

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التـعليم العـالي و
البحـث العـلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد
تلمسـان

Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Génie civil

Spécialité : Structures

Par :

Gourari Mohammed Salah Eddine

Dekar Mouad

Sujet :

Conception d'un pavé Autolumineux

Soutenu publiquement le /12/2023 devant le jury composé de :

Mme SAIL Latifa	Professeure	Univ. Tlemcen	Présidente
M HOUTI Brahim Farid	M.A.A.	ESSA. Tlemcen	Encadrant
M TALEB Omar	MCA	Univ. Tlemcen	Encadrant
M BENOSMAN Ahmed Soufiane	Professeur	Univ. Tlemcen	Examineur
M MAACHOU Omar	M.A.A.	Univ. Tlemcen	Examineur

Année universitaire : 2022/2023

Remerciements

*Nous remercions **ALLAH** le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme le présent travail.*

*Nous tenons tout d'abord à remercier chaleureusement nos encadrants **M. HOUTI Farid Brahim** et **Dr. TALEB Omar** pour leurs précieuses aides, leurs conseils éclairés et leur soutien constant tout au long de ce travail de recherche. Nous leurs sont profondément reconnaissants.*

*Nous tenons aussi à exprimer notre gratitude au **Pr. SAIL Latifa** qui nous a honoré en acceptant de présider le jury de soutenance.*

*Nous tenons aussi à exprimer nos vifs remerciements aux **Pr. BENOSMAN Ahmed Soufiane** et **M. MAACHOU Omar** pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'examiner ce modeste travail.*

*Nos remerciements s'adressent également à tous ceux et celles qui nous ont aidé à la réalisation de ce modeste travail, notamment l'équipe du laboratoire pédagogique de la faculté de technologie, l'équipe de i2E particulièrement **Mme BERBER Wafaa**, **Mr SOULIMANE Sofiane**, **Mr TAIBE Housine**, **Mr HENNAOUI Mustapha**, **Mr Hakim** et **Mme BOUKLIKHA Fadia** pour leurs disponibilités tout au long de ce projet*

Dédicaces

Je dédie ce projet de fin d'études à : mon binôme,

À mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

À mes chères sœurs pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral, À toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

Mes amis, **Bentenah Khalid** et zeryouh mohamed, Les personnes qui me sont les plus chères.

Tous les enseignants qui m'ont dirigé vers la porte de la réussite.

Toute la promotion de Génie civil 2022-2023

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible, Merci d'être toujours là pour moi.

DEKAR Mouad

Dédicace

Avec un grand respect, je dédie ce modeste Travail à :

Mes parents, qui ont sacrifié leurs vies pour notre bien, qui m'ont toujours encouragé et soutenu dans mes études jusqu'à atteindre ce stade de formation.

Ma sœur et mes trois frères **ANOUAR** et **AMINE** et **ISLEM**. Mon ami, mon binôme **DEKAR MOUAD**, avec qui j'ai partagé de merveilleux moments.

Tous mes amis, connaissances et tous ceux qui ont partagé ma joie en ce jour-ci.

Tous les enseignants qui m'ont dirigé vers la porte de la réussite.

Toute la promotion de Génie civil 2022-2023

Enfin, à tous ceux qui m'aiment.

GOURARI Mohammed Salah Eddine

Résumé

Les pavés auto-lumineux s'insèrent dans une nouvelle technologie prometteuse qui pourrait révolutionner l'éclairage urbain. Ils présentent plusieurs avantages notamment sur le plan de l'efficacité énergétique et de l'esthétique.

Dans cette étude, nous avons étudié la faisabilité de la fabrication de pavés auto-lumineux à base de matériaux phosphorescents et de résine. Nous avons réalisé une série de tests pour étudier les propriétés mécaniques et physiques de ce type de pavés. Nous avons aussi testé différents mélanges de résine et de produit phosphorescent.

Nous avons constaté que le mélange optimal est composé de 50 % de résine et de 50 % de produit phosphorescent. Ce mélange offre une luminosité uniforme et visible, ainsi qu'une durée d'effet relativement intéressante.

Cette étude montre que la fabrication de pavés auto-lumineux est techniquement possible et offre des avantages significatifs par rapport aux méthodes d'éclairage urbain traditionnelles, améliorant ainsi la sécurité économique, l'esthétique et l'écologique.

Mots clés : pavé, résine, produits phosphorescents, luminosité .

ملخص

إن البلاطات المضيئة ذاتيًا هي تقنية جديدة واعدة يمكن أن تغير ثورة في الإضاءة الحضرية. فهي تقدم العديد من المزايا، بما في ذلك الكفاءة في استخدام الطاقة والجمالية. في هذه الدراسة، قمنا بدراسة جدوى تصنيع البلاطات المضيئة ذاتيًا القائمة على المواد الفسفورية والراتنج. أجرينا اختبارات على الخصائص الميكانيكية والفيزيائية لهذه البلاطات. اختبرنا خلطات مختلفة من الراتنج والمنتج الفسفوري، وجدنا أن الخليط الأمثل يتكون من 50% راتنج و 50% منتج فسفوري. يوفر هذا الخليط سطوعًا موحدًا ومرئيًا، بالإضافة إلى فترة تأثير نسبيًا طويلة. تُظهر هذه الدراسة أن تصنيع البلاطات المضيئة ذاتيًا ممكن تقنيًا ويقدم مزايا كبيرة مقارنة بطرق الإضاءة الحضرية التقليدية.

كلمات مفتاحية: بلاطة, راتنج, منتج فسفوري, سطوع

Abstract

Self-illuminating paving stones are a promising new technology that could revolutionize urban lighting. They offer several advantages, including energy efficiency, and aesthetics. In this study, we investigated the feasibility of manufacturing self-illuminating paving stones based on phosphorescent materials and resin. We conducted tests on the mechanical and physical properties of these paving stones. We tested different mixtures of resin and phosphorescent product, We found that the optimal mixture is composed of 50% resin and 50% phosphorescent product. This mixture provides uniform and visible brightness, as well as a relatively long duration of effect. This study shows that the manufacture of self-illuminating paving stones is technically feasible and offers significant advantages over traditional urban lighting methods.

Keywords: Paving stone, Resin, Phosphorescent product, Brightness.

Liste des tableaux

Tableau 1 : choix du pavage en fonction du trafic (CERIB-FIB).....	9
Tableau 2 : Épaisseur nominale minimum pour les pavés.....	10
Tableau 3 : Écarts admissibles sur les caractéristiques géométriques.....	10
Tableau 4 : produits et matériaux pour préparer SrAl ₂ O ₄ :Eu ²⁺ ,Dy ³⁺	17
Tableau 5 : Caractéristiques physiques et mécaniques des granulats.....	24
Tableau 6 : Matériels pour formulation du béton.....	25
Tableau 7 : Formulation du pavé.....	26
Tableau 8 : Luminosité selon la quantité du produit phosphorescent a résine et ciment blanc.....	29

Liste des figures

Figure 1 : machines de fabrication de pavé en béton	5
Figure 2 : pavés en pierre	6
Figure 3 : Pavés rectangulaires	6
Figure 4 : Pavés à emboîtement	7
Figure 5: pavés autobloquants à emboîtement et épaulement.....	7
Figure 6 : Exemples de pavés autobloquants unidirectionnels	8
Figure 7 : Exemples de pavés autobloquants multidirectionnels	8
Figure 8 : Couleur de l'émission de luminescence en fonction de la longueur d'onde	11
Figure 9 : SrAl ₂ O ₄ :Eu ²⁺ pulvérulent sous (a) lumière visible ou (b) sous UV dans le noir, et (c) saphir sous lumière visible	13
Figure 10 : Mécanisme de phosphorescence	14
Figure 11 : Mécanisme de phosphorescence	14
Figure 12 : Niveaux électroniques localisés participant à la phosphorescence	15
Figure 13 : Dépiégeage localisé d'un électron (a,b) direct ou (c) via la bc	16
Figure 14: Dépiégeage d'un électron entre le niveau piège et un niveau excité de l'activateur par(b) effet tunnel ou (a) non.....	16
Figure 15 : Diagramme de flux schématique pour la synthèse de phosphores SrAl ₂ O ₄ : Eu ²⁺ , Dy ³⁺ via une voie sol-gel.....	19
Figure 16 : résine époxy[19]	20
Figure 17 : matériaux utilise	23
Figure 18 : pavé SARL BOU SAADA [21]	26
Figure 19 : le mélange de béton	27
Figure 20 : serrage des pavés	27
Figure 21: Pavé Confectionné (198×98×60 mm ³ (D=50,ep=8))	27
Figure 22 : résine époxy	28
Figure 23 : produit phosphorescent	28
Figure 24 : Verser le mélange dans la partie supérieure de l'espace creux du pavé	29
Figure 25 : essai traction par fendage	30
Figure 26 : immersion d'échantillons dans l'eau	32
Figure 27 : résultat du la résistance par apport la charge de rupture.....	
Figure 28 : étuvation d'échantillons	32
Figure 29 : les masses des pavés immersion et a l'étuve	
Figure 30 : Matériaux pour essai de l'adhérence	34
Figure 31 : Extractomètre	34
Figure 32 : Les échantillons après essai de l'adhérence:	35
Figure 33 : résultats d'essai de l'adhérence	
Figure 34 : Rupture cohésive Rupture du support La force d'adhérence est supérieure à la valeur d'essai	37
Figure 35 : La durée de la luminosité du pavé	37
Figure 36 : La luminosité du pavé avant et après 10s de chargement	38

Liste des abréviations

Symboles	Désignations
UV	Ultraviolet
<i>IR</i>	Infrarouge
Eu	Europium
BC	Bande de Conduction
Dy	Dysprosium
Sr	Strontium
BV	Bande de Valence

Sommaire

<i>Remerciement</i>	i
Dédicace	ii
Résumé	iii
Introduction Générale	1
Chapitre 1	2
Généralités	2
Partie A : Généralités sur les pavé	3
1.1 Historique :	3
1.2 Définition de pavé :	3
1.3 Méthode de fabrication de pavé de trottoir	3
1.3.1 Préparation des matériaux	3
1.3.2 Fabrication du béton	3
1.3.3 Cure du béton	4
1.3.4 Retrait des pavés des moules	4
1.3.5 Stockage des pavés	4
1.3.6 Pose des pavés	4
1.3.7 Entretien des pavés	4
1.4 Les machines de fabrication de pavés en béton:	5
1.5 Type des pavés :	5
1.5.1 les pavés en pierre (naturelle ou reconstitué) :	6
1.5.2 Les pavés en béton :	6
1.6 Normes sur la fabrication des pavés en béton:	8
1.7 Caractéristiques de pavé selon NF EN 1338 :	9
Partie B : matériaux phosphorescents	10
1.1 L'historique des matériaux phosphorescents	10
1.2 Définition de la luminescence	11
1.3 Définition de la phosphorescence	12
1.4 Couleurs d'émission	12
1.5 Mécanisme de phosphorescence	13

1.5.1 Conditions à l'existence de la phosphorescence	14
1.5.2 Mécanisme de dépiégeage	15
1.6 Le matériaux phosphorescent $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+},\text{Dy}^{3+}$	16
1.6.1 Les produit chimique et matériaux utiliser pour prépare le $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+},\text{Dy}^{3+}$:	17
1.6.2 le mode opératoire de préparation de $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+},\text{Dy}^{3+}$	18
1.7 Dentition de résine époxy :	19
Conclusion	20
Chapitre 2	22
Méthode d'essais Résultats et discussion	22
2.1 Introduction	23
2.2 Confection des pavés	23
2.2.1 Matériaux utilisés	23
2.2.2 Matériels utilisés :	25
2.2.3 Formulation du pavé :	25
2.2.4 Réalisation pavé :	26
2.3 Confection de la résine lumineuse	28
2.3.1 Matériaux utilisés	28
2.3.2 Mélange	29
2.4 Tests réalisés	30
2.4.1 Essais mécanique et physique :	30
2.4.1.1 Traction par fendage:.....	30
2.4.1.2 Absorption d'eau :	30
2.4.1.3 Essai d'adhérence:.....	33
2.4.2 Essais de phosphorescence	36
➤ La luminosité	36
2.6 Conclusion	37
Conclusion générale.....	39
Référence bibliographique	41
Annexe BMC:	44

Introduction Générale

Introduction générale

Les avancées technologiques dans le domaine des matériaux ont ouvert la voie à des innovations dans divers secteurs. Parmi celles-ci, l'utilisation de matériaux phosphorescents pour créer des pavés auto lumineux représente une révolution prometteuse dans l'industrie de la construction et de l'aménagement urbain. Ces pavés offrent la possibilité d'introduire des éléments esthétiques et fonctionnels, apportant une nouvelle dimension à l'environnement urbain en offrant une luminescence naturelle et durable.

