

dre...../F.S.S.A/UAMOB/2020

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE D'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ de Bouira



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie Civil

Mémoire de fin d'études

Présenté par :

M^{elle}. KHALFI IBTISSAM

M^r. BOUNOUA SOFIANE

En vue de l'obtention du diplôme de Master 2en :

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Thème :

**Effet de la distribution des billes de polystyrène sur les propriétés
des mortiers.**

Devant le jury composé de :

ARIBI CHOUAIB
KENNOUCHE Salim
HAMI BRAHIM

MCB
MCB
MCB

UAMOB
UAMOB
UAMOB

Président
Encadreur
Examineur

Année Universitaire 2019/2020

Remerciements

*A mon Dieu le clément et miséricordieux
Je remercie avant tout mon dieu c'est grâce à lui seul que j'ai peu achevé
ce modeste travail.*

*Mes premiers remerciements iront à Monsieur Kennouche Salim, qui a
encadré ce travail, notamment pour la confiance et l'indépendance qu'il
m'a accordée mais également pour ses conseils avisés et l'orientation qu'il
a su donner au mémoire dans les moments critiques, sans oublier ses
qualités humaines formidables, son soutien permanent et son expérience
dont j'ai eu l'honneur de profiter à de nombreuses reprises.*

*Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour
l'intérêt qu'ils ont porté notre recherche en acceptant d'examiner notre
travail Et de l'enrichir par leurs propositions.*

*Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les professeurs
qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu
dans la poursuite de nos études, spécialement à Mr. AMRANE Oh mon
Dieu, aie pitié de lui avec ta grande miséricorde, Mr AIT TAHER,
Mme NOZHA*

*Ma reconnaissance ira aussi à ma chère famille et à mes amis pour leur
amour et leur soutien dans les moments difficiles.*

*A titre plus personnel, Je remercie chaleureusement mes parents. Sans
son soutien je n'aurais sans doute pas eu la persévérance de mener ce
travail à terme.*

*Merci tout spécialement à ma sœur Amira. Ainsi qu'à toute ma famille.
Mes plus vifs remerciements vont également, à mes amis Amine Laribi et
Rezki ahlem, samma Omar que j'ai partagé avec eux des moments
inoubliables pendant mes études.*

Merci



Dédicace

Je Dédie Ce Modeste Travail A :

Ma chère grande mère « Hadda », affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à Bien mes études. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour Exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte.

A mon père « Boulem », avec toute ma reconnaissance, Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.

A Ma chère seule sœur « Amira », je te remercie pour tes sacrifices, ton soutien moral et ta gentillesse, ton profond attachement m'ont permis de réussir mes études, sans ton aide, tes encouragements ce travail n'aurait vu le jour.

- *Mon adorable cousine « samia ».*
- *À ma fleur « Marwa ».*
- *Mes oncles et tantes.*
- *A ma grande famille « KHALFI. » qui est intéressée à mon succès.*

Aux personnes qui m'ont accompagné durant mon chemin d'études supérieures mes aimables amies, collègues d'étude, « Ahlem, Amine, Omar »

- *La promotion de fin cycle Master II, Matériaux,*
- *Mon binôme « SOUFIANE. » et à toute sa famille.*

Khalfi ibtissam

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à.

- *À ma Mère «Fatima» qui m'a encouragé durant toutes mes études, et qui est toujours disponible pour m'aider, je lui confirme mon attachement et mon profond respect.*
- *À Mon père «Rabah», qui est toujours disponible pour me soutenir et pour que je puisse arriver à ce stade.*
À ma chère femme et mes petites filles «widad » et «hajar »
 - *À mes frères*
 - *À mes chères sœurs*
- *À mes chères ami(e)s tout particulièrement «mouloud», «hamide», «mohamed» et «Rachid » qui m'ont aidé et soutenue dans les moments difficiles ...*
 - *À ma chère binôme «IBTISSAM» et à toute sa famille.*
 - *À tous mes amis de ma promotion.*
 - *Et à tous ceux que j'ai connus durant mon cycle d'étude.*

BOUNOUA Sofiane

Résumé

Les constructions modernes sont toujours à la recherche de nouveaux matériaux avec des caractéristiques visées, notamment la légèreté, que dans cette étude bibliographique, axée sur les mortiers allégés avec des billes de polystyrène, dont plusieurs avantages sont exposés dans les différentes études antérieures, notamment la réduction de masse, l'isolation thermique et phonique, ce qui va répercuter positivement sur la légèreté des structures, le gain énergétique, ainsi qu'amélioration du confort par la réduction des nuisances sonores.

Après présentation dans les différents chapitres traitant les mortiers légers, la présentation du polystyrène et de certaines recherches récentes en relation avec la thématique suivie d'une critique, qu'a permis de dégager l'idée de faire une étude sur l'effet de la disposition des billes de polystyrène dans le mortier.

Mots clés : Mortier léger, billes de polystyrène, masse volumique, résistances mécaniques.

Summary

Modern constructions are looking for new materials with targeted characteristics, in particular lightness, that in this bibliographical study, focused on lightened mortars with polystyrene rods, that several advantages are exposed in different studies, in particular the reduction of mass, thermal and sound insulation, which will have a positive impact on the lightness of the structures, the economy of energy, thus improving comfort by reducing the noise levels.

After presentation in different chapters dealing with light mortars, the presentation of polystyrene and some recent research in relation to the theme followed by a criticism, which led to the idea of carrying out a study on the effect the arrangement of the polystyrene connecting rods in the mortar.

Key words: Lightweight mortar, polystyrene rods, density, mechanical strength.

ملخص

تبحث الانشاءات الحديثة دائما عن مواد جديدة ذات خصائص مستهدفة، و لا سيما الخفة، و التي ركزت في هذه الدراسة البيبليوغرافية على الملاط المخفف بقضبان البوليسثيرين، و التي تم الكشف عن مزاياها العديدة في الدراسات السابقة المختلفة، و لا سيما تقليل الكتلة، العزل الحراري و الصوتي، و الذي سيكون له تأثير ايجابي على خفة الهياكل، و زيادة الطاقة، و بالتالي تحسين الراحة عن طريق الحد من التلوث الضوضائي.

بعد العرض في الفصول المختلفة التي تتناول الملاط الخفيف، و عرض البوليسثيرين و بعض الابحاث الحديثة فيما يتعلق بالموضوع، تلاه نقد، مما ادى الى فكرة اجراء دراسة عن تأثير ترتيب البوليسثيرين في خليط الرمل .

الكلمات المفتاحية : ملاط خفيف الوزن، بلور التبوليسترين، كثافة، قوة ميكانيكية.

Table des matières

Remerciements	I
Dédicace	Erreur ! Signet non défini.
Résumé	III
Introduction générale.....	5
Problématiques	5
Chapitre I : Les mortiers légers	7
I.1. Introduction	8
I.2. Généralité	8
I.3. Les mortiers.....	9
I.3.1. Définition.....	9
I.3.2. Constituants des mortiers.....	9
I.4. Classification des mortiers	15
I.4.1. Classification générale des mortiers	15
I.5. Classe des mortiers.....	17
I.5.1. Différents types des mortiers.....	17
I.6. Caractéristiques des mortiers	19
Chapitre II : Etude bibliographique sur le polystyrène dans les mortiers	24
II.1. Introduction.....	25
II.1.2. Définition	25
II.1.3. Origine du polystyrène	25
II.1.4. Forme de polystyrène	26
II.1.5. Propriétés du polystyrène	28
II.1.6. Les applications.....	29
II.1.7. Le polystyrène expansé	29
II.1.8. La résistance thermique R	37
II.1.9. L'utilisation de l'additifs polystyrène dans les mortiers légers et béton léger.....	39
Conclusion.....	45
Chapitre III : Travaux de recherches.....	46
III.1. Le premier article.....	47
III.1.2. Matériels et méthodes	47
III.1.3. Résultats et discussion	49
III.1.3. Conclusion	51

III.1.4. Discussion et critiques du travail	51
III.2. Le deuxième article	52
III.2.1. Introduction.....	52
III.2.2. Matériel et approche	52
III.2.3. Résultats et discussion	54
III.2.4. Conclusion	57
III.2.5. Discussion et critiques du travail	58
Conclusion Générale	59
Références bibliographiques	61

Liste des figures

Figure I. 1 : Constituants des mortiers [2].....	9
Figure I. 2 : Sable roulé (naturel).	11
Figure I. 3 : Sable concassé (Artificiel).....	11
Figure I. 4 : Mécanisme des floculations avec et sans superplastifiants	14
Figure I. 5 : Différents ajouts cimentaires	15
Figure I. 6 : Le gypse.....	15
Figure I. 7 : Table à secousses [12].	19
Figure I. 8 : Principe de fonctionnement du maniabilimètre [12].	20
Figure I. 9 : : Essai d'étalement au mini –cône	20
Figure I. 10 : Appareil de Vicat muni de l'aiguille avec une surcharge	21
Figure I. 11 : Moule pour moulage des éprouvettes de mortier.	21
Figure I. 12 : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.	21
Figure I. 13 : Appareillage pour la mesure du retrait.	22
Figure I. 14 : Volume quelconque et le volume unitaire	23
Figure II. 1: Structure du polystyrène.....	25
Figure II. 2: Polymérisation du monomère de styrène en polystyrène.	26
Figure II. 3 : photo Polystyrène cristal.	26
Figure II. 4 : Photos polystyrène choc.....	27
Figure II. 5 : Photos PS expansé.....	27
Figure II. 6 : Les boîtiers de CD, et les emballages alimentaires.	29
Figure II. 7 : Les plaques de polystyrène.	29
Figure II. 8 : la formule développée du monomère de styrène.....	30
Figure II. 9 : unité de fabrication de polystyrène expansible.	31
Figure II. 10 : Motif du polystyrène expansé.	32
Figure II. 11 : Courbe d'expansion de perles de PSE.....	33
Figure II. 12 : Pré-expansion.	33
Figure II. 13 : Le stockage du polystyrène Dans les Silos.	34
Figure II. 14 : Moule à bloc.....	34
Figure II. 15 : Unité de découpage.....	35
Figure II. 16 : Produit finie.....	35

Figure II. 17 : Image sur l'isolation acoustique d'une maison.....	39
Figure II. 18 : Polystyrène non traité.....	41
Figure II. 19 : Photo sac en Polys béton.....	42
Figure II. 20 : Photo de Polystyrène traité.....	43
Figure II. 21 : Photo de sac de POLITERM®.....	44
Figure II. 22 : Mortier léger en sac.....	44
Figure II. 23 : Mortier léger.....	45
Figure III. 1 : Structure de la vermiculite.....	47
Figure III. 2 : Déchets de poudre de polystyrène expansé et sa microstructure.	48
Figure III. 3 : Variations de porosité des mortiers.....	49
Figure III. 4 : Variations d'absorption d'eau des mortiers.	50
Figure III. 5 : Variations de résistance à la compression des mortiers.....	50
Figure III. 6 : Variations de conductivité thermique des mortiers.....	51
Figure III. 7 : Force d'adhérence moyenne du PSE et des mortiers de ciment par rapport à ASTM C1329.	55
Figure III. 8 : Modes de rupture de liaison.....	55
Figure III. 9 : Résistance à la compression du mortier PSE et du mortier de ciment.....	56
Figure III. 10 : Rupture des éprouvettes lors de l'essai de flexion.....	56
Figure III. 11 : 7 jours de résistance à la flexion et à la traction du mortier de ciment et de mortier OMR EPS.....	56
Figure III. 12 : Une comparaison des mortiers spécifiés ASTM et du mortier OMR EPS	57
Figure III. 13 : Les vides d'air et les problèmes de durcissement de la surface externe Mortier EPS...	57

Liste des Tableaux

Tableau I. 1 : Dosages des mortiers [11].....	18
Tableau II. 1 : Les valeurs de la conductivité des matériaux de construction.....	38
Tableau III. 1 : Composition de vermiculite expansée (poids%).....	47
Tableau III. 2 : Les variations des proportions du mélange (EV+WPSE+C).	48
Tableau III. 3 : Proportions de lisier PSE et de sable tranchant pour les mortiers PSE.....	53

Introduction générale et problématiques

Introduction générale

La recherche actuelle dans le domaine des matériaux de construction est dirigée vers les granulats légers naturels ou artificiels pour assurer d'une part, la pérennité des granulats naturels conventionnels et l'allègement de certains éléments de construction et d'autre part, une économie d'énergie par la réduction de la conductivité thermique. En effet, le gain de poids, qui peut être plus ou moins important selon le type de matériau, entraîne une diminution des masses des éléments.

Une des voies d'allègement et d'amélioration du pouvoir d'isolation envisageables pour le mortier est le remplacement d'une fraction des granulats habituels, qui constituent environ les 3/4 de la masse du mortier, par des granulats plus légers, naturels ou artificiels.

Une construction est généralement réalisée par éléments maçonnés (blocs de béton, pierre de taille, briques), dont il faut assurer la liaison ou qu'il faut protéger par un revêtement. On doit alors effectuer des scellements ou divers travaux de reprise, de bouchage, etc. Toutes ces opérations se font à l'aide d'un liant toujours mélangé à du sable, de l'eau et éventuellement un adjuvant, pour obtenir un « **mortier** », qui se distingue du béton par l'absence de gravillons. Des compositions multiples de mortiers peuvent être obtenues en jouant sur les différents paramètres : liant (type et dosage), adjuvants et ajouts, dosage en eau. En ce qui concerne le liant, tous les ciments et les chaux sont utilisables ; leur choix et le dosage sont fonction de l'ouvrage à réaliser et de son environnement. Le mortier est un mélange de liant chaux ou ciment, de sable, d'eau et éventuellement d'adjuvants.

L'objet de notre travail est de faire une étude bibliographique sur l'utilisation des bielles de polystyrène dans les mortiers.

Dans notre étude, le matériau utilisé est un mortier léger au polystyrène qui est connu par sa faible densité.

Problématiques

L'utilisation du polystyrène comme une partie solide dans les mortiers soit par remplacement partiel du sable, ou comme ajout, a fait l'objet de beaucoup de travaux de recherche, l'ensemble des résultats de recherche notent une amélioration des propriétés physiques telle que la légèreté et l'isolation thermique. Néanmoins l'effet de la disposition des bielles de

polystyrène dans le matériau n'est pas illustré ou pris en charge, ce qui nous a inciter à questionner sur l'effet de la disposition de ses bielles dans les mortiers sur les propriétés physico-mécanique de ce dernier.

Structure du mémoire

Notre mémoire est structuré comme suit :

- Une introduction générale,
- **1^{ère} chapitre** : Etude bibliographique sur les mortiers légers,
- **2^{ème} chapitre** : Etude bibliographique sur le polystyrène dans les mortiers,
- **3^{ème} chapitre** : travaux des recherches en relation avec la problématique pris en charge, avec une discussion et une critique.
- Une conclusion générale avec des recommandations.

Chapitre I : Les mortiers légers

I.1. Introduction

Le présent chapitre est une étude bibliographique des travaux de recherche sur les mortiers légers.

I.2. Généralité

Une construction est généralement réalisée par éléments, dont il faut assurer la liaison ou qu'il faut protéger par un revêtement. On doit alors effectuer des scellements ou divers travaux de reprise, de bouchage, etc. Toutes ces opérations se font à l'aide d'un liant toujours mélangé à du sable, de l'eau – et éventuellement un adjuvant – pour obtenir un « Mortier », qui se distingue du béton par l'absence de gravillons.

Le mortier est obtenu par le mélange d'un liant (chaux ou ciment), de sable, d'eau et éventuellement d'additions. Des compositions multiples de mortier peuvent être obtenues en jouant sur les différents paramètres : liant (type et dosage), adjuvants et ajouts, dosage en eau. En ce qui concerne le liant, tous les ciments et les chaux sont utilisables; leur choix et le dosage sont fonction de l'ouvrage à réaliser et de son environnement.

Les mortiers peuvent être:

- Préparés sur le chantier en dosant et en mélangeant les différents constituants, adjuvants compris ;
- Préparés sur le chantier à partir de mortiers industriels secs prédosés (il suffit d'ajouter la quantité d'eau nécessaire) ;
- Livrés par une centrale : ce sont des mortiers prêts à l'emploi, dont les dernières années, les mortiers retardés stabilisés, ont un temps d'emploi supérieur à 24 heures.

