces figures, les courbes de comportement présentent trois phases : la première correspond à une partie linéaire (élastique), la deuxième à une partie non linéaire de la branche ascendante, et la troisième à la branche descendante.
- ❖ On remarque que la courbe de comportement du béton évolue avec l'incorporation de marc de café. On constate que cette incorporation influence nettement les propriétés mécaniques du béton.
- ❖ On observe également que cette augmentation du taux de remplacement provoque une augmentation du temps au pic. De plus, la courbure de la phase post-pic du béton à base de marc de café présente une atténuation par rapport à celle du béton naturel (BN).

III.5.Variation massique

❖ La perte de masse

La perte de masse du béton à la base du marc de café est illustrée dans la figure suivante :

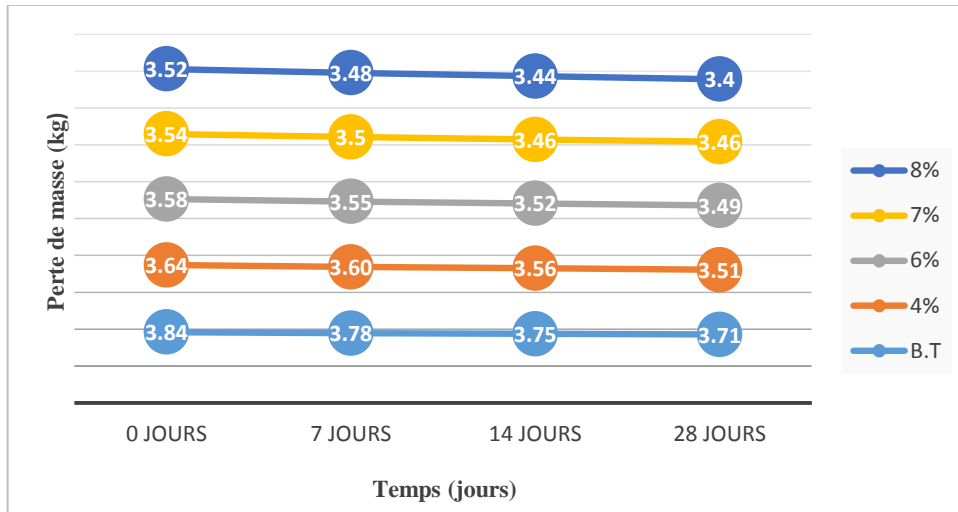


Figure III.15.: Perte de masse en fonction de marc de café

- ❖ La figure précédente présente l'évolution de la perte de masse des bétons formulés avec différents pourcentages de marc de café.

Les résultats montrent que l'incorporation de marc de café entraîne une perte de masse notablement plus élevée par rapport au béton témoin. Cette perte de masse est attribuée à une augmentation de la porosité et à la masse des grains du marc de café qui sont plus petits que ceux du sable.

III.6. Conclusion

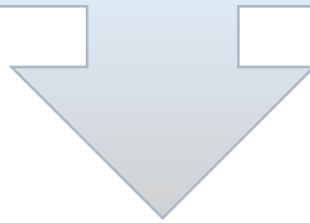
D'après les résultats obtenus on remarque que le marc de café tend à prolonger le processus de durcissement du béton. Et d'une manière générale, la résistance à la compression du béton augmente en fonction de l'âge.

Les figures précédentes montrent aussi que, quel que soit l'âge du béton, les taux de substitution de 7 % et 8 % du sable par le marc de café ont un effet négatif sur la résistance à la compression, tandis que l'effet du taux de 4 % reste légèrement inférieur à celle du béton témoin.

En revanche, le taux de 6 % présente un comportement particulier, bien qu'il ait un impact négatif à 7 jours, il montre une amélioration significative à partir de 14 jours, avec une résistance dépassant celle du béton témoin de 3 % à 28 jours.

En complément de ces observations mécaniques, il convient également de souligner une diminution progressive de la masse du béton à mesure que le pourcentage du marc de café augmente. Cette perte de masse est directement liée à la nature légère et poreuse des déchets de café, qui remplacent partiellement le sable, ainsi, plus le taux de substitution est élevé, plus la masse volumique du béton diminue. Ce phénomène, bien qu'accompagné d'une baisse de résistance de compression.

