



République Tunisienne  
Ministère de la défense nationale  
Armée de terre  
Académie militaire Fondouk Jdid  
Direction des études universitaires



---

Recyclage et valorisation des déchets de caoutchouc  
et étude d'impact sur l'économie circulaire

---

Présenté par :

Slt Imen Memmi

Encadré par :

- Lt Col Oussama Atoui
- Comandant Azer Mazzoun

Année Universitaire 2024

# Plan de travail

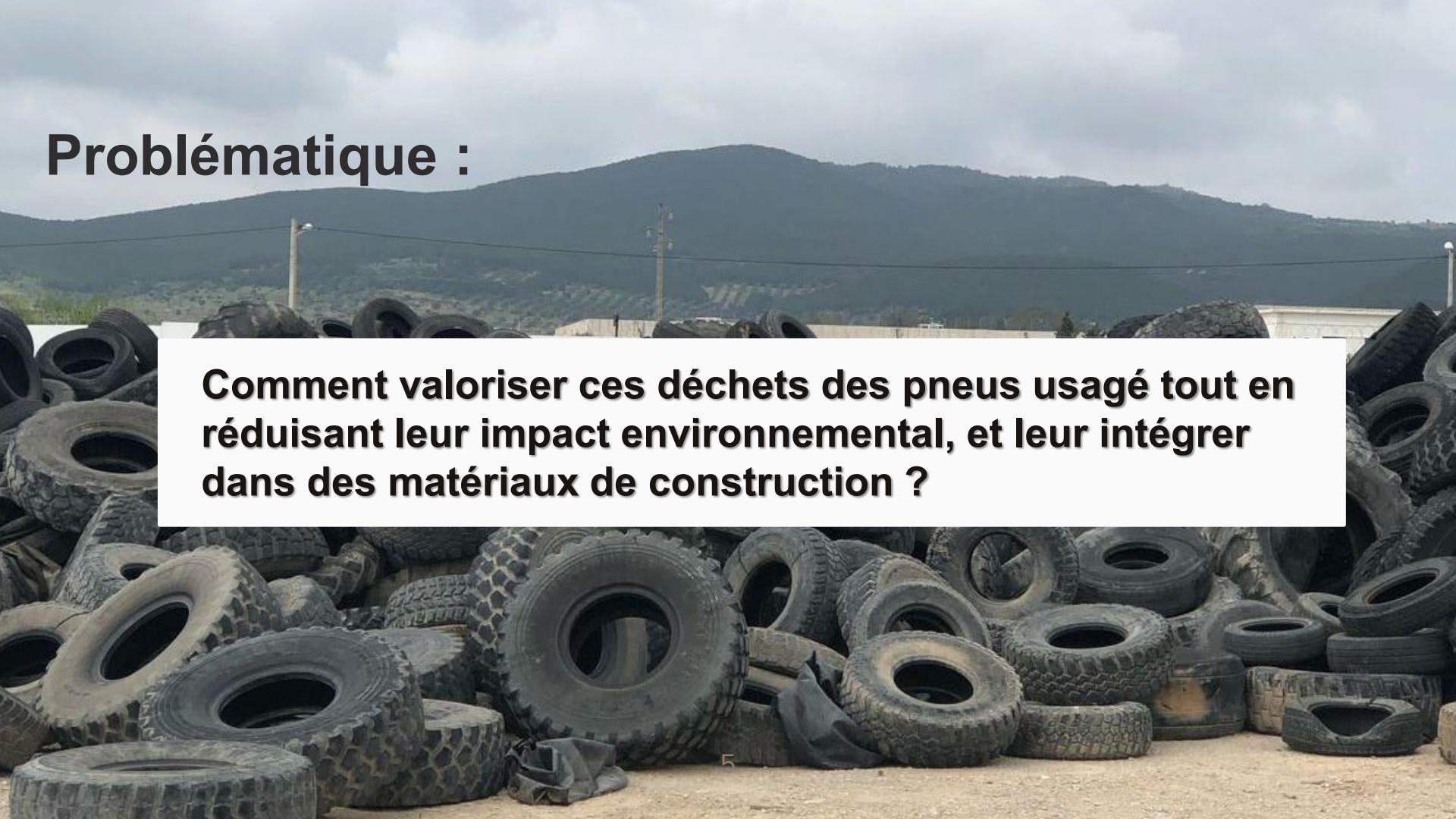
- 1- Présentation générale du projet**
- 2- Formulation et caractéristique mécanique des matériaux**
- 3- Analyse des résultats expérimentaux**
- 4- Blocs de béton au Caoutchouc et caractéristique mécanique**
- 5- Etude d'impact sur l'économie circulaire**
- 6- Conclusion et perspective**



