

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان –

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie Civil

Spécialité : Structure : Efficacité énergétique dans les bâtiments de constructions

Par : KARA ALI Rania Mansouria

BENIKHLEF Hadjira

Sujet

Rhéologie de béton léger

Soutenu publiquement, le 27/06/2022, devant le jury composé de :

Mr HOUMADI YUCEF
Mme SAIL LATEFA
Mr TALEB OMAR
Mr SOUALEM TEWFIK

Université de Tlemcen
Université de Tlemcen
Université de Tlemcen
Université de Tlemcen

Président
Examineur
Encadreur
Co-Encadreur

Année universitaire : 2021 /2022

Dédicace

Je dédie ce mémoire,

A mes chers parents pour leur soutien et encouragement durant toute

Mes années d'études, à mes frères RAMZI & MONCEF, à ma belle sœur ASMA, à mes nièces WISSAM et RYMA à mon fiancé OUSSAMA, à ma chère copine HADJIRA, Ainsi qu'à ma chère cousine SARAH. A tous mes camarades de l'université, qui sans eux ce projet d'étude n'aurais pas vu le jour.

Et à toute ma famille qui a cru en mes capacités.

KARA ALI RANIA

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mes très chers parents, que dieu les gardent et les protègent pour leurs soutien moral et financier, pour leurs encouragements, j'espère que vous êtes tout simplement fière de moi, je ne pourrais jamais vous récompenser pour les grands sacrifices que vous avez fait et continuez de faire pour mon éducation et mon bien être, c'est à vous que je dois cette réussite et je suis fière de vous l'offrir. Que Dieu tout puissant vous accorde santé, longue vie et bonheur.

A mes frères : 'MUSTPHA, ISMAIL'

A mes sœurs : 'SOUMIA, CHAIMAA'

A mes belle sœurs : 'SOUMIA, YASSMINA'

A mon beau frère : 'FETHALLAH'

A mes neveux et mes nièces : 'FATIMA ZOHERA, LOUAY, RAWAN'

A ma chère amie : 'RANIA', qui était toujours à mes côtés, tu es pour moi une sœur je te dédie et toute ta famille ce travail, je vous souhaite une

vie pleine de santé et de bonheur.

A mes camarades de promotion en souvenir des bons

Moments passés ensemble, je regrette de ne plus vous voir aussi souvent.

A toute ma famille tous ceux qui me sont chères.

BENJKHLEF HADJRA

Remerciements

On dit souvent que le trajet est aussi important que la destination. Nos années de maîtrise nous ont permis de bien comprendre la signification de cette phrase. Ce parcours, en effet, ne s'est pas réalisé sans défis et sans soulever de nombreuses questions pour lesquelles les réponses nécessitent de longues heures de travail.

*Nous tenons dans un premier temps à remercier **ALLAH** le tout puissant de nous avoir donné la foi, le courage et de nous avoir aidées tout au long de notre parcours éducatif.*

*Nous voudrions particulièrement remercier notre encadrant, **Dr Omar TALEB**, de nous avoir fait confiance. Nous lui exprimons ici notre profond respect et gratitude pour le suivie, et la précieuse aide qui a permis de réaliser ce modeste travail.*

*Nos vifs remerciements vont également à **Mr Tewfik SOUALEM**, en tant que Co-encadrant, pour ses remarques et suggestions pour améliorer la qualité de ce mémoire.*

*Nous remercions également, **Pr Youcef HOUMADI** de nous faire l'honneur de présider ce jury.*

*Nos vifs remerciements au **Pr Latifa SAIL** qui a participé à l'examen de ce travail.*

Nous remercions infiniment tous les enseignants qui nous ont aidés durant tout notre cycle d'études.

*Nos sincères remerciements s'adressent à toute l'équipe du laboratoire du Génie Civil de l'université de Tlemcen, **Dr Mustapha HENNAOUI** et **Mr HAKIM** ainsi qu'à l'équipe du laboratoire EOLE spécialement **Mr Mohammed BARKA** pour leurs précieuses aides, leurs disponibilités et leurs soutiens.*

Merci d'avoir pris le temps de répondre à nos nombreuses questions.

*On voudrait également adresser nos vifs remerciements à toute l'équipe de **laboratoire LAE**.*

Un grand merci à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour l'élaboration de ce travail.

Résumé

Le polystyrène expansé est un matériau isolant, qui peut absorber le surplus de chaleur pendant la journée, en été. Il offre un espace sec et confortable tout en éliminant l'humidité qui peut se condenser sur les murs. Par conséquent, il peut apporter une solution technique très intéressante au problème d'isolation thermique et acoustique dans les bâtiments.

Notre travail s'insère dans cette thématique et consiste à formuler des bétons légers à base de microbilles en polystyrène appelés « styrobétons ».

Pour ce faire, une série de béton avec différents pourcentage volumique de microbilles en polystyrène ont été confectionnés et étudiés à l'état frais sur le plan de la rhéologie et à l'état durci sur le plan mécanique. De plus, une étude thermique a été réalisée sur ces bétons en faisant varier la température de 20° à 60°.

Les principaux résultats ont montré que les microbilles à base de polystyrène ont un effet bénéfique sur la maniabilité mais au dépend de la résistance mécanique. Sur le plan thermique, les résultats ont clairement montré l'effet bénéfique de ces microbilles.

Mots clés : béton léger, styrobéton, microbilles de polystyrène, formulation, rhéologie, résistance, thermique.

Abstract :

Expanded polystyrene is an insulating material that can absorb excess heat during the day in the summer. It offers a dry and comfortable space while eliminating moisture that can condense on the walls. Therefore, it can provide a very interesting technical solution to the problem of thermal and acoustic insulation in buildings.

Our work fits into this theme and consists of formulating lightweight concrete based on polystyrene microbeads called «styrobetons».

To do this, a series of concrete with different density percentages of polystyrene microbeads were made and studied in the fresh state in terms of rheology and in the mechanically hardened state. In addition, a thermal study was carried out on these concretes by varying the temperature from 20° to 60°.

The main results showed that polystyrene-based microbeads have a beneficial effect on maneuverability but at the expense of mechanical resistance. The thermal results clearly showed the beneficial effect of these microbeads.

Keywords: light concrete, styrobeton, polystyrene microbeads, formulation, rheology, resistance, thermal.

الماء خص:

البوليسترين الموسع هو مادة عازلة يمكنها امتصاص الحرارة الزائدة خلال النهار في الصيف. يوفر مساحة جافة ومريحة مع التخلص من الرطوبة التي يمكن أن تتكثف على الجدران. لذلك، يمكن أن يوفر حلاً تقنيًا مثيّرًا للاهتمام لمشكلة العزل الحراري والصوتي في المباني.

يتناسب عملنا مع هذا الموضوع ويتكون من صياغة خرسانة خفيفة الوزن تعتمد على حبيبات البوليسترين تسمى «الستايروبيتون».

للقيام بذلك، تم صنع ودراسة سلسلة من الخرسانة بنسب كثافة مختلفة من حبيبات البوليسترين في الحالة الجديدة من حيث علم الريولوجيا وفي الحالة المتصلبة ميكانيكيًا. بالإضافة إلى ذلك، تم إجراء دراسة حرارية على هذه النوعيات عن طريق تغيير درجة الحرارة من 20 درجة إلى 60 درجة.

أظهرت النتائج الرئيسية أن حبيبات القائمة على البوليسترين لها تأثير مفيد على القدرة على المناورة ولكن على حساب المقاومة الميكانيكية. أظهرت النتائج الحرارية بوضوح التأثير المفيد لهذه الحبيبات.

الكلمات الرئيسية: خرسانة خفيفة، ستيروبيتون، حبيبات البوليسترين، تركيبة، ريولوجيا، مقاومة، حرارية.

Table des matières :

Dédicace	II
Remerciements	IV
Abstract :	VI
المــــا :.....	VII
Table des matières :	VIII
Liste des figures :	XI
Liste des tableaux :	XIII
Liste des Symboles :	XIV
Introduction Générale.....	XV
Chapitre I : Synthèse bibliographique	
I.1 Historique du béton léger :	18
I.1.1 Le béton léger :	19
I.1.2 Définition :	19
I.1.3 Divers domaine d'application :	19
I.1.3.1 Fondation :	19
I.1.3.2 Rénovation :	20
I.1.3.3 Isolation :	20
I.1.3.4 Chapes et bétons légers :	22
I.1.3.4.1 Les chapes	22
I.1.3.4.2 Différents types de chape :	22
I.1.3.4.3 Chapes rapportées adhérentes :	23
I.1.3.4.4 Chapes incorporées adhérentes :	23
I.1.3.4.5 Chapes désolidarisées :	23
I.1.3.4.6 Chapes flottantes :	24
I.1.3.4.7 Les formes de chapes:	25
I.2 Classification des granulats légère :	25
I.3.1 Les bétons cellulaires :	28
I.3.1.1 Composition :	28
I.3.1.2 Les propriétés :	28
I.3.1.3 Utilisation :	29
I.3.2 Béton caverneux :	29
I.3.2.1 Composition :	29

I.3.2.2	Propriétés :	29
I.3.2.3	Utilisation :	30
I.3.3	Bétons de granulats légers /béton a base de microbilles de polystyrène :	30
I.3.3.1	Fabrication de Polystyrène expansé :	30
I.3.3.2	Le styrobéton :	31
I.3.3.2.1	Propriété :	31
I.3.3.2.2	Inconvénient :	32
I.3.3.2.3	Précaution d'emploi :	32
I.3.3.3	Traitement des microbilles :	32
I.4	Comportement rhéologique :	32
I.5	Comportement mécanique :	35
I.6	Comportement thermique :	36
I.7	Conclusion :	37
Chapitre II : Partie expérimentale		
II.1	Caractérisation des matériaux :	39
II.1.1	Identification du sable :	39
II.1.2	Equivalent de sable :	39
II.1.3	Propriétés dimensionnelles :	40
II.1.4	Essai au bleu de méthylène: (NF EN 933-9)	41
II.1.5	Module de finesse :	42
II.1.6	Masses volumiques apparentes et absolues des constituants (NA 255) :	43
II.1.7	Coefficient d'absorption :	44
II.1.8	Billes de polystyrène expansé :	45
II.1.9	Diamètre des microbilles de polystyrène :	46
II.1.10	Identification de ciment :	46
II.1.11	Consistance du ciment :	47
II.1.13	Dosage de saturation de l'adjuvant :	48
II.2	Formulation du béton:	50
II.2.1.	Description du béton :	50
II.2.2	La composition du béton :	50
II.2.3	Malaxage et remplissage des éprouvettes :	52
II.3	Description des essais en laboratoire :	53
II.4	Mesures état frais :	53
II.4.1	Essaie d'affaissement :	53

II.4.2 Etude rhéologique des bétons à base de polystyrène :.....	56
II.5 Mesures à l'état durci :	60
II.5.1 Mesure de la résistance mécanique :	60
II.5.2 Mesure de l'adhérence :.....	63
II.5.2.1 Mode opératoire :.....	63
II.5.3 Etude thermique :.....	65
Conclusion générale :	71
LES NORMES :	72
Références Bibliographiques :	73

Liste des figures :

Figure 1 : REPRESENTATION schématique des différents types de béton léger[22].....	28
Figure 2 :Diagramme de la fabrication du polystyrène	31
Figure 3 : Principales lois de comportement rhéologique du béton [28].....	33
Figure 4 : Comportement rhéologique de l'échantillon avec le minimum d'PES.....	34
Figure 5 : Résultats de l'essai de résistance à la traction	35
Figure 6 : Résultats des essais de résistance à la compression.....	35
Figure 7 : sable de l' ENG	39
Figure 9: Analyse granulométrique du sable.....	40
Figure 8 : Essai d'équivalent de sable.....	40
Figure 10 :essaie de bleu de méthylène.....	42
Figure 11 : Détermination de la masse volumique.....	44
Figure 12 : Essai d'absorption du PSE	45
Figure 13 : Mesure avec pied à coulisse.....	46
Figure 14 : Ciment CEM II 42.5	46
Figure 15 : Malaxage de la pate	47
Figure 16 : Essaie de Vicat.....	47
Figure 18 : Fiche technique de SikaLatex	49
Figure 17 : Essaie de Kantro	48
Figure 19: VARIATION DE L'ETALEMENT DE LA PATE DE CIMENT EN FONCTION DU DOSAGE EN SUPER PLASTIFIANT	49
Figure 20 : (a) avec un malaxeur, (b) avec une bétonnière (c) manuellement	52
Figure 21: Les différents étalements de les essaie de la série I	54

Figure 22 : valeurs d'affaissement en fonction de % des billes	55
Figure 23 : Les différents étalements de les essaie de la série II.....	55
Figure 25: Evolution du couple (T) et la vitesse de rotation (N) en fonction du temps.	57
Figure 24:rheometre	56
Figure 26: Relation entre le couple et la vitesse de rotation (cas du béton avec 100% PES).....	58
Figure 27: Relation entre la contrainte et le taux de cisaillement (cas du béton avec 100% PES).....	58
Figure 28 : Essaie de la résistance mécanique SERIE I.....	60
Figure 29: LES RESULTATS DE LA RESISTANCE MECANIQUE DES ESSAIES DE LA SERIE II.....	61
Figure 30: EVOLUTION DE LA RESISTANCE EN FONCTION DU % DES MICROBILLES	62
Figure 31 : Les étapes de l'essaie d'adhérence.....	63
Figure 32: les résultats de l'essaie d'adhérence.....	64
Figure 33 : Les échantillons étuvés	65

Liste des tableaux :

Tableau 1 : Les avantages et les inconvénient des différents types d'isolation	20
Tableau 2: LES EPAISSEURS DES CHAPES DEPENDENT DE LA CLASSE DECOMPRESSIBILITE D'ISOLANT	24
Tableau 3 : Classification Des Bétons Légers En Fonction De La Densité [19].....	26
Tableau 4 Classification des bétons légers selon le guide ACI 213R-87	26
Tableau 5 Classification des bétons légers selon l'utilisation dans la construction	27
Tableau 6 : Classification des bétons légers selon l'utilisation dans la structure [20].....	27
Tableau 7 :L'essai d'équivalent de sable	39
Tableau 8 : Résultats de l'essai de VB.....	41
Tableau 10 : Masses volumiques apparentes et absolues des constituants.....	43
Tableau 9 :Vérification de la classe granulaire	43
Tableau 11 : Le coefficient d'absorption d'PES	44
Tableau 12 : Caractéristiques des billes de polystyrène	45
Tableau 13 : composition chimique de ciment(Rapport du laboratoire LTPO).....	46
Tableau 14 : Caractéristiques physico - mécaniques du ciment. (Rapport du laboratoire LTPO)	47
Tableau 15 : Résultats d'étalement des pâtes en utilisant sika latex	48
Tableau 16 :Résultats d'étalement des pâtes en utilisant SKY 3080.....	49
Tableau 17 : Compositions des bétons préparés lors de la première partie expérimentale	50
Tableau 18 : Composition des bétons préparés pour la deuxième série d'essai	51

Tableau 19 : les essais réalisés et les dimensions des éprouvettes	53
Tableau 20 : les résultats d'affaissement des bétons de la série I.....	54
Tableau 21 : les résultats d'affaissement des essais de la série II	55
Tableau 22 : les résultats de la résistance mécanique des essais SERIE I.....	60

Liste des Symboles :

PES : microbilles de polystyrène

ρ : masse volumique

R_c : Résistance à la compression

γ : taux de cisaillement

τ : contrainte

τ_0 : le seuil de cisaillement

μ_{pl} : viscosité plastique

λ : conductivité thermique

ESV : équivalent de sable visuel

ESP : équivalent de sable avec piston

W : coefficient d'absorption

E/C : rapport eau sur ciment

Adj : adjuvant

V_B : la valeur de bleu de méthylène

F_c : résistance à la compression

F_t : résistance a la traction

F_a : force d'arrachement

F_r : contrainte d'arrachement

Introduction Générale

Un bâtiment est conçu pour protéger les usagers des effets climatiques (chaud, froid) en créant un microclimat intérieur satisfaisant pour l'exercice de diverses activités, tout en assurant une gestion efficace de l'énergie.

La limitation de la consommation énergétique est basée en premier lieu sur le choix des matériaux utilisés pour la construction de l'enveloppe. Parmi les matériaux de construction les plus utilisés, on retrouve le béton qui doit avoir une certaine résistance, une bonne durabilité, une réflectivité et une grande polyvalence. La densité du béton ordinaire peut être modifiée en fonction de son utilisation. À cet égard, la sélection des matières premières, notamment les granulats, qui forment le squelette du béton, joue un rôle important dans l'ajustement du poids du béton.

