



VALORISATION ET RECYCLAGE DES DÉCHETS POUR LA CONSTRUCTION

Chef du projet : Lt Col Oussama Atoui

Institutions : Académie Militaire Fondouk Jedid
Centre de Recherches Militaires

VALORISATION ET RECYCLAGE DES DÉCHETS POUR LA CONSTRUCTION



1 Contexte et motivation

2 Objectifs

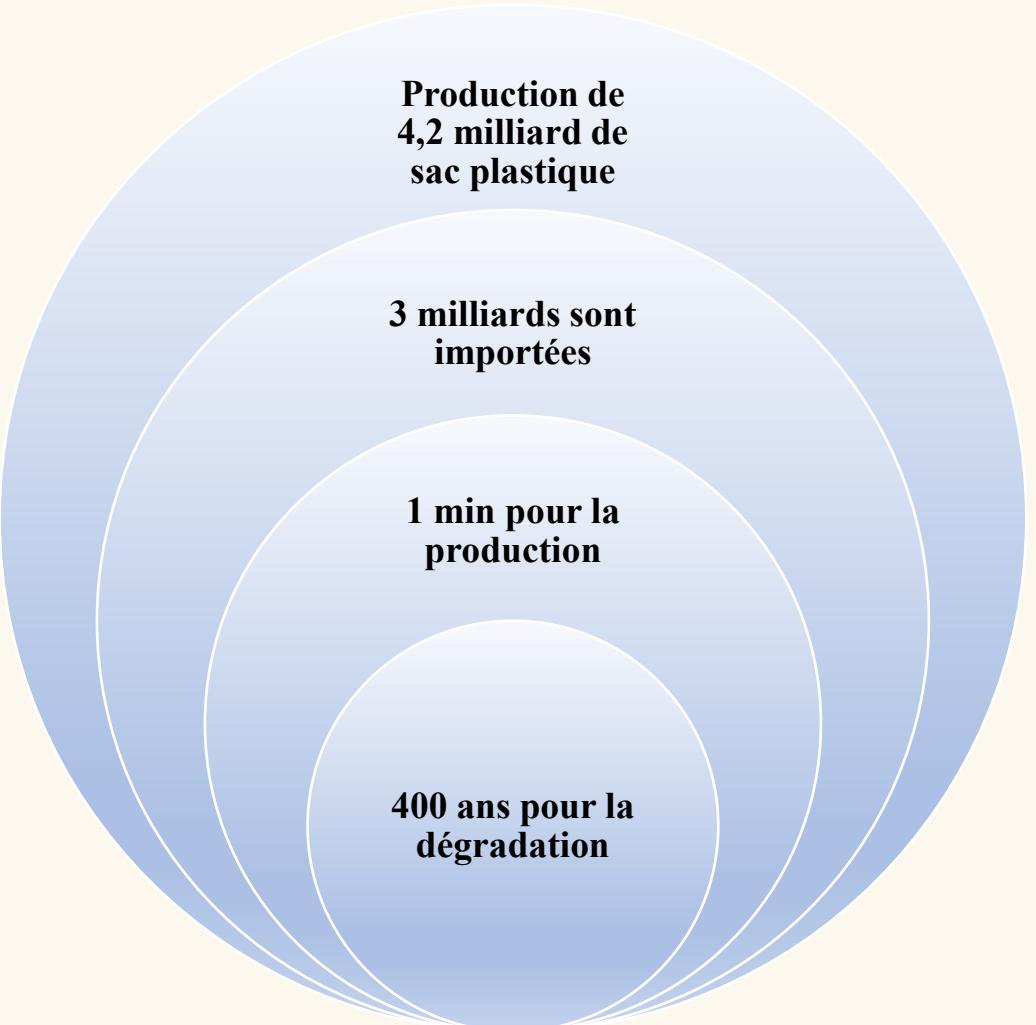
1/ Contexte et motivation

2

3

4

5



1/ Contexte et motivation

2

4ème consommateur dans la région méditerranée

3

Production entre 0,25 et 0,5 million de tonnes

4

95% de déchets finissent dans l'environnement

5

5% de déchets plastique sont recyclés

De 70% à 90% de déchets collectés sont récupérés





TUNISIA: Government will shut down Borj Chakir landfill in two years' time

By Jean Marie Takouleu - Published on November 7 2019 / Modified on November 7 2019



The Tunisian government has decided to close the Borj Chakir landfill located near the capital Tunis. The action will be effective within two years. The government is now focusing on **waste recovery**.





مركز البحوث العسكرية
Centre de Recherches Militaires



In a world focused on sustainability, civil



COMMENT PEUT ON VALORISER ET RECYCLER LES DÉCHETS POUR LA CONSTRUCTION?

1

2/ Objectifs

3

4

WASTE TO WEALTH



1

- Réduire la quantité de déchets plastiques envoyé en décharge.

2/ Objectifs

3

- L'objectif principal est de minimiser la quantité de déchets qui finissent dans les sites d'enfouissement, en les utilisant comme matières premières pour la fabrication de pavés écologiques.

4

1

- Préserver les ressources naturelles et réduire la demande en matières premières naturelles.

2/ Objectifs

3

- En utilisant des déchets plastiques recyclés, nous pouvons réduire la demande de matières premières naturelles, telles que le sable, le gravier ou le clincker.

4

1

- Réduire l'empreinte carbone.

2/ Objectifs

- La valorisation des déchets plastiques permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre associées à l'extraction et au transport des matières premières traditionnelles. Cela contribue ainsi à la lutte contre le changement climatique.

3

4



1

- Promouvoir l'économie circulaire en créant une boucle de production et de consommation durable.

2/ Objectifs

- En recyclant les déchets plastiques et les déchets de construction, nous pouvons créer une boucle de production et de consommation plus durable, où les matériaux sont utilisés et réutilisés de manière continue, réduisant ainsi la nécessité de nouvelles extractions de ressources.

3

4



1

Produire des matériaux de construction écologiques , résistants et durables.

2/*Objectifs*

- L'objectif final est de **fabriquer des matériaux de construction** (*pavés écologique, matériaux routiers, bétons, etc.*) de **haute qualité** à partir de déchets recyclés, qui sont **résistants, durables** et **adaptés à une utilisation dans les infrastructures**, tout en répondant aux normes de **qualité** et de performance requises.



