الجمهـــوريـــــة الجزائـــريـــــة الديمقـــراطيـــة الشـعبيـــة
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التـــعلـــيـــــم العـــــالـــــــي والبـــحـــــــث العـلمـــــي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
جامعة وهران 2 محمد بن أ حمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed
معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Sécurité Industrielle et Environnement

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Hygiène et Sécurité Industrielle

Spécialité : Sécurité Industrielle et Environnement

Thème

Valorisation des déchets de construction : Étude de faisabilité pour des nouvelles utilisations du plâtre et du gypse recyclé.

Présenté et soutenu publiquement par :

NECHNICHE Yamina Rania & **REGUIEG YSSAAD Sarah**

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
SERAT	**Prof**	**IMSI**	**Président**
DERIAS Fatma Zohra	**MCB**	**IMSI**	**Encadrant**
NADJI AEK		**IMSI**	**Examinateur**
			Représentant Partenaire Socio-économique

2025 / 2026

RESUME :

Dans une perspective d'économie circulaire, ce travail étudie la faisabilité de la valorisation des déchets de plâtre et de gypse issus du secteur du BTP en tant que poudre écologique d'extinction des incendies. Après des opérations de tri, de traitement thermique à 1000 °C et 1200 °C, de broyage et de tamisage, douze formulations ont été élaborées et testées sur des feux de classe A (papier, plastique et bois).

Les résultats obtenus montrent que l'ensemble des mélanges possède un pouvoir extincteur efficace grâce aux mécanismes d'étouffement et d'absorption thermique. Les meilleures formulations ont permis l'extinction des flammes en quelques secondes seulement, avec une faible consommation de poudre. Cette étude démontre ainsi le potentiel du plâtre et du gypse recyclé comme alternative écologique aux agents extincteurs conventionnels, tout en contribuant à la réduction des déchets de construction.

Cependant, certaines limitations liées à l'agglomération des particules après traitement thermique ont été observées. Des travaux complémentaires sont donc nécessaires afin d'améliorer la fluidité des poudres, d'évaluer leurs performances sur d'autres classes de feux et d'envisager une future homologation conformément aux normes de sécurité incendie.

Mots-clés : Valorisation des déchets, Plâtre recyclé, Gypse recyclé, Poudre extinctrice écologique, Sécurité incendie, Classe A, Poudre d'extinction.

ABSTRACT:

This study investigates the feasibility of valorizing construction and demolition waste, particularly recycled gypsum and plaster, as an eco-friendly fire-extinguishing powder. Conducted within the framework of the circular economy, the research aims to reduce construction waste while developing a sustainable alternative to conventional chemical extinguishing agents.

The experimental methodology involved sorting, cleaning, thermal treatment at 1000 °C and 1200 °C, grinding, and sieving of the recycled materials. Twelve different powder formulations were prepared and evaluated through fire-extinguishing tests on Class A fires involving paper, wood, and plastic.

The results demonstrated that all formulations exhibited effective fire suppression through smothering and heat absorption mechanisms. Among the tested mixtures, P100 and P3 showed the best performance, achieving flame extinction within a very short time and with minimal powder consumption. These findings confirm the technical feasibility of using recycled plaster and gypsum as environmentally friendly extinguishing agents.

Furthermore, this approach contributes to waste reduction and promotes sustainable resource management. However, particle agglomeration observed after high-temperature treatment may affect powder flowability. Future research should focus on improving powder stability and fluidity, evaluating performance on other fire classes, and pursuing certification according to fire safety standards.

Keywords: Construction waste valorization, Recycled plaster, Recycled gypsum, Eco-friendly extinguishing powder, Fire safety, extinguishing powder.

ملخص :

في إطار تعزيز مبادئ الاقتصاد الدائري والحد من الآثار البيئية المرتبطة بتراكم نفايات البناء والهدم في الجزائر، يهدف هذا البحث إلى دراسة إمكانية تثمين مخلفات الجص والجبس، خاصةً صفائح الجبس وتحويلها الى مسحوق بيئي مستدام دي قيمة مضافة. اعتمدت الدراسة على جمع وفرز النفايات الجبسية، ثم إخضاعها لمعالجة حرارية عند درجتي حرارة 1000 و1200 درجة مئوية، تلتها عمليات الطحن والنخل للحصول على مجموعة من التركيبات المسحوقة المختلفة.

تم تقييم فعالية هذه التركيبات من خلال اختبارها على حرائق المواد الصلبة من الصنف A مثل الخشب والورق والبلاستيك، حيث أظهرت نتائج واعدة تمثلت في القدرة على إخماد اللهب خلال فترات زمنية قصيرة تراوحت بين ثانية واحدة وخمس ثوانٍ. ويُعزى هذا الأداء إلى الخصائص الفيزيائية للمساحيق المنتجة، والتي ساهمت في امتصاص الحرارة وعزل المادة المشتعلة عن الأكسجين.

وتبرز أهمية هذا العمل في كونه يقدّم مسارًا مبتكرًا لتثمين نفايات البناء والهدم وتحويلها إلى مادة ذات فائدة في مجال السلامة من الحرائق، بما يساهم في تقليل كميات النفايات الموجهة للردم ودعم التوجه نحو حلول أكثر استدامة. كما أظهرت الدراسة أن المعالجة الحرارية عند 1200 درجة مئوية قد تؤدي إلى تكتل بعض الجزيئات وانخفاض انسيابية المسحوق، مما يستدعي مستقبلاً تطوير تركيبات محسنة بإضافة مواد مضادة للتكتل والرطوبة، إلى جانب توسيع نطاق الاختبارات لتشمل أصنافًا أخرى من الحرائق والعمل على مطابقة المنتج للمعايير الدولية المعتمدة.

الكلمات المفتاحية :

تثمين النفايات، الجص المعاد تدويره، الجبس المعاد تدويره، مسحوق الإطفاء، السلامة من الحرائق،

المعالجة الحرارية.

Remerciment

Au terme de ce travail, nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude à **Allah**, qui nous a accordé la force, la patience et la santé nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

Nous adressons aussi notre profonde reconnaissance à notre chère encadrante, **Mme DERIAS F.Z.**, pour son accompagnement, sa disponibilité, ses précieux conseils, sa rigueur scientifique et ses encouragements constants. Tout au long de cette étude. Son expertise et sa confiance ont grandement contribué à l'enrichissement et à la réussite de ce travail.

Nos remerciements les plus sincères vont également à nos familles, **NECHNICHE** et **REGUIEG YSSAAD**, qui nous ont soutenues avec amour et bienveillance durant tout notre parcours universitaire. Leur patience, leurs sacrifices, leurs encouragements et leur confiance indéfectible ont constitué une source permanente de motivation et de courage.

Nous souhaitons aussi exprimer notre gratitude à nos chères amies, **Ikram** et **Sihem**, pour leur présence, leur soutien moral, leurs conseils et les moments de partage qui ont accompagné cette aventure académique.

Nous remercions également le point de distribution **KNAUF** Oran pour son accueil, sa disponibilité et sa collaboration, qui ont contribué au bon déroulement de notre étude.

Enfin, nous adressons nos remerciements à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont participé à la réalisation de ce mémoire et ont contribué à notre formation académique et personnelle.

Dédicae

Je dédie ce travail, avec une immense gratitude et beaucoup d'émotion, à ma chère famille **REGUIEG YSSAAD** et **DAHMANE**.

Merci pour votre amour silencieux mais puissant, pour votre présence dans chaque étape de ma vie, et pour tous les sacrifices que vous avez faits sans jamais rien attendre en retour. Vous êtes ma sécurité, ma force, et la raison pour laquelle je continue toujours d'avancer.

À la famille **NECHNICHE**, merci pour votre soutien sincère et votre confiance constante. Votre bienveillance a toujours été une lumière discrète mais essentielle dans mon parcours.

À tout le corps enseignant et à l'administration de **l'IMSI**, pour leur accompagnement, leur patience et la qualité de leur enseignement qui a façonné mon parcours académique et professionnel.

Au **Club Basmat Muhandis**, qui n'a pas été seulement un club, mais un espace d'apprentissage, de partage et de croissance personnelle, où j'ai découvert des valeurs, des compétences et des personnes inoubliables.

À **Amine**, **Lila**, **Sabiha** et **Abdelillah**, merci pour votre présence, votre gentillesse et les moments simples mais précieux qui ont rendu ce chemin plus humain et plus supportable.

À ma chère binôme **NECHNICHE Yamina Rania**, avec qui j'ai partagé cinq années d'université. Merci pour ta patience, ton aide, ta compréhension et tout ce qu'on a traversé ensemble. Tu fais partie de cette réussite autant que moi.

À toute **la promotion M2 SIE**, avec qui j'ai partagé cette dernière étape de mon parcours, faite de défis, d'entraide et de souvenirs inoubliables.

Ce travail est dédié à tous ceux qui ont cru en moi, même dans les moments où moi-même je doutais.

Si aujourd'hui j'ai pu arriver jusque-là, c'est parce que vos cœurs ont porté le mien quand le mien n'en avait plus la force.

Sarah

Dédicace

الحمد لله أولًا وآخرًا، وظاهرًا وباطنًا، الذي بنعمته تتم الصالحات، وبتوفيقه تتحقق الأمنيات، والذي كان معي في كل خطوة من هذا الطريق، فله الحمد حتى يرضى وله الحمد إذا رضي وله الحمد بعد الرضا.

إلى أبي الغالي

إلى من كان سندي وعوني في هذه الحياة، إلى من تعب واجتهد وضحّى من أجل أن يراني ناجحة، إلى من علّمني أن الإرادة طريق النجاح، أهدي ثمرة جهدي هذه، راجيةً من الله أن يحفظه ويديم عليه الصحة والعافية.

إلى أمي الحبيبة

إلى نبع الحنان ومصدر الأمان، إلى من سهرت الليالي ودعت الله لي بالتوفيق في كل خطوة، إلى من كان حبها ودعاؤها سرّ قوتي واستمراري، أهديكِ هذا العمل عربون محبة ووفاء، وأسأل الله أن يجزيكِ عني خير الجزاء.

إلى أختيّ العزيزتين هناء وكوثر

إلى من جمعتني بهما أجمل الذكريات وأصدق المشاعر، إلى من كانتا مصدر فرح وسند في كل المواقف، أهديكما هذا الإنجاز الذي يحمل جزءًا من محبتكما ودعمكما.

إلى رفيقة دربي وصديقة عمري وزميلتي في هذا العمل سارة

لم تكوني مجرد زميلة أو شريكة في إنجاز هذا البحث، بل كنتِ أختًا لم تلدها أمي، وسندًا حقيقيًا في لحظات التعب والضغط. شكراً لكل لحظة مشاركة، ولكل كلمة تشجيع، ولكل ذكرى جميلة ستبقى محفورة في القلب. أسأل الله أن يكتب لكِ النجاح والسعادة أينما كنتِ.

إلى عائلة رقيق يسعد الكريمة

إلى العائلة التي غمرتني بلطفها ومودتها، وإلى كل فرد فيها على ما قدمه من دعم وتشجيع واهتمام، أهديكم هذا العمل تعبيرًا عن خالص امتناني وتقديري. لقد كان لطيب أخلاقكم وكرم معاملتكم أثر جميل في نفسي، فجزاكم الله عني كل خير، ودامت بيننا المحبة والمودة.

إلى أساتذتي الأفاضل

إلى كل أستاذ علّمني حرفًا، وغرس في نفسي حب العلم والمعرفة، وكان له دور في تكويني العلمي والأكاديمي. أتقدم لكم بخالص التقدير والاحترام، وأهديكم هذا العمل عرفانًا بجهودكم النبيلة ورسالتكم السامية. فبفضلكم، بعد توفيق الله، اكتسبنا العلم الذي ينير دروبنا ويقودنا نحو مستقبل أفضل.

إلى كل من كان سببًا في ابتسامة، أو كلمة تشجيع، أو دعوة صادقة من القلب

إليكم جميعًا أهدي ثمرة سنوات من الجهد والتعب، وأسأل الله أن يجعل فيها الخير والبركة والتوفيق

رانيا

Table des matières

Introduction 1
CHAPITRE I 1
Généralités sur les déchets 1
I. Introduction 3
II. Généralité sur les déchets 3
1) Définition des déchets 3
III. Classification des déchets 4
1) Selon la réglementation Européenne 4
2) Selon la réglementation Algérienne 6
IV. Types des déchets 6
1) Déchets ménagers et assimilés y compris les déchets encombrants 6
2) Déchets spéciaux y compris les déchets spéciaux dangereux et les déchets des activités de soin 7
3) Déchets inertes 8
V. Modes d'élimination des déchets 8
1) Valorisation 8
2) Stockage 9
3) Banalisation 10
VI. Définition et Objectif des CET 10
VII. Classification des CET 11
1) Classification selon la nature des déchets 11
VIII. Statistiques des opérateurs de gestion des déchets en Algérie 12
Tableau 02 : Nombre et type d'opérateurs de gestion des déchets en Algérie (CNR) 13
IX. Impact des déchets 13
1) Impact sur l'environnement 13
2) Impact sur la santé 14
3) Impact sur l'économie 14
X. Enjeux de la gestion des déchets 14
XI. Conclusion 15
CHAPITRE II 16
Les déchets des Bâtiments et des Travaux Publics 16
« BTP » 16
I. Introduction 16
II. Déchets du BTP 16
II.1. Définition des déchets de construction et démolition (BTP) 16

II.2. Classifications des déchets BTP 17
2.3 Importance de la classification 20
III. Production et impact environnemental 20
III.1. Impacts environnementaux liés aux déchets de BTP 20
IV. Propriétés physicochimiques du plâtre/ gypse 21
➢ Résistance thermique (au feu) : 21
V. Technique de valorisation des déchets BTP 22
VI Limites des méthodes actuelles 23
➢ Intérêt de la valorisation innovante 23
VII Conclusion 24
Chapitre III 25
Les poudres d'extinction 25
I. Introduction 25
II. Définition du feu 25
➢ Triangle de feu 25
II.1. Combustible 25
II.2. Comburant 26
II.3. Énergie d'activation 26
➢ Mélange stœchiométrique 26
III. Définitions et désignation des classes de feux 27
IV. Phénomènes de combustion 32
V. Risques et impacts de feux 36
VI. Accidentologie 36
VII. Maitrise de feux 37
VII.1. Refroidissement 38
VII.2. Étouffement (ou inertage) 38
VII.3. Isolement ou suppression du combustible 39
VIII. Agents d'extinction 39
1. Type des agents d'extinction 39
a) Poudres extinctrices 39
IX. Conclusion 43
Chapitre IV 44
Potentiel des déchets BTP comme agents extincteurs 44
I Introduction 44
II Caractérisation et propriétés favorables des déchets BTP 45
II.1. Propriétés thermo-physiques et capacité de rétention thermique 45
II.2. Mécanismes d'étouffement par barrière physique (Effet couverture) 46

II.3. Stabilité chimique à haute température 46
II.4. Porosité et comportement microstructural 46
III État de l'art et travaux scientifiques existants 47
III.1. Utilisation des poudres de béton et de mortier recyclés dans l'extinction des feux de classe A (Feux secs) 47
III.2. Valorisation des déchets de plâtre (Gypse) 48
III.3. Emploi des granulats lourds pour la maîtrise des feux spéciaux (Feux de métaux ou de classe D) 48
III.4. Synthèse des performances comparatives (Déchets BTP vs Agents conventionnels) 49
IV Limites techniques, défis environnementaux et contraintes de mise en œuvre 51
IV.1. Hétérogénéité et variabilité de la composition des déchets BTP 51
IV.2. Risques de toxicité et d'émissions de poussières nocives 51
IV.3. Problématiques logistiques : Conditionnement, transport et fluidité des poudres 52
IV.4. Barrières réglementaires et acceptabilité par les services de secours 52
V Conclusion 54
Chapitre V 55
Matériels et méthodes & Résultats 55
I. Matériaux utilisés 55
I.1 Types de déchets BTP sélectionnés 55
I.1.1. Définition du plâtre 55
I.1.2. Définition du gypse 56
I.2. Origine des échantillons 56
II. Préparation des poudres 57
II.1. Tri et nettoyage 57
II.2. Traitement thermique des déchets de plâtre 57
II.3. Broyage 61
II.4. Tamisage 61
III. Formulation des poudres extinctrices 62
IV. Tests expérimentaux 62
V. Méthode de calcul des résultats 64
VI. Résultats des tests 65
I.1. Premier feu 65
I.2. Deuxième feu 68
I.3. Troisième feu 71
Conclusion Général 78
Les références Bibliographiques : 78

Liste des figures

01 Déchets ménagers et assimilés……07
02 Déchets spéciaux et spéciaux dangereux…… 07
03 Déchets Inertes…… 08
04 Types de traitement des déchets en Algérie en 2014……...10
05 Déchets de chantier du BTP……17
06 Répartition des déchets BTP en France……17
07 Déchets BTP inerte…….. 18
08 Déchets BTP non dangereux……... 19
09 Déchets BTP dangereux…….. 19
10 Le triangle de feu…… 25
11 Mélange stœchiométrique…… 26
12 Les classes de feux……... 27
13 Feu de forêt déclenché par la foudre…… 28
14 Incendie de liquide inflammable ……. 28
15 Feux de Gaz……. 29
16 Feux de métaux…… 29
17 Feux de cuisson…… 30
18 Feux d'origine électrique……. 30
19 Feux des batteries Lithium ion……. 31
20 Un incendie…….. 32
21 Explosion de Bierut……. 33
22 BLEVE sphère de GPL……..…..… 34
23 Boil Over……...…... 35
24 La mousse d'extinction……...… 42
25 Système d'extinction à CO2……..…...… 42
26 Production de plaque de plâtre……..…...… 55
27 Point de distribution Oran KNAUF……. 57
28 Comparaison de l'état de surface et de la coloration des poudres (1000°C et 1200°C)…. . 59
29 Les étapes de préparation des poudres écologique …….. 60
30 Conditionnement final des poudres de plâtre recyclé dans des flacons hermétiques étiquetés……..….. 61

31 Les feux secs testés (plastique, papier, bois) ……..…. 63
32 Présentation graphique de l'extinction du papier……..… 69
33 Présentation graphique de l'extinction du plastique……..... 72
34 Présentation graphique de l'extinction du bois…….... 75

Liste des tableaux

01 Classification des déchets selon leur interaction……..…….05
02 Nombre et type d'opérateurs de gestion des déchets en Algérie……..13
03 Les classes de feux……...…… 31
04 Accidents réels organisés en fonction des différentes catégories de feux…….…..… 37
05 La composition des poudres extinctrices…….…… 40
06 Synthèse comparative des propriétés et mécanismes d'extinction……... 50
07 Traitement thermique du plâtre……...……. 61
08 Les formules des 12 mélanges de poudre…… 65
09 Résultats expérimentaux des essais d'extinction du feu de papier par les différents mélanges de poudre…….. 68
10 Résultats expérimentaux des essais d'extinction du feu de plastique par les différents mélanges de poudre…….. 71
11 Résultats expérimentaux des essais d'extinction du feu de bois par les différents mélanges de poudre……. 74

Liste des abréviations

BLEVE: Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion.

BTP : Bâtiment et Travaux Public.

CET : Centre d'Enfouissement Technique.

DCD : Déchet de Construction et de Démolition.

DRX : Diffraction des Rayons X.

HSE : Hygiène, Sécurité et Environnement.

LII : Limite Inferieur d'Inflammabilité.

LSI : Limite Supérieur d'Inflammabilité.

NFPA : National Fire Protection Association.

Introduction Générale

Introduction

Dans un contexte marqué par le développement rapide des activités de construction ainsi que par les activités industrielles, la gestion des déchets constitue aujourd'hui un enjeu majeur dans le domaine de l'Hygiène, de la Sécurité et de l'Environnement (HSE). Le secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP) est considéré parmi les principaux producteurs de déchets solides, générant chaque année des grandes quantités de matériaux issus des activités de construction, de rénovation et de démolition. L'accumulation et la mauvaise gestion de ces derniers peuvent entraîner des effets négatifs, tels que la pollution, l'encombrement ainsi que la consommation excessive des ressources naturelles.