CONCLUSION GENERALE



CONCLUSION GENERALE

III.7. Conclusion Générale

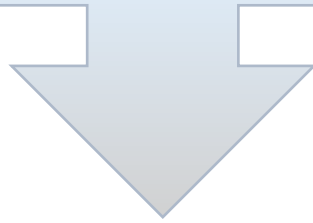
L'objectif de cette étude est d'analyser le comportement mécanique du béton dans lequel une partie de sable 0/3 a été substituée par des déchets de marc de café issus de la récupération. L'attention a été portée sur les propriétés mécaniques, et plus particulièrement sur la résistance à la compression. Pour cela, un béton témoin (0 % de marc de café) a été comparé à des bétons contenant différentes proportions de marc de café : 4 %, 6 %, 7 % et 8 %. Les résultats montrent une tendance générale à la diminution de la résistance mécanique avec l'augmentation du taux de substitution, notamment pour les dosages de 7 % et 8 %, tandis que le dosage à 4 % présente une résistance approximativement équivalente à celle du béton témoin. Toutefois, une amélioration notable de la résistance a été observée à 6 %, dépassant même celle du béton témoin. Ce résultat suggère l'existence d'une valeur optimal de substitution permettant de valoriser certaines propriétés physiques du marc de café, contribuant ainsi à améliorer la compacité du béton.

Cette variation non linéaire peut être attribuée à plusieurs facteurs. À un taux de substitution de 4 %, la faible quantité de marc de café pourrait ne pas permettre une dispersion homogène dans la matrice cimentaire, favorisant ainsi la formation de zones de faiblesse et de microbulles d'air. Par ailleurs, une vibration insuffisante ou une erreur expérimentale lors de la mise en œuvre pourraient également contribuer à cette irrégularité.

En revanche, à 6 %, la proportion semble suffisante pour combler efficacement certains vides et favorise une meilleure répartition dans le mélange, ce qui améliore la cohésion interne et la résistance à la compression. Cependant, à partir de 7 %, la quantité de marc devient excessive. Étant organique, poreux et hydrophile, le marc de café absorbe une partie de l'eau de gâchage, perturbe l'hydratation du ciment, et peut créer des vides ou affaiblir l'adhérence entre les composants. De plus, certains composés présents dans le marc, tels que les huiles et les tanins, peuvent interférer avec les réactions chimiques du ciment, surtout à forte concentration.

- En conclusion, les résultats suggèrent qu'un taux de substitution de 6 % représente un équilibre favorable entre apport organique et maintien des propriétés mécaniques du béton. En deçà, l'effet est trop faible pour être bénéfique ; au-delà, la surcharge organique nuit à la cohésion et à la performance du matériau.

RECOMMENDATIONS



III.8. Recommandations

- Etude de durabilité du béton à base du Marc de café.
- Valorisation du marc de café usagé par pyrolyse pour le transformer en biochar.
- Béton autoplaçon à base du Marc de café.
- Etudier la conductivité thermique du béton ordinaire à base du marc de café.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

Références Bibliographiques

[1] <https://www.archeoroma.fr/sites/pantheon/>

[1] : Gunning .J.G," concret technology: level 4 " Longman technician séries; Const & civil, england, p 293, 1983.

[2] : Georges Dreux et Jean Festa, " Nouveau guide du béton et de ses constituants" ; édition Eyrolles 2002.

[3] : Emile Olivier," Technologie des matériaux de construction" ; Techniciens de la construction (Tome 1) ; entreprise moderne d'édition, Paris, 1978.

[4] : M. Rissel Khelifa, " Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplacants", thèse de doctorat, 2009.

[5] : P.C. Aitcin, " l'emploi des fluidifiants dans les BHP, les bétons à ultra hautes performances" presse de l'ENPC, 1992.

[6] : A.M. Paillere, "Les adjuvants", Le béton hydraulique Presse de ENPC 1982.

[7] : D. L. Kantro, "Influence des superplastifiants réducteurs d'eau sur les propriétés de la pâte de ciment – un slump test miniature", cement and concrete aggregate, Vol. 2, pp 95-102, 1980.

[8]- A.R. Kara, "Influence des additions minérales sur le besoin en eau et les résistances mécaniques des mélanges cimentaires", ThD, U Cergy Pontoise, décembre2002.

[9] : -A.M. Neville, "Propriétés des bétons", Edition Eyrolles 2000.

[10] : Sperandiok ; Identification des facteurs mobilisateurs des stratégies de gestion des déchets ménagers mises en oeuvre par les collectivités locales ; thèse de doctorat ; l'institut national des sciences appliquées de Lyon ; 2001.