2

Etude expérimentale

Fabrication des pavés écologiques

1

Peser la quantité de plastique

2

Peser la quantité de sable de concassage

3

Chauffer la quantité de sable

4

Fusionner la quantité de plastique

5

Ajouter le sable avec le malaxage continu

**6**

Malaxer le mélange

7

Lubrifier le moule

8

Verser le mélange dans la moule

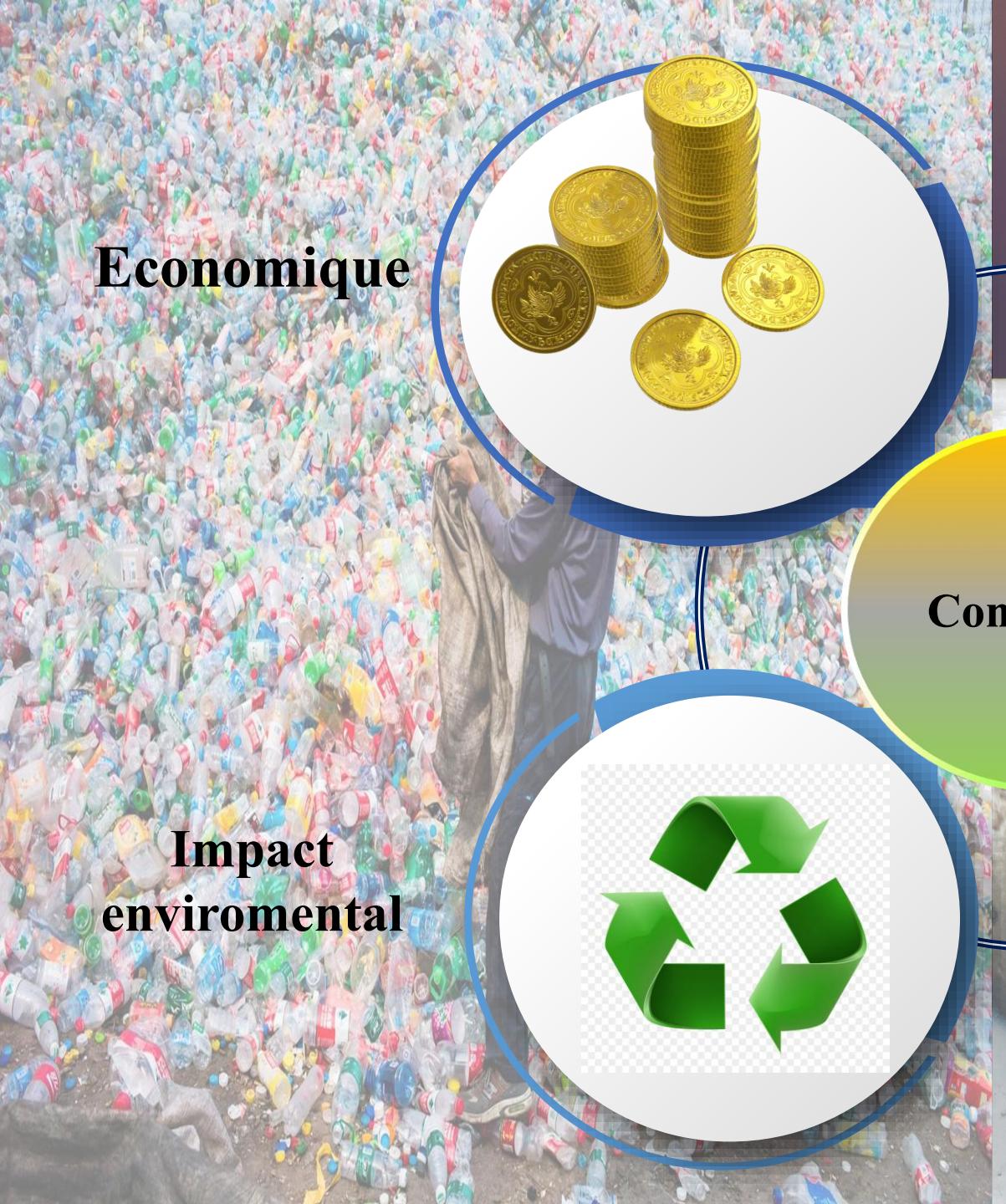
9

Positionner la plaque chargée

10

Enlever le moule

17



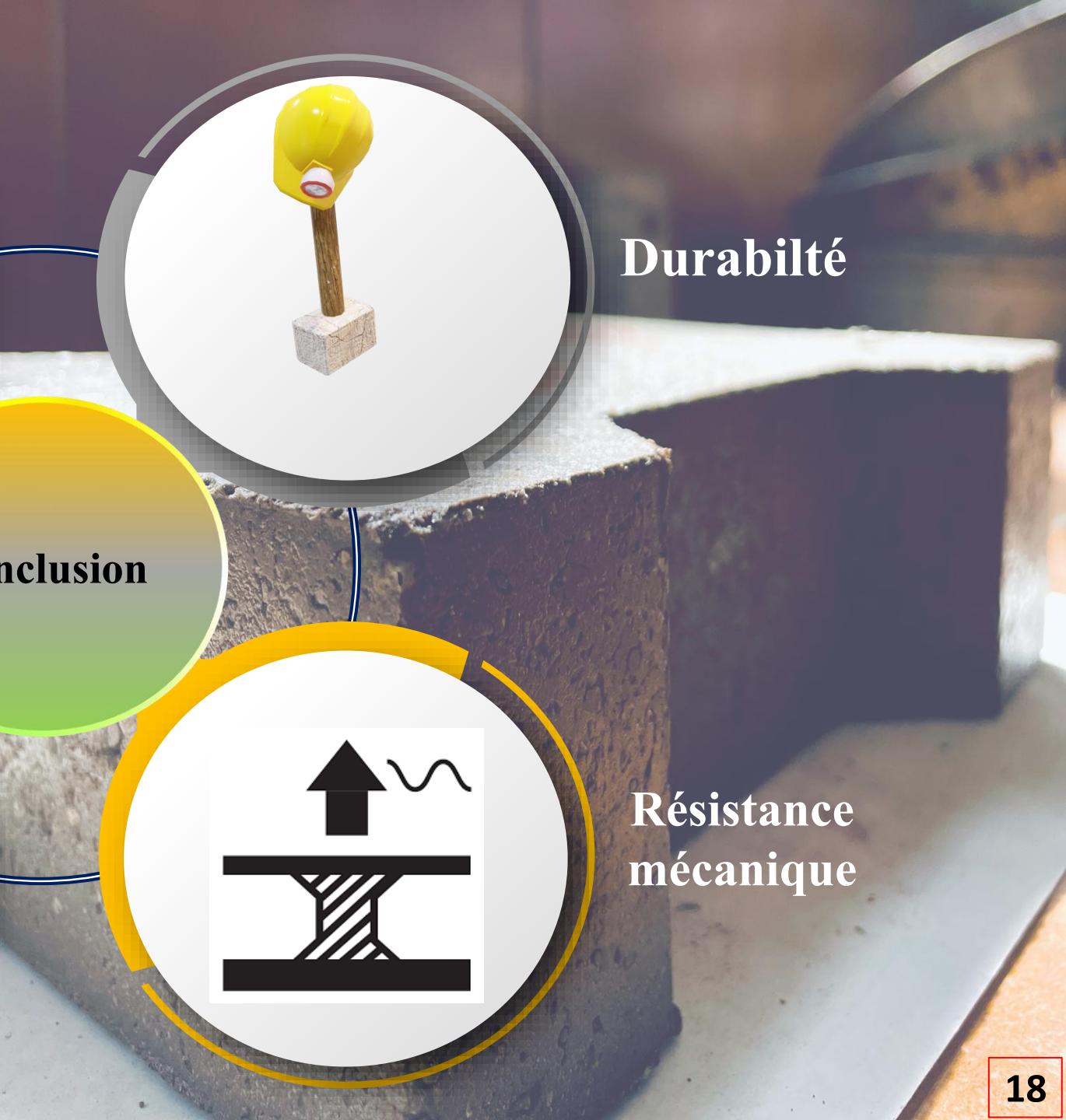
Economique



Impact
environnemental



Conclusion



Durabilité



Résistance
mécanique

1

Pavé autobloquant

Pavé en béton



Pavé en pierre naturel

Pavé autobloquant

Pavé en brique



Pavé en pierre reconstitué

1

Pavé autobloquant

Besoin fonctionnel

Reflet des zones ou des limites assignées aux planificateurs



Besoin structurel

Résistance au divers échanges climatiques, différents trafics

Besoin architectural

favoriser une esthétique ou une perception architecturale des aménagements urbains