Parmi les différents types de déchets générés par le secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP), ceux issus à base de gypse et de plâtre occupent une place importante en raison de leur utilisation significative dans la construction. Ces matériaux se distinguent par leurs propriétés physico-chimiques remarquables, notamment leur teneur en eau de cristallisation et leur comportement thermique. Ces caractéristiques ouvrent des perspectives intéressantes pour leur valorisation dans divers domaines. Le recyclage de ces déchets contribue non seulement à la diminution des volumes destinés à l'élimination, mais aussi à la création de nouvelles applications. Dans ce cadre, leur intégration dans le domaine de la sécurité incendie représente une opportunité particulièrement prometteuse, notamment pour le développement d'agents extincteurs innovants avec un rôle crucial dans la prévention et la lutte contre les incendies.

La génération continue des déchets solides générés par le secteur du BTP, en particulier les déchets inertes et encombrants, pose des défis environnementaux et esthétiques significatifs, affectant les écosystèmes ainsi que l'apparence des sites concernés. Dans ce cadre, est-il possible de valoriser ces déchets en produisant une poudre d'extinction alternative aux poudres classiques, présentant presque la même efficacité et rentabilité ainsi qu'un coût réduit et un impact environnemental moindre ?

Notre étude a pour objectif d'étudier la faisabilité, l'efficacité, et la rentabilité de la valorisation des déchets issus du secteur du BTP en les transformant en un agent d'extinction écologique destiné à la lutte contre les incendies. Cette approche vise non seulement à réduire les impacts environnementaux liés à l'accumulation des déchets de construction, mais aussi de remplacer les poudres classiques constitué d'agent chimiques nocif pour la santé et l'environnement par

une poudre eco-friendly, moins couteuse et ayant la même efficacité dans le domaine de la sécurité incendie.

Les déchets valorisés de gypse et de plâtre issus du secteur BTP, peuvent être un agent extincteur efficace (type poudre) pour les incendies des matériaux solides (la classe A).

Ce mémoire est scindé en deux parties :

- **Partie 01 :** partie théorique composé de quatre chapitres :

➢ Le premier chapitre présente des généralités sur les déchets.

➢ Le deuxième chapitre traite les déchets du BTP.

➢ Le troisième chapitre est consacré aux poudres d'extinction, leurs compositions et mécanismes d'action.

➢ Le quatrième chapitre présente le potentiel de déchets BTP comme agent extincteur.

- **Partie 02** : partie expérimentale composé d'un seul chapitre :

➢ Le cinquième chapitre décrit le volet expérimental de notre étude, le matériel et les méthodes utilisées lors de la production de la poudre d'extinction ainsi que les résultats obtenus de notre étude.

CHAPITRE I

Généralités sur les déchets

I. Introduction

La maîtrise de la classification et des caractéristiques des déchets est un élément fondamental pour garantir une gestion efficace de ces derniers. Elle facilite l'organisation des processus de collecte, de traitement et de valorisation.

II. Généralité sur les déchets

1) Définition des déchets

a) Définition du dictionnaire

Un déchet est défini selon (**Larousse**) comme étant des :

- Débris, restes d'aliments qui sont impropres à la consommation ou à l'usage.
- Matériaux rejetés comme n'ayant pas une valeur immédiate ou laissés comme résidus d'un processus ou d'une opération. (On nomme déchets industriels ceux qui ne peuvent ni n'être admis en décharge ni être ramassés avec les ordures ménagères en raison de leur quantité ou de leur toxicité.)
- Produits incombustibles et inutiles du métabolisme des cellules vivantes, destinés soit à être rejetés (gaz carbonique, excréta, urine, sueur, urée, acide urique), soit, chez les végétaux surtout, à être accumulés à l'écart de la circulation générale (latex, oléorésines, alcaloïdes, etc.).

b) Définition économique

Un déchet est défini comme étant une matière ou une entité dont la valeur économique est nulle ou négative, à un moment donné, et dans un lieu donné, pour son détenteur. Le détenteur devrait payer quelqu'un ou faire le travail lui-même pour se débarrasser de cette entité, par opposition à un bien qui a une valeur économique positive et donc c'est le consommateur qui doit payer les frais pour en avoir. **(Marie-Laure ANDRE and Samuel HUBERT**). Cette définition reste relative tout simplement parce que les déchets des uns peuvent devenir des biens pour d'autres personnes, et même des matières premières secondaires pour d'autres procédés (**Aloueimine**).

c) Définition juridique

Nous entendons, par définition juridique, deux conceptions :

- Une conception subjective : lorsqu'une personne a la volonté de se débarrasser d'un bien, ce dernier devient un déchet ; lorsqu'il reste dans le territoire du propriétaire, ce déchet lui

appartient toujours, et lorsqu'il est déposé sur la voie publique (poubelle par exemple) il appartient à la municipalité.

• Une conception objective : selon cette conception, un déchet est tout objet ou tout bien qui nécessite une gestion contrôlée au profit de la santé publique et de l'environnement sans prendre en considération sa valeur économique ni la volonté de son propriétaire de le garder. (**Marie-Laure ANDRE and Samuel HUBERT**).

d) Définition règlementaire

Dans la règlementation algérienne, un déchet est défini selon **L'article 3 de la loi du 12 décembre 2001** relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets, comme tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation. Et plus généralement toute substance, ou produit et tout bien meuble dont le propriétaire ou le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou de l'éliminer.

III. Classification des déchets

1) Selon la réglementation Européenne

Les déchets peuvent être classés selon différents critères, permettant d'établir des typologies adaptées aux besoins des acteurs impliqués dans leur gestion, leur contrôle et leur évaluation. Cette classification varie d'un pays à l'autre en fonction de plusieurs facteurs, notamment l'origine des déchets, leur nature, les spécificités géographiques ainsi que les objectifs des politiques environnementales. Parmi les principales bases de classification, on distingue :

a) Classification selon l'origine du déchet :

L'origine du déchet permet d'identifier le responsable de sa gestion. Les collectivités territoriales prennent en charge les déchets municipaux, tandis que le producteur initial est responsable des déchets issus d'activités non ménagères. Cette classification, également appelée statut du déchet, distingue (**Parlement européen et Conseil**) :

- Les déchets municipaux ;
- Les déchets de chantier (construction et démolition) ;
- Les déchets d'activités économiques.

b) Classification selon les propriétés de danger :

Les déchets sont également classés en fonction de leur dangerosité pour la santé humaine et l'environnement. On distingue :

- Les déchets dangereux ;
- Les déchets non dangereux non inertes ;
- Les déchets inertes ;
- Les déchets d'activités de soins à risques (DASRI).

c) Classification selon la nature du déchet :

Selon leur état physique, les déchets sont répartis en trois catégories principales :

- Les déchets solides ;
- Les déchets liquides ;
- Les déchets gazeux.

d) Classification selon le mode de traitement et d'élimination :

Cette classification repose sur les modalités de gestion et de traitement appropriées :

- Les déchets banals ;
- Les déchets spéciaux ;
- Les déchets dangereux.

e) Classification selon le comportement et les effets sur l'environnement

Selon leur interaction avec le milieu naturel, on distingue :

- Les déchets inertes;
- Les déchets fermentescibles ;
- Les déchets toxiques.

Tableau 01 : classification des déchets selon leur interaction.

Classification des déchets	Exemples
Déchets inertes	Déchets issus du secteur BTP
Déchets dangereux	Huile, pile, appareils électrique…
Déchets non dangereux	Papier, bois, textile, matière organique végétale ou animale…

2) Selon la réglementation Algérienne

- L'Algérie a adopté plusieurs lois et décrets dans le domaine de l'environnement. En ce qui concerne la gestion des déchets, on cite :
- Loi N 01-19 du 12 Décembre 2001, relative à la gestion, au contrôle et l'élimination des déchets.
- Loi N 03-10 du 19 juillet 2003, relative la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable.
- Décret N 02-372 du 11 novembre 2002, relatif aux déchets d'emballages.
- Décret N 02-175 du 20 mai 2002, portant création, organisation et fonctionnement de l'Agence Nationale des Déchets.
- Décret N 04-199 du 19 juillet 2004, fixant les modalités de création, organisation, fonctionnement et de financement du système public de reprise et de valorisation des déchets d'emballages Eco-Jem.
- Les déchets au sens de l'article 05 de la loi 01-19 du 12 décembre 2001 sont classifiés comme suit :
  - Les déchets spéciaux y compris les déchets spéciaux dangereux.
  - Les déchets ménagers et assimilés.
  - Les déchets inertes.

IV. Types des déchets

En Algérie ; nous distinguons trois classes de déchets selon la description de l'article 03 et l'article 05 de la loi de 12 décembre 2001 :

1) Déchets ménagers et assimilés y compris les déchets encombrants

Tous déchets issus de ménages ainsi que les déchets similaires provenant des activités industrielles commerciales, artisanales et autres qui, par leur nature et leur composition, sont assimilables aux déchets ménagers. Tous déchets issus des ménages, qui en raison de leur caractère volumineux, ne peuvent être collectés dans les mêmes conditions que les déchets ménagers et assimilés.

Figure 01 : Déchets ménagers et assimilés **(Insaniyat)**

2) Déchets spéciaux y compris les déchets spéciaux dangereux et les déchets des activités de soin

Tous déchets issus des activités industrielles, agricoles, de soins, de services et toutes autres activités, qui en raison de leur nature et de la composition des matières qu'ils contiennent, ne peuvent être collectés, transportés et traités dans les mêmes conditions que les déchets ménagers et assimilés et les déchets inertes. Tous déchets spéciaux qui, par leurs constituants ou par les caractéristiques des matières nocives qu'ils contiennent, sont susceptibles de nuire à la santé publique et/ou à l'environnement. Tous déchets issus des activités de diagnostic, de suivi et de traitement préventif ou curatif, dans les domaines de la médecine humaine et vétérinaire.

Figure 02 : Déchets spéciaux et spéciaux dangereux (**Grupo SPR)**

3) Déchets inertes

Tous déchets provenant notamment de l'exploitation des carrières, des mines, des travaux de démolition, de construction ou de rénovation, qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique lors de leur mise en décharge, et qui ne sont pas contaminés par des substances dangereuses ou autres éléments générateurs de nuisances, susceptibles de nuire à la santé et /ou à l'environnement.

Figure 03 : Déchets Inertes (**Etares Environnement**).

V. Modes d'élimination des déchets

Le choix du mode ou bien de la technique d'élimination des déchets ne peut résulter que d'une étude technique et économique approfondie. Il n'est jamais pratique ni pertinent de donner des règles précises pour l'application d'un tel ou tel mode d'élimination.

En général, on distingue deux familles d'élimination des déchets : La valorisation et le stockage.

1) Valorisation

La valorisation consiste à donner un autre cycle de vie aux déchets en l'impliquant dans un autre circuit de production. Nous entendons par cela la production d'un autre matériau ou produit, ou bien de l'énergie.

a) Valorisation matérielle : nous distinguons trois modes remarquables de valorisation :

- La réutilisation : où le même matériau est utilisé pour les mêmes fins. Elle consiste à la réutilisation des bouteilles en verre destinées aux boissons. Le matériau doit subir un procédé de nettoyage, de stérilisation avant d'être réutilisé mais il ne doit subir aucune transformation et ne doit rentrer dans aucun circuit de production.
- Le recyclage : le déchet doit passer par un autre circuit de production avant d'avoir un nouveau cycle de vie similaire à sa première utilisation. C'est le cas du recyclage des plastiques ou des métaux. Le produit ainsi recyclé n'aura jamais les mêmes qualités qu'un produit initial mais il sera utilisé comme un produit alternatif moins couteux et aussi utile.
- Le compostage : Le compostage est un **processus biologique de décomposition et de stabilisation de la matière organique en conditions aérobies, aboutissant à un produit stable appelé compost (Sunar et al).**
- La méthanisation : un processus biologique naturel de dégradation de la matière organique par des micro-organismes en absence d'oxygène (digestion anaérobie), qui produit du biogaz (principalement du méthane) et un résidu appelé digestat (**INERIS**).
- Valorisation par transformation (La valorisation matière): est un processus consistant à transformer un déchet en une nouvelle matière première secondaire utilisée pour fabriquer un nouveau produit, différent de son usage initial (**ADEME**).

b) Valorisation énergétique :

Comme le sens du terme l'indique, la valorisation énergétique consiste à produire de l'énergie à partir des déchets. Les deux techniques les plus connues sont l'incinération et la pyrolyse.

2) Stockage

Le recours au stockage des déchets ne doit être envisageable que dans le cas où aucune autre solution n'est faisable. La mise en décharge demeure donc la solution ultime et inévitable pour l'élimination des déchets. Cependant, la pertinence d'une filière de stockage, soit une décharge soit un centre d'enfouissement, doit prendre en considération certains points pour que la filière ne perde pas son objectif principal qui est l'élimination des déchets et la protection de l'environnement et devienne elle-même une source de pollution pour l'environnement. **(Gachet)** a cité les étapes à considérer pour la mise en place d'une filière de stockage des déchets :

- Choix du site et sa conception ;
- Les règles d'exploitation et du suivi du site ;
- Fermeture des casiers et suivi poste-exploitation ;

3) Banalisation

La banalisation est un procédé de traitement (souvent par désinfection et broyage) permettant de réduire ou supprimer le caractère dangereux, notamment infectieux, d'un déchet afin qu'il puisse être éliminé comme un déchet non dangereux (**Proserve DASRI**).

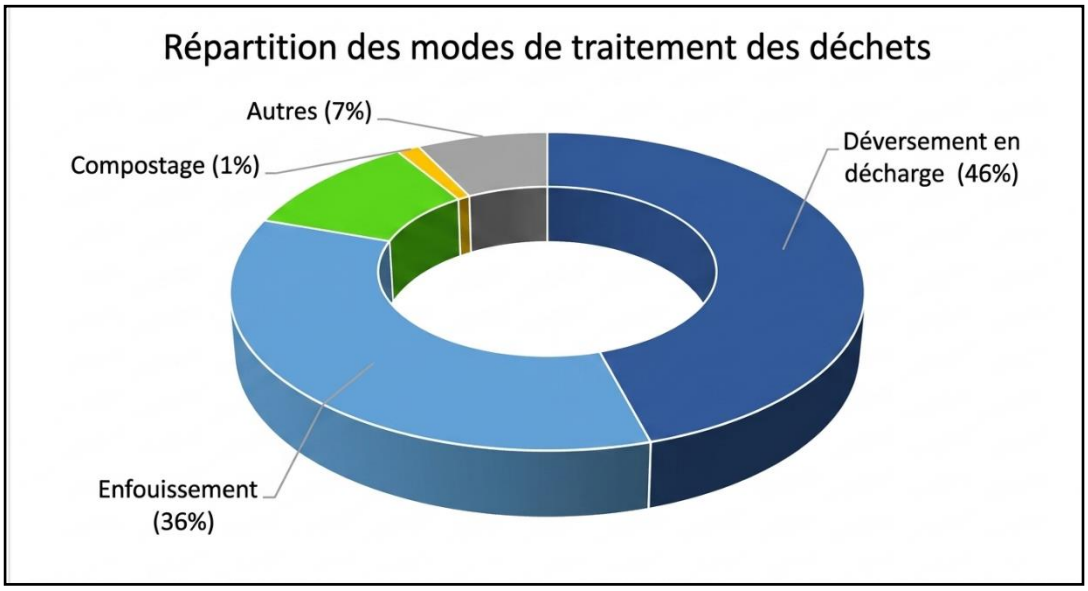

Figure 04 : Types de traitement des déchets en Algérie en 2014 **(AND)**

VI. Définition et Objectif des CET

Le Centre d'Enfouissement Technique (CET) désigne une installation dédiée à l'élimination des déchets par leur dépôt sur le sol ou au sein du sous-sol. Il s'agit d'une parcelle de terrain, souvent accompagnée d'une excavation structurée, dont l'exploitation est régie par un arrêté administratif officiel. Cet arrêté, délivré après une étude approfondie des impacts environnementaux et une enquête publique, définit les modalités relatives à l'implantation, le fonctionnement, le suivi et la réhabilitation finale du site. Au sein du CET, divers types de déchets sont disposés, notamment les déchets ménagers, les déchets solides issus des activités commerciales, les boues non toxiques et les déchets solides industriels. La mise en œuvre d'un tel site poursuit plusieurs objectifs essentiels :

- Réduction du volume et de la quantité des déchets générés ;
- Limitation des conséquences négatives des déchets sur l'environnement ;
- Création de débouchés pour l'emploi local ;
- Valorisation des matériaux recyclables, permettant ainsi de diminuer les pertes associées aux matières premières.

Le CET se présente comme une solution stratégique et réglementée visant à répondre aux défis environnementaux tout en favorisant une gestion durable des déchets (**BOUDRA. M et SENNOUR, M).**

VII. Classification des CET

Le Centre d'Enfouissement Technique (CET), également désigné comme centre de stockage (CDS), constitue une installation spécialement conçue pour entreposer des déchets tout en les isolant de leur environnement immédiat. Son principal objectif est d'empêcher toute forme de contamination, que ce soit du sol ou des nappes phréatiques, il existe deux principales catégories de classifications des CET **(Bennadir et Fentiz).**

1) Classification selon la nature des déchets

a) Centres d'Enfouissement Technique (CET) de Classe I :

Les centres d'enfouissement technique de classe I sont conçus pour accueillir, en plus des déchets urbains et courants, certains types de déchets industriels spécifiques. Ainsi, ces installations acceptent les catégories suivantes :

- D**échets industriels spéciaux de ca**tégori**e A :**
  - Résidus issus des processus d'incinération.
  - Sous-produits de l'industrie sidérurgique.
- Déchets minéraux liés aux traitements chimiques, notamment :
  - Sels métalliques et sels minéraux.
  - Oxydes métalliques.
- Déchets industriels **de catégorie B**, parmi lesquels **:**
  - Les résidus provenant du traitement des effluents industriels et des eaux usées industrielles.
  - Déchets générés par le traitement de sols contaminés.
- Résidus liés à l'utilisation **de peintures** :
  - Peintures solides usagées.
  - Résines et vernis obsolètes.

b) Centres d'Enfouissement Technique (CET) de Classe II

Les CET de classe II reçoivent des déchets qui présentent un moindre niveau de dangerosité. Parmi les types de déchets admissibles, on trouve :

- Déchets ménagers courants.
- Encombrants ménagers, tels que les meubles usagés.

- Déblais et gravats issus d'activités de construction ou de démolition.
- Déchets commerciaux, artisanaux et industriels assimilables aux ordures ménagères en termes de composition et de dangerosité.
- Déchets issus d'activités agricoles ne représentant ni un risque sanitaire ni un danger pour l'environnement.
- Pneumatiques usagés.
- Cendres et déchets refroidis provenant de l'incinération des ordures ménagères.
- Boues résultant des processus d'assainissement urbain.

c) Centres d'Enfouissement Technique (CET) de Classe III

Ces installations sont exclusivement destinées au stockage des déchets inertes, majoritairement issus des activités domestiques et du secteur industriel. Les déchets acceptés dans les CET de classe III incluent :

- Déchets inertes d'origine domestique, tels que ceux produits lors d'activités de bricolage familial.
- Déblais et gravats pouvant également être entreposés dans les CET de classe II.
- Résidus et rebuts provenant de chantiers de construction ou de démolition.
- Déchets extraits des carrières.

VIII. Statistiques des opérateurs de gestion des déchets en Algérie

En Algérie, la gestion des déchets repose sur l'intervention de plusieurs opérateurs économiques spécialisés, qui assurent différentes étapes de la chaîne de valeur, notamment la collecte, le transport, le traitement et la valorisation des déchets. Ces acteurs jouent un rôle essentiel dans la mise en œuvre des politiques publiques environnementales et contribuent à l'amélioration progressive de la performance du système national de gestion des déchets.