Le concept des pavés auto-lumineux repose sur l'exploitation de matériaux phosphorescents capables d'absorber et de stocker l'énergie lumineuse du soleil ou d'autres sources lumineuses artificielles, pour ensuite la restituer sous forme de lumière visible pendant une période prolongée dans des conditions de faible luminosité[14].

Notre objectif est donc d'étudier l'utilisation de matériaux phosphorescents dans les pavés en examinant leurs résistances mécaniques, leur comportement vis à vis d'immersion dans l'eau et leur luminosité dans l'obscurité. Les matériaux utilisés dans cette étude comprennent le ciment, le sable et le gravier pour la confection du pavé, la résine époxy et l'aluminate de strontium avec différentes substitutions en masse (20%,50%) pour la réalisation du produit lumineux

Le mémoire est divisé en deux chapitres distincts :

- ❖ Le premier chapitre présente en détail le pavé, mettant en lumière ses caractéristiques physiques, mécaniques et sa structure. La seconde partie offre un aperçu non exhaustif des matériaux phosphorescents et de la résine époxy, en expliquant leur fonctionnement conjoint.
- ❖ Le second chapitre se concentre sur la phase expérimentale, détaillant la méthodologie employée pour la formulation et la préparation des pavés composites en combinant des matériaux phosphorescents avec de la résine époxy. Ce chapitre présente également les résultats obtenus, leur analyse ainsi que leur comparaison avec d'autres données conformes à la norme.

Enfin, le mémoire sera clôturé par une conclusion succincte et des perspectives

Chapitre 1

Généralités

Partie A : Généralités sur les pavés

1.1 Historique :

Les pavés ont été utilisés pour la première fois par les Romains dans les voies romaines. Au Moyen Âge, les premières mentions de chaussées en pavées remplaçant les rues en terre battue dans les villes coïncident avec l'essor urbain du XIIe siècle et le développement du trafic commercial qui dégrade les voies mal protégées [1].

1.2 Définition du pavé :

Selon le "Dictionnaire de l'architecture et de la construction" de Cyril M. Harris, un pavé est "un élément plat et souvent rectangulaire utilisé pour les revêtements de sol tels que les trottoirs, les allées, les patios et les rues". Les pavés peuvent être fabriqués à partir de différents matériaux tels que le béton, la pierre naturelle, l'argile ou la brique, et peuvent être assemblés de différentes manières pour créer une surface solide et durable [2].

1.3 Méthode de fabrication des pavés de trottoir

La fabrication des pavés de trottoir consiste à fabriquer des blocs de béton qui seront ensuite utilisés pour paver les trottoirs. Le processus de fabrication peut être divisé en six étapes principales :

1.3.1 Préparation des matériaux

Les matériaux doivent être conformes aux spécifications du DTU 21.1. Le ciment CEM I 42,5 est généralement utilisé. Le sable et le gravier doivent être naturel alluvionnaire ou de rivière. L'eau doit être propre [3].

1.3.2 Fabrication du béton

Les matériaux secs sont mélangés dans une bétonnière pendant au moins 2 minutes. L'eau est ensuite ajoutée progressivement jusqu'à ce que le mélange atteigne la consistance souhaitée.

La consistance du béton doit être telle qu'il soit possible de le couler dans les moules sans qu'il ne déverse ou ségrégue. [3]

1.3.3 Cure du béton

Le béton doit être laissé pendant au moins 24 heures avant d'être démoulé. La cure peut être réalisée en recouvrant le béton d'une bâche ou d'un film plastique.[3]

1.3.4 Démoulage des pavés

Les pavés doivent être retirés des moules délicatement pour éviter de les endommager. Les pavés peuvent être laissés sur le chantier pendant quelques jours pour que le béton termine de durcir.[3]

1.3.5 Stockage des pavés

Les pavés doivent être stockés à l'abri des intempéries jusqu'à leur utilisation. Les pavés peuvent être stockés sur une palette ou directement sur le sol, en prenant soin de les protéger des chocs.[3]

1.3.6 Pose des pavés

La pose des pavés doit être réalisée conformément au DTU 21.1. Les pavés doivent être posés sur un lit de sable ou de gravier. Les pavés doivent être posés à la même hauteur et doivent être joints avec un joint de sable ou de mortier.

1.3.7 Entretien des pavés

Les pavés doivent être entretenus régulièrement pour conserver leur aspect et leur durée de vie. Les pavés doivent être nettoyés avec un balai ou un jet d'eau. Les pavés peuvent être traités avec un produit hydrofuge pour les protéger des intempéries.[4]

1.4 Les machines de fabrication de pavés en béton :

Les machines de fabrication de pavé en béton (Figure1) sont des machines industrielles qui servent à fabriquer des pavés en béton. Elles sont utilisées dans le secteur de la construction pour la réalisation de trottoirs, chaussées, parkings, etc. [5].



Figure 1 : Machines de fabrication de pavé en béton [6]

Les machines de fabrication de pavé en béton sont généralement composées des éléments suivants :

- **Un système de dosage** : il permet de doser les différents composants du béton (ciment, sable, gravier, eau) selon la recette souhaitée.
- **Un système de mélange** : il permet de mélanger les différents composants du béton pour obtenir une masse homogène.
- **Un système de compactage** : il permet de compacter le béton dans le moule pour lui donner la forme souhaitée.
- **Un système de démoulage** : il permet de retirer le pavé du moule.

1.5 Type des pavés :

Voici quelques exemples de pavés, où chacun possède ses propres particularités et applications :

1.5.1 Pavés en pierre (naturelle ou reconstitué) :

Ils Proviennent des roches (figure 2) tel que le granit, le gneiss, le porphyre, le basalte, le grès, le calcaire et le marbre.



Figure 2 : pavés en pierre [7]

1.5.2 Pavés en béton :

Ils sont fabriqués en étant moulés dans des formes régulières, ce qui leur permet de s'emboîter parfaitement les uns dans les autres, éliminant ainsi le besoin de joints.

Les pavés en béton sont de trois types :

1.5.2.1 Les pavés classiques : Ils sont inspirés des pavages traditionnels (Figure 3) en pierres naturelles et adoptent des formes généralement simples tel que le rectangle, le carré, le cercle et l'hexagone. Ils ne sont pas auto-verrouillant et leurs côtés opposés sont généralement plats et parallèles [8].

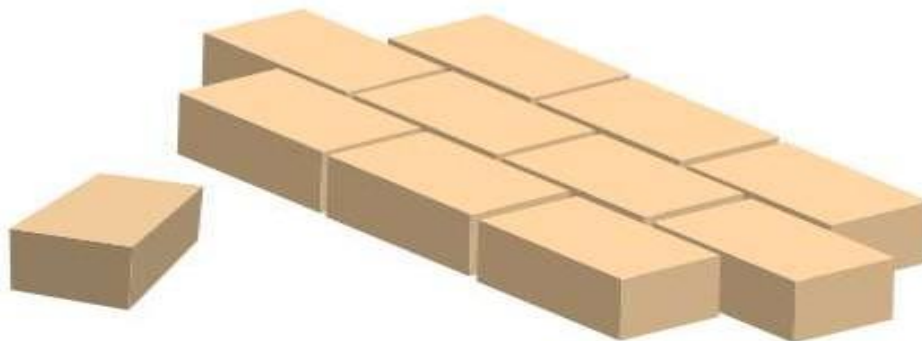


Figure 3 : Pavés rectangulaires [8]

1.5.2.2 Les pavés autobloquants à emboîtement : Les pavés autobloquants sont le résultat d'une amélioration des pavés traditionnels (Figure 4). Leurs formes sont conçues de

manière à assurer une liaison horizontale entre les éléments du revêtement une fois qu'ils sont installés. On distingue deux types de pavés autobloquants : ceux qui permettent un verrouillage dans une seule direction (unidirectionnels) (Figure 6) et ceux qui permettent un verrouillage dans plusieurs directions (multidirectionnels) (Figure 7) [8].

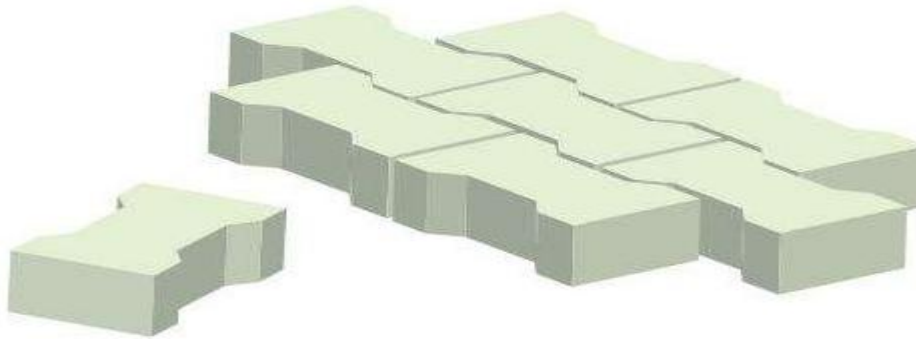


Figure 4 : Pavés à emboîtement [8]

1.5.2.3 Les pavés autobloquants à emboîtement et à épaulement : Leur forme est conçue de manière à permettre une liaison à la fois horizontale et aussi verticale entre les éléments du pavage une fois installés (Figure 5) [8].