1

Pavé autobloquant



Caractéristiques des pavés

Caractérisations géométriques

Selon le classe de trafic:

- T1: 60 mm
- T2: 80 mm
- T3: 80 mm
- T4: 100 mm
- T5: 100 mm



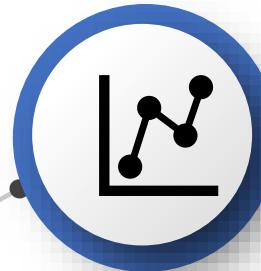
Caractérisations physiques

au plus égal à 5,4%
pour le fractile 0/5mm.



Abrasion

Au plus égal à 25 mm



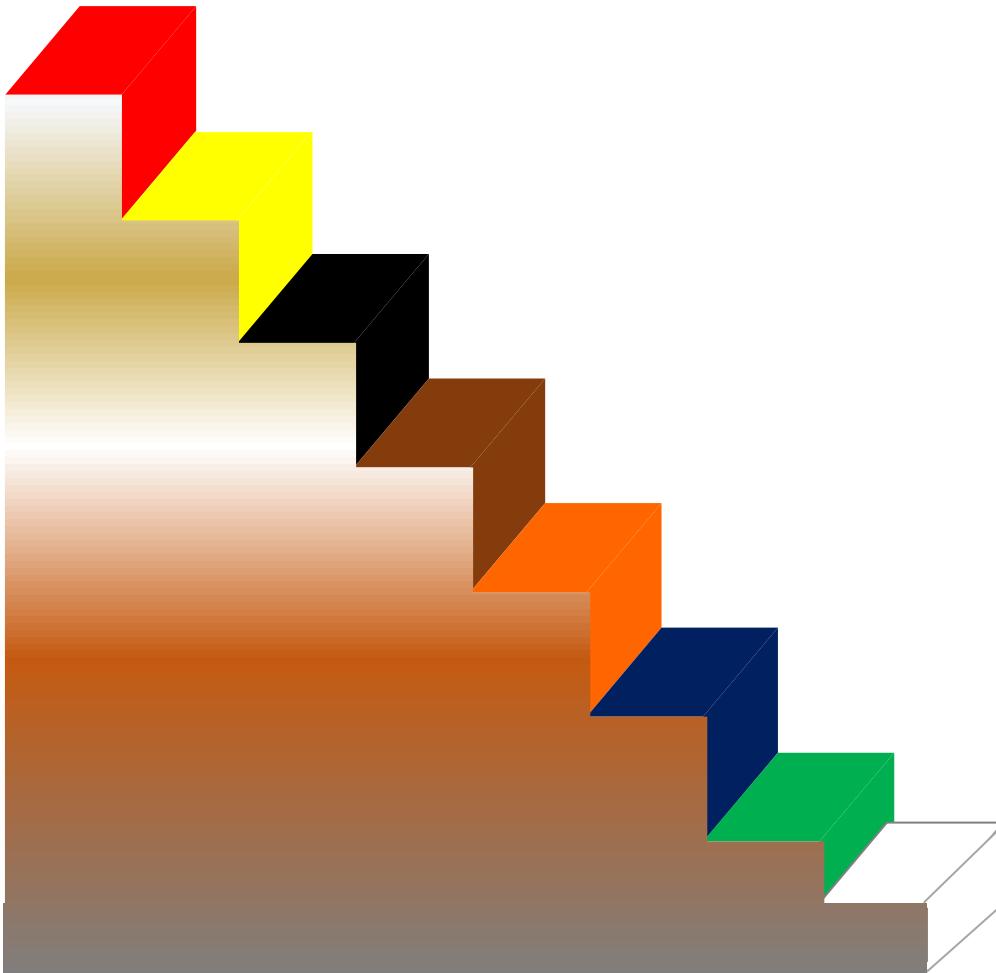
Traction par fendage

au moins 4,0 MPa
pour le fractile
0/5mm



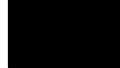
Caractérisations mécaniques

l'oxyde de fer pigment



 rouge

 jaune

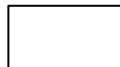
 noir

 marron

 orange

 bleu

 vert

 blanc

2

Etude expérimentale

Identification des matériaux



Fabrication du pavé écologique



Etude de comportement du pavé écologique



Sable de concassage



1

Equivalent de sable : 78,36%

2

Masse volumique réel : 2650 kg/m³

3

Module de finesse : → 2,53 sable préférentiel

4

Coefficient d'uniformité → 20,43 granulométrie semi-étalé

2

Etude expérimentale

Identification des matériaux

Plastique PET



1

Densité : 1340 kg/m^3

2

Température de fusion entre 180 et 220 °C

3

Résistance à la traction de 12 à 15 MPa

4

Module de Young de $2,7$ à $4,1$ GPa

*Etude de comportement du pavé écologique***Etude de comportement physique****1/Essai d'absorption de l'eau****Etude de comportement chimique et thermique****1/ Effet d'attaque des acides sur pavé écologique****2/ Effet thermique sur le pavé écologique****Etude de comportement mécanique****1/ Essai de la résistance à la traction par fendage****2/ Essai de la résistance à l'abrasion****3/ Essai de la résistance à la glissance avant polissage**