Les mortiers industriels se sont beaucoup développés ces dernières années, permettant d'éviter le stockage et le mélange des constituants sur des chantiers parfois exigus et difficiles d'accès : rénovation, travaux souterrains.

Les mortiers peuvent comporter différents types d'adjuvants :

- Réducteurs d'eau-plastifiants ;
- Plastifiants
- Entraîneurs d'air ;
- Modificateurs de prise (retardateurs, accélérateurs);

- Hydrofuges

Dans tous les cas des soins particuliers doivent être pris afin d'obtenir des mortiers sans ressuage, homogènes d'une gâchée à l'autre[1].

I.3. Les mortiers

Les mortiers sont très utilisés pour les travaux de tous types (finition, chapes, revêtement,.....etc), composé essentiellement de ciment, sable et additions, la figure II.1 suivante illustre les composants du mortier[2].

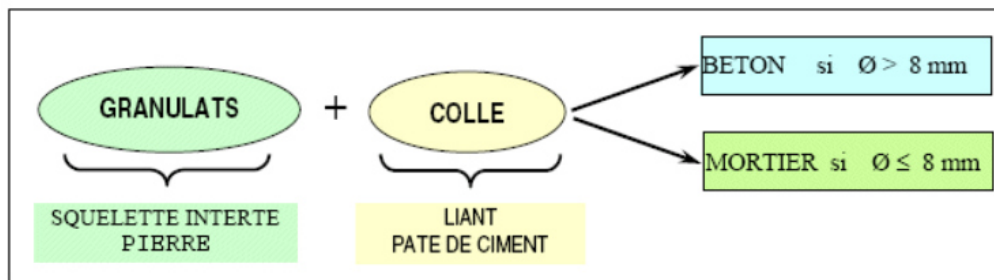


Figure I. 1:Constituants des mortiers[2].

I.3.1. Définition

Le mortier est l'un des matériaux de construction que l'on utilise pour solidariser les éléments entre eux, assurer la stabilité de l'ouvrage, combler les interstices entre les blocs de construction. En général le mortier est le résultat d'un mélange de sable, d'un liant (ciment ou chaux) et d'eau dans des proportions données, différant selon les réalisations et d'adjuvant [2].

I.3.2. Constituants des mortiers

I.3.2.1. Le Liant

On utilise généralement des liants hydrauliques qui peuvent être le ciment, cette dernière est une matière pulvérulente à base de silicate et d'aluminate, et de la chaux obtenue par la cuisson [3].

Généralement, on peut utiliser :

- Les ciments normalisés (gris ou blanc).
- Les ciments spéciaux (alumineux fondu, prompt,...).
- Les liants à maçonner.
- Les chaux hydrauliques naturelles.
- Les chaux éteintes.

I.3.2.2. Le sable

C'est une matière minérale siliceuse ou calcaire qui se présente dans le sol sous la forme de grains ou de poudre, suivant qu'il s'agit de sable grossier ou de sable fin. Les sables proviennent de la désagrégation des roches qui constituent l'écorce terrestre ; suivant leur composition, ils sont blancs, jaunes, gris ou rougeâtres. On peut encore classer les sables d'après leur origine et distinguer les sables de carrière, les sables de mer et les sables de rivière. Le terrain dans lequel le sable grossier domine, manque d'homogénéité, sa trop grande perméabilité ne lui permet pas de retenir les engrais solubles, qui sont entraînés par les eaux avant d'avoir produit leur effet, amenant, en outre, l'assèchement rapide du sol. Des amendements sont nécessaires pour corriger les défauts des sols sableux ; l'apport de marne argileuse donne de la cohésion aux terrains qui en manquent, mais le fumier de ferme, en augmentant l'humus, est dans tous les cas le meilleur des traitements : il apporte au sable grossier l'agglomérant dont il a besoin et au sable fin l'allègement et l'aération qui lui font défaut [4].

I.3.2.2.1. Origines de sable

•Sable d'origine naturelle

Le sable est une roche sédimentaire meuble, constituée principalement de quartz, provenant de la désagrégation des roches sous l'action de divers agents d'érosion et de l'altération des roches riches en quartz (granites, gneiss) sous l'action de processus physiques (vent, eaux courantes) ou chimiques (action dissolvante de l'eau). Les grains de sable qui se forment sont généralement gros et anguleux, difficilement transportables par le vent et les cours d'eau. Les plus gros grains de sable se retrouvent ainsi le long des cours d'eau, aux bords des mers, ou dans les régions désertiques. En milieu fluvial, les grains s'usent peu et restent donc gros et anguleux. En milieu continental, l'usure des grains de sable par le vent et l'eau entraîne une modification de leur forme (ou morphoscopie) au cours des temps géologiques. Les grains de sable usés deviennent émoussés et luisants (milieu littoral), ou ronds et mats (milieu éolien). En s'arrondissant, les grains deviennent plus petits. Les sables peuvent également se consolider et se cimenter ultérieurement pour donner naissance à des grès (grès quartzeux, grès calcaires). Ce type de sables est principalement constitué de quartz (silice), avec de faibles proportions de mica, de feldspath et de magnétite. La couleur du sable est d'autant plus claire que la teneur en silice est élevée. Les sables sont toujours définis en fonction des constituants (masses orbitaires), on parle ainsi de sable quartzeux,

feldspathique, ferrugineux, micacé, calcaire, ou encore de sable coquillier. Toutefois, dans le langage

courant, le sable est généralement associé au sable quartzeux[2].

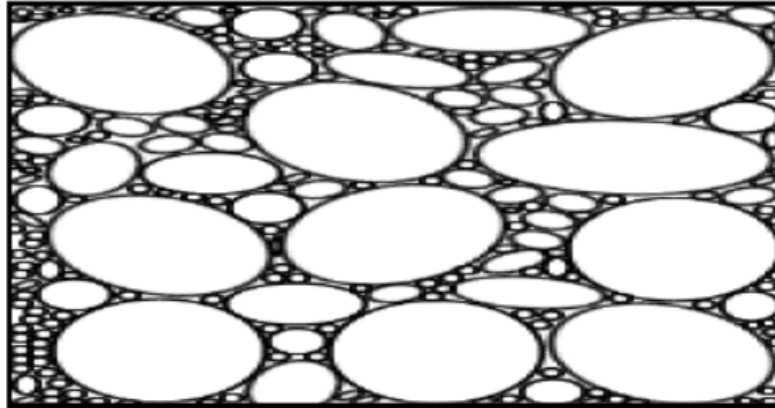


Figure I. 2:Sable roulé (naturel).

● **Sable d'origine artificielle :**

Provient de concassage des roches naturelles comme le calcaire, ou artificielle (pouzzolane), dit aussi sable concassé, caractérisées par une meilleure adhérence agrégat/liant[2].

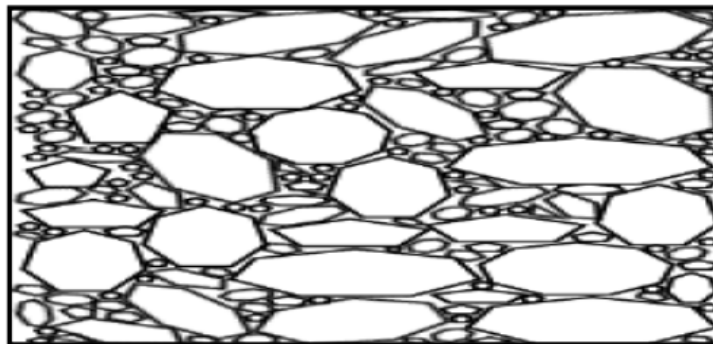


Figure I. 3: Sable concassé (Artificiel).

● **Sables spéciaux (lourds, réfractaires, légers)**

- Sable de laitier ;
- Sable d'oxydes de fer, de chromite ;
- Corindon ;
- Sable de briques concassées ;
- Polystyrène expansé ;
- Vermiculite, perlite

I.3.2.2.2. Granulométrie

Certains sables sont à éviter, notamment les “sables à lapin”, généralement très fins, les sables crus qui manquent de fines et les sables de dunes ou de mer qui contiennent des sels néfastes pour les constituants des ciments, par contre ils doivent être propres.

Le diamètre maximum des grains de sable utilisés pour les mortiers est :

- Extra-fins : jusqu'à 0,08 mm (en tamis), soit 1 mm (en passoire).
- Fins : jusqu'à 1,6 mm.
- Moyens : jusqu'à 3,15 mm.
- Gros : jusqu'à 5 mm. [2].

I.3.2.2.3. Rôle du sable dans le mortier

L'introduction des sables permet de diminuer le retrait du liant (ossature mortier) en augmentant les résistances mécaniques, ajoutant du ça, sa disponibilité et son aspect esthétiques (couleur). Les sables de bonne granulométrie doivent contenir des grains fins, moyens et gros. Les grains fins se disposent dans les intervalles entre les gros grains pour combler les vides. Ils jouent un rôle important : Ils réduisent les variations volumiques, les chaleurs dégagées et même le prix. Les dosages se feront en poids plutôt qu'en volume comme c'est souvent le cas, afin d'éviter les erreurs de dosage, par suite de l'augmentation de volume de sable humide [2].

I.3.2.2.4. Exigences sur le sable d'usage général

Le sable doit être siliceux, silico-calcaire ou même calcaire à condition que les grains ne soient pas friables. Il doit être propre, c'est-à-dire dépourvu d'impuretés susceptibles de compromettre la qualité du mortier en œuvre (argile, vase, terre végétale, plâtre, sels minéraux). Le degré de propreté du sable est mesuré par l'essai d'équivalent de sable L'indice fourni par cet essai (ESV) doit être inférieur à 75%. Il est préférable d'utiliser des sables roulés de rivière. Les sables de carrière conviennent s'ils ne renferment pas d'impuretés nocives. Les sables de mer doivent être lavés (sinon ils sèchent mal et peuvent donner lieu à des efflorescences en raison des sels qu'ils contiennent). La granulométrie des sables doit être limitée à 3mm. En général, les dosages du mortier sont exprimés en poids de liant par m³ de sable sec. Or, le plus souvent, sur le chantier, le sable renferme un certain pourcentage d'eau (pouvant varier de 0% à 20 %) et il suffit de très peu d'eau pour que le poids du m³ de sable soit modifié, c'est le phénomène bien connu du foisonnement du sable [2].

I.3.2.2.5. L'eau de gâchage

L'eau joue un rôle important, elle sert à hydrater le ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier, ainsi elle contribue à son ouvrabilité. L'eau doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis). L'eau potable convient toujours le gâchage à l'eau de mer est à éviter, surtout pour le béton armé. Les caractéristiques des eaux requises pour la confection des mortiers et des bétons sont précisées dans la norme NA-442. Les mortiers devraient contenir la quantité d'eau maximale compatible avec une ouvrabilité optimale [4].

L'eau remplit deux fonctions : d'une part, elle sert à l'hydratation du ciment et d'autre part, elle permet la fluidification de la pâte [5]. Une partie d'eau est consommée par l'hydratation du ciment, soit entrant dans la composition chimique de l'hydrate, soit étant piégée à l'intérieur des pores de l'hydrate. Cette eau étant physico-chimique fixée par les hydrates, ne contribue pas à la fluidification de la pâte. Par contre, une autre partie de l'eau ne participe pas à l'hydratation du ciment.

I.3.2.2.6. Les additifs

Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques que l'on utilise dans le cas des bétons. Ils modifient les propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés en faible proportion (environ de 5% du poids de ciment). Les mortiers peuvent comporter différents types d'adjuvants :

- Les plastifiants (réducteurs d'eau);
- Les entraîneurs d'air;
- Les modificateurs de prise (retardateurs, accélérateurs);
- Les hydrofuges.[6]

La norme **NF EN 934-2** [7] classe les adjuvants en onze 11 Catégories différentes :

Adjuvants modificateurs de la rhéologie du béton

- Plastifiants/Réducteurs d'eau ;
- Super plastifiants/Haut réducteurs d'eau ;
- Plastifiants/Réducteurs d'eau/Retardateur de prise ;
- Super plastifiants/Haut réducteurs d'eau/Retardateur de prise ;
- Super plastifiants/Haut réducteurs d'eau/Accélérateur de prise.

Adjuvants modificateurs de prise et de durcissement du béton

- Accélérateurs de prise ;
- Accélérateurs de durcissement ;
- Retardateurs de prise.

Autres catégories normalisées d'adjuvants

- Hydrofuges de masse ;
- Entraîneurs d'air ;
- Rétenteurs d'eau.

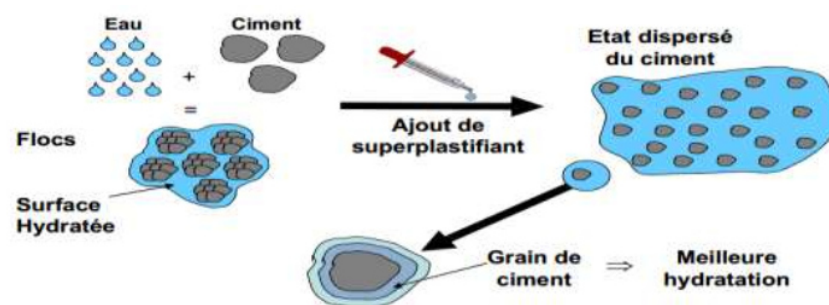


Figure I. 4 : Mécanisme des floculations avec et sans superplastifiants

I.3.2.2.7. Les ajouts

Les cendres volantes, le laitier de haut fourneau granulé broyé, la fumée de silice et les pouzzolanes naturelles, telles que le schiste calciné, l'argile calcinée ou le méta kaolin sont des matériaux qui, combinés au ciment portland, contribuent aux propriétés du béton et mortiers durci par action hydraulique ou pouzzolanique ou les deux à la fois.

-Les cendres volantes

Il existe quatre classes qui sont :

- **Classe F**: moins de 10% de CaO.
- **Classe C**: de 15 à 35% de CaO .
- **Classe F et C**: 60 à 85% de verre.

- Le laitier de haut fourneau :

- Laitier acide
- Laitier basique

- Les pouzzolanes

- Pouzzolane naturelle:(L'argile calcinée).
- Pouzzolane artificielle:(d'oxyde de fer et de schiste cuit).
- Les colorants

- Les calcites.
- La fumée de silice.
- Les fillers.
- - Le gypse.[2]



Figure I. 5: Différents ajouts cimentaires.

Avec: 1: cendre volante classe C, 2: méta kaolin, 3: fumée de silice, 4: cendre volante classe F, 5: laitier, 6: schiste.



Figure I. 6: Le gypse

I.4. Classification des mortiers

La classification des mortiers est comme suite: [8]

I.4.1. Classification générale des mortiers

•Selon leur domaine d'utilisation :

Généralement les mortiers varient selon leur domaine d'application, et ce dernier qu'est très vaste et leurs domaines permet de citer les catégories suivantes:

- ♣ Mortier de pose.
- ♣ Mortier de joints.
- ♣ Mortier pour les crépis.

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

♣ *Selon la nature du liant :*

On peut classer les mortiers selon la nature du liant en:

♣ **Mortier de ciment portland**

Le ciment portland donne au mortier de maçonnerie sa résistance mécanique, en particulier la résistance initiale, qui est indispensable à une époque où la vitesse de construction est telle que l'on exige qu'un mur puisse supporter une charge importante le lendemain même de sa construction. Les mortiers de ciment portland manquent de plasticité, ont un faible pouvoir de rétention d'eau et sont difficiles à travailler. Le dosage du rapport entre le ciment et le sable est en général volumétrique de 1,3 et le rapport de l'eau sur ciment est environ 0,35. De plus, un dosage en ciment les rend pratiquement imperméables.

♣ **Mortier de chaux**

C'est le composant traditionnel du mortier, il possède une plasticité et un pouvoir de rétention d'eau excellent, mais sa résistance mécanique est faible et sa cure est lente. La chaux grasse, obtenue par extinction de la chaux vive en la laissant vieillir, est le produit de qualité que l'on devrait utiliser, mais le vieillissement prend beaucoup de temps et le travail de la chaux grasse est très salissant. C'est pourquoi il est plus pratique d'utiliser la chaux hydratée sèche. La cure des mortiers de chaux s'effectue lentement par carbonatation sous l'effet du gaz carbonique de l'air; ce processus peut être fortement ralenti par un temps froid et humide.