Le tableau ci-après présente une synthèse des données statistiques relatives aux principaux opérateurs de gestion des déchets identifiés à l'échelle nationale, permettant ainsi de mieux appréhender la structure et la répartition de ce secteur.

Tableau 02 : Nombre et type d'opérateurs de gestion des déchets en Algérie **(CNR)**

Secteur d'activité	Code	Activité	Personnes Physiques	Personnes Morales	Nombre d'opérateurs
Production des biens	**114101**	Valorisation des déchets ménagers et assimiles	883	313	1196
	114102	Valorisation des déchets inertes	753	312	1065
	114103	Valorisation des déchets spéciaux	529	274	803
	114104	Valorisation des déchets spéciaux dangereux	399	217	616
Des services	**619101**	Collecte des déchets ménagers et assimiles	714	261	975
	619102	Collecte des déchets inertes	607	234	841
	619103	Collecte des déchets spéciaux	241	229	470
	619104	Collecte des déchets spéciaux dangereux	212	208	420
	619201	Elimination des déchets ménagers et assimiles	135	167	302
	619202	Elimination des déchets inertes	119	174	293
	619203	Elimination des déchets spéciaux	132	186	318
	619204	Elimination des déchets spéciaux dangereux	120	181	301
	619301	Dépollution	128	156	284
Exportation	**705101**	Exportation des déchets ménagers et assimiles	47	216	263
	705102	Exportation des déchets spéciaux	50	236	286
	705103	Exportation des déchets spéciaux dangereux	17	169	186
Opérateurs de gestion des Déchets			**2106**	**955**	**3061**

IX. Impact des déchets

1) Impact sur l'environnement

Les déchets ont un impact notable sur l'environnement. Les méthodes de gestion telles que l'incinération et l'enfouissement génèrent des substances chimiques toxiques et des gaz à effet de serre qui peuvent contaminer l'air, le sol et les cours d'eau. Les déchets organiques, en cas de mauvaise gestion, risquent de polluer les réserves d'eau potable et de nuire à la biodiversité

en endommageant la faune et la flore. De plus, certains types de déchets nécessitent de nombreuses années pour se décomposer, et leur accumulation dans les milieux naturels représente une menace sérieuse pour l'équilibre des écosystèmes ainsi que pour les cycles biologiques qui les régulent (**Yefsah, F**).

2) Impact sur la santé

Une mauvaise gestion des déchets, qu'ils soient d'origine domestique, industrielle, agricole, hospitalière ou classés comme dangereux, représente une menace majeure pour la santé publique. Les déchets organiques non traités attirent des vecteurs de pathogènes tels que les moustiques, les mouches, les rats et les cafards, ce qui amplifie le risque de propagation de maladies vectorielles telles que le paludisme, la dengue ou encore la leptospirose. Quant aux déchets biomédicaux mal éliminés, ils peuvent être à l'origine de la transmission d'infections graves comme l'hépatite B, le VIH ou la tuberculose, souvent dues à des blessures causées par des aiguilles contaminées ou au contact avec des fluides corporels infectés. Les déchets industriels et chimiques renferment fréquemment des métaux lourds comme le plomb, le mercure ou le cadmium, ainsi que diverses substances toxiques. Ces éléments peuvent provoquer des troubles de santé graves tels que des maladies respiratoires, dermatologiques, neurologiques, et même cancérogènes. De plus, la contamination des sols et des eaux par ces déchets compromet la qualité de l'eau potable et des produits agricoles, augmentant ainsi l'exposition à des risques sanitaires à long terme. Enfin, l'incinération incontrôlée des déchets libère dans l'air de fines particules et des gaz toxiques, qui sont responsables de troubles respiratoires chroniques, particulièrement dans les zones urbaines densément peuplées (**OMS)**

3) Impact sur l'économie

La détérioration des conditions écologiques exerce des effets notables sur l'économie. Elle peut provoquer une baisse de la production agricole, altérer la santé humaine et animale, et diminuer l'attrait des destinations touristiques. De plus, l'exploitation excessive des ressources naturelles met en péril, à moyen et long terme, notre aptitude à assurer la production alimentaire, compromettant ainsi la sécurité alimentaire et l'équilibre économique (**IUCN**).

X. Enjeux de la gestion des déchets

La gestion des déchets constitue un défi majeur pour le développement durable en raison de ses répercussions environnementales, économiques et sociales. Une gestion inadéquate peut engendrer des dégradations significatives de l'environnement, notamment par la pollution des sols, de l'air et des ressources hydriques (**ASJP**). Par ailleurs, l'augmentation continue de la

production des déchets, liée à l'urbanisation et à la croissance démographique, exerce une pression croissante sur les systèmes de gestion existants (**Boudjellal. M**). Toutefois, les déchets représentent également une opportunité de valorisation, contribuant à la préservation des ressources naturelles et au développement d'une économie circulaire **(Boubekeur. M, Argillos. A).** Ainsi, une gestion optimisée des déchets s'impose comme un levier essentiel pour concilier protection de l'environnement et développement durable.

XI. Conclusion

Aujourd'hui la gestion des déchets est devenue un défi environnemental à l'échelle mondiale. Valoriser ces déchets contribue non seulement à diminuer les volumes envoyés en décharge, mais aussi à réduire leur impact sur l'environnement. Dans cette perspective, le recyclage et la réutilisation s'imposent comme des solutions durables, inscrites dans une approche d'économie circulaire et de développement durable.

CHAPITRE II

Les déchets des Bâtiments et des Travaux Publics

« BTP »

I. Introduction

Le secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP) produit annuellement des quantités significatives de déchets issus des activités de construction et de démolition. À l'heure où les enjeux environnementaux occupent une place centrale et où la sécurité des ressources naturelles s'impose comme une priorité. Parmi les différents types de déchets BTP générés, ceux composés de gypse et de plâtre retiennent une attention particulière en raison de leurs propriétés physico-chimiques spécifiques et de leur potentiel élevé en matière de recyclage.

II. Déchets du BTP

II.1. Définition des déchets de construction et démolition (BTP)

Selon Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie, les déchets du BTP regroupent « tous les matériaux, substances ou objets dont le détenteur se défait ou a l'intention ou l'obligation de se défaire, issus des activités de construction et de travaux publics » *(***ADEME***)*. Cette définition s'inscrit dans le cadre plus général de la notion de déchet telle que définie par la réglementation environnementale.

Dans le contexte réglementaire européen, la Directive-cadre sur les déchets 2008/98/CE précise qu'un déchet est « toute substance ou tout objet dont le détenteur se défait ou a l'intention ou l'obligation de se défaire » **(Union européenne***)*. Cette définition est applicable aux déchets du BTP, qui constituent une catégorie spécifique en raison de leur volume important et de leur diversité.

Dans le cadre réglementaire algérien, même si la législation ne prévoit pas une catégorie spécifique nommée « déchets de construction et de démolition », ces derniers sont néanmoins identifiés et classés dans la nomenclature nationale des déchets en fonction de leur nature et de leur niveau de dangerosité. Ils peuvent ainsi être répartis parmi les catégories des déchets inertes, des déchets spéciaux non dangereux ou encore des déchets spéciaux dangereux, en accord avec la réglementation en vigueur concernant la gestion des déchets **(République algérienne ; République algérienne).**

Figure 05 : Déchets de chantier du BTP (**Fédération Française du Bâtiment.)**

II.2. Classifications des déchets BTP

La classification des déchets du BTP constitue une étape essentielle pour leur gestion, leur traitement et leur valorisation. Cette classification repose principalement sur leur niveau de dangerosité et leur nature physico-chimique, conformément aux référentiels réglementaires nationaux et internationaux (**Européen Parliament & Council)**.

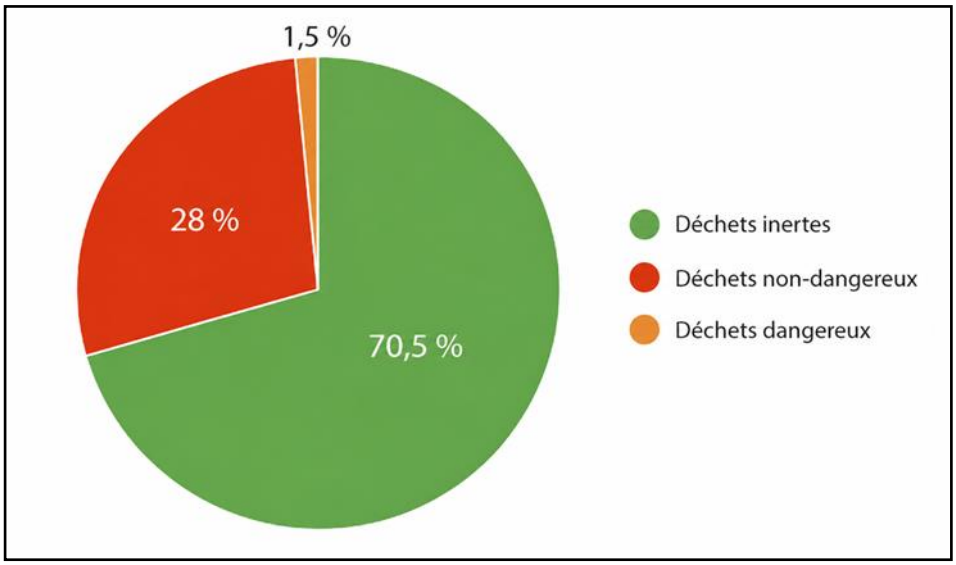

Figure 06 : répartition des déchets BTP en France (**Ecodrop**)

- **Classification selon la dangerosité**

La classification la plus couramment utilisée distingue trois grandes catégories de déchets BTP (**Ministère de la Transition écologique**.) :

a) Déchets inertes

Les déchets inertes sont des déchets qui ne subissent aucune transformation physique, chimique ou biologique significative. Ils ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent pas de réactions susceptibles de nuire à l'environnement (**ADEME).**

Exemples :

• Béton
• Briques, tuiles, céramiques
• Pierres et gravats

Figure 07 : déchets BTP inerte (**Carrières Coussegrey**)

Ces déchets représentent la plus grande proportion des déchets du BTP et sont généralement valorisables sous forme de granulats recyclés utilisés en remblai ou en sous-couche routière (**SEDDRe**).

b) Déchets non dangereux

Il s'agit de déchets qui ne présentent pas de caractère toxique ou dangereux, mais qui peuvent être recyclables ou valorisables (**Ministère de la Transition écologique**).

Exemples :

• Bois non traité
• Plastiques
• Carton et emballages

Figure 08 : déchets BTP non dangereux (**Séché Environnement**)

Ces déchets nécessitent souvent un tri à la source afin de faciliter leur recyclage.

c) Déchets dangereux

Les déchets dangereux contiennent des substances nocives pouvant présenter des risques pour la santé humaine et l'environnement (**European Parliament & Council**).

Exemples :

• Peintures, vernis, solvants, Huiles usagées
• Produits contenant des hydrocarbures
• Déchets contaminés

Figure 09 : déchets BTP dangereux (**Alamy**)

Ces déchets nécessitent des filières spécifiques de traitement afin de limiter leur impact environnemental.

❖ **Classification selon l'origine des déchets**

Les déchets BTP peuvent également être classés en fonction de leur origine :

• Déchets de construction (travaux neufs)
• Déchets de rénovation
• Déchets de démolition

Cette classification est largement utilisée dans les études sur la gestion des déchets du bâtiment (**ADEME).**

❖ **Classification selon la nature des matériaux**

Une autre approche consiste à classer les déchets selon leur composition matérielle :
• Déchets minéraux : béton, briques, céramiques
• Déchets métalliques : acier, aluminium, cuivre
• Déchets organiques : bois
• Déchets synthétiques : plastiques
• Déchets composites
Cette classification permet d'orienter les filières de recyclage et de valorisation.

2.3 Importance de la classification

La classification des déchets BTP permet :
• D'assurer une gestion conforme à la réglementation
• De réduire les risques pour la santé et l'environnement
• D'optimiser le tri, la collecte et le traitement
• De favoriser la valorisation et le recyclage des matériaux
Dans le contexte algérien, cette classification s'inscrit dans le cadre de la Loi n°01-19 relative à la gestion des déchets (**République Algérienne**).

III. Production et impact environnemental

Le secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP) se distingue par une production massive de déchets, entraînant des impacts environnementaux notables, notamment en termes de pollution, d'épuisement des ressources naturelles et de perturbation des écosystèmes (**Aït Saadi).**

III.1. Impacts environnementaux liés aux déchets de BTP

Longtemps perçus comme relativement peu menaçants pour l'environnement en raison de leur composition majoritairement composée de matériaux peu dégradables, les déchets issus des activités de construction sont aujourd'hui reconnus pour leur potentiel polluant. Certains matériaux, tels que le bois, le plâtre (gypse) et les métaux, peuvent libérer des substances nocives comme des sels métalliques, des sulfates ou des oxydes, notamment dans des environnements caractérisés par une forte humidité ou acidité (**Recyc-Québec**).
La gestion des déchets de construction et de démolition représente un défi environnemental crucial. Le recyclage de ces matériaux contribue à préserver les ressources naturelles en remplaçant les matières premières vierges par des matériaux réutilisés. Il en résulte une diminution des impacts écologiques, tels que la pollution des sols et la dégradation des paysages **(Recyc-Québec**).

Par ailleurs, les émissions de gaz à effet de serre liées aux différentes étapes de traitement des déchets dans le secteur du BTP constituent un autre facteur dommageable pour l'environnement. Collecte, transport, tri et traitement engendrent en effet des émissions de dioxyde de carbone (CO_2). Toutefois, une valorisation efficace des déchets, notamment par le recyclage, permet d'atténuer considérablement ces émissions en réduisant le besoin de produire des matières premières vierges. Cela joue un rôle positif dans la diminution de l'empreinte carbone du secteur (**SEDDRe**).

IV. Propriétés physicochimiques du plâtre/ gypse

- **Composition chimique :**

CaSO4, ½H2O **(Karim, F., Waqif, M., & Saâdi, L**).

- **Résistance thermique (au feu) :**

Les déchets issus du secteur du BTP, et plus particulièrement le plâtre, sont considérés comme des matériaux incombustibles offrant une bonne résistance au feu. En cas d'incendie, la chaleur provoque une évaporation progressive de l'eau chimiquement liée au gypse. Ce processus absorbe une part significative de l'énergie thermique, ralentissant ainsi la montée en température des structures protégées. Ce comportement agit comme une véritable barrière thermique en limitant la propagation de la chaleur. Par ailleurs, le plâtre ne dégage pas de gaz toxiques lors d'un incendie, se contentant principalement de libérer de la vapeur d'eau (**Gypsum Association).**

- **Résistance mécanique :**

La résistance mécanique diminue à mesure que le rapport E/P (Consistance normale du plâtre) augmente. Cela s'explique par une porosité accrue engendrée par ce rapport, rendant le matériau moins dense et réduisant ainsi sa résistance. Pour garantir une bonne ouvrabilité tout en maintenant une résistance adéquate, il est préconisé d'utiliser un rapport E/P égal à 0,6 **(A. M. Rachedi).**

(E/P : Temps de prise = $\frac{\text{Début de prise}}{\text{Fin de prise}}$**)**

- **Masse volumique (plâtre) :** 2.63 g/m^3 (**l'élémentarium**)
- **Solubilité :** 0.23 g/100mL dans l'eau à 20 °C **(Karim, F., Waqif, M., & Saâdi, L).**

V. Technique de valorisation des déchets BTP

Toute opération dont l'objectif principal est que : des déchets puissent servir à des fins utiles, en remplacement d'autres matières qui auraient pu être utilisées à une fin particulière, ou que des déchets soient préparés pour être utilisés à cette fin, dans l'usine ou dans l'ensemble de l'économie **MATRICIEL**).

Le déchet de BTP peut être traité selon trois méthodes dans l'article L.541-1 du code de l'environnement elle s'effectue dans l'ordre préférentiel suivant :

- **Réutilisation des déchets BTP** : implique de donner une nouvelle vie à ces matériaux sans nécessiter de transformations majeures. Les éléments tels que le béton, les briques ou le plâtre peuvent ainsi être réemployés dans d'autres projets. Cette démarche favorise la préservation des ressources naturelles tout en limitant les volumes de déchets à éliminer (**ADEME**)
- **Recyclage matière des déchets BTP** : Le recyclage des déchets issus du secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP) correspond à un processus visant à collecter les matériaux provenant des chantiers, tels que le plâtre, les gravats, le béton ou encore les débris de maçonnerie. Ces éléments sont ensuite transformés, notamment par des opérations de concassage et de criblage, en matériaux neufs et réutilisables, tels que des sables et des granulats. Ce procédé contribue à la préservation des ressources naturelles, à la réduction des volumes de déchets entreposés et à la diminution des impacts sur l'environnement. Par ailleurs, il s'inscrit pleinement dans une démarche de gestion durable des déchets issus de la construction (**Boudjellal, M**).
- **Elimination des déchets BTP** : la gestion des déchets issus du secteur du BTP repose essentiellement sur leur mise en décharge ou leur stockage dans des centres d'enfouissement technique (CET), lorsque ni la valorisation ni le recyclage ne sont envisageables. Cependant, ces déchets empruntent souvent des circuits peu encadrés et finissent fréquemment dans des décharges communales ou abandonnés directement dans la nature, faute d'infrastructures adaptées et de filières spécialisées. Bien que la réglementation établisse une hiérarchie de gestion axée sur la prévention, la valorisation, puis l'élimination par enfouissement ou traitement, son application sur le terrain demeure limitée. Les CET, conçus pour accueillir les déchets inertes tels que le béton, les briques et les céramiques, représentent la principale solution réglementaire, mais leur nombre et leurs capacités restent nettement insuffisants pour répondre aux besoins (**Boudjellal, M**).

VI Limites des méthodes actuelles

Les méthodes actuelles de gestion des déchets issus du secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP) présentent de nombreuses failles, rendant leur valorisation et leur élimination respectueuses de l'environnement particulièrement complexes. L'un des principaux défis réside dans le manque d'infrastructures spécialisées capables d'assurer de manière efficace le recyclage et le traitement des déchets de chantier ainsi que le manque de recherche scientifique sur ce sujet. Les matériaux produits par les activités de construction, démolition ou réhabilitation sont souvent déversés dans des décharges classiques ou abandonnés dans la nature, faute de centres adaptés ou de réseaux organisés pour leur valorisation. Cette gestion défaillante est aggravée par l'absence de tri préalable sur les chantiers, où les déchets sont fréquemment entreposés en mélange. Cela complique non seulement leur recyclage, mais diminue également la qualité des matériaux qui pourraient être réutilisés. La situation est rendue encore plus préoccupante par le manque de stations de concassage et de traitement pour les déchets pierreux, alors même que des quantités considérables de ressources potentielles, comme le béton, les gravats ou les débris de maçonnerie, demeurent inutilisées **(Boudjellal, M**).

D'autre part, les coûts élevés liés au transport et à l'élimination des déchets dans des sites réglementaires conduisent certaines entreprises et particuliers à recourir au dépôt clandestin autour des routes, des cours d'eau ou sur des terrains agricoles. Le manque de contrôle, les lacunes organisationnelles et l'absence de suivi systématique des flux de déchets encouragent ces pratiques illégales. De surcroît, les infrastructures existantes restent limitées et ne suffisent pas à gérer efficacement la croissance continue des volumes de déchets engendrés par l'expansion du secteur BTP. Ces insuffisances nuisent à l'efficacité globale du système de gestion des déchets et engendrent des répercussions environnementales et paysagères significatives (**Boudjellal, M**).