- 
- 1- Présentation générale du projet**
  - 2- Caractéristique mécanique des matériaux et formulation**
  - 3- Analyse des résultats expérimentaux**
  - 4- Blocs de béton au Caoutchouc et caractéristique mécanique**
  - 5-Etude d'impact sur l'économie circulaire**
  - 6-Conclusion et perspective**
-

istock  
by Getty Images

# Problématique :



**Comment valoriser ces déchets des pneus usagé tout en réduisant leur impact environnemental, et leur intégrer dans des matériaux de construction ?**

# Objectifs :

Formuler un béton écologique à base de caoutchouc recyclé pour réduire l'usage de ressources naturelles et limiter l'impact environnemental.

Comparer les performances mécaniques des bétons contenant des granulats de caoutchouc à celles d'un béton témoin, afin d'évaluer leur faisabilité et leur potentiel d'application dans le domaine de la construction.

Réduire les émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'incinération des pneus usagés.



---

**1- Présentation générale du projet**

**2- Caractéristique mécanique des matériaux**

**3- Analyse des résultats expérimentaux**

**4- Blocs de béton au Caoutchouc et caractéristique mécanique**

**5-Etude d'impact sur l'économie circulaire et Etude financière**

**6-Conclusion et perspectives**

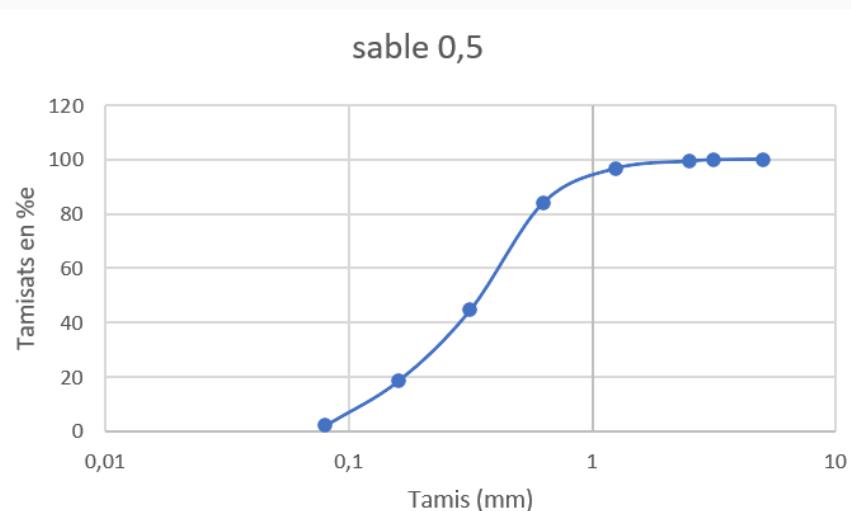
# 1. Caractéristiques du sable :



- Sable provenant du Djebel Rsass
- ES = 75,2 % < 80 %
- c'est un « Sable propre »