♣ **Mortiers bâtards**

Ce sont les mortiers, dont le liant est le mélange de ciment et de chaux, dans les proportions égales, suivant leur domaine d'utilisation éventuelle, les compositions de chaux et ciment peuvent être variées.

♣ Mortier à base de ciment de maçonnerie

C'est un produit déposé contenant du ciment portland et un filler minéral inerte (calcaire) et des adjuvants tels que des agents mouillants, des agents hydrofuges et des entraîneurs d'air, les adjuvants donnent la plasticité et le pouvoir de rétention d'eau que confère la chaux aux mortiers de ciment. Certains ciments de maçonnerie sont des mélanges de ciment portland et de chaux hydratée, avec des adjuvants.

I.5. Classe des mortiers

- **Classe 1:** Adjuvant modifiant les caractéristiques des mortiers, bétons et coulis à l'état frais.
- **Classe 2:** Adjuvant modifiant les caractéristiques des mortiers, bétons et coulis pendant la prise et le durcissement.
- **Classe 3:** Adjuvant modifiant la teneur en air ou en autre gaz.
- **Classe 4:** Adjuvant modifiant la résistance des mortiers, bétons et coulis.
- **Classe 5:** Adjuvant améliorant la durabilité des mortiers, bétons et coulis.
- **Classe 6:** Adjuvant modifiant des propriétés spéciales [9].

I.5.1. Différents types des mortiers

Les mortiers se partagent en :

Les mortiers de ciment

Les mortiers de ciments très résistants, il présente une meilleure résistance à la compression et sa prise est plus rapide. En revanche, il est davantage sujet au retrait [10].

Les mortiers de chaux

Les mortiers de chaux sont gras et onctueux. Ils durcissent plus lentement que les mortiers de ciments [10].

Les mortiers bâtards

Le mortier bâtard est composé de ciment et de chaux aérienne ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), plus élastique et plus facile à mettre en œuvre que le mortier de ciment pour son retrait est en outre moins marqué. Le temps de durcissement relativement long, surtout en cas de menace de gel [10].

Mortier réfractaire

Il est fabriqué avec du ciment fondu, qui résiste à des températures élevées. Il est utilisé pour la construction des cheminées et barbecues [2].

Mortier rapide

Il est fabriqué avec du ciment prompt, il est rapide et résistant pour les Scellemets [2].

Mortier industriel

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, conditionnés en sacs, contrôlés en usine et parfaitement réguliers. Pour utiliser ce type de mortier, il suffit de mettre la quantité d'eau nécessaire et malaxer pour ensuite les mettre en œuvre. Les fabricants de mortiers industriels proposent une gamme complète de produits répondant à tous les besoins:

- Mortiers pour enduits de couleur et d'aspect varié.
- Mortiers d'imperméabilisation.
- Mortier d'isolation thermique.
- Mortier de jointoiement.
- Mortier de ragréage.
- Mortier de scellement, mortier pour chapes.
- Mortier-colle pour carrelages, sur fond de plâtre ou de ciment ...
- Mortier de réparation [2].

Préparation des mortiers :

Les quantités nécessaires en fonction des dosages et des travaux à faire comme le montre tableaux ci-dessous : [11].

Tableau I. 1: Dosages des mortiers [11].

Sable	Ciment	Eau
Unité (g)	Unité (g)	Unité (ml)
1350	450	225

- Prévoir une surface de gâchage plate et assez grande, balayer cette aire de gâchage au balai de chantier, elle doit être propre et surtout sans débris végétaux.
- Installer la bétonnière ou le seau de maçon à proximité des produits.
- Prévoir un tuyau d'alimentation en eau muni d'un robinet d'arrêt.
- Déposer sur l'aire prévue à cet effet la quantité de sable.
- Verser le ciment (ou la chaux) sur le sable.
- Commencer à mélanger à la pelle le sable et le ciment. Afin d'obtenir un bon mélange, déplacer le tas deux ou trois fois. Le mélange doit être de couleur homogène.
- Creuser le tas en cratère et verser 2/3 de l'eau prévue.
- Faire tomber peu à peu les bords du cratère dans l'eau pour humidifier le mélange.

- Mélanger le tas afin de répartir l'eau. Pour homogénéiser le mélange, le déplacer deux ou trois fois comme pour le mélange à sec.
- Couper le dessus du tas de mortier avec la pelle. S'il ne se forme pas de **boudins**, ajouter un peu d'eau et mélanger à nouveau.
- Le mortier est correctement humidifié lorsqu'on passe le plat de la pelle dessus, il se lisse et l'eau remonte en surface [11].

I.6. Caractéristiques des mortiers

Les caractéristiques principales des mortiers sont [12] :

Ouvrabilité :

L'ouvrabilité d'un mortier se mesure à l'aide de divers appareils. Les plus connus sont:

❖ Table à secousses

Après le démoulage du mortier, ce dernier reçoit 15 chocs en 15 secondes. On mesure le diamètre de la galette ainsi obtenue. L'étalement en % est donné par la formule:

$$E\% = 100 * Dr - Di / Di$$

Avec : Dr: diamètre final

Di: diamètre initial

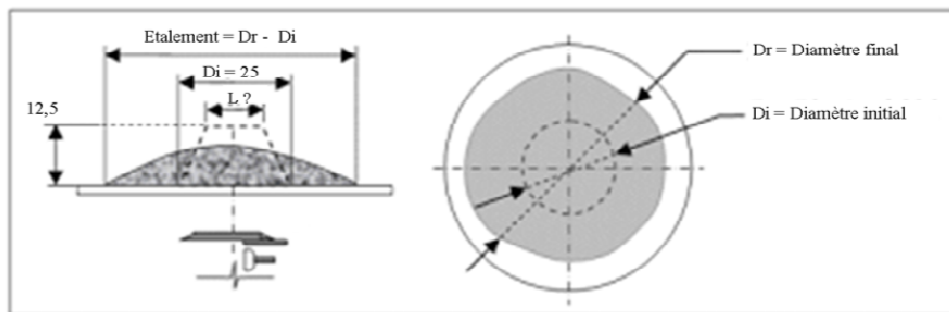


Figure I. 7 : Table à secousses[12].

●Maniabilimètre du LCPC

Il est constitué d'un moule parallélépipédique comportant une paroi mobile et un vibreur. Le principe de l'essai consiste, après avoir enlevé la paroi mobile, à mesurer le temps mis par le mortier sous vibrations pour atteindre un repère gravé sur la face intérieure du moule.

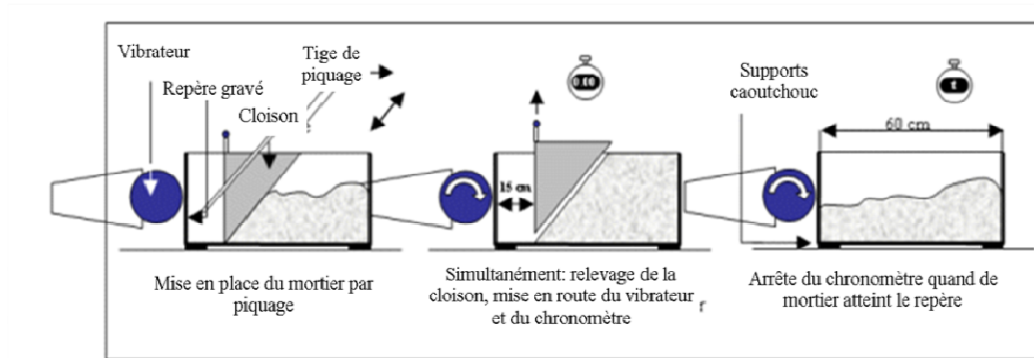


Figure I. 8 : Principe de fonctionnement du maniabilimètre[12].

•Le cône

Dans le cas d'un mortier fluide, on peut mesurer le temps d'écoulement d'une certaine quantité de mortier au travers d'un ajustage calibré situé à la partie inférieure d'un cône. Le cône peut aussi être muni d'un vibreur[12].

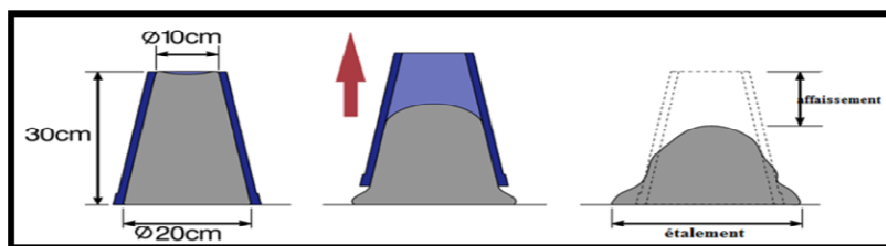


Figure I. 9 : Essai d'étalement au mini-cône

Prise

Le temps de prise se mesure habituellement sur une pâte pure de ciment de consistance normale (24 à 30% d'eau) et conformément à la norme concernée (à l'aide de l'appareil de Vicat). Il est possible d'obtenir (hors norme) le temps de prise d'un mortier avec le même appareillage mais en plaçant une surcharge de 700 grammes sur le plateau supérieur. Le poids de l'aiguille pénétrant dans le mortier est de 1000 grammes. Le début de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du fond (taille des plus gros grains de sable) et la fin de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du niveau supérieur[12].

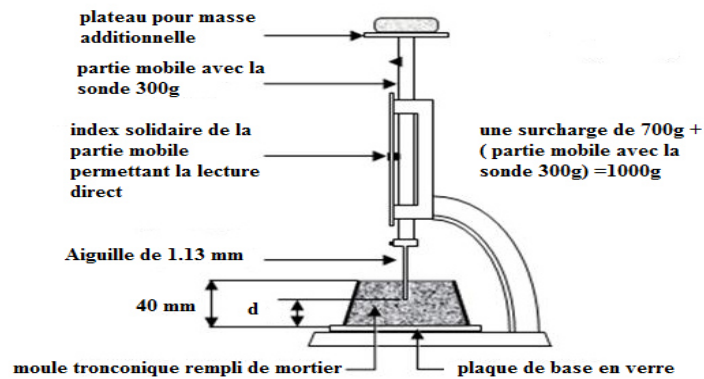


Figure I. 10 : Appareil de Vicat muni de l'aiguille avec une surcharge

Résistances mécaniques

Les essais sont souvent effectués sur les éprouvettes prismatiques de 4x4x16cm conservés dans l'eau à 20°C. Les éprouvettes sont rompues en traction par flexion puis en compression. Les résistances, aussi bien en traction par flexion qu'en compression, progressent à peu près comme logarithme du temps (entre 1 et 28 jours).

Les résistances des mortiers dépendent de très nombreux facteurs:

- Nature et dosage en ciment.
- Rapport E/C.
- Granulométrie et nature du sable.
- Energie de malaxage et mise en œuvre.
- Protection des premiers jours[12].

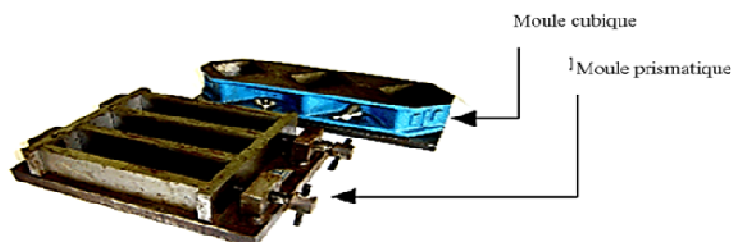


Figure I. 11 : Moule pour moulage des éprouvettes de mortier.

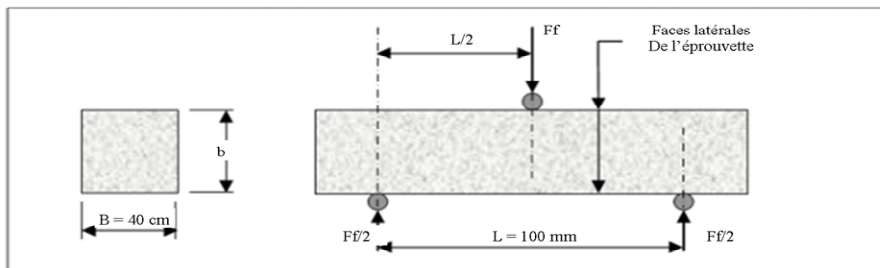


Figure I. 12 : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.

Retraits et gonflements

❖ Le Retrait :

Les retraits se mesurent sur des prismes 4x4x16cm en mortier 1/3, munis de plots à leurs extrémités et conservés, après démoulage, dans une enceinte à 20°C et à 50% d'humidité relative. Ce retrait progresse à peu près comme le logarithme entre 1 et 28 jours. Le mortier prend son retrait plus rapidement que la pâte pure. Le rapport du retrait de la Pâte pure sur le retrait du mortier croît avec le temps. Il est de l'ordre de 1,5 à 2,5 les premiers jours, puis augmente pour atteindre 2,5 à 3,5 en un an. En moyenne, le retrait sur mortier est 2 à 3 fois plus faible que celui de la pâte pure (avec le même ciment) [12].

❖ Le gonflement :

Le gonflement des mortiers (qui se produisent lorsqu'ils sont conservés dans l'eau) se mesure sur les mêmes éprouvettes de 4x4x16cm conservées dans l'eau à 20°C. Ils sont en général assez faibles (cas de ciment stable ayant une expansion aux aiguilles de le Chatelier inférieure sur pâte pure à 10mm) [12].

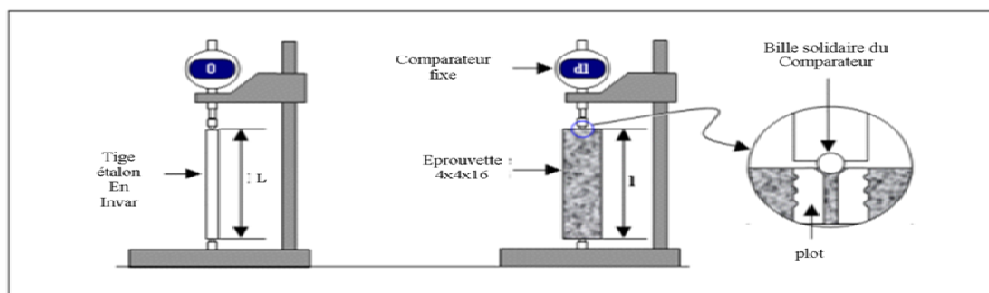


Figure I. 13 : Appareillage pour la mesure du retrait.

Masse volumique apparente :

C'est la masse d'un corps par unité de volume apparent en état naturel (y compris les vides et les capillaires). Elle est exprimée en (g/cm^3 , kg/m^3 ou t/m^3) [12].

Masse volumique absolue :

C'est la masse d'un corps par unité de volume absolu de matière pleine (volume de matière Seule sans tenir compte les vides et les pores). Elle est exprimée en (g/cm^3 , kg/m^3 ou t/m^3). [12].

Porosité et compacité :

❖ La porosité

La porosité est le rapport du volume vide sur le volume total [12].

P = volume de vide / volume totale

❖ La compacité

La compacité est le rapport du volume des pleins sur le volume total [12].

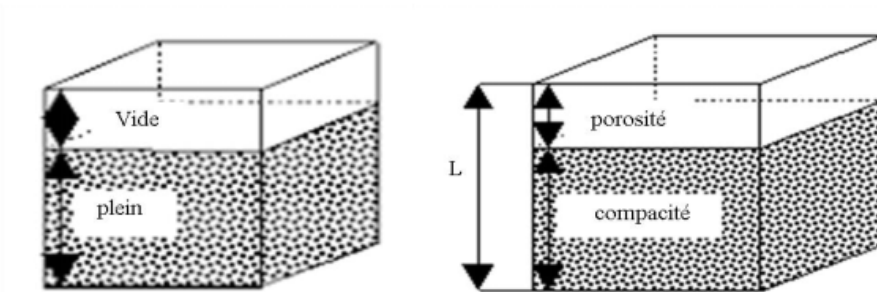


Figure I. 14 : Volume quelconque et le volume unitaire [12].