➢ Intérêt de la valorisation innovante

L'adoption de stratégies visant la valorisation des déchets générés par le secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP) s'impose comme un levier crucial pour atténuer les impacts environnementaux associés à cette activité. En particulier, le recours au recyclage contribue significativement à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, en remplaçant les matériaux vierges par des matériaux recyclés, offrant ainsi une alternative plus respectueuse de l'environnement (**SEDDRe**). Parallèlement, le réemploi des matériaux de construction joue un rôle déterminant dans la préservation des ressources naturelles. Cette pratique limite la nécessité

d'extraire de nouvelles matières premières tout en s'inscrivant pleinement dans les principes de l'économie circulaire, favorisant une gestion durable des ressources (**Bellastock**). En outre, les résultats issus de plusieurs études indiquent que le réemploi peut parfois présenter des bénéfices environnementaux supérieurs à ceux du recyclage. En termes de réduction des impacts climatiques et énergétiques, cette approche s'avère particulièrement avantageuse dans certaines situations spécifiques (**Bellastock**). En conclusion, la valorisation des déchets issus du secteur du BTP constitue une solution incontournable pour promouvoir la durabilité et minimiser l'empreinte écologique de cette industrie.

VII Conclusion

Ce chapitre a permis de mettre en valeur l'importance des déchets BTP, tant sur le plan environnemental que comme ressource de matériaux valorisables. L’analyse des propriétés du gypse et du plâtre a offert une meilleure compréhension de leurs caractéristiques et des opportunités qu’ils présentent pour une réutilisation efficace. De plus, les approches examinées, telles que le recyclage et les processus de valorisation, témoignent de la possibilité de réduire leur impact écologique tout en leur conférant une utilité renouvelée. Ces observations constituent une base essentielle pour la partie expérimentale de cette étude, qui explorera la transformation des déchets de gypse et de plâtre en une poudre extinctrice, conçue pour la lutte contre les incendies.

Chapitre III

Les poudres d’extinction

I. Introduction

La maîtrise du feu et la sécurité incendie repose sur une compréhension approfondie des principes fondamentaux de la combustion, tels que le triangle du feu, le mélange stœchiométrique et les limites d'inflammabilité. Elle inclut également la classification des classes de feux conformément aux normes en vigueur, ainsi que l'analyse des principaux phénomènes dangereux associés. Enfin, la lutte contre les incendies s'articule autour des mécanismes d'extinction et de l'utilisation des agents extincteurs, pour la réduction des risques et la protection des personnes, des biens et de l'environnement.

II. Définition du feu

D'après la National Fire Protection Association (**NFPA 921**), le feu est la manifestation d'une réaction chimique d'oxydation rapide, connue sous le nom de combustion, qui génère de la chaleur, de la lumière et des produits de réaction. Sa formation nécessite la présence simultanée de trois éléments essentiels, constituant le triangle du feu.

➢ Triangle de feu

D'après la National Fire Protection Association (**NFPA 921**), le triangle du feu est un concept clé en matière de sécurité incendie. Il illustre les trois éléments essentiels à l'apparition et au maintien d'un incendie un combustible, un comburant et une source d'énergie. Si l'un de ces éléments manque, la combustion ne peut pas se produire ou s'interrompt immédiatement.

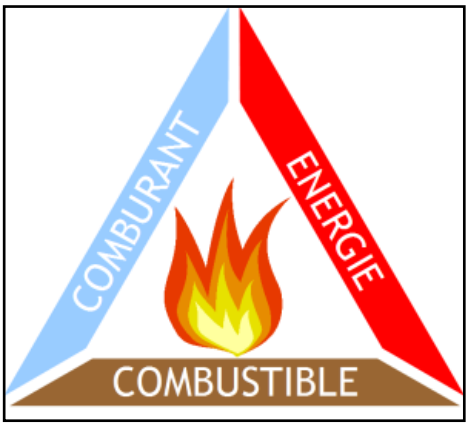

Figure 10 : Le triangle de feu (**Extincteur.net**

II.1. Combustible

Le combustible est toute substance solide, liquide ou gazeuse capable de réagir chimiquement avec un comburant dans une réaction d'oxydation. Selon la **NFPA 921,** il s'agit du matériau qui subit la combustion après avoir atteint les conditions favorables, notamment une

température suffisante permettant sa décomposition ou sa vaporisation. Les combustibles peuvent être naturels (bois, papier) ou synthétiques (plastiques, hydrocarbures).

II.2. Comburant

Le comburant est l'agent oxydant qui permet la réaction de combustion. Dans la majorité des incendies, il s'agit de l'oxygène présent dans l'air ambiant (environ 21 %). D'après la **NFPA 921**, la concentration en oxygène joue un rôle déterminant dans l'intensité et la propagation du feu : une diminution de cette concentration peut ralentir, voire interrompre la combustion, tandis qu'un enrichissement en oxygène peut l'accélérer.

II.3. Énergie d'activation

L'énergie d'activation correspond à l'apport énergétique initial nécessaire pour déclencher la combustion. Selon la **NFPA 921**, cette énergie peut provenir de diverses sources telles qu'une flamme nue, une étincelle électrique, une surface chaude ou une réaction chimique. Elle permet d'atteindre la température d'inflammation du combustible, condition indispensable au démarrage de la réaction de combustion.

➢ Mélange stœchiométrique

Le mélange stœchiométrique correspond à la proportion idéale entre un combustible et un comburant permettant une combustion complète (zone d'inflammabilité). Cette notion, issue de la chimie de la combustion, est en cohérence avec les principes décrits par la National Fire Protection Association concernant les conditions nécessaires au développement du feu.

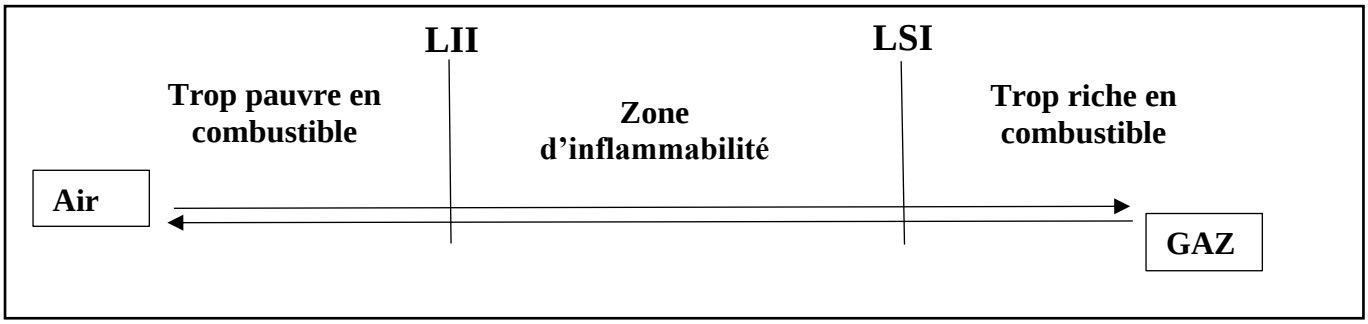

Figure 11 : Mélange stœchiométrique.

- **Limite Inférieure d'Inflammabilité (LII) :**

Lorsque la concentration de gaz est **inférieure à** cette limite, elle est trop faible pour qu'une inflammation du mélange puisse se produire. Par conséquent, il est essentiel de mettre en place des mesures préventives avant que le risque d'inflammation ne survienne **(Roumane, S).**

- **Limite Supérieure d'Inflammabilité (LSI)** :

Au-delà de cette limite, la concentration de gaz devient excessive, entraînant un manque de comburant qui rend impossible l'inflammation du mélange. Toutefois, cette limite est peu exploitable en pratique pour la prévention ou l'intervention, car le mélange de gaz n'est, dans la plupart des cas, pas parfaitement homogène **(Roumane, S).**

III. Définitions et désignation des classes de feux

La classification des feux représente une étape clé en matière de sécurité incendie, car elle permet de déterminer la nature du combustible impliqué et d'opter pour l'agent extincteur le mieux adapté. Pour ce faire, elle s'appuie sur les normes européennes **EN 2** et américaines **NFPA 10**. Ces deux référentiels établissent les différentes classes de feux en fonction des matériaux en combustion, tout en différant sur certains points, notamment en ce qui concerne les gaz inflammables, les risques électriques et les feux liés aux appareils de cuisson.

Figure 12 : les classes de feux (***SSIAP.eu)***

1. Feux Secs : impliquant des matériaux solides tels que, le bois, les tissus, le papier, le caoutchouc et de nombreux plastiques, généralement d'origine organique, dans lesquels la combustion se produit normalement avec la formation de braises incandescentes.

Les incendies de classe A peuvent être soit de surface, lorsque le feu se situe à la surface du matériau, soit en profondeur, lorsque le feu est à l'intérieur du matériau.

Figure 13 : Feu de forêt déclenché par la foudre (**Futura Sciences**)

2. Feux Gras : impliquant des liquides ou des solides liquéfiables, il convient de prendre en compte la rétention du carburant et ses caractéristiques (par exemple, polaire ou non polaire), car cela peut influencer la méthode de lutte contre l'incendie.

Figure 14 : Incendie de liquide inflammable **(Le Sillon Belge**)

3. Feux de Gaz : Il est généralement considéré comme dangereux d'éteindre un incendie de gaz si la source de gaz ne peut pas être arrêtée, ce qui crée un risque d'explosion. Le gaz sous pression peut s'accumuler et augmenter encore le risque d'explosion.

Figure 15 : Feux de Gaz **(iStock)**

4. Feux de Métaux : impliquant des métaux ;

Un incendie de métal présente une situation tellement spécifique (en termes du métal lui-même, de sa forme, de la configuration du feu, etc.) qu'il n'est pas possible de définir un feu standard représentatif aux fins des tests et chaque situation doit être considérée séparément.

Figure 16 : feux de métaux **(ARIA)**

5. Feux de Cuisson : impliquant des milieux de cuisson (huiles et graisses végétales ou animales) dans des appareils de cuisson ;

Lorsque l'eau est projetée directement dans un milieu de cuisson chaud en profondeur, il y a un risque d'explosion et/ou d'éclaboussures d'huile.

Figure 17 : Feux de cuisson (**Dreamstime**)

6. **Feux d'origine électrique** : Les incendies d'origine électrique résultent de dysfonctionnements ou de défaillances dans les installations ou équipements électriques sous tension.

Figure 18 : Feux d'origine électrique (**DH Les Sports+**)

7. **Feux des batteries Lithium ion :** impliquant des cellules et des batteries lithium-ion, sans trace de lithium métallique.

Figure 19 : feux des batteries Lithium ion **(Large Power Co., Ltd)**

Tableau 03 : les classes de feux.

Classe de feux	**Classification Européenne, (EN2, 2005)**	**Classification Américaine (NFPA 10, 2022)**
Classes A	Feux des solides	Feux des solides
Classe B	Feux des liquides	Feux des liquides et Gaz inflammables
Classe C	Feux des Gaz	Feux d'origine électrique
Classe D	Feux des métaux	Feux des métaux
Classe F	Feux des huiles de cuisson	Feux des huiles et graisses de cuisson

IV. Phénomènes de combustion

Les phénomènes de combustion correspondent à des phénomènes d'oxydation d'un combustible ainsi à des événements non souhaités résultant d'une libération brutale d'énergie ou de substances dangereuses. Cette libération peut engendrer des effets physiques, thermiques, mécaniques ou toxiques susceptibles de provoquer des dommages sur les personnes, les biens ou l'environnement. Leur analyse repose généralement sur trois paramètres principaux : la probabilité d'occurrence, l'intensité des effets générés et leur dynamique de développement dans le temps et l'espace, telle que (**INERIS) :**

- **Incendie :** l'incendie est défini comme une combustion non contrôlée, auto-entretenue, qui se développe de manière progressive dans le temps et l'espace. Il résulte de la réunion simultanée de trois éléments essentiels constituant le triangle du feu : un combustible, un comburant (généralement l'oxygène de l'air) et une source d'inflammation.

Certains phénomènes, comme les boules de feu, sont associés aux incendies mais sont généralement étudiés séparément en raison de leur courte durée, de leur forte intensité thermique et de leur capacité à projeter des matériaux en combustion sur de longues distances.

Figure 20 : Un incendie **(Leral.net)**

- **Explosion :** Une explosion est une réaction brutale d'oxydation ou de décomposition qui entraîne une augmentation très rapide de la température et/ou de la pression dans un volume

donné. Ce phénomène se caractérise par une libération d'énergie extrêmement rapide, générant des effets de surpression et des effets thermiques importants.

Figure 21 : Explosion de Beirut (**Le monde**)

On distingue deux grandes catégories d'explosions :

1. **Les explosions physiques** : liées à un changement d'état ou à une rupture mécanique par exemple un éclatement sous pression
2. **Les explosions chimiques** : résultant de réactions rapides de combustion ou de décomposition de substances instables.

Dans le cas des explosions de gaz ou de poussières, on différencie deux régimes de propagation de la flamme :

1. **La déflagration** : où la vitesse de propagation est inférieure à celle du son, avec une progression relativement lente mais destructrice ;
2. **La détonation** : où la propagation dépasse la vitesse du son, générant une onde de choc très violente.

➢ **BLEVE :** Le BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) est une explosion physique résultant de la rupture soudaine d'un réservoir contenant un liquide sous pression, chauffé à une température supérieure à son point d'ébullition à pression atmosphérique. Cette rupture entraîne une vaporisation instantanée du liquide, provoquant une onde de choc et, si le liquide est inflammable, une boule de feu (**Info Pompiers).**

Figure 22 : BLEVE sphère de GPL **(Benyamina, N**)

Trois conditions sont nécessaires à l'occurrence d'un BLEVE :

1. Un liquide stocké à une température supérieure à son point d'ébullition à pression atmosphérique.
2. Un récipient sous pression maintenant le liquide à l'état liquide.
3. Une défaillance soudaine du récipient, entraînant une chute rapide de pression.

➢ **Types de BLEVE** :

- **BLEVE chaud** : Survient lorsque le liquide est chauffé au-delà de sa température limite de surchauffe. La rupture est généralement due à un incendie externe.
- **BLEVE froid** : Se produit sans apport thermique externe, souvent à la suite d'un choc mécanique ou d'une défaillance structurelle du récipient.

➢ **Les effets d'un BLEVE peuvent être dévastateurs :**

- **Onde de choc** : Peut causer des dommages structurels importants.
- **Projection de débris** : Des fragments du récipient peuvent être projetés à grande distance.
- **Boule de feu** : Si le liquide est inflammable, une boule de feu intense peut se former, entraînant des brûlures et des incendies secondaires.

➢ **Boil Over :** l'**INERIS** précise que le Boil over est un phénomène de moussage brutal résultant de la vaporisation rapide de l'eau contenue au fond du réservoir. Il engendre des projections importantes de combustible, une extension rapide des flammes ainsi que la formation d'une boule de feu. Ce phénomène est caractérisé par la propagation d'une onde de chaleur à travers le liquide jusqu'à atteindre la couche d'eau, déclenchant une vaporisation explosive.

Figure 23 : Boil over (**SafeRack)**

- **Boil over classique** correspond à une situation dangereuse pouvant survenir lors de l'incendie d'hydrocarbures contenus dans un réservoir atmosphérique. Selon la National Fire Protection Association (NFPA) il se produit lorsqu'une combustion prolongée entraîne la formation d'une couche chaude de résidus de combustion qui s'enfonce progressivement dans le liquide non brûlé. Cette onde thermique atteint finalement une couche d'eau située au fond du réservoir, provoquant une vaporisation brutale et explosive de celle-ci. Ce phénomène entraîne alors l'expulsion violente du contenu du bac ainsi qu'une augmentation soudaine de l'intensité de l'incendie.

- **Boil over en couche mince** constitue une variante de ce phénomène se produisant lorsque l'épaisseur de la couche de liquide inflammable dans le réservoir est relativement faible. Selon l'INERIS, il est également lié à la progression d'une onde de chaleur à travers la surface en feu jusqu'à atteindre une fine couche d'eau ou d'émulsion présente au fond du bac. Lorsque cette onde thermique atteint cette couche aqueuse, l'eau subit une vaporisation extrêmement rapide, entraînant une expansion brutale de volume. Cette transformation provoque des projections violentes de combustible enflammé hors du réservoir, accompagnées d'une intensification soudaine de l'incendie et d'une extension rapide des flammes.

V. Risques et impacts de feux

Les incendies représentent des événements dangereux susceptibles de provoquer des conséquences significatives sur les individus, les biens matériels et l'environnement. D'après l'INERIS, la gravité d'un incendie est conditionnée par divers facteurs, tels que la nature des substances en jeu, les conditions de combustion ou encore la vitesse de propagation du feu. Sur le plan humain, les incendies posent principalement un risque lié aux fortes chaleurs et à l'exposition aux fumées toxiques.

L'INRS indique que ces fumées sont la principale cause de décès lors d'un incendie. Elles comportent des gaz toxiques, notamment le monoxyde de carbone, qui peut entraîner une asphyxie rapide, ainsi que d'autres substances irritantes et nocives. En termes de dégâts matériels, les incendies entraînent des dommages considérables aux structures et aux équipements. Les effets thermiques, associés à la progression des flammes, altèrent les propriétés mécaniques des matériaux, ce qui peut provoquer l'effondrement partiel ou total des bâtiments et installations (**Drysdale**).

Sur le plan environnemental, **l'INERIS** souligne que les incendies génèrent une pollution majeure. Les émissions atmosphériques contiennent des particules fines et des substances toxiques, tandis que les eaux utilisées pour éteindre les flammes peuvent se charger en polluants tels que hydrocarbures, métaux lourds et produits chimiques, contaminant ainsi les sols et les ressources en eau.

Enfin, selon la NFPA, les incendies peuvent provoquer des phénomènes aggravants comme des explosions ou des réactions en cascade, augmentant fortement l'étendue des dégâts ainsi que la complexité des interventions nécessaires **(NFPA).**

VI. Accidentologie

Ce tableau et selon la norme européenne illustre des exemples concrets d'accidents réels, organisés en fonction des différentes catégories de feux. Il met en évidence les types de combustibles impliqués, les causes identifiées et les conséquences observées lors de divers scénarios d'incendie (**BARPI, Base de données ARIA**).

Tableau 04 : Accidents réels organisés en fonction des différentes catégories de feux (**BARPI, Base de données ARIA).**

Lien de l'accident	Description de l'accident	Lieu de l'accident	Les effets	Classe de feux
https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/fiche_detaillee/58596-2/	Incendie sur une ligne industrielle (huile thermique enflammée après rupture d'équipement, propagation aux plastiques et palettes)	France	Destruction d'une ligne, dégâts importants, arrêt long d'activité, fumées importantes	**B + A**
https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/30122/	Accident de feu de bouteille de gaz (propylène) avec plusieurs explosions de type BLEVE	Etats-Unis	Une victime, dégâts matériels important	**C**
https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/21999/	Incendie sur un camion de transport de kérosène.	Chine	Explosions multiples. Endommagement de 23 véhicules.	**B**
https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/7126/	Un gazoduc s'est enflammé puis a explosé une explosion de type BLEVE.	Egypte	Explosion (BLEVE). Incendie important. 19 personnes blessées.	**C**
https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/fiche_detaillee/6077-2/	Un incendie s'est déclaré dans un bac de stockage de pétrole brut d'une raffinerie	Royaume-Uni	Incendie majeur Boil-over, propagation du feu, dégâts matériels importants et 6 blessés.	**B**

VII. Maitrise de feux

L'extinction d'un incendie repose sur la suppression d'un ou de plusieurs éléments constitutifs du phénomène de combustion, modélisé par le triangle du feu : le combustible, le comburant (généralement l'oxygène), l'énergie d'activation (chaleur). Ainsi, toute action permettant d'éliminer ou de perturber l'un de ces éléments entraîne l'arrêt de la combustion.

Selon la littérature spécialisée, notamment la **National Fire Protection Association** et les travaux de **Drysdale et INRS,** quatre mécanismes fondamentaux d'extinction sont distingués : le refroidissement, l'étouffement, l'isolement du combustible et l'inhibition de la réaction en chaîne. Ces mécanismes peuvent agir séparément ou de manière combinée selon l'agent extincteur utilisé et la nature du feu.

VII.1. Refroidissement

Le refroidissement est le mécanisme le plus couramment utilisé dans la lutte contre les incendies. Il consiste à **abaisser la température du combustible en dessous de sa température d'inflammation**, empêchant ainsi la poursuite de la combustion.

Ce phénomène repose principalement sur l'absorption de la chaleur par un agent extincteur.