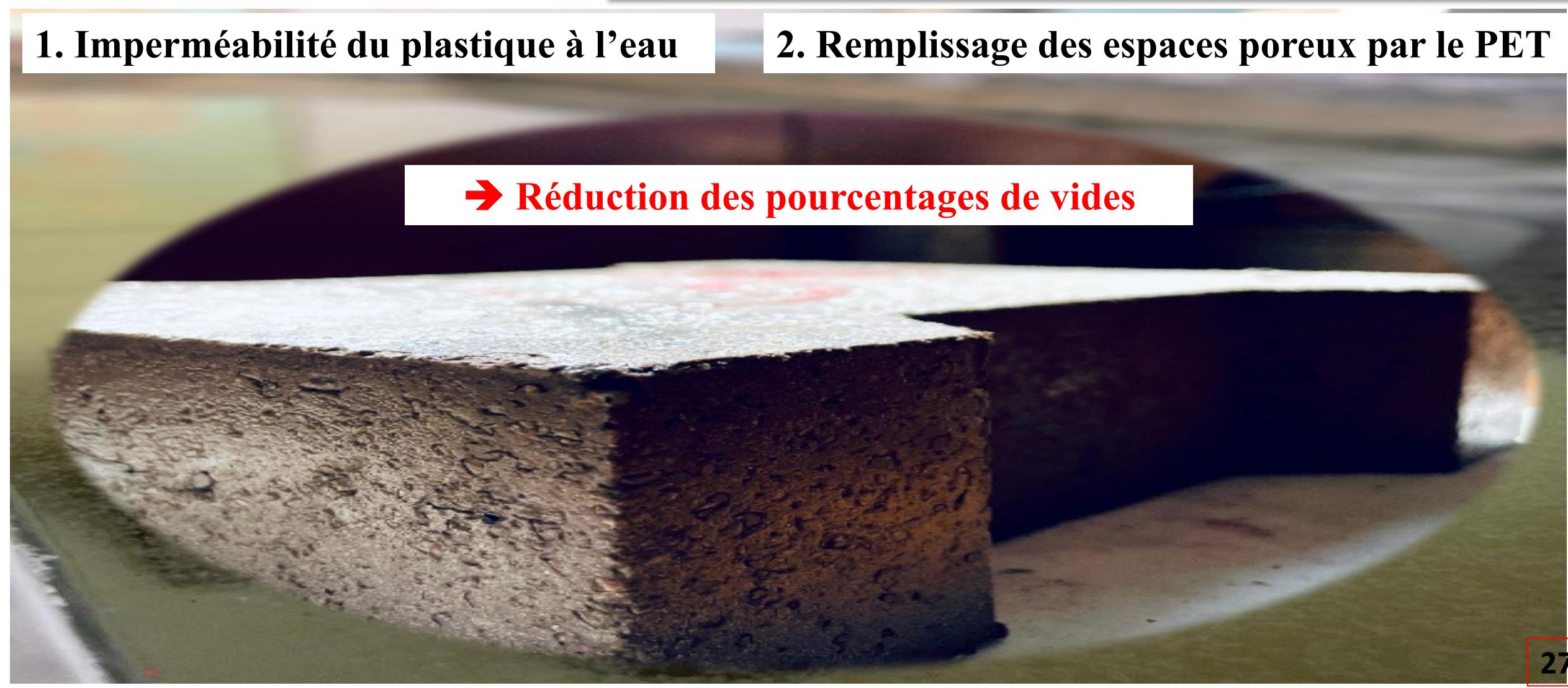
2

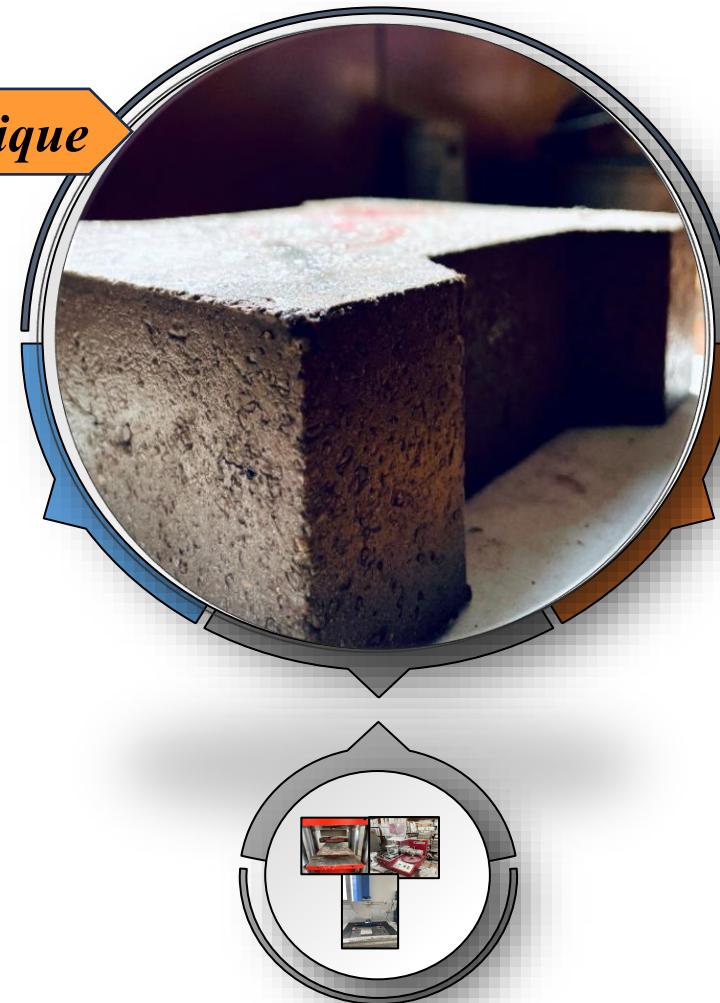
Type de pavé	Pourcentage d'eau absorbé [W _a %]	Norme NBN B 15-215 :1989
Pavé en béton	2,83	$\leq 5,4\%$
Pavé écologique	0,39	

1. Imperméabilité du plastique à l'eau

2. Remplissage des espaces poreux par le PET

➔ Réduction des pourcentages de vides





Etude de comportement mécanique

1/ Essai de la résistance à la traction par fendage

2/ Essai de la résistance à l'abrasion

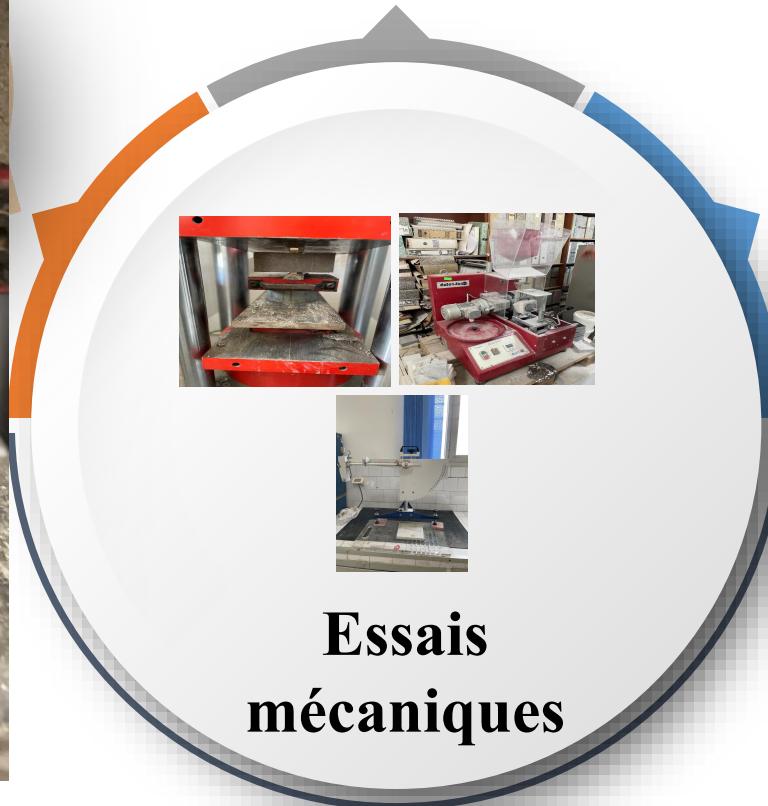
3/ Essai de la résistance à la glissance avant polissage

