

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mohamed Seddik
Benyahia- Jijel -



Faculté des Sciences et de la technologie
Département de Génie des Procédés

Mémoire

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

Filière : Génie des Procédés

Option : Génie des Procédés des Matériaux

**Comportement à long terme et essai mécanique de la rupture
d'un matériau obtenu par la valorisation du polystyrène**

Réalisé par :

M^{elle} Menia Sara

Encadré par :

Mr : M.H. Arada

Promotion 2019

REMERCIEMENT

Je tiens d'abord à remercier en premier lieu et avant tous Le Bon Dieu Le Tout Puissant, qui me donne la force et la patience de mener à bien ce modeste travail.

Je tiens à remercier mon encadreur Mr M.H ARADA pour sa présence permanente , son amour de travail , sa générosité de donner tout ce qu'il a comme savoir, pour avoir su me guider dans ce travail, pour avoir encore et toujours posé les bonnes questions, pour sa patience et sa coopération le long de cette période.

Je remercie les membres de jury qui m'ont fait l'honneur de présider et d'examiner ce modeste travail.

Je remercie également les membres du laboratoire MPCA pour leurs conseils et leurs soutiens durant la réalisation de ce travail.

J'aimerais remercier aussi le personnel du laboratoire de mécanique des sols du département du génie civil et en particulier M^{me} Souad Hank et ceux du laboratoire des essais mécaniques du département de génie mécanique M^r Abdenour Khdimellah Et Sofiane Hayene ainsi que M^{me} Hadji Nardjesse du laboratoire de métallurgie du département de physique.

Je tiens à présenter mes remerciements à tous les enseignants de qui ont contribué à ma formation universitaire surtout les enseignants de génie des procédés, et aussi un grand merci pour tout les étudiants de génie des procédés master 2 Génie des Procédés des Matériaux et Génie de l'Environnement.

Mes remerciements vont aussi à tous qui ont participé de près ou de loin à l'établissement de ce mémoire.

MERCI.

Dédicace

Rien n'est plus beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédie du fond du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en exprimant la gratitude et la reconnaissance durant toute notre existence.

J'ai le grand plaisir de dédier le fruit de mes efforts à :

L'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis : mon Père.

A celle qui a été à mes côtés et ma soutenu durant toute ma vie : ma mère.

A mes très chers frères Rafik, Amine et Fethi, et à la meilleure sœur au monde Farah, à mes belles sœurs Meryem et Nesrine.

A mes adorables nièces Radjaa et Naya Eline, et à toute ma famille sans exception.

A mes amies et aux personnes qui me sont chères : Hakima, Sarra², Ahlem, Amel³, Hasna, Touhida, Meryem, Sahar, Lwiza, Wassima, Nora, Anissa, Ines, Nada, Fayza et Khadidja.

A mon encadreur Mr M.H.Arada.

A toute la promotion 2019 Génie des Procédés des Matériaux.

Introduction générale	1
Références bibliographiques	2
Chapitre I Elaboration et essais mécaniques	
I 1- Présentation du chapitre	3
I.2- Le sable	3
I.3- Le Polystyrène	3
I.4- Mode opératoire	5
I.5- Historique des échantillons	5
I.6- Vieillessement, dégradation et essais mécaniques	7
I.6.1- Vieillessement et dégradation.....	7
I.6.2- Essais mécaniques.....	7
a. Essai de traction.....	7
b. Essai de compression.....	8
c. Essai de dureté	8
d. Essai de résilience.....	10
e. Essai de fatigue	11
f. Essai de flexion.....	11
I.7- Les plans d'expériences	12
I.7.1- Avantages des plans d'expériences.....	12
I.7.2- Les différents types des plans d'expérience.....	13
I.7.3- Modèle mathématique.....	13
I.8- Microscope Binoculaire	14
Références bibliographiques	15
Liste des Tableaux	17

Liste des Figures	18
-------------------------	----

Chapitre II partie expérimentale

Introduction.....	19
II.2- Vieillissements et dégradation des échantillons	19
a. Plan d'expérience : Etude de Cas	23
b. Observation par microscope binoculaire	29
II.3- Essais Mécaniques	30
II.3.1- Mesure de dureté	31
II.3.1.1- Dureté superficielle.....	31
II.3.1.2- Micro-dureté	33
II.3.2- Essai de la flexion.....	36
II.3.3- Essai de la traction	39
Références Bibliographiques	43
Liste des Tableaux	44
Liste des Figures	45
Conclusion générale et perspectives.....	47

Liste des abréviations

m :	masse
Pr :	précipitation
PS :	Poly Styrène
PM :	Poudre de Marbre
PF :	Poudre de Fer
S :	Sable
t :	temps
T :	Température Moyenne

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction Générale

Ce travail est une continuité d'une étude réalisée par des étudiants de Master durant l'année 2017-2018 et qui s'est porté, d'une part, sur la proposition d'une nouvelle approche expérimentale destinée à la préparation d'un matériau à base de polystyrène récupéré et qui est destiné à la décoration externe. Il s'est avéré que l'approche proposée permet d'amoindrir l'impact négatif sur l'environnement au niveau de la pollution et la contamination [1]. Elle a montré que l'obtention du composé dont la matrice initiale S-PS est possible. D'autre part, sur la création d'un historique du matériau élaboré et cela par la création de fiches techniques.

Notre travail est une exploration plus poussée effectuée sur les échantillons obtenus précédemment. Le but de cette exploration est d'avoir une idée plus claire sur certaines propriétés mécaniques ainsi que sur le vieillissement et dégradation. Cette étude est primordiale dans toute étude qui se porte sur les matériaux.

Ce manuscrit est divisé en deux grandes parties. La première partie correspond à une synthèse bibliographique ou en un premier temps, les résultats les plus pertinents sont présentés ainsi la présentation du mode opératoire proposée l'année dernière et en un deuxième temps, elle s'étale sur les définitions et/ou descriptions des essais mécaniques les plus répandus, et utilisés dans cette étude.

Dans la deuxième partie, nous présentons les résultats expérimentaux obtenus suite à l'étude de vieillissement et dégradation des échantillons étudiées. Cette dernière (étude) s'exprime par le suivie de l'évolution de la masse de l'échantillon en fonction de certains facteurs externes du milieu naturel (température, temps, précipitation) pour s'étaler sur la réalisation de certains essais mécaniques (dureté, traction, flexion) réalisés au niveau de plusieurs laboratoire de l'université de Jijel (génie civile, physique et de chimie).

Nous terminons bien évidemment par une conclusion générale et des perspectives

Références bibliographiques

[1] : LAOUAR, Abdellah. BOURIB, Mohammed Lamine. ‘’ La valorisation des déchets plastiques pour l’obtention des matériaux à usage de décoration’’. Master. Université Mohamed Seddik Ben Yahia-Jijel. (2018).

CHAPITRE I

ELABORATION ET ESSAIS

MÉCANIQUES

I.1- Présentation du chapitre

Ce chapitre est consacré à une synthèse bibliographique présentée en deux volets, Le premier volet concerne la présentation des résultats de travaux déjà réalisés dans le cadre d'un master réalisé durant l'année 2017-2018, entre autre nous évoquons les produits de base utilisés pour l'obtention du matériau ciblé, la voie prêté pour son obtention, la présentation des échantillons sélectionnés pour notre études et enfin quelques propriétés chimiques, a savoir, comportement vis-à-vis des produits chimiques.

Le second volet est consacré a la présentation d'une synthèse bibliographique au niveau des essais mécaniques de manière générale, hors la focalisation est portée sur les essais mécaniques que nous avons réalisé a savoir, étude du vieillissement, la dureté superficielle , la micro dureté, la flexion et la traction.

I.2- Le sable

Le mot sable est généralement pour les granulats fins dont les dimensions varient de 0 à 5mm. Les sables sont des matériaux dont le diamètre maximal ne dépasse pas 6,3mm et de dimensions allant de 80 μ m à 5 μ m. Ces intervalles peuvent changer selon le type et la classification du sable étudié.

Les sables proviennent dans la nature par dégradation mécanique ou décomposition chimique des roches, leurs transport dans l'environnement par l'eau ou par l'air leurs permet de rassembler divers propriétés et caractéristiques physico-chimiques, ils sont le résultat la désagrégation des roches d'érosion et de sédimentation [2]. Toutefois il est à savoir que hors le sable naturel, il existe le sable dit : Sable Artificiel qui provient des roches naturelles (calcaire) ou artificielles (pouzzolane) extraites des carrières. Il est produit dans des sablières ou soutiré du criblage d'un tout-venant et peut aussi provenir de l'excédent dans la production des graviers ou gravillons. Les sables d'origines artificiels sont caractérisés par une meilleure adhérence agrégat/liant [2].

I.3- Le Polystyrène

Le polystyrène (Découvert en 1930) est un polymère thermoplastique de formule $(CH_2-CH(Ph))_n$ qui s'atteint par la polymérisation radicalaire du styrène de formule $CH_2=CH-Ph$. Cette polymérisation est la méthode fondamentale pour produire industriellement du polystyrène [3].

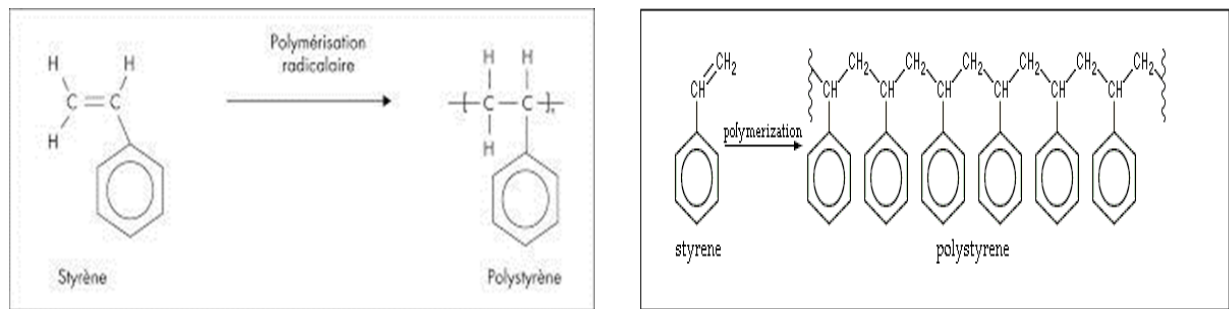


Figure I.1 : Réaction de polymérisation de styrène.

➤ Caractéristiques

Le polystyrène se présente sous deux grandes classes : Standard (Cristal) et Choc.

Dans le polystyrène cristal la polymérisation et la conversion du styrène, qui est sous forme de gouttelettes dans la suspension ou le polystyrène cristal se prépare, passent par plusieurs étapes (de 95 à 120 °C). Cette suspension est préparée en milieu aqueux sous diazote afin d'obtenir des masses molaires élevées et nécessite la présence d'un plastifiant (huile minérale par exemple) et d'un catalyseur type peroxyde (peroxyde de benzoyle ethydro peroxyde detertio butyle) [3]. Hors, le polystyrène choc se présente en plusieurs types selon son niveau de résister au choc. Nous pouvons citer :

- Polystyrène demi-choc
- Polystyrène choc
- Polystyrène super choc

Il est lié à la teneur en polybutadiène ajouté lors de la fabrication [3].