Le refroidissement permet aussi de **limiter la pyrolyse**, c'est-à-dire la décomposition thermique du combustible produisant des gaz inflammables. En réduisant cette production de vapeurs combustibles, la flamme ne peut plus se maintenir.

Cependant, ce mécanisme nécessite souvent une quantité importante d'agent extincteur et peut être inefficace sur certains feux spécifiques, notamment les feux d'origine électrique ou les feux de liquides inflammables.

VII.2. Étouffement (ou inertage)

L'étouffement consiste à **réduire la concentration en comburant**, principalement l'oxygène, dans la zone de combustion. La combustion ne peut être maintenue que si la teneur en oxygène dépasse un certain seuil, généralement situé autour de 15 % pour la plupart des combustibles.

Lorsque cette concentration diminue en dessous de ce seuil critique, la réaction de combustion s'arrête faute d'oxygène.

Ce mécanisme peut être obtenu par plusieurs moyens :

- Utilisation de **gaz inertes** (comme le dioxyde de carbone ou l'azote) qui remplacent l'oxygène dans l'atmosphère ;
- Application de **mousses extinctrices**, formant une couche isolante empêchant les échanges gazeux ;

- Recouvrement du foyer avec des matériaux (**sable, couvertures anti-feu**) limitant l'apport d'air.
- Utilisation des **poudres extinctrices**.

L'étouffement est particulièrement efficace pour les feux de liquides inflammables, où il permet de stopper l'émission de vapeurs combustibles. Toutefois, il peut être difficile à maintenir dans des environnements ouverts où l'air se renouvelle rapidement.

VII.3. Isolement ou suppression du combustible

Ce mécanisme repose sur le principe fondamental selon lequel **la combustion ne peut se produire sans combustible**. Il consiste donc à éliminer, isoler ou interrompre l'alimentation en combustible.

Dans les installations industrielles, ce mécanisme est souvent intégré dans les systèmes de sécurité (arrêt d'urgence, coupure automatique d'alimentation).

Ce procédé est particulièrement efficace car il agit directement sur la source du feu. Cependant, il n'est pas toujours applicable, notamment lorsque le combustible est difficilement accessible ou déjà fortement engagé dans la combustion.

VIII. Agents d'extinction

Un agent extincteur est une substance liquide, solide ou gazeuse utilisée pour éteindre un feu/incendie ou en arrêter le développement. Il agit en supprimant ou en limitant l'un des éléments du triangle de feu nécessaires à la combustion, à savoir le combustible, le comburant ou la source d'énergie (**YLEA)**

1. Type des agents d'extinction

a) Poudres extinctrices

Les poudres d'extinction sont des agents extincteurs très efficaces et rapides. L'effet extincteur brutal tridimensionnel du nuage de poudre découle de l'effet d'inhibition puis de l'effet d'étouffement (**Bonneville**).

Selon la **norme ISO 7202**, on peut distinguer 03 types de poudre extinctrice :

- La poudre ABC ;
- La poudre BC ;

- La poudre D ;

1 Poudre ABC :

Sont des agents polyvalents, utilisables sur les feux de classes A (matériaux solides), B (liquides inflammables) et C (gaz). En raison de leur polyvalence et de leur efficacité, ces poudres sont largement utilisées dans les environnements présentant des risques variés.

2 Poudre BC :

Sont destinées aux feux de classes B et C. Elles se distinguent par une extinction rapide des flammes, mais ne présentent pas d'efficacité sur les feux de classe A, en raison de l'absence d'action sur les braises.

3 Poudre D :

Utilisables sur les feux de classe D. Elles sont aussi utilisables pour les feux de métalloïdes.

Tableau 05 : La composition des poudres extinctrices **(Bonneville; NFPA10)**

Types de poudre	Composition chimique	Formule chimique
Les poudres BC	Bicarbonate de sodium ou de sels de potassium	(NaHCO3)
Les poudres ABC	Phosphate monoammonique	(NH4H2PO4)
Les poudres D	Chlorures et Graphite.	(NaCl, KCl)

Les principes d'extinction des poudres extinctrices reposent principalement sur trois actions complémentaires : l'étouffement, l'inhibition de la réaction en chaîne, et le refroidissement par. Ces principes sont décrits Selon la littérature spécialisée **(National Fire Protection Association, Drysdale).**

b) Eau déminéralisée :

L'eau est généralement l'agent extincteur principal contenu dans ces dispositifs. Toutefois, afin d'améliorer ses performances, notamment en termes de pénétration, de mouillage ou de réduction des tensions superficielles, des additifs peuvent être incorporés. Ces additifs permettent par exemple d'augmenter l'efficacité sur les matériaux poreux ou de limiter la quantité d'eau nécessaire à l'extinction. Le mécanisme d'action de l'eau repose essentiellement

sur le **refroidissement**, mais également, dans une moindre mesure, sur l'étouffement. En effet, lors de son évaporation au contact du foyer, l'eau absorbe une quantité importante d'énergie thermique, ce qui contribue à la diminution rapide de la température. Par ailleurs, la vapeur d'eau produite peut participer à la dilution locale de l'oxygène, réduisant ainsi la capacité du feu à se maintenir. Enfin, l'agent extincteur à base d'eau est principalement adapté aux feux de classe A. Il ne doit pas être utilisé sur des équipements électriques sous tension ni sur des liquides inflammables, en raison des risques d'électrocution, de projection ou d'extension du feu **Toppr Guides).**

c) Mousse d'extinction :

La mousse extinctrice est largement utilisée dans la lutte contre les incendies, notamment pour les feux impliquant des liquides inflammables tels que les hydrocarbures. La mousse extinctrice est généralement constituée d'un mélange d'eau, d'un agent moussant (l'émulseur) et de l'air. Selon sa formulation, elle peut être de type chimique ou physique, et sa performance dépend de sa capacité à former une structure stable et homogène. Une fois appliquée sur le foyer, la mousse se déploie en une couche continue qui recouvre la surface du combustible (le tapis de mousse) **Toppr Guides).**

Le mécanisme d'action de cet agent extincteur repose principalement sur trois effets complémentaires. Tout d'abord, **l'isolement** est le mécanisme dominant : la couche de mousse forme une barrière physique entre le combustible et l'oxygène de l'air, limitant ainsi les échanges gazeux et empêchant l'alimentation du feu en comburant. Ensuite, la mousse contribue également à un effet de **refroidissement** grâce à la présence d'eau dans sa composition, qui absorbe une partie de l'énergie thermique du foyer. Enfin, elle joue un rôle important dans la prévention des vapeurs inflammables, en réduisant l'évaporation des liquides combustibles **Toppr Guides).**

Figure 24 : la mousse d'extinction (**Gielle**).

d) Dioxyde de carbone (CO_2) :

L'agent extincteur dioxyde de carbone (CO_2) est principalement destiné à l'extinction des feux d'origine électrique.

Le mécanisme d'action du CO_2 repose principalement sur l'**étouffement**. En effet, lors de sa libération, le dioxyde de carbone se diffuse sous forme de gaz froid ou de neige carbonique, ce qui permet de remplacer l'oxygène présent autour du foyer et de réduire sa concentration en dessous du seuil nécessaire au maintien de la combustion. Par ailleurs, cet effet est renforcé par un léger **refroidissement** local dû à la détente rapide du gaz **Toppr Guides).**

Figure 25 : système d'extinction à CO_2 (**Aware Fire Technology Co., Ltd**)

IX. Conclusion

Ce chapitre met en lumière que la compréhension des phénomènes de combustion repose sur une analyse combinée des conditions d’inflammation, des propriétés des combustibles et des interactions entre les éléments du triangle du feu. Par ailleurs, la classification des types de feux s’avère être un outil indispensable pour adapter les moyens d’intervention à la nature spécifique du sinistre. Le choix des agents extincteurs et des méthodes d’intervention doit être soigneusement ajusté en fonction des caractéristiques du feu, afin de maximiser l’efficacité tout en limitant les impacts sur les personnes, les biens et l’environnement.

Chapitre IV

Potentiel des déchets BTP comme agents extincteurs

I Introduction

Les déchets de construction et de démolition (DCD) constituent l'un des flux les plus importants de déchets solides à l'échelle mondiale, dominés par des fractions minérales majoritairement inertes telles que le béton, les briques, les céramiques et le plâtre. Au-delà de leur impact environnemental et de leur volume croissant, ces matériaux présentent des caractéristiques physico-chimiques susceptibles d'être exploitées dans des applications à haute valeur ajoutée, notamment dans le domaine de la sécurité incendie.

Dans une approche d'ingénierie des matériaux appliquée à la lutte contre le feu, plusieurs études suggèrent que certaines fractions des DCD peuvent contribuer à des mécanismes d'extinction passifs tels que l'inertage thermique, l'étouffement par barrière physique ou encore l'absorption endothermique. Toutefois, ces propriétés potentielles restent fortement conditionnées par la variabilité intrinsèque des déchets et par l'absence de standardisation des matériaux recyclés.

Ce chapitre examine ainsi le potentiel des DCD comme agents extincteurs alternatifs, tout en mettant en évidence les principales limites techniques, environnementales et réglementaires qui encadrent leur valorisation dans ce domaine.

II Caractérisation et propriétés favorables des déchets BTP

Les déchets issus des activités de construction, de rénovation et de démolition (DCD) constituent une part importante des déchets solides produits en Algérie. Ils sont composés principalement de matériaux minéraux tels que le béton, les briques, les tuiles, le verre et le plâtre. Selon la réglementation algérienne, ces déchets sont généralement classés parmi les déchets inertes lorsqu'ils ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique lors de leur mise en décharge et qu'ils ne présentent pas de risque pour la santé ou l'environnement. Toutefois, sous l'effet de températures élevées ou lors d'un incendie, certains de leurs constituants peuvent subir des transformations physico-chimiques susceptibles de modifier leurs propriétés initiales (**Agence Nationale des Déchets [AND]**).

II.1. Propriétés thermo-physiques et capacité de rétention thermique

L'évaluation des DCD comme barrières thermiques repose d'abord sur leur comportement face aux transferts de chaleur intensifs d'un incendie. À cet égard, les travaux de (**Fenollera et al)** montrent que l'incorporation de granulats recyclés entraîne une diminution de la conductivité thermique ainsi qu'une augmentation de la porosité du matériau.

Dans le cadre d'une application pulvérulente sur un foyer, ces caractéristiques présentent un intérêt potentiel pour l'extinction passive. Une conductivité thermique faible, couplée à la géométrie irrégulière des grains, limite la propagation du flux thermique à travers le lit de matière déposé. De plus, cette inertie thermique permet d'absorber une partie de l'énergie calorifique sans entretenir la combustion.

Sous l'effet de l'élévation de température, les composants subissent des transformations structurelles importantes. D'une part, les hydrates du ciment subissent une déshydratation progressive qui altère leurs propriétés à haute température (**Xiao et al.**). D'autre part, la fraction issue des déchets de plâtre (gypse, $CaSO_4.\ 2H_2O$) présente un intérêt majeur en ingénierie de la sécurité incendie. Sous l'action de la chaleur, le gypse subit des réactions de déshydratation fortement endothermiques, libérant sa vapeur d'eau constitutionnelle (**Mehaffey et al**). Bien que ces travaux fondateurs concernent principalement les plaques de plâtre structurelles, les mécanismes thermodynamiques observés restent transposables au comportement de phases pulvérulentes de gypse soumises à un flux thermique intense, présentant des similitudes physiques avec certains mécanismes absorbants recherchés dans les poudres extinctrices.

II.2. Mécanismes d'étouffement par barrière physique (Effet couverture)

L'application de ces matières broyées vise à étouffer le feu en limitant l'accès du comburant, principalement l'oxygène atmosphérique. Cet effet de couverture dépend notamment de la granulométrie et de la morphologie des particules. En se déposant sur le combustible en combustion, les grains forment une couche relativement compacte qui réduit les échanges gazeux entre le foyer et son environnement.

Cette barrière physique limite l'apport d'oxygène nécessaire au maintien de la combustion et freine la dispersion des gaz inflammables issus de la pyrolyse du matériau. Par ailleurs, la couche déposée réduit l'exposition directe du combustible aux flammes et aux flux thermiques, ce qui contribue à ralentir la dégradation thermique du matériau. L'ensemble de ces phénomènes participe à l'affaiblissement progressif de la combustion par étouffement et isolation physique (**Drysdale**).

II.3. Stabilité chimique à haute température

Les principaux constituants minéraux des déchets de construction et de démolition (DCD), notamment la silice (SiO_2), les carbonates et les résidus de gypse, sont des composés déjà oxydés présentant une forte stabilité chimique lorsqu'ils sont exposés à des températures élevées. Contrairement aux matériaux organiques, ces phases minérales ne génèrent pas de produits de pyrolyse combustibles susceptibles d'alimenter l'incendie.

Sous l'effet de la chaleur, les transformations observées correspondent principalement à des phénomènes de décomposition ou de déshydratation thermiques. Ces réactions sont généralement associées à une absorption d'énergie et ne conduisent pas à la formation de composés inflammables (**Aïtcin ; Alarcón-Ruiz et al**).

Dans le cas du gypse, l'élévation de la température provoque une déshydratation progressive accompagnée d'une libération de vapeur d'eau et de la formation de phases plus stables telles que l'anhydrite. Ce comportement a été largement documenté pour les matériaux à base de plâtre soumis à l'action du feu (**Mehaffey et al ; Wakili et al**).

II.4. Porosité et comportement microstructural

Les bétons et mortiers recyclés présentent généralement une porosité plus élevée que les granulats naturels en raison de la présence d'une ancienne pâte de ciment adhérant à leur surface. Cette particularité microstructurale influence plusieurs propriétés physiques du

matériau, notamment sa densité apparente, sa perméabilité et sa capacité d'absorption d'eau (**Poon et al**).

La structure poreuse des DCD favorise également la rétention de fluides au sein du réseau de pores. Cette capacité d'absorption est largement documentée dans la littérature consacrée aux granulats recyclés et constitue l'une des caractéristiques distinctives de ces matériaux (**Silva et al**).

Dans le contexte d'une application potentielle en extinction incendie, cette propriété pourrait contribuer au maintien temporaire d'une certaine quantité d'eau au sein du matériau. Toutefois, l'influence réelle de ce phénomène sur l'efficacité extinctrice nécessite une validation expérimentale spécifique.

III État de l'art et travaux scientifiques existants

III.1. Utilisation des poudres de béton et de mortier recyclés dans l'extinction des feux de classe A (Feux secs)

L'utilisation des poudres issues du recyclage des bétons et mortiers dans le domaine de la sécurité incendie s'inscrit dans une démarche de valorisation des déchets de construction et de démolition. Ces matériaux sont principalement constitués de phases minérales stables telles que le carbonate de calcium ($CaCO_3$), la silice (SiO_2) et les hydrates de silicate de calcium (C-S-H), ce qui leur confère une inertie thermique relativement élevée (**Pacheco-Torgal & Jalali**).

Les feux de classe A concernent des matériaux solides combustibles tels que le bois, le papier et les textiles, dont la combustion dépend fortement des transferts de chaleur et de l'apport en oxygène (Drysdale). Dans ce contexte, les poudres minérales peuvent agir comme agents passifs en formant, lors de leur dépôt sur le combustible, une couche isolante qui limite à la fois le transfert thermique et la diffusion de l'oxygène vers la zone de réaction, contribuant ainsi au ralentissement de la propagation du feu.

Le carbonate de calcium présent dans ces matériaux peut subir une décomposition thermique à haute température selon la réaction :

$$\mathbf{CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2}$$

Cette transformation est associée à une absorption d'énergie thermique (**Babrauskas**).

Toutefois, dans des conditions d'incendie réelles, son influence sur la dynamique globale de combustion reste secondaire.

Contrairement aux agents extincteurs chimiques de type ABC, ces poudres recyclées n'agissent pas par inhibition des radicaux libres en phase gazeuse. Leur efficacité repose principalement sur des mécanismes physiques tels que l'étouffement et l'isolation thermique.

III.2. Valorisation des déchets de plâtre (Gypse)

Les déchets de plâtre issus des activités de construction et de démolition sont principalement constitués de sulfate de calcium dihydraté ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$). Leur intérêt en sécurité incendie réside dans leurs propriétés thermo-chimiques liées à leur comportement endothermique.

Sous l'effet de la chaleur, le gypse subit une déshydratation progressive en plusieurs étapes, conduisant à la formation de bassanite ($CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$), puis d'anhydrite ($CaSO_4$). Ce phénomène débute généralement entre 80°C et 150°C et s'accompagne d'une absorption d'énergie thermique importante, ce qui contribue à limiter l'élévation de température des matériaux exposés au feu (**Kontogeorgos, Mandilaras & Founti**).

$$\mathbf{CaSO_4 \cdot 2}\boldsymbol{H_2O} \rightarrow \mathbf{CaSO_4 \cdot}\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}}\boldsymbol{H_2O} + \frac{\mathbf{3}}{\mathbf{2}}\boldsymbol{H_2O}$$

La vapeur d'eau libérée lors de cette déshydratation peut également participer localement à la dilution des gaz chauds, contribuant ainsi à l'atténuation des conditions de combustion (**Kontogeorgos & Founti**).

Contrairement aux agents extincteurs chimiques, le gypse agit principalement par des mécanismes physiques, notamment l'absorption de chaleur, la libération de vapeur d'eau et la formation d'un résidu minéral stable après déshydratation.

Le comportement thermique du gypse en situation d'incendie est bien documenté dans la littérature et constitue un mécanisme essentiel expliquant son utilisation dans les systèmes de protection passive contre le feu (**Ryan**).

III.3. Emploi des granulats lourds pour la maîtrise des feux spéciaux (Feux de métaux ou de classe D)

Les feux de classe D concernent la combustion de métaux réactifs tels que le magnésium, le sodium ou l'aluminium en poudre. Ces incendies se caractérisent par des températures très élevées et une forte réactivité chimique, rendant inefficaces les agents extincteurs classiques tels que l'eau ou les mousses (**Drysdale**).

Selon la **NFPA 484**, la lutte contre les feux de métaux repose sur l'utilisation d'agents spécifiques assurant principalement le confinement du foyer, l'isolation thermique et l'exclusion de l'oxygène.

Dans ce cadre, les matériaux granulaires inertes et parfaitement secs peuvent être envisagés comme éléments de confinement passif, en formant une couche dense susceptible de limiter les échanges entre le métal en combustion et l'air ambiant. Ce rôle reste strictement physique et ne relève pas d'un mécanisme d'extinction chimique.

Toutefois, l'utilisation de tels matériaux nécessite une extrême prudence. La présence d'humidité ou de certaines impuretés peut entraîner des réactions violentes avec les métaux en fusion, ce qui impose des conditions strictes de sécheresse et d'inertie chimique (**Zalosh**).

Ainsi, conformément aux recommandations de la **NFPA 484**, la maîtrise des feux de classe D repose exclusivement sur des agents spécifiquement certifiés, et les granulats lourds ne peuvent être considérés que comme une piste exploratoire de confinement passif dans un cadre théorique.

III.4. Synthèse des performances comparatives (Déchets BTP vs Agents conventionnels)

Un bilan critique des connaissances actuelles permet de structurer les performances comparatives théoriques des fractions pulvérulentes et granulaires issues des déchets de construction et de démolition (DCD) face aux agents extincteurs conventionnels tels que les poudres ABC. Étant donné la nature hétérogène des DCD, cette comparaison doit être comprise comme un modèle théorique basé sur des fractions triées et caractérisées, et non sur des matériaux bruts non traités (**Vegas et al; Poon et al**).

Il est important de souligner que les agents issus des DCD ne constituent pas des substituts aux agents extincteurs normés et certifiés, mais peuvent être considérés comme des matériaux à potentiel fonctionnel dans des scénarios de confinement passif (**Linteris**).

Tableau 06 : synthèse comparative des propriétés et mécanismes d'extinction entre les agents conventionnels et les fractions composites issues de DCD.