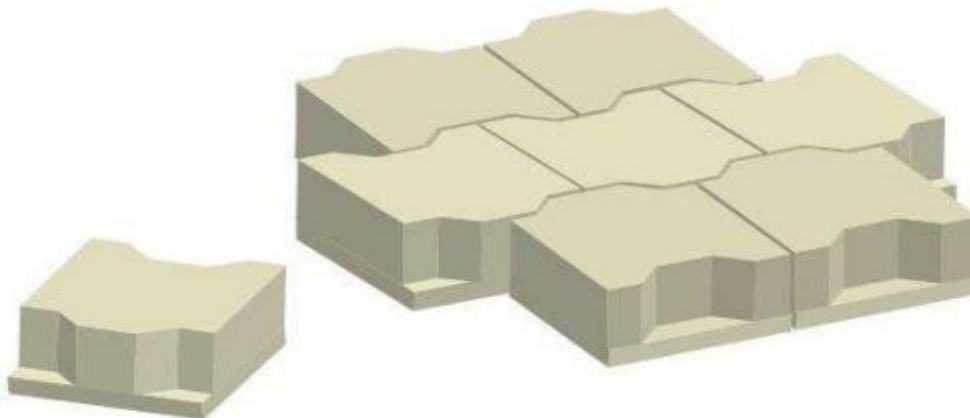


Figure 5 : pavés autobloquants à emboîtement et à épaulement [8]

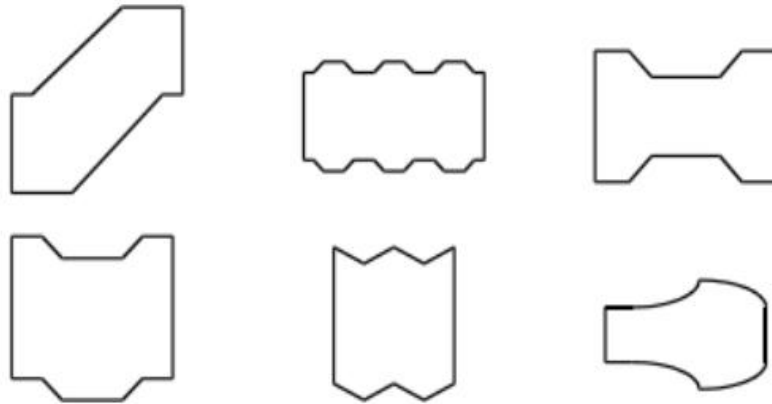


Figure 6 : Exemples de pavés autobloquants unidirectionnels [8]

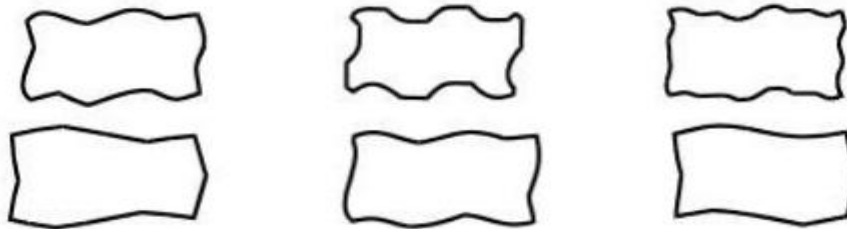


Figure 7 : Exemples de pavés autobloquants multidirectionnels [8]

Rappelons que l'auto-blocage est plus efficace lorsque la forme des pavés présente des lignes discontinues de joints courts.

La forme des pavés autobloquants apporte l'avantage du non glissement des éléments. Ils peuvent alors être posés dans des secteurs en pente ou dans des courbes [8].

1.6 Normes sur la fabrication des pavés en béton :

Les pavés sont conformes aux normes NF P 98-303, P 98-305, et NF P 98-306, qui sont basées sur les pratiques de fabrication traditionnelles. Ces normes imposent des tolérances dimensionnelles, une résistance minimale à la rupture, une bonne résistance à l'usure et une capacité à résister aux intempéries.

- Les normes spécifient des tolérances pour les dimensions de fabrication, avec des écarts acceptables de (+3) mm pour l'épaisseur totale et (+2) mm pour les autres dimensions.
- Les pavés doivent avoir un coefficient d'absorption d'eau qui ne dépasse pas 5,4%. Aucun résultat individuel ne doit être supérieur à 5,7%.

- La résistance à la rupture par fendage des pavés doit être d'au moins 4,0 MPa (40 bars).
- La résistance à l'usure des pavés doit être telle que la longueur d'empreinte individuelle ne dépasse pas 25 mm

L'épaisseur des pavés varie en fonction de l'utilisation prévue du revêtement, mais leur longueur reste constante.

Le CERIB et la FIB ont préconisé des épaisseurs du pavage en fonction du trafic (Tableau 1) :

Tableau 1 : choix du pavage en fonction du trafic (CERIB-FIB) [9]

Épaisseur du pavage	Classe du trafic
6 à 8 cm	1 et 2
8 à 10 cm	3
10 à 13 cm	4 et 5

En 2004, l'Association Française de Normalisation a homologué une nouvelle norme pour les pavés en béton, la norme NF EN 1338 [4] (Indice de classement : 98-338). Cette norme remplace les normes précédentes NF P 98-303 de juillet 1988, NF P 98-306 de décembre 1989 et la norme expérimentale P 98-305 d'août 1994. La norme NF EN 1338 [4], actuellement appliquée en l'Algérie, définit de nouvelles valeurs acceptables en ce qui concerne les caractéristiques géométriques, physiques, mécaniques et visuelles des pavés en béton.

1.7 Caractéristiques de pavé selon NF EN 1338 :

Les pavés peuvent être de type mono béton ou bi-couche, avec des bétons différents pour la couche de parement et la semelle. Dans le cas des pavés bi-couches, la couche de parement doit avoir une épaisseur minimale de 4 mm

La géométrie des pavés joue également un rôle dans leur résistance au trafic, qui est influencée par l'épaisseur des produits. Ainsi, il est important de vérifier deux paramètres : l'épaisseur nominale minimale des pavés (Tableau 2), et les tolérances dimensionnelles de manière générale [4].

Tableau 2 : Épaisseur nominale minimum pour les pavés [4]

Classe de trafic	Utilisation de pavés béton	Épaisseur minimum des pavés (mm)
T5	Courante	60
T4		80
T3		80
T2	Nécessite une étude détaillée	100
T1		100

Toutefois les dimensions déclarées doivent rester dans les tolérances fixées par le texte normatif

Ainsi, pour la longueur, la largeur et l'épaisseur des pavés rectangulaires, les écarts admissibles sont fixés et sont présentés dans le tableau 3 :

Tableau 3 : Écarts admissibles sur les caractéristiques géométriques [4]

Épaisseur du pavé (mm)	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Épaisseur (mm)
< 100	±2	±2	±3
≥ 100	±3	±3	±4
La différence entre deux épaisseurs sur un même pavé doit être de ≤ 3 mm			

Partie B : matériaux phosphorescents

1.1 L'historique des matériaux phosphorescents

Les matériaux phosphorescents sont des matériaux qui absorbent de l'énergie et la restituent sous forme de lumière. Ils sont utilisés dans de nombreuses applications, notamment les écrans, les montres et les jouets.

Les premiers matériaux phosphorescents ont été découverts au XVII^{ème} siècle. En 1603, le chimiste Allemand Johann Kunckel a observé que le sulfure de zinc émettait de la lumière

lorsqu'il était exposé à la lumière du soleil. Au cours des siècles suivants, de nombreux autres matériaux phosphorescents ont été découverts, notamment le calcium sulfuré, le strontium sulfuré et le tungstène [10].

Au début du XX^{ème} siècle, les matériaux phosphorescents ont commencé à être utilisés dans des applications commerciales. En 1912, la compagnie américaine General Electric a commencé à produire des montres à aiguilles phosphorescentes. Ces montres étaient équipées d'une peinture à base de sulfure de zinc dopé au radium, qui émettait de la lumière pendant plusieurs heures après avoir été exposée à la lumière [10].

Les matériaux phosphorescents ont une longue histoire, remontant au XVII^{ème} siècle. Ils sont utilisés dans de nombreuses applications et continuent de se développer.

1.2 Définition de la luminescence

La luminescence est une forme d'émission lumineuse qui peut être visible (de 380 à 770 nanomètres) selon la figure 8 ou non (ultraviolet, infrarouge, etc.), qui est produite par la relaxation radiative d'états excités et dont l'excitation n'est pas d'origine thermique. Différents types de luminescence existent en fonction de la nature de l'excitation, tels que la photoluminescence (induite par des rayonnements X, UV, visible ou infrarouge), la cathodoluminescence (induite par un bombardement électronique), la radioluminescence (induite par des radiations nucléaires α , β ou γ), l'électroluminescence (induite par un champ électrique ou par injection), la triboluminescence (induite par des contraintes mécaniques), la chimie- ou bioluminescence (induite par des réactions chimiques), et la sonoluminescence (induite par des ondes acoustiques). Toutefois, l'incandescence ne fait pas partie de la définition de la luminescence. En outre, il convient de noter que la thermoluminescence, décrite plus loin dans le texte, correspond simplement à une stimulation thermique de la luminescence résultant de l'une des sources d'excitation susmentionnées [11].

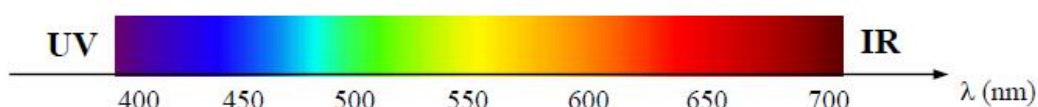


Figure 8 : Couleur de l'émission de luminescence en fonction de la longueur d'onde [12]

1.3 Définition de la phosphorescence

La phosphorescence est un phénomène lumineux qui se produit lorsque certaines substances continuent d'émettre de la lumière après avoir été exposées à une source d'énergie, telle que la lumière du soleil ou une lumière artificielle [13]. Contrairement à la fluorescence, qui cesse dès que la source d'énergie est retirée, la phosphorescence peut persister pendant plusieurs heures, voire plusieurs jours.

1.4 Couleurs d'émission

La couleur perçue par l'œil dépend de la position et de la forme du spectre d'émission lumineuse dans le domaine visible, tel que montré dans (la figure 9). Si plusieurs pics sont présents, les couleurs s'additionnent pour donner une couleur perçue globale. La longueur d'onde de l'émission dépend de la nature de la transition et des espèces chimiques impliquées, ainsi que de l'environnement chimique des ions. Les transitions 4f-4f des terres rares Ln^{3+} sont peu sensibles à l'environnement, tandis que les transitions 4f-5d de Eu^{2+} ou Ce^{3+} sont influencées par le champ cristallin et la covalence des liaisons activateur-ligands, qui augmentent avec une diminution de la taille du cation substitué et de la coordinence du site. Dans notre environnement quotidien, la coloration dite chimique est principalement due à l'absorption sélective de certaines longueurs d'onde du spectre visible et à la réflexion des autres, tandis que la coloration dite physique est due à des phénomènes tels que la diffusion, la réfraction, la diffraction ou les interférences. Contrairement aux autres phénomènes de coloration, la luminescence implique des photons qui ne font pas partie du spectre incident. En conséquence, l'intensité de la luminescence est généralement plus faible que celle de la diffusion pour les luminophores pulvérulents observés à la lumière naturelle, mais peut être observée avec des cristaux où la réflexion est moins importante. (La figure 9.a, b et c) illustrent respectivement la couleur d'un luminophore sous lumière naturelle, sous excitation UV et avec des cristaux [11].