Figure I.2: (a): Le polystyrène cristal. (b):Le polystyrène choc.

I.4- Mode opératoire

Le matériau ciblé est un matériau destiné à la décoration extérieure, jardin et passage personnel...etc. Son obtention est basée sur la réalisation d'un mélange de polystyrène (PS), sable poudre de marbre (PM) et/ou poudre de fer (PF) avec des proportions bien déterminées. L'intégration de la PM ou PF à la matrice du matériau PS-Sable a pour but de renforcer le matériau afin d'obtenir un d'armée. Le procédé de fabrication utilisé pour cette raison est inspiré d'un premier mode opératoire (voir Figure I.3) en absence de la poudre de fer et de la poudre de marbre [1].

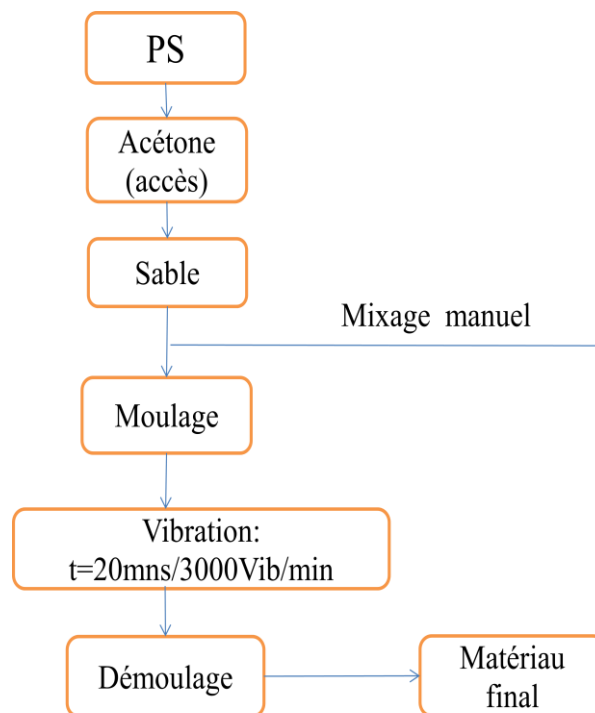


Figure I.3 : Procédés de fabrication du matériau dont la matrice est PS-Sable.

I.5- Historique des échantillons

Les échantillons utilisés pour la réalisation d'essais mécanique ont été préparé, comme nous l'avions mentionné au dessus, par des étudiants master en génie des matériaux du département de génie des procédés [1]. Parmi ces échantillons, le choix s'est porté sur seulement trois d'entre eux. Ce choix n'est pas pris au hasard mais suite au suivi de ces derniers durant plus de 6mois pour un test de vieillissement.

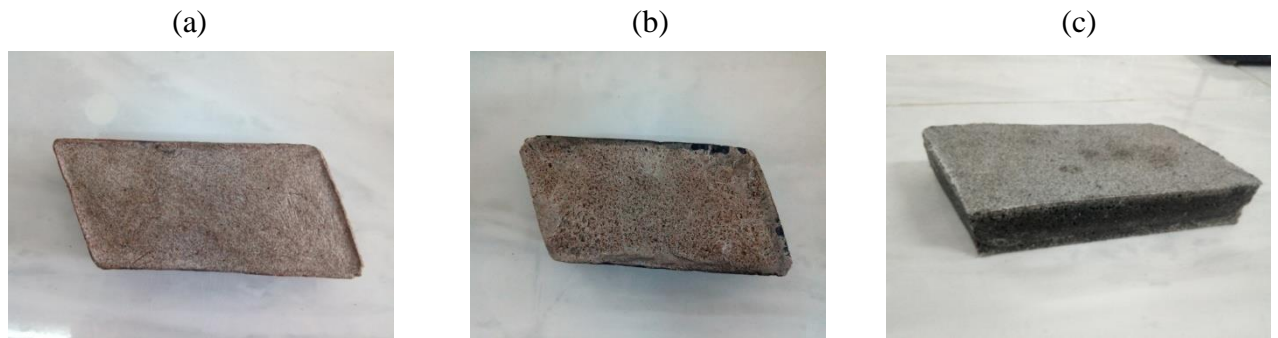


Figure I.4 : Echantillons utilisés pour l'étude des essais mécaniques et vieillissement (a) PS-Sable, (b) PS-Sable-PM et (c) PS-Sable-PF.

Le comportement de ces matériaux aux produits chimiques suite à un contact de 24h est présenté dans le tableau suivant [1]:

Solution Chimique	SIMDUT	Réaction après 24h00
HF		Aucun
HNO ₃		Aucun
H ₂ SO ₄		Aucun
HCl		Aucun
NaOH		Aucun
Eau régale		Aucun
H ₃ PO ₄		Aucun
Eau Régale : pas de test à l'eau régale car elle perd ses propriétés dont le pouvoir oxydant de HNO ₃		

Tableau I.1: Comportement du matériau après 24h de contact avec des solutions corrosives.

I.6- Vieillissement, dégradation et essais mécaniques

I.6.1- Vieillissement et dégradation

Le vieillissement est une dégradation qui peut avoir un impact négatif sur les propriétés d'un matériau, et qui provient généralement de son environnement qui risque de l'altérer de façon lente et irréversible.

Cette altération peut provenir des facteurs naturels (température, atmosphère ...) mais aussi des facteurs physiques (dégazage, migration des plastifiants, évolution de la morphologie) ainsi que des facteurs chimiques [4].

I.6.2- Essais mécaniques

Il est nécessaire de bien connaître les propriétés mécaniques du matériau avant son usage et/ou utilisation afin d'avoir des idées claires sur son comportement, comme au niveau de la déformation ou celui de la rupture, comme il est important de maîtriser les méthodes suivies pour les essais ainsi. La maîtrise des méthodes s'exprime initialement par les normes déclarées par des organismes nationaux ou internationaux comme l'AFNOR (association française de normalisation) l'ISO (international standardisation organisation) et l'ASTM (American society for testing and materials). Ces normes permettent de réaliser et répéter un essai dans les mêmes conditions [5]. Il existe de nombreux essais mécaniques comme par exemple l'essai de la traction, de compression, de dureté que se soit superficielle ou micro dureté...etc.

a- Essai de traction

Cet essai consiste à exercer une traction ; dont la définition littéraire est une action de tirer en tendant, sur une éprouvette qui possède des dimensions bien définies dont la section peut être circulaire ou rarement rectangulaire.

La traction est réalisée par une machine appelée machine de traction. L'éprouvette est encastrable dans la machine avec ses deux extrémités et subit deux forces égales et opposées suite à une traction. Ses deux forces sont dirigées vers l'extérieur de l'éprouvette.

Concernant la machine de traction, elle dispose d'un enregistreur qui permet de donner les résultats obtenus par cet essai et qui donne la relation entre la force de traction (F) et l'allongement absolu de l'éprouvette (ΔL).

Les résultats obtenus sont présentés sous forme de diagramme qui dépend des dimensions des éprouvettes, il consiste à présenter la relation des contraintes ($\sigma = F/S_0$) en fonction de l'allongement relatif ($\varepsilon = \Delta L/L$), avec F étant la force de traction, S_0 : la surface initiale de la section transversale de l'éprouvette, L : la longueur initiale de l'éprouvette et ΔL : l'allongement absolu de l'éprouvette [6].

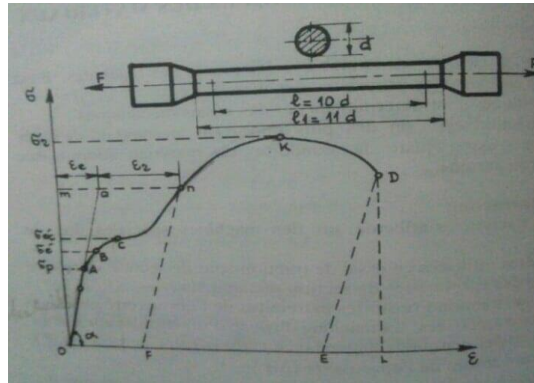


Figure I.5 : Eprouvette normes ANFOR et la courbe de traction.

Pour la traction biaxiale l'éprouvette est en forme de croix. Elle est liée à une machine qui permet d'appliquer des forces orthogonales dirigés vers l'extérieur de l'éprouvette. Cette dernière doit être construite de façon que la déformation soit uniforme sur une large zone. Cet essai a pour but d'obtenir plus des informations sur le comportement plastique [7].

b- Essai de compression

L'essai consiste à soumettre l'éprouvette à des forces à ses deux extrémités et qui sont dirigés vers l'intérieur de cette dernière.

La compression est réalisée sur des éprouvettes qui doivent satisfaire certaines conditions (normes). De forme cylindrique, les éprouvettes doivent avoir une longueur égale ou inférieure à deux fois le diamètre de la section transversale.

Cet essai diffère de la traction au niveau de la charge de compression qui croit brusquement ainsi que la section de l'éprouvette qui croit en prenant une forme de tonneau [6].

c- Essai de dureté

Cet essai nous permet de mesurer la dureté superficielle et/ou micro-dureté.

✓ *Dureté superficielle*

La dureté superficielle consiste à faire pénétrer une charge F (valeur sans dimension) dans un matériau en mesurant sa résistance. Cette dernière dépend des déformations élastiques et plastiques, des forces de frottements sur la surface du matériau, de la géométrie du pénétrateur et de la force appliquée [8]. Un essai sclérométrique désigne la relation entre la dureté d'un matériau et sa résistance à la compression. Afin de déterminer la dureté du béton par exemple, en utilisant un scléromètre dont la bille de ce dernier est projetée sur une sonde en contact avec l'ouvrage à inspecter, plus la valeur affichée sur le scléromètre est importante plus le matériau est dur[9]. Pour notre étude expérimentale nous avons utilisé un scléromètre type SILVER SCHMIDT dont les caractéristiques sont :

- Aucune correction nécessaire car les mesures sont indépendantes de la direction de frappe.
- Exactitude de mesure parfaite, grâce à l'encodeur différentiel optique de vitesses absolues.
- Courbes de conversion pour une large gamme de bétons, notamment les bétons peu solides ($<10 \text{ N/mm}^2$) et très solides (jusqu'à 100 N/mm^2).
- Fonctionnement simple "à un seul bouton" combiné à une interface utilisateur à technologie avancée d'inclinaison et de torsion.
- Menu graphique à symboles indépendants de la langue.
- Conversion automatique dans l'unité de mesure désirée (MPa, N/mm^2 , kg/cm^2 , psi).



Figure I.6 : Scléromètre à béton SILVER SCHMIDT.

✓ *Micro-dureté*

L'essai de micro-dureté s'effectue par un micro-duromètre dont le principe est le même que celui de l'essai de dureté superficielle. Il existe plusieurs types d'essais, les plus répandus sont celui de Brinell, Rockwell, Shore et l'essai Vickers.

Pour notre étude expérimentale nous avons utilisé un micro-duromètre type AFFRI (DM 2D 388).



Figure I.7:Micro-duromètre de Vickers AFFRI DM 2D 388 (Digital Microhardness Tester).

La différence entre ces multiples essais se situe au niveau de la forme du pénétrateur (indenteur) utilisé [10].