2 Etude expérimentale

Etude de comportement mécanique



Type de pavé	Charge mesurée à la rupture F[KN]	T [MPa]	Norme NF P 98-303
Pavé en béton	39,17	2,09	$\geq 4 \text{ MPa}$
Pavé écologique	33,61	1,8	

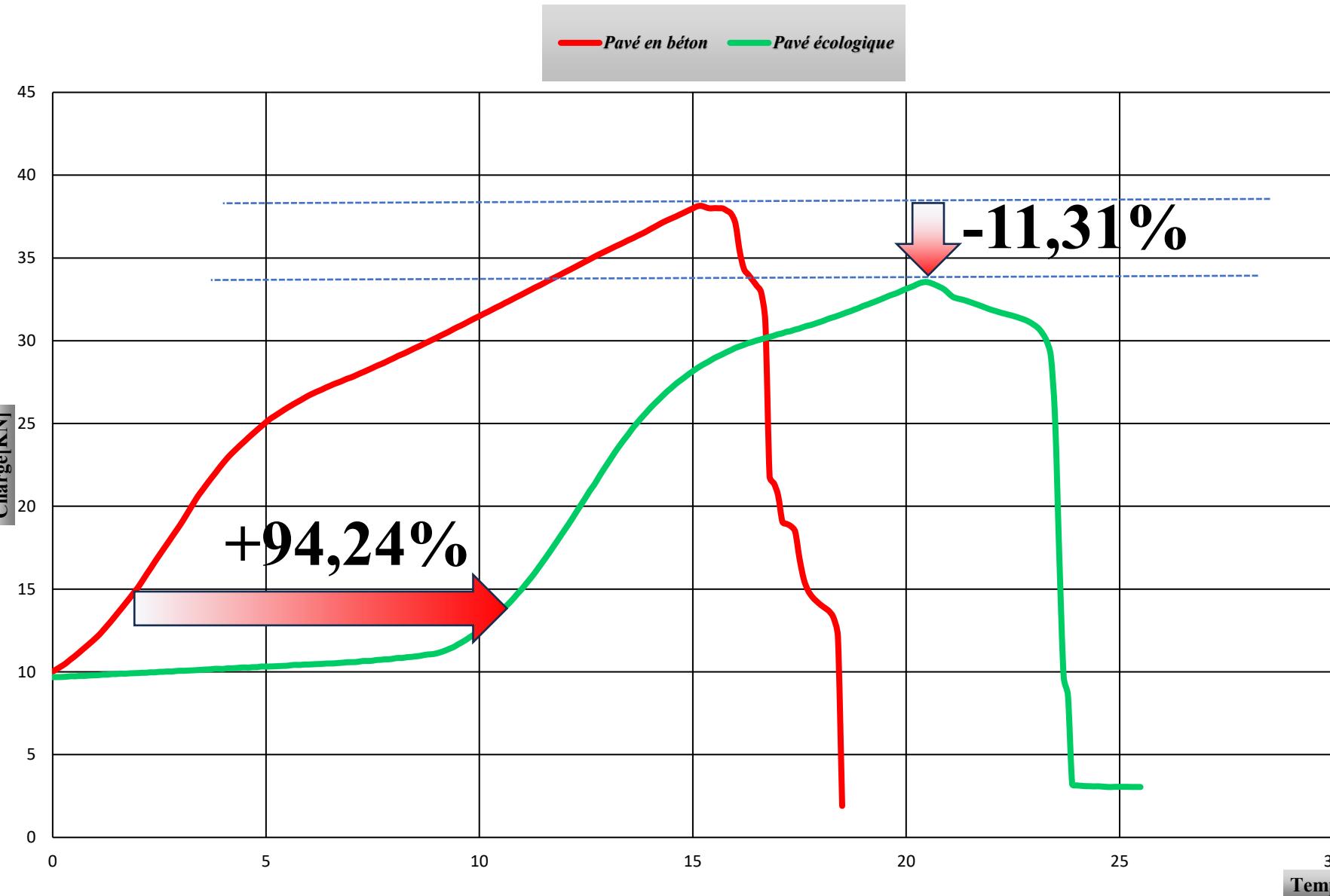


□ **Ciment (liant):** Création des liaisons fortes avec les agrégats

□ **Plastique(liant):** Création des liaisons faible avec les agrégats

→ **Une haute résistance mécanique pour le pavé en béton**

1/ Essai de la résistance à la traction par fendage



Ciment

Plus rigide et dense:
casse brusquement

Plastique

Plus flexible et élastique:
se déforme de manière
continue

2 Etude expérimentale

Etude de comportement mécanique



Essai d'abrasion



Essais
mécaniques



2/ Essai de la résistance à l'abrasion

Type de pavé	Longueurs des empreintes mm	Norme NF EN 1338 :2003
Pavé en béton	24,33	 ≤ 25 mm
Pavé écologique	24,33	 ≤ 25 mm

Pavé en béton

Composant de béton:

création d'une structure stable et uniforme

Pavé écologique

30% sable fournit la dureté nécessaire

70% PET améliore la flexibilité et la cohésion du matériau

Essais mécaniques



**Essai de glissance
avant polissage**

3/ Essai de la résistance à la glissance avant polissage



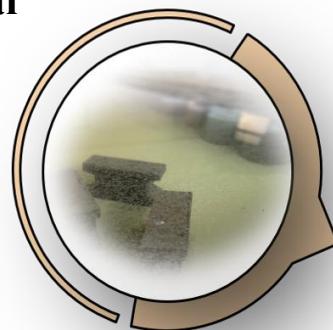
Type de pavé	Valeur USRV (état sec)	Valeur USRV (état humide)
Pavé en béton	63,8	22,86
Pavé écologique	49,6	47,06

État sec: pavé en béton a une surface moins lisse que le pavé écologique

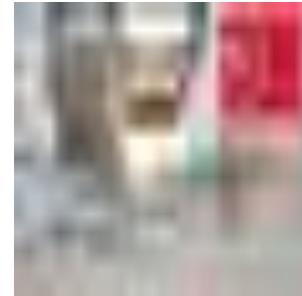
État humide: pavé en béton présente un nombre de vides plus important que le pavé écologique