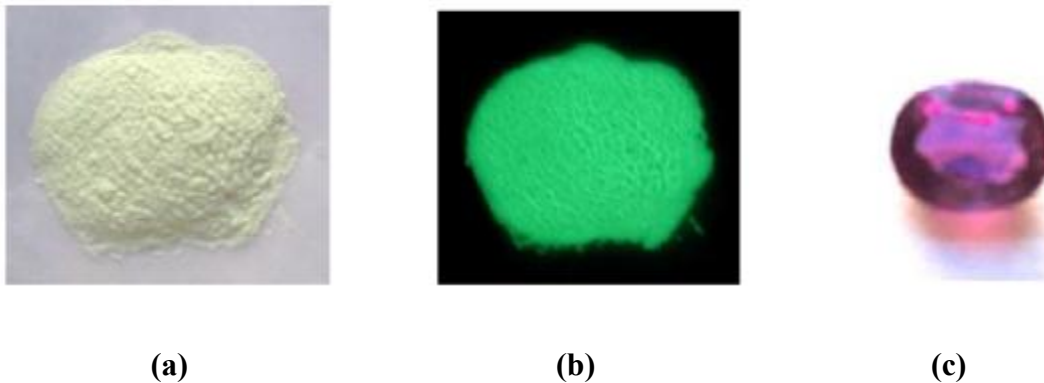


Figure 9 : $\text{SrAl}_2\text{O}_4 : \text{Eu}^{2+}$ pulvérulent sous (a) lumière visible ou (b) sous UV dans le noir, et (c) saphir sous lumière visible [12].

1.5 Mécanisme de phosphorescence

Le mécanisme de phosphorescence diffère de celui de fluorescence en raison d'un phénomène de piégeage des électrons et/ou des trous formés lors de l'excitation du luminophore. À température ambiante, l'énergie thermique permet un dépiégeage progressif des porteurs de charge piégés, ce qui diffère la recombinaison radiative. (La figure 10) illustre le mécanisme de piégeage d'un électron via la bande de conduction (BC). Lorsque le centre luminescent est excité, l'électron est délocalisé dans la BC. En cours de migration dans la bande, l'électron peut se trouver à proximité d'un défaut déficitaire en électron, sur lequel il se désexcite de manière non radiative. Cet état métastable persiste jusqu'à ce qu'une énergie suffisante soit fournie à l'électron pour qu'il retourne dans la BC. Dans le cas de la phosphorescence, l'énergie thermique à température ambiante est suffisante pour permettre le retour progressif des électrons dans la BC. Lorsque l'électron retourne dans la BC, il peut se retrouver à proximité du centre luminescent, où il se désexcite de manière non radiative avant de se recombiner radiativement avec le trou resté sur le niveau fondamental.[13] Toutefois, l'électron peut également être repiéagé par un autre piège pendant cette étape de retour

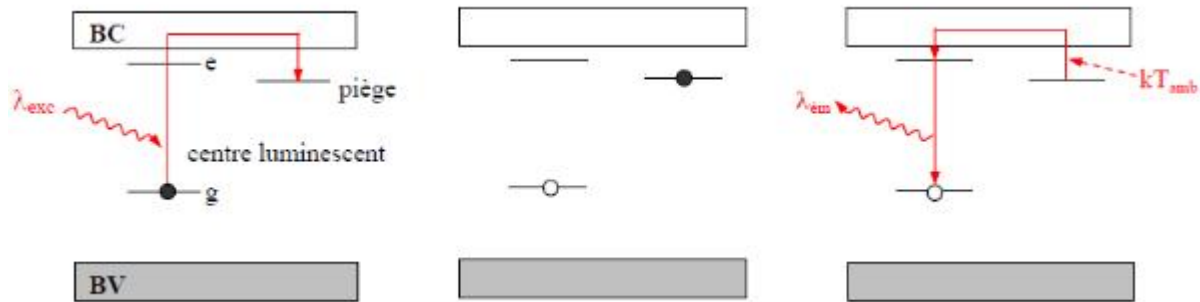


Figure 10 : Mécanisme de phosphorescence [12]

Même mécanisme peut être représenté sur les courbes de configuration (Figure 11).

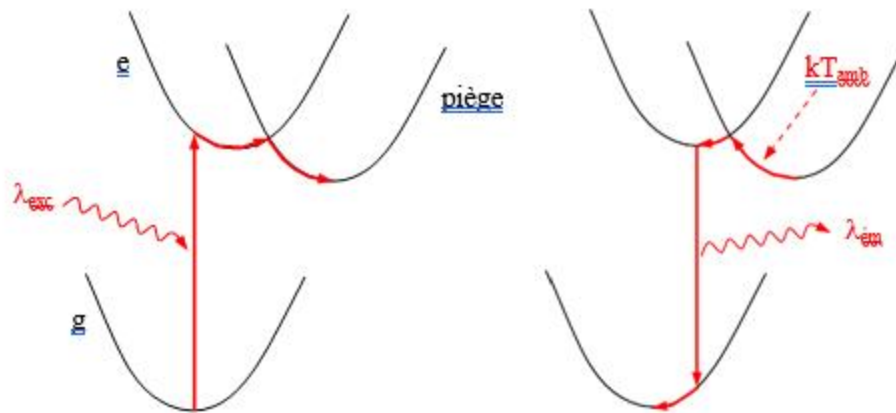


Figure 11 : Mécanisme de phosphorescence [12]

1.5.1 Conditions à l'existence de la phosphorescence

La phosphorescence est un phénomène qui nécessite la présence de défauts introduisant des niveaux discrets dans la bande interdite, comme illustré dans (la Figure12). En effet, tous les matériaux phosphorescents connus contiennent un activateur (généralement Eu^{2+} , Ce^{3+} , Eu^{3+} ou Mn^{2+}), ainsi qu'un défaut supplémentaire qui peut participer à l'émission lorsque le centre luminescent n'est pas le centre de recombinaison des charges piégées, par exemple dans le cas d'un transfert d'énergie. Cette présence d'un défaut piège distingue la fluorescence de la phosphorescence. Le piégeage peut avoir lieu sur des niveaux donneurs situés juste en-dessous de la bande de conduction (pièges à électrons), sur des niveaux accepteurs situés juste au-dessus de la bande de valence (pièges à trous), ou sur les deux en parallèle si le gap est suffisamment petit.

La profondeur du piège est déterminée par l'énergie séparant le niveau piège de la bande et est notée E_T [13]. Cette énergie correspond à l'énergie nécessaire pour libérer la charge piégée, ce qui correspond à une énergie d'activation.

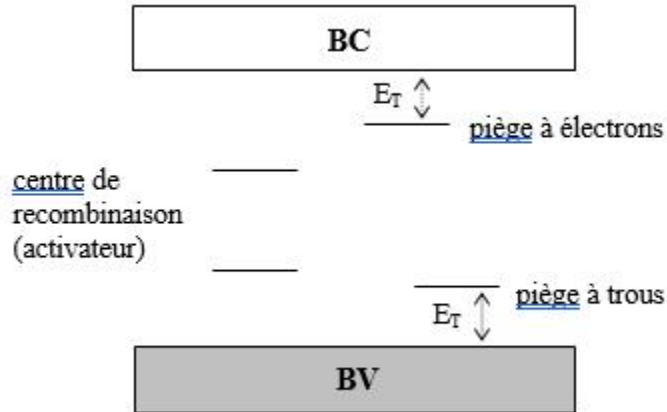


Figure 12 : Niveaux électroniques localisés participant à la phosphorescence [12]

1.5.2 Mécanisme de dépiégeage

Le transfert des porteurs de charge entre le centre de recombinaison et le piège peut se produire de deux manières : par migration dans les bandes ou via un processus localisé qui nécessite une proximité spatiale entre l'activateur et le piège associé, comme le propose Mc Keever. Selon l'auteur, le transfert de l'électron d'un état excité du piège vers le niveau fondamental du centre luminescent est possible (Figure 13.a), mais la recombinaison directe du niveau fondamental du piège vers celui de l'activateur reste rare. Cependant, un processus similaire mais beaucoup plus probable est envisageable, avec le transfert de l'électron piégé vers un niveau excité de l'activateur (Figure 13.b et Figure 14.a). Ce mécanisme est autorisé par les orbitales 5d étendues et 4f internes des centres luminescents Eu^{2+} ou Ce^{3+} . Le transfert peut également s'effectuer par un processus d'effet tunnel assisté thermiquement avec la profondeur a et b (Figure 14.b) [13].

Mc Keever a également proposé un autre processus basé sur la déformation locale de la structure due à la proximité des défauts. Dans ce cas, l'électron promu du piège vers la bc ne peut pas se délocaliser loin du défaut et se recombine sur l'activateur proche, ce qui élimine la

conductivité (Figure 13.c). La notion de proximité entre l'activateur et le piège dépend de l'extension spatiale des orbitales impliquées et du processus de dépiégeage.

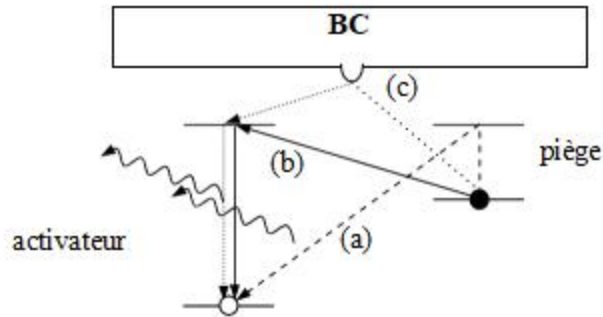


Figure 13 : Dépiégeage localisé d'un électron (a,b) direct ou (c) via la bc[12]

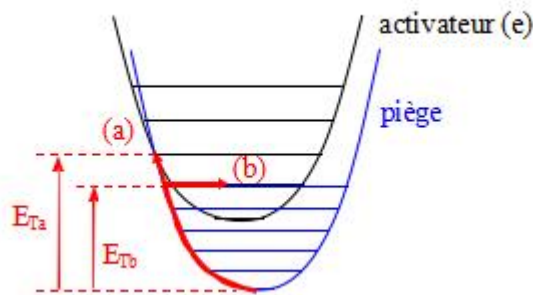


Figure 14 : Dépiégeage d'un électron entre le niveau piège et un niveau excité de l'activateur par (b) effet tunnel ou (a) non [12].

1.6 Le matériaux phosphorescent $\text{SrAl}_2\text{O}_4 : \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$

Le matériau d'aluminate de strontium dopé aux ions europium (Eu^{2+}) et dysprosium (Dy^{3+}), $\text{SrAl}_2\text{O}_4 : \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ est un matériau phosphorescent qui est utilisé dans diverses applications telles que les panneaux de sortie de secours, les horloges lumineuses, les indicateurs de sécurité, etc.