- Essai de Brinell : indenteur sous forme de bille d'acier de gros diamètre ($\phi = 10\text{mm}$)
- Essai de Rockwell : indenteur sous forme de bille d'acier dur de faible diamètre ($\phi = 1,59\text{mm}$)
- Essai de Rockwell : indenteur sous forme de cône en diamant d'angle au sommet de 120°
- Essai de Vickers : indenteur sous forme de pyramide à base carrée en diamant ou l'angle entre les faces est 136° [5].

d- Essai de résilience

Appeler aussi résistance au choc, il consiste à faire subir un choc à une éprouvette sous forme d'un barreau parallélépipédique carré appliqué par un mouton pendulaire dit de Charpy, ce pendule descend d'une hauteur connue h_0 vers l'éprouvette qui reçoit le choc. Durant ce dernier, l'énergie dépensée se mesure comme suit:

$$W = m g (h_0 - h)$$

- La résilience est le rapport de l'énergie dépensée au cours du choc qui a provoqué la rupture et la surface de la section rompue. Elle est exprimée en J/m^2 en N/m ou encore en Kg/S^2

$$\phi = W / S$$

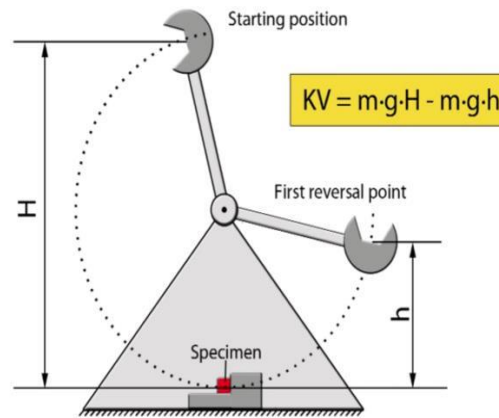


Figure I.8 : Test Charpy pour essai de résilience (résistance au choc).

e- Essai de fatigue

La fatigue d'un matériau exprime son exposition à un nombre de cycles de sollicitations qui peuvent conduire à sa rupture en passant par des altérations et des fissures qui se développent lentement jusqu'à la détérioration totale du matériau [11].

f- Essai de flexion

Ce type d'essai exige que les éprouvettes utilisées soient de formes prismatiques (polyèdre à deux bases avec des faces sous forme de losanges) de côté et de longueur $4a$, ces éprouvettes sont reposées sur deux appuis ou deux cas sont possibles :

- Premier appuis : sous charge concentrée unique appliquée au milieu de l'éprouvette (moment maximal au centre).
- Deuxième appuis : sous deux charges concentrées, symétriques, égales, appliquées au tiers de la portée (moment maximal constant entre les deux charges) [12].

Pour notre étude expérimentale nous avons utilisé une machine de flexion trois points type PASCO (ME-8236) au sein du Laboratoire numérique primaire et secondaire de l'université Mohammed Seddik Ben yahia-Jijel.



Figure I.9 : Machine de flexion trois points PASCO (ME-8236).

Tout ce qui est nécessaire pour réaliser des études d'essais sur les matériaux est inclus dans le system de test des matériaux. Ce system mesure la force avec un capteur de 7100 N et le déplacement avec un codeur optique. La machine d'essai est connectée à un ordinateur par une porte USB afin de recevoir les réponses du matériau sous formes de courbes. Le system d'étude comprend tout les accessoires nécessaires pour des la réalisation des essais de compression, traction, cisaillement, photoélasticité, flexion trois points et flexion quatre points... etc.

I.7-Les plans d'expériences

Un plan d'expérience est utilisé pour la quantification des facteurs qui influent sur une réponse afin de déduire celui qui donne le meilleur résultat ainsi que pour répondre à une problématique bien précise [13].

I.7.1-Avantages des plans d'expériences

Les plans d'expériences permettent l'étude d'un grand nombre de facteurs, les interactions entre ces derniers et la détection des plus influents d'entre eux. Ils permettent aussi de réaliser une modélisation des réponses étudiées par conséquent l'obtention d'une précision optimale des résultats [14].

Afin de pouvoir utiliser un plan d'expérience il est impératif de cerner la terminologie qui le caractérise dont la réponse qui a pour but de quantifier les performances du système étudié, les facteurs expérimentaux sont les paramètres à étudier et qui influent sur la variation de la réponse.

Le domaine d'un facteur présente deux niveaux (la borne inférieure dite niveau bas notée (-1), et la borne supérieure dite niveau haut notée (+1)). Les valeurs entre ces deux niveaux représentent le domaine d'un facteur ou chaque paramètre est représenté par un axe gradué et orienté. Dans le cas où il existe deux facteurs la réunion des domaines de ces derniers représentera un domaine d'étude.

L'influence de deux ou plusieurs facteurs dépendamment l'un à l'autre sur une réponse est appelée interaction [13].

I.7.2- Les différents types des plans d'expérience

Il existe plusieurs types de plans

- Plan Gréco-Romain
- Plan factoriel type 2^n
- Plan Taguchi

Dans ce travail nous nous sommes intéressés au plan type factoriel 2^n . Les plans factoriels complets couvrent toutes les combinaisons de niveaux entre tous les facteurs et c'est la cause de leur coût très élevé, contrairement aux plans factoriels fractionnaires qui sont des sous-ensembles des plans factoriels complets et qui peuvent négliger l'influence de certains facteurs ou interactions sur une réponse [15].

I.7.3- Modèle mathématique

Lorsque il y'a une absence d'informations la loi d'évolution générale qui lie les facteurs influençant à la réponse est donnée comme suit :

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$$

Afin de rendre cette loi bien précise, il est nécessaire de la représenter sous forme d'un polynôme de degré plus au moins élevé si les dérivés sont considérés comme constantes en utilisant l'équation suivante :

$$Y = a + \sum a_{ix} x_i + \sum a_{ijx_ix_j} + \sum a_{iix_i^2} + \dots + e$$

Avec :

Y : c'est la réponse ou grandeur d'intérêt.

x_i : représente un niveau du facteur i.

x_j : représente un niveau de facteur j.

a₀, a_j, a_{ij}, a_{ii} : sont les coefficients du polynôme.

e: L'erreur.

I.8- Microscope Binoculaire

La microscopie optique est une technique qui a pour but de donner la possibilité d'observer à partir d'une surface polie, les éléments constitutifs des microstructures et d'obtenir des informations sur la texture ainsi que les dimensions des grains [16].

Dans cette études expérimentale et afin de pouvoir observer la surface de nos échantillons nous avons utilisés le microscope binoculaire OPTIKA B-350 équipés différemment avec deux types d'optiques différentes et le diamètre de champ du système dans les deux types est de 20mm.

Références bibliographiques

- [1] : LAOUAR, Abdellah. BOURIB, Mohammed Lamine. ‘‘ La valorisation des déchets plastiques pour l’obtention des matériaux à usage de décoration’’. Master. Université Mohamed Seddik Ben Yahia-Jijel. (2018).
- [2] : HACHEMI, Nadir. BOUSSA, Adel. ‘‘Influence des différentes granulométries du sable sur le comportement mécanique du béton’’. Master. Université De M’hamed BOUGARA – Boumerdes. p 10-11 (2017).
- [3] : BOUSFIHA, Safae. ‘‘ Valorisation du Polystyrène dans la fabrication des bouteilles destinées aux produits laitiers’’. Master. Université Sidi Mohammed Ben Abdellah - Fès. p 13-14-15-16 (2016).
- [4] : AZZI, Nadia. ‘‘ Effet du vieillissement thermique sur la rigidité diélectrique du polyméthacrylate de méthyle’’. Magister. Université Mouloud Mammeri – Tizi-Ouzou .p 9 (2017).
- [5] : Dominique François, André, Pinceau. André, Zaoui. ‘‘Comportement mécanique des matériaux, élasticité et plasticité. Editions Hermes. p 59-67.
- [6] : SEGHIR, Kamel. ‘‘Notions de résistance des matériaux, cours et exercices résolus. Presse de l’université de Batna. p 43-47 (1997).
- [7] : TEACA, Mihaela. ‘‘ Caractérisation expérimentale et modélisation de la déformation plastique des tôles métalliques’’Thèse de doctorat. Université de METZ. p 25 (2009).
- [8] : BOUDILMI, Abd el Hakim. ‘‘ Contribution à l’étude de la fatigue des matériaux’’ Master. Université de M’sila. p5 (2016).
- [9] : KHOBIZI, Sena. ‘‘ Réhabilitation des structures en béton armé’’ Master. Université 08 Mai 1945 de Guelma. (2017).
- [10] : BENZAOUI, Khalida. ‘‘ Etude du Vieillissement des alliages Superplastiques’’ Magister. Université MENTOURI- Constantine. p 46 (2011).
- [11] : Claude, Chèze. ‘‘Resistance des matériaux, Dimensionnement des structures. (Niveau b). Ellipses/Edition marketing S.A. 32 rue bague, Paris (15e). p 12-20 (1996).

[12] : ARAB, Azedine. RAFAI, Hichem. ” Elaboration et étude des caractéristiques physico-mécaniques des Bétons fibrés à ultra hautes performances avec ajouts de pouzzolane naturelle et de fumées de silice ” Master. Université M’hamed BOUGARA –Boumerdes. p 46 (2017).

[13] : HALHAL, Yuba. HADROUG, Salma. “ Optimisation par le plan d’expérience Box-Behnken de la production d’une pectinase à partir des écorces d’agrumes ” Master. Université A. MIRA-Bejaia. p 9 – 10 – 11– 12 (2017).

[14] : LAKEHAL-SENHAJI, Mohammed. “ Optimisation d'une méthode de détermination d'azote et du phosphore par les plans d'expériences”Master. Université Sidi Mohammed Ben Abdellah. p 20 (2016).

[15] :BLONDET, Gaëtan. “Système à base de connaissances pour le processus de plan d’expériences” Doctorat. SORBONNE universités, université de technologie Compiègne. p 26 (2017).

[16] : OURAK, Billal. ZOUAOUI, Bilal. “ Caractérisation électrochimique d’un dépôt à base de fer obtenu par projection flamme-poudre sur un substrat en acier” Master. Université Abderrahmane MIRA Bejaia. p 37 (2017).

Liste des tableaux

Tableau	Page
Tableau I.1: Comportement du matériau après 24h de contact avec des solutions corrosives.	6

Liste des Figure

Figure	Page
Figure I.1 : Réaction de polymérisation de styrène.	4
Figure I.2 : (a) : le polystyrène cristal. (b) : le polystyrène choc.	4
Figure I.3 : Procédés de fabrication du matériau dont la matrice est PS-Sable.	5
Figure I.4 : Echantillons utilisés pour l'étude des essais mécaniques et vieillissement (a) PS-Sable, (b) PS-Sable-PM et (c) PS-Sable-PF.	6
Figure I.5 : Eprouvette normes ANFOR et la courbe de traction.	8
Figure I.6 : Scléromètre à béton SILVER SCHMIDT.	9
Figure I.7 : Micro-duromètre de Vickers AFFRI DM 2D 388 (Digital Microhardness Tester).	10
Figure I.8 : Test Charpy pour essai de résilience (résistance au choc).	11
Figure I.9 : Machine de flexion trois points PASCO (ME-8236).	12

CHAPITRE II

PARTIE EXPERIMENTALE

II.1- Introduction

Ce chapitre est la partie expérimentale de notre étude. Les échantillons étudiés sont des sujets obtenus durant la préparation d'un projet fin d'étude en génie des matériaux au sein du département de génie des procédés de l'université MSB –Jijel- de l'année universitaire 2017-2018. Le projet réalisé, avait pour but ; non seulement, de proposer de nouveaux matériaux destinés à la décoration extérieure (Jardin, bordure ...etc.) mais aussi, de proposer une approche expérimentale (mode opératoire) pour son obtention. Cependant, notre travail a pour but de faire un suivi sur l'évolution de ces échantillons en les étudiant sur deux volets distincts.