[11] : Caractérisation de la longévité des briques brutes et très bien écrasées réutilisées d'employer de bétons et des agrégats, des matériaux et du RILEM concrets (2011).

<http://www.rilem.net/ms.php>.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [12] les procédés de recyclage, <http://technocap021bis.eklablog.com/les-procedes-derecyclage-a115203926>, 29 Mars 2015
- [13] Quebaud M., 'Caractérisation des granulats recyclés - Etude de la composition et du comportement de bétons incluant ces granulats', Thèse de doctorat, Université d'Artois, France, décembre 1996.
- [14] Francky carassou, une récupération spécifique du marc de café aurait-elle une plus-value pour la communauté? Cas de l'île de montréal, université de sherbrooke, 2015.
- [15] Alexandre Vandeponseele. Valorisation chimique du marc de café : utilisation des fluides pressurisés pour l'extraction de molécules d'intérêt. Biochimie, Biologie Moléculaire. Université Savoie Mont Blanc, 2023. Français. HAL Id: tel-04496215. <https://theses.hal.science/tel04496215v1> . Submitted on 8 Mar 2024.
- [16] Zamora, A.J., Pastoriza, S. et Henares, J.A.R (2015) Revalorization of coffee byproducts. Prebiotic, antimicrobial and antioxidant properties. *LWT - Food Science and Technology*, vol. 61, p. 12-18. www.elsevier.com/locate/lwt (Page consultée le 12 juin 2015).
- [17] : Gomez-de la Cruz, F.J., Cruz-Peragon, F., Casanova-Pelaez, P.J. et Palomar-Carnicero, J.M. (2015) A vital stage in the large-scale production of biofuels from spent coffee grounds: The drying kinetics. *Fuel Processing Technology*, vol. 130, p. 188-196. www.elsevier.com/locate/fuproc (Page consultée le 6 juin 2015).
- [18] : Cruz, R., Cardoso, M.M., Fernandes, L. et Oliveira, M.. (2009). Espresso Coffee Residues : A Valuable Source of Unextracted Compounds. *Journal of agricultural and food chemistry*, vol. 60, p. 7777-7784. . <http://pubs.acs.org/journal/jafcau> (Page consultée le 6 juin 2015).
- [19] : Chen, K.I., Lo, Y.C., Liu, C.W., Chou, C.C. et Cheng, K.C. (2013) Enrichment of two isoflavone aglycones in black soymilk by using spent coffee grounds as an immobilizer for α -glucosidase. *Food Chemistry*. P. 79-85.
- [20]: Ballesteros, L. F., Teixeira, J. A., & Mussatto, S. I. (2014). Chemical, functional, and structural properties of spent coffee grounds and coffee silverskin. *Food and Bioprocess Technology*, 7(12), 3493-3503.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [21]: Shen, K., & Gondal, M. A. (2017). Removal of hazardous Rhodamine dye from water by adsorption onto exhausted coffee ground. *Journal of Saudi Chemical Society*, 21, S120-S127.
- [22]: Limousy, L., Jeguirim, M., Dutournié, P., Kraiem, N., Lajili, M et Said, R. (2013). Gaseous products and particulate matter emissions of biomass residential boiler fired with.
- [23]: Franca, A. S., & Oliveira, L. S. (2016). Coffee and its by-products as sources of bioactive compounds. *Coffee: Production, Consumption and Health Benefits*. New-York, USA: Nova Science Publishers, 1-28.
- [24]: Mussatto, S. I., Carneiro, L. M., Silva, J. P., Roberto, I. C., & Teixeira, J. A. (2011). A study on chemical constituents and sugars extraction from spent coffee grounds. *Carbohydrate polymers*, 83(2), 368-374.
- [25]: Campos-Vega, R., Loarca-Pina, G., Vergara-Castaneda, H. A., & Omah, B. D. (2015). Spent coffee grounds: A review on current research and future prospects. *Trends in Food Science & Technology*, 45(1), 24-36.
- [26]: Limousy, L., Jeguirim, M., Dutournié, P., Kraiem, N., Lajili, M., & Said, R. (2013). Gaseous products and particulate matter emissions of biomass residential boiler fired with spent coffee grounds pellets. *Fuel*, 107, 323-329.
- [27] Boukerma Tarek et Mechentel Abdellah, UNIVERSITÉ Dr YAHIA FARÈS DE MÉDÉA, Projet de Fin d'études, le béton de sable à base du marc de café, juin 20.