Propriété	Agents conventionnels (poudres ABC)	Fractions recyclées de DCD (fraction composite)
Mécanisme principal	Inhibition chimique des radicaux dans la flamme + action d'enrobage des particules (**Drysdale**)	Étouffement physique + absorption thermique par matériaux minéraux (**Pacheco-Torgal ; Jalali**)
Temps d'abattement	Très rapide grâce à l'inhibition des réactions en chaîne de combustion (**Drysdale**)	Plus lent, dépend de la granulométrie et de la densité du lit de particules
Masse requise (g/m²)	Faible à modérée selon efficacité des poudres chimiques (**Babrauskas**)	Élevée en raison de la faible réactivité chimique et de la couverture nécessaire
Comportement thermique	Décomposition thermique des sels ammoniacaux et libération de gaz inhibiteurs	Déshydratation du gypse et décomposition du carbonate de calcium (**Baxter ; Kontogeorgos ; Founti,**)
Impact environnemental	Risque environnemental lié aux composés phosphatés (**ECOFIRE review**)	Impact potentiellement réduit si tri et absence de contaminants (**Pacheco-Torgal ; Jalali**)

L'analyse des mécanismes d'extinction montre que les poudres issues des déchets de construction et de démolition (DCD) présentent globalement une efficacité inférieure à celle des agents extincteurs commerciaux de type ABC. Ces derniers agissent principalement par inhibition des réactions radicalaires en phase gazeuse, interrompant ainsi la chaîne de combustion (**Drysdale ; Linteris**).

En revanche, les matériaux issus des DCD interviennent essentiellement par des mécanismes physiques, notamment par recouvrement du foyer et formation d'une barrière isolante limitant les transferts de chaleur et de masse vers le combustible.

Sur le plan thermique, certains constituants des DCD, en particulier les phases à base de gypse et de carbonates, présentent un comportement endothermique lié respectivement à la déshydratation et à la décarbonatation, contribuant ainsi à l'absorption d'énergie lors de l'exposition au feu (**Bentz et al ; Kontogeorgos & Founti, Baxter,**).

Les performances de ces matériaux dépendent fortement de paramètres tels que la qualité du tri, la granulométrie et l'homogénéité chimique des fractions utilisées. Une hétérogénéité importante peut entraîner une diminution de l'efficacité et rendre leur comportement difficile à prédire en conditions d'incendie.

IV Limites techniques, défis environnementaux et contraintes de mise en œuvre

IV.1. Hétérogénéité et variabilité de la composition des déchets BTP

Les déchets de construction et de démolition (DCD) constituent un flux de matériaux particulièrement hétérogène, résultant de la diversité des matériaux employés dans le secteur du bâtiment. Ils comprennent généralement des fractions minérales telles que le béton, les briques et les céramiques, associées à des matériaux métalliques, plastiques et organiques.

Cette diversité dépend principalement du type de construction, de l'âge des structures et des techniques de démolition utilisées (**Poon et al ; Vegas et al**). En conséquence, la composition des DCD varie fortement d'un chantier à un autre, ce qui entraîne une variabilité importante des propriétés des matériaux recyclés.

Plusieurs études ont montré que cette hétérogénéité influence directement les performances physiques et mécaniques des granulats recyclés, notamment la porosité, la densité apparente et la résistance mécanique. La présence de matériaux indésirables tels que le plâtre, le bois ou les plastiques peut également affecter la qualité du produit final (**Silva et al ; Su et al**).

Ainsi, la variabilité intrinsèque des DCD constitue une contrainte majeure pour leur utilisation dans des applications techniques nécessitant des performances constantes et reproductibles.

IV.2. Risques de toxicité et d'émissions de poussières nocives

Les opérations de traitement des DCD (concassage, broyage, tri) génèrent des poussières fines susceptibles d'être inhalées. Ces particules incluent des fractions respirables (PM10 et PM2.5) pouvant atteindre les voies respiratoires profondes.

Un risque important est associé à la présence de silice cristalline dans certaines fractions minérales. Selon l'International Agency for Research on Cancer (**IARC**), la silice cristalline

inhalée est classée cancérogène pour l'homme (Groupe 1), et est associée à la silicose et au cancer pulmonaire.

La composition variable des DCD peut également inclure des résidus de matériaux de construction anciens (peintures, revêtements ou additifs), pouvant contribuer aux émissions de poussières lors du traitement.

Des mesures de prévention telles que la captation à la source, l'humidification et la filtration permettent de réduire l'exposition des travailleurs (**WHO ; EU-OSHA**).

IV.3. Problématiques logistiques : Conditionnement, transport et fluidité des poudres

Les fractions pulvérulentes issues des déchets de construction et de démolition (DCD) présentent des contraintes significatives lors des opérations de stockage, de transport et de manipulation. Leur comportement est principalement influencé par des paramètres physiques tels que la granulométrie, la morphologie des particules, la densité apparente et la teneur en humidité.

Les travaux en technologie des poudres montrent que les matériaux granulaires fins peuvent présenter des phénomènes de cohésion interparticulaire et d'agglomération, particulièrement en présence d'humidité. Ces phénomènes affectent directement l'écoulement des poudres et peuvent entraîner des blocages ou des écoulements irréguliers dans les systèmes de stockage et de distribution (**Jenike ; Rhodes**).

La distribution granulométrique constitue également un facteur déterminant du comportement des poudres. Une distribution large ou mal contrôlée peut induire une instabilité de l'écoulement et une dégradation des performances de transport des matériaux granulaires (**Rhodes**).

Dans ce contexte, les matériaux issus du recyclage présentent généralement une variabilité plus importante que les poudres industrielles normalisées, ce qui influence leur comportement lors des opérations de manipulation et de transport. Ainsi, la maîtrise des conditions de stockage, de séchage et de conditionnement apparaît essentielle pour assurer la stabilité des matériaux pulvérulents issus du recyclage.

IV.4. Barrières réglementaires et acceptabilité par les services de secours

L'utilisation de matériaux issus des déchets de construction et de démolition (DCD) dans les applications de sécurité incendie est encadrée par des normes strictes visant à garantir la performance, la sécurité et la reproductibilité des agents extincteurs.

Les agents extincteurs portatifs doivent répondre à des exigences de performance définies par des référentiels internationaux. La norme **NFPA 10** précise les critères relatifs à la

classification, à l'efficacité et à l'entretien des extincteurs portatifs, en insistant sur la nécessité d'une performance fiable et reproductible en conditions réelles d'utilisation (**NFPA**). De manière complémentaire, la norme **ISO 7202** définit les exigences relatives aux agents extincteurs en poudre, notamment leurs propriétés physiques telles que la granulométrie, la fluidité et la stabilité au stockage (**ISO**).

Ces référentiels imposent que les agents extincteurs présentent des caractéristiques contrôlées afin de garantir leur efficacité sur des feux types ainsi que leur comportement prévisible lors des interventions. Les essais normalisés constituent une étape essentielle dans la validation des performances des agents de lutte contre l'incendie (**Drysdale**).

Dans ce cadre, les matériaux issus des DCD présentent une limitation majeure liée à leur variabilité intrinsèque. Leur composition dépend fortement de la nature des matériaux d'origine et de l'efficacité des procédés de tri, ce qui rend difficile la standardisation de leurs propriétés physiques et chimiques (**Poon et al ; Silva et al**).

Par ailleurs, la littérature en dynamique du feu souligne que l'efficacité des agents extincteurs dépend fortement de leurs propriétés physiques, notamment leur capacité de dispersion et leur stabilité dans le temps. Toute instabilité de ces paramètres peut compromettre la performance globale du système d'extinction (**Drysdale**).

V Conclusion

Les déchets de construction et de démolition (DCD) présentent un potentiel intéressant comme base de développement d'agents extincteurs alternatifs, grâce à leurs propriétés minérales inertes, leur capacité d'isolation thermique et certains effets endothermiques (gypse, carbonates) qui contribuent à ralentir la propagation du feu.

Cependant, leur utilisation directe reste limitée par leur forte hétérogénéité, la variabilité de leur composition et les exigences normatives strictes (EN 3, ISO 7202), qui imposent des performances reproductibles impossibles à garantir avec des matériaux non standardisés.

Ainsi, ces matériaux ne constituent pas des agents extincteurs opérationnels en l'état, mais une ressource minérale secondaire prometteuse, dont l'exploitation requiert un contrôle strict de la composition ainsi qu'un processus de traitement et de formulation optimisé afin d'assurer des performances reproductibles.

Chapitre V

Matériels et méthodes & Résultats

I. Matériaux utilisés

I.1 Types de déchets BTP sélectionnés

Dans le cadre de notre étude, les déchets utilisés se sont principalement des déchets de plâtre et de gypse (plaques de plâtre) issus du secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP). Ce choix repose sur leur forte disponibilité sur les chantiers, ainsi que par leur potentiel élevé en matière de valorisation et de recyclage. Ces matériaux, largement utilisés dans le domaine de la construction, génèrent des quantités considérables de déchets lors des travaux de construction et de démolition. De plus, leurs propriétés physico-chimiques sont stables, ce qui représente un atout significatif. Considérés comme inertes, ces matériaux offrent un avantage clé pour notre étude en termes de stabilité, de sécurité et de simplicité lors des manipulations expérimentales.

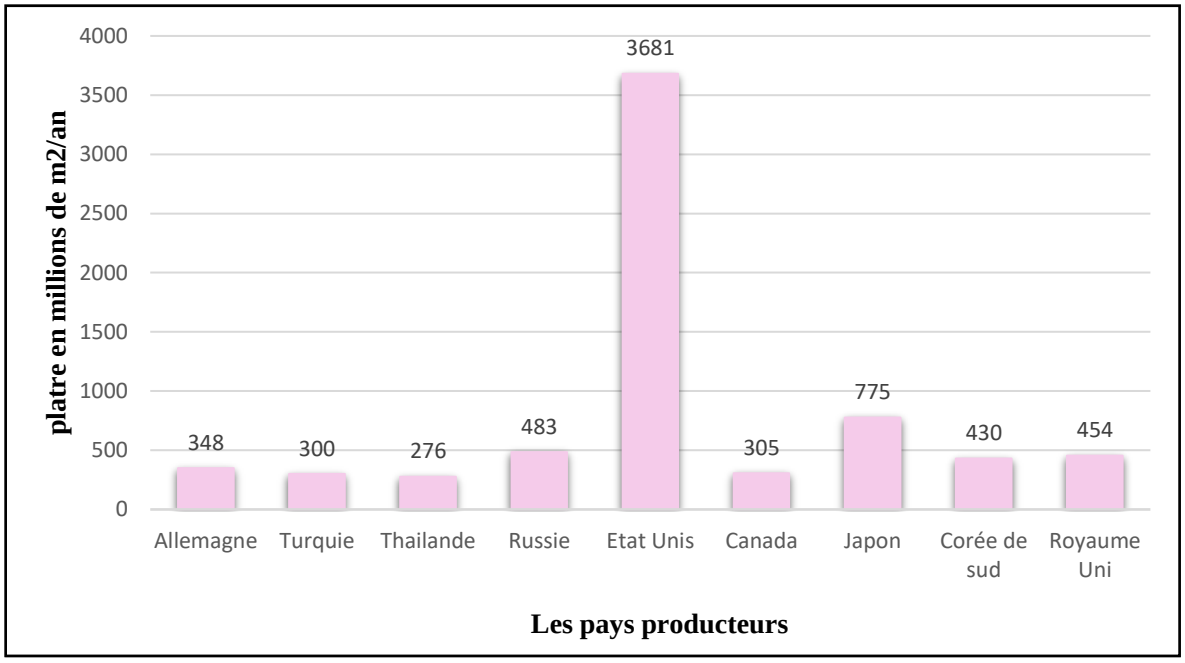

Figure 26 : production de plaque de plâtre (Global Gypsum magazine)

I.1.1. Définition du plâtre

Le plâtre est un matériau dérivé du gypse, une roche sédimentaire formée en grandes masses d'évaporites. Autrefois appelée pierre de gypse, cette roche se trouve parfois sous forme de cristaux d'albâtre ou de sélénite. Généralement, la matière première est extraite des carrières souterraines, puis elle est chauffée, broyée et réduite en une fine poudre pour obtenir le plâtre blanc (**ENSA Marseille–Luminy).**

I.1.2. Définition du gypse

Le gypse est un minéral composé de sulfates de calcium que l'on trouve naturellement sous forme sédimentaire. Sa formule chimique à l'état pur est $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, ce qui correspond à une composition de 32,6 % d'oxyde de calcium (CaO), 46,5 % de trioxyde de soufre (SO_3) et 20,9 % d'eau (H_2O).

I.2. Origine des échantillons

Les échantillons étudiés dans le cadre de cette recherche proviennent du point de distribution d'Oran de l'entreprise **Knauf**, spécialisée dans la fabrication de matériaux à base de gypse et de plâtre. Ils se composent de déchets de plâtre et de gypse (des plaques de plâtre), qui nous ont été fournis pour être intégrés dans nos travaux expérimentaux.

Le Groupe **KNAUF** est une entreprise internationale reconnue pour la conception et la production de matériaux et systèmes de construction à base de plâtre et de gypse. Sa fondation remonte à 1932, lorsque les frères Alfons et Karl Knauf, ingénieurs diplômés de l'École des mines, ont créé la société Gebrüder Knauf. À ses débuts, l'activité de l'entreprise se concentrait sur l'extraction et le traitement du gypse, avant de s'orienter rapidement vers la fabrication de matériaux de construction en plâtre. En 1958, KNAUF franchit une étape majeure en lançant la production industrielle de plaques de plâtre, apportant sur le marché des solutions innovantes, performantes et économiques adaptées aux besoins du secteur du bâtiment. Au fil des années, le groupe s'est considérablement étendu à l'international, opérant actuellement dans plus de 90 pays et comptant plus de 250 sites de production à travers le monde (**Knauf).**

En Algérie, KNAUF est présent depuis plusieurs décennies et a consolidé sa position à partir de 2006 grâce à l'acquisition de la plâtrière de Hassiane Etoual (anciennement appelée *Fleurus*), située à Benfréha dans la wilaya d'Oran, à proximité du gisement de gypse de Sidi Boutbal. Pour répondre à une demande croissante sur le marché algérien, le groupe a inauguré en 2009 une usine de production de plaques de plâtre, suivie en 2011 par une unité dédiée à la fabrication de profilés métalliques. Aujourd'hui, KNAUF Algérie s'impose comme l'un des principaux acteurs du secteur des matériaux de construction, jouant un rôle clé dans le développement industriel et l'innovation dans le domaine du bâtiment (**Knauf).**

Figure 27 : point de distribution Oran KNAUF **(**Ouest Tribune)

II. Préparation des poudres

II.1. Tri et nettoyage

Les déchets de plâtre étudiés dans ce travail proviennent de plaques de type BA13. Une étape de tri manuel a été réalisée afin d'éliminer les impuretés visibles, notamment le revêtement en carton adhérant aux surfaces des plaques.

Cette opération constitue une étape préliminaire essentielle, permettant de limiter la présence de contaminants susceptibles d'influencer les propriétés physico-chimiques du matériau.

Les plaques ont ensuite été fragmentées à l'aide d'un mortier et d'un pilon afin de réduire leur taille et de faciliter les étapes de traitement ultérieures.

Les fragments obtenus ont subi un broyage mécanique permettant leur transformation en une poudre plus fine.

Une fois le broyage terminé, un tamisage a été effectué afin d'éliminer les résidus de papier encore présents.

Les fractions retenues ont été collectées, quantifiées et considérées comme impuretés.

Une opération de pesée a ensuite permis d'évaluer la masse de poudre obtenue ainsi que celle des déchets éliminés, majoritairement constitués de résidus cellulosiques.

Cette étape permet d'estimer le rendement de récupération et le degré de pureté du matériau traité.

II.2. Traitement thermique des déchets de plâtre

Après les étapes de tri, de broyage et de nettoyage, les échantillons de plâtre ont été soumis à un traitement thermique dans un four tubulaire afin d'étudier leur comportement à haute température et leur stabilité thermique.

Réalisés selon deux conditions thermiques successives :

- 1000 °C pendant 1 à 5 heures

- 1200 °C pendant 1 à 5 heures

Pour chaque condition, des creusets réfractaires ont été préalablement pesés à vide, puis remplis d'une masse connue de poudre de plâtre. L'ensemble (creuset + échantillon) a ensuite été introduit dans le four.

Après chaque cycle thermique, les creusets ont été retirés du four puis refroidis à température ambiante.

Par la suite, le matériau traité a été soigneusement récupéré, transféré dans des sachets propres et étiquetés, puis pesé afin d'obtenir la masse finale réelle de la poudre de plâtre après traitement.

Une variation de masse a été observée pour l'ensemble des conditions testées, traduisant principalement l'élimination de l'eau libre ainsi que des phases hydratées présentes dans le matériau.

Les masses initiales et finales ont été regroupées dans un tableau récapitulatif permettant de quantifier précisément les pertes de matière en fonction de la température et de la durée de traitement. Cette démarche assure une détermination fiable de la variation de masse, en tenant compte de la séparation entre la masse du creuset et celle de l'échantillon.

À l'issue du traitement thermique, les échantillons présentent une texture modifiée, sous forme de poudre partiellement agglomérée. Cette évolution est attribuée à un début de frittage induit par les températures élevées, particulièrement marqué à 1200 °C.

Tableau 07 : Traitement thermique du plâtre.

Échantillon	**T (°C)**	**Temps (h)**	**Masse initiale (g)**	**Masse finale (g)**	**Perte (%) = $\frac{mi-mf}{mi}$ ×100**
1	1000	**1**	180.567	143.260	**21.09**
2		**2**	205.17	163.093	**20.54**
3		**3**	197.141	156.270	**20.69**
4		**4**	291.361	157.593	**45.92**
5		**5**	174.4	138.320	**20.68**

6	1200	**1**	159.937	122.112	**23.64**
7		**3**	161.748	124.790	**22.85**
8		**4**	169.657	128.006	**24.53**
9		**5**	163.28	119.918	**26.52**

L'analyse visuelle des échantillons (Figure 28) montre qu'à 1000 °C, le matériau conserve une texture poudreuse relativement homogène. En revanche, à 1200 °C, la poudre devient plus compacte et forme des agglomérats plus durs sous l'effet de la température élevée. Cette transformation peut être liée aux modifications structurales et physico-chimiques du matériau à haute température, ce qui pourrait également expliquer la perte de masse plus importante observée pour l'échantillon traité à 1200 °C.

Figure 28 : Comparaison de l'état de surface et de la coloration des poudres (1000°C et 1200°C).