Le premier volet consiste à faire un suivi minutieux du comportement des échantillons étudiés en les exposant au milieu naturel, à savoir, la pluie, le soleil, le temps de l'expositionetc. afin d'avoir une idée préliminaire sur leurs vieillissement et dégradation.

Hors le deuxième volet, il est consacré à l'effectuation des essais mécaniques. Ces derniers nous permettent de statuer sur certaines propriétés mécaniques, comme la dureté superficielle, la micro-dureté, la traction et la flexion.

Il est à noter que parmi les échantillons préparés précédemment, seuls trois échantillons ont été choisis pour la réalisation de cette partie expérimentale, à savoir les matériaux appartenant aux matrices : S-PS, S-PS-PM et S-PS-PF.

II.2- Vieillissements et dégradation des échantillons

Le vieillissement est un phénomène qui attaque tous les matériaux. Dans notre étude, et dans le but d'avoir des informations sur la résistance et la dégradation des échantillons à base de S-PS, S-PS-PF et S-PS-PM obtenus l'année précédente, ces derniers sont exposés aux éléments naturels, à savoir, l'air, la pluie comme à la grandeur extensive qui est la température. Cette étude nous permet plus précisément de connaître les facteurs favorable et défavorable au niveau de la résistance et/ou dégradation. Les échantillons étudiés sont de nombre de trois, ils ont été exposés aux éléments naturels de Juillet 2018 jusqu'à Mai 2019. La figure II.1 montre l'état des échantillons avant leur exposition au milieu naturel, hors la figure II.2 montre l'état des échantillons après 11 Mois d'exposition.

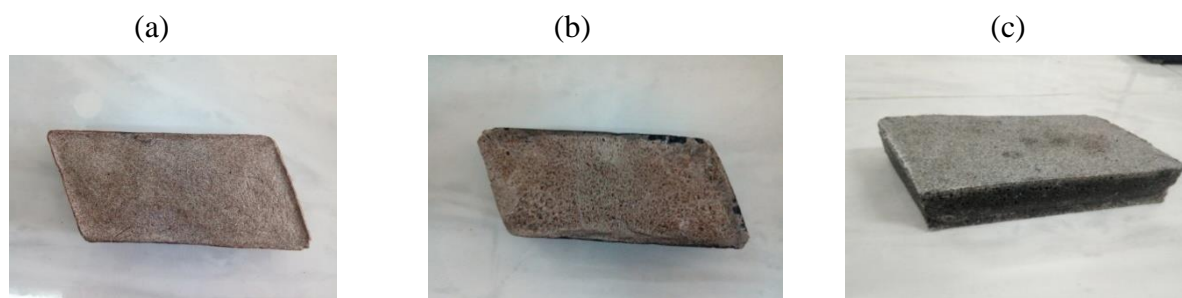


Figure II.1 : Echantillon étudié avant leurs exposition au milieu naturel. (a) : S-PS, (b) : S-PS-PM et (c) : S-PS-PF.

Selon les premières constatations, nous avons remarqué que le comportement des différents échantillons est différent, à savoir, l'échantillon dont la matrice est S-PS a connu une altération au niveau de la surface, alors que l'échantillon dont la poudre de marbre est intégrée, a exprimé une augmentation de la porosité, hors le dernier (à base de poudre de fer) des traces de corrosion sont flagrantes au niveau de la surface, ces dernières reviennent bien évidemment à la présence de la poudre de fer. Nous avons constaté aussi qu'il n'y a eu aucune altération de la surface pour les deux derniers échantillons. Cette absence revient à la présence d'éléments nouveaux dans la matrice S-PS, à savoir la poudre de fer et la poudre de marbre.

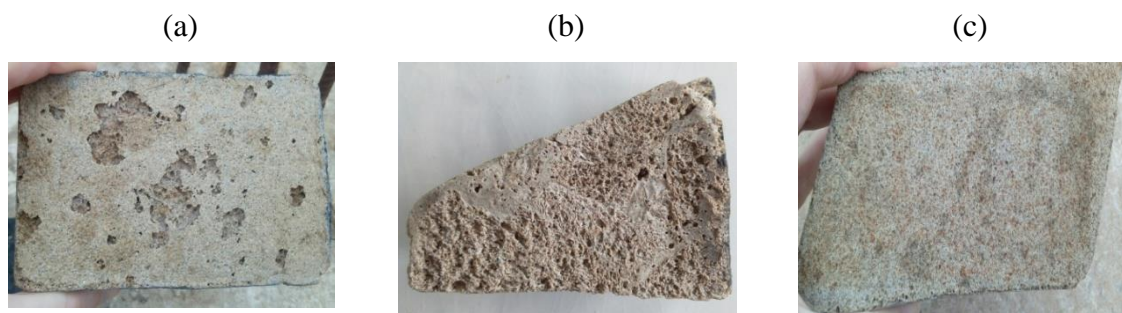


Figure II.2 : Aspect de la surface des échantillons après 11 mois d'exposition au milieu naturel. (a) :S-PS, (b) : S-PS-PM et (c) : S-PS-PF.

Pour le suivi de l'évolution de la surface des échantillons entre l'état initial et l'état final, notre stratégie consiste à effectuer un contrôle mensuel des échantillons et qui consiste à réaliser des pesées en prenant en compte trois facteurs intervenants :

- La température moyenne T
- La précipitation Pr
- Le temps t

Le tableau qui suit, présente les informations mensuelles requises au niveau des facteurs déjà évoqués ainsi que la couverture nuageuse

Mois	Température moyenne (C°)	Couverture du ciel	Précipitations (pluie) (mm)
Juillet	28	Soleil et partiellement nuageux (7%)	10
Aout	29	Soleil et partiellement nuageux(8%)	20
Septembre	26	Ensoleillé (16%)	63
Octobre	23	Soleil et partiellement nuageux (21%)	75
Novembre	18	Soleil et partiellement nuageux (31%)	134
Décembre	14	Soleil et partiellement nuageux (33%)	119
Janvier 2019	13	Faibles averses de pluie (37%)	146
Février	13	Ciel dégagé/ ensoleillé (39%)	141
Mars	14	Ciel dégagé pleinement ensoleillé (31%)	117
Avril	17	Soleil et partiellement nuageux (26%)	92
Mai	20	Soleil et partiellement nuageux (21%)	71

Tableau II.1 : Paramètres météorologiques mensuels.

Le tableau [II.2] Présente les résultats des pesées réalisées à chaque fin de mois. Nous constatons que la différence entre les valeurs optimales des masses des échantillons étudiés (masse initiale (juillet 2018 et masse finale Mai2019) varie d'un échantillon a un autre, à savoir, une perte de masse de 5grs pour l'échantillon S-PS, 20grs pour l'échantillon S-PS-PM et aucune perte pour l'échantillon S-PS-PF. Toutefois, nous avons constaté que l'évolution de la masse n'est pas une de linéaire, y compris pour l'échantillon dans la perte de masse est nul. Suite à cette constatations, nous avons procédé à la réalisation des plans d'expérience, afin de proposer un modèle mathématique capable d'exprimer cette évolution pour pouvoir comprendre le comportement des échantillons au niveau de la masse et par conséquent statuer sur les facteurs influents sur la dégradation et vieillissement des échantillons

Mois/Masse	Masse (S-PS)	Masse (S-PS-PM)	Masse (S-PS-PF)
2 juillet 2018	395g	130g	475g
31 juillet	380g	125g	475g
31 aout	375g	125g	500g
3 octobre	400g	150g	500g
2 novembre	375g	120g	500g
30 novembre	375g	125g	475g
31 décembre	375g	120g	475g
31 janvier 2019	400g	100g	500g
28 février	400g	150g	475g
31 mars	375g	125g	475g
30 avril	400g	125g	475g
31 mai	375g	125g	475g

TableauII.2:Variations mensuels des masses des échantillons.

a- Plan d'expérience : Etude de Cas

Dans notre étude de vieillissement nous avons étudié trois facteurs

- La précipitation Pr
- Le temps de l'exposition au milieu extérieur : t
- La température moyenne du milieu extérieur : T

Ainsi que les interactions entre facteurs, à savoir :

- Pr*T
- Pr*t
- T*t
- Pr*T*t

Le tableau suivant présente la matrice représentative du plan d'expérience factorielle type 2^n avec n, bien évidemment le nombre de facteurs étudiés, ce qui mène à réaliser 8 essais. Les +1 et -1 présente le domaine (niveau haut et niveau bas), pour l'étude de cas présent, il correspond à la masse m des échantillons étudiés. Plus explicitement:

m(S-PS) :

+1 : 150grs

-1 : 130grs

m(S-PS-PM) :

400grs

395grs

m(S-PS-PF):

500grs

475grs

Nbre d'essai	Pr	T	t	Pr*T	Pr*t	T*t	Pr*T*t
1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1
2	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
3	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1
4	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
5	+1	-1	-1	-1	-1	+1	-1
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1
7	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1
8	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1

Tableau II.3: Tableau matriciel du plan d'expérience factoriel type 2^n .

- *Echantillon S-PS*

○ *Facteur 1 : Précipitation (Pr)*

La figure [II.3] exprime la variation de la masse de l'échantillon en fonction de la précipitation Pr

$$y_1 = a_0 + a_1 x_1 \quad (1)$$

Avec : x_1 : Précipitation et y_1 : Masse

L'équation (1) devient : $m = a_0 + a_1 \cdot Pr$

D'ou

$$m = 391.227 - 0.377 Pr \quad (2)$$

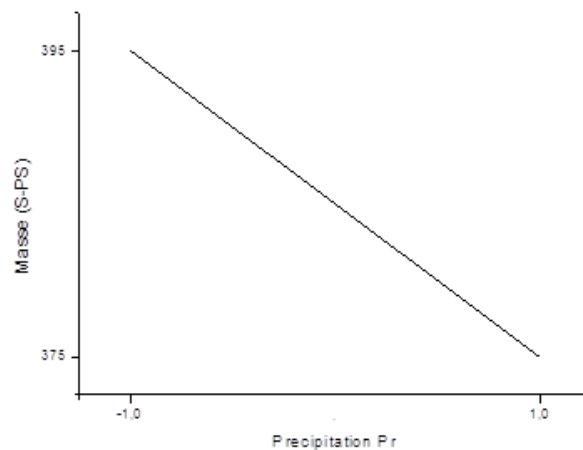


Figure II.3: Variation de la masse (m) en fonction de la précipitation (Pr).