Massé volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,43
---	------

Massé volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2,73
---	------

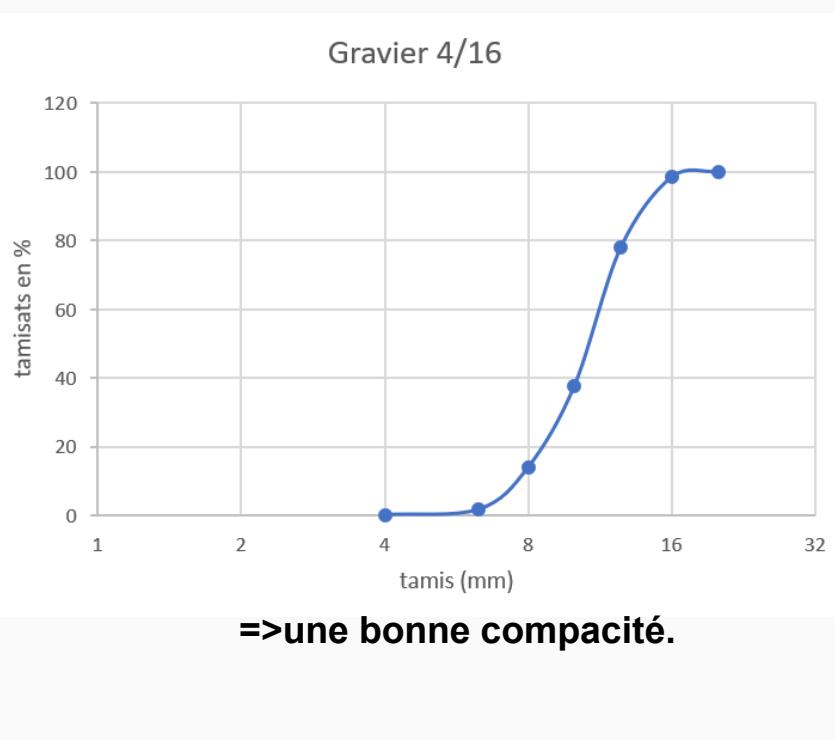


=> Granulométrie bien étalée avec une pente régulière

## 2. Caractéristiques du Gravier :



Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,35
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2,77



### 3. Caractéristiques de Ciment portland :



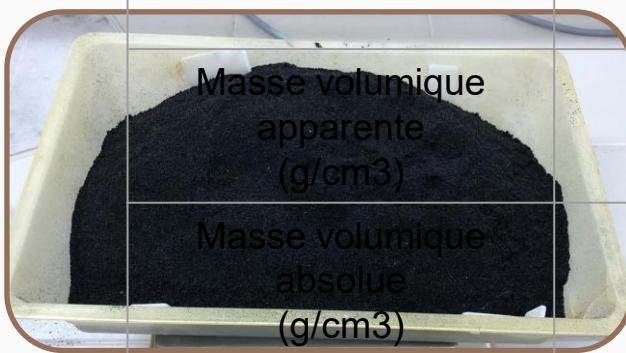
Type	CEM I 42,5
Résistance minimale	42,5 Mpa
Caractéristiques chimiques	-minimum de 95% de clinker -de 1 à 5% de constituants secondaires.

$$(E/C) = 0,5$$

## 4. Caractéristiques du Granulats de Caoutchouc

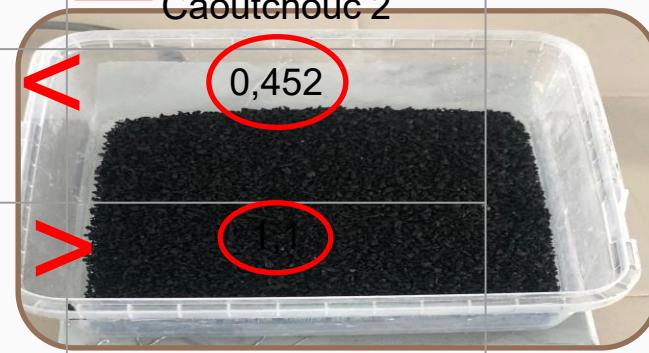
Ce qui reflète une structure plus ouverte mais plus stable

Caoutchouc1 (C1) : 0 - 0,8mm



Caoutchouc 1

Caoutchouc2 (C2) : 0,5 - 2,5mm  
Caoutchouc 2



- Fourni par la Société EL BARAKA , située à Sfax.
- Des particules très fines.