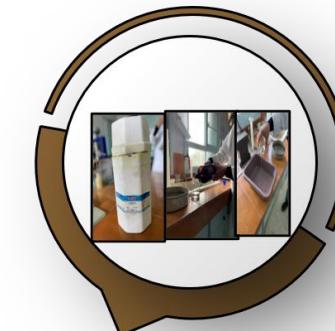
Résultats d'essai
physique



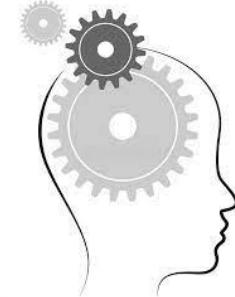
Résultats d'essai
mécanique



Résultats et
interprétation



Résultats d'essai
chimique



Résultats d'essai
thermique

Effet d'attaque d'acide

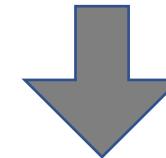


Effet thermique





1/ Effet d'attaque des acides sur pavé écologique



Type de pavé	Perte de masse %	État de surface
Pavé en béton	1,01	rugueuse
Pavé écologique	-92,47% 0,076	lisse

- Béton matériau basique : $\text{pH} \geq 12,5$
- La dissolution totale de la portlandite
- La décalcification progressive des C-S-H (silicate de calcium hydraté)
- ✓ Plastique constitué de nombreuses unités structurales répétées: monomères
- ✓ Plastique présente une grande résistance aux attaques acides



>>>

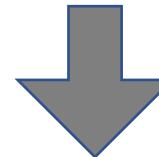


<<<

❖ Gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

❖ Dégradation de couleur du béton

2/ Effet thermique sur le pavé écologique

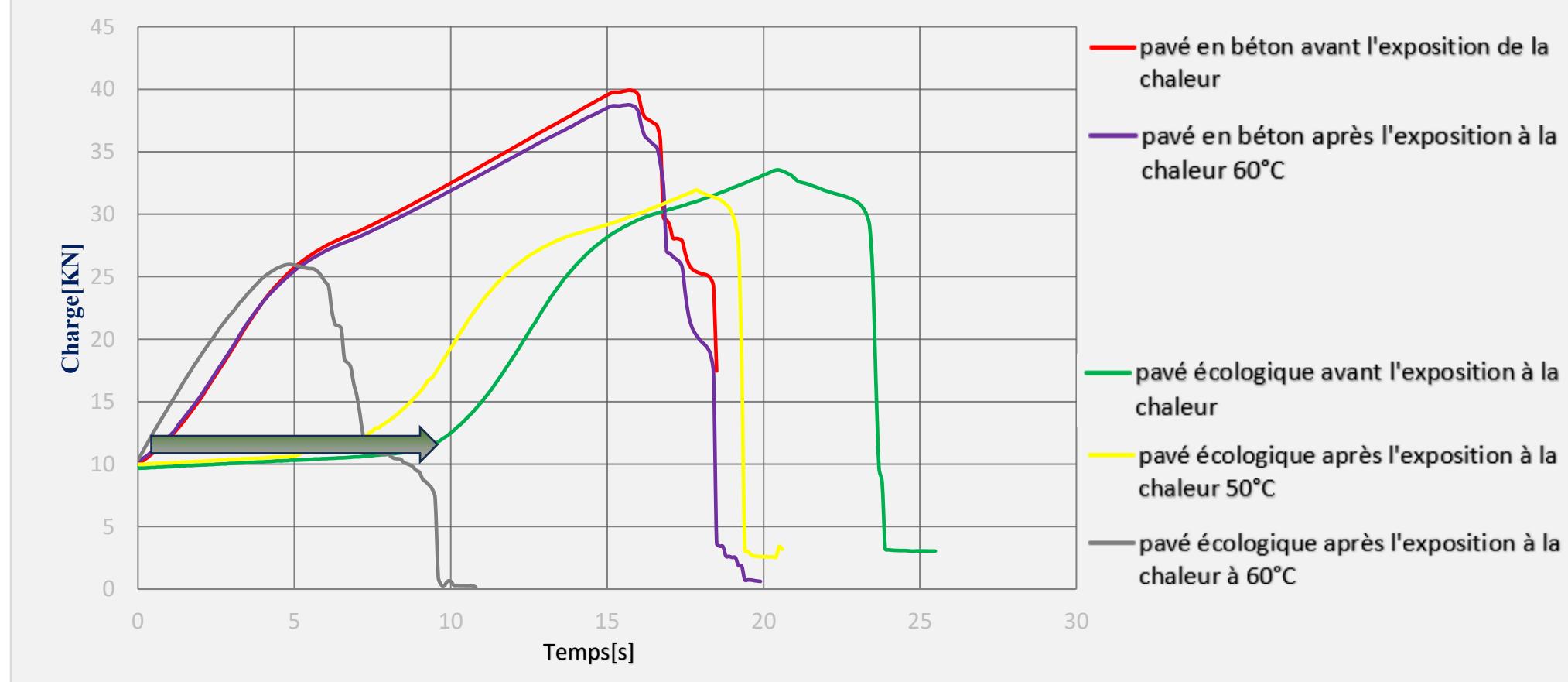


Type de pavé	Charge mesurée à la rupture F[KN]	T [MPa]	Perte de masse %
Pavé en béton	39,13	2,09	0
Pavé écologique	26,87	1,44	0

- L'influence de la structure interne (liaison entre plastique et granulats) du pavé écologique par la chaleur 60°C
- Modification physico-chimique dans les matériaux constitutifs
→ diminution de la résistance
- **Résistance du pavé en béton contre la chaleur exposée**



Force de traction des deux types de pavés dans les deux conditions



- ❖ Les matériaux plastiques présentent des propriétés **viscoélastiques**
- ❖ La structure interne du plastique devient plus **visqueuse (irréversible)**: liaison entre plastique et granulats devient très faible
- ❖ Diminution de temps nécessaire pour atteindre la charge à la rupture maximale.

WP 4 : Évaluation de l'impact environnemental et économique

1

2

3 / Work packages

4

1. Réaliser une analyse du cycle de vie pour évaluer l'**impact environnemental** des matériaux fabriqués à partir de déchets recyclés.



2. Réaliser une analyse économique pour évaluer la **viabilité financière** du projet.

3. Étudier l'impact du recyclage des matériaux de construction sur le développement économique, l'employabilité et l'inclusion sociale de la ville.