Le rôle d'utilisation de mortier :

La pâte plastique obtenue peut jouer plusieurs rôles essentiels

- Assurer la liaison, la cohésion des éléments de maçonnerie entre eux, c'est-à-dire la solidité de l'ouvrage, le rendre monolithique.
- Protéger les constructions contre l'humidité due aux intempéries ou remontant du sol.
- Sous forme d'enduits aériens.
- Sous forme d'écrans étanches.
- Constituer des chapes d'usure, un pour dallages en béton.
- Devenir la matière première dans la fabrication de blocs manufacturés, carreaux, tuyaux et divers éléments moulés.
- Être le constituant essentiel du béton
- Consolide certains sols de fondations sous forme d'injection [13].

Conclusion

Dans cette partie, on a vu les différents mortiers formulés par d'autres auteurs du point de vue caractéristiques mécanique en compression et en flexion ainsi que le comportement en retrait, en gonflement et temps de prise etc.

Chapitre II : Etude bibliographique sur le polystyrène dans les mortiers

II.1. Introduction

Pour réduire la consommation énergétique dans le domaine de la construction et les problèmes environnementaux liés au recyclage des déchets industriels et domestiques, il est nécessaire de développer de nouvelles solutions pour l'avenir. Ces solutions passent par l'amélioration des matériaux de construction existants. L'introduction de matériaux « déchets » tel que le polystyrène semble une solution intéressante. Les propriétés thermiques de ces matériaux permettent par rapport à un béton classique d'alléger le produit de base, de proposer une meilleure isolation, de diminuer l'inertie thermique, de recycler certains déchets et de réduire le dégagement de CO₂ dû à la combustion pour le chauffage des bâtiments.

II.1.1 Histoire de sa découverte

La production de plastiques est sans cesse croissante depuis pratiquement un siècle, parmi les plus connus on trouve : le polystyrène.

Le polystyrène est l'un des plastiques industriels les plus courants dans la vie quotidienne ;

Il a été découvert dès 1839, mais n'a été exploité à grande échelle en Allemagne et aux États-Unis qu'à partir des années 1933. Sa fabrication industrielle commença en 1933 et le procédé utilisé fut perfectionné au cours des décennies suivantes. Le polystyrène expansé a été inventé par hasard en 1944 par Ray Mc Intire (1919-1996) un chimiste travaillant pour Dow chemical. Il fut commercialisé sous le nom de Styrofoam et utilisé à l'origine comme isolant thermique pour les bâtiments. [14]

II.1.2. Définition

Le polystyrène (PS) est un polymère thermoplastique de formule brute (C₈H₈)_n. structurellement, comme le montre la figure II.1, il est composé d'une longue chaîne hydrocarbonée, avec un cycle de benzène accroché sur une chaîne (CH-CH₂). [15]

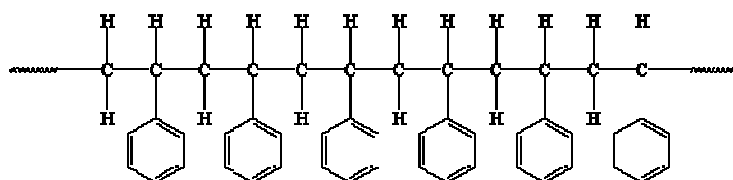


Figure II. 1: Structure du polystyrène.

II.1.3. Origine du polystyrène

Le PS est obtenu par polymérisation du styrène, un matériau issu de la pétrochimie. Plus de 90% de la production de styrène provient de la déshydrogénation de l'éthyle benzène et de

l'éthylène .sa formule chimique est $(C_8 H_8)_n$, il ne contient que de carbone et de l'hydrogène comme éléments chimiques.

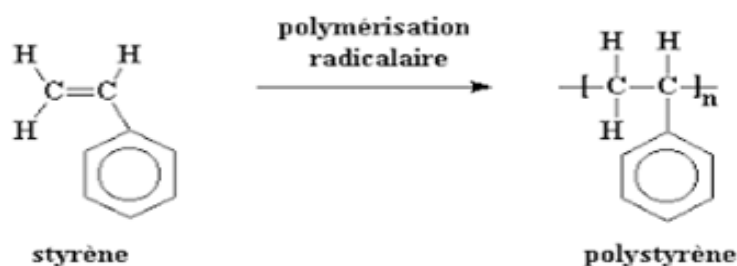


Figure II. 2: Polymérisation du monomère de styrène en polystyrène.

Deux procédés de polymérisation sont actuellement utilisés pour la fabrication du PS : la polymérisation radicalaire en suspension et la polymérisation radicalaire en masse. Pour empêcher la polymérisation à basse température, lors de stockage et du transport du styrène liquide, le monomère est stabilisé avec des inhibiteurs tels que le 4-tert-butylcatechol [16].

II.1.4.Forme de polystyrène

Il existe trois formes de polystyrène : PS standard (cristal), le PS choc et le PS expansé(PSE).

a) Polystyrène standard (cristal)

Le polystyrène standard communément appelé polystyrène cristal à cause de sa transparence qui résulte de la polymérisation du styrène sous l'action de catalyseurs.il est caractérisé par sa rigidité et sa fragilité [17].

Ce PS est également appelé le polystyrène d'utilisations général (général purpose polystyrène (GPPS)) ou bien le polystyrène rigide (PSR). C'est un polystyrène amorphe, transparent, brillant, rigide, cassant et pouvant être coloré.il est souvent appelé PS cristal à cause de son aspect transparent. C'est le premier PS obtenu à la polymérisation. Toutes les autres formes du polystyrène sont obtenues par modification de celui-ci. Le PS cristal peut également être façonné par injection et des pièces moulées. Comme les gobelets transparents des boîtiers de digital versatile disc(DVD)[16].



Figure II. 3 : photo Polystyrène cristal.

b) Polystyrène choc

Le polystyrène choc : Selon le niveau de résistance au choc, lui-même lie à la teneur en

Polybutadiène introduit lors de la fabrication, on définit : Le polystyrène demi-choc, le polystyrène choc, le polystyrène super choc [18].



Figure II. 4: Photos polystyrène choc.

c) Le polystyrène expansé

Le polystyrène expansé Il existe deux types de PSE : les polystyrènes expansés moulés (PSE-M) et les polystyrènes expansés extrudés (PSE-E).

Le **PSE-M** est obtenu à partir d'un polystyrène "expansible" qui n'est rien d'autre qu'un polystyrène cristal auquel on a ajouté, en cours de polymérisation, un agent d'expansion (pentane, Ebullition = 35°C). Une pré-expansion est opérée à la vapeur d'eau puis une période de stabilisation permet aux perles de PS pré-expansées de perdre leur excédent d'eau. Enfin, dans un moule, on les expansé et on les moule à la vapeur [19].

Le **PSE-E** est quant à lui obtenu lors de l'extrusion (mise en forme à la chaleur) par injection sous pression d'un gaz (les HCFC ont été remplacés par le pentane) dans le polymère cristal fondu. L'utilisation des catalyseurs métallocènes permet l'élaboration d'un PS syndiotactique permettant des applications techniques. Ce PS syndiotactique appelé SPS, est un plastique technique doté d'une résistance thermique accrue (point de fusion = 270°C) et d'une résistance chimique élevée. Il trouve des applications dans l'électronique, les équipements électriques et l'automobile [19].



Figure II. 5: Photos PS expansé.

II.1.5. Propriétés du polystyrène

- Polystyrène est un thermoplastique amorphe, insipide, inodore, non toxique, transparente, claire ;
- Le polystyrène est le polymère obtenu par polymérisation des monomères de styrène ; C'est un matériau solide à 20°C et pâteux à 120°C, qui fond entre 150°C et 170°C. Il est inflammable et combustible, avec une température d'auto-inflammation d'environ 490°C ;
- Les polystyrènes possèdent de bonnes propriétés d'isolation électrique. Ils peuvent recevoir des additifs pour devenir antistatique ou conducteurs, ce sont de faibles conducteurs de chaleur ;
- Le polystyrène brûle et produit des fumées noires très denses, il dégage du CO, CO₂, et H₂O et coule en formant des gouttelettes ;
- Densité : 1,015; mais expansé, on divise sa densité par 10 ;
- Le polystyrène se soude à lui-même à la chaleur ou par dissolution partielle, suivie d'une légère pression ;
- Le polystyrène résiste mal à la lumière et très perméable aux gaz ;
- Aspect et toucher plutôt sec ; bruit « métallique » lorsqu'il tombe ;
- Sa température de transition vitreuse T_g est de 120° C et sa température de fusion de 110°C ;
- Bonne résistance aux chocs à basse température -40°C ;
- Résistance au choc : plutôt fragile ; de 0 à +80°C ; mais résistant si expansé ;
- Rigidité : parmi les plus rigides : Module de 3 GPa ;
- Le polystyrène est un thermoplastique semi-rigide ;
- Le PS peut être injecté en très fine épaisseur, on peut donc en faire de petites pièces ;
- Le polystyrène résiste bien aux acides faibles, bases, alcools, gras, huiles, graisses, cires, mais il est attaqué par les carbures aromatiques chlorés ou non, esters, éthers, cétone, acides forts, eau de chlore ou de brome, acide acétique, essences.
- Vieillessement : Une exposition prolongée à l'extérieur provoque l'oxydation de ces polymères. Leur couche superficielle devient jaunâtre et s'effrite l'incorporation d'agent protecteur ou la coloration permet d'améliorer la résistance au vieillissement [16].
- Ses excellentes propriétés mécaniques (résistance en compression, capacité d'amortissement des chocs),
- Son insensibilité de mise en forme (moulage, découpage, ...) ;
- Absorption d'eau : le polystyrène absorbe un peu d'eau 2% ;
- Et enfin, il est possible de le recycler [20].

II.1.6. Les applications

Les propriétés de polystyrène PS et son faible cout d'achets permettant son utilisation dans de nombreuses applications et dans différents secteurs, parmi Les principales utilisations du polystyrène dans les vies courantes sont :

- Les boitiers de CD et PS cristal ;
- Les couverts et verres en plastique en PS choc ;
- Les emballages alimentaires (comme les pots de yaourt) ;
- Les emballages des appareils fragiles en PSE ;
- Isolation thermique des bâtiments sous forme expansé ou extrudée ;
- Isolation phonique des bâtisses : les plaques de polystyrène limitent le passage des bruits de l'extérieur vers l'intérieur ou vice versa[21].

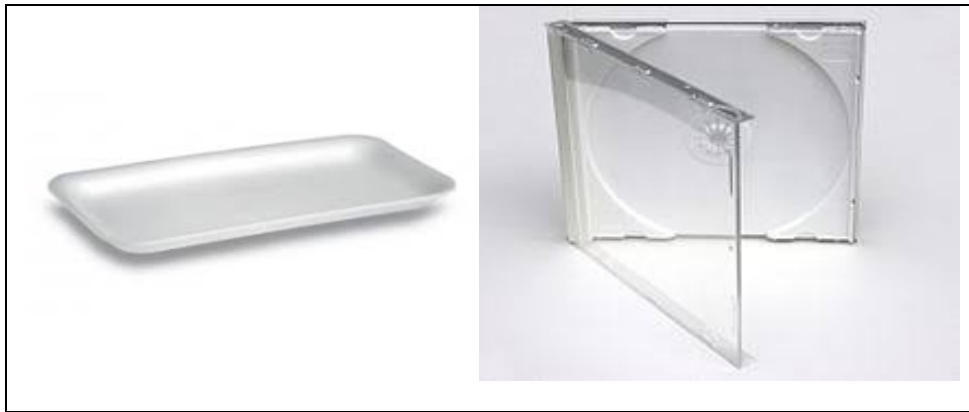


Figure II. 6: Les boitiers de CD, et les emballages alimentaires.

II.1.7. Le polystyrène expansé

II.1.7.1. Introduction

Le polystyrène expansé est un isolant synthétique à faible coût qui peut être utilisé pour tout type d'isolation. Il est principalement utilisé lorsqu'on manque de place (fort pouvoir isolant), ou pour l'isolation extérieure des murs (résistance aux intempéries) et des planchers (résistance à la compression), Le P.S.E. est aussi employé dans le domaine de l'emballage, ce qui fait appel à ses caractéristiques vis à vis des phénomènes de chocs [22].

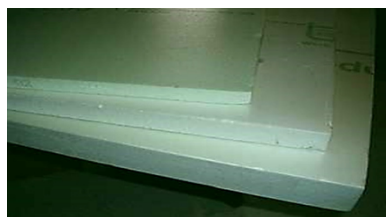


Figure II. 7: Les plaques de polystyrène.

II.1.7.2.Fabrication de PSE

Le polystyrène expansé (PSE) est obtenu à partir d'un mélange de polystyrène et de gaz, qui donne un matériau léger de couleur blanche. Il est utilisé comme isolant thermique ou phonique. Il s'agit d'un isolant léger, rigide et à cellules fermées. Le polystyrène expansé est disponible en plusieurs résistances à la compression pour résister aux charges et aux forces de remblaiement. Cette structure à cellules fermées assure une absorption d'eau minimale et une faible permanence de la vapeur. Le processus industriel se décompose en différentes étapes et ne nécessite que très peu d'énergie [22].

a) **Polymérisation** : Le procédé de polymérisation en suspension dans l'eau est employé pour la polymérisation du PSE. Le styrène monomère (C_8H_8) (Figure II.8) est dispersé en fines gouttelettes dans l'eau.

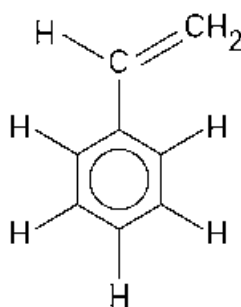


Figure II. 8: la formule développée du monomère de styrène.

Les initiateurs radicalaires de polymérisation sont essentiellement Des peroxydes organiques (peroxyde de benzoyle) qui doivent être solubles dans le styrène monomère et insolubles dans l'eau. La taille des gouttelettes peut être ajustée par de nombreux paramètres comme l'addition d'un agent protecteur qui permet de stabiliser la suspension, comme les conditions de mélange, la forme du réacteur, etc. On peut éventuellement incorporer un système ignifugeant. La réaction s'opère selon un procédé discontinu dans un réacteur muni d'un agitateur et équipé d'une double enveloppe permettant par chauffage ou par refroidissement, de réguler la température interne du réacteur. L'ensemble de la réaction est représenté sur la figure II.9[23].

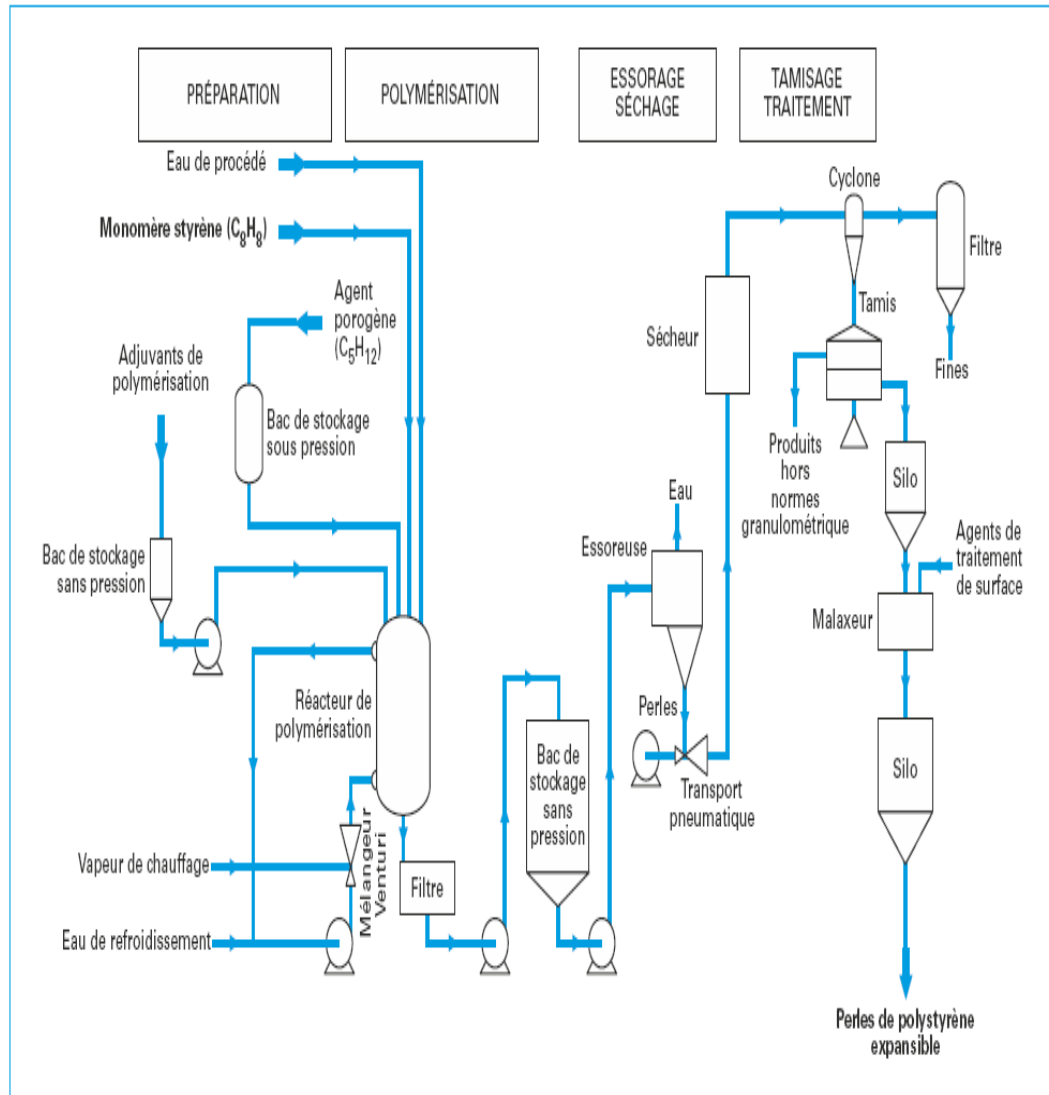


Figure II. 9: unité de fabrication de polystyrène expansible.