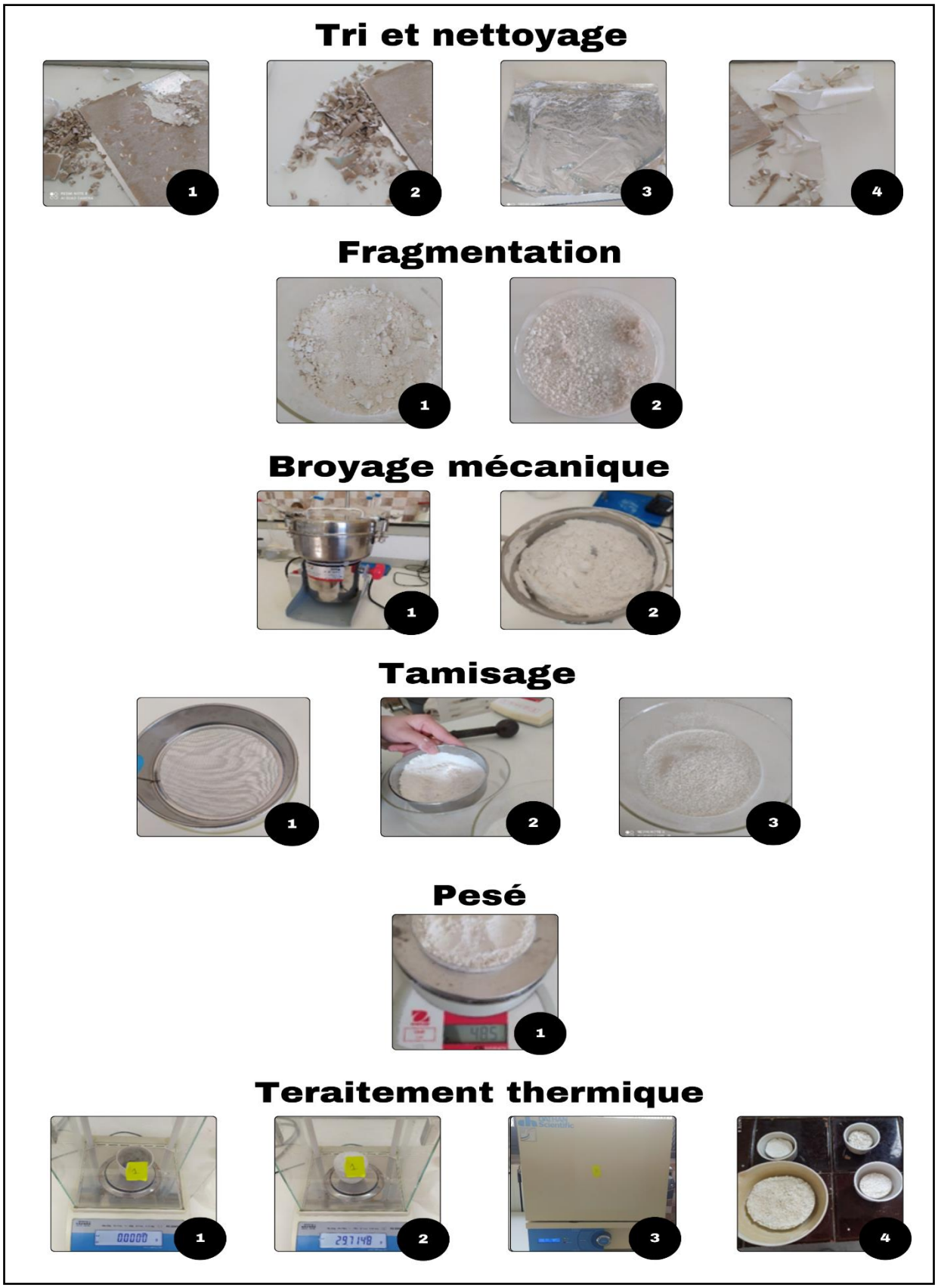

Figure 29 : Les étapes de préparation des poudres écologique

II.3. Broyage

Le matériau issu du traitement thermique, initialement aggloméré, a été soumis à une seconde étape de broyage afin de dés-agglomérer les particules et d'améliorer l'homogénéité granulométrique.

Cette opération permet de réduire la taille des particules et d'augmenter la surface spécifique, ce qui favorise la réactivité du matériau lors des analyses ultérieures.

Le broyage a été réalisé mécaniquement pendant environ 5 minutes, permettant d'obtenir une poudre fine et homogène sans altération significative de la structure.

II.4. Tamisage

La poudre obtenue a ensuite été soumise à un tamisage final afin d'uniformiser la distribution granulométrique.

Cette étape permet de retenir une fraction de particules de taille homogène et d'éliminer les grains grossiers susceptibles d'introduire des hétérogénéités dans les analyses.

Le tamisage a été réalisé à l'aide d'un tamis normalisé, permettant l'obtention d'une poudre fine et homogène.

Une granulométrie contrôlée sera adoptée pour assurer la qualité des analyses physico-chimiques prévues (DRX et analyses thermiques), en limitant l'effet de l'hétérogénéité des particules.

Après tamisage, La Figure 14 illustre le stockage final des échantillons dans des flacons hermétiques. Ce protocole de conservation est indispensable pour protéger le matériau de toute carbonatation accidentelle ou d'une reprise d'humidité (hygroscopie), préservant ainsi l'état de phase obtenu lors du traitement thermique.

Figure 30 : Conditionnement final des poudres de plâtre recyclé dans des flacons hermétiques étiquetés.

III. Formulation des poudres extinctrices

Pour les tests expérimentaux nous avons préparé 12 différents mélanges de de 50g de poudre extinctrice :

- 80 % de poudre de plâtre.
- 10 % additif 01 : un anti agglomérant.
- 05 % additif 02 : retardateur de flamme.
- 05 % additif 03 : un inhibiteur.

Tableau 08 : Les formules des 12 mélanges de poudre.

Mélange	Masse plâtre	Masse additif 01	Masse additif 02	Masse additif 03	Température de cuisson	Temps de cuisson
P1	40 g	05 g	2.5 g	2.5 g	1000° C	01 h
P2						02 h
P3						03 h
P4						04 h
P5						05 h
P6					1200° C	01 h
P7						03 h
P8						04 h
P9						05 h
P100	50 g	/	/	/	/	/
P100+	40 g	05 g	2.5 g	2.5 g	/	/

IV. Tests expérimentaux

Dans le cadre de la partie expérimentale de notre étude, une série d'essais expérimentaux a été menée dans le but d'évaluer l'efficacité des mélanges de poudres préalablement préparés pour l'extinction des feux de classe A. Ces essais visaient à examiner les performances de divers mélanges en interaction avec différents types de combustibles solides, tout en permettant une comparaison de leur aptitude respective à éteindre les flammes.

Nous avons élaboré trois types de feux secs de classe A en intégrant différents matériaux combustibles : du papier, du plastique et du bois. Ces matériaux ont été sélectionnés en raison de leurs comportements distincts en matière de combustion, ce qui permet de réaliser une analyse des performances des poudres testées. Chacun de ces combustibles présente en effet des particularités propres concernant leur inflammabilité, leur vitesse de propagation des flammes et la quantité de chaleur produite.

Suite à la préparation des feux, nous avons appliqué les différents mélanges de poudres préparés au cours des étapes précédentes de notre étude pratique. Les essais d'extinction ont été réalisés dans des conditions contrôlées et similaires, tout en assurant la fiabilité et la comparabilité des données obtenues. Chaque mélange a été utilisé directement sur les feux jusqu'à l'extinction totale des flammes.

Lors de chaque expérience, nous avons procédé à la mesure de plusieurs paramètres expérimentaux essentiels. Parmi ceux-ci, la masse de poudre utilisée pour maîtriser chaque feu a été déterminée, ce qui nous a permis d’estimer la quantité d’agent extincteur (poudre) requise en fonction du type de combustible. De plus, nous avons également relevé le temps d’extinction, correspondant à la durée nécessaire pour éteindre complètement le feu après l'application de la poudre.

Les résultats obtenus ont permis de comparer l’efficacité des différents mélanges préparés et d’identifier les formulations les plus performantes. Cette étude expérimentale apporte ainsi un éclairage précieux sur l’influence de la nature du combustible sur l’efficacité des poudres extinctrices et permet d’évaluer leur aptitude à combattre les feux de classe A.

Figure 31 : les feux secs testés (plastique, papier, bois).

V. Méthode de calcul des résultats

- **Présentation des résultats :**

Les résultats des tests expérimentaux ont été synthétisés et présentés sous forme de tableaux ainsi qu'un histogramme, dans le but de simplifier leur interprétation et d'en permettre une analyse plus claire et méthodique.

Tout d'abord, les données expérimentales ont été rassemblées dans des tableaux récapitulatifs reprenant les principaux paramètres analysés : le type de mélange utilisé, la nature du feu testé, la masse de combustible, la quantité de poudre requise pour l'extinction, ainsi que le temps nécessaire à l'extinction de chaque essai. Cette présentation nous a permis la possibilité de comparer directement les différentes compositions de poudres et d'estimer leur efficacité en fonction du type de combustible utilisé.

Dans un deuxième temps, les résultats ont été présentés sous forme d'histogrammes, mettant en évidence l'évolution de la masse de poudre utilisée en fonction des différents mélanges testés. Cette approche graphique offre une meilleure compréhension des écarts de performance entre les formulations et facilite l'identification des mélanges demandant une quantité réduite de poudre pour un contrôle efficace des feux testés.

- **Calcul de la masse de poudre utilisée :**

La quantité de poudre utilisée lors de chaque essai d'extinction a été déterminée par une méthode de pesée différentielle. Pour ce faire, nous avons mesuré la masse initiale de la poudre avant l'expérience **(m_i)** ainsi que la masse finale restante après l'extinction du feu **(m_f)**.

La masse de poudre consommée au cours de l'opération d'extinction a ensuite été calculée à l'aide de la formule suivante :

$$m = m_i - m_f$$

- **m** : représente la masse de poudre utilisée pour l'extinction ;
- m_i représente la masse initiale de poudre avant l'essai ;
- m_f : représente la masse finale de poudre après l'extinction.

VI. Résultats des tests

I.1. Premier feu

Tableau 09 : Résultats expérimentaux des essais d'extinction du feu de papier par les différents mélanges de poudre

Mélange	Feu	Masse du combustible	Masse de poudre	Temps d'extinction
P_1	**Papier et carton**	1.6 g	2.5 g	02 sec
P_2		05 g	2.1 g	1.5 sec
P_3		8.7 g	5.4 g	03 sec
P_4		4.5 g	03 g	02 sec
P_5		5.1 g	2.3 g	1.5 sec
P_6		2.5 g	2.1 g	01 sec
P_7		05 g	**1.7 g**	01 sec
P_8		05 g	03 g	02 sec
P_9		5.1 g	2.9 g	02 sec
P_{100}		1.5 g	**12.1 g**	05 sec
P_{100+}		06 g	5.9 g	03 sec

❖ Histogramme représentant la masse de poudre utilisée à l'extinction du feu de papier par rapport aux mélanges de poudre utilisés.

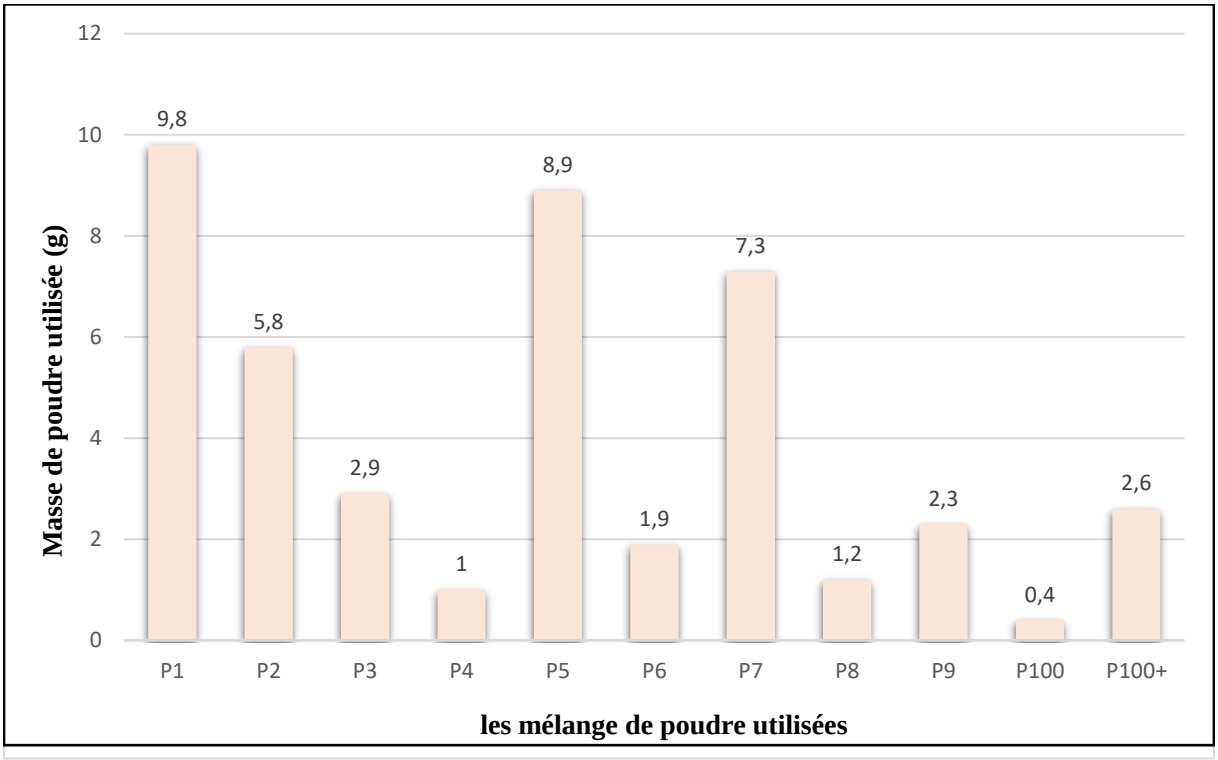

Figure 32 : présentation graphique de l'extinction du papier.

➢ **Interprétation des résultats :**

Le tableau et la figure 01 présentent les résultats des essais expérimentaux d'extinction des feux de papier en utilisant nos différents mélanges de poudre. Les paramètres examinés incluent principalement la masse du papier, la quantité de poudre utilisé, ainsi que le temps d'intervention.

Selon les données recueillies, tous les mélanges ont permis une extinction rapide, avec un temps d'extinction variant entre 01 et 05 secondes. De plus, la quantité de poudre utilisée varie sensiblement d'un mélange à l'autre, révélant des écarts significatifs en termes d'efficacité entre les différentes formulations testées.

La figure 01 met clairement en évidence cette variation. Les mélanges P1, P5 et P7 ont nécessité les plus grandes quantités de poudre pour l'extinction, soit respectivement 9,8 g, 8,9 g et 7,3 g. Ces résultats suggèrent une moindre performance de ces formulations, marquée par une consommation plus élevée de substance extinctrice.

En revanche, les mélanges P4, P8 et notamment P100 se démarquent par leurs performances remarquables, avec des masses de poudre très faibles : 1 g, 1,2 g et seulement 0,4 g

respectivement. Le mélange P100 apparaît comme le plus performant, démontrant une efficacité maximale avec une quantité minimale de poudre nécessaire pour éteindre le feu de papier.

Les performances des mélanges restants, notamment P2, P3, P6, P9 et P100+, se situent dans une catégorie intermédiaire. Cette variabilité des résultats pourrait s'expliquer par les formulations des poudres utilisées, telles que leur aptitude à inhiber les réactions de combustion, réduire l'oxygène disponible ou créer une barrière isolante sur le matériau enflammé.

En conclusion, l'analyse globale du tableau et du graphique indique que l'efficacité des mélanges extincteurs repose avant tout sur leur composition. Une consommation réduite de poudre associée à une intervention rapide constitue un indicateur clé pour évaluer leur performance face aux feux et incendies de papier.

I.2. Deuxième feu

Tableau 10 : Résultats expérimentaux des essais d'extinction du feu de plastique par les différents mélanges de poudre

Mélange	Feu	Masse du combustible	Masse de poudre	Temps d'extinction
P_1	**Plastique**	02 g	03 g	02 sec
P_2		2.5 g	**9.6 g**	05 sec
P_3		2.1 g	**1.4 g**	01 sec
P_4		4.8 g	5.1 g	03 sec
P_5		04 g	3.4 g	02 sec
P_6		4.4 g	3.3 g	02 sec
P_7		4.2 g	5.4 g	03 sec
P_8		4.1 g	3.7 g	02 sec
P_9		4.2 g	4.9 g	03 sec
P_{100}		03 g	1.8 g	01 sec
P_{100+}		2.6 g	1.86 g	01 sec

❖ Histogramme représentant la masse de poudre utilisée à l'extinction du feu de plastique par rapport aux mélanges de poudre utilisés.

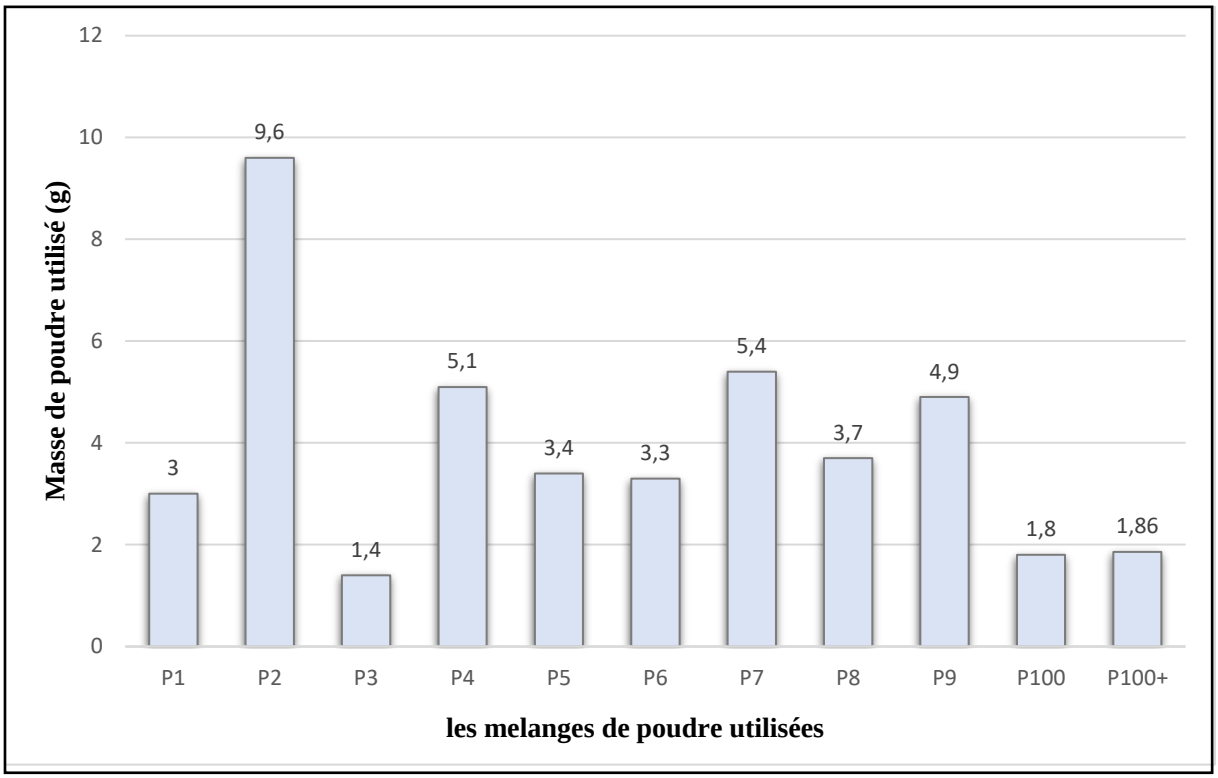

Figure 33 : présentation graphique de l'extinction du plastique.

➢ **Interprétation des résultats :**

L'analyse du tableau et de l'histogramme des résultats révèle que tous les mélanges de poudre testés ont entraîné une extinction extrêmement rapide du feu de plastique, avec un temps d'extinction varie entre 01 et 05 secondes pour l'ensemble des tests expérimentaux. Cela témoigne de l'efficacité globale des différentes formulations employées.

Cependant, la masse de poudre requise pour assurer l'extinction varie de manière significative en fonction des différents mélanges, comme l'illustre clairement l'histogramme. Le mélange P2 présente la valeur maximale de poudre utilisée « 9,6 g », ce qui traduit une efficacité faible en comparaison aux autres compositions testées. À l'inverse, les mélanges P3, P100 et P100+ montrent des performances optimales, nécessitant des quantités les plus faibles de poudre, à savoir 1,4 g, 1,8 g et 1,86 g respectivement. Ces résultats témoignent d'une capacité extinctrice nettement améliorée pour ces derniers mélanges.

Les autres mélanges, à savoir P1, P4, P5, P6, P7, P8 et P9, affichent des valeurs intermédiaires situées entre 3 g et 5,4 g. L'histogramme révèle ainsi les variations dans la consommation de poudre parmi les formulations étudiées et permet de repérer les mélanges les plus performants.

Ces derniers se distinguent par leur capacité à obtenir une extinction rapide tout en nécessitant une quantité minimale de poudre.