Le SrAl_2O_4 est un composé cristallin le plus efficace qui est dopé avec des ions Eu^{2+} et Dy^{3+} . Lorsque ce matériau est exposé à une source de lumière, les ions Eu^{2+} absorbent l'énergie lumineuse et passent à un état excité. Ensuite, les ions Eu^{2+} réémettent une partie de l'énergie sous forme de lumière visible, ce qui donne la luminescence. Les ions Dy^{3+} sont utilisés comme

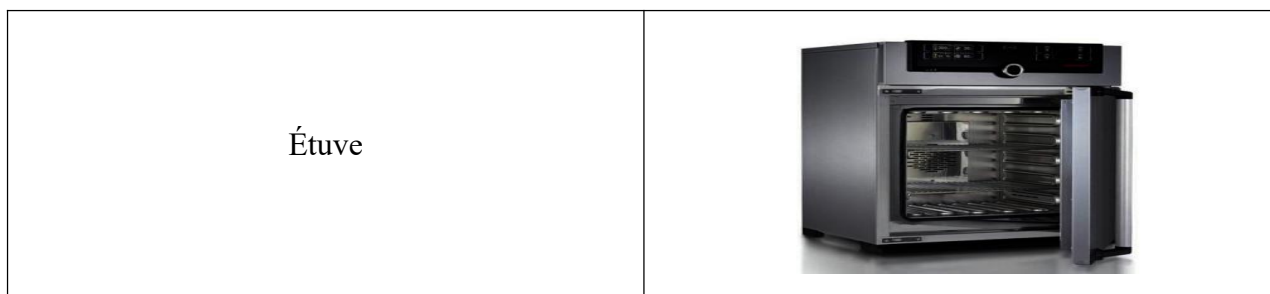
co-dopants pour améliorer l'efficacité de la luminescence et prolonger la durée de la phosphorescence.

1.6.1 Les produits chimiques et matériaux utilisés pour préparer le $\text{SrAl}_2\text{O}_4 : \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$:

Les produits chimiques nécessaires pour préparer le $\text{SrAl}_2\text{O}_4 : \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ sont présentés dans le (Tableau 4)

Tableau 4 : produits et matériaux pour préparer $\text{SrAl}_2\text{O}_4 : \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$

Produits chimiques et matériaux	Photos
Oxyde d'euporium(III) Eu_2O_3 (99,99 %)	
Oxyde de dysprosium Dy_2O_3 (99,9 %)	
Sr $(\text{CH}_3\text{CO}_2)_2 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ (99 %)	
Al $(i\text{-OC}_3\text{H}_7)_3$ (99 %)	
Éther monoéthylique de glycol	



1.6.2 Le mode opératoire de préparation de $\text{SrAl}_2\text{O}_4 : \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$

Les matériaux de départ utilisés étaient de l' Eu_2O_3 (99,99 %), du Dy_2O_3 (99,9 %), du Sr $(\text{CH}_3\text{CO}_2)_2 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ (99 %) et de l' $\text{Al}(\text{i-OC}_3\text{H}_7)_3$ (99 %). L'isoproxyde d'aluminium a été dissous dans de l'éther monoéthylique de glycol à 80°C. Les oxydes d'Eu, de Dy et d'acétate de strontium ont été dissous respectivement dans de l'acide nitrique concentré et de l'eau désionisée, puis les deux solutions ont été mélangées avec une stœchiométrie molaire de 0,96 :0,04 :0,04 pour Sr/Eu/Dy. Du glycérol a été ajouté en tant qu'additif à la solution aqueuse mixte pour éviter la précipitation indésirable d' $\text{Al}(\text{OH})_3$ due à l'hydrolyse de l'isoproxyde d'aluminium, puis la solution d'isoproxyde d'aluminium a été ajoutée goutte à goutte tout en remuant vigoureusement. La solution précurseur a été agitée à température ambiante pendant une heure supplémentaire, puis chauffée à 60°C pendant 12 heures. Après hydrolyse et condensation, les gels blancs préparés ont été séchés à 180°C pendant 24 heures, calcinés dans un four à atmosphère d'air à des températures comprises entre 900 et 1250°C pendant 4 heures, respectivement. Enfin, les poudres ont été chauffées à 1200°C pendant 2 heures dans une atmosphère réductrice pour assurer une conversion complète d' Eu^{3+} en Eu^{2+} [14]. Le processus sol-gel dans ce travail est résumé dans un diagramme de flux illustré à (la figure 15).

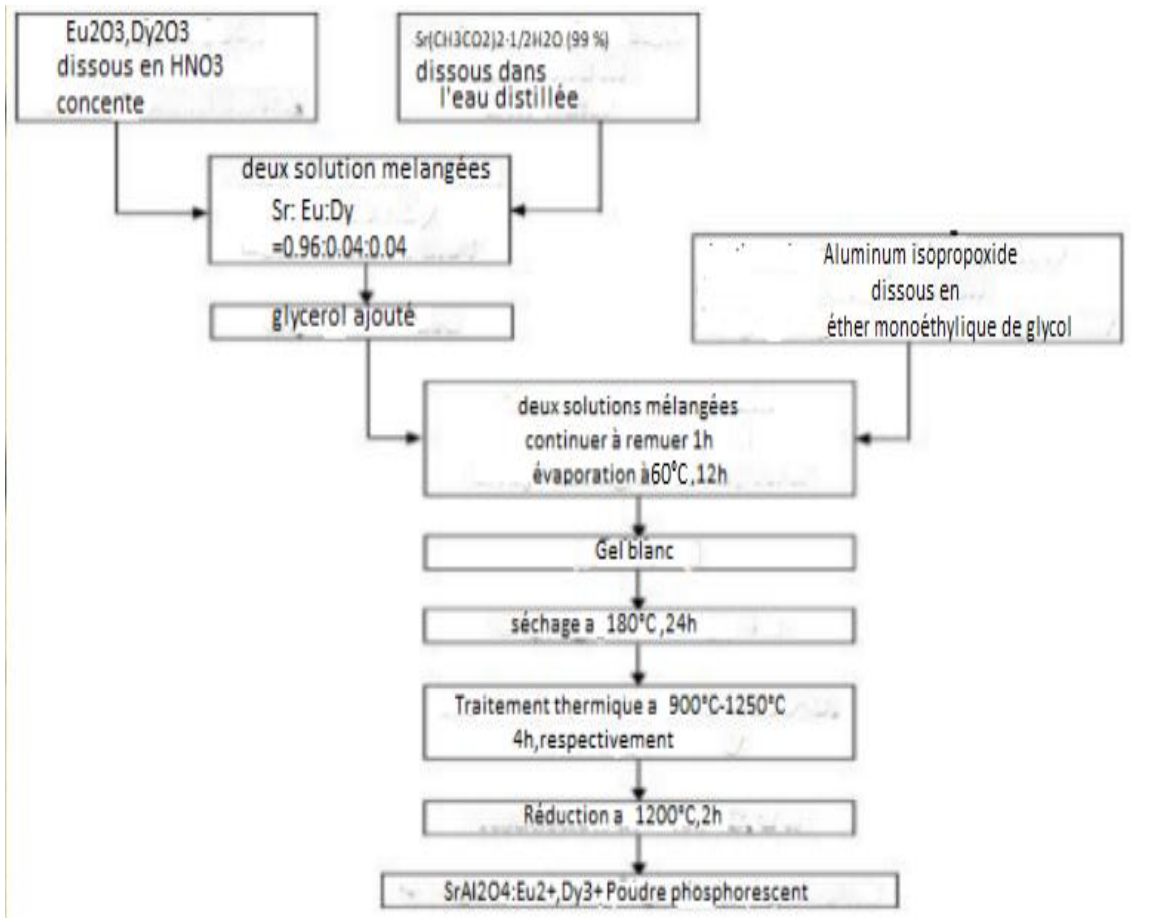


Figure 15 : Diagramme de flux schématisant la synthèse de phosphores $\text{SrAl}_2\text{O}_4 : \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ via une voie sol-gel [14]

1.7 Définition de la résine époxy :

La résine époxy, également connue sous le nom de polyépoxyde, est un polymère liquide thermodurcissable constitué de deux composants : la résine elle-même et un durcisseur. Une fois mélangée selon les dosages indiqués, ces composants réagissent pour former un film de peinture très résistant, présentant de bonnes propriétés mécaniques et chimiques.

La résine époxy (Figure 16) est généralement utilisée pour recouvrir des surfaces en béton, offrant une excellente résistance aux chocs, aux rayures, à l'abrasion, aux usures répétitives, ainsi qu'aux agressions chimiques, tels que les acides, les bases, les solvants et autres produits chimiques en général [15].

Elle est également utilisée dans la fabrication de composites avec des fibres de verre ou de carbone, ainsi que dans la personnalisation de meubles en bois, la fabrication de tables rivière, les revêtements de sol décoratifs, les bijoux et les applications artistiques [16].

La résine époxy est un produit industriel nécessitant des précautions d'emploi en raison de sa toxicité et de son potentiel allergène [17].



Figure 16 : résine époxy [18]

Conclusion

En conclusion, la conception des pavés constitue un processus complexe, requérant une attention minutieuse portée à diverses caractéristiques telles que la géométrie, la structure, les aspects fonctionnels et esthétiques. Les pavés doivent être robustes face aux charges de trafic, aux conditions météorologiques, à l'usure et aux agents chimiques tout en préservant leur attrait esthétique.

Les normes européennes, telles que la NF EN 1338 [4] pour les pavés en béton et la norme EN 12616 pour les pavés en pierre naturelle, énoncent des critères essentiels tels que les caractéristiques géométriques, la résistance à l'abrasion, au glissement, à la traction et au fendage.

Le choix du matériau de pavage doit prendre en compte l'usage prévu, l'esthétique recherchée et sa durabilité sur le long terme.

Une conception adéquate de pavés peut non seulement améliorer l'aspect visuel et fonctionnel d'un espace, mais également fournir une surface robuste et durable pour les piétons et les véhicules. En définitive, la conception de pavés doit respecter les normes et exigences en termes de résistance, de durabilité et d'esthétique pour assurer la sécurité et la longévité des surfaces pavées.

Dans notre étude, nous avons exploré l'utilisation du matériau phosphorescent SrAl_2O_4 : Eu^{2+} , Dy^{3+} et de résine époxy afin d'accroître la luminosité des pavés.

Chapitre 2

Méthodes d'essais ,

Résultats et discussion

2.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des matériaux utilisés pour la confection des pavés et l'incorporation du produit phosphorescent. Les méthodes d'essais, l'analyse et l'interprétation des résultats du programme expérimental ont été présentées, qui ont pour objectif d'étudier l'effet des matériaux phosphorescent avec différents taux de remplacement sur la résine époxy

Les résultats obtenus des différents tests physiques, mécaniques et thermiques effectués sur les pavés à l'état durci, sont présentés et discutés.

Ensuite, des essais sur le pavé autolumineux ont été menés pour voir l'intensité et la durée de luminosité

2.2 Confection des pavés

2.2.1 Matériaux utilisés

Les pavés étudiés sont confectionnés à partir du ciment CEM II/A 42.5, les granulats (sable 0/1 et 0/3) et gravier (3/8), eau de gâchage (voir figure 17).



Figure 17 : Matériaux Utilisés

2.2.1.1 Ciment :

Nous avons utilisé le ciment composé CEM II/A 42.5, fabriqué par la société des ciments de Béni-Saf (Ain-Temouchent), conforme à la norme algérienne NA 442.