L'utilisation de granulats légers pour remplacer les granulats fins et grossiers dans le béton est une méthode courante pour produire un béton de granulats légers.

Le béton léger a une masse volumique à sec inférieure à celle d'un béton ordinaire (inférieure à 1800 Kg/m³). Ce béton peut contenir un pourcentage volumique importante de granulats légers tel que le polystyrène ou peut être rendu cellulaire par aération ou moussage.

Pour le développer, deux éléments doivent être pris en considération : les concepts liés à la formulation des bétons légers et l'utilisation de granulats légers.

Par ailleurs, il devient de plus en plus intéressant d'évaluer le potentiel des matériaux légers comme source de matières premières.

L'objectif de ce travail est de formuler des bétons légers à base de microbilles en polystyrènes appelés aussi les styrobétons . Une étude sur la rhéologie de ces bétons est nécessaire car elle conditionne la mise en place du matériau. De plus, l'étude du comportement mécanique et thermique est importante pour montrer la spécificité de ces bétons légers.

Dans ce contexte, ce mémoire s'articule autour de deux parties :

La première partie est consacrée à une synthèse bibliographique

La deuxième partie englobe le travail expérimental réalisé au niveau du laboratoire, ainsi que les différents résultats obtenus.

Chapitre 1 :

Synthèse bibliographique

Le béton léger est considéré comme l'une des alternatives qui ont une grande importance dans les bâtiments moderne, il est largement utiliser dans les travaux de construction en raison de ses caractéristiques que le béton traditionnel ne fournit pas. De plus le polystyrène est disponible localement à faible cout, il fournit une bonne isolation thermique, économisant l'énergie nécessaire pour le refroidissement et le chauffage, surtout que le polystyrène est considéré comme matériau de choix pour l'isolation thermique.

I.1 Historique du béton léger :

L'utilisation des bétons légers n'est pas une chose nouvelle dans le domaine du béton. Bien au contraire, ces bétons sont connus depuis les temps anciens et ont été largement utilisés dans les constructions du moyen âge. Les premières bâtisses européennes en béton léger ont été construites au début de l'Empire romain, il y a déjà deux mille ans. Le Panthéon à Rome, en Italie, a été construit avec des matériaux légers en 128 AJC et peut être cité comme l'un des exemples les plus connus. Il a émerveillé les ingénieurs de diverses disciplines pendant des centaines d'années et a démontré de manière impressionnante l'utilisation systématique de divers agrégats naturels légers dans l'opus caementitium [1].

Après l'effondrement de l'Empire romain, l'utilisation du béton léger a été limitée en raison de la faible disponibilité et de la variabilité des agrégats volcaniques naturels. Le développement et la production d'agrégats légers produits industriellement aux XIXe et XXe siècles ont marqué un tournant historique pour la technologie des matériaux [2],[3] Initialement, l'utilisation des agrégats élargis était réservée à la Marine des États-Unis d'Amérique. L'U.S. Emergency Fleet Building Corporation a établi un programme de construction navale avec l'entrée des États-Unis dans la Première Guerre mondiale. En 1918, Atlantis a été le premier navire à émerger de ce programme et quatorze coques de navire en béton léger ont été construites au total. Au cours de la seconde guerre mondiale, ces premières expériences ont conduit au déploiement de 104 navires de ravitaillement, avec des capacités de cargaison allant de 3200 à 140000 tonnes [4].

Son utilisation réussie dans la construction navale a permis l'introduction du béton léger dans l'ingénierie structurale. La première usine commerciale à produire des agrégats élargis a été établie en 1920 au Kansas, aux États-Unis. La qualité et la composition uniformes des agrégats produits industriellement se sont révélées avantageuses par rapport aux agrégats d'origine naturelle [5]. Au cours des années 20 du siècle précédent, plusieurs ponts ont été construits en utilisant de l'ardoise expansée comme agrégat dans du béton léger. Cinquante ans plus tard, plus de 200 ponts légers en béton ont été construits aux États-Unis et au Canada [6], Au milieu du XXe siècle, l'utilisation de béton léger dans l'ingénierie structurale s'est intensifiée. Elle a mené à la construction de tours d'habitation à étages multiples, comme le Prudential Plaza Building ou les tours Marina City à Chicago. Cependant, le béton léger a été principalement utilisé pour des raisons structurelles et une adaptation largement limitée aux cas individuels [7].

A la suite de la crise pétrolière de 1973, l'Allemagne a reconsidéré sa position politique en matière de consommation d'énergie. Afin de devenir plus indépendante des importations d'énergie, la loi sur les économies d'énergie [8] a été mise en œuvre comme conséquence logique. Entre autres, l'utilisation efficace de l'énergie dans les bâtiments est devenue une obligation politique. Par conséquent, les murs extérieurs monolithiques en béton léger d'une épaisseur économique ne répondaient plus aux exigences accrues en matière d'isolation thermique.

I.1.1 Le béton léger :

I.1.2 Définition :

Il est constitué en partie ou en totalité de granulats légers, de liants hydrauliques ou de résines synthétiques (époxydes, mousses de polyuréthane, etc.). En fait, la majorité de ces bétons a une masse volumique faible, comparativement à celle des bétons conventionnels comprise entre 2200 et 2600 kg/m³ [14].

Pour développer un béton léger, on doit prendre en considération deux aspects :

- ✓ les particularités en matière de formulation des bétons légers,
- ✓ la source des constituants spécifiques à la confection de bétons légers dont les matériaux légers naturels, artificiels et recyclés.

Ces deux aspects sont reliés avec la masse volumique qui diminue en remplaçant une quantité de matériaux par de l'air. Ces vides d'air peuvent être incorporés à trois endroits: soit dans les granulats, dans la pâte de ciment ou entre les gros granulats par élimination de granulats fins.

I.1.3 Divers domaine d'application :

On retrouve le béton léger dans diverses applications :

I.1.3.1 Fondation :

On peut retrouver du béton léger dans les fondations. En effet, ce dernier étant moins lourd que le béton classique, il peut être placé sur une structure demandant une résistance moins élevée à la charge. Ceci peut être un avantage car la structure est donc plus facile à mettre en place et par conséquent, des économies peuvent être faites[15].

I.1.3.2 Rénovation :




















Ce béton étant plus léger qu'un béton classique, permet donc de réaliser des rénovations sans avoir à renforcer au préalable la structure sur laquelle on souhaite l'appliquer [16].

I.1.3.3 Isolation :

Le béton léger a comme particularité d'être à la fois un bon isolant thermique et phonique. De ce fait, il est très utilisé lors de la conception de mur ou de dalle.

- ✓ Les types d'isolation thermique avec leurs avantages et leurs inconvénients sont résumés dans le tableau suivant :

TABLEAU 1 : LES AVANTAGES ET LES INCONVENANT DES DIFFERENTS TYPES D'ISOLATION

Isolation par l'extérieur	Isolation dans la coulisse	Isolation par l'intérieur
 Continuité de l'isolation	 Préservation de l'aspect extérieur	 Préservation de l' aspect extérieur
 Évitement de potentiels ponts thermiques ⁷	 Aucune perte de place à l'intérieur	 Diminution du volume intérieur
 Aucune perte de place à l'intérieur	 Préservation de l'inertie thermique	 Diminution de l'inertie thermique
 Étanchéité de la façade améliorée	 Limitation de l'épaisseur de l'isolant de la coulisse	 Formation/accentuation des ponts thermiques
 Préservation de l'inertie thermique ⁸	 Accroissement du risque d'infiltration d'eau	 Finition intérieure à refaire
 Modification de l'aspect extérieur	 Formation de potentiels petits ponts thermiques causés par des déchets de mortier	
 Nécessité dans de nombreux cas d'un permis d'urbanisme	 Uniquement possible si largeur de la coulisse supérieure à 4 mm	

- ❖ Plusieurs travaux traitent du sujet de la réhabilitation du béton léger. On constate que les différents travaux de recherche sur ce sujet se répartissent en quatre grandes disciplines traitant respectivement de l'affaissement, de la résistance (compression-flexion), de la rhéologie et de la conductivité thermique.
- **Zaher Kuhail,2001 [9]** a montré les performances du béton léger en utilisant des microbilles de polystyrène et des agents moussant.Son but principal était de produire un béton léger avec une bonne maniabilité et une bonne résistance en variant la quantité d’PES et d’agent moussant. Les résultats obtenus montrent que : la densité du béton léger est réduite avec l’augmentation des vides causées par les microbilles de polystyrènes.
- **M. Reisi & al.,2012[10]** ont réalisé 08 mélanges de béton avec des densités environ égales à 700 kg/m₃. Les résultats montrent que l'utilisation de fumée de silice et d'agent entraîneur d'air peut diminuer la ségrégation des grains PES et améliorer la liaison entre le PES et la pâte de ciment, de sorte que le mélange de béton aura plus d'homogénéité.
- **Ankur Tayal & Gaurav Gupta ,2015[11]** ont remplacé les agrégats grossiers du béton par des billes de polystyrène expansé (PES) pour obtenir un béton léger. L'objectif principal de cette expérience était de comparer les propriétés, telles que la résistance à la compression et l'isolation thermique du béton PES avec celles d'un béton standard. Pendant le processus de chauffage, les billes du PES qui sont entrées en contact direct avec la surface chauffée se sont rétractées, entraînant la formation des vides dans le béton.et la réduction du poids du mélange qui était significative.
- **Aman Mulla & Amol Shelake,2016[12]** se sont basés sur la comparaison de quatre bétons. Le premier était un béton ordinaire considéré comme béton de référence, les autres formulations étaient caractérisées par des quantités variables du PES , L’objectif principal de cette étude était de trouver une proportion de mélange de béton qui offrait le meilleur résultat par rapport à la brique brulée, et d’étudier les propriétés telles que la densité, la résistance à la compression et à la traction. Selon les résultats observés, plus la quantité d’PES était réduite, plus la résistance à la compression et à la traction s’amélioraient, De plus, la maniabilité du béton léger d’PES augmente avec l’augmentation de la teneur en PSE et peut être facilement compacté. Concernant la densité, les auteurs ont remarqué que le béton avec la plus basse teneur de PES avait une résistance supérieure à la brique brulée.

- **Mohammed Salman Al-Lami & Al, 2021 [13]** a proposé des relations mathématiques entre la résistance à la compression, la densité et les proportions du mélange, un programme expérimental intensif a été mis en œuvre à cette fin. Les variables étudiées étaient les proportions du mélange, à savoir le rapport polystyrène/ciment (P/C), le rapport sable/ciment (S/C) et le rapport eau/ ciment (E/C). Les résultats des essais ont permis de conclure que la résistance à la compression diminue lorsque le rapport (P/C) augmente ; ainsi avec l'augmentation du rapport (S/C) la résistance à la compression devenait plus sensible à la teneur en polystyrène.

I.1.3.4 Chapes et bétons légers :

Le béton léger peut aussi être utilisé afin de concevoir des chapes sèches, qui sont d'ailleurs considérée comme de bons isolants phoniques et thermiques. [16] Il est utilisé dans toutes les étapes de la construction, en intérieur comme en extérieur (murs, cloisons, plafonds,...), du gros œuvre extérieur aux divers aménagements et finitions intérieurs.

I.1.3.4.1 Les chapes

Une chape est une fine couche de mortier avec une épaisseur comprise entre 4 et 6cm. cette couche n'a pas de fonction structurelle, elle est coulée entre la dalle et le revêtement de sol et assure différentes fonctions :

- aplanir le sol pour obtenir une finition lisse.
- supporter le revêtement (exemple revêtement de sol collé type carrelage).
- répartir les charges et les transmettre au support (dalle de béton).

I.1.3.4.2 Différents types de chape :

L'exécution des chapes destinées aux bâtiments d'usage courant (tels que logements, bureaux, boutiques, bâtiments scolaires, etc...) est définie dans le **DTU 26.2**.

En fonction de leur conception et de leur mode de réalisation, on distingue :

- les chapes adhérentes, qui sont rapportées ou incorporées.
- les chapes désolidarisées.
- les chapes flottantes.

I.1.3.4.3 Chapes rapportées adhérentes :

La chape est coulée directement sur le support en béton durci (dalle) en y étant liaisonnée par adhérence.

Dans ce cas, l'isolant ne peut pas être placé entre le mortier et le support et doit donc être mise en place en dessous du support.

Elles peuvent être mises en œuvre dans les locaux à sollicitations faibles (ex : locaux d'habitation, bureaux, boutiques, salles de classe), modérées (ex : galeries commerciales) et dans les cuisines collectives.

I.1.3.4.4 Chapes incorporées adhérentes :

Elle est constituée d'un mortier très fin, et est appliquée avant que le béton du support (dalle) n'ait fait sa prise.

Cette technique, qui nécessite de couler la chape sur le béton encore frais, est réalisée par des maçons professionnels car elle demande un véritable savoir-faire.

Elle est majoritairement utilisée dans le cas de surfaces très sollicitées tels que les dallages industriels.

I.1.3.4.5 Chapes désolidarisées :

Elle est désolidarisée de son support par l'intermédiaire d'une couche de désolidarisation (film polyane ou lit de sable) placée entre la dalle et le mortier.

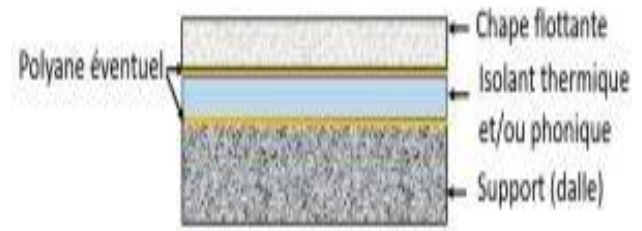


Cette couche permet d'éviter le contact et l'adhérence entre les deux, et ainsi de limiter la fissuration du mortier.

Elles peuvent être réalisées dans les locaux à sollicitations faibles, modérées et dans les cuisines collectives.

I.1.3.4.6 Chapes flottantes :

- Elles sont destinées à répartir la pression des charges exercées sur la surface.
- Elles sont entièrement désolidarisées des parois verticales et de leur support.
- Elles sont posées sur une couche d'isolation thermique et/ou phonique, et sont réalisées uniquement dans les locaux à sollicitations faibles.



Cette technique est également utilisée lorsqu'on veut faire une chape sur plancher chauffant, pour enrober les tuyaux de chauffage du sol [17].

Les épaisseurs des chapes dépendent de la classe de compressibilité d'isolant selon le tableau suivant :

TABLEAU 2: LES EPAISSEURS DES CHAPES DEPENDENT DE LA CLASSE DECOMPRESSIBILITE D'ISOLANT

Isolant		Chape
Classe de compressibilité		Epaisseur (Cm)
I	Epaisseur ≤ 3 mm	3
		4
	Tassement ≤ 0.5 mm et épaisseur > 3 mm	4
		5
II	$0.5 < \text{tassement} \leq 3$ mm	4
		5
III	$3 < \text{tassement} \leq 12$ mm	4
		5

I.1.3.4.7 Les formes de chapes:

➤ **Les formes de pente :**

D'épaisseur variable, elles sont destinées à favoriser l'écoulement des eaux : généralement exécutées en toitures-terrasses, elles reçoivent dans ce cas soit l'étanchéité directement appliquée et sa protection éventuelle, soit les panneaux isolants supportés d'étanchéité.

➤ **Les ravoirages :**

Les ravoirages réalisés en mortier, sable ou stabilisé sont utilisés pour atteindre la cote de niveau souhaitée en y incorporant, le cas échéant des canalisations : ils peuvent recevoir soit un revêtement de sol scellé, soit une chape elle-même destinée à recevoir un revêtement de sol collé.

➤ **Les besaces :**

Les besaces sont des formes localisées des faibles dimensions.

I.2 Classification des granulats légers :

Un béton léger est défini par deux caractères de base, dépendant des autres caractères ou des données nécessaires au calcul. Il s'agit :

- de la masse volumique sèche, désignée par γ_{bs} ;
- de la résistance à la compression à l'âge de 28 jours.