VS

440

350

440
millimes

Cout d'un seul pavé écologique

300 DT

Cout d'un tonne de plastique PET

20 DT

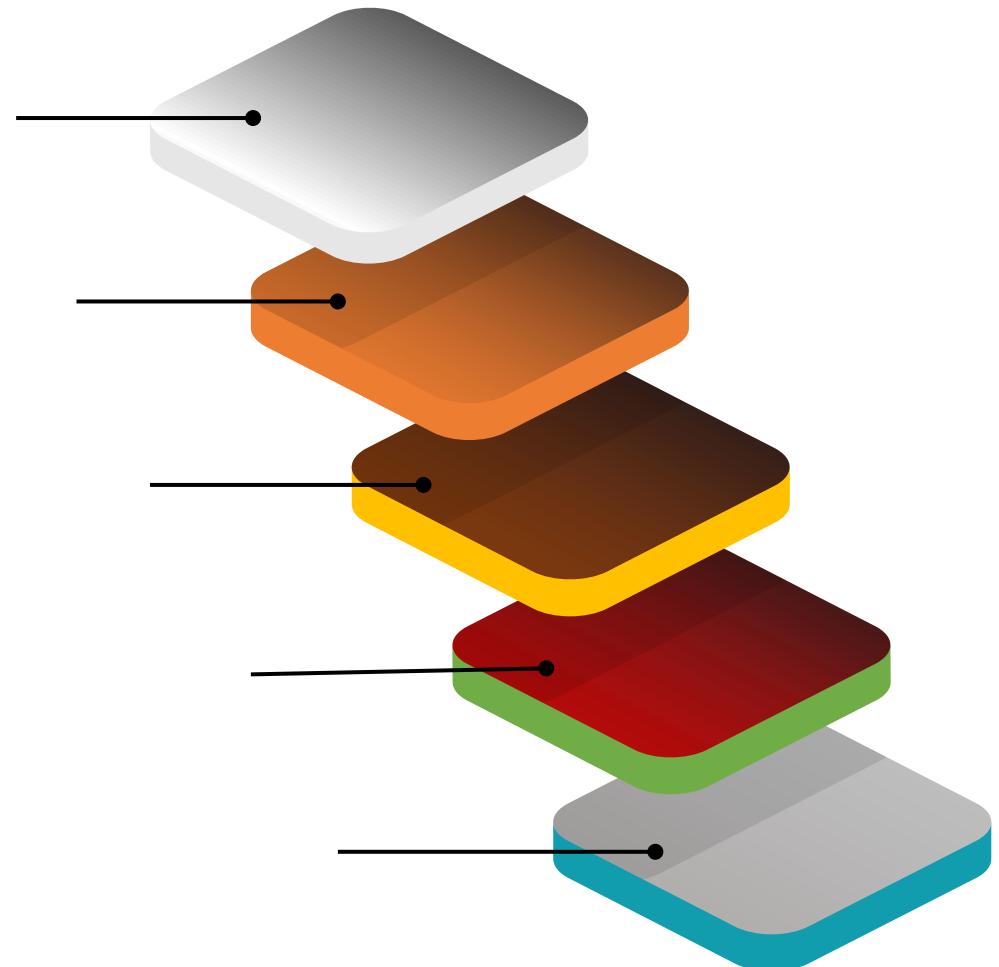
Cout d'une tonne de sable

76,545 millimes

Cout du gaz consommé d'un seul pavé

0,315 m³

Consomation du gaz d'un seul pavé (50 min)



WP 5 : Validation et déploiement

1

2

3/ Work packages

4

1. Testez des pavés écologiques, des bétons, et d'autres matériaux de construction dans des **conditions réelles**.

2. Recueillir le retour d'information et les commentaires des utilisateurs afin **d'améliorer les produits et les processus**.

3. Déployer des matériaux recyclés dans des projets pilotes.



1

2

WP 6 : Suivi et évaluation continue

1. Mettre en place un suivi régulier des performances des matériaux recyclés utilisés dans les projets de construction et de leur impact sur la vie des résidents locaux.

3/ Work packages

4

2. Diffuser les résultats et les meilleures pratiques afin d'encourager l'adoption de la récupération des plastiques et des déchets de construction dans le domaine du génie civil et de l'urbanisme.

Au niveau Scientifique:

1

Caractérisation des matériaux : Analyse approfondie des propriétés physiques et chimiques des déchets plastiques et des matériaux de construction recyclés.

2

Processus de recyclage efficaces : Développement de méthodes de recyclage efficaces pour transformer les déchets en composants de matériaux de construction de qualité.

3

Performance des matériaux recyclés : Tests en laboratoire pour évaluer les propriétés mécaniques, thermiques et chimiques des matériaux de construction fabriqués à partir de déchets recyclés.

4

Durabilité et stabilité à long terme : Évaluation de la résistance aux intempéries, à la corrosion et à la dégradation. Comparaison des performances avec les matériaux de construction traditionnels.



Au niveau opérationnel :



1

Infrastructure de traitement des déchets : Mise en place d'installations de tri, de lavage, de **broyage**, de concassage, d'extrusion ou d'autres procédés de transformation des déchets en matériaux de construction.

2

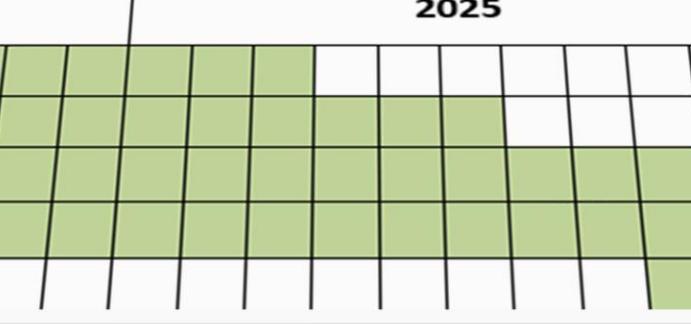
Production de matériaux de construction recyclés : Production réussie de matériaux de construction de haute qualité à partir de déchets recyclés, tels que des blocs, des panneaux, des tuyaux, des matériaux de chaussées, etc.

3

Chaîne d'approvisionnement : Établissement de partenariats avec des fournisseurs de déchets plastiques et de matériaux de construction pour garantir un approvisionnement continu.

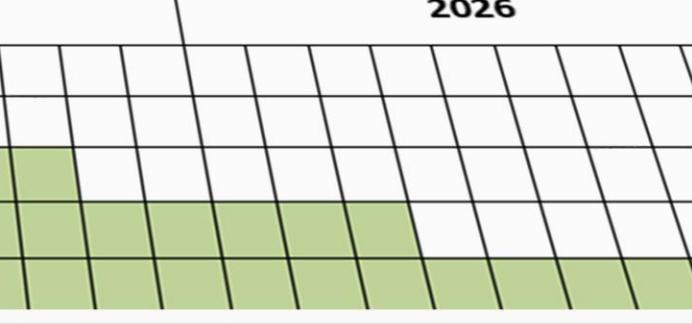
4

Normes de qualité : Respect des normes de qualité et de sécurité spécifiques aux matériaux de construction recyclés, y compris les certifications le cas échéant.