La réaction exothermique se développe suivant un programme de température défini et, lorsqu'un certain taux de conversion est atteint, l'agent d'expansion est introduit sous pression, généralement du pentane (C_5H_{12} : $H_3C(CH_2)_3-CH_3$). Des mélanges de butane sont utilisés au Japon.

La durée de ces opérations est d'environ 10 h.

Ces opérations terminées, le mélange obtenu, constitué de billes sphériques de polystyrène expansible et d'eau, est refroidi et envoyé dans des cuves de stockage intermédiaire. Le diamètre de ces perles varie entre 0,2 mm et 3 mm. La formule du motif du PSE est donnée sur la figure II.10[23].

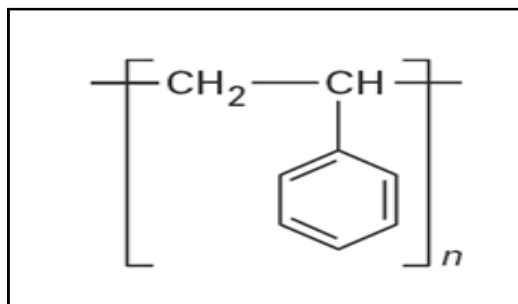


Figure II. 10: Motif du polystyrène expansé.

La masse moléculaire relative des perles de polystyrène expansible (M_r) est comprise entre 160 000 et 260 000. Ces perles contiennent de 3 à 8 % d'agent d'expansion.

b) Traitement de finition : Le mélange précédent est ensuite essoré pour séparer l'eau des perles et un séchage est alors réalisé. Il existe une certaine dispersion dans le diamètre des perles obtenues. Un tamisage permet d'obtenir différentes coupes granulométriques destinées à différentes applications. Ces différentes coupes granulométriques reçoivent un traitement de surface destiné à optimiser leur mise en œuvre. C'est un enrobage par divers stéarates (organiques ou métalliques) [23].

Après un stockage intermédiaire en silos, les produits sont conditionnés en conteneur carton d'une tonne ou bien en fûts métalliques.

Le produit doit être conservé à une température modérée ($T \leq 20^\circ\text{C}$); la durée de conservation est limitée :

- à 1 mois pour le stockage en conteneur carton ;
- à 6 mois pour le stockage en fûts métalliques.

En effet, le pentane diffuse lentement à l'extérieur des emballages

Et les performances d'expansibilité du produit se dégradent

Dans le temps [23].

II.1.7.2.2. Production du polystyrène expansé PSE-M à partir du polystyrène expansible

Le polystyrène expansé est obtenu à partir du polystyrène expansible après trois étapes de fabrication :

A) **Pré-expansion :** Le polystyrène expansible est introduit dans une cuve en inox. L'opération consiste à chauffer les perles par de la vapeur d'eau. Il se produit un ramollissement de la matrice polystyrène vers 90°C et une augmentation de la pression de l'agent d'expansion (appelé encore agent porogène) qui se trouve au-dessus de sa température normale d'ébullition (pour le pentane technique, $= 35^\circ\text{C}$).

Ces deux phénomènes simultanés provoquent l'expansion des perles. La figure II.11 représente l'évolution de la masse volumique apparente des perles en fonction du temps de séjour dans le pré-expandeur[23].

La masse volumique minimale atteinte est variable selon les produits. Elle dépend de facteurs comme :

- La taille initiale des perles ;
- La teneur en agent d'expansion ;
- La présence de certains adjuvants.

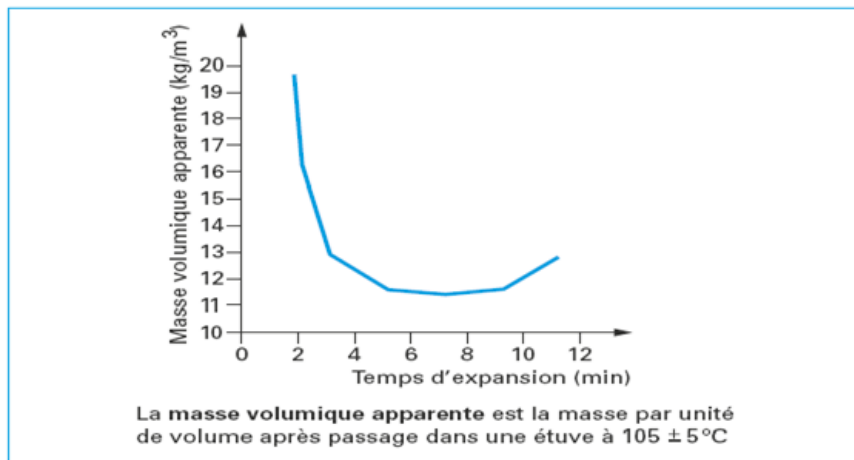


Figure II. 11: Courbe d'expansion de perles de PSE.

La courbe de la figure II.11. Cet affaissement est dû à une chute de la pression interne dans la perle, conséquence d'une diffusion trop importante de l'agent d'expansion à l'extérieur de la perle [23].

Les appareils utilisés sont en acier inoxydable (figure II.12)



Figure II. 12: Pré-expansion.

b) Maturation (stabilisation à l'air) et le stockage

En sortie du pré-expandeur, une phase de séchage et de stabilisation à l'air est nécessaire en silos de toile perméable à l'air, afin de permettre la finalisation des échanges gazeux, de ramener les perles à la température ambiante et d'éliminer l'excédent d'eau [24].



Figure II. 13: Le stockage du polystyrène Dans les Silos.

C) Expansion et moulage

Après cette phase de stabilisation, une seconde expansion à la vapeur d'eau dans un moule fermé va de nouveau venir dilater les perles jusqu'à 50 fois leur volume initial. Elles occupent alors tout l'espace du moule et se soudent entre elles naturellement sans aucun adjuvant [24].



Figure II. 14: Moule à bloc.

- Mesure du poids des blocs par une balance.
- Quitter le bloc pour se repos
- Réglage de la vitesse de la machine (la découpe).
- La découpe : La découpe est effectuée pour transformer ces gros blocs de plusieurs mètres de haut en panneau de 120 cm sur 60 cm avec une épaisseur allant en général de 2 à 30 cm. Elle peut réaliser une découpe horizontale, une découpe verticale et une découpe en bloc [25].



Figure II. 15 : Unité de découpage.

-Recyclage par broyage : les chutes ou les déchets de PSE doivent être stockés dans des zones bien ventilées avant d'être réutilisés, recyclés ou éliminés.

-Extrusion en matière recyclée. Produits finis en attente de livraison.



Figure II. 16 : Produit fini.

-Transport et livraison.

-Personnalisation des produits.

II.1.7.3. Les propriétés du Polystyrène expansé

Les propriétés les plus remarquables du polystyrène expansé sont :

- Sa faible masse volumique ;
- Son pouvoir isolant thermique ;
- Bon rapport résistance/légèreté : 98 % d'air, 2 % de produit ;
- Ses excellentes propriétés mécaniques (résistance en compression, capacité d'amortissement des chocs) ;

- Son insensibilité à l'eau ;
- Sa facilité de mise en forme (moulage, découpage) ;
- Stabilité aux intempéries, neutralité pour l'environnement ;
- Sarecyclabilité[23].

II.1.7.4. Polystyrène expansé et environnement

Le polystyrène expansé, que l'on appelle aussi PSE, dispose de Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDE&S), et de certificats délivrés par l'ACERMI et le CSTB. Par ailleurs, l'étude thermique et l'étude d'impact environnemental identifient clairement le polystyrène expansé comme matériau d'isolation pouvant être utilisé dans un projet de construction environnemental.[26].

- La préservation d'une ressource naturelle :
- Le PSE contribue de manière significative à l'amélioration de l'environnement. En effet, il utilise uniquement de la vapeur d'eau pour la transformation du polystyrène expansible. **Peu consommateur en matière première**, il contribue à sauvegarder les ressources naturelles. Il préserve la couche d'ozone car il ne contient **aucun gaz destructeur** tels que les CFC, HCFC ou HFC. Composé de 98 % d'air, il ne nécessite que très peu d'énergie pour sa production et son utilisation permette d'en économiser de manière significative. Il favorise ainsi la réduction des émissions de gaz à effet de serre[26].

II.1.7.5. Le recyclable du polystyrène

Le polystyrène peut théoriquement être recyclé sans problème. Même si la loi limite sa réutilisation dans le domaine de l'alimentaire, le polystyrène utilisé pour Fabriquer des plateaux, des tasses, des boîtes à œufs, des contenants de mets à emporter transparents ou des ustensiles peut être recyclé. Il existe certaines entreprises qui recyclent actuellement cette matière bien que celle-ci doit souvent être propre. Ce volet sera approfondi plus loin.

Sous **forme expansée**, un emballage usagé peut être réintroduit en production après broyage (séparation mécanique des billes) pour obtenir soit de nouveaux emballages PSE soit des blocs et plaques PSE pour les marchés du bâtiment.

Il peut également servir à la production de bétons allégés destinés aux marchés

De la construction ou en génie civil. Il est aussi utilisé comme protection de drain en agriculture ou en allègement des sols horticoles.

Sous **forme extrudée** (non expansée), après recyclage, il se présente alors sous forme de granules de polystyrène réutilisés comme matière première dans de multiples applications de

produits manufacturés en matière plastique tels que les coffrets de compact-discs, les boîtiers d'appareils photo jetables, le mobilier urbain, les accessoires de bureau et les bobines industrielles[19].

II.1.7.6. Les performances

II.1.7.6.1. La performance mécanique

Le polystyrène expansé offre une excellente performance Mécanique. Pour preuve, il peut être utilisé comme isolant sous Dallage d'une maison individuelle et de bâtiments industriels Devant recevoir de fortes charges.

La performance mécanique d'un matériau se caractérise en trois points :

- l'incompressibilité : le matériau résiste à de fortes charges ;
- la stabilité dimensionnelle : le matériau ne se déforme pas Sous l'action de l'humidité ;
- la cohésion : le matériau ne se décompose pas ;

Grâce à sa micro structure à l'intérieur d'une charpente tridimensionnelle de type "nid d'abeilles", le PSE est très léger et offre une excellente résistance mécanique.

II.1.7.6.2. La performance thermique

Aujourd'hui, quels que soient le système de chauffage et le type d'énergie utilisés, construire un logement confortable et de qualité implique une isolation thermique aussi performante que rentable. Isoler thermiquement un bâtiment (maison individuelle, logement collectif, établissement recevant du public, bâtiment tertiaire et industriel) en neuf ou en rénovation, consiste à limiter les déperditions de chaleur en installant un matériau isolant entre son enveloppe extérieure et celle intérieure. Ceci permet de réduire la quantité d'énergie requise pour le chauffer ou le climatiser [26].

Le lambda λ – conductivité thermique

Le lambda λ ou conductivité thermique d'un matériau, exprimé (en W/m.K), représente la capacité d'un matériau à conduire la chaleur. Le lambda est une caractéristique intrinsèque d'un isolant. Il sert à déterminer la résistance thermique (R) d'une épaisseur donnée. Plus la

Valeur λ d'un isolant est faible, plus il est performant.

II.1.8. La résistance thermique R

La résistance thermique R, exprimée en ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$), caractérise la résistance d'un isolant aux Flux de chaleur. Elle dépend de la conductivité thermique (lambda λ) et de l'épaisseur (e) de

L'isolant selon la formule : e/λ (avec e exprimé en mètre). A épaisseur d'isolant égale, plus la conductivité thermique (λ) est faible, plus sa résistance thermique est forte et plus il est Performant. [26]

Applications :

Le polystyrène expansé s'utilise dans les bâtiments comme isolation thermique

- Isolation des murs ;
- Isolation intérieure entre mur et contre murette ;
- Isolation intégrée dans les éléments préfabriqués lourds ;
- Isolation par extérieur ;
- Isolation des toitures (plates et inclinées) ;

Isolation du sol [27].

Tableau II. 1 : Les valeurs de la conductivité des matériaux de construction

Conductivité des matériaux de construction		
Rang	Matériau	Conductivité W/mK
1	Polyuréthane	0,022
2	Fibre de bois SteicoTherm	0,04
3	PSE extrudé	0,04
4	Laine de verre	0,04
5	PSE expansé	0,04
6	Laine de roche	0,044
7	Liège	0,05
8	Béton cellulaire	0,09
9	Laine de bois	0,1
10	Panneau OSB	0,12
11	Bois Sapin	0,15
12	Plaque de plâtre	0,25
13	Plâtre carreaux	0,25
14	Bois Chêne	0,29
15	Brique pleine	0,74
16	Pierre	1,7
17	Béton plein	1,8
18	Acier	50
19	Aluminium	230
20	Cuivre	380

II.1.7.6.3. La performance acoustique

L'isolation acoustique est déterminante pour le confort des personnes et leur qualité de vie. Elle consiste à réduire la transmission des bruits entre des locaux différents ou entre l'extérieur et l'intérieur d'un bâtiment. Ceux-ci proviennent de différents types de nuisances et se classent en 2 catégories :

- Bruits aériens (paroles, télévision, musique, circulation routière et avions...)
- Bruits d'impact (chocs sur la paroi, marche...)[26].



Figure II. 17 : Image sur l'isolation acoustique d'une maison.

II.1.8. L'Utilisation du polystyrène en Algérie

L'utilisation du polystyrène dans le secteur du bâtiment est encore timide dans notre pays, il est disponible en plaque d'isolation acoustique et thermique. Ce matériau innovant peut aussi être introduire à la formulation du béton pour former des « **placo-styrènes** », dix fois plus légers et trente fois plus isolants et tout aussi résistants que le béton traditionnel.

L'Algérie est un pays chaud en été les constructions ont besoin de matériaux d'isolation thermique. Le polystyrène expansé c'est un matériau climatiseur, qui absorbe le surplus de chaleur pendant la journée, en été. Il offre un espace sec et confortable : il élimine l'humidité qui peut se condenser sur les murs. [28].

Actuellement sur le marché des matériaux de construction, il existe des mortiers et des bétons légers prêt à l'emploi, qui préparent au niveau des usines telles que (EDILITCO : boîte française de production des produits « POLYS BETO » dont la fiche technique des produits sont mentionnée en annexe.

II.1.9. L'utilisation de l'additifs polystyrène dans les mortiers légers et béton léger

II.1.9.1. Béton léger

II.1.9.1.1. Introduction

La masse volumique des bétons traditionnels est de 2200 à 2300 kg/m³. Elle peut être abaissée, notamment par l'adjonction de matériaux plastiques expansés tels que des billes de Polystyrène expansé. Les bétons obtenus présentent alors de meilleures propriétés d'isolation Thermique et acoustique et pourraient avoir des applications intéressantes dans le domaine du Bâtiment [29].