La norme EN 206 classe les bétons légers dans les six catégories de densités suivantes, en fonction de leur masse en Kg/m³. **[18]**

TABLEAU 3 : CLASSIFICATION DES BETONS LEGERS EN FONCTION DE LA DENSITE [19]

Classe de densité	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
Kg /m ³	901	1001	1201	1401	1601	1801
	à	à	à	à	à	à
	1000	1200	1400	1600	1800	2000

On retrouve une autre classification qui se base essentiellement sur la masse volumique puisqu'elle est étroitement liée avec la résistance, ce qui explique pourquoi la norme ACI 213R - 8713.141 classe les bétons en fonction de la masse volumique (entre 300 et 1900 kg/m³) en trois catégories comme indiqué dans le tableau suivant :

TABLEAU 4 CLASSIFICATION DES BETONS LEGERS SELON LE GUIDE ACI 213R-87

Classification	ρ (Kg/m ³)	Rc (MPa)
Béton léger de structure	1350-1900	>17
Béton léger de résistance modérée	800-1350	7-17
Béton de faible résistance	300-800	<7

De même Kass J.L et Compbell D, en Australie, ont adopté une classification fonctionnelle des bétons légers selon leur utilisation dans la construction. Cette classification a été recommandée par la suite par les RILEM (RILEM, 1970).

**TABLEAU 5 CLASSIFICATION DES BETONS LEGERS SELON L'UTILISATION DANS LA CONSTRUCTION
(RILEM, 1970)**

Type de béton léger	De construction	De construction et d'isolation	D'isolation
Masse volumique (kg/m ³)	<1800	Non précisée	Non précisée
Résistance à la compression (MPa)	>15	>3.5	>0.5
Conductivité thermique (W/m.K)		<0.75	<0.30

Selon leur utilisation dans les structures, il existe aussi une classification suivant la masse volumique apparente du béton léger :

Tableau 6 : Classification des bétons légers selon l'utilisation dans la structure [20]

	Béton de remplissage	béton porteurs isolant	Béton de structure
La masse volumique (kg/m ³)	entre 300 et 1000	entre 300 et 1000	1400 et 1800
résistance à la compression	faible	Moins faible	comparables à celles des bétons ordinaires
caractéristiques thermiques	bonne	acceptables	faible

I.3 Types de béton léger :

- les bétons cellulaires.
- les bétons sans fines (caverneux).
- les bétons de granulats légers (argile expansé, microbilles de polystyrène [21]).

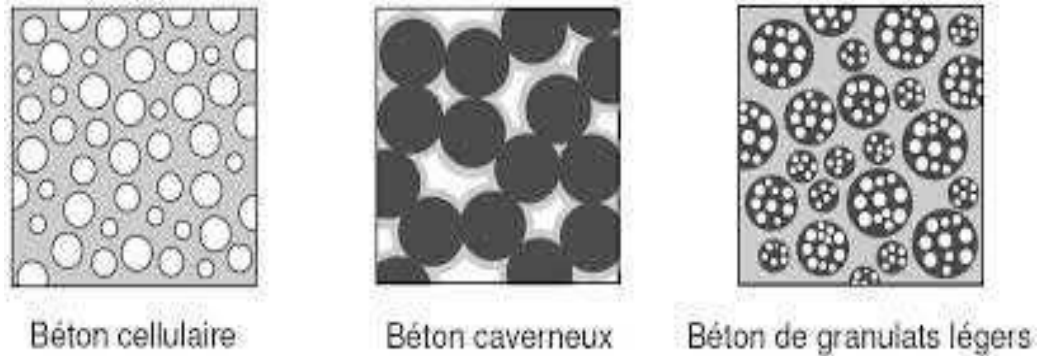


FIGURE 1 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES DIFFERENTS TYPES DE BETON LEGER[22].

I.3.1 Les bétons cellulaires :

I.3.1.1 Composition :

Toutes les matières premières sont présentes en abondance dans la nature. En moyenne, 65 % de sable de quartz siliceux, 20 % de ciment, Environ 15 % de chaux , 0,05 % d'agent d'expansion, 1 % de gypse et l'Eau.

Les pourcentages varient légèrement, mais de façon précise, en fonction de la masse volumique souhaitée. Au final, le béton cellulaire est constitué d'environ 80 % d'air et 20% de matières.

I.3.1.2 Les propriétés :

- Un matériau non polluant
- Un matériau moderne
- Un matériau léger, solide, et isolant
- Un matériau isotrope

La conductivité thermique augmente avec l'augmentation du contenu d'humidité. La quantité des pores et sa distribution sont aussi des facteurs qui influent sur l'isolation thermique du béton cellulaire.

I.3.1.3 Utilisation :

Pour les blocs non armés murs porteurs, cloisons non porteuses, murs de refend, cloisons coupe-feu et tous les petits travaux d'aménagement ou de réhabilitation. Pour les éléments armés : le bardage, le compartimentage coupe-feu, les toitures, les planchers, les murs en maison individuelle. [23]

Parmi ses avantages il est avant tout un matériau de construction léger. Cela est pratique autant pendant le processus de fabrication que pour le transport et la mise en œuvre. En effet, le béton cellulaire procure une manipulation facile par contre il est plus exposé aux fissures. Ce qui le désavantage par rapport aux parpaings et aux briques qui peuvent être également utilisés pour construire des murs extérieurs d'une maison.

I.3.2 Béton caverneux :

I.3.2.1 Composition :

Ces bétons sont constitués d'un mélange d'agrégats ordinaires ou légers et sont cimentés ensemble pour les lier. La pâte de ciment ne remplira pas tous les vides et l'air restera entre les agrégats. Par conséquent, ces bétons ont une porosité élevée, ils sont drainants. Ils sont fabriqués avec un minimum d'eau pour éviter de laver la pâte de ciment sur les granulats

I.3.2.2 Propriétés :

- ✓ Séchage rapide
- ✓ La densité : entre 500 et 600 Kg/m³
- ✓ La porosité : entre 15 et 25 % du volume
- ✓ une forte perméabilité
- ✓ Super léger : Il pèse 600 kg/m³ environ en œuvre,
- ✓ 10 fois plus isolantes que les solutions traditionnelles
- ✓ Conductivité thermique : 0,134 W/mK
- ✓ Incombustible et résistant au feu

I.3.2.3 Utilisation :

En raison de sa grande perméabilité à l'eau, le béton caverneux est utilisé comme matériau pour le pavage des routes résidentielles et piétonnes, des parkings, des trottoirs et des serres [24].

Puisqu'il laisse passer l'eau, le béton drainant permet le réapprovisionnement des nappes phréatiques. Fini le ruissellement à la surface de votre terrasse ou aux abords de votre piscine. Le cycle de l'eau est respecté et contribue à la bonne hydratation de vos terres. Par ailleurs, ce système permet de désengorger les réseaux d'égouts de votre ville. Par contre Dans le cas de fuite de substances nocives pour l'environnement, ils peuvent le traverser et atteindre le sol.

I.3.3 Bétons de granulats légers /béton a base de microbilles de polystyrène :

I.3.3.1 Fabrication de Polystyrène expansé :

En premier lieux il y a la polymérisation des gouttes de styrène à l'aide de vapeur d'eau avec l'introduction simultanée d'un agent d'expansion qui est le pentane. Le polymère obtenu se présente sous forme de billes sphériques dont les diamètres varient de 0,2 à 0,3 mm.

Après A l'intérieur d'une cuve en inox et en présence de vapeur d'eau, le pentane se dilate et provoque une première expansion du polystyrène expansible, jusqu'à 30 fois leur volume initial.

Ensuite, ces billes pré expansées reposent dans des silos pendant plusieurs heures pour permettre leur stabilisation.

Enfin Après maturation les billes pré expansées sont introduites dans un moule fermé et soumises à une nouvelle injection de vapeur d'eau. Elles reprennent leur expansion (jusqu'à 50 fois leur volume initial), occupent tout l'espace du moule et se soudent entre elles pour constituer l'emballage.

Le polystyrène expansé est donc un matériau composé principalement d'air (à 98%). Il est très léger avec une masse volumique comprise entre 10 et 30 Kg/m³.

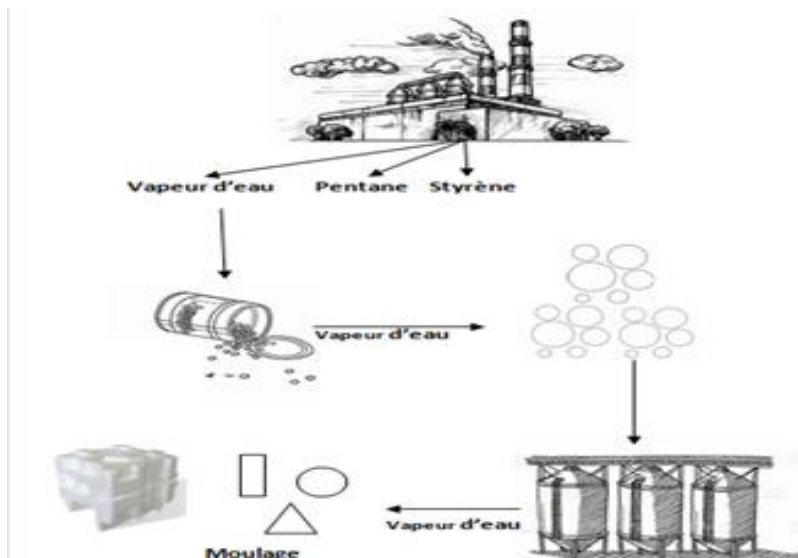


FIGURE 2 :DIAGRAMME DE LA FABRICATION DU POLYSTYRENE

I.3.3.2 Le styrobéton :

Les bétons légers sont obtenus par l'incorporation de vides d'air dans le matériau et dans notre cas on remplace les gros granulats par les microbilles de polystyrène qui sont composé de 98% d'air.

Les propriétés du béton varient essentiellement en fonction des matériaux utilisés et de leur dosage. Les principes de dosage font référence à trois principaux facteurs :

- ✓ la qualité de la pâte de ciment hydraté,
- ✓ la qualité des granulats,
- ✓ la rhéologie recherchée,

I.3.3.2.1 Propriété :

- ✓ bonne performance acoustique et thermique.
- ✓ une meilleure résistance aux feux (A2).
- ✓ une grande facilité de mise en œuvre et de travail
- ✓ Résistance au choc.
- ✓ Economique : réhabilitation rapide et non destructive.
- ✓ Imputrescible et inodore.

I.3.3.2.2 Inconvénient :

- ✓ Résistance plus faible.
- ✓ Porosité et perméabilité à l'air élevées.

I.3.3.2.3 Précaution d'emploi :

Les chapes en STYROBETON doivent être mises en œuvre sur des supports identifiés et convenablement préparés. Pour la reconnaissance des supports, se reporter aux documents du CSTB, de l'A.N.A.H. et DTU en vigueur.

Les épaisseurs minimum à respecter sont 5 à 8 cm en fonction de la densité du béton support.

I.3.3.3 Traitement des microbilles :

En général, les proportions du mélange, le coulage, le moulage, le durcissement, le temps de prise et le démoulage du styrobéton sont similaires à ceux du béton conventionnel.

Cependant, la proportion du mélange et le niveau de remplacement des agrégats peuvent être ajustés pour répondre aux propriétés mécaniques et d'ouvrabilité du béton.

En raison de la caractéristique ultralégère des granulats PES et de leurs propriétés hydrophobes, ils peuvent flotter pendant le processus de mélange et mal s'intégrer à la matrice de ciment. Par conséquent, diverses techniques de traitement, telles que l'ajout d'agents de liaison (résine époxy ou époxy émulsifié à l'eau) ou de différents adjuvants minéraux, sont nécessaires [25].

I.4 Comportement rhéologique :

Le béton est un matériau hétérogène de par ses éléments constitutifs. C'est une suspension de particules de tailles diverses dans un fluide suspendant. Son comportement rhéologique est classiquement considéré comme celui d'un fluide à seuil. De nombreux travaux associent à de telles suspensions concentrées un comportement rhéologique viscoplastique, par exemple de type Bingham [26] ,[27] Rappelons que le comportement rhéologique des fluides visqueux newtoniens (fluide classique) est caractérisé par une relation linéaire entre contrainte τ et taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ Un tel comportement semble trop réducteur pour caractériser les bétons. Parmi les modèles de fluides à seuil, nous pouvons distinguer le modèle de Bingham caractérisé par une viscosité plastique définie du modèle de HerschelBulkley pour lequel la composante visqueuse évolue en loi puissance.

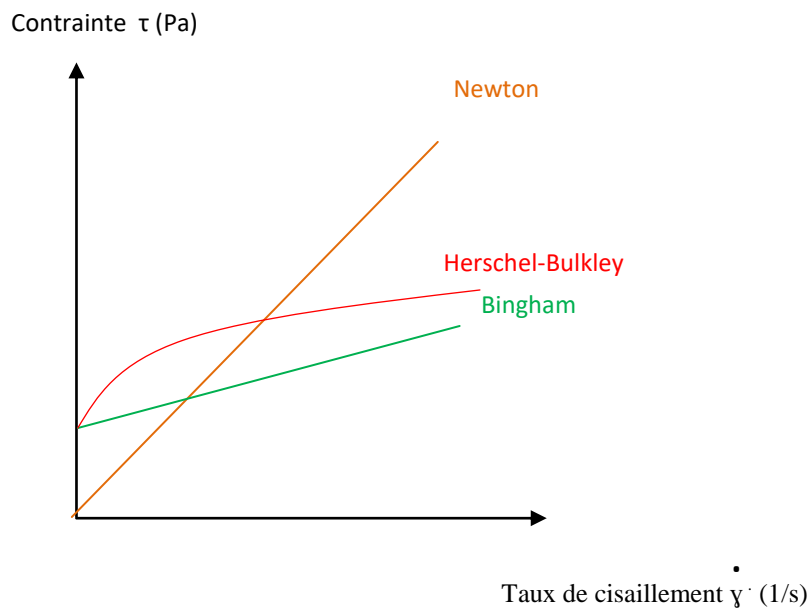


FIGURE 3 : PRINCIPALES LOIS DE COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DU BETON [28]

Les Principales lois de comportements rhéologiques du béton sont le modèle de Bingham qui est le modèle le plus utilisé pour modéliser le comportement rhéologique du béton en raison du faible nombre de paramètres à ajuster (le seuil de cisaillement τ_0 et la viscosité plastique μ_{pl}). Dans le cas unidimensionnel, cette loi de comportement s'écrit simplement pour retraduire les conditions d'arrêt de l'écoulement du béton ainsi que les dissipations liées à son écoulement :

$\dot{\gamma} = 0$	si	$\tau < \tau_0$
$\tau = \tau_0 + \mu_{pl} \dot{\gamma}$	Si	$\tau > \tau_0$

Le seuil de cisaillement correspond à la contrainte minimale à dépasser pour avoir un écoulement [29], [30]. Il peut être interprété physiquement par la présence de frottements intergranulaires. La viscosité plastique est caractéristique d'une dissipation visqueuse du fluide

suspendant entre les espaces interstitiels du squelette granulaire [31]. La quantité et la qualité de la pâte du béton vont donc logiquement conditionner sa viscosité plastique. Les diverses contributions rhéologiques des matériaux constitutifs du béton [31] Dans la littérature d'autres modèles existent. Ainsi, De Larrard et al. [1998] préfèrent utiliser le modèle d'Herschel-Bulkley [32] pour caractériser rhéologiquement certains bétons. Ce modèle permet de décrire les phénomènes non-linéaires tels que la rhéofluidification ou le rhéoépaississement du béton frais sous cisaillement. Le modèle de Bingham conduit à des singularités lorsque les taux de cisaillement sont faibles. La loi de Carreau [33] permet de s'affranchir du problème de viscosité apparente infinie du béton pour des contraintes inférieures au seuil de cisaillement, Bouvet et al. [2010] ont par exemple utilisé cette loi pour l'évaluation de la consistance d'une pâte de ciment à partir de mesures réalisées avec un cône de Marsh ou un mini-cône.

Rhéologie des bétons légers à base de polystyrène

➤ STEFAN-OVIDIU DIMA et al. : [34]

une étude rhéologique a été réalisée afin d'atteindre la compatibilité entre la matrice de béton hydrophile et les billes de polystyrène hydrophobes, les résultats de cette étude et l'analyse des graphes représenté sur la figure, montre que l'ajout d'PSE dans la matrice de béton même à la plus petite fraction massique a produit une augmentation de la contrainte de cisaillement d'écoulement. Lorsque la fraction PSE augmente, la viscosité augmente également et la contrainte d'écoulement augmente.