2.2.1.2 Les granulats :

Les granulats utilisés dans la confection des pavés sont :

- ✓ Sable fin 0/1 et grossier 0/3 provenant de la carrière du groupe FAYMED MAZARI, situé dans la Wilaya de Tlemcen
- ✓ Gravier 3/8, provenant de la carrière BENDIMRED, située dans la wilaya de Tlemcen.

Le tableau 5 présente les caractéristiques physiques et mécaniques des granulats utilisés, les résultats proviennent du rapport du LTPO Tlemcen [19]




Tableau 5 : Caractéristiques physiques et mécaniques des granulats [19]

Désignation	Normes	Sable MAZARI	Gravier 3/8 BENDIMRED
Coef. D'aplatissement	NA256/90	-	9
Masse volum.Absolue (T/m ³)	-	2.76	2.69
Masse volum. Appar (T/m ³)	-	1.76	1.46
Propreté (%)	-	-	1.44
Equivalent de sable	NFEN933-8+A1	61	-
Teneur en fines (%)	-	10	-
Module de finesse	-	3.35	-
Los Angeles (%)	NFEN1097-2	-	20
Micro-Deval (%)	NFEN1097-1	-	9
Granulométrie Refus Tamisât D	NFP18-304	-	18
Tamisât à d			10

2.2.2 Matériels utilisés :

Le matériel utilisé dans la confection des pavés est présenté dans le (Tableau 6).

Tableau 6 : Matériels pour la confection des pavés

Matériels	Photos
Table vibrante	
Balance électrique	
Moule utilisé : (198×98×60) mm, (D=50, e=8) mm	

2.2.3 Formulation du pavé :

Nous avons adopté une formulation de pavé basée sur nos recherches dans plusieurs usines de fabrication de pavé dans la région de Tlemcen (voir tableau 7)

En ce qui concerne les dimensions du pavé, nous avons adopté celle réalisé par MULTI BETON BOU SAADA. (Figure 18.), longueur 198 mm, largeur 98 mm et épaisseur 60 mm [20]

Tableau 7 : Formulation du pavé

Matériaux (g)	Provenance	Poids kg
Ciment 42.5	GICA	400
Sable 0/1	Mazari	858
Sable 0/3	Mazari	257
Gravier 3/8	Bendimred	944
Eau	/	200 litres



Figure 18 : Pavé SARL BOU SAADA [20]

2.2.4 Réalisation pavé :

Le malaxage manuel s'effectue selon les étapes suivantes :

La première étape consiste à mélanger le sable 0/1, 0/3 à sec pendant 30 secondes.

On ajoute la quantité de ciment et on mélange pendant 30 secondes. Ensuite le gravier 3/8 est ajouté. On mélange jusqu'à obtenir un mélange homogène.

On verse la quantité totale de l'eau et on mélange jusqu'à obtenir une bonne texture (figure 19).



Figure 19 : le mélange de béton

Une fois le mélange homogène obtenu, il est versé dans le moule de dimensions (198 x 98 x 60) mm³ en trois couches. Chaque couche est vibrée pendant 5 s (figure 20).



Figure 20 : serrage des pavés

Après le décoffrage (figure 21), la cure des échantillons s'est faite à l'aire libre dans les conditions du laboratoire.



Figure 21 : Pavé Confectionné (198×98×60 mm³ (D=50 mm, ép=8mm))

2.3 Confection de la résine lumineuse

2.3.1 Matériaux utilisés

Pour la confection du produit lumineux, nous avons utilisé :

Résine époxy : (La figure22)

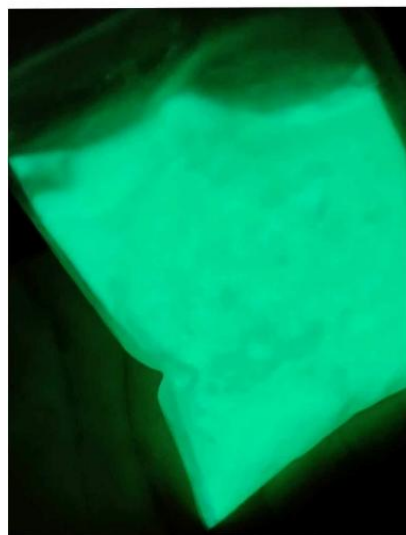


Figure 22 : résine époxy

Produit phosphorescent : La poudre lumineuse est une poudre à base de pigments qui s'illumine dans le noir. Elle est composée de matériaux qui absorbent la lumière et la restituent sous forme de luminescence. Pour que la poudre lumineuse brille dans le noir, il est nécessaire de l'exposer à une source de lumière, comme une LED, le soleil ou une lumière UV. (La figure 23 (a) et (b))



(a) : lumière du jour



(b) : la nuit

Figure 23 : produit phosphorescent

2.3.2 Mélange

Nous avons réalisé trois mélanges du produit lumineux, l'un avec le ciment blanc et les deux autres avec la résine.

- 1) 50 % de produit phosphorescent et 50 % de ciment blanc
- 2) 20 % de produit phosphorescent et 80 % de résine époxy.
- 3) 50 % de produit phosphorescent et 50 % de résine époxy.




Nous avons versé le mélange dans la cavité en haut du pavé (figure 24)



Figure 24 : Versement du mélange dans la partie supérieure de l'espace creux du pavé

Le Tableau 8 présente la luminosité obtenue pour les différents mélanges étudiés

Tableau 8 : Luminosité selon la quantité du produit phosphorescent à résine et ciment blanc

	Quantité du produit phosphorescent	Luminosité	Photo
Résine	50 %	Bonne	
	20 %	Moyenne	
Ciment blanc	50%	Faible et dispersée et disparate	

Résine lumineuse (50%) : bonne luminosité uniforme

Résine lumineuse (20%) : moyenne luminosité uniforme

Ciment blanc (50%) : faible luminosité et disparate

Choix :

Nous avons adopté le mélange 1 (50% de résine + 50% produit phosphorescent) parce que le produit obtenu présente une bonne luminosité uniforme, visible et la durée d'effet et relativement importante

2.4 Tests réalisés

2.4.1 Essais mécanique et physique :

2.4.1.1 Traction par fendage

L'essai de traction par fendage est un test qui permet de mesurer la résistance d'un matériau à la fissuration sous l'action d'une force de traction. Le matériau est placé entre deux plaques d'appui, et une force est appliquée de manière à provoquer une fissure. La résistance à la traction par fendage est alors calculée par la **norme EN 1338 :2003** [4]

La valeur de la contrainte de rupture à la traction par fendage a été obtenue par calcul.

$$T = 0.637 \times k \times \frac{P}{S} (\text{kg/m}^3)$$

$$S = L \times t$$

La figure 25 présente l'essai de traction par fendage.



Figure 25 : essai traction par fendage

La figure 26 présente les résultats du test traction par fendage.

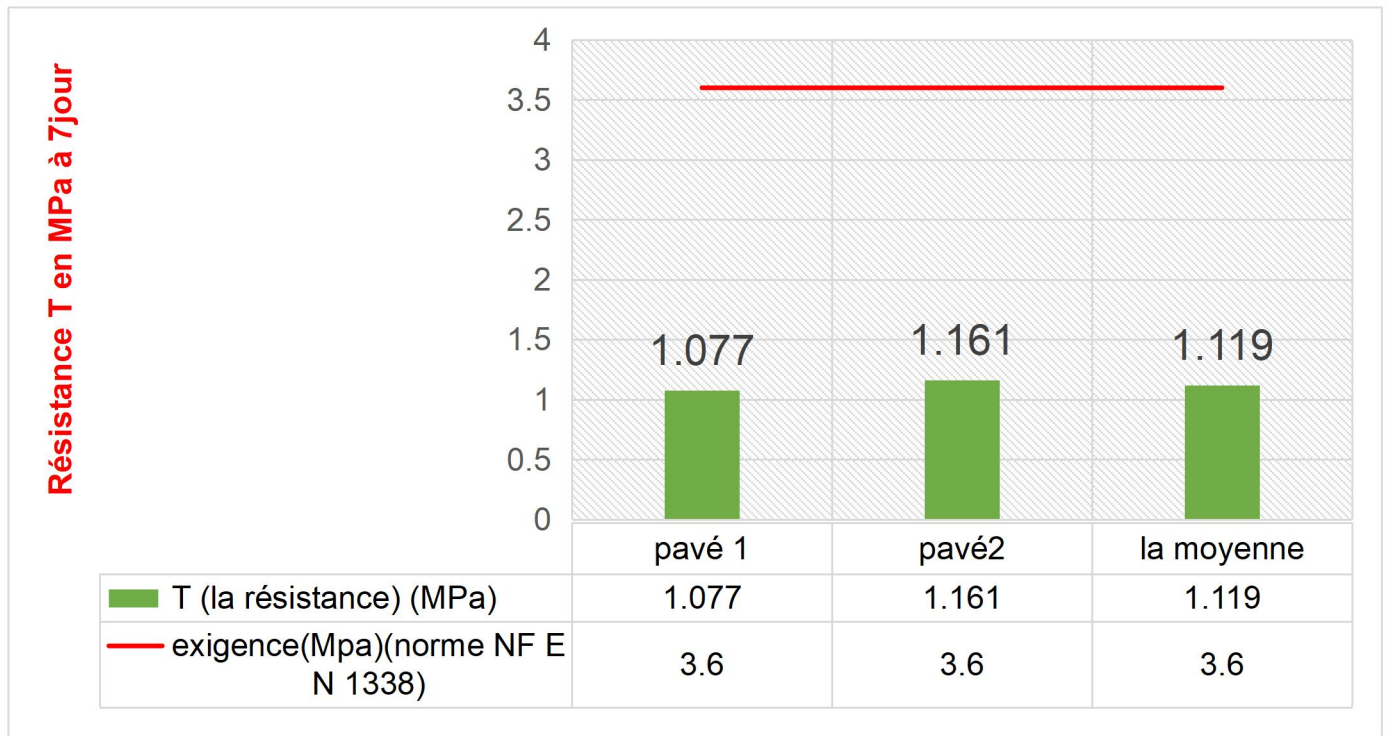


Figure 26 : Résultat de la résistance par rapport à la charge de rupture

Le résultat de l'essai de traction par fendage obtenu (1,119 MPa) est inférieur à la valeur minimale requise par la norme NF EN 1338 [4] (3,6 MPa). Les résultats de l'essai de traction par fendage peuvent varier en raison de plusieurs facteurs, notamment :

- La qualité du matériau utilisée dans l'essai peut être un facteur qui explique des résultats inférieurs aux exigences de la norme. Le matériau peut ne pas répondre aux spécifications de la norme ou présenter des défauts qui réduisent sa résistance.
- La méthode d'essai est un facteur important qui peut affecter les résultats. Il est important de s'assurer que la méthode a été correctement suivie, en particulier en ce qui concerne les conditions de charge, la vitesse de charge et la préparation de l'échantillon. Des erreurs dans la procédure d'essai peuvent entraîner des résultats incorrects.
- L'état de l'échantillon testé est un facteur important qui peut affecter les résultats. L'échantillon doit être représentatif du matériau utilisé dans la pratique et ne présenter aucun défaut ni de zone faible. La présence d'un trou dans la résine peut être considérée comme un défaut, car il peut affaiblir la résistance de l'échantillon.