En suivant la même logique pour les deux facteurs restants nous avons obtenu les graphes représentatifs de la variation de m en fonction des facteurs étudiés ainsi que les modèles mathématiques exprimant l'évolution de cette la masse en fonction de ces mêmes facteurs

Pour le facteur de température moyenne (T)

$$y_2 = a_0 + a_2 x_2$$

$$y_2 = 115 + 10 x_2$$

$$m = 115 + 10 T \quad (3)$$

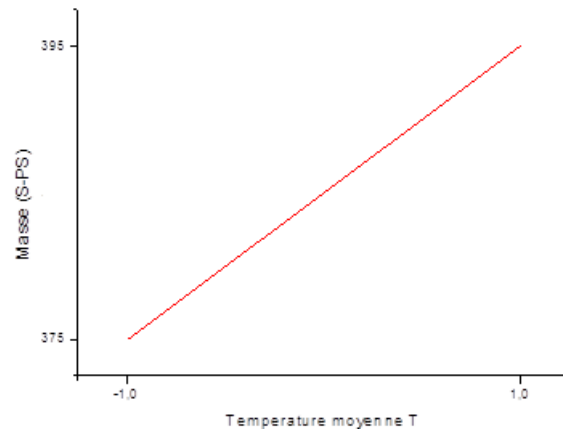


Figure II.4 : Variation de la masse (m) en fonction de la température moyenne (T).

Alors que pour le facteur temps (t)

$$y_3 = a_0 + a_3 x_3; y_3 = 405 - 10 x_3$$

$$m = 405 - 10 t \quad (4)$$

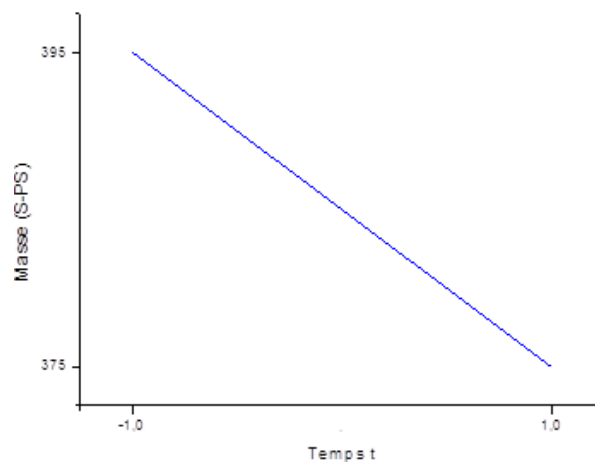


Figure II.5: Variation de la masse (m) en fonction du temps.

Hors, les graphes précédents expriment l'influence individuelle des facteurs pris en compte, sachant qu'il y a d'éventuelles interactions, ceux-ci nous mènera exprimer via un modèle mathématique, le comportement (perte de masse) de l'échantillon en fonction des interactions possibles (Voir tableau matriciel du plan d'expérience).

- **Interaction (Pr*T)**

$$y_{12} = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_1 a_2 x_1 x_2$$

$$y_{12} = 148.125 - 0.377 x_1 + 10 x_2 - 3.77 x_1 x_2$$

Avec 1 : Pr et 2 : T

Ainsi nous obtenons le model suivant

$$m(\text{Pr}^*\text{T}) = 148.125 - 0.377 \text{ Pr} + 10 \text{ T} - 3.77 \text{ Pr}^*\text{T} \quad (5)$$

- **Interaction (Pr*t)**

$$y_{13} = a_0 + a_1 x_1 + a_3 x_3 + a_1 a_3 x_1 x_3$$

$$y_{13} = 148.125 - 0.377 x_1 - 10 x_3 + 3.77 x_1 x_3$$

$$m(\text{Pr}^*\text{t}) = 148.125 - 0.377 \text{ Pr} - 10 \text{ t} + 3.77 \text{ Pr}^*\text{t} \quad (6)$$

- **Interaction (T*t)**

$$y_{23} = a_0 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_2 a_3 x_2 x_3$$

$$y_{23} = 148.125 + 10 x_2 - 10 x_3 - 100 x_2 x_3$$

$$m(\text{T}^*\text{t}) = 148.125 + 10 \text{ T} - 10 \text{ t} - 100 \text{ T}^*\text{t} \quad (7)$$

- **Interaction (Pr*T*t)**

$$y_{123} = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_1 a_2 x_1 x_2 + a_1 a_3 x_1 x_3 + a_2 a_3 x_2 x_3 + a_1 a_2 a_3 x_1 x_2 x_3$$

$$y_{123} = 148.125 - 0.377 x_1 + 10 x_2 - 10 x_3 - 3.77 x_1 x_2 + 3.77 x_1 x_3 - 100 x_2 x_3 + 37.7 x_1 x_2 x_3$$

$$m(\text{Pr}^*\text{T}^*\text{t}) = 148.125 - 0.377 \text{ Pr} + 10 \text{ T} - 10 \text{ t} - 3.77 \text{ Pr}^*\text{T}$$

$$+ 3.77 \text{ Pr}^*\text{t} - 100 \text{ T}^*\text{t} + 37.7 \text{ Pr}^*\text{T}^*\text{t} \quad (8)$$

Des équations (2), (3), (4), (5), (6), (7) et (8) le model mathématique décrivant le comportement de la masse m en fonction des facteurs étudiés et leurs interactions s'exprime de la manière suivante :

$$m = 1503.727 - 1.508 \text{ Pr} + 40 \text{ T} - 40 \text{ t} - 7.54 \text{ Pr}^*\text{T} + 7.54 \text{ Pr}^*\text{t} - 200 \text{ T}^*\text{t} + 37.7 \text{ Pr}^*\text{T}^*\text{t} \quad (9)$$

- *Echantillon S-PS-PM*

Concernant l'échantillon trois dont la matrice S-PS-PM, les résultats obtenus suite à l'application du plan d'expérience sont présentés comme suit :

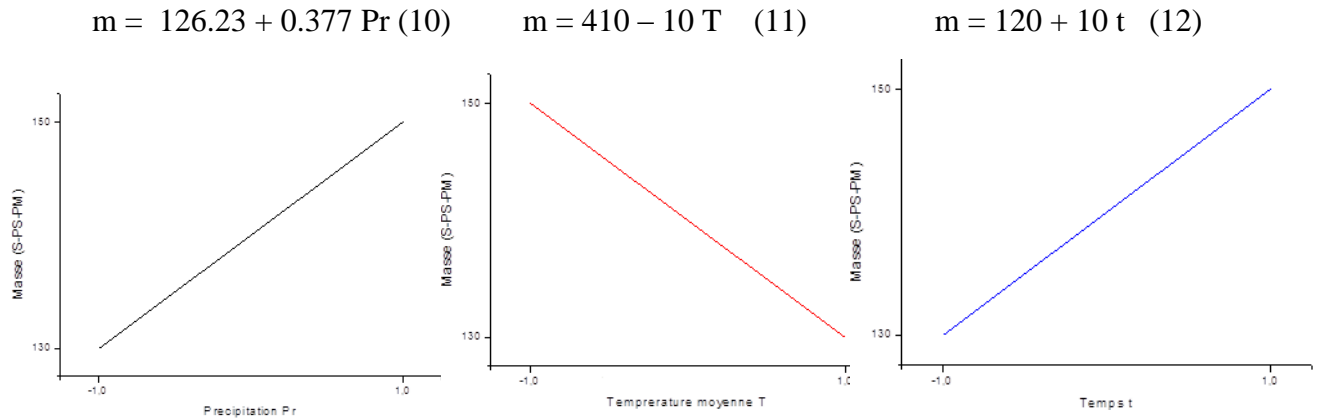


Figure II.6: Variation de la masse m en fonction de Pr, T et temps pour l'échantillon S-PS-PM.

- *Interaction (Pr*T)*

$$m_{(Pr*T)} = 4.875 + 0.377Pr - 10T - 3.77Pr*T \quad (13)$$

- *Interaction (Pr*t)*

$$m_{(Pr*t)} = 4.875 + 0.377Pr + 10t + 3.77 Pr*t \quad (14)$$

- *Interaction (T*t)*

$$m_{(T*t)} = 4.875 - 10T + 10t - 100T*t \quad (15)$$

- *Interaction (Pr*T*t)*

$$m_{(Pr*T*t)} = 4.875 + 0.377 Pr - 10 T + 10t - 3.77 Pr*T + 3.77 Pr*t - 100T*t - 37.7Pr*T*t \quad (16)$$

Des équations (10), (11), (12), (13), (14), (15) et (16) le model mathématique décrivant le comportement de la masse m en fonction des facteurs étudiés et leurs interactions s'exprime de la manière suivante :

$$m = 675.73 - 1.508 Pr - 40 T + 40 t - 7.54 Pr*T + 7.54 Pr*t - 200 T*t - 37.7 Pr*T*t \quad (17)$$

- *Echantillon S-PS-PF*

Concernant l'échantillon deux dont la matrice *S-PS-PF*, les résultats obtenus du plan d'expérience sont présentés comme suit :

$$m = 470.29 + 0.471 Pr \quad (18)$$

$$m = 825 - 12.5 T \quad (19)$$

$$m = 462.5 + 12.5 t \quad (20)$$

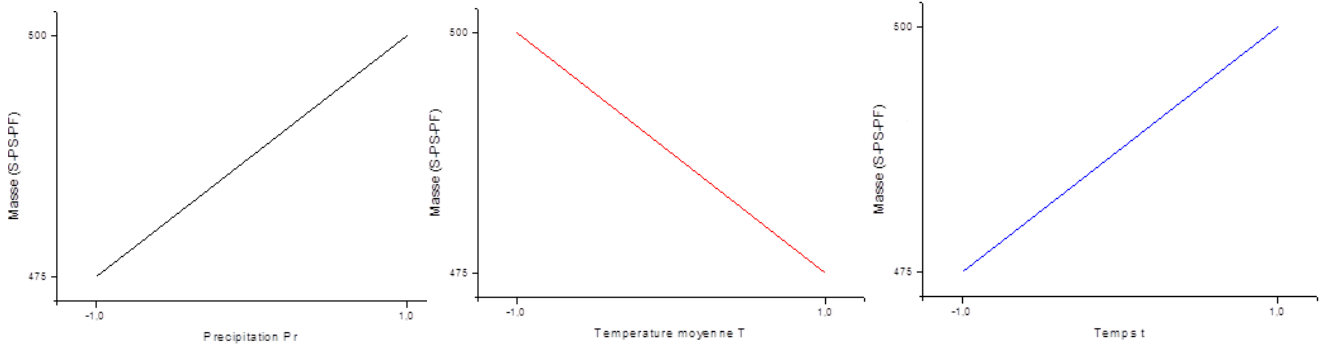


Figure II.7: Variation de la masse m en fonction de Pr, T et temps pour l'échantillon S-PS-PF.