 Military Academy <i>Project Title:</i> <i>Durée du projet</i> <i>S</i>	Academic year 2024-2025 project Proposal Form <i>Concrete Reinforced by the Addition of Demolition Waste</i>	 2024
		 2025
		 2026

Project description	
Objective: <p>The objective of this project is to investigate the mechanical properties of concrete reinforced with materials derived from demolition waste. The study aims to evaluate the performance and efficiency of these materials in real-world construction applications. Additionally, the project will explore innovative ways to utilize demolition waste for construction ends.</p>	
Approach/Phases: <p>Phase 01: Comprehensive literature review on recycled materials from demolition waste and their applications in construction. Phase 02: Experimental analysis of the mechanical properties of concrete reinforced with various types of demolition waste. Phase 03: Performance evaluation of reinforced concrete in simulated construction scenarios. Phase 04: Development of new methodologies for using demolition waste in military and civilian construction, with a focus on enhancing sustainability and efficiency.</p>	
Work type: <input checked="" type="checkbox"/> Study <input type="checkbox"/> Conception/Modélisation <input checked="" type="checkbox"/> Simulation <input type="checkbox"/> Développement/Réalisation	
Expected Results: <p>Outcome 01: Detailed analysis of the mechanical characteristics of concrete reinforced with recycled demolition waste. Outcome 02: Practical recommendations for integrating demolition waste into construction processes, particularly for military and civilian infrastructure. Outcome 03: Proposal of a new method or idea for utilizing demolition waste in construction, aimed at improving sustainability and cost-effectiveness.</p>	
Requirements (équipement/software) <p>1) LSDYNA software. 2) i5/i7 laptop. 3) Standard laboratory equipment for material testing. 4) Access to demolition waste samples and concrete mixing facilities.</p>	
Project prerequisite: <p>1) One student with a strong background in civil engineering and materials science. 2) The student should be familiar with concrete technology and recycling processes.</p>	
Date: ... / 2024 Signature:D.A..... 13/09/2024	



 Republic of Tunisia Ministry of Defense Army Military Academy - Fondouk Jeddid Academic Instruction Directorate	Academic year 2024-2025 End of course Project Proposal Form	 2026
		 2026
		 2026
		 2026

Project description	
Objective: <p>The primary objective of this project is to explore and develop innovative methods for recycling and valorizing rubber waste. The project will also evaluate the impact of these processes on the circular economy, emphasizing the environmental and economic benefits of integrating rubber waste into sustainable material cycles.</p>	
Approach/Phases: <p>Phase 01: Literature review on the current methods and technologies for rubber waste recycling and valorization. Phase 02: Investigation of the potential uses of recycled rubber in various industries and its impact on sustainability. Phase 03: Experimental analysis of the properties of recycled rubber materials and their performance in real-world applications. Phase 04: Evaluation of the economic and environmental impacts of rubber waste recycling on the circular economy.</p>	
Work type: <input checked="" type="checkbox"/> Study <input type="checkbox"/> Conception/Modélisation <input checked="" type="checkbox"/> Simulation <input type="checkbox"/> Développement/Réalisation	
Expected Results: <p>Outcome 01: Development of a comprehensive model for rubber waste recycling and valorization. Outcome 02: Assessment of the impact of rubber recycling on the circular economy, including potential cost savings and environmental benefits.</p>	
Requirements (équipement/software) <p>1) LSDYNA / ANSYS software. 2) i5/i7 laptop. 3) Standard laboratory equipment for material testing. 4) Access to rubber waste samples and recycling facilities.</p>	
Project prerequisite: <p>1) One student with a sound knowledge of the Finite Element method for the numerical analysis part of the project. 2) She/he will also be responsible for setting up the experimental campaigns and for the exploitation of the results.</p>	
Date: ... / 2024 Signature:D.A..... 13/09/2024	

VALORISATION ET RECYCLAGE DES DÉCHETS POUR LA CONSTRUCTION

VALORISATION ET RECYCLAGE DES DÉCHETS POUR LA CONSTRUCTION

Work packages	2024					2025												2026						2027				
	-09	-10	-11	-12	-01 -02	-03 -04	-05 -06	-07 -08	-09	-10	-11	-12	-01 -02	-03 -04	-05 -06	-07 -08	-09 -10	-11 -12	-01	-02	-03 -04	-05 -06	-06 -07	-08	-09			
WP 5 : Validation et déploiement	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	5	5	5	6	6	6	6				
1. Testez des pavés écologiques, des bétons, et d'autres matériaux de construction dans des conditions réelles. 2. Recueillir le retour d'information et les commentaires des utilisateurs afin d'améliorer les produits et les processus. 3. Déployer des matériaux recyclés dans des projets pilotes.																												
WP 6 : Suivi et évaluation continu	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	6	6			
1. Mettre en place un suivi régulier des performances des matériaux recyclés utilisés dans les projets de construction et de leur impact sur la vie des résidents locaux. 2. Diffuser les résultats et les meilleures pratiques afin d'encourager l'adoption de la récupération des plastiques et des déchets de construction dans le domaine du génie civil et de l'urbanisme.																												

Date de l'exposé

VALORISATION ET RECYCLAGE DES DÉCHETS POUR LA CONSTRUCTION

Objectifs	Délai		Budget	Ressources humaines	Résultats obtenus	Difficultés rencontrées
	Début	Fin				
1. Analyser les quantités et les types de déchets plastiques et de construction générés en Tunisie.						
2. Évaluer les besoins en matériaux de construction dans le secteur du bâtiment.	01/09/24	31/12/25	80000 DT	Oussama Atoui Azer Maazoun Ahmed Siala		
3. Mener des recherches approfondies sur les différentes technologies de traitement et de recyclage des déchets plastiques et de construction.						50

VALORISATION ET RECYCLAGE DES DÉCHETS POUR LA CONSTRUCTION

Objectifs	Délai		Budget	Ressources humaines	Résultats obtenus	Difficultés rencontrées
	Début	Fin				
<p>1. Préserver les ressources naturelles et réduire la demande en matières premières naturelles.</p> <p>2. Réduire l'empreinte carbone.</p> <p>3. Promouvoir l'économie circulaire en créant une boucle de production et de consommation durable.</p>	01/01/26	31/12/26	? DT	Oussama Atoui Azer Maazoun Ahmed Siala	 THIS IS TO CERTIFY THAT Oussama Atoui <small>Participated as a keynote speaker in the International Seminar on Climate Resilient Pavements</small> <small>Organized in cooperation with: World Road Association PIARC Tunisian Road Association ATR Ministry of Equipment and Housing of Tunisia Held in GammARTH, Tunisia, from April 28-30 April 2023</small> <small>and delivered the presentation titled:</small> 'Pavements made from recycled materials' <small>This certificate is awarded in recognition of his valuable contribution to advancing sustainable, climate-resilient pavement technologies.</small>  THIS IS TO CERTIFY THAT Azer Maazoun <small>Participated as a keynote speaker in the International Seminar on Climate Resilient Pavements</small> <small>Organized in cooperation with: World Road Association PIARC Tunisian Road Association ATR Ministry of Equipment and Housing of Tunisia Held in GammARTH, Tunisia, from April 28-30 April 2023</small> <small>and delivered the presentation titled:</small> 'Ecological Pavements with Plastic Waste' <small>This certificate is awarded in recognition of his valuable contribution to advancing sustainable, climate-resilient pavement technologies.</small>	



مركز البحوث العسكرية
Centre de Recherches Militaires

MINISTÈRE DE LA DÉFENSE NATIONALE CENTRE DES RECHERCHES MILITAIRES



MERCI POUR
VOTRE
ATTENTION

A central graphic features a stylized grey map of North Africa. Overlaid on the map are various blue icons representing industrial and renewable energy sectors: wind turbines, a factory with a smoking chimney, solar panels, and power transmission towers. In the foreground, there are two sprigs of leaves; one on the left has orange leaves, and one on the right has grey leaves. The background is white with light blue and grey circular bubbles of varying sizes.