Les conditions environnementales lors de l'essai peuvent influencer sur les résultats, notamment en termes de température et d'humidité.

2.4.1.2 Absorption d'eau :

L'absorption d'eau est importante car elle affecte la résistance, la durabilité et l'apparence des pavés. Les pavés qui absorbent beaucoup d'eau sont plus susceptibles de se fissurer, de se déformer, de se tacher ou de se corroder. L'essai d'absorption d'eau est réalisé selon une **norme EN 1338 :2003 [4]** qui définit les conditions de préparation des éprouvettes,

Immersion dans l'eau :

Les échantillons doivent être immergés dans l'eau à une température de $(20\pm 5)^{\circ}\text{C}$ (Figure 26) jusqu'à l'obtention d'une masse constante M_1 . La norme EN 1338 : 2003 [4] indique une durée d'immersion de 24 heures.



Figure 27 : immersion des échantillons dans l'eau



Figure 28 : Disposition des échantillons dans l'étuve

Le pourcentage d'absorption est donné par la formule suivante :

$$W_a = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100\%$$

Où :

M_1 : est la masse initiale de l'éprouvette en grammes.

M_2 : est la masse finale de l'éprouvette en grammes.

Calculer le rapport entre la masse de l'eau absorbée par l'éprouvette et la masse initiale de l'éprouvette, puis exprimer ce rapport en pourcentage

La Figure 29 illustre les changements de poids pour les échantillons de pavés.

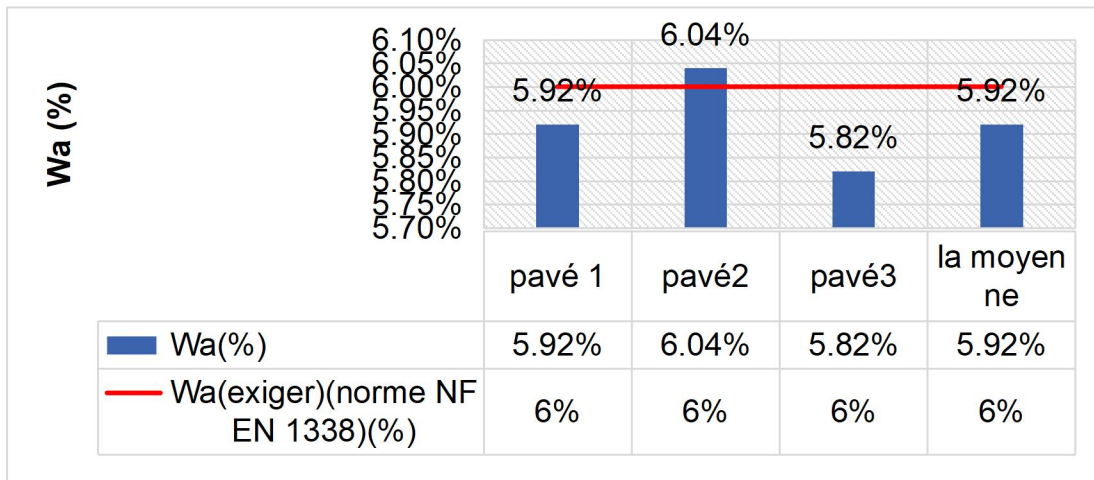


Figure 29 : les masses des pavés immersion et a l'étuve

La moyenne des résultats d'absorption d'eau sur trois pavés est : $W_a(\text{moyenne}) = 5.92\%$

- L'absorption d'eau des pavés testés est conforme à la norme NF EN 1338[4], qui fixe une limite maximale de 6 %.
- L'absorption d'eau est une propriété importante des matériaux de construction, car elle peut affecter leur durabilité et leur résistance aux intempéries

2.4.1.3 Essai d'adhérence

Pour la réalisation de cet essai, les échantillons de résine sont prélevés par carottage de 50 mm de diamètre figure. Le carottage est effectué 24 heures avant l'essai et doit traverser toute l'épaisseur de la résine jusqu'au support. Les pastilles en aluminium sont ensuite collées sur la surface de la résine carottée à l'aide d'une colle époxy (A et B) (figure30 (a)).

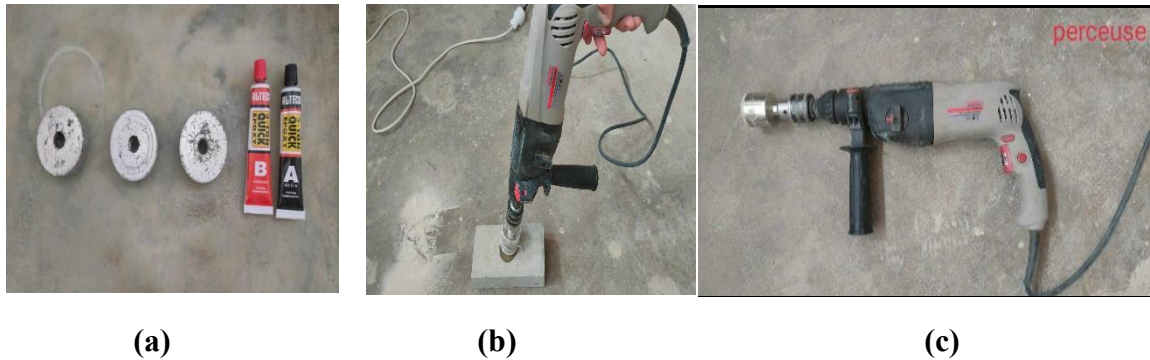


Figure 30 : matériaux pour essai de l'adhérence

Après avoir collé les pastilles, on les fixe sur une rotule mâle. Cette rotule vient ensuite se loger dans une rotule femelle située à la base de l'axe central de l'appareil d'essai d'adhérence figure31. Le test d'arrachement consiste à appliquer une force croissante sur la rotule mâle, perpendiculairement à la surface de la pastille, jusqu'à ce que la résine se détache du support [21].



Figure 31 : Extractomètre

L'adhérence de la résine sur le support est mesurée en divisant la force nécessaire pour arracher la résine du support par la surface de la pastille

$$f_u = \frac{F_u}{A}$$

f_u : L'adhérence (MPa)

F_u : est la force maximale de rupture [N]

A : Est la surface de la pastille en [mm²]

La figure 32 présente les échantillons après arrachement



Figure 32 : les échantillons après l'essai d'adhérence :

La Figure 33 illustre les résultats obtenus.

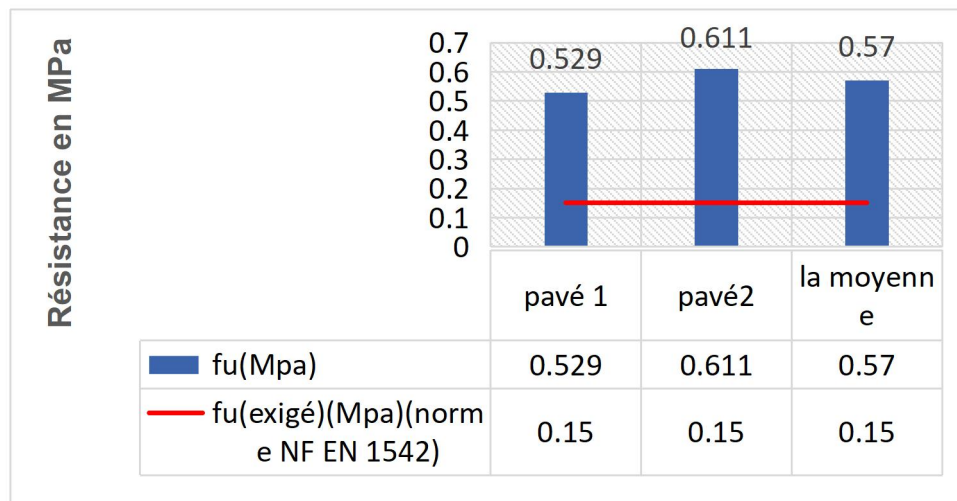


Figure 33 : résultats d'essai de l'adhérence

Le résultat obtenu de l'essai d'adhérence satisfait aux exigences minimales imposées par la norme EN 1542 [21] (0,15 N/mm²). La rupture observée est de nature cohésive (figure 34).



Figure 34 : Rupture cohésive

2.4 .2 Essais de phosphorescence

➤ La luminosité

Une autre méthode pour effectuer le test de la durée de la luminosité consiste à exposer le matériau luminescent à une source de lumière connue et à mesurer la diminution de la luminosité du matériau au fil du temps. Les résultats du test de la durée de la luminosité sont généralement exprimés en heures, minutes ou secondes.

▪ Procédure :

- Nous avons exposé le pavé sous le soleil pendant quelque minute ‘3 à 5 mn.
- Les échantillons sont ensuite placés dans une chambre sombre.
- On prend des photos chaque heure pendant les 3 premières heures et ensuite chaque demi-heures.

Le test de phosphorescence a révélé une durée de phosphorescence de 5 heures. De plus, cette durée de phosphorescence demeure inchangée même après une exposition du matériau à une charge pendant 5 minutes (figure 35).

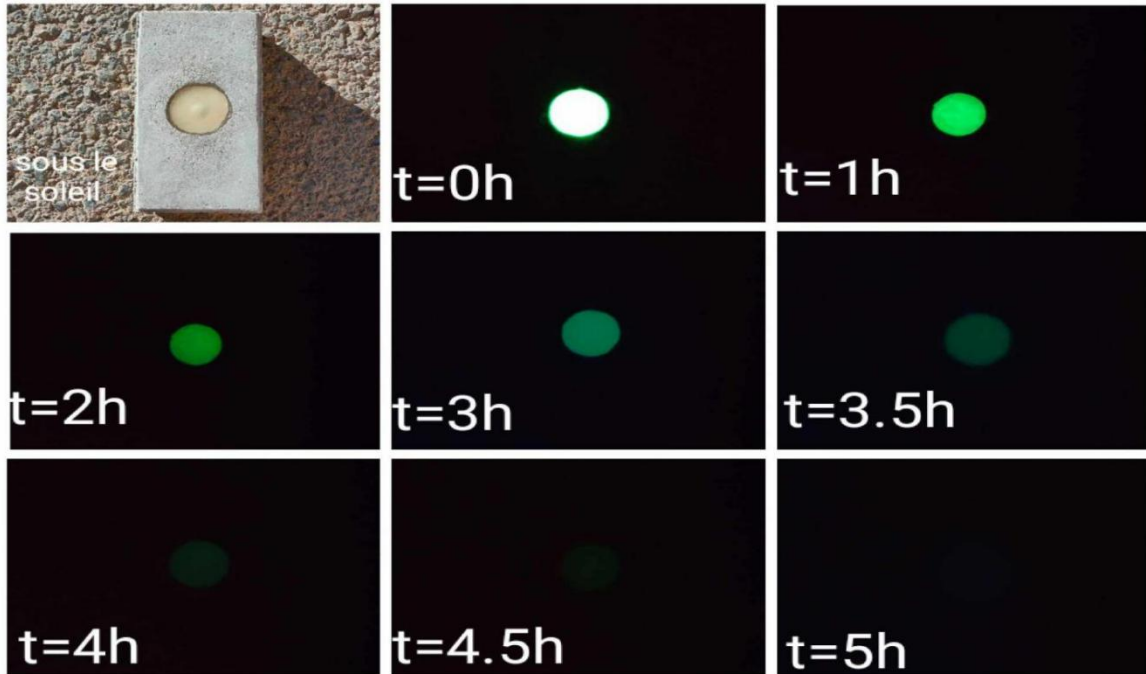
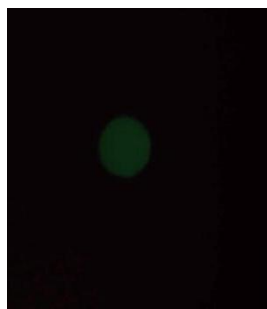