I.3. Troisième feu

Tableau 11 : Résultats expérimentaux des essais d'extinction du feu de bois par les différents mélanges de poudre

Mélange	Feu	Masse du combustible	Masse de poudre	Temps d'extinction
P_1	Bois	2.9 g	**9.8 g**	01 sec
P_2		2.6 g	5.8 g	01 sec
P_3		2.5 g	2.9 g	01 sec
P_4		2.2 g	01 g	01 sec
P_5		02 g	8.9 g	01 sec
P_6		2.1 g	1.9 g	01 sec
P_7		2.1 g	7.3 g	01 sec
P_8		1.8 g	1.2 g	01 sec
P_9		2.9 g	2.3 g	01 sec
P_{100}		0.4 g	**0.4 g**	01 sec
P_{100+}		2.6 g	2.6 g	01 sec

❖ Histogramme représentant la masse de poudre utilisée à l'extinction du feu de bois par rapport aux mélanges de poudre utilisés.

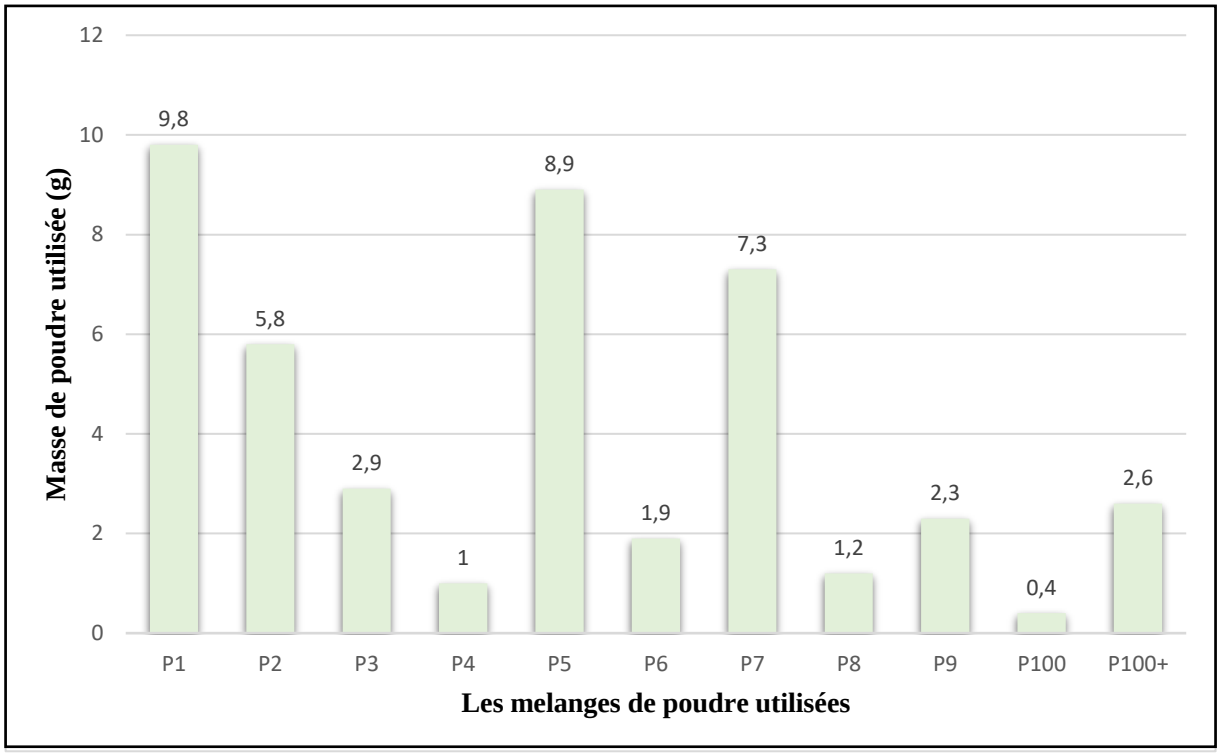

Figure 34 : présentation graphique de l'extinction du bois.

➢ **Interprétation des résultats :**

Le tableau et la figure présentent les résultats des essais expérimentaux portant sur l'extinction du feu de bois grâce aux différents mélanges de poudre extinctrice. Les principaux paramètres évalués incluent la masse de bois utilisé comme combustible, la masse de poudre requise pour éteindre le feu et le temps d'extinction mesuré pour chaque test. Les résultats indiquent que tous les mélanges testés ont permis d'éteindre le feu de bois en un temps identique de 1 seconde. Cela met en évidence une efficacité rapide et homogène des formulations face aux feux de bois. Cette performance illustre la capacité des poudres à stopper rapidement la combustion du matériau solide, les quantités de poudre consommées diffèrent considérablement selon les mélanges, comme le montre la figure. Les mélange, P1, P5 et P7 ont nécessité les plus grandes quantités de poudre, soit respectivement 9,8 g, 8,9 g et 7,3 g. Ces résultats suggèrent une moindre efficacité de ces formulations, car elles demandent une plus grande consommation de poudre pour maîtriser le feu. À l'opposé, les mélanges P100, P4 et P8 se sont révélés les plus performants pour l'extinction du bois, avec des masses de poudre très faibles : respectivement 0,4 g, 1 g et 1,2 g.

En conclusion, l'analyse collective des données met en évidence que l'efficacité d'un mélange dans l'extinction du feu de bois repose principalement sur la quantité de poudre nécessaire pour une extinction rapide. Plus cette masse est faible, plus le mélange est jugé performant pour lutter contre ce type d'incendie.

Conclusion Général

Ce travail de recherche a été consacré à l'étude de faisabilité de la valorisation des déchets du Bâtiment et des Travaux Publics (BTP), plus particulièrement le plâtre et le gypse, afin de les transformer en une poudre écologique d'extinction des incendies. Le choix de ces matériaux a été motivé par leurs propriétés physico-chimiques et thermiques remarquables, notamment leur forte capacité de rétention thermique et leur comportement endothermique lors de la déshydratation, permettant de constituer une barrière naturelle contre le feu sans émission de gaz toxiques.

La démarche expérimentale s'est articulée autour de plusieurs étapes rigoureuses : le tri, le nettoyage et le traitement thermique des échantillons à haute température (1000 °C et 1200 °C), suivis d'un broyage et d'un tamisage fin afin de garantir l'homogénéité granulométrique des poudres. Par la suite, la formulation de douze mélanges distincts a été réalisée afin de mener des essais d'extinction comparatifs. Les tests expérimentaux ont été conduits sur trois types de feux secs de classe A, utilisant des combustibles représentatifs tels que le papier, le bois et le plastique.

Les résultats obtenus démontrent que l'ensemble des mélanges formulés présente un effet d'étouffement efficace, entraînant une extinction rapide des flammes. La comparaison des performances met en évidence une variabilité selon la composition des mélanges ; les formulations optimales, notamment P100 et P3, se distinguent nettement en assurant un temps d'extinction très réduit (de l'ordre de 1 à 2 secondes) avec une consommation de poudre minimale.

En conclusion, la transformation des déchets de plâtre et de gypse en agents extincteurs s'avère non seulement techniquement faisable, mais également particulièrement prometteuse. Cette approche innovante s'inscrit pleinement dans une démarche environnementale et durable, favorisant l'économie circulaire par la réduction des déchets de construction et la substitution des agents chimiques conventionnels par une alternative innovante et totalement *eco-friendly*.

Enfin, comme perspectives de recherche, il serait pertinent d'améliorer la fluidité et la stabilité de la poudre face à l'humidité, d'optimiser le temps de réponse et l'efficacité d'extinction sur d'autres classes de feux (notamment les feux de liquides et de gaz), ainsi que de poursuivre les investigations en vue d'une éventuelle standardisation conforme aux exigences des services de sécurité incendie.

Les références Bibliographiques :

A. M. Rachedi, contribution à l'étude de la durabilité de mortier de plâtre à base de sable de dunes renforcé par des fibres de palmier dattier, thèse de magister, université de Ouargla 2013.

ADEME. (2020). *Déchets : les différents modes de valorisation*. Agence de la transition écologique. https://www.ademe.fr

Agence Nationale des Déchets. (2025). Définitions de la terminologie réglementaire. https://and.dz/base-des-connaissances/definitions/

Agence Nationale des Déchets. (2025). Définitions de la terminologie réglementaire. https://and.dz/base-des-connaissances/definitions/

Aït Saadi, N. (2019). *Gestion des déchets de construction dans la wilaya de Béjaïa* (Mémoire de master, Université de Béjaïa).

Aïtcin, P.-C. (2007). Bétons haute performance. Hermès Science.

Alamy. *Déchets dangereux*. https://www.alamyimages.fr/photos-images/d'A9chets-dangereux.html

Alarcon-Ruiz, L., Platret, G., Massieu, E., & Ehrlacher, A. (2005). The use of thermal analysis in the study of carbonated cementitious materials. Cement and Concrete Research, 35(3), 609 613.

AND. (2014). *Caractérisation des déchets ménagers et assimilés dans les zones nord, semi-aride et aride d'Algérie*. Agence nationale des déchets.

ARIA – Base de données des accidents industriels. (2023). *Illustration issue de l'accident ARIA n°53991* [Image]. https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/wp-content/uploads/2023/05/A53991-image_002.jpg

ASJP. (2020). *Gestion des déchets industriels et impacts environnementaux*.

Aware Fire Technology Co., Ltd. *Carbon dioxide fire extinguishing agent release* [Image]. https://www.awarefire.com/wp-content/uploads/Carbon-dioxide-fire-extinguishing-agent-release.jpg.

Babrauskas, V. (2003). Ignition Handbook. Fire Science Publishers.

Baxter, L. (2005). Calcium carbonate thermal decomposition. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *44*(11), 3942–3949.

Bellastock. (2021). *Réemploi dans le bâtiment : analyse environnementale et économie circulaire*

Bennadir, S., & Fentiz, S. (2013). *La gestion des déchets ménagers : cas d'étude du centre d'enfouissement de Bamendil Ouargla* (Mémoire de master). Université Kasdi Merbah Ouargla.

Bentz, D. P., et al. (2008). *Thermal behavior of cementitious materials under heating*. (Référence béton/gypse utilisée en feu).

Benyamina, N. (2011). *Étude et modélisation des effets thermiques de BLEVE sur la sphère de stockage de GPL au niveau de GP2/Z* (Mémoire de master, Université d'Oran Es-Sénia)

Bonneville, J.-P. (1999). *Installations fixes d'extinction*. Presses internationales Polytechnique.

Boudjellal, M. (2009). *La gestion des déchets de chantier du BTP en Algérie* (Mémoire de magister, Université Saad Dahlab de Blida, Faculté des sciences).

Boudra, M., & Sennour, M. (2020). *Étude des paramètres physico-chimiques du lixiviat d'un centre d'enfouissement technique : cas du C.E.T de Hassi-Bounif (W. Oran)*.

Carrières Coussegrey. (s. d.). *Quels sont les déchets acceptés – déchets inertes (Yonne, Aube).* Consulté le 24 avril 2026, à partir de http://dechetterie-professionnelle.carrieres-coussegrey.fr/quels-sont-les-dechets-acceptes-dechets-inertes-yonne-aube/

CNRC Centre National du Registre de Commerce (2024). *Mise à jour du 24 novembre 2024*.

Comité Européen de Normalisation. (2005). *EN 2 : Classes de feux.* CEN.

DH Les Sports+. (2014, 16 mars). *Gigantesque incendie d'un transformateur électrique*. https://www.dhnet.be

Drysdale, D. (2011). *An introduction to fire dynamics* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Drysdale, D. (2011). An Introduction to Fire Dynamics (3rd ed.). Wiley.

Ecodrop. (2017). *Diagramme de répartition des déchets du bâtiment* [Infographie]. Ecodrop. https://www.ecodrop.net/wp-content/uploads/2017/04/diagramme-repartition-dechets-batiment-ecodrop.png (ecodrop.net)

ENSA Marseille–Luminy. (2008). Formation continue sur le plâtre. Groupe de formation continue, Marseille, France.

Etares Environnement. *Déchets inertes* [Image]. https://www.etares-environnement.fr/public/img/big/DchetsInertesJPG_60cc552a37bde.JPG (etares-environnement.fr)

EU Standard. (2019). *EN 3: Portable fire extinguishers*.

European Agency for Safety and Health at Work. (2013). *Occupational exposure to dust in construction*. EU-OSHA.

European Commission. (2023). *Construction and demolition waste (CDW).*

European Parliament & Council. (2008). *Directive 2008/98/EC on waste.* https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX:32008L0098

Extincteur.net. (2017). *Le triangle de feu*. https://blog.extincteur.net/le-triangle-de-feu/

Fédération Française du Bâtiment. *Déchets de chantier (BTP)* [Photographie]. https://www.dechets-chantier.ffbatiment.fr/

Fenollera, M., Míguez, J., Goicoechea, I., & Lorenzo, J. (2015). Experimental study on thermal conductivity of self-compacting concrete with recycled aggregate. Materials, 8(7), 4457-4478.

Futura Sciences. (2023). *Feux de forêt : pourquoi les orages secs sont redoutables ?* https://www.futura-sciences.com

Gielle. *Fire extinguishing system* [Image]. https://www.gielle.fr/wp-content/uploads/2015/11/image024.jpg

Grupo SPR. (2019). *Schéma du triangle du feu* [Image]. Grupo SPR. https://www.grupo-spr.com/wp-content/uploads/2019/07/Captura.png

Gypsum Association. (2009). *Fire resistance design manual: Sound control* (19th ed., GA-600).

INERIS *La méthanisation : définition*. Institut national de l'environnement industriel et des risques. https://www.ineris.fr/sites/default/files/contribution/Documents/fiche-filieremethanisation-def-1348730138.pdf

INERIS. *Les phénomènes dangereux accidentels*. https://www.ineris.fr

Info Pompiers. *BLEVE*. https://infopompiers.com/Lexique%20pompiers/bleve/

INRS. (2021). *Incendie et explosion – Principes de prévention*. https://www.inrs.fr

Insaniyat (s.d.). *Image extraite de l'article publié dans la revue algérienne d'anthropologie et de sciences sociales*. OpenEdition Journals. https://journals.openedition.org/insaniyat/24878?lang bodyftn8

International Agency for Research on Cancer [IARC]. (2012). Arsenic, metals, fibres, and dusts: A review of human carcinogens. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Volume 100C. World Health Organization.

International Organization for Standardization. (2019). *ISO 7202: Fire extinguishing media — Powder*. ISO.

iStock. *Flamme de gaz et explosion du réservoir de gaz* [Photographie]. https://media.istockphoto.com

IUCN. (2023). *L'impact économique de la pollution plastique*. https://iucn.org/sites/default/files/2023-10/a_b-l_impact-economique-de-la-pollution-plastique.pdf

Jenike, A. W. (1964). *Storage and flow of solids*. University of Utah Engineering Experiment Station.

Karim, F., Waqif, M., & Saâdi, L. (2013). *Caractérisation physico-chimique du gypse synthétisé et du phosphogypse*. *Verres Céramiques Composites, 2*(2), 19-31. ASJP (asjp.cerist.dz)

Knauf. (s.d.). *Notre identité*. **KNAUF Gypsum Algérie.** https://knauf.com/fr-DZ/knauf-gypsum/a-propos-de-knauf/notre-identite

Kontogeorgos, D. A., & Founti, M. A. (2012). Gypsum board dehydration kinetics and thermophysical properties variation at elevated temperatures. Fire and Materials, 36(5-6), 379 394.

Kontogeorgos, D., & Founti, M. (2012). Thermal decomposition of gypsum under fire

Large Power Co., Ltd. (s. d.). *How to extinguish a lithium battery fire safely and effectively*. https://www.large-battery.com

Le Monde. (2022, 23 août). *À Beyrouth…*. https://www.lemonde.fr

Le Sillon Belge. (2017). *Une fois confronté à l'incendie, quels moyens d'extinction choisir ?* https://www.sillonbelge.be.

Linteris, G. T. (2011). Flame inhibition mechanisms of fire suppressants. *Fire Safety Journal, 46*(1–2), 1–10.

MATRICIEL. (2011). *Rapport technique : La gestion des déchets du secteur de la construction.* Bruxelles.

Mehaffey, J. R., et al. (1994). Fire performance of gypsum board systems. Fire and Materials.

Ministère de la Transition écologique. (s.d.). *Les différentes catégories de déchets.* https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/differentes-categories-dechets

National Fire Protection Association. (2021). *NFPA 921: Guide for fire and explosion investigations*. https://www.nfpa.org

National Fire Protection Association. (2022). *NFPA 10: Standard for portable fire extinguishers*. https://www.nfpa.org

National Fire Protection Association. (2023). *National Fire Protection Association*. https://www.nfpa.org

Organisation mondiale de la santé (OMS). (2023). *Déchets d'activités de soins*. https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/health-care-waste

Ouest Tribune. (2024, 27 octobre). *L'usine Knauf Algérie à Oran : sept millions de plaques de plâtre exportées vers l'Afrique***.** https://ouest-tribune.dz/lusine-knauf-algerie-a-oran-sept-millions-de-plaques-de-platre-exportees-vers-lafrique/

Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2011). Construction and demolition waste in construction: A review. *Construction and Building Materials*.

Poon, C. S., et al. (2004). Management of construction and demolition waste in Hong Kong. *Waste Management*, 24(7), 661–665.

Poon, C. S., et al. (2004). Properties of recycled aggregates. Waste Management.

Proserve DASRI. *Qu'est-ce que la banalisation / le prétraitement ?* https://www.proservedasri.com/parlons-dasri/foire-aux-questions/quest-ce-que-la-banalisation-le-pretraitement

Recyc-Québec. (s.d.). *Résidus de construction, rénovation et démolition (CRD).* https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/entreprises-organismes/mieux-gerer/residus-crd

République Algérienne. (2001). *Loi n°01-19 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets.*

République Algérienne. (2006). *Décret exécutif n°06-104 du 28 février 2006.*

Rhodes, M. (2008). *Introduction to particle technology* (2nd ed.). Wiley.

Roumane, S. (2017). *La protection civile face aux risques chimiques*. Revue Sécurité et Risques Technologiques, 12(3).

Ryan, J. (1962). Fire resistance of gypsum plaster. (Référence historique matériaux feu)

SafeRack. https://saferack.com

Séché Environnement. *Gestion des déchets non dangereux*. Consulté le 24/04/2026, https://www.groupe-seche.com/solution/gestion-des-dechets-industriels/gestion-des-dechets-industriels-non-dangereux

SEDDRe. (2019). *Empreinte carbone de la valorisation des déchets du bâtiment en France – Rapport technique.*

Silva, R. V., de Brito, J., & Dhir, R. K. (2014). *Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production*. **Construction and Building Materials, 65**, 201–217.

SSIAP.eu. *Les classes de feu : classification complète des incendies*. https://ssiap.eu

Su, H., Yang, J., & Ling, T.-C. (2018). *Properties of recycled aggregate and its influence on concrete performance*. **Construction and Building Materials, 158**, 883–893.

Sunar, N. M., Stentiford, E. I., Stewart, D. I., & Fletcher, L. A. (2014). *The process and pathogen behavior in composting: A review*.

Toppr Guides. (2025). *Introduction and types of combustion*. https://www.toppr.com

Vegas, I., Broos, K., Nielsen, P., Sani, R. E., & Lisbona, A. (2015). Upgrading the quality of mixed construction and demolition waste fine fractions by advanced sorting technologies. Construction and Building Materials, 75, 482–490.

Wakili, K. G., et al. (2007). Fire behaviour of gypsum plasterboard. Fire and Materials.

World Health Organization. (2010). *WHO guidelines for indoor air quality*. WHO.

Xiao, Y., et al. (2012). High-temperature behaviour of recycled concrete. Construction and Building Materials.

Yefsah, F. (2017). *Contribution au traitement des déchets ménagers par le compostage* (Thèse de doctorat). Université Mouloud Mammeri.

YLEA. *Agent extincteur*. https://www.ylea.eu

Zalosh, R. (2015). *Industrial fire protection engineering*. Wiley. https://www.ordeco.org/dechets/dechets-inertes

Zalosh, R. (2015). *Industrial fire protection engineering*. Wiley.