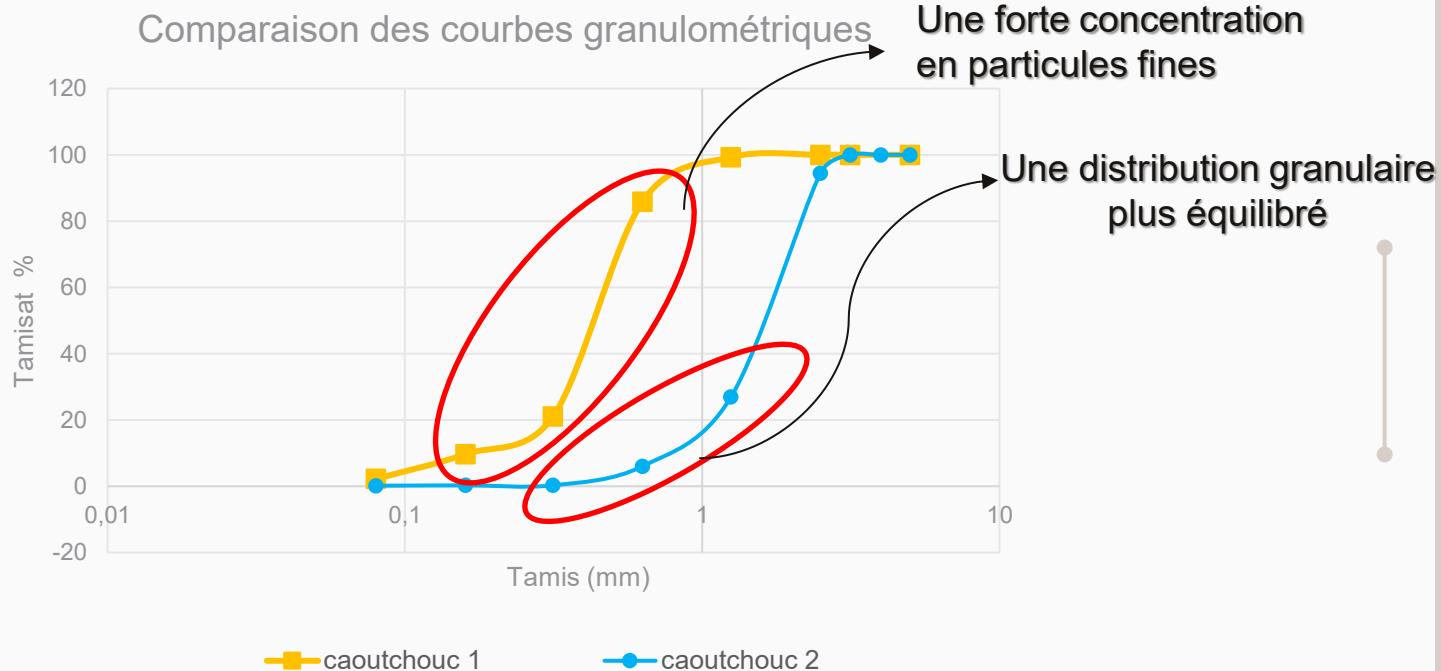
Un meilleur compactage des particules fines

Fourni par la société GMN ,

opérant sous le nom

commercial GREEN11, située en Espagne.