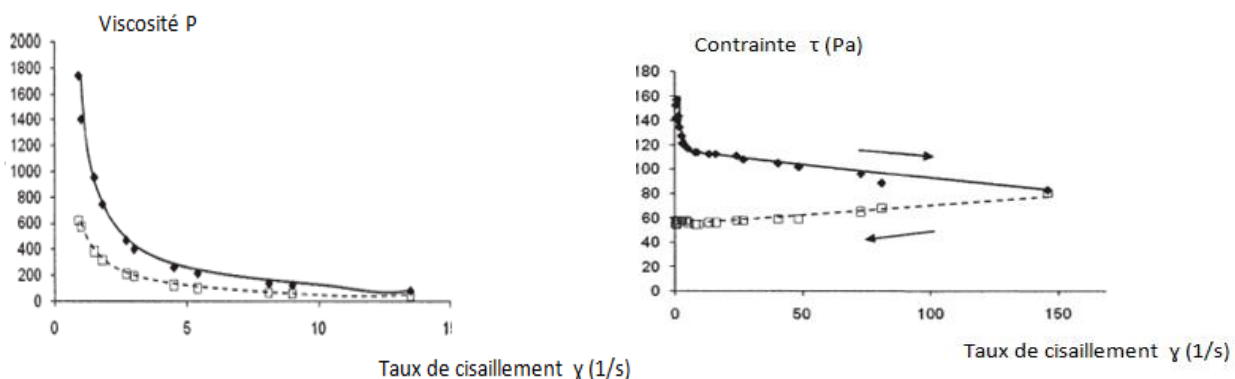


Figure 4 : Comportement rhéologique de l'échantillon avec le minimum d'PES

I.5 Comportement mécanique :

➤ **Aman Mulla, Amol Shelake [35]** : ont observé que la résistance à la compression et traction d'un béton augmente avec l'augmentation de l'âge du béton. Ils ont aussi constaté que plus la quantité de billes de PES est grande plus la résistance à la compression et la traction devient faible comme illustrés sur les figures suivantes :

(L'échantillon type B représente le béton qui contient le moins d'PES).

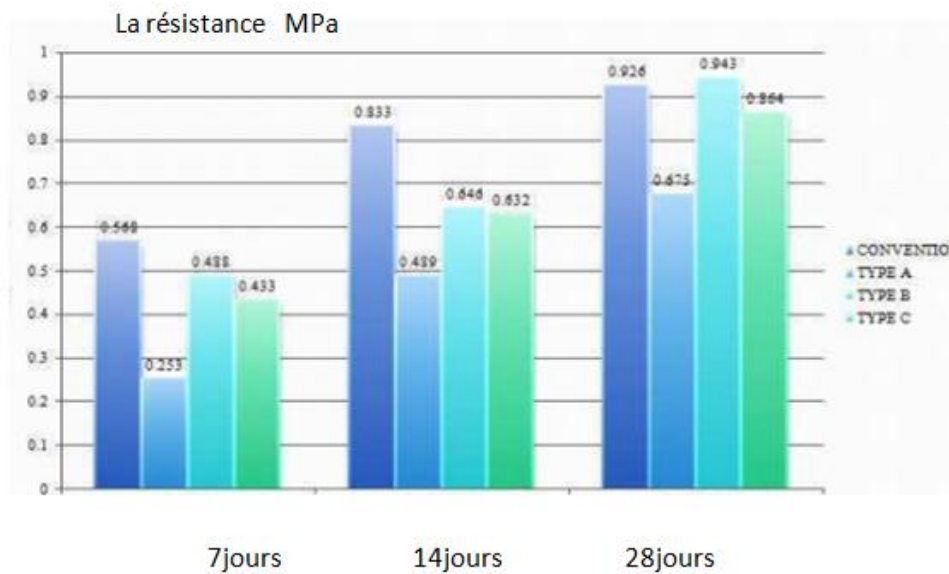


FIGURE 5 : RESULTATS DE L'ESSAI DE RESISTANCE A LA TRACTION

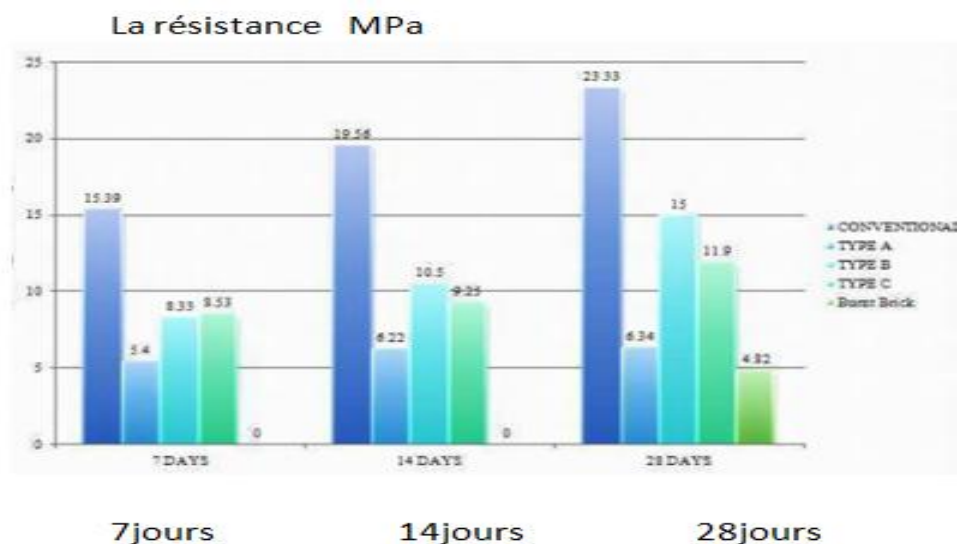


FIGURE 6 : RESULTATS DES ESSAIS DE RESISTANCE A LA COMPRESSION

I.6 Comportement thermique :

Thermiques, leur coefficient de conductivité étant de l'ordre de 0.20, pour de densité de 400 kg/m³ et 0.30 La demande d'une isolation adaptée s'est considérablement accrue. En effet une bonne isolation thermique est économiquement rentable et les économies d'énergie sont devenues une préoccupation majeure des architectes, des concepteurs et des constructeurs.

Une des propriétés intéressantes des bétons légers est leur pouvoir d'isolation thermique dû aux nombreuses bulles d'air interposées dans l'épaisseur du béton. Les bétons de polystyrène expansés sont constituent de bons isolations à pour de densité de 800 kg/m³. [36]

Les bétons légers de polystyrène ont donc une faible conductivité thermique notamment pour un taux de billes très important (de l'ordre de 70%). Par conséquent, ils peuvent apporter une solution technique très intéressante au problème d'isolation thermique dans les bâtiments [37]

I.7 Conclusion :

Dans ce premier chapitre, nous avons traité plusieurs points clés, qui peuvent être résumés comme suit :

- Il existe trois types de béton léger (béton cellulaire, béton caverneux et béton à granulats léger dans le monde, qui sont utilisés comme : béton léger structurel et béton léger architectural.
- Le polystyrène fait partie des isolants synthétiques.
- Les propriétés des PES et de la matrice de ciment jouent un rôle important dans les comportements rhéologique, mécanique et thermique du béton léger.
- Il est à noter que le béton léger est très utile dans différents domaines, notamment dans les zones à climats rigoureux (hautes et basses températures), où il est très largement utilisé.

Dans le chapitre suivant, on abordera le travail expérimental réalisé au niveau du laboratoire. Il est constitué de la formulation des bétons légers à base de polystyrène et de leurs caractéristiques.

Chapitre II :



Partie expérimentale

Après avoir récolté les informations nécessaires sur les bétons légers, nous allons entamer la confection des styrobétons afin d'optimiser la formulation qui répond aux propriétés souhaitées, bien sûr après avoir caractérisé tous les matériaux qui le composent.

II.1 Caractérisation des matériaux :

II.1.1 Identification du sable :

Le sable utilisé provient de la carrière de l'entreprise nationale des granulats l'ENG

(SIDI EL ABDELI), c'est des granulats calcaires concassés.



FIGURE 7 : SABLE DE L' ENG

II.1.2 Equivalent de sable :

L'équivalent sable est une mesure utilisée en géotechnique pour caractériser la propreté du sable ou du gravier. Il indique la teneur en éléments fins de la surface des particules, principalement d'origine argileuse, végétale ou organique. Ce terme désigne également l'essai qui permet de déterminer cet indicateur.

L'équivalent de sable est déterminé selon la norme (NA 455 / NF P 18-598).

TABLEAU 7 :L'ESSAIE D'EQUIVALENT DE SABLE

	h 1	h 2	ESV	h 2'	ESP
Eprouvette 1	10.9	7.9	72.47	7.5	68.8
Eprouvette 2	10.9	8.4	77.06	7.9	72.4

On prend la moyenne des éprouvettes 1 et 2 : $\frac{68.8+72.4}{2} = 70.6$

L'équivalent de sable obtenu en utilisant le piston est égal à 70,6, ce qui montre que le sable est propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour des bétons de qualité selon la norme (NF P 18-541).



FIGURE 8 : ESSAI D'EQUIVALENT DE SABLE

II.1.3 Propriétés dimensionnelles :

L'analyse granulométrique a été réalisée selon les démarches de la norme (NF P 94-056)

La courbe granulométrique du sable est **représentée sur la figure suivante.**

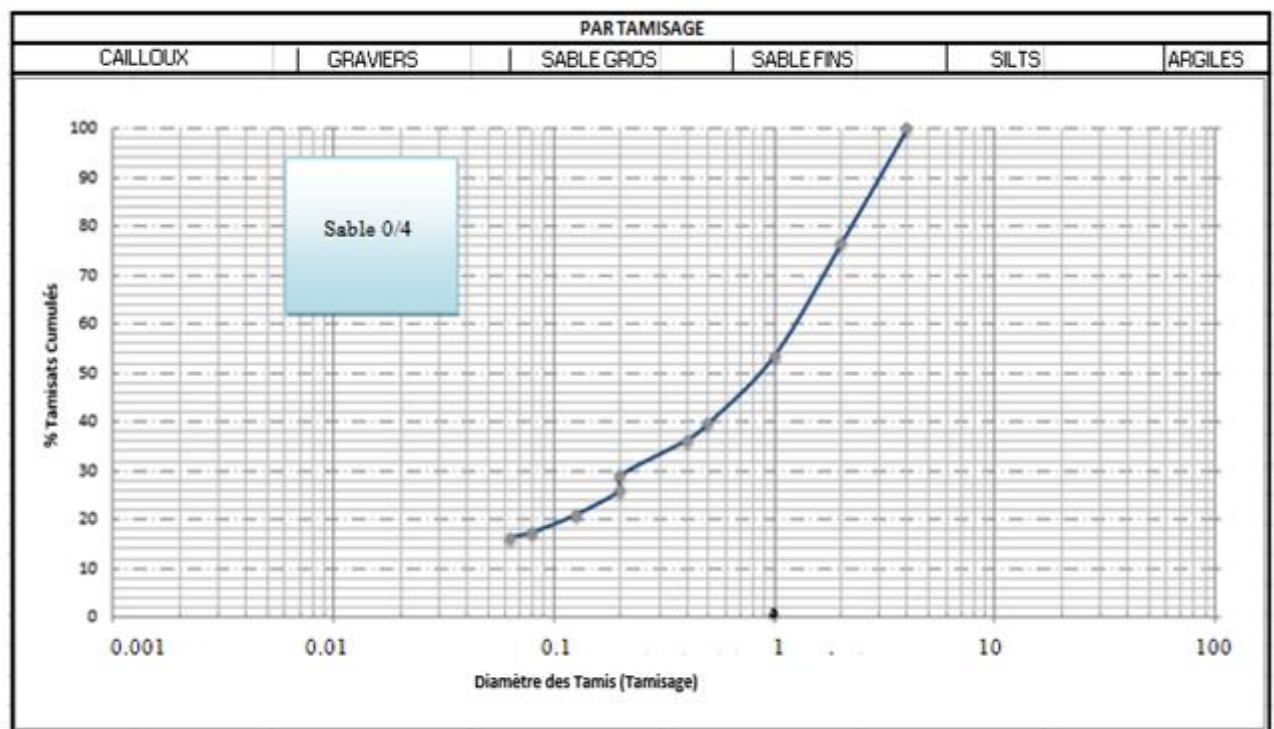


FIGURE 9: ANALYSE GRANULOMETRIQUE DU SABLE

Le sable utilisé présente une granulométrie continue, ce qui est favorable pour améliorer la compacité du mélange.

II.1.4 Essai au bleu de méthylène: (NF EN 933-9)

Cet essai permet de mesurer la capacité des éléments fins à adsorber du bleu de méthylène, pour cela on prélève une goutte de liquide dans le bêcher contenant le sable imbibé de bleu, et on dépose celle-ci sur le papier filtre.

- ✓ La valeur au bleu des fines (VB) a été réalisée selon les démarches de la norme (NFP 94-068). Deux cas sont possibles : La goutte centrale bleue est entourée d'une zone humide (auréole) incolore.
 - Le test est négatif.

- ✓ La goutte centrale bleue est entourée d'une zone humide (auréole) teintée de bleu.
 - Le test est positif.

La valeur au bleu des fines (VB) est donnée par la formule suivante :

$$VB = Vv \cdot M \cdot 10$$

M1	70
V1	10
MB	1,4286
VBS	1,09

TABLEAU 8 : RESULTATS DE L'ESSAIE DE VB

Avec :

- **Vv**: volume de solution de bleu utilisée jusqu'à obtention du test positif (en cm³).
- **M** : masse sèche de la prise d'essai (en g).



FIGURE 10 :ESSAIE DE BLEU DE METHYLENE

On a trouvé le **VB= 1.09** seuil au dessous duquel on peut apparaître à coup sûr sur la sensibilité à l'eau.

II.1.5 Module de finesse :

Le module de finesse est un coefficient permettant de caractériser l'importance des éléments fins dans un granulat, Le module de finesse est calculé selon la norme (NFP 18-540),

Le module de finesse du sable est égal à 2.81. Le sable utilisé est conforme aux exigences de la norme (P 18-541) qui fixe un module de finesse compris entre 1,8 à 3,2. Toutefois, son module de finesse de 2.8, correspond à un sable un peu grossier, Il donnera des bétons résistants mais moins maniabiles

✚ vérification de la classe granulaire selon la norme (XP P 18-540) :

Dmax = 4m

TABLEAU 9 : VERIFICATION DE LA CLASSE GRANULAIRE

Condition N°	Dimension des tamis	Mesure à prendre (% des tamisats)	Condition à vérifier norme XP P 18-540		Classification selon la norme XP 18-540
01	D	T=100	85% < T	OK	
02	1.58 D	T=100	T ≥ 99%	OK	
03	2D	T=100	T ≥ 100%	OK	

II.1.6 Masses volumiques apparentes et absolues des constituants (NA 255) :

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules, ainsi que La masse volumique absolue est le rapport de la masse du matériau sur le volume réel auquel on a soustrait le volume des pores (ouverts et fermés). Elle est égale à la masse volumique réelle dans le cas des matériaux non poreux.

TABLEAU 10 : MASSES VOLUMIQUES APPARENTES ET ABSOLUES DES CONSTITUANTS

	ρ apparente [kg / m ³]	ρ absolue [kg / m ³]
Ciment	979	3025.12
Sable	1522	2722.5
Microbille de polystyrène	17.66	30.13



FIGURE 11 : DETERMINATION DE LA MASSE VOLUMIQUE

II.1.7 Coefficient d'absorption :

Le coefficient d'absorption a été déterminé pour l'PSE selon la norme (NF P18-555) en utilisant la relation suivante :

$$w = \frac{M_i - M_s}{M_s} \times 100 \quad \text{Où}$$

M_s : la masse de l'échantillon sec .

M_i : la masse de l'échantillon imbibé pendant 24h, surface sèche, après être soigneusement épongé.

Tableau 11 : Le coefficient d'absorption d'PES

	M _i [g]	M _s [g]	W (%)
PES	24	10	140



FIGURE 12 : ESSAI D'ABSORPTION DU PSE

On remarque que le polystyrène absorbe beaucoup d'eau donc il peut influencer sur la quantité d'eau de gâchage.

II.1.8 Billes de polystyrène expansé :

Les différentes caractéristiques des billes de polystyrène expansé utilisées dans le cadre de cette recherche sont synthétisées dans le tableau suivant:

Tableau 12 : Caractéristiques des billes de polystyrène

Granulométrie (mm)	2 – 5.8
Masse volumique apparente (Kg/ m3)	17.66
Masse volumique absolue (Kg/ m3)	30.13
Conductivité thermique (W/m. K)	0.045

II.1.9 Diamètre des microbilles de polystyrène :

Les microbilles de polystyrène qu'on a utilisé sont de différents diamètres donc on a utilisé le pied à coulisse.