Pour l'étude des interactions, les modèles mathématiques sont présentés ci-dessous :

- *Interaction (Pr*T)*

$$m_{(Pr*T)} = 178.125 + 0.471 Pr - 12.5 T - 5.887 Pr*T \quad (21)$$

- *Interaction (Pr*t)*

$$m_{(Pr*t)} = 178.125 + 0.471 Pr + 12.5 t + 5.887 Pr*t \quad (22)$$

- *Interaction (T*t)*

$$m_{(T*t)} = 178.125 - 12.5 T + 12.5 t - 156.25 T*t \quad (23)$$

- *Interaction (Pr*T*t)*

$$m_{(Pr*T*t)} = 178.125 + 0.471 Pr - 12.5 T + 12.5 t - 5.887 Pr*T + 5.887 Pr*t - 156.25 T*t - 73.59 Pr*T*t \quad (24)$$

Des équations (18), (19), (20), (21), (22), (23) et (24) le model mathématique décrivant le comportement de la masse m en fonction des facteurs étudiés et leurs interactions s'exprime de la manière suivante :

$$m = 2470.29 + 1.884 Pr - 50 T + 50 t - 11.774 Pr * T + 11.774 Pr * t - 312.5 T * t - 73.59 Pr * T * t$$

b- Observation par microscope binoculaire

Nous avons observé l'état des échantillons de l'intérieur en utilisant un microscope binoculaire (OPTIKA B-350). Hors, pour pouvoir le faire, nous étions bien évidemment obligés de réaliser des cisaillements pour atteindre le cœur des échantillons, par conséquent, d'une part, nous avons pu réaliser des prises de photo, et d'autre part, ça nous a permis d'avoir une idée plus claire sur l'aspect du cœur du matériau (du moins localement). La figure II.8 présente les échantillons (Voir Figure II.2) après cisaillement et polissage alors que la figure II.9 présente l'état du matériau de l'intérieur.

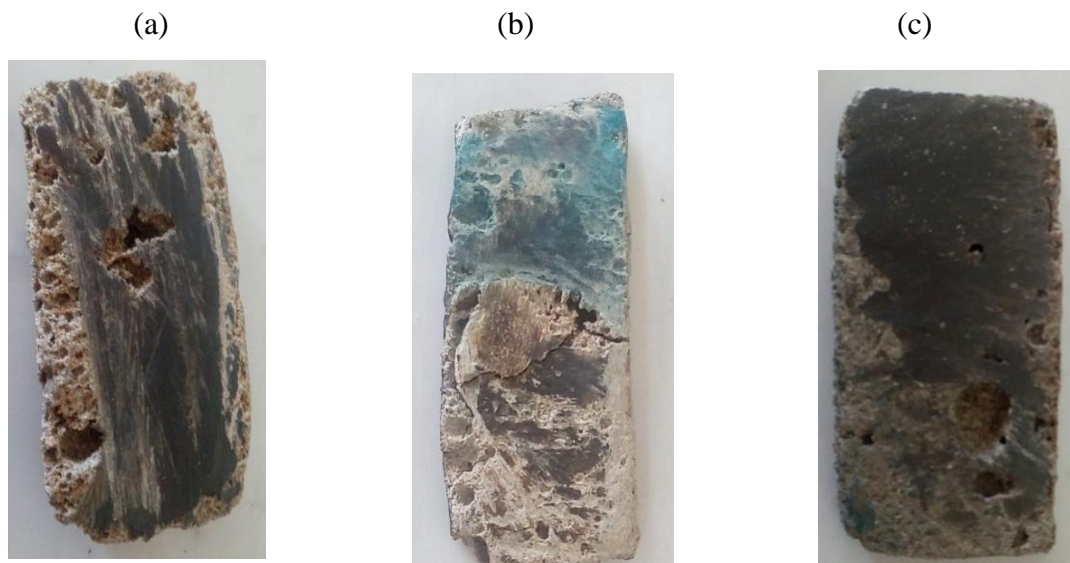


Figure II.8: Prise photographique des échantillons après cisaillement et polissage (a): S-PS, (b): S-PS-PM et (c): S-PS-PF.

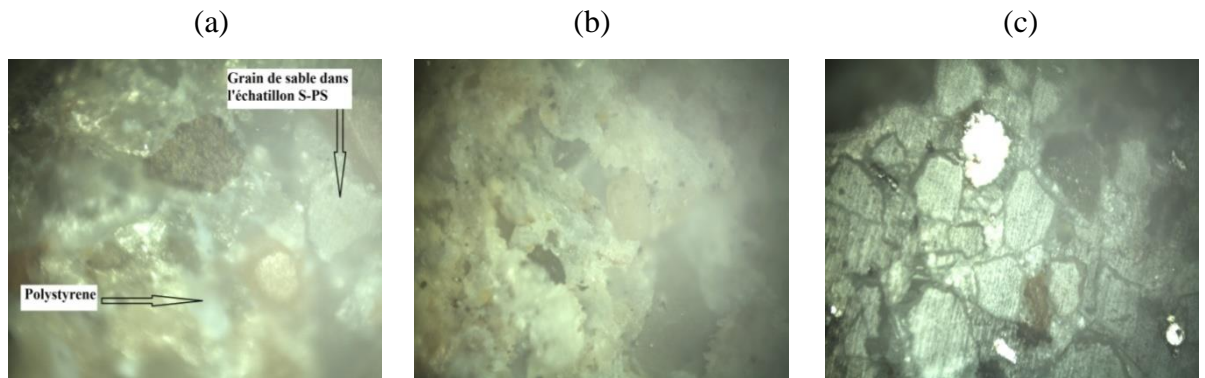


Figure II.9: Prise photographique des échantillons par microscope (zoom10).

(a): S-PS, (b) : S-PS-PM et (c) : S-PS-PF.

Il est à noter, qu'avant cisaillement et toute prise de photo, nous avons effectué un polissage des échantillons cisailés afin d'assurer une qualité meilleure de la prise. Les figures précédentes montrent clairement que les échantillons S-PS-PM ; S-PS-PF présentent au niveau du cœur du matériau, une porosité dont la répartition des pores est locale ; à la différence de l'échantillon S-PS que lui, exprime clairement une répartition des pores au niveau des contours du matériau tout en présentant le même état que celui des deux autres échantillons (porosité locale au cœur). La figure II.9 présente des photographies avec un zoom de *10. Cette photographie nous donne une idée sur la connexion des éléments constitutifs de la matrice. Il est nettement clair, que cette dernière s'accroît en allant de S-PS à S-PS-PF passant par S-PS-PM. En d'autres mots, l'échantillon ayant la PF comme élément dans la matrice du matériau présente une meilleure connexion avec le sable et le polystyrène.

II.3- Essais Mécaniques

Afin d'avoir plus d'informations sur la résistance de nos échantillons nous avons réalisés quelques tests mécaniques sur ces derniers vu qu'ils sont les seuls à pouvoir nous aider à connaître les propriétés mécaniques des matériaux étudiés. Les essais réalisés dans cette étude sont les suivants :

- Mesure de dureté superficielle
- Mesure de la micro-dureté
- Essai de flexion
- Essai de traction

II. 3.1- Mesure de dureté

L'essai de dureté nous aide à savoir si le matériau utilisé est dur et résistant. Afin de pouvoir déduire, la mesure de la dureté de nos échantillons s'est portée sur deux types d'essais, à savoir :

- Essai de dureté superficielle.
- Essai de micro-dureté.

II.3.1.1- Dureté superficielle

Cet essai est réalisé à l'université Mohammed seddik Ben yahia-Jijel au sein du laboratoire de béton et matériaux en utilisant un scléromètre à béton SILVER SCHMIDT.



Figure II.10 :Sclérometre a béton (SILVER SCHMIDT).

Il consiste à appliquer dix martèlements sur la surface de l'échantillon en changeant la zone à chaque martèlement. La mesure instantanément est enregistrée par le scléromètre. Ce dernier enregistre les valeurs de dix forces (correspondants aux nombre de martèlement) appliquées pour donner comme résultat final la moyenne des contraintes appliquées (forces) en N/mm^2 .



Figure II.11 : Zone des dix martèlements sur la surface de l'échantillon S-PS.

Les martèlements des échantillons étudiés enregistré par le scléromètre ont donné les résultats présentés dans le tableau II.4. Cette dernière montre clairement que la moyenne des contraintes appliquées pour les échantillons dont PM et PF sont intégrées à la matrice initiale (S-PS) présente des valeurs supérieure sa celle de l'échantillon S-PS.

Pour une étude préliminaire, nous avons constaté aussi, que même s'il n'est pas considérable, l'écart entre ces valeurs moyennes enregistrées nous oriente vers l'échantillon le plus résistant au choc (S-PS-PF). Selon l'évolution des indices du scléromètre obtenus par rapport aux éléments intégrés à la matrice initiale, nous affirmons que le matériau S-PS-PF est le matériau armé comme l'ont supposé ses élaborateurs, avec l'indice le plus élevé $I=18,65$.

Il est à rappeler que le scléromètre à béton est utilisé dans le domaine de la construction afin d'avoir une estimation de la résistance au choc du béton et qu'il ne permet pas une mesure directe de cette dernière et que cette mesure n'est pas considérée comme une de fiable, ainsi il existe d'autres méthodes pour la transformation des indices du scléromètre de la résistance mécanique à la compression. Selon les indices rapportés par [17], à savoir, $28 \leq I \leq 32$ le fonctionnement de l'appareil est satisfaisant alors que si $I < 28$ ou $I > 32$ l'appareil est défectueux. Selon nos résultats les indices du scléromètre sont inférieurs à 28. Ces intervalles n'excluent les résultats obtenus mais elle nous oriente vers une appréciation juste des matériaux au niveau d'une étude comparative des indices comme ils suggèrent bien évidemment de s'orienter vers des scléromètres adéquats, comme par exemple ceux utilisés pour le plastique, verre...etc.

Martèlement \	Contrainte (S-PS)	Moyenne des contraintes	Contrainte (S-PS-PM)	Moyenne des contraintes	Contrainte (S-PS-PF)	Moyenne des contraintes
1	9	18	16	18.5	23.5	18.65
2	17.5		20		12	
3	23		13.5		22.5	
4	17		18		20	
5	21.5		13.5		18.5	
6	18.5		22.5		23.5	
7	16.5		22.5		14	
8	17.5		19		17.5	
9	21.5		15		16	
10	18		25		19	

Tableau II.4: Valeurs des contraintes appliquées sur chaque échantillon.

II.3.1.2- Micro-dureté

Cette mesure est réalisée au niveau du laboratoire de métallurgie à l’université MSB-Jijel. L’essai est exécuté en utilisant le micro-duromètre de Vickers AFFRI (Digital Micro-hardness Tester) sur les trois échantillons S-PS, S-PS-PM et S-PS-PF étudiés dans les conditions suivantes :

- Echantillon bien polis
- Echantillon non poreux
- Surface d’étude lisse
- Surface d’étude lumineuse



Figure II.12: Micro-duromètre de Vickers AFFRI DM 2D 388 (Digital Micro-hardness Tester).

Après avoir mis l'échantillon sur le porte échantillon, nous avons commencé à chercher une surface lumineuse par le microscope du micro-duromètre (les zones sombres sont à éviter). Une fois la surface de l'échantillon est repérée, nous entamons la recherche de la zone d'essai ; qui doit être nette, en effectuant un zoom de 10 à 40. Cette étape est suivie par le réglage du temps d'essai (15 secondes) ainsi que le réglage de la force à vouloir appliquer. L'essai débute en cliquant sur START. Après la durée de 15 secondes, nous marquons la fin de l'essai par la mesure optique des longueurs des deux diagonales de l'empreinte du pénétrateur dont la forme (empreinte) est un losange. Le calcul de la dureté de Vickers s'effectue en utilisant l'équation suivante :

$$HV = 1854.4 F / d^2$$

Avec : HV est la valeur de micro-dureté de Vickers en (kg/mm²), F c'est la force appliquée en (gramme force : gf) et d c'est la longueur des diagonales de l'empreinte en (µm). Les tableaux suivants présentent les valeurs des forces appliquées pour chaque échantillon ainsi que les longueurs des diagonales ainsi que les résultats obtenus de la dureté de Vickers, à savoir la micro-dureté :

Force (gf)	d1 (µm)	d2 (µm)	HV (kg/mm)
100	8793	8055	2.62
500	6146	8198	18.40
1000	8618	8799	24.45

Tableau II.5: Micro dureté de Vickers pour l'échantillon S-PS.