En outre, grâce à l'emploi des matrices cimentaires à ultra haute résistance, ces bétons de polystyrène peuvent avoir des résistances de bétons de structure. Par conséquent, ils représentent, grâce à leur légèreté, une solution technique intéressante pour les domaines du bâtiment, des ouvrages d'art et d'offshore. Par ailleurs, les bétons légers de polystyrène ont 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 [29].

II.1.9.1.2. Composition des bétons léger de polystyrène expansé

Le béton de polystyrène est un béton à granulats légers. Il est généralement constitué de billes de polystyrène mélangées à une matrice à base de pâte de ciment, ou à base de mortier. Parfois, pour un critère d'allègement, le polystyrène est utilisé dans les bétons traditionnels en remplaçant une partie des granulats ordinaires par des billes de polystyrène.

II.1.9.1.3.. Béton léger a base de polystyrène non traité

Plusieurs recherches ont été effectuées sur des essais d'incorporation du polystyrène normal dans le béton. Nous pouvons constater que : Si nous mélangeons le polystyrène non traité normal avec le ciment et l'eau :

- Le polystyrène revient à la surface du béton et flottera.
- Le ciment tombe au fond à cause de la différence de densité entre le polystyrène expansé et le ciment. Cependant on peut réduire le phénomène "du retour à la surface par flottement du polystyrène", en employant des équipements spécifiques et si le béton est très épais (avec une petite quantité d'eau). Et aussi en employant du polystyrène perméable, car les alvéoles du polystyrène normal seront remplis d'eau pour réduire la différence de densité dans le mélange "eau /ciment/polystyrène".

Mais malgré cela, l'utilisation de cette sorte de béton aura des inconvénients

- Il y aura des difficultés d'obtention d'une homogénéité du matériau, en employant l'équipement traditionnel pour faire le béton ;
- Difficulté de pomper ou de vibrer le béton ;
- Constatation d'aucune résistance au feu.

D'où les conséquences négatives suivantes :

- Le béton contiendra une quantité d'eau ;
- Résistance à la compression faible ;
- Pas économique : car il y aura une grande consommation de polystyrène pour alléger le béton à cause des 5 à 30 % des alvéoles du polystyrène qui seront remplis d'eau et de ciment ;

- L'eau contenue dans le béton produira des germes et donnera de mauvaises odeurs dans le polystyrène ainsi que dans le béton ; particulièrement dans des climats chauds et humides ou dans des pièces humides comme la salle de bains ou la cuisine.
- Délai trop grand de séchage pour le béton
- Retrait important du béton dû à la grande quantité d'eau évacuée
- Possibilité d'employer des renforts d'acier écartée parce qu'ils seraient attaqués par la corrosion (à cause de l'eau contenue dans les alvéoles du polystyrène).

En conclusion l'emploi du polystyrène normal dans le béton a une pauvre image de fragilité, pour minimiser ces problèmes nos doivent traiter ces billes de polystyrène de façons d'améliorer ces caractéristiques. En Algérie la société IBERCONSTRUCTION traite les billes de polystyrène qui sont fabriquées à l'usine ENL sise à la zone industrielle d'Oued Smar Alger pour obtenir le produit **POLYS BETO** [28].



Figure II. 18 : Polystyrène non traité.

. II.1.9.1.4. Béton léger à base de polystyrène traité

A) POLYS BETO

Le granulat POLYS BÉTO® est une bille de polystyrène vierge expansé à granulométrie contrôlée, enrobée d'un adjuvant, il remplace totalement ou partiellement le sable et le gravier traditionnellement utilisés dans la confection des mortiers et bétons. Les chapes, mortiers et bétons légers élaborés avec le POLYS BÉTO® possèdent de bonnes propriétés isolantes, destinés à réaliser tous supports de revêtement de sol, chapes, ravaillages isolants et sous-chapes, rattrapages de niveaux, formes de pentes, isolation thermique et acoustique aux bruits de chocs, remplissages divers... Nos granulats sont expansés et traités dans nos usines. Ils ne peuvent pas contenir de polystyrène recyclé, des déchets de polystyrène ou autres agrégats organiques ou artificiels. [30].



Figure II. 19 : Photo sac en Polys béton.

Les avantages du POLYS BETO sont qu'il est utilisable avec tous les types de ciment, et avec tous les types de granulats naturels.

Le béton est homogène et est réalisé avec les mêmes règles que celles du béton traditionnel et on peut le mixer avec des équipements classiques.

Le béton transporté par camion est facile à pomper.

Peu de perles de Polys Béto seront séparées par des micros bulle aériennes :

- Aucun alvéole ne sera rempli d'eau pour réduire la différence de densité entre le mélange Eau / Ciment et le polystyrène d'où une résistance au feu MO et à la fumée FO ; au contact du feu les perles produiront moins de fumée que les perles normales non traitées ;
- Moins d'eau contenue dans le béton ;
- Polys béton peut alléger tout type de béton de 3 à 80 % selon son taux d'incorporation ;
- Résistance à la compression plus élevée ;
- Polys Béto est économique parce que les petites quantités de Polys Béto sont suffisantes pour alléger le béton : les alvéoles du Polys Béto ne seront remplis ni d'eau ni de ciment ;
- Aucun microbe ni germe n'est détecté, ainsi qu'aucune odeur ;
- Durée courte de séchage pour le béton ;
- Aucune corrosion des renforts d'acier ;
- Retrait très faible[31].

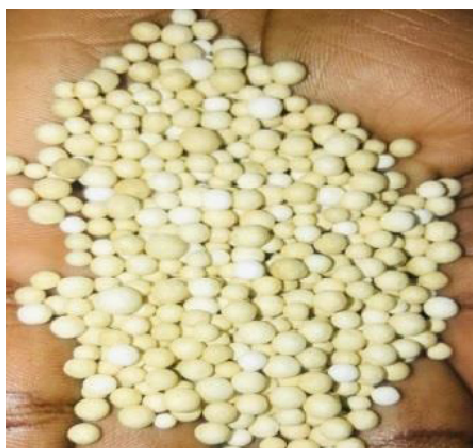


Figure II. 20 : Photo de Polystyrène traité.

B) POLITERM®

Le granulat POLITERM® est l'élément essentiel de toute notre gamme sols, c'est une bille de polystyrène vierge expansé à granulométrie contrôlée, enrobée de l'adjuvant breveté EIA, spécialement conçu et développé dans notre laboratoire. Les mortiers et bétons légers élaborés avec le POLITERM® possèdent de bonnes propriétés isolantes, destinés à réaliser tous supports de revêtement de sol, chapes, ravaillages isolants et sous-chapes, rattrapages de niveaux, formes de pentes, isolation thermique et acoustique aux bruits de chocs, remplissages divers... Nos granulats sont expansés et traités dans nos usines ; ils ne peuvent en aucun cas contenir de polystyrène recyclé, déchet de polystyrène ou autre agrégat organique ou artificiel[30].

Propriété de POLITERM

Les propriétés les plus remarquables :

- Masse volumique : 200 kg/m^3 ;
- Conductivité thermique : $0,066 \text{ W/mK}$;
- Réaction au feu (NF EN 13501) : A2 - s1, d0 ;
- Température d'application : $+ 5 \text{ }^\circ\text{C}$ et $+ 30 \text{ }^\circ\text{C}$;
- Affaiblissement acoustique aux bruits de chocs : $\Delta L_w 19 \text{ dB}$ (Rapport d'essais FCBA).
- Épaisseur minimum : $3 \text{ cm} / 5 \text{ cm}$
- Épaisseur maximum : Pas de limite.
- Température d'application : $+ 5 \text{ }^\circ\text{C}$ et $+ 30 \text{ }^\circ\text{C}$.



Figure II. 21 : Photo de sac de POLITERM®.

b. mortier léger : Exemple d'un mortier léger prêt à l'emploi isolant et fibré 700 kg/m^3 .

1. Définition

MAXX+® est un mortier léger en sac prêt à l'emploi, allégé par des billes de polystyrène vierge expansé à granulométrie contrôlée et enrobées de l'adjuvant E.I.A. (diamètre 4-6 mm).

MAXX+® est fibré et possède de bonnes propriétés isolantes [32].



Figure II. 22 : Mortier léger en sac.

2. Applications

Le mortier léger MAXX+® est destiné à alléger les structures (gain de poids d'environ 70 % par rapport à des bétons traditionnels), à isoler et à traiter thermiquement et acoustiquement les différents types de supports existants dans les immeubles collectifs et les maisons individuelles en travaux neufs ou de rénovation, à réaliser tous supports de revêtement de sol, voiries isolantes et sous-chapes, rattrapages de niveaux, formes de pentes, isolation thermique et acoustique aux bruits de chocs [32].



Figure II. 23 : Mortier léger.

3. Avantages

- Collage direct du carrelage après 96 heures, sans ragréage.
- Léger : 700 kg/m³.
- Sac prêt à l'emploi de 45 litres.
- Fibré = suppression du treillis antifissuration.
- PomPable sur de longues distances et à grande hauteur.
- Complément d'isolation thermique.
- Mise en œuvre simple et facile.
- Compatible avec tous les revêtements (cf. tableau de revêtement)
- Stable dans le temps.
- Qualité constante du mélange tout au long du chantier [32].

Conclusion

Les bétons légers de polystyrène, possède un poids inférieur à celui d'un béton traditionnel. Cette caractéristique rend ce béton très utile dans la réalisation de structures plus légères. C'est également un bon isolant thermique et phonique.

Chapitre III : Travaux de recherches

III.1. Le premier article

Dans les travaux de FuatKoksal, EmrahMutluay et Osman Gencel (2020), sur l'effet de la vermiculite expansée et du polystyrène expansé résiduel sur les propriétés du mortier.

La vermiculite et les déchets de polystyrène en tant qu'agrégats dans le mortier offrent une opportunité de réduire le poids unitaire et le coefficient de conductivité thermique qui sont importants pour l'isolation thermique.

Cinq des rapports de (vermiculite + polystyrène) / (ciment) égal a3, 4, 5, 6 et 7, en volume ont été utilisés pour élaborer des mortiers. Dans chaque 100% de vermiculite et 100% de polystyrène en volume ont été étudiés en plus de leur combinaison à 25%, 50% et 75%. Au total, 25 mortiers de 4 *4* 16 cm³ ont été confectionnés pour évaluer leur propriétés mécaniques et thermiques[33].

III.1.2. Matériels et méthodes

CimentLe raccord CEM I 42.5R conforme à la norme TS EN 197-1 a été obtenu auprès de YozgatCimenterie, Yozgat, Turquie. La gravité spécifique du ciment est 3.1.

Vermiculite expansée

La vermiculite expansée a été obtenue sur le terrain à Sivas, Turquie, le tableau suivant résume la composition minéralogique de la vermiculite utilisée dans le travail expérimental.

Tableau III. 1 : Composition de vermiculite expansée (poids%).

SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Perte au feu
36.2	18.2	2.3	0.2	3.7	17.1	12.1	1.9	8.1

La figure suivante montre la structure de la vermiculite obtenue par l'analyse d'images MEB.

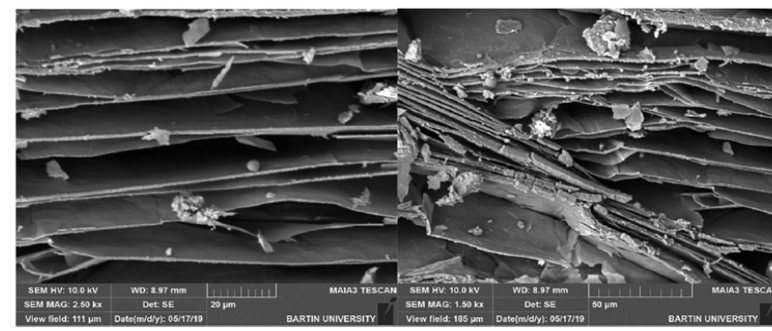


Figure III. 1 : Structure de la vermiculite.

Déchets de mousse de polystyrène en poudre

Le PSE a une porosité de 98%, ce qui est assez élevé. Les déchets PSE et sa structure sont illustrées à la Fig. 3. Diamètre des particules de déchets PSE était de 0 à 3 mm.

Le diamètre des pores de PSE était généralement d'environ 50 um niveau.

La densité apparente de PSE résiduel était de 0,019 g / cm³(figure III.2).



Figure III. 2 :Déchets de poudre de polystyrène expansé et sa microstructure.

Mélange et conception

Composites de mortier contenant du ciment, de la vermiculite expansée et des déchets PSE ont été produits. Le rapport Ciment (C) a été utilisé comme 300 kg/m³ dans tous les mélanges.

Les variations des proportions du mélange sont données dans le tableau 3.

Tableau III. 2 :Les variations des proportions du mélange (EV+WPSE+C).

Mix Code	(EV+WPSE)/C (en volume), %	EV/(EV+WPSE) (en volume), %	WPSE / (EV + WEPS) (en volume),%	Ciment (g)	EV (g)	WPSE (g)	Eau (g)
A1	3	0	100	300	0	900	358
A2	3	25	75	300	225	675	648
A3	3	50	50	300	450	450	770
A4	3	75	25	300	675	225	876
A5	3	100	0	300	900	0	658
B1	4	0	100	300	0	1200	707
B2	4	25	75	300	300	900	887
B3	4	50	50	300	600	600	974
B4	4	75	25	300	900	300	766
B5	4	100	0	300	1200	0	844
C1	5	0	100	300	0	1500	502
C2	5	25	75	300	375	1125	498
C3	5	50	50	300	750	750	808
C4	5	75	25	300	1125	375	764
C5	5	100	0	300	1500	0	1074
D1	6	0	100	300	0	1800	626
D2	6	25	75	300	450	1350	660
D3	6	50	50	300	900	900	772
D4	6	75	25	300	1350	450	1042
D5	6	100	0	300	1800	0	1056
E1	7	0	100	300	0	2100	502
E2	7	25	75	300	525	1575	592
E3	7	50	50	300	1050	1050	790
E4	7	75	25	300	1575	525	736
E5	7	100	0	300	2100	0	936

Préparation des mortiers

Un mélangeur à casserole d'une capacité de 56 dm³ a été utilisé dans la production des mortiers. Tout d'abord, la vermiculite a été mélangée à la moitié du mélange total de l'eau

pour empêcher la vermiculite d'absorber rapidement l'eau de mélange. Deuxièmement, la vermiculite expansée et les déchets d'EPS ont été mélangés pendant 1 min.

Troisièmement, du ciment a été ajouté. Après l'addition du ciment, le reste de l'eau de mélange a été ajoutée au mélange. Tous les lots étaient mélangés pendant 5 min. Et puis du mortier frais a été coulé $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ et $20 \times 160 \times 160 \text{ mm}^3$ moules de taille 160 mm. Après la fonderie, les mortiers frais moulés ont été laissés en laboratoire à 21°C pendant 24 h. Les échantillons de mortier ont été recouverts d'une feuille humide. Après 24 h, les éprouvettes de mortier durci ont été retirés des moules et conservées dans l'eau pour durcir jusqu'au jour du test [33].

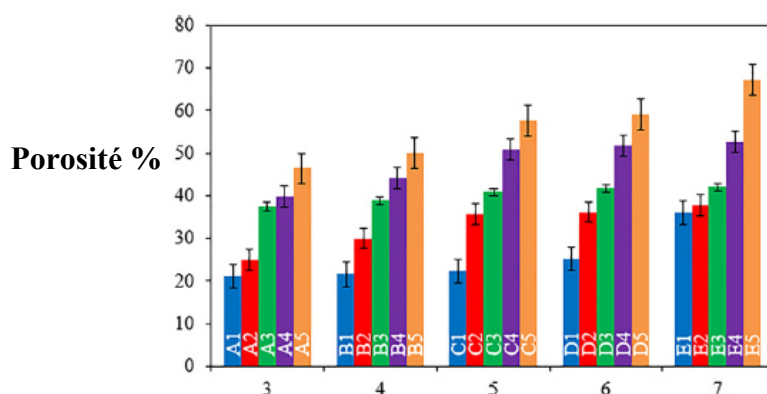
III.1.3. Résultats et discussion

Unité de poids

Le Polystyrène et vermiculite, sont utilisés pour diminuer le poids unitaire, ce qui induit à obtenir une structure poreuse élevée due au polystyrène et à la vermiculite.