On a trouvé que $0.2 \text{ cm} < D < 0.58 \text{ cm}$



FIGURE 13 : MESURE AVEC PIED A COULISSE

II.1.10 Identification de ciment :

Dans notre recherche, nous avons utilisé un ciment portland composé CEM II/A 42,5 largement disponible dans notre région, produit par la société des ciments de Béni-Saf (S.C.I.B.S.). La masse volumique apparente a été déterminée conformément à la norme (NF P 18-558).



FIGURE 14 : CIMENT CEM II 42.5

Tableau 13 : composition chimique de ciment(Rapport du laboratoire LTPO)

Composition chimique du ciment	
CA O	61.94
FE ₂ O ₃	4.27
Al ₂ O ₃	5.22
C ₃ A	6.61
C ₄ AF	12.98

Selon la norme (NA 442), les résultats des analyses effectuées caractérisent un ciment CPJ avec une teneur en C₃A = 6.61 %.

Tableau 14 : Caractéristiques physico - mécaniques du ciment. (Rapport du laboratoire LTPO)

Masse volumique apparente [kg/m³]	979
Masse volumique absolue (pycnomètre à liquide) [kg/m³]	3025,12
Début de prise	02H45'
Fin de prise	04h30'
Résistance à la compression (MPa)	
2 jours	12,339
7 jours	19,920
28 jours	35,225

II.1.11 Consistance du ciment :

La consistance du ciment a été déterminée à l'aide de l'appareil de Vicat conformément à la norme (EN 196-3).

E/C	0.24	0.25	0.26
Étalement (mm)	21	7	0

Après avoir confectionné une pâte de ciment avec un rapport E/C égale à 0.25, la distance entre l'extrémité de la sonde et le fond du moule est de l'ordre de 7 mm. Ceci implique que la consistance est normalisée dans ce cas.



FIGURE 15 : ESSAIE DE VICAT



FIGURE 16 : MALAXAGE DE LA PÂTE

II.1.13 Dosage de saturation de l'adjuvant :

Selon la norme (NF EN 934-2) L'adjuvant est un produit incorporé au moment du malaxage du béton à un dosage inférieur ou égal à 5 % en masse de la teneur en ciment du béton,

Les adjuvants utilisés dans nos essais permettent de fluidifier le béton tout en réduisant la quantité d'eau de gâchage nécessaire, ce qui améliore les résistances mécaniques et la durabilité du béton.

La détermination du dosage de saturation a été effectuée en utilisant l'essai de Kantro qui se base sur la mesure des étalements en utilisant un mini-cône de dimension 19/38/57 mm.



FIGURE 17 : ESSAIE DE KANTRO

TABLEAU 15 : RESULTATS D'ETALEMENT DES PATES EN UTILISANT SIKA LATEX

Adj (%)	0%	0.5%	1%	1.2%	1.4%	1.6%
Masse adj (g)	0	1	2	2.4	2.8	3.2
Etalement (mm)	0	157.5	210	210	210	210

Figure 18 : Fiche technique de SikaLatex



COULEUR	PH	DENSITÉ
blanc	8.5	1Kg/l

TABLEAU 16 :RESULTATS D'ETALEMENT DES PATES EN UTILISANT SKY 3080

Adj (%)	0%	0.5%	1%	1.2%	1.4%	1.6%
Masse adj (g)	0	1	2	2.4	2.8	3.2
Etalement (mm)	0	145	210	210	210	210

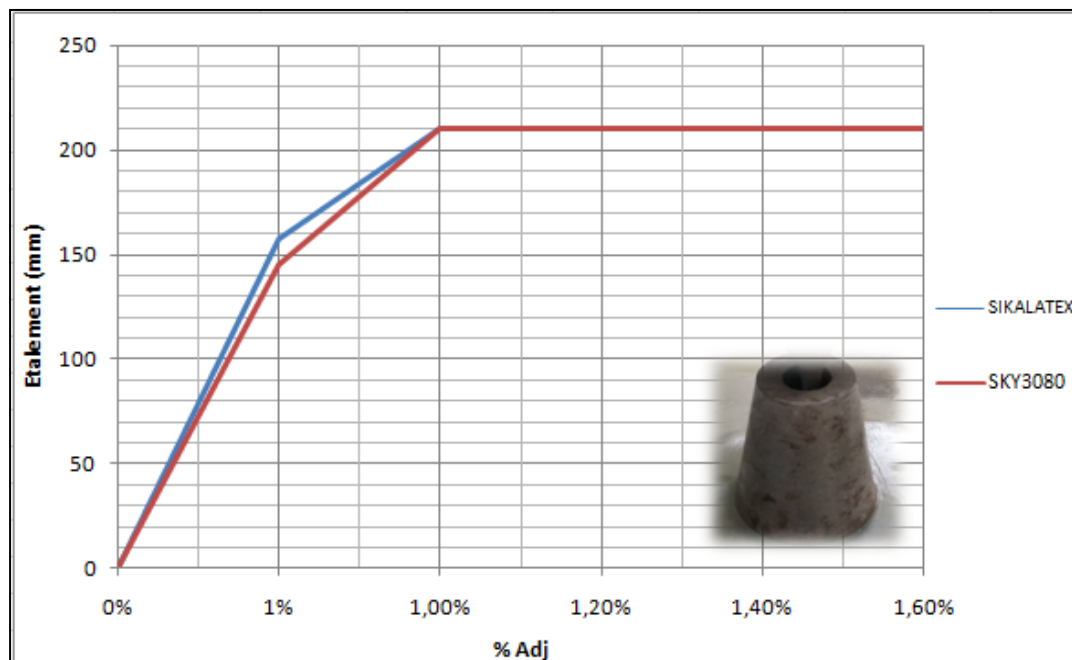


FIGURE 19: VARIATION DE L'ETALEMENT DE LA PATE DE CIMENT EN FONCTION DU DOSAGE EN SUPER PLASTIFIANT

II.1.14 EAU :

L'eau de gâchage utilisé au cours des essais est une eau de robinet de la commune de Chetouane sans aucun traitement. Nous supposons qu'elle répond à toutes les prescriptions de la norme (EN 1008) en matière de béton.

II.2 Formulation du béton:

II.2.1. Description du béton :

Notre partie expérimentale est répartie en deux parties.

Partie I : son but principale est de trouver la bonne formulation selon l'homogénéité et l'ouvrabilité du mélange, qui va être considéré comme formulation de référence (100%).

Partie II : consiste à varier le pourcentage des billes de polystyrène pour pouvoir effectuer les différents essais de caractérisation.

II.2.2 La composition du béton :

Partie I :

La variation des différents composants de styrobéton nous a permis d'effectuer plusieurs mélanges, résumés dans le tableau suivant :

TABLEAU 17 : COMPOSITIONS DES BETONS PREPARES LORS DE LA PREMIERE PARTIE EXPERIMENTALE

Dosage de ciment 350Kg/m ³	Ciment Kg	Sable Kg	Eau kg	Microbille poly g	Adjuvant g
Essai 01 : E/C=0.58					
	5kg	3kg	2.91kg	300	105 (sky3080)
Essai 02 : E/C=0.45					
	5	3	2.25	300	0

	Essai 03 : E/C= 0.4				
	5	3	2	200	46g (sika latex)
	Essai 04 : E/C= 0.35 microbilles immergés dans l'eau pendant 12h				
	5	3	1.76	200	50(sika latex)
Dosage de ciment 380 Kg/m³	Essaie 05: E/C=0.48				
	5.7	3	2.75	200	0

✚ Partie II :

Nous avons fait varier le pourcentage volumique des billes de PES respectivement 100% à 40 % par pas de 20% et en le remplaçant par un volume similaire ensable. Les différentes compositions utilisées sont reportés aux tableaux suivant :

Tableau 18 : Composition des bétons préparés pour la deuxième série d'essai

enchantions	% des billes de PES	Constituions de mélange -----> 1m ³			
		Ciment (Kg)	Sable (Kg)	Eau(Kg)	PES(L)
A	100	460	242	222	537
B	80	460	528	222	429
C	60	460	813	222	326
D	40	460	1260	222	221

II.2.3 Malaxage et remplissage des éprouvettes :

Le mode de malaxage des bétons légers à base de microbilles de PES s'appuie sur les étapes suivantes :

Verser le sable, ciment et les microbilles (les éléments secs) ensuite l'eau au fur et à mesure du malaxage (dans le cas de l'utilisation de l'adjuvant il doit être dilué dans l'eau).Après homogénéisation du matériau frais, celui-ci est mis dans les différentes éprouvettes.

Les mélanges des bétons dans les éprouvettes ont été soumis à la vibration pour éliminer les bulles d'air. Les moules utilisés sont de dimensions 4 x 4 x 16 cm / 16 x32 cm / 10x10x40 cm.

Les éprouvettes confectionnées sont ensuite conservées dans l'eau à $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ pour la cure. Avant les essais mécaniques, les échantillons ont été séchés.

Les photos suivantes représentent les différentes modes de malaxage réalisés :



Figure 20 : (a) avec un malaxeur, (b) avec une bétonnière (c) manuellement

- ✓ Après comparaison entre les trois types de malaxage, le malaxage manuel donne le meilleur résultat en termes d'homogénéité du mélange

II.3 Description des essais en laboratoire :

TABLEAU 19 : LES ESSAIE REALISER ET LES DIMENSIONS DES EPROUVETTES

Essaie	Formule
Affaissement	
Résistance ç la compression	$F_c = \frac{F}{S}$
Résistance à la flexion	$F_t = \frac{3F_{max} \cdot L}{2bh^2}$
Rhéologie	$\gamma = 0 \quad \text{si } \tau < \tau_0$ $\tau = \tau_0 + \mu_{pl}\gamma \quad \text{si } \tau > \tau_0$

II.4 Mesures état frais :

II.4.1 Essaie d'affaissement :

Cet essai consiste à mesurer la hauteur d'affaissement d'un volume tronconique de béton frais ou ce dernier est compacté dans un moule ayant la forme d'un tronc de cône de dimension 10*20*30 m. Lorsque le cône est soulevé verticalement, l'affaissement du béton permet de mesurer la consistance.

a) tableau suivant représente les résultats d'affaissement des essais de la Série I :

TABLEAU 20 : LES RESULTATS D'AFFAISSEMENT DES BETONS DE LA SERIE

	Affaissement (mm)
Essaie 01	Ségrégation
Essaie 02	155
Essaie 03	175
Essaie 04	150
Essaie 05	175

- la meilleure consistance a été obtenue dans la cinquième formulation .On a obtenu un mélange homogène avec un affaissement de 175 mm (selon la norme NF EN 12350-2), donc on considère cette formulation comme le béton de référence (100%) dans la deuxième série d'essais.



FIGURE 21: LES DIFFERENTS ETALEMENTS DE LES ESSAIE DE LA SERIE I

b) Le tableau suivant représente les résultats d'affaissement de la deuxième série d'essais :

TABLEAU 21 : LES RESULTATS D'AFFAISSEMENT DES ESSAIE DE LA SERIE II

	Affaissement (mm)
Essai A	175
Essai B	10
Essai C	0
Essai D	0

- A partir des essais d'affaissement, on déduit que l'ajout des billes de PES diminue augmente la maniabilité du béton ce qui peut être expliqué par la forme sphérique des billes qui augmente le glissement entre les particules du mélange.

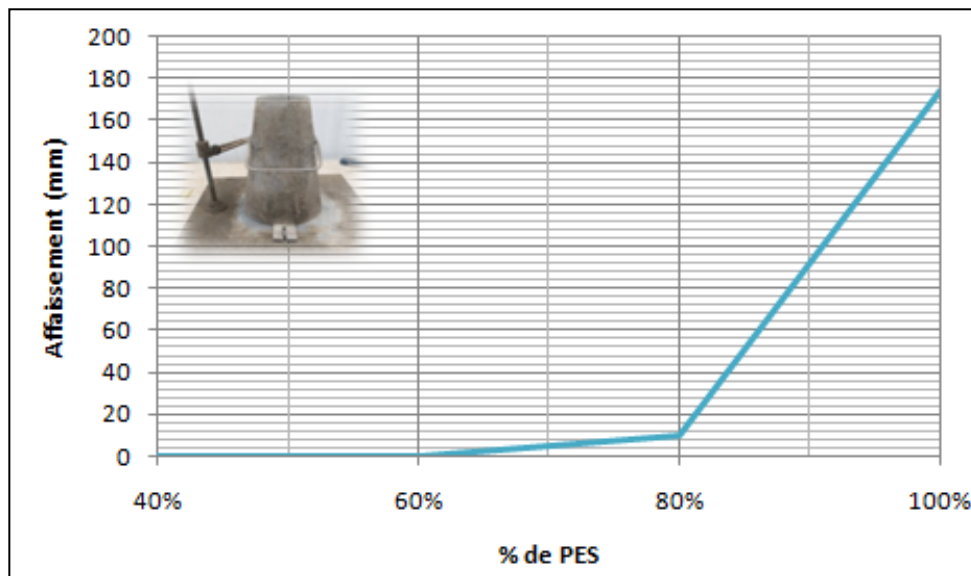


FIGURE 22 : VALEURS D'AFFAISSEMENT EN FONCTION DE % DES



II.4.2 Etude rhéologique des bétons à base de polystyrène :

La caractérisation rhéologique de nos bétons a été étudiée à l'aide d'un rhéomètre coaxial de type vane de marque Heidolph.

Les mesures rhéologiques ont été effectuées pendant la phase décroissante des vitesses afin de s'affranchir du comportement et des propriétés dépendantes du temps telle que la thixotropie et pour tester le matériau dans un état suffisamment destructuré. Le profil de vitesse choisi est composé de 7 paliers de 20 s à des vitesses de rotation allant de 48 rpm (0,8 rps) à 4 rpm (0,07 rps), précédés d'un palier de 110 secondes de pré-cisaillement à la vitesse maximale de 48 rpm afin d'effacer l'historique de cisaillement précédent et la mémoire d'une structure initiale. Pour chaque palier de vitesse, 20 mesures du couple sont effectuées.



FIGURE 24: RHEOMETRE

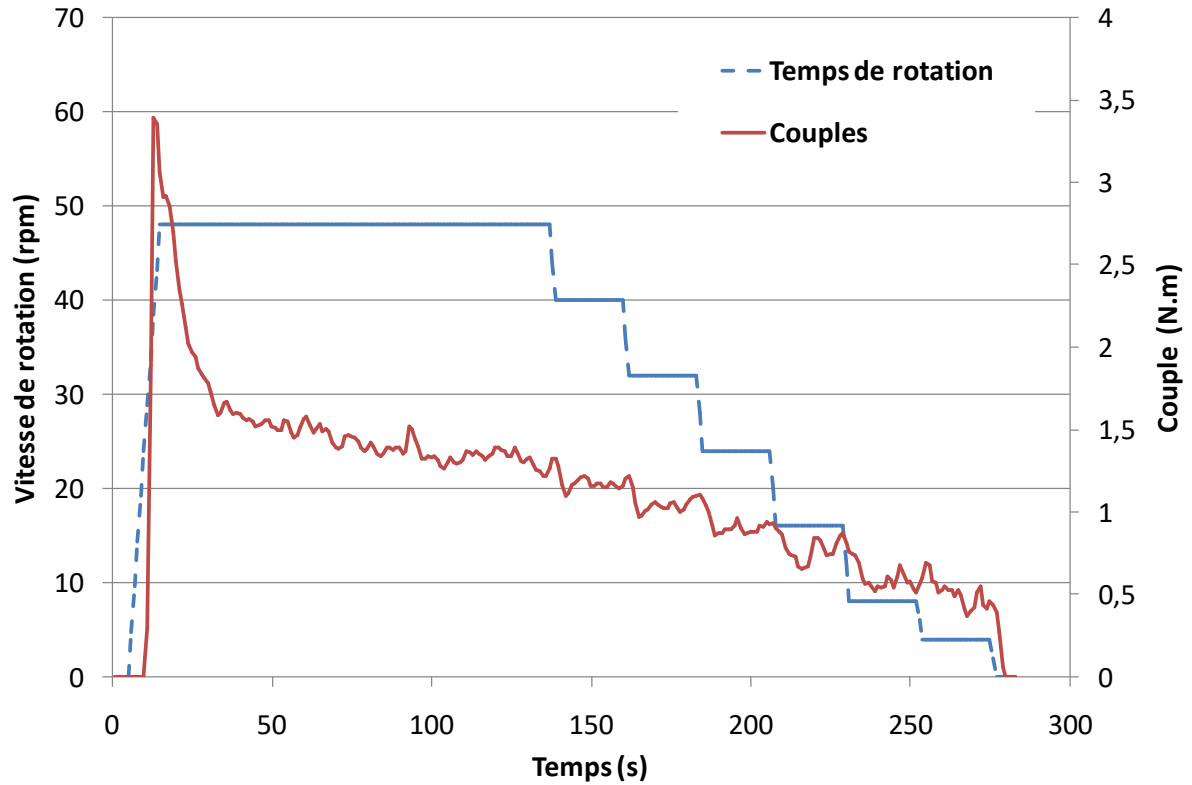


FIGURE 25: EVOLUTION DU COUPLE (T) ET LA VITESSE DE ROTATION (N) EN FONCTION DU TEMPS.