Figure 35 : la durée de la luminosité du pavé après 5min de chargement

On peut avoir un rechargement rapide de 5s à 10s (à travers les lumières des voitures par exemple) comme montré par la figure 36 (a),(b)



(a) Avant



(b) Après

Figure 36 (a),(b) : La luminosité du pavé avant et après chargement par la lumière d'une voiture

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons effectué plusieurs expériences sur le pavé avec différents pourcentages de produit phosphorescent. Parmi les résultats obtenus on peut déduire les résultats suivants :

- ✧ Les pavés testés respectent les critères de la norme NF EN 1338. L'absorption d'eau est maintenue en dessous de la limite maximale de 6 %.
- ✧ Les pavés testés répondent aux normes définies par la NF EN 1542 pour l'essai d'adhésion..
- ✧ Les pavés autolumineux, conçus avec des matériaux phosphorescents, peuvent émettre de la lumière visible par lui-même. Cette technologie supprime le besoin d'une rétro-réflexion ou d'une électroluminescence pour assurer sa détection.
- ✧ Le test de phosphorescence a démontré que la luminescence persistait pendant 5 heures. En outre, cette période de luminescence reste constante même après que le matériau a été exposé à une charge pendant 5 minutes.

Conclusion générale

Conclusion générale :

L'objectif de cette étude était d'évaluer les propriétés mécaniques, physiques et la durée de luminosité des pavés autolumineux, fabriqués à partir de produits phosphorescents et de résine avec des masses variables. À la suite d'une recherche bibliographique approfondie et de l'analyse des résultats obtenus, on peut déduire les conclusions suivantes :

- Les résultats des tests physiques et mécaniques sont satisfaisants.
- Les pavés autolumineux par des matériaux phosphorescents sont capables d'émettre de la lumière.
- Plus le pourcentage de matériaux phosphorescent augmente, plus l'intensité lumineuse s'accroît.
- La durée de la phosphorescence reste inchangée même après que le matériau ait été exposé à une charge pendant 5 minutes.

En perspective, il serait intéressant d'étudier ces produits lumineux sur bordures de trottoir, les glissières de sécurité routière, les marqueurs de chaussée...,

Aussi, il serait intéressant d'étudier l'incorporation de ces produits phosphorescents dans le béton, le carrelage et la peinture.

Référence bibliographique

Référence bibliographique

[1] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Pav%C3%A9> (EN Ligne) Consulter le 16/12/2023

[2] Harris, C. M. (2005). Dictionnaire de l'architecture et de la construction. Dunod

[3] DTU 21.1 - Béton frais - Exécution - Pose des éléments en béton

[4] Association Française de Normalisation. NF EN 1338 : Pavés en Béton, Prescriptions et méthodes d'essai, Février 2004

[5] "Fabrication de pavés en béton", Interbloccs, 2023

[6] https://machine.hfblockmachine.com/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=+2.1+%E6%90%9C%E7%B4%A2-%E5%88%B6%E7%A0%96%E6%9C%BA%E5%A4%A7%E8%AF%8D-%E9%9D%9E%E6%B4%B2&utm_id=11710285114&gad=1&gclid=Cj0KCQjwj5mpBhDJARIsAOVjBdobMF7gGwoZzaihJDObV-TwltBIB0zl_1VJ0RAIVE-EpAZ6xB5v6v8aAkt-EALw_wcB (EN Ligne) Consulter le 16/12/2023

[7] <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.amenager-maison.com%2Fterrasse-et-jardin%2Fle-pave-de-terrasse-1865&psig=AOvVaw1QOGMCib2Is0kbVSSRoz1S&ust=1702809108837000&source=images&cd=vfe&ved=0CBEQjRxqFwoTCICXo7Lgk4MDFQAAAAAdAAAAABAE> (EN Ligne) Consulter le 16/12/2023

[8] Université D'Abomey Calavi Ecole Polytechnique D'Abomey-Calavi Departement De Genie Civil Determination D'Un Melange Optimal De Gravier Roule Et De Gravier Concasse Pour La Realisation Des Pavés Autobloquants Performants 2013-2014

[9] CERIB, 2009, Guide de conception des ouvrages réalisés à partir de pavés, dalles, bordures et caniveaux préfabriqués en béton

[10] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Phosphorescence> (EN Ligne) Consulter le 16/12/2023

[11] **G. Blasse, B.C. Grabmaier**, Luminescence materials, Springer-Verlag, Berlin, 1994

[12] **Phosphorescence: Mécanismes Et Nouveaux Matériaux** Thèse De Doctorat Soutenue
Publiquement Par Frédéric Clabau Le 18/03/2005

[13] **S. McKeever**, Thermoluminescence of solids, Cambridge Press University, Cambridge, 1988

[14] **Y. Lu et al.** / Microelectronics Journal 35 (2004)

[15] <https://www.metaltop.fr/content/508-definition-resine-epoxy> (EN Ligne) Consulter le 16/12/2023

[16] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Poly%C3%A9poxyde> (EN Ligne) Consulter le 16/12/2023

[17] <https://jardinage.lemonde.fr/dossier-2895-resine-epoxy.html> (EN Ligne) Consulter le 16/12/2023

[18] <https://www.ouedkniss.com/materiaux-de-construction-resine-epoxy-transparent-epotek-autonivelant-beni-mered-blida-algerie-d37789507?lang=fr> (EN Ligne) Consulter le 16/12/2023

[19] **Rapport essai matériaux** ‘étude de composition de béton’ LTPO 24 /02/2022

[20] **multi béton Bou Saada** fiche technique pavé rectangulaire

[21] **la Norme EN 1542 1999**

Annexes : BMC

Annexe : Business Model Canvas pour les Pavés Autolumineux

1-Proposition de Valeur

- **Pavés Autolumineux Rectangle** : Offrant une forme standardisée, ces pavés sont conçus pour offrir une luminosité nocturne, améliorant à la fois la sécurité et l'attrait esthétique des espaces urbains.
- **Propriétés Autolumineuses pour la Sécurité et l'Esthétique** : Les pavés sont conçus avec des propriétés autolumineuses afin d'accroître la visibilité la nuit et d'ajouter une touche artistique aux environnements.
- **Durabilité et Longévité** : L'utilisation de matériaux de qualité et de techniques de fabrication avancées garantit une longue durée de vie aux pavés, réduisant ainsi les coûts de maintenance.
- **Personnalisable en Termes de Couleur et de Design** : Offrir une variété de choix en termes de couleur, de motif et de design permet aux clients de personnaliser leurs espaces selon leurs préférences.

2-Segments de Clients

- **Secteur de la Construction** : Les entreprises de construction, les promoteurs immobiliers et autres acteurs du domaine de la construction.
- **Municipalités et Organismes Gouvernementaux** : Les administrations locales cherchant à améliorer la sécurité et l'esthétique des espaces publics.
- **Architectes et Concepteurs** : Professionnels à la recherche de solutions innovantes pour leurs projets architecturaux

3-Relations

- **Service Client Dédié** : Offrir un support technique dédié aux clients pour répondre à leurs questions et préoccupations.
- **Service Après-Vente** : Un service permettant les réparations ou les remplacements nécessaires pour garantir la satisfaction client.

- **Marketing Ciblé** : Des stratégies de marketing axées sur l'attraction de nouveaux clients, mettant en valeur les avantages des pavés autolumineux..

4-Canaux

- **Ventes Directes aux Entreprises de Construction** : La commercialisation directe auprès des entreprises de construction, en mettant l'accent sur les avantages des pavés autolumineux.
- **Distribution via les Revendeurs de Matériaux de Construction** : La collaboration avec des revendeurs établis pour élargir la portée des pavés sur le marché de la construction.
- **Site Web pour les Commandes en Ligne**: Un canal supplémentaire pour permettre aux clients de passer des commandes en ligne, offrant une commodité accrue.

5-Partenaires Clés

- **Fournisseurs de Matériaux** : Les partenariats avec des fournisseurs de matériaux de qualité tels que le ciment, le sable, le gravier et les matériaux phosphorescents sont essentiels pour garantir la qualité des pavés autolumineux.
- **Distributeurs de Matériaux de Construction** : Les canaux de distribution nécessitent des relations solides avec des distributeurs de confiance pour assurer la disponibilité et la promotion des pavés dans le marché de la construction.
- **ANADE et Université** : Les collaborations avec des établissements telles que ANADE et universités peut favoriser la recherche, le développement et l'innovation dans la technologie des matériaux luminescents.
- **Agence de Communication** : Une agence de communication compétente peut contribuer à la promotion et à la diffusion des avantages et des caractéristiques des pavés autolumineux.

6-Activités Clés

- **Conception et Fabrication des Pavés** : L'aspect fondamental de l'entreprise réside dans la conception créative et la fabrication précise des pavés autolumineux, mettant l'accent sur la sécurité, l'esthétique et la durabilité.

- **Gestion de la Chaîne d'Approvisionnement** : La gestion efficace de l'approvisionnement en matériaux est essentielle pour maintenir la qualité constante des pavés tout en maîtrisant les coûts.

7-Ressources Clés

- **Matériaux de Fabrication de Haute Qualité** : Ciment, Sable, Gravier et Eau : Les composants de base nécessaires à la création des pavés.

- **Matériaux Phosphorescents** : Essentiels pour assurer la propriété autolumineuse des pavés.

- **Équipements et Personnel**

1 Employé Expert : Nécessaire pour opérer la machine de fabrication.

Local de Production : Espace essentiel pour la fabrication des pavés.

Gérance et Administration : Pour assurer la gestion efficace de l'entreprise.

8-Structure de Coûts

- **Matières Premières** : Les coûts associés aux matériaux de fabrication sont évalués à 750 pièces pour 23950 da.

- **Machine de Fabrication** : Un investissement initial important pour garantir la production des pavés.

- **Main-d'œuvre** : Salaire mensuel de l'employé, essentiel pour le fonctionnement de l'entreprise.

- **Marketing, Energie, gérance et Administration** : Coûts récurrents nécessaires au bon fonctionnement de l'entreprise.

9-Sources de Revenus

- **Vente des Pavés Autolumineux Standard** : La vente des pavés autolumineux standard à un prix de 1750 da par mètre carré, avec une production mensuelle estimée à 7488 mètres carrés, générant ainsi un revenu mensuel de 13,104,000 da.

- **Vente de Pavés Autolumineux Personnalisés** : Une opportunité de revenus supplémentaires en offrant des pavés personnalisés en termes de couleur, de type et de design, répondant aux besoins spécifiques des clients.