Force (gf)	d1 (μm)	d2 (μm)	HV (kg/mm^2)
100	8470	8793	2.49
500	8612	8797	12.23
1000	8754	8633	24.54

Tableau II.6: Micro dureté de Vickers pour l'échantillon S-PS-PM.

Force (gf)	d1 (μm)	d2 (μm)	HV (kg/mm^2)
100	5317	5877	5.93
500	5753	5940	27.13
1000	6035	5892	52.15

Tableau II.7: Micro dureté de Vickers pour l'échantillon S-PS-PF.

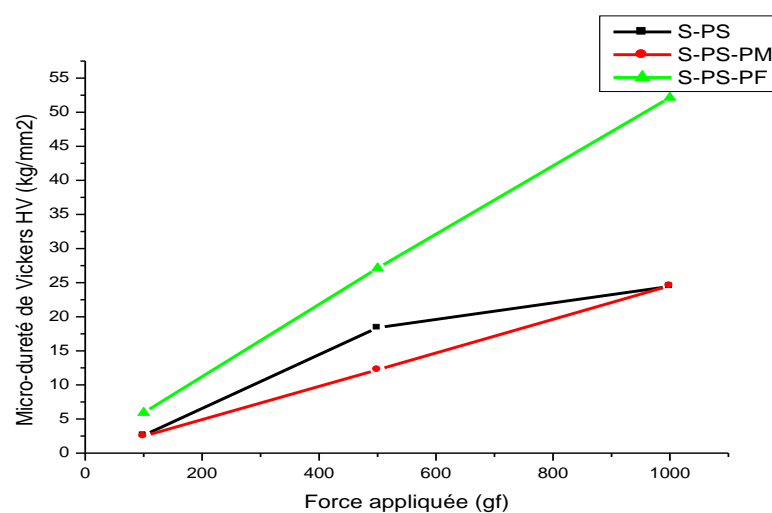


Figure II.13 : Représentation graphique de la force appliquée sur les trois échantillons S-PS, S-PS-PM et S-PS-PF en fonction de la micro-dureté de Vickers.

Selon la figure II.13 Et pour les échantillons dont la matrice est S-PS-PM, Il est clair que l'évolution de la micro-dureté n'est pas harmonieuse (même si elle est linéaire) lorsque nous sommes passés de la force appliquée 100 à 500 gf par rapport à celle de S-PS. Cette anomalie revient au fait que l'échantillon S-PS-PM n'a pas subi un polissage convenable, par conséquent, une détérioration locale de la surface (point de mesure) est inévitable dont la cause est la présence de petits pores. Cette détérioration fausse, bien évidemment, la mesure ainsi que le calcul qui en résulte.

Hors, l'évolution de la micro-dureté pour l'échantillon S-PS-PF est linéaire et n'exprime aucune anomalie non seulement par rapport à celles des autres échantillons mais aussi par rapport à l'évolution de la force appliquée.

Nous remarquons aussi pour les trois échantillons que la micro-dureté de Vickers augmente en augmentant la force appliquée.

II.3.2- Essai de la flexion

Nous avons réalisé cet essai à l'université Mohammed Seddik Benyahia-Jijel au sein du laboratoire de métallurgie du département de physique en utilisant l'appareil PASCO ME-8236 équipé d'un ordinateur afin de tracer les courbes de la force appliquée en fonction de la position (mm).



Figure II.14 : Appareil de flexion PASCO ME-8236.

L'essai est réalisé sur les échantillons étudiés. Un découpage à la scie à métaux est réalisé afin d'obtenir l'épaisseur nécessaire (exigée) pour la réalisation de ce dernier. Cette épaisseur (h) est bien évidemment mesurée, comme fut le cas pour la largeur (b) de l'échantillon et sa

longueur (l). Une fois placé sur les deux appuis de l'appareil (voir figure II.15), un poinçon se fait descendre manuellement jusqu'à la rupture de l'éprouvette. Cette opération est accompagnée par le traçage d'une courbe par l'ordinateur connecté. Après la rupture enregistre la courbe obtenue, la valeur maximale de la Force (N) est extraite afin de calculer la valeur de la contrainte en utilisant la relation suivante :

$$\sigma = (3.F.l) / (2.b.h^2)$$



Figure II.15: Epreuve en cour flexion.

Figure II.16 : Epreuves après rupture.

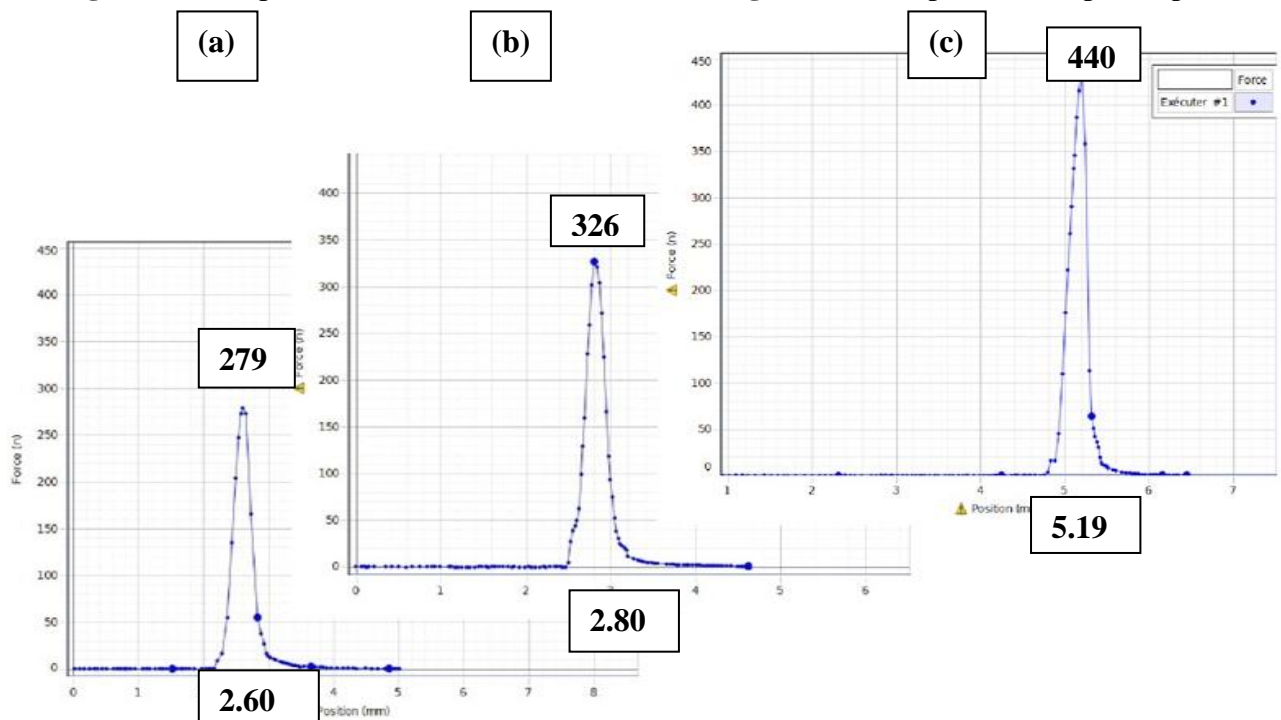


Figure II.17 : Courbes représentatives de la flexion mesurée des trois échantillons (a) : S-PS, (b) : S-PS-PM et (c) : S-PS-PF respectivement.

La figure II.17 présente les courbes qui expriment la flexion mesurée des trois échantillons S-PS, S-PS-PM et S-PS-PF respectivement. Selon les trois courbes enregistrées,

nous constatons que les trois échantillons ont le même comportement suite à l'essai de flexion. Ce comportement se traduit suite à l'intervention du poinçon ou une croissance suivie par une décroissance de la force exercée est observée. L'aspect de l'évolution de la force exercée ressemble à celui d'une fonction Lorentzienne

Nous constatons aussi, d'autre part, que la courbe correspondante à l'échantillon S-PS présente un début de flexion à la position 2.21 mm (avant cette valeur, le poinçon est au contact de la surface de l'échantillon sans aucune flexion) et une rupture au position 2.60 mm dont la force appliquée est égale à 279 N alors que pour l'échantillon S-PS-PM le début de la flexion est enregistrée à la position la position 2.49 mm tandis que la position de rupture est relevée à 2.80 mm dont la force appliquée enregistrée est de 326 N.

Concernant le troisième échantillon S-PS-PF, ce dernier a marqué les positions de début de flexion et de rupture les plus élevés et par conséquent la force appliquée par le poinçon est la plus élevée par rapport aux deux autres échantillons, a savoir, début de flexion : position 4.79 mm, rupture : position 5.19 mm et force appliquée 440 N.

En prenant compte des résultats au niveau des positions de début de flexion et de ruptures, nous constatons que l'échantillon dont PF est intégrée dans la matrice présente des valeurs supérieur a celles de l'échantillon S-PS-PM et quasiment le double de celle de l'échantillon S-PS (Voir Tableau II.8)

Caractéristiques /Echantillons	S-PS	S-PS-PM	S-PS-PF
h (mm)	10.37	9.63	10.4
b (mm)	32.47	34.08	32.20
l (cm)	3	3	3
Position de début de flexion	2.21	2.49	4.79
Position de rupture	2.60	2.80	5.19
F (N)	279	326	440
σ (N/mm ²)	3.595	4.641	5.685

Tableau II.8: Valeur des dimensions des éprouvettes, force maximale appliquée et contrainte.

II.3.3- Essai de la traction

Pour la réalisation de cet essai, l'éprouvette doit respecter des normes imposées au niveau de la forme ainsi qu'au niveau des dimensions (Largeur, épaisseur et longueur). La figure II.18 montre clairement l'éprouvette type considérée comme référence pour les éprouvettes préparées pour nos échantillons.