Les lois de passages utilisées sont celles développées par Estellé et Lanos (2008). L'approche consiste à considérer un fluide en écoulement comme étant un fluide de Bingham et calculer les taux de cisaillements et les contraintes correspondantes lorsque respectivement le fluide est partiellement et complètement cisailé dans l'entrefer.

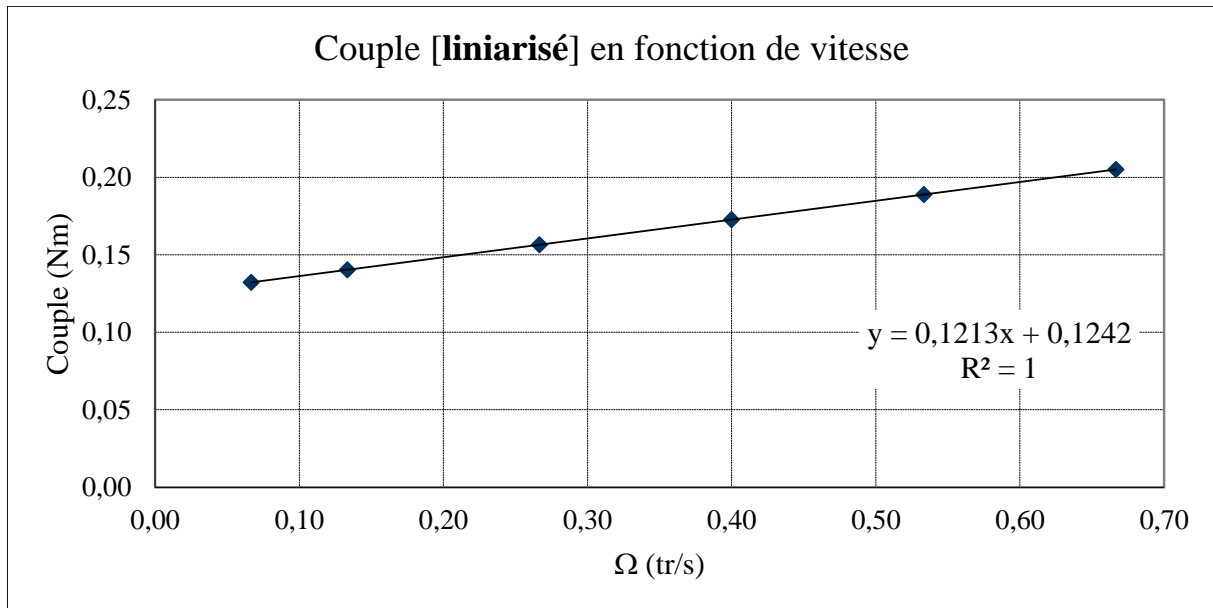


FIGURE 26: RELATION ENTRE LE COUPLE ET LA VITESSE DE ROTATION (CAS DU BETON AVEC 100% PES)

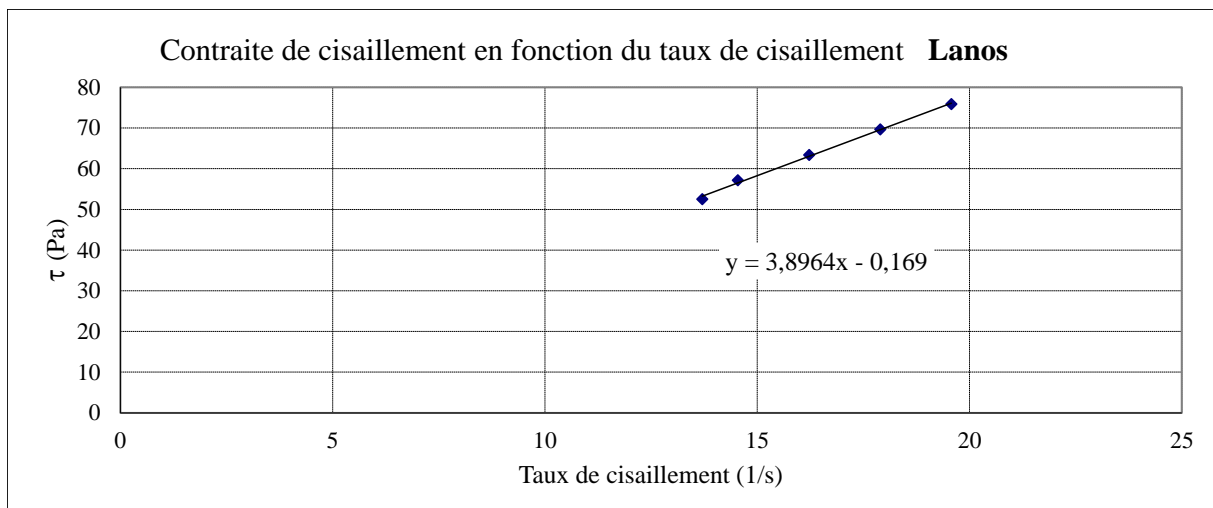
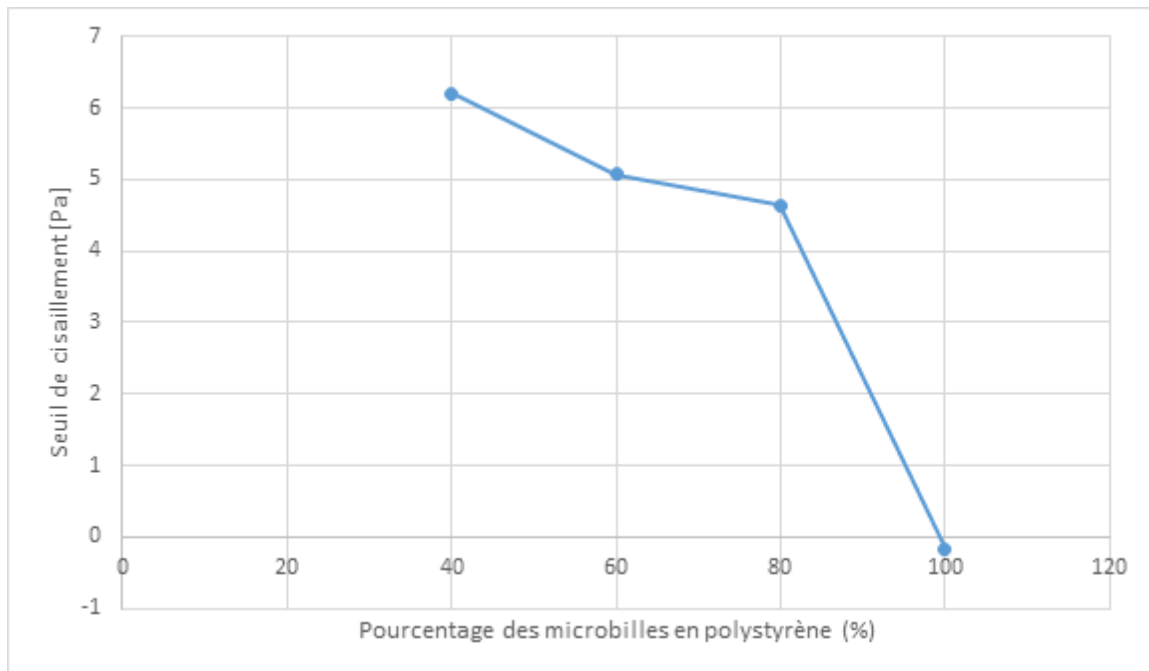


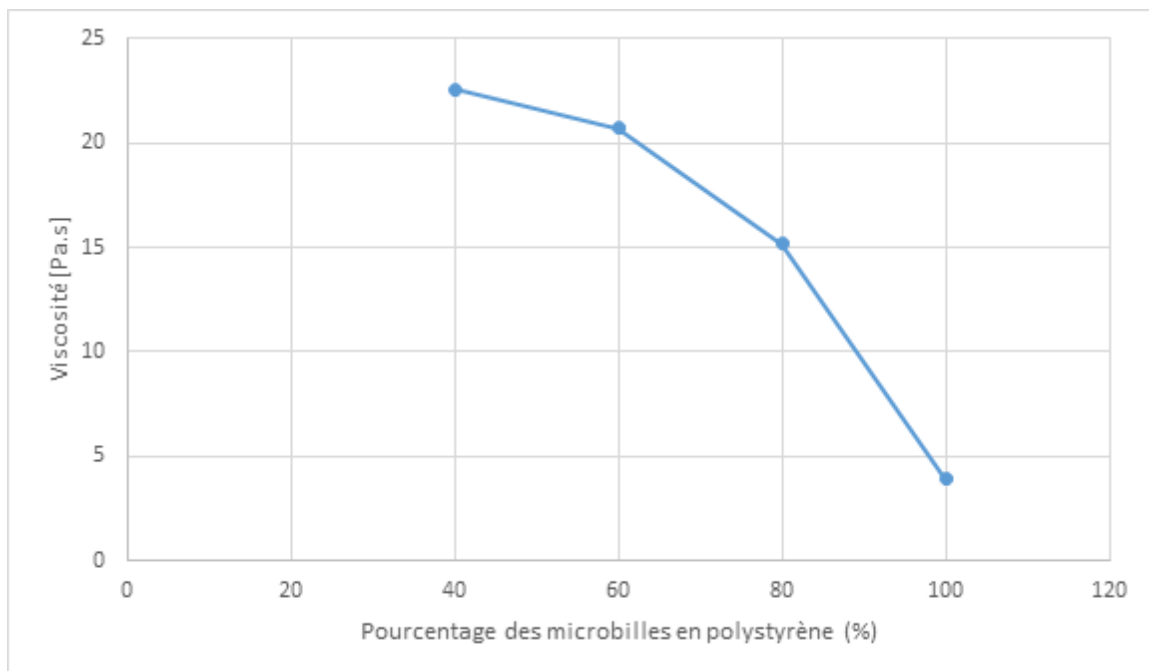
FIGURE 27: RELATION ENTRE LA CONTRAINTE ET LE TAUX DE CISAILLEMENT (CAS DU BETON AVEC 100% PES)

Seuil de cisaillement en fonction du pourcentage des microbilles en polystyrène :



Il est clair que l'augmentation du taux des microbilles en polystyrène engendre une diminution du seuil de cisaillement, ce qui est en corrélation avec les résultats des essais d'affaissement.

Viscosité en fonction du pourcentage des microbilles en polystyrène :



La même tendance a été noté pour la viscosité. En effet, l'augmentation du taux des microbilles en polystyrène engendre aussi une diminution de la viscosité car les frictions et frottements dans le mélange s'attenuent à cause de la forme et de la texture des microbilles.

II.5 Mesures à l'état durci :

II.5.1 Mesure de la résistance mécanique :

Les caractéristiques mécaniques des bétons étudiés sont résumées dans le tableau.

TABLEAU 22 : LES RESULTATS DE LA RESISTANCE MECANIQUE DES ESSAIES SERIE I

		Essaie 03	Essaie 04	Essaie 05
Résistance a la compression (MPa)	14j	0.25	0.26	0.31
	28j	0.28	0.39	0.65
Résistance a la traction par flexion (MPa)	14j	0.28	0.39	0.42
	28j	0.29	0.6	0.63



FIGURE 28 : ESSAIE DE LA RESISTANCE MECANIQUE SERIE I

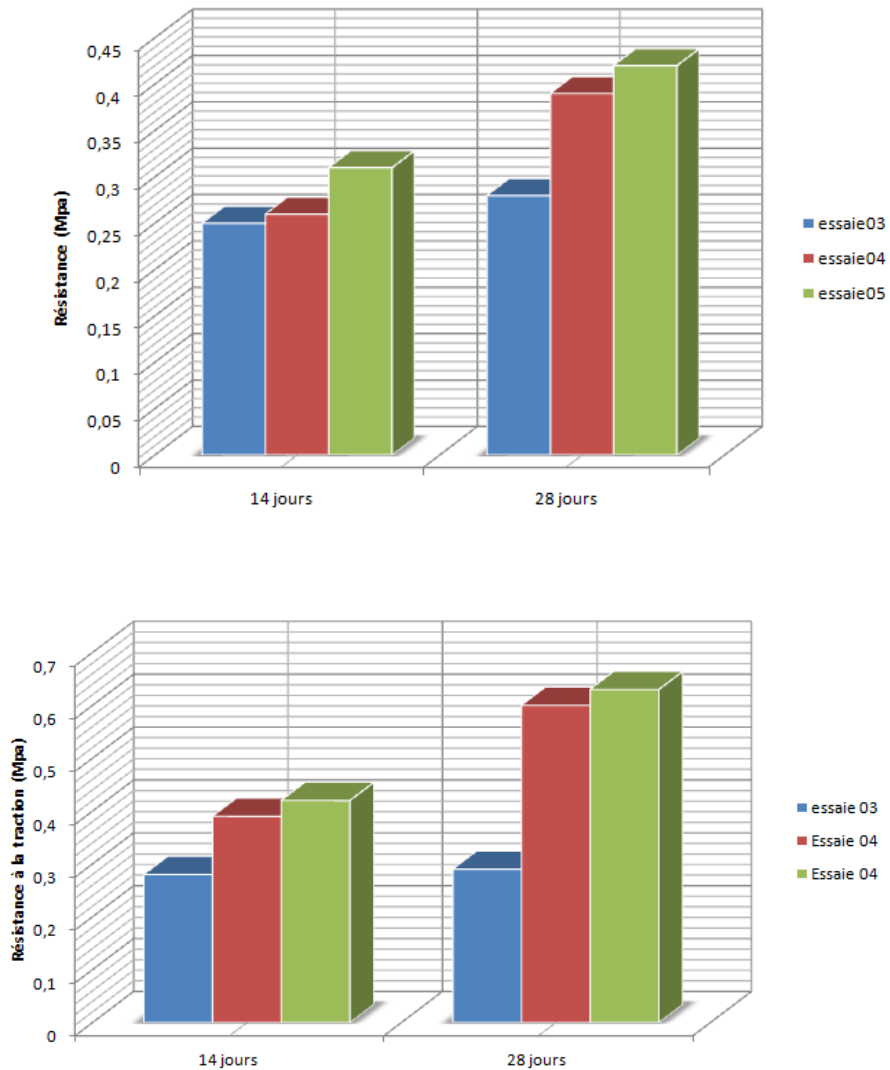


FIGURE 29: LES RESULTATS DE LA RESISTANCE MECANIQUE DES ESSAIES DE LA SERIE II

- ✓ il a été observé que la résistance à la compression et à la traction de tous les mélanges de béton augmente avec l'augmentation de l'âge du béton.