Porosité apparente

-Les porosités des mortiers varient entre 21,1% et 67,2%, expliquer par la présence de la vermiculite et du polystyrène utilisée, qui évolue proportionnellement avec l'augmentation du pourcentage de additions. Cette porosité est affectée aussi par la pâte de ciment, cette dernière ne comble pas les pores à l'intérieur du polystyrène alors qu'elle se remplit en partie et ferme les pores entre les flocons de vermiculite en raison de l'hydratation du ciment.



(Vermiculite + polystyrène) / (Ciment) en volume

Figure III. 3 : Variations de porosité des mortiers.

Absorption de l'eau

Les variations d'absorption d'eau des éprouvettes de mortier légers produites sont présentées dans la figure III. 4. Les valeurs varient entre 25,6 % et 122,5 %, l'absorption augmente (tout en augmentant le rapport (Vermiculite + polystyrène) / (Ciment)).

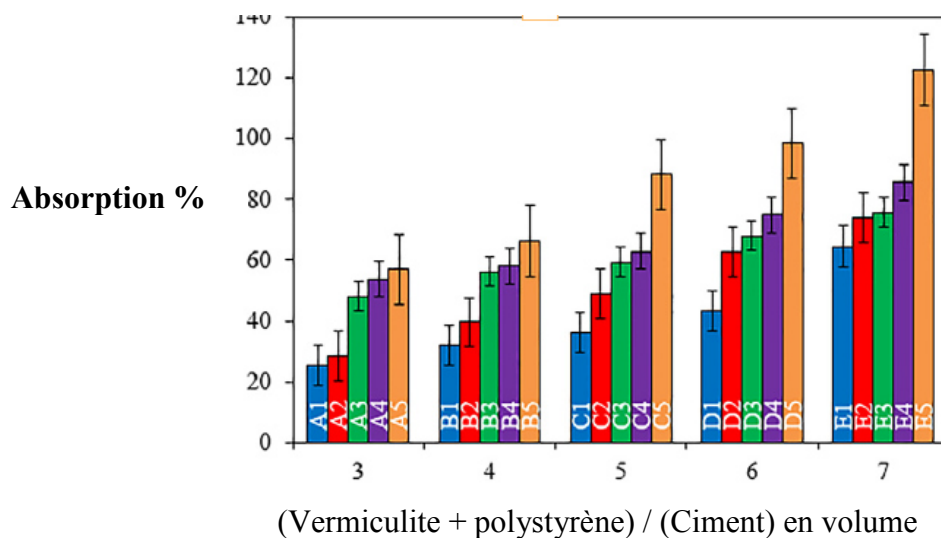


Figure III. 4 : Variations d'absorption d'eau des mortiers.

- L'augmentation de l'absorption augmente en fonction de l'augmentation de la porosité présente dans les éprouvettes, qui évolue aussi en fonction du taux de vermicule et du polystyrène.

Résistance à la compression

Les résistances à la compression des éprouvettes de mortier légers sont illustrées par la Fig. III.5, qui varient entre 0,57 et 5,89 MPa selon la composition, l'utilisation de ces agrégats entraînent une grande porosité dans les éprouvettes de mortier étudiées, ce qui explique la chute des résistances mécaniques.

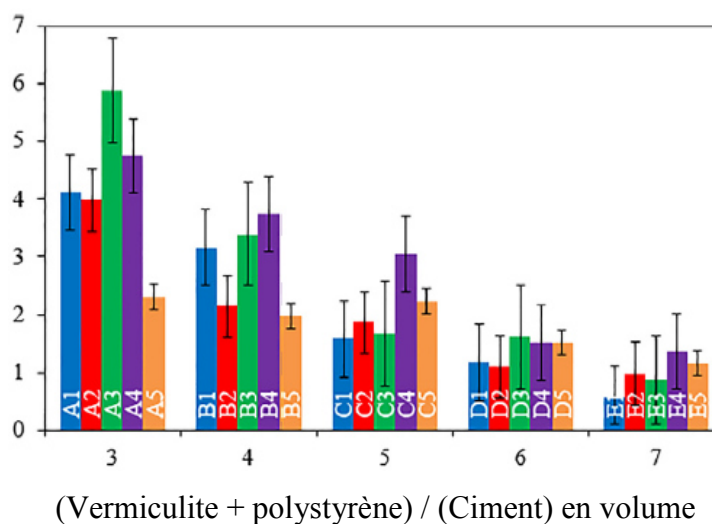


Figure III. 5 : Variations de résistance à la compression des mortiers.

Conductivité thermique

Les valeurs de conductivité thermique sont données sur la figure III.6, la conductivité thermique diminue lorsque le rapport ((vermiculite + polystyrène) / ciment augmente), qui varie entre 0,09 et 0,445 W / mK.

Les éprouvettes des composites de mortier dont le polystyrène présente un coefficient de conductivité thermique meilleur ou plus faible que ceux des mortiers composites élaborés avec

la vermiculite, cela est expliqué par la microstructure alvéolaire fermée du polystyrène, tandis que la vermiculite a une forme de flocons, la conductivité thermique plus faible entraîne une augmentation des performances thermiques du matériau, donnant ainsi une meilleure isolation thermique au matériau.

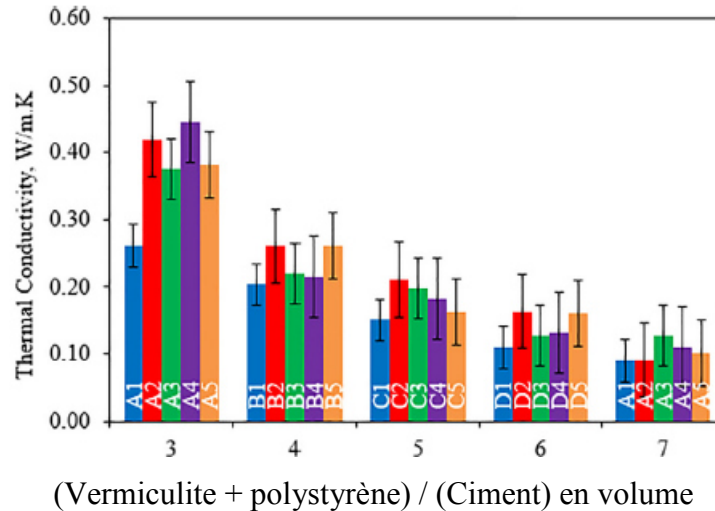


Figure III. 6 : Variations de conductivité thermique des mortiers.

III.1.3. Conclusion

Dans cette étude, les effets de la vermiculite expansée et des déchets de polystyrène et aussi leur effet combiné sur les propriétés du mortier à base de ciment ont été étudiés, les principales conclusions tirées sont :

- La masse volumique est affectée par le rapport ((vermiculite + polystyrène) / ciment).
- La porosité augmente à près de 70% lorsque le taux ((vermiculite + polystyrène) / ciment) augmente.
- La porosité semble le paramètre le plus important affectant de nombreuses caractéristiques des mortiers. Il existe une forte corrélation entre la porosité et la masse volumique, résistance à la compression et conductivité thermique.
- Les particules de ciment ont pour effet de combler le vide de la vermiculite due à l'hydratation du ciment alors qu'il n'y a pas un tel effet pour le polystyrène.
- Sans augmentation de la pâte de ciment dans la composition du mortier tout en augmentant la vermiculite et le polystyrène la résistance à la compression du mortier diminue de manière significative à cause de la mauvaise adhérence avec la pâte de ciment, les mêmes remarques pour les résistances en flexion.
- Les mortiers avec de la vermiculite et du polystyrène peuvent être utilisés comme bon matériau d'isolation[33].

III.1.4. Discussion et critiques du travail

Le travail présenté, traite une possible utilisation combiner des déchets de polystyrène et la vermiculite dans l'élaboration des mortier légers, ce qui va répercuter positivement sur

Chapitre III : Travaux de recherches

l'environnement (élimination des déchets de polystyrène), et sur l'aspect économique des mortiers, avec la réduction du coût, ainsi le coût des projets, d'autre part d'un point de vue technique, l'introduction du polystyrène et de la vermiculite conduit à la réduction du poids, et donner une meilleure isolation thermique au matériau à cause de la porosité élevée.

Néanmoins, à l'échelle d'élaboration, la disposition ou l'emplacement des additifs utiliser tels que le polystyrène et la vermiculite n'est pris en considération, autrement dit la disposition des matières destinées pour l'allègement dans cas d'une disposition désirée soit sur l'axe du matériau ou sur les extrémités va influée sur les propriétés du matériau ? ce qui permettra de vérifier l'effet de la disposition du polystyrène dans les mortiers, notamment sur la porosité ouverte (en surface du matériau), qui peut être un paramètre qui accélère la dégradation du matériau, réduisant ainsi sa durée de vie, d'où la prise en compte de notre thématique.

III.2. Le deuxième article

Dans les travaux de AmritaMilling, Abrahams Mwasha et Hector Martin (2020), sur l'étude de l'exploration le remplacement complet du ciment par du polystyrène expansé (PSE) déchets dans les mortiers utilisés pour la construction de maçonnerie.

III.2.1. Introduction

Les impacts des déchets de PSE et l'augmentation exponentielle de son utilisation, la nécessité d'une gestion efficace des déchets est devenue impératif. Par conséquent, des intérêts se sont développés dans l'utilisation de Solution (PSE dissous) comme matériaux de construction.

Cette recherche explore une combinaison de résines PSE liquides, obtenues par dissolution de déchets PSE dans l'acétone et le sable tranchant pour produire un mortier pour remplacer les mortiers pour joindre les unités de maçonnerie.

Cette recherche explore les propriétés techniques fondamentales du mortier PSE, et vérifier si ces propriétés sont adaptées pour répondre aux exigences selon les codes du bâtiment américains et les normes d'essai [34].

III.2.2. Matériel et approche

Matériaux : Les matériaux utilisés dans cette étude [34] comprennent l'acétone, le polystyrène expansé, le sable, le ciment et briques.

Acétone

L'acétone est un solvant organique transparent, incolore et volatil qui se produit naturellement dans les plantes, l'acétone utilisé de qualité Baker 99,5%, à des fins de recherche et de fabrication est utilisée pour dissoudre l'PSE perles, avec une température d'ébullition de $56\text{ }^{\circ}\text{C}$, et densité de $0,792\text{ g / cm}^3$ ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Chapitre III : Travaux de recherches

Polystyrène expansé : Les perles EPS utilisées dans cette recherche sont de couleur blanche et de forme sphériques avec un diamètre compris entre 1,21 mm et 3,93 mm.

Le sable : Le sable de silice disponible dans le commerce est utilisé comme agrégats fins la granulométrie des agrégats variait de 0,075 mm à 5 mm.

Eau : Eau potable propre avec un pH de 7 conforme à la norme ASTM C1602 /C1602M est utilisé pour le mélange de ciment.

La brique : de dimension : $(200 \times 100 \times 60) \text{ mm}^3$, en béton.

Préparation des mélanges

Production de lisier PSE

La masse volumique des billes PSE est déterminée, puis dissoute dans solvant organique (acétone), dont 100 ml de billes EPS dans 3 ml d'acétone, la densité de la suspension était de $0,92 \text{ g / cm}^3$, cette procédure a été suivie pour la préparation de l'ensemble des mélanges.

Détermination du rapport optimal de mélange de mortier PSE

Cinq mélanges de pâte PSE avec du sable ont été préparés comme indiqué dans le tableau 2. Pour chaque mélange, 1200 g de mortier ont été préparés, la quantité de sable nécessaire a été pesé à l'aide d'une balance électronique et ajouté au bac à la suspension PSE à mélanger jusqu'à l'obtention d'une consistance désirée.

Tableau III. 3 : Proportions de lisier PSE et de sable tranchant pour les mortiers PSE.

Mélanger	Rapport		Masse	
	Lisier PSE	Sable pointu	Boue PSE (g)	Sable (g)
1	1	1	600	600
2	1	1.2	545	654
3	1	2	400	800
4	1.2	1	654	545
5	2	1	800	400

Détermination du rapport de mélange de mortier de ciment

Le mélange est préparé d'une manière à avoir une (1) partie de ciment et trois (3) parties de granulats fins, et 0,7 partie d'eau comme spécifié par ASTM C270-14a

Adhérence du mortier de ciment

La force d'adhérence du mortier de ciment a été déterminée par l'essai de traction des briques croisées selon ASTM C952-12

Test de résistance à la compression

- Six éprouvettes cubiques de 50 mm, préparer avec le mélange coulé dans les moules et a vibré pendant deux (2) minutes pour éliminer les bulles d'air, les mélanges sont conservés pendant 3 jours dans les moules jusqu'au durcissement, après démolition les éprouvettes sont testées conformément à la norme ASTM C109 / C109M.

Essai de traction

Deux méthodes ont été utilisées pour évaluer la résistance à la traction des éprouvettes de mortier, la méthode du couplet de briques croisées selon ASTM C952-12, qui mesure une résistance à la traction directe (le lien entre le mortier et l'élément de maçonnerie) selon ASTM C307-03 et ASTM C190-85.

L'essai de traction, deux dalles de dimension $(225 \times 150 \times 25,4)$ mm³ ont été préparés en utilisant le rapport de mélange optimal pour le mortier PSE et le mélange de mortier de ciment. Six éprouvettes de briquettes selon ASTM C307-03 ont été coupées de chaque dalle, la résistance à la traction a été enregistrée lors de la charge maximale.

Test de flexion

La résistance à la flexion a été déterminée conformément à la norme ASTM C580-02, les essais ont été arrêtés lorsque les échantillons atteignent la rupture, ou après chute de 25% par rapport à sa valeur maximale.

Test d'absorption d'eau

La méthode d'essai standard ASTM C413-01 (2012) a été utilisée pour déterminer le degré d'absorption d'eau.

Test de perméabilité

Pour chaque mortier, un échantillon cylindrique de diamètre 64 mm et hauteur 74 mm a été préparé et conditionné pendant sept (7) jours à 23 °C et une humidité de 79%.

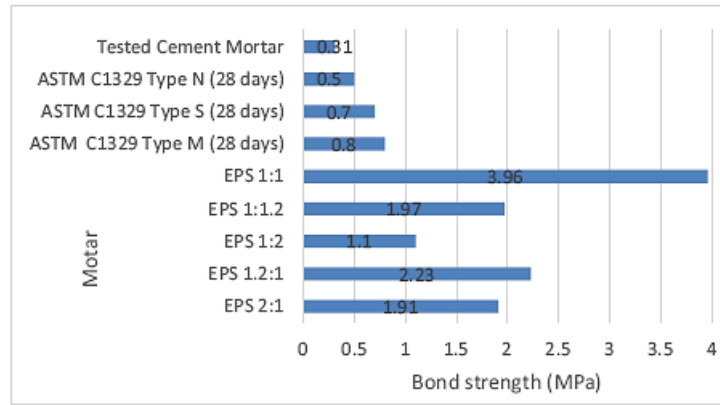
III.2.3. Résultats et discussion

- Dans l'ensemble, les mortiers PSE étaient des adhésifs plus résistants que les mortiers de ciment Portland.

- La moyenne de sept (7) jours la force d'adhérence des différents mélanges de mortier est indiquée sur la Fig.1, où les résistances d'adhérence des mortiers PSE allaient de 3,96 MPa à 1,1 MPa, alors que le mortier de ciment a démontré une très faible adhérence résistance de 0,31 MPa.

- La force d'adhérence des mortiers PSE est directement liée à la proportion de matériaux utilisés pour les préparer. En faisant varier le liant de boue PSE et la teneur en agrégats fins, deux tendances ont été observées comme le montre la **Figure III. 7**.

- Les forces d'adhérence des mortiers EPS étaient toutes plus fortes que le minimum requis à vingt-huit (28) jours tel que spécifié par l'ASTM C1329 / C1329M-16a pour les mortiers «mortier-ciment» de types M, N et S.



Mortier de ciment testé en fonction de la force de liaison (MPa)

Figure III. 7 :Force d'adhérence moyenne du PSE et des mortiers de ciment par rapport à ASTM C1329.

La figure III.8, montre les modes de rupture des mortiers une rupture d'adhérence a été observée pour les mortiers EPS 1,2: 1 / 2: 1/1: 1,2 et 1: 2, et la rupture du mortier de ciment et de la brique a été observée pour le mortier EPS 1: 1. le mortier PSE possédait la plus haute force d'adhérence.