## 4. Caractéristiques du Granulats de Caoutchouc





**1- Présentation générale du projet**

**2- Formulation**

**3- Analyse des résultats expérimentaux**

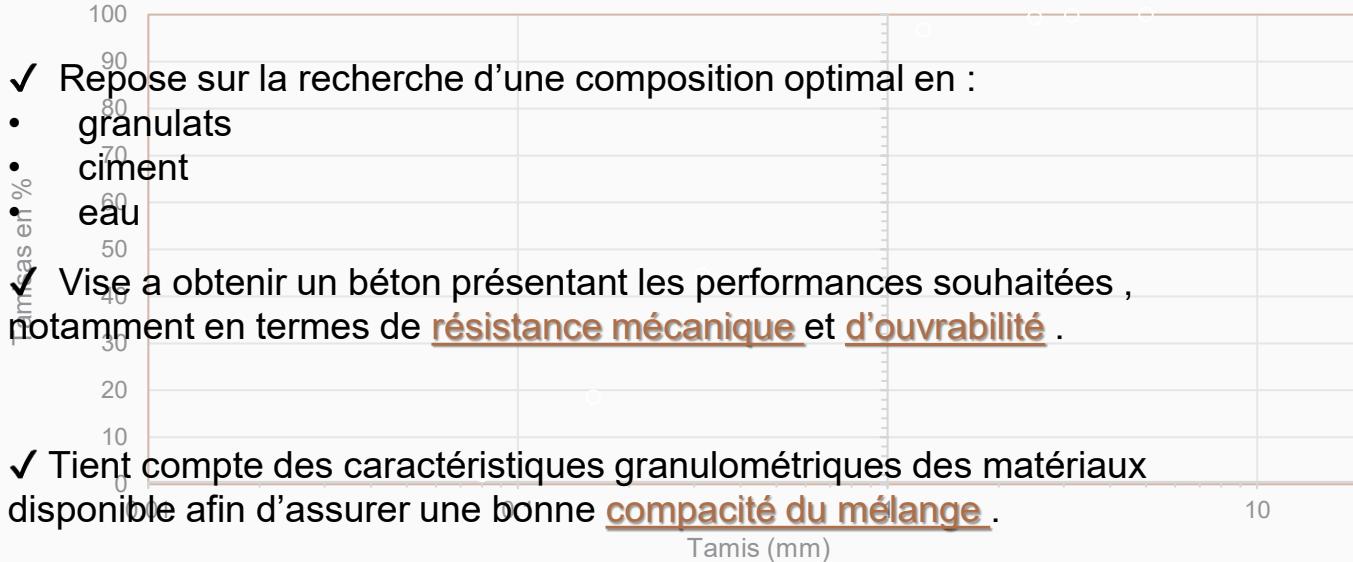
**4- Blocs de béton au Caoutchouc et caractéristique mécanique**

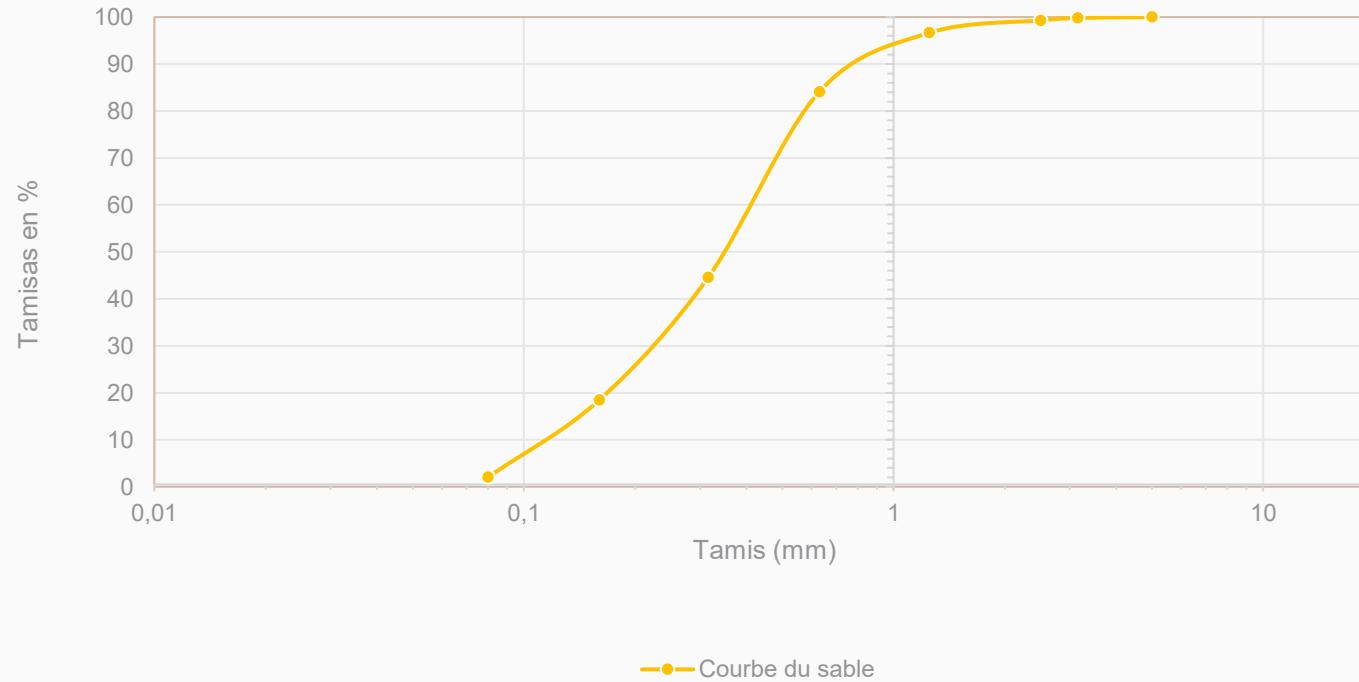
**5-Etude d'impact sur l'économie circulaire et Etude financière**