	Essaie A	Essaie B	Essaie C	Essaie D
Résistance à la compression 14j (MPa)	0.31	1.5	2.23	4.32
Résistance à la flexion 14j (MPa)	0.65	0.96	1.02	2.04

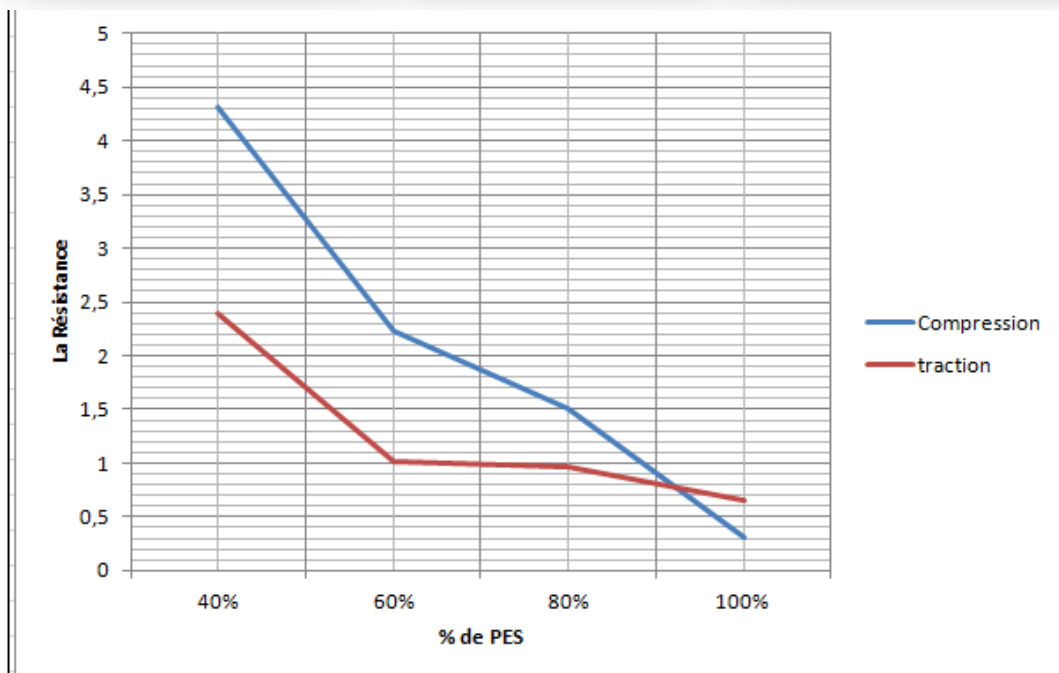


FIGURE 30: EVOLUTION DE LA RESISTANCE EN FONCTION DU % DES MICROBILLES

- ✓ Il est clair que plus la quantité de billes de PES est grande plus la résistance à la compression et la traction ont tendance à diminuer, ce qui peut être expliqué par ma mauvaise résistance des microbilles.

II.5.2 Mesure de l'adhérence :

L'essai de l'adhérence consiste à mesurer l'énergie nécessaire pour rompre les liaisons intermoléculaire qui s'opposent au glissement.

II.5.2.1 Mode opératoire :

L'essai a été réalisé avec le styrobéton (100%)

On commence par préparé une quantité de béton suffisante pour remplir les moules.

Les moules doivent être sous forme de bague (sans base) pour couler le béton directement sur la surface souhaitée avec une épaisseur qui ne doit pas dépasser 5 cm. La surface doit être lissée au maximum.

Dans notre cas on a utilisé deux types de surfaces : un béton et des briques.

Après le séchage de notre béton (après 48h), à l'aide d'une scie cloche on fait des coupes jusqu'à atteindre la base. On colle par la suite la pièce métallique fournie avec le dispositif de l'essai.

Après 24h, on fait l'essai d'arrachement avec l'appareil.



FIGURE 31 : LES ETAPES DE L'ESSAIE D'ADHERENCE

- On constate que le cisaillement de béton peut se faire uniquement à la surface qui a été en contact avec la colle et qui s'est arrachée. Ce constat est principalement dû à la faible structure de notre béton.
- Toutefois, les résultats ont montré que la force d'arrachement est de 50 DaN.



FIGURE 32: LES RESULTATS DE L'ESSAIE D'ADHERENCE

*calcul de la contrainte d'arrachement :

$$F_r = \frac{Fa}{S} = \frac{50 * 10}{\pi * (25) ** 2} = 0.25 \text{ MPa}$$

II.5.3 Etude thermique :

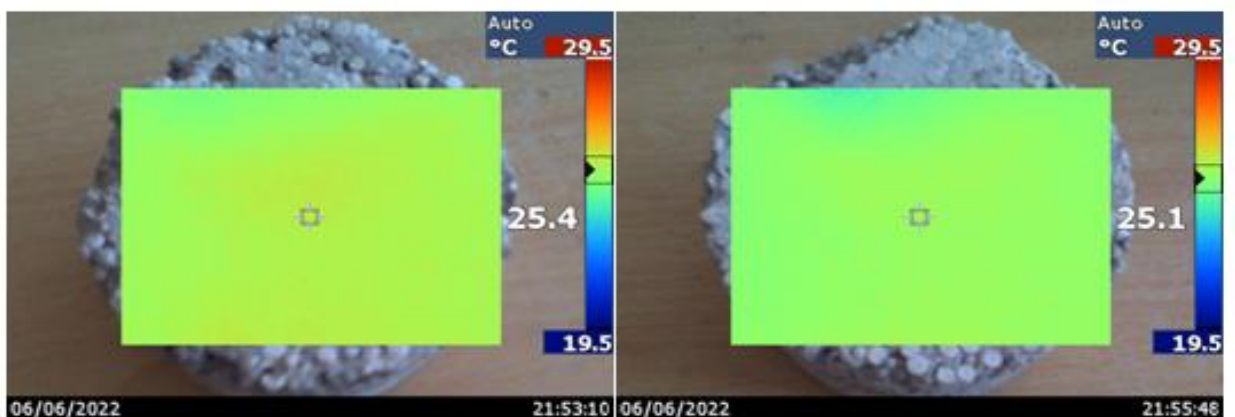
Nous avons étudié la répartition de la température sur les éprouvettes à différents taux de polystyrène et dans une température qui varie de 20° à 60° par pas de 20°C.



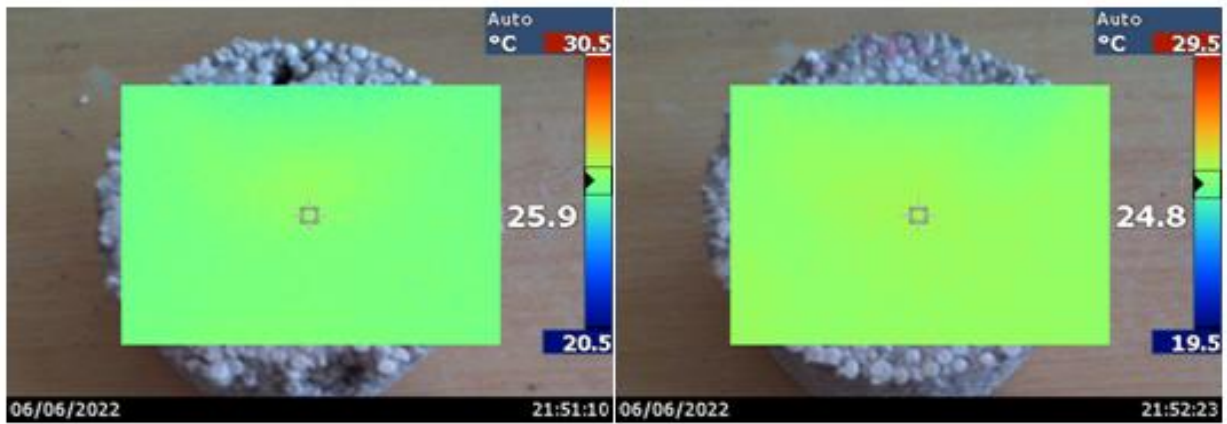
FIGURE 33 : LES ECHANTILLONS ETUVES

⚡ A 20° :

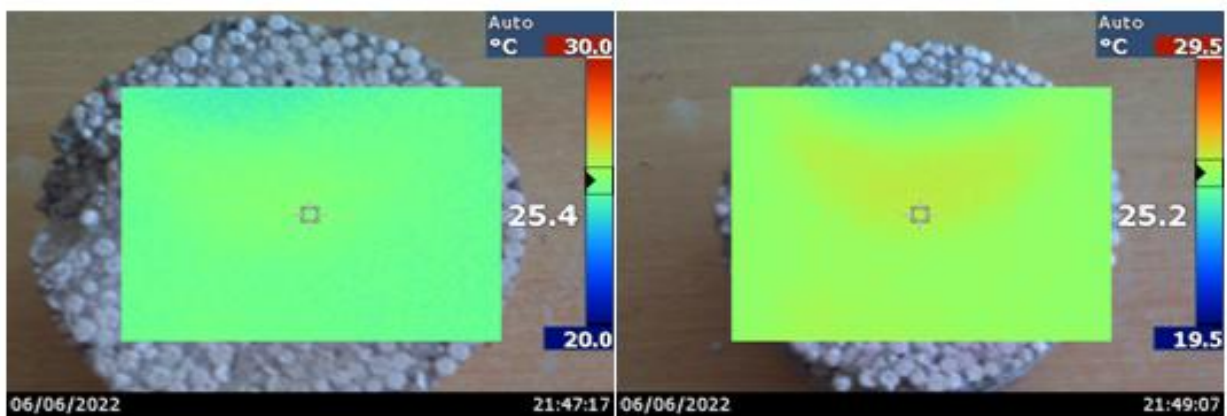
⚡ Dosage de 40% des microbilles de polystyrène :



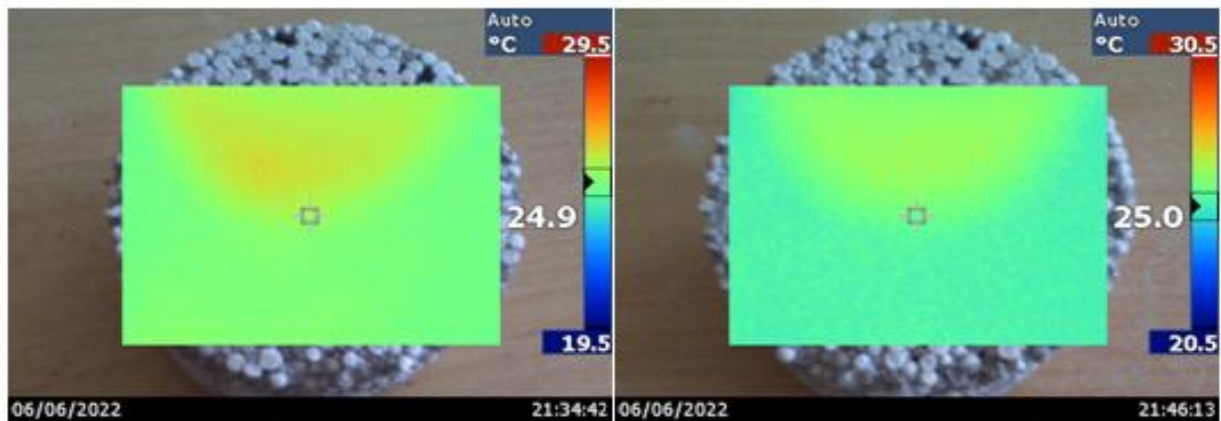
+ Dosage de 60% des microbilles de polystyrène :



+ Dosage de 80% des microbilles de polystyrène :

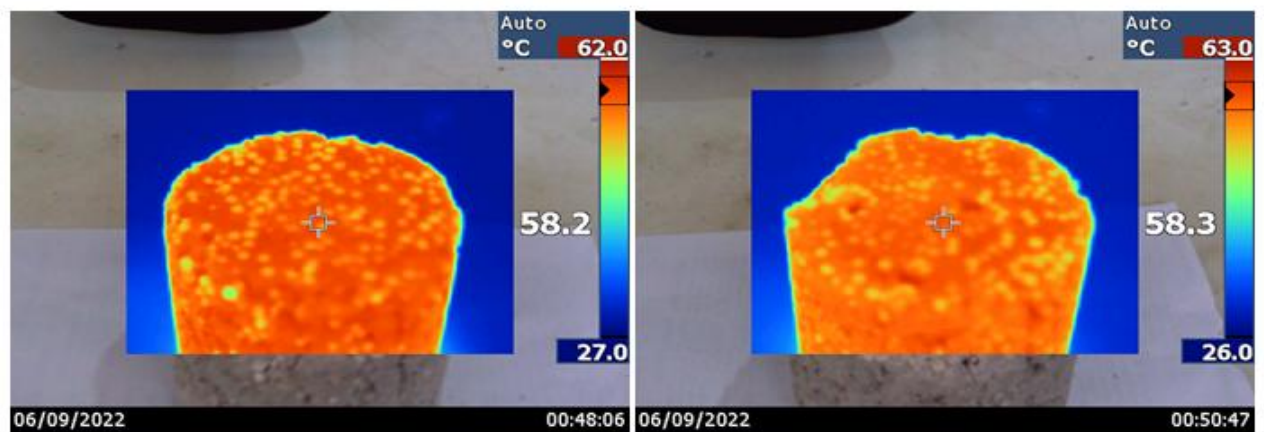


+ Dosage de 100% des microbilles de polystyrène :

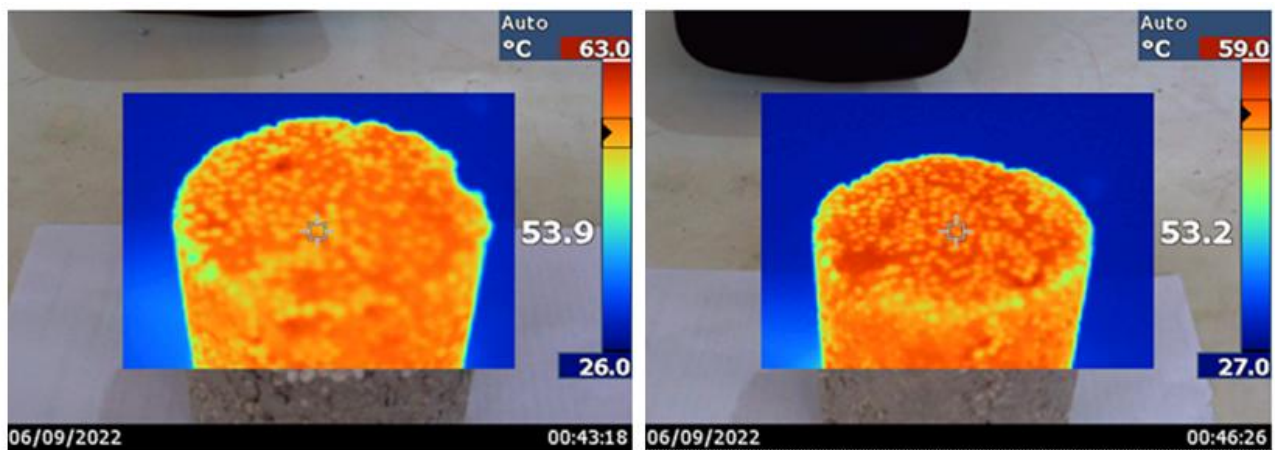


⊕ A 40° :

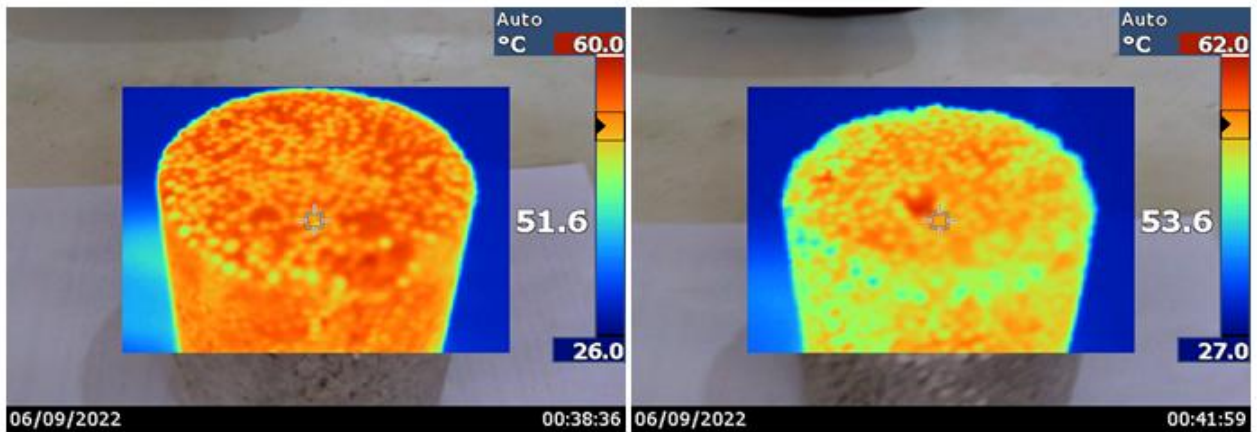
⊕ Dosage de 40% des microbilles de polystyrène :