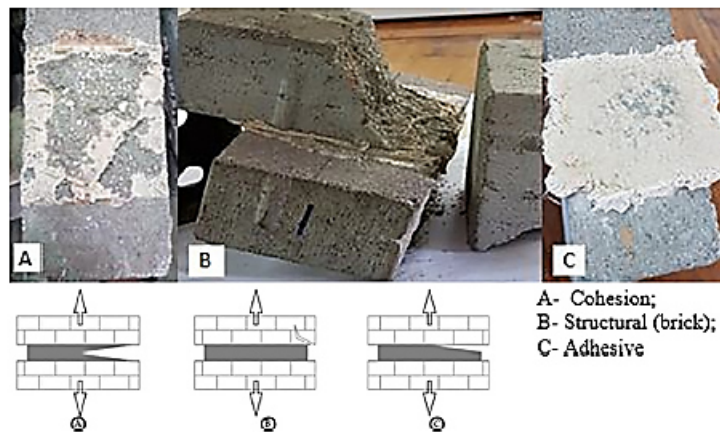


Figure III. 8 :Modes de rupture de liaison.

- L'évaluation des résistances à la compression de sept (7) jours ont montré que la résistance à la compression du mortier PSE était nettement inférieure à celle du mortier de ciment et que l'intérieur des éprouvettes cubiques de mortier PSE était encore humide même si les surfaces extérieures semblaient durcies.

La figure III. 9, montre que la résistance à la compression du mortier augmentait avec le temps, cependant à 28 jours, il était encore faible par rapport à celui du mortier de ciment.

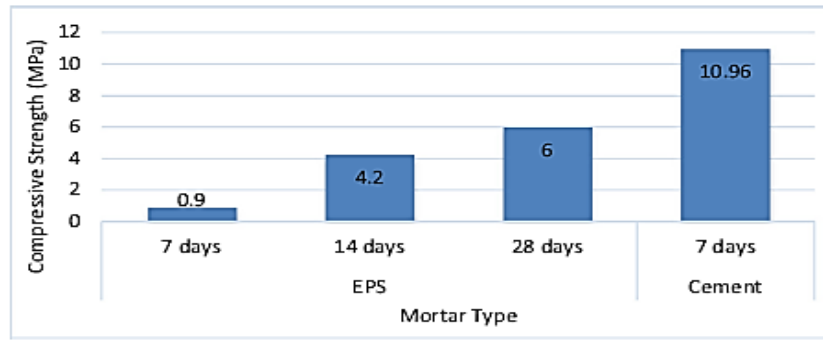


Figure III. 9 :Résistance à la compression du mortier PSE et du mortier de ciment.

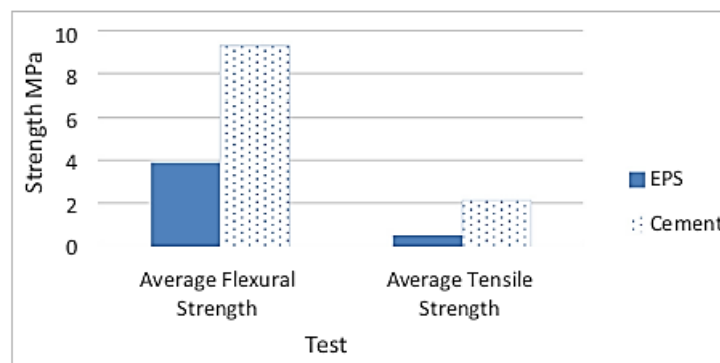
- La résistance à la flexion est une mesure de la résistance à la traction du béton qui confirme si le béton non armé peut résister en flexion.

La figure III. 10, montre les modes de ruptures du mortier de ciment et celui de PSE, lors des essais de flexion trois points.



Figure III. 10 :Rupture des éprouvettes lors de l'essai de flexion.

À sept (7) jours, le mortier de ciment possédait une résistance à la flexion environ deux (2) fois celle du mortier EPS comme le montre la figure III. 11, une fois de plus, cette résistance du matériau PSE restefaible en raison de l'incapacité des éprouvettes de mortier à durcir complètement.



Force MPa Flexion moyenne Force Tension moyenne Force

Figure III. 11 :7 jours de résistance à la flexion et à la traction du mortier de ciment et de mortier OMR EPS.

La figure III. 11 montre une variation des résultats des essais de résistances en compression an fonction de la méthode utilisée selon les normes ASTM C1329 / C1329M-16a.

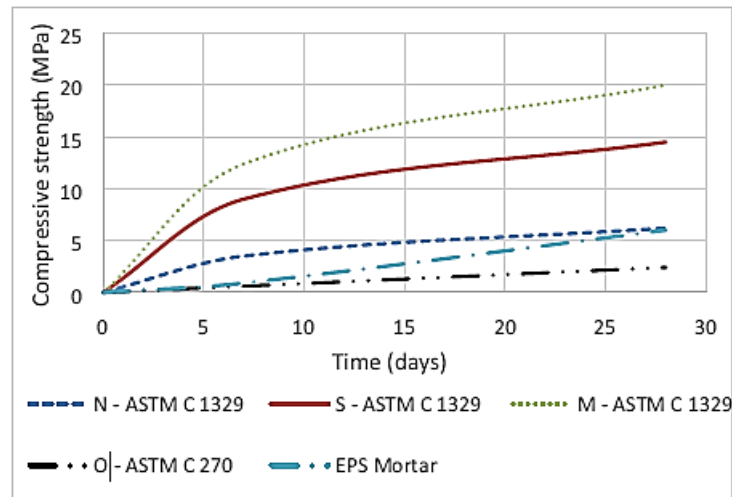


Figure III. 12 :Une comparaison des mortiers spécifiés ASTM et du mortier OMR EPS
Résistance à la compression.

La figure III.13, montre la structure poreuse des mortiers PSF, cette porosité est expliquée par la non évaporation de l'acétone utiliser pour liquéfier le polystyrène.



Figure III. 13 :Les vides d'air et les problèmes de durcissement de la surface externe Mortier EPS.

III.2.4. Conclusion

- Le rapport idéal des résines PSE liquides au sable s'est avéré être 1 : 1 car ce mélange a démontré la force d'adhérence maximale de 3.96 MPa et rupture de brique qui est la rupture de liaison.
- Le mortier PSE était un plus fort adhésif pour éléments de maçonnerie,
- Le mortier EPS possédait très faible résistance à la compression et à la flexion par rapport à la résistance mortiers de ciment.
- La réduction de la quantité de dioxyde de carbone produite durant le processus de fabrication du ciment profite à l'environnement et rend l'industrie de la construction plus verte. Cette réduction globale des gaz à effet de serre contribuera également à réduire le changement climatique.
- Cette étude ouvre la voie également au secteur du recyclage des déchets de polystyrène.
- Les travaux futurs devraient inclure l'étude d'autres mélanges ratios pour mortiers PSE, détermination du rapport de mélange optimal basé sur d'autres propriétés techniques et pas

uniquement sur l'adhérence, et utiliser d'autres additifs chimiques dans le mortier PSE pour une meilleure résistance à la compression, afin d'améliorer le problème de durcissement soulevé dans cette étude.

De plus, il est recommandé de tester des modèles mis à l'échelle réel pour vérifier la performance des murs construits avec ce nouveau matériau PSE [34].

III.2.5. Discussion et critiques du travail

Le travail présenté, traite une possible utilisation d'autre liant dans les mortiers, à savoir le déchet de polystyrène après dissolution dans l'acétone, en remplacement du ciment, ce qui va répercuter positivement sur l'environnement (élimination des déchets de polystyrène), et sur l'aspect économique des mortiers, avec l'élimination de l'utilisation du ciment, réduisant ainsi les gaz à effet de serre, ainsi le coût des projets, d'autre part d'un point de vue technique, l'utilisation du polystyrène en remplacement du ciment a démontré certaines limites de point de vue résistances mécaniques et temps de durcissement, afin de palier à ses problèmes, d'autres travaux seront souhaitables, tels que l'utilisation d'autres solvants.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Rappelons que l'objet de ce mémoire est : l'étude de l'effet de la distribution des bielles de polystyrène sur les propriétés physicomécaniques des mortiers.

En effet, le mortier à base de polystyrène expansé est caractérisé par sa faible masse volumique, adaptable aux exigences, la diminution de la densité est expliquée par une augmentation de la porosité dans le PSE.

Nous présentant ici, le bilan de la contribution apportée sur les deux chapitres concernant la revue bibliographique et travail de recherche.

Le premier chapitre, consacré à la revue bibliographique, qui nous a permis de bien préciser le contexte scientifique et technique des matériaux ; mortiers, les mortiers légers et le béton léger.

Dans le Deuxième chapitre, nous a permis d'approfondi nos connaissances concernant le matériau polystyrène sa composition chimique, sa structure, sa technologie et son procédé de fabrication et ses propriétés ont été abordés, ainsi l'impact environnemental positif lors de l'utilisation du polystyrène.

Dans le troisième chapitre, consacré aux travaux de recherches récents réalisés, sur l'effet de l'incorporation du polystyrène sur les propriétés des mortiers, qui nous a permis après analyses et critiques des travaux, de proposer une étude expérimentale dédiée à l'étude de l'effet de la disposition des billes de polystyrène dans les mortiers.

Ce travail, nous a permis d'approfondir nos connaissances sur les matériaux, notamment sur les mortiers légers à base de polystyrène expansé, les travaux récents publiés nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- L'allègement des mortiers est accompagné par une perte des résistances mécaniques, mais il est possible d'obtenir des résistances mécaniques acceptables avec des petits dosages en PSE.
- Le mortier à base de polystyrène, vu sa légèreté, son isolation thermique et phonique, trouvera une large utilisation dans le domaine de la rénovation du vieux bâti, et dans les nouvelles constructions.

Enfin, des perspectives peuvent être mentionnées sur la nécessité des études et de la recherche dans les matériaux légers sont nécessaires pour confirmer les résultats de recherches d'une part, et d'enrichir la base de données sur ces mortiers légers.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] **SAMAI, SOUMIA** « Formulation d'un mortier avec ajout de pouzzolane naturelle soumis à températures élevées » mémoire master 2.Université Mohamed Boudiaf - M'sila Faculté de technologie. 2015 -2016. Page 04 -77.
- [2] **BOUALI, KHALED**, thèse de doctorat« élaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajouts de déchets de briques réfractaires » ». (2015), 108 PAGES.
- [3] **WILLIAM.D, CALLISTER.JR** « Science et génie des matériaux » modolu Editeur, 2001.
- [4] **R.DUPAIN, R.LANCHON, J-C.SAINT-ARROMAN**«Granulat, sols, ciment et béton» Edition CASTEILLA-PARIS-2004.
- [5] **Hanna Fares** « propriétés mécaniques et physico-chimiques des bétons autoplaçants exposés à une température élevée » Thèse Doctorat. Ecole Doctorale Science et ingénierie. Université de Cergy-Pontoise. Soutenue le 07 Décembre 2009.
- [6]**HEMIL, SAMIR** «effet combine des billes du polystyrène et les fibres plastique sur les mortiers au ciment blanc»thèse de doctorat. Université Mohamed Boudiaf-M'sila(2017-2018) PAGES 1-80.
- [7]**NF EN 934-2**, adjuvants pour bétons, mortier et coulis - partie 2 : adjuvants pour béton - définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage, 2012, 21 pages.
- [8] **SYLVER.P**«science des matériaux», université pierre et marie curie 2006.
- [9]**Mr. BERRAIH MIMOUN** « Etude des mortiers contenant de la pouzzolane naturelle et des déchets de verre » mémoire pour l'obtention du diplôme de magister en Génie Civil, option géo matériaux (ENSET Oran 2009/2010).
- [10] **H. MITANI**. Variations volumiques des matrices cimentaires aux très jeune âges : approche expérimentale des aspects physiques et microstructuraux.Thèse de doctorat de l'école nationale des ponts et chaussées, 2003, 182 pages.
- [11] PDF réalisé par Zile-Marie Durosier Richard Bonneville.(chapitre I).
- [12]**Georges Dreux**, Jean Festa, Nouveau guide du béton et de ses constituants, Paris, Edition Eyrolles, 2009.

Références bibliographiques

- [13] **SAOUD HADJIRA**« l'influence de l'ajout de la poudre de verre et de la poudre de marbre sur le comportement physique et mécanique du ciment composé » mémoire master, université du m'sila, (2016), 64 pages.
- [14] [https://www.gralon.net > articles/materiels-et-consommables/ materiel-industriels/le polystyrène caracteristiques-et-applications-1383.html](https://www.gralon.net/articles/materiels-et-consommables/materiel-industriels/le-polystyrene-caracteristiques-et-applications-1383.html).
- [15]**S. DOROUDIANI, H. OMIDIAN**, environmental, health and safety concerns of decorative mouldings made of expanded polystyrene in buildings, build. environ. 45 (2010) 647–654 pages.
- [16]**S.MAHIOUT**, mettre en valeur ou bannir le polystyrène-approches dans un cadre de développement durable, mémoire master, université de Sherbrooke, 2014, 162 pages.
- [17] **R.FARHI, C.MOREL, J.CHERON**, INRS ; livre de la matière plastique 3^{ième} édition, octobre 2006, 226 pages
- [18]**B.SAFAIE**, valorisation du polystyrène dans la fabrication des bouteilles destinées aux produits laitiers, mémoire de master université de Fès, 2016, 71 pages.
- [19]**L.MILLETTE-ERIK BELANGER**, étude sur les alternatives de valorisation des résidus de polystyrène, mémoire doctorat, l'école polytechnique de Montréal, 2008, 92 pages.
- [20] **NASSIMA SOTEHI**«caractéristiques thermiques des parois des bâtiments et amélioration de l'isolation» thèse université du Constantine 2010, 157 pages.
- [21]**VENUAT. M**; du béton mousse au béton de polystyrène ; 1983.
- [22]**C.J. BENNING - PLASTIC FOAMS: the physics and chemistry of product performance and process technology**, volume i: chemistry and physics of foam formation-wileyinterscience- 1969-pages 1-116.
- [23] **DANIEL WYART**, production du polystyrène expansé (PSE-e et PSE-m), technique de l'ingénieur, réf : am3341 v1, 2008, 26 pages.
- [24]<https://hirschisolation.fr/les-etapes-de-fabrication-des-isolants-pse/>
- [25]**NICOLAS, EDWIGE**. Compatibilités et incompatibilités liants cimentaires / superplastifiants, thèse de doctorat. Université Henri Poincaré Nancy pages 1-198.
- [26]**BRUNO, B ET CLAUDE, D ET VALERIE , M**« polystyrène expansé et développement durable » livre édition Eyrolles (2008), pages 1-83.
- [27]**B. ELMOUATEZ BILLAH**. Étude de l'isolation thermique d'un local situé dans la région d'Ouargla, master en mécanique énergétique. Université KasdiMerbah -Ouargla- (2014), pages 1-56.

Références bibliographiques

- [28] **HERIHIRI,OUIDED**. Formulation et caractérisation des bétons légers, thèse de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra ; 2010-pages 4-138
- [29] **B.OUM HABIBIA**. Étude d'un composite à base de sable dune, ciment et granulats en billes de polystyrène expansé, magister en génie civil, université de Laghouat 2012, page 162.
- [30] **S. LICKA KHADIDIATOU.DIEYE KHADIJATOU**. Études des bétons à base d'argile expansée et à base de coquillages réalisées au Sénégal, thèse de master université de Guelma, juillet 2019 ; pages 1- 127.
- [31] GROUP EDILTECO « mortier léger prêt à l'emploi catalogue 109 fr 10/2019 pages 1-8.
- [32] GROUP EDILTECO « mortier léger prêt à l'emploi isolant et fibre 700 kg/m³ catalogue 109 fr 06/2019 pages 1-6.
- [33] **FuatKoksal, EmrahMutluay, Osman Gencel**, Caractéristiques des mortiers isolants produits avec de la vermiculite expansée et déchets de polystyrène expansé, Université de Bozok, Turquie, 2020 PAGES 1-13.
- [34] **AMRITA MILLING, ABRAHAMS MWASHA, HECTOR MARTIN**, l'étude de l'exploration le remplacement complet du ciment par du polystyrène expansé (PSE) déchets dans les mortiers utilisés pour la construction de maçonnerie, université des Antilles, saint-augustin, trinidad, wi, trinite-et-tobago, 2018 pages 1-9.