Figure II.18 : Eprouvette type en plastique pour la préparation du moule

Comme il nous était impossible d'avoir des éprouvettes (par découpage et/ou polissage) à partir des échantillons étudiés (préparée l'année dernière), nous étions dans

l'obligation de préparer les mêmes échantillons en suivant minutieusement les étapes de l'approche proposée pour leur obtention, a savoir :

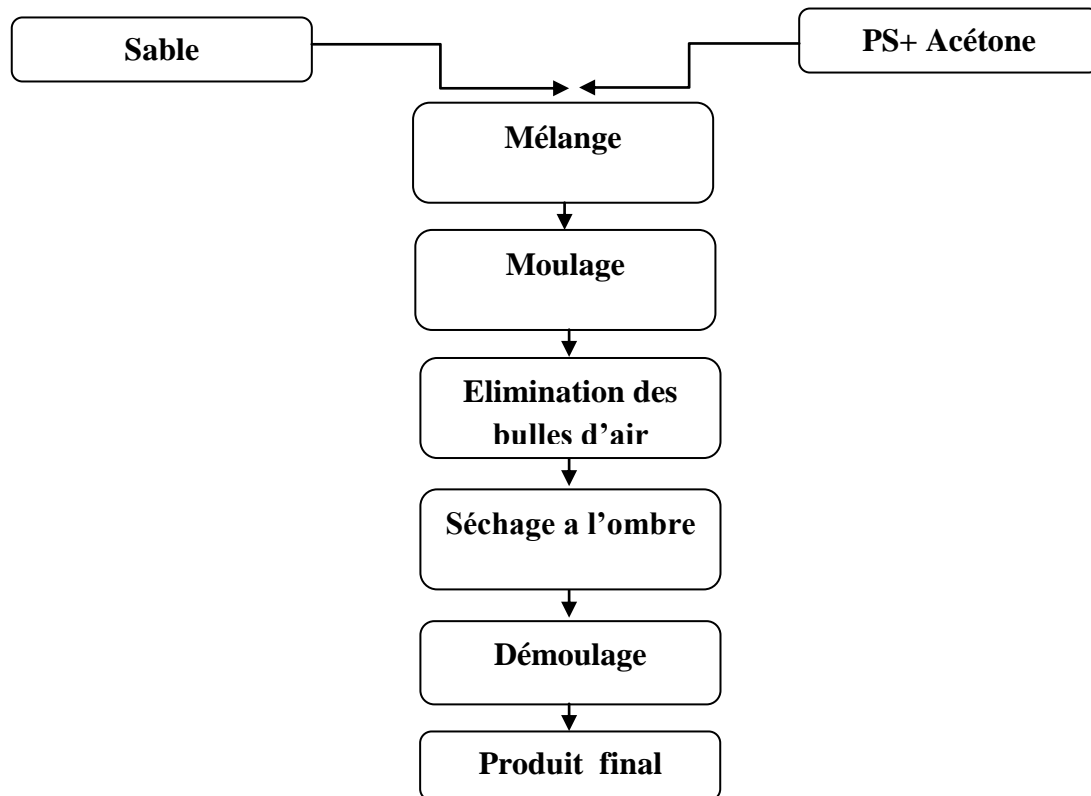


Figure II.19: Procédés de fabrication de l'échantillon S-PS.

A ce stade, le problème qui s'est imposé est au niveau de la conception d'un moule. Afin de surpasser ce problème, nous avons eu l'idée de fabriquer un en utilisant du savon Marseille ou la l'empreinte de l'éprouvette est sculptée. Cette opération s'est soldée par le résultat exprimée par la figure II.20a. Le choix du savon n'est pas pris au hasard. Il est basé, non seulement, sur la facilité de sculpter l'empreinte de l'éprouvette type mais aussi sur la récupération de l'éprouvette une fois séchée.



Figure II. 20 :(a) Empreinte de 'l'éprouvette type ' sculptée sur le savon. (b) moulage des échantillons.

Après avoir réalisé notre empreinte sur le savon, nous avons commencé à réaliser nos trois éprouvettes qui sont à base de S-PS, S-PS-PM et S-PS-PF suivant les proportions suivantes :

Pour les échantillons S-PS-PM et S-PS-PF

$$m(S) = 1.5 m(PS) \text{ et } m(PF) = 0.5 m(PS)$$

$$m(S) = 1.5 m(PS) \text{ et } m(PM) = 0.5 m(PS)$$

Pour l'échantillon S-PS

$$m(S) = 2 m(PS)$$

Une fois les échantillons séchés, nous avons constaté qu'ils sont facilement cassables au niveau de la partie droite qui se trouve entre les deux bouts, cet obstacle a faillit freiner l'investigation à ce niveau. Après longue réflexion et pour pouvoir surpasser ce problème, nous avons eu l'idée d'augmenter la dimension au niveau de l'épaisseur (par conséquent de l'éprouvette) et qu'une fois les échantillons sont séchés et récupérés, nous procéderons à un polissage pour retrouver l'épaisseur imposée. Après la mise en œuvre de cette idée, il s'est avéré que les échantillons dont la matrice est S-PS et S-PS-PM ont satisfait le but fixé, alors que ; paradoxalement, l'échantillon dont la poudre de fer est intégrée a présenté une cassure au niveau de la partie droite.



Figure II .21 : (a) Eprouvette obtenue après l'augmentation des épaisseurs et avant polissage.
(b) : Présentation de pores au niveau de la partie droite en forme de tunnel dans l'échantillon S-PS-PF.

Au niveau du polissage des échantillons obtenus après le moulage, il s'est avéré que ces derniers présentent une fragilité à l'action exécutée (et /ou cisaillement). Cette fragilité est accentuée par la présence de pores en forme de tunnel au niveau de la partie droite de l'éprouvette (voir figure II.22)



Figure II.22 : Pores en forme de tunnel au niveau de la partie droite des éprouvettes S-PS et S-PS-PM

Comme fut le cas de l'échantillon S-PS-PF durant le démoulage. Ce n'est qu'à ce moment que nous avons décidé de rester à ce stade expérimental.

Références Bibliographiques

[1] : M, YAGOUB. "Evaluation de la qualité du béton de fibres insitu cas du béton auto-plaçant avec des fibres mixtes" Magister. Université Mohamed KHIDER Biskra. p 50 (2009).

Liste des tableaux

Tableau	Page
Tableau II.1 : Paramètres météorologiques mensuels.	21
Tableau II.2 : Variations mensuels des masses des échantillons.	22
Tableau II.3 : Tableau matriciel du plan d'expérience factoriel type 2 ⁿ .	23
Tableau II.4 : Valeurs des contraintes appliquées sur chaque échantillon.	33
Tableau II.5 : Micro dureté de Vickers pour l'échantillon S-PS.	34
Tableau II.6 : Micro dureté de Vickers pour l'échantillon S-PS-PM.	35
Tableau II.7 : Micro dureté de Vickers pour l'échantillon S-PS-PF.	35
Tableau II.8 : Valeur des dimensions des éprouvettes, force maximale appliquée et contrainte.	39

Liste des figures

Figure	Page
Figure II.1 : Echantillon étudié avant leurs exposition au milieu naturel. (a) : S-PS, (b) : S-PS-PM et (c) : S-PS-PF.	20
Figure II.2 : Aspect de la surface des échantillons après 11 mois d'exposition au milieu naturel. (a) : S-PS, (b) : S-PS-PM et (c) : S-PS-PF.	20
Figure II.3 : Variation de la masse (m) en fonction de la précipitation (Pr).	24
Figure II.4 : Variation de la masse (m) en fonction de la température moyenne(T).	25
Figure II.5 : Variation de la masse (m) en fonction du temps.	25
Figure II.6 : Variation de la masse m en fonction de Pr, T et temps pour l'échantillon S-PS-PM.	27
Figure II.7 : Variation de la masse m en fonction de Pr, T et temps pour l'échantillon S-PS-PF.	28
Figure II.8 : Prise photographique des échantillons après cisaillement et polissage(a): S-PS, (b): S-PS-PM et (c): S-PS-PF.	29
Figure II.9 : Prise photographique des échantillons par microscope (zoom10). (a): S-PS, (b) : S-PS-PM et (c) : S-PS-PF.	30
Figure II.10 : Scléromètre a béton (SILVER SCHMIDT).	31
Figure II.11 : Zone des dix martèlements sur la surface de l'échantillon S-PS.	31
Figure II.12 : Micro-duromètre de Vickers AFFRI DM 2D 388 (Digital Micro hardness Tester).	34
Figure II.13 : Représentation graphique de la force appliquée sur les trois échantillons S-PS, S-PS-PM et S-PS-PF en fonction de la micro-dureté de Vickers.	35
Figure II.14 : Appareil de flexion PASCO ME-8236.	36

Figure II.15 : Epreuve en cour flexion.	37
Figure II.16 : Epreuves après rupture.	37
Figure II.17 : Courbes représentatives de la flexion mesurée des trois échantillons S-PS, S-PS-PM et S-PS-PF respectivement.	37
Figure II.18 : Epreuve type en plastique pour la préparation du moule.	39
Figure II.19 : Procédés de fabrication de l'échantillon S-PS.	40
Figure II. 20 : (a) Empreinte de l'épreuve type sculptée sur le savon. (b) moulage des échantillons.	40
Figure II .21 : (a) Epreuve obtenue après l'augmentation des épaisseurs et avant polissage. (b) : Présentation de pores au niveau de la partie droite en forme de tunnel dans l'échantillon S-PS-PF.	41
Figure II.22 : pores en forme de tunnel au niveau de la partie droite des épreuves S-PS et S-PS-PM.	42

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale et perspectives

Ce projet fin d'étude est consacré à la réalisation de certains nombre d'essais mécaniques sur trois échantillons du même matériau préparé à l'occasion d'une étude antérieure précédé par un suivi des échantillons étudiés durant onze mois (11) afin de statuer sur le vieillissement et la dégradation de ces derniers.

L'étude du vieillissement et la dégradation a révélé que parmi les échantillons suivis, le matériau dont la matrice est S-PS-PF présente un meilleur comportement et réaction face aux facteurs imposés par le milieu extérieur, plus explicitement, il n'y'a aucune détection d'une quelconque détérioration importante du matériau suite à son exposition à la pluie, à la variation de la température et en fonction de la durée de l'exposition (le temps).

Aucune fissure n'est détectée, aucune perte de masse considérable est a signalé et aucune déformation. Néanmoins, l'apparition de la rouille est signe révélateur d'une corrosion qui reflète la dégradation du matériau. Hors, l'échantillon S-PS présente une perte de masse et une détérioration de la surface et un peu moins pour le matériau dont la matrice est S-PS-PM.

De ce fait, le matériau contenant la poudre de fer est considéré comme le candidat favori pour l'application déjà exprimée durant l'étude antérieure. Les essais mécaniques réalisés sur les trois échantillons viennent conforter cette suggestion. En effet, l'essai de la micro-dureté pour le matériau candidat, et avec une mesure de 52.15kg/mm et 24.45 et 24.54 kg/mm Pour S-PS et S-PS-PM respectivement, il exprime une meilleure résistance au choc par rapport aux deux autres échantillons.

Pour l'essai de flexion, nous avons conclu que le matériau à base de poudre de fer présente le seuil le plus élevé de rupture, en d'autres termes, il présente la position de rupture la plus élongée par rapport à celles des échantillons à base de poudre de sable et poudre de marbre.

Hors, la réalisation de l'essai de la traction présente des contraintes majeur. La première rencontrée est au niveau du moulage pour l'obtention des éprouvettes avec les normes exigées. Ce problème contourné par l'élaboration d'un moule à savon a seulement permis l'obtention des éprouvettes avec la forme demandée. Ces dernières se présentent comme durs mais facilement cassables au niveau de leur partie droite. Cette fragilité à la cassure s'est accentuée par la présence de pores qui forment un tunnel le long des éprouvettes.

Après le suivi du vieillissement et dégradation du matériaux durant 11mois et avec l'épaulement des essais mécaniques réalisés, a savoir, dureté superficielle, micro-dureté et flexion, les résultats obtenus ainsi que les constats et les observations nous permettent de conclure que l'échantillon S-PS-PF est le candidat favoris pour une utilisation au niveau du parquet (élaboration de pavés). Nous recommandons, des pavés dont les dimensions soient inférieures à 337,5cm³.