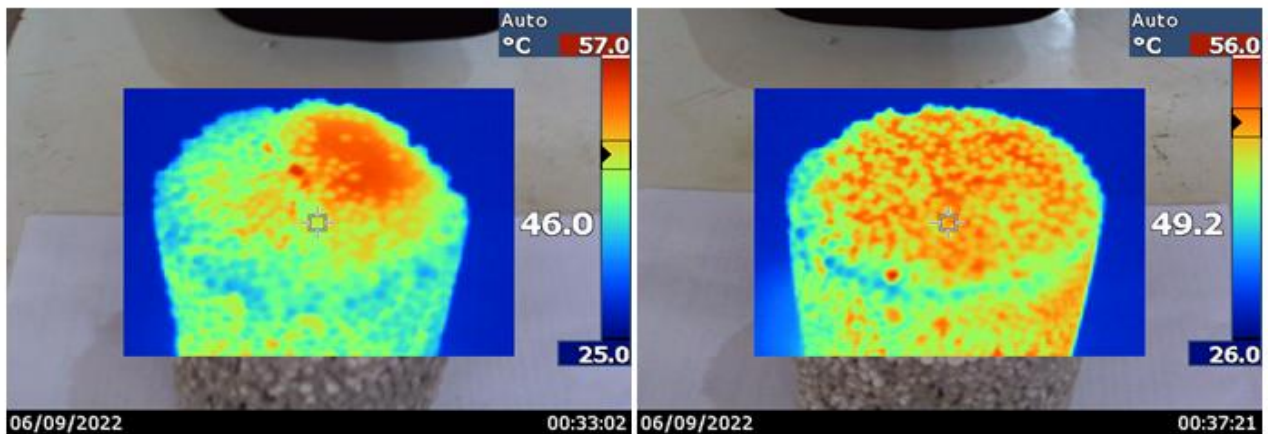
⊕ Dosage de 60% des microbilles de polystyrène :



✚ Dosage de 80% des microbilles de polystyrène :

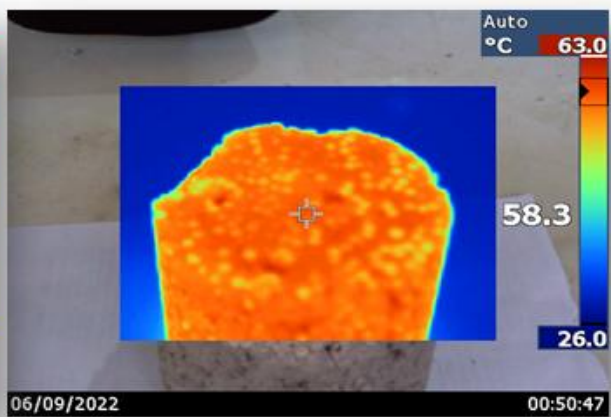
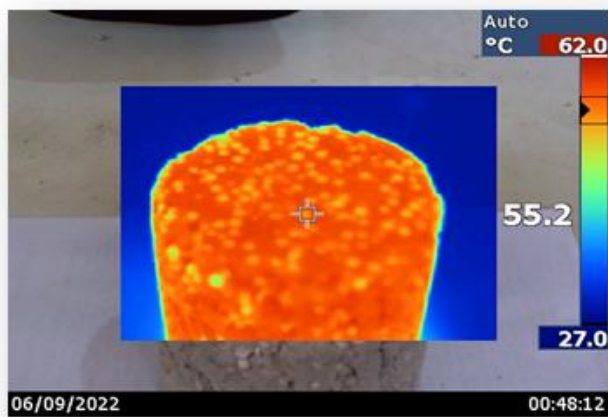


✚ Dosage de 100% des microbilles de polystyrène :

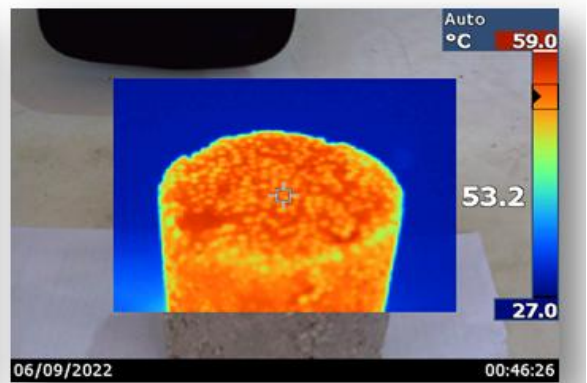
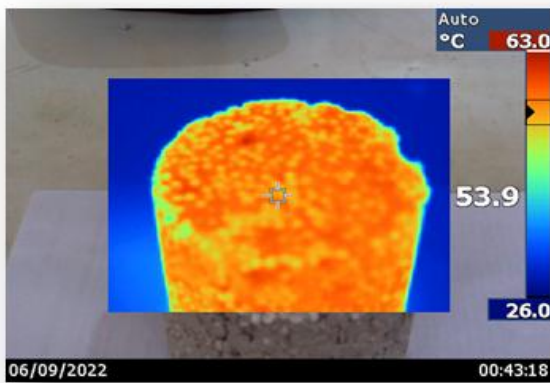


⊕ A 60° :

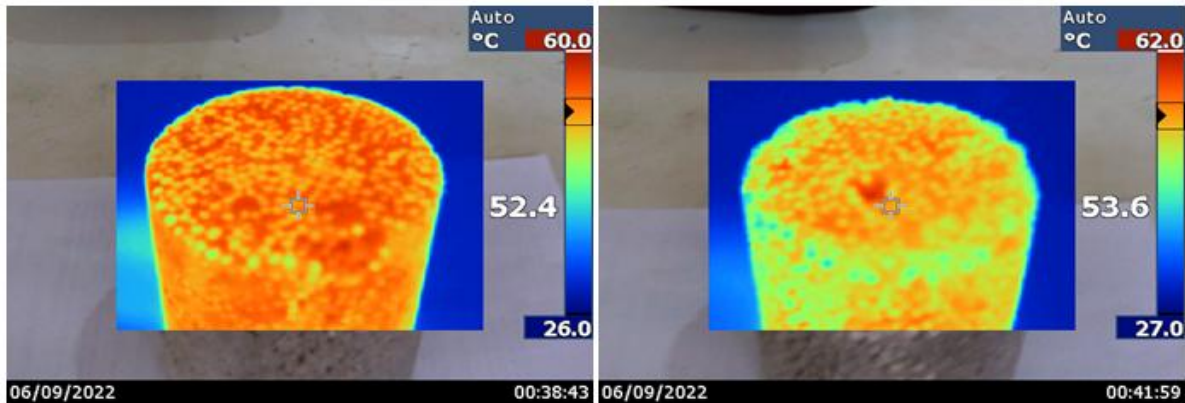
⊕ Dosage de 40% des microbilles de polystyrène :



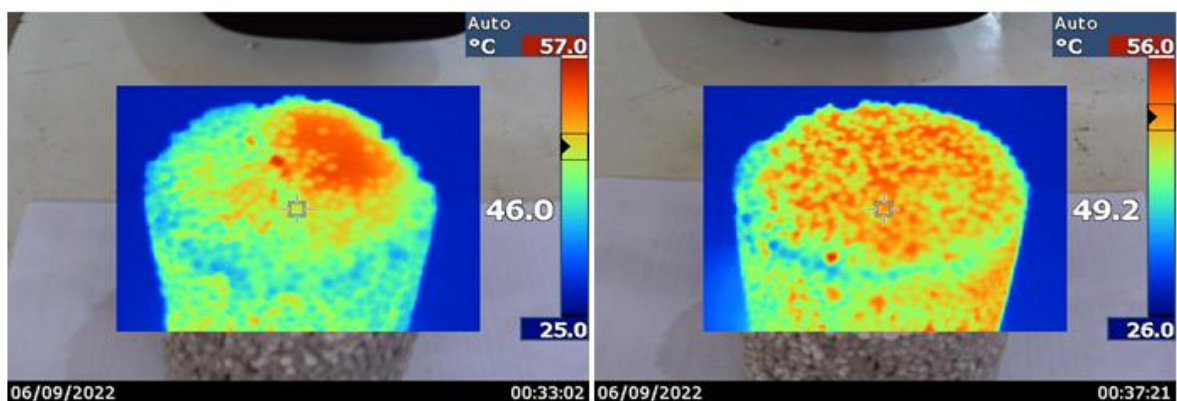
⊕ Dosage de 60% des microbilles de polystyrène :



✚ Dosage de 80% des microbilles de polystyrène



✚ Dosage de 100% des microbilles de polystyrène :



- ✓ A 20° on ne voit aucune différence de couleur entre l'échantillon et la surface car ils ont la même température.
- ✓ A 40° l'échantillon devient rouge, et plus la quantité de billes de polystyrène augmente l'échantillon est moins chaud (couleur bleu) et sa était confirmer en 60°.
- ✓ Les résultats montrent clairement que c'est la pâte qui absorbe la température. Donc l'augmentation du dosage de polystyrène rend le béton moins chaud, et donc plus isolant

Conclusion générale :

De nos jours, l'utilisation de béton léger devient de plus en plus avantageuse. Cette étude rentre dans ce cadre et est consacrée sur les styrobétons à base de microbilles en polystyrène.

A partir des résultats trouvés, on peut tirer les conclusions suivantes:

- l'augmentation de la quantité des microbilles de PES augmente l'affaissement du styrobéton et donc la maniabilité, ce qui peut être dû à la forme sphérique des billes qui réduit le frottement entre les particules du mélange.
- L'augmentation du taux des microbilles en polystyrène engendres une diminution du seuil de cisaillement, ce qui est en corrélation avec les résultats des essais d'affaissement.
- La densité du styrobéton augmente avec la diminution de la quantité de billes de PES.
- Ainsi que la diminution du pourcentage de billes de PES augmente la résistance mécanique du béton

Perspectives :

Cette recherche peut être approfondie sur des essais de durabilité pour voir l'influence de la moisissure des billes en polystyrènes ou en utilisant d'autres types de matériaux légers.

LES NORMES :

- ❖ NF 18-598: Granulats. Équivalent de sable.
- ❖ NF P 94-056: granulat déterminer les paramètres de nature et d'état d'un sol pour en effectuer sa classification selon le GTR (Guide des Terrassements Routiers).
- ❖ NF P 18-540 : effectue une synthèse des connaissances acquises et propose de classer les granulats en un petit nombre de catégories, mais de telle sorte que chaque client potentiel y trouve une catégorie qui convienne à ses besoins.
- ❖ NA 255 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau, 1990
- ❖ NA 442 : Ciment - Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants
- ❖ EN 196-3 : EN 196 traitant des méthodes d'essais des ciments. Cette partie est consacrée à la détermination du temps de prise et de stabilité
- ❖ NF EN 934-2: adjuvants pour bétons. Définitions et exigences Le présent document fixe les prescriptions et les exigences pour les adjuvants utilisés dans les bétons.
- ❖ NF EN 933-9 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 9 : qualification des fines. Essai au bleu de méthylène
- ❖ NF P 94-068 : Mesure de la quantité et de l'activité de la fraction argileuse - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la taché.
- ❖ NF EN 1008 : Eau de gâchage pour bétons - Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton, 2003.
- ❖ NF EN 12 350-2 : une méthode de détermination de la consistance du béton frais par l'essai d'affaissement. L'essai d'affaissement est sensible aux modifications de la consistance du béton correspondant à des affaissements compris entre 10 mm et 210 mm

Références Bibliographiques :

- [1] : Lamprecht, H.-O. *Opus Caementitium: Bautechnik der Römer, 5th ed.*; Beton-Verlag GmbH: Düsseldorf, Germany, 1996; p. 264. ISBN 3-7640-0350-2
- [2] : Chandra, S.; Berntsson, L. *Lightweight Aggregate Concrete, 1st ed.*; Noyes Publications: Norwich, UK, 2002; p. 450. ISBN 978-0815514862
- [3] : Expanded Clay and Slate Institute. *Lightweight Concrete History Applications Economics; Expanded Clay and Slate Institute (ESCSI): Salt Lake City, UT, USA, 1971*].
- [4] : Holm, T.A. *Performance of Structural Lightweight Concrete in a Marine Environment. In Proceedings of the Performance of Concrete in Marine Environments, St. New Brunswick, NB, Canada, 1 August 1980; pp. 589–608*
- [5] : Expanded Clay and Slate Institute. *Lightweight Concrete History Applications Economics; Expanded Clay and Slate Institute (ESCSI): Salt Lake City, UT, USA, 1971*].
- [6] : Raithby, K.D.; Lydon, F.D. *Lightweight concrete in highway bridges. Int. J. Cem. Compos. Lightweight Concr.* 1981, 3, 133–146
- [7] : Thienel, K.-C.; Peck, M. *Die Renaissance leichter Betone in der Architektur. DETAIL* 2007, 47, 522–534
- [8] : Bundesregierung. *Verordnung Über Einen Energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung-WärmeschutzV); Bundesregierung (German Federal Government): Berlin, Germany, 1977; p. 11*
- [9] : Civil Engineering Department, Islamic University, Gaza, Palestine. Received: (21/2/2000), Accepted: (18/7/2001)
- [10] : *Investigation Effects of Different Parameters on Compressive Strength and Density of EPS Concrete* 19 October 2012
- [11] : *LIGHTWEIGHT CONCRETE USING RECYCLED EXPANDED POLYSTYRENE BEADS* 2015

- [12] : *international journal of research in advent technology (E-ISSN :2321-9637) numéro spécial conférence nationale ‘Vishwacon’16’*, 19 mars 2016
- [13] : *Relation entre la résistance à la compression et ladensité du béton léger de polystyrène en fonction des proportions du mélange ,journal of applied engineering science vol.19, No 1 2021*
- [14] : «*Confection de bétons légers la fabrication d'éléments architecturaux*». *Projet d'application présenté à l'Ecole de technologie supérieure L'université du Québec Édition. Montréal 14 Avril 2000*
- [15] : *"Béton léger", TECHNI.CH-Rapport technique / domaine du bâtiment - génie-civil Contenu, Janvier 2014*
- [16] : <http://www.guidebeton.com/b%C3%A9ton-leger>
- [17] : <https://www.toutsurlebeton.fr/mise-en-oeuvre/quest-ce-quune-chape/>© Béton Direct 2017-202
- [18] : «*Nouveau guide du béton et de ses constituants*». 8ème Édition. Eyrolles.Mai 1998.
- [19] : «*Propriétés des bétons*». Eyrolles. Paris, 2000
- [20] : I.Saiti «*Étude d'un procédé d'élaboration d'un béton léger cellulaire à base de sable de dune de la région de GHARDAIA* », *Thèse de magistère, Université de Ouargla, 2014*
- [21] : «*Compatibilité élastique, Comportement mécanique et optimisation Des bétons de granulats légers*». *Université Laval Québec Avril 2003*
- [22] : Short A , Kinniburgh W; *Lightweigh concrete; CR books; 1968. Beton léger*
- [23] : *Livre de : Construire des matériaux : www.GCAlgerie.com*
- [24] : *Report on Pervious Concrete » [archive], American Concrete Institute, 2010 (ISBN 9780870313646) Report No. 522R-10.*
- [25] : *M. Maghfouri et al , Case Studies in Construction Materials 16 (2022) e00919*
- [26] : *E. C. Bingham. Fluidity and plasticity. Mc Graw-Hill Book Co, 1922.*

- [27] : G. H. Tattersall. *Workability and quality control of concrete*. E & FN SPON, 1991.
- [28] : MOKADEM s, *contrôle de la rhéologie d'un béton et de son évolution lors du malaxage par des mesures en ligne à l'aide de la sonde Viscoprobe*. Thèse de doctorat de l'école centrale de NANTE, France
- [29] : H. A. Barnes. *The yield stress - everything flows*, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 81, pp.133-178, 1999.
- [30] : P. C. F. Moller, J. Mencis, and D. Bonn. *Yield stress and thixotropy : on the difficulty of measuring yield stress in practice*. *Soft Matter*, 2, pp.274-283, 2006.
- [31] : F. de Larrard, C. F. Ferraris, and T. Sedran. *Fresh concrete: A Herschel-Bulkley material*. *Materials and Structures*, 31, pp.494-498, 1998.
- [32] : W. H. Herschel and R. Bulkley. *Measurement of consistency as applied to rubber-benzene solutions*. *Am. Soc. Testing Materials*, 26, pp.621-633, 1926.
- [33] : P. J. Carreau. *Rheological equations from molecular network theories*. *Trans. Soc. Rheol*, 16, pp.99-127, 1972.
- [34] : *Rhéological behaviour of lightweight concrete with embedded EPS beads september 2009*
- [35] : *international journal of research in advent technology (E-ISSN :2321-9637) numéro spécial conférence nationale "Vishwacon'16", 19 mars 2016*
- [36] : *Nouveau guide du béton et de ses constituants». 8ème Édition. Eyrolles. Mai 1998.*
- [37] : *Effet de taille dans le béton léger de polystyrène expansé ".thèse de doctorat. L'école national des ponts et chaussées 21.11.2005*
- [38] : A. GUEZOULI & A. BENAÏSSA ,2005 .''le polys-béton un nouveau matériau de construction, décembre 2005