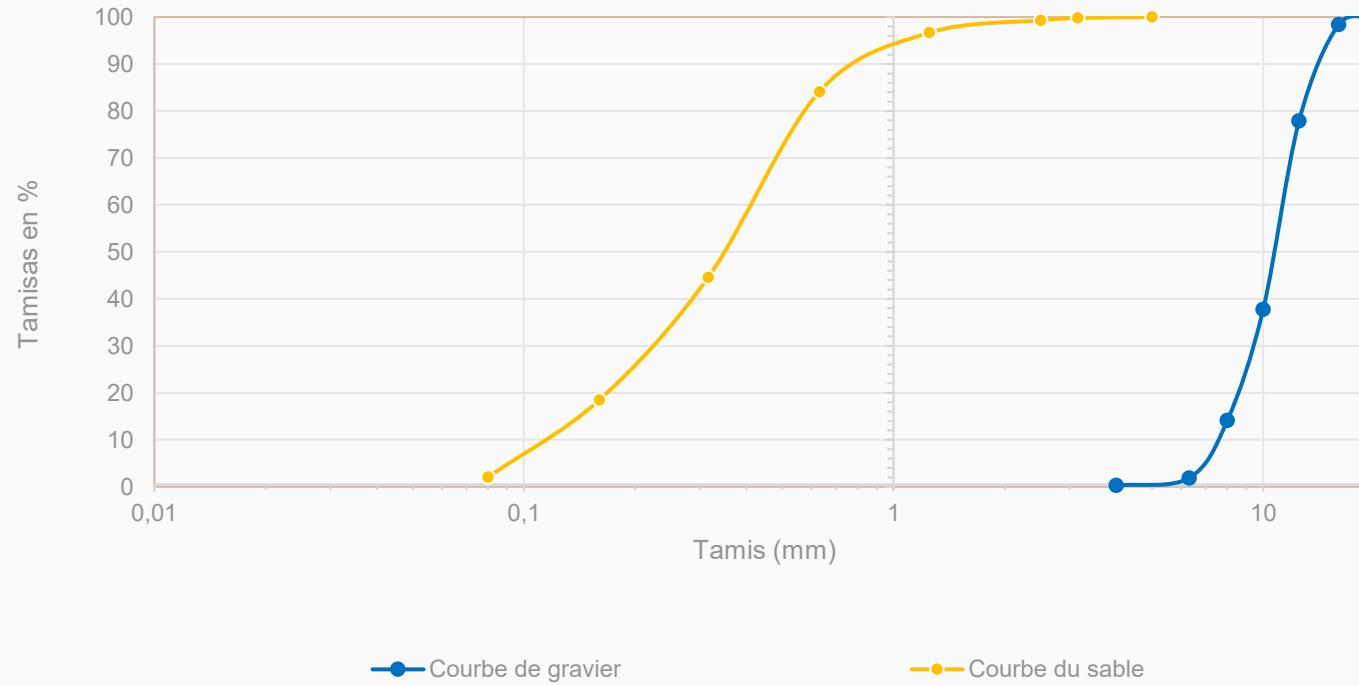
**6-Conclusion et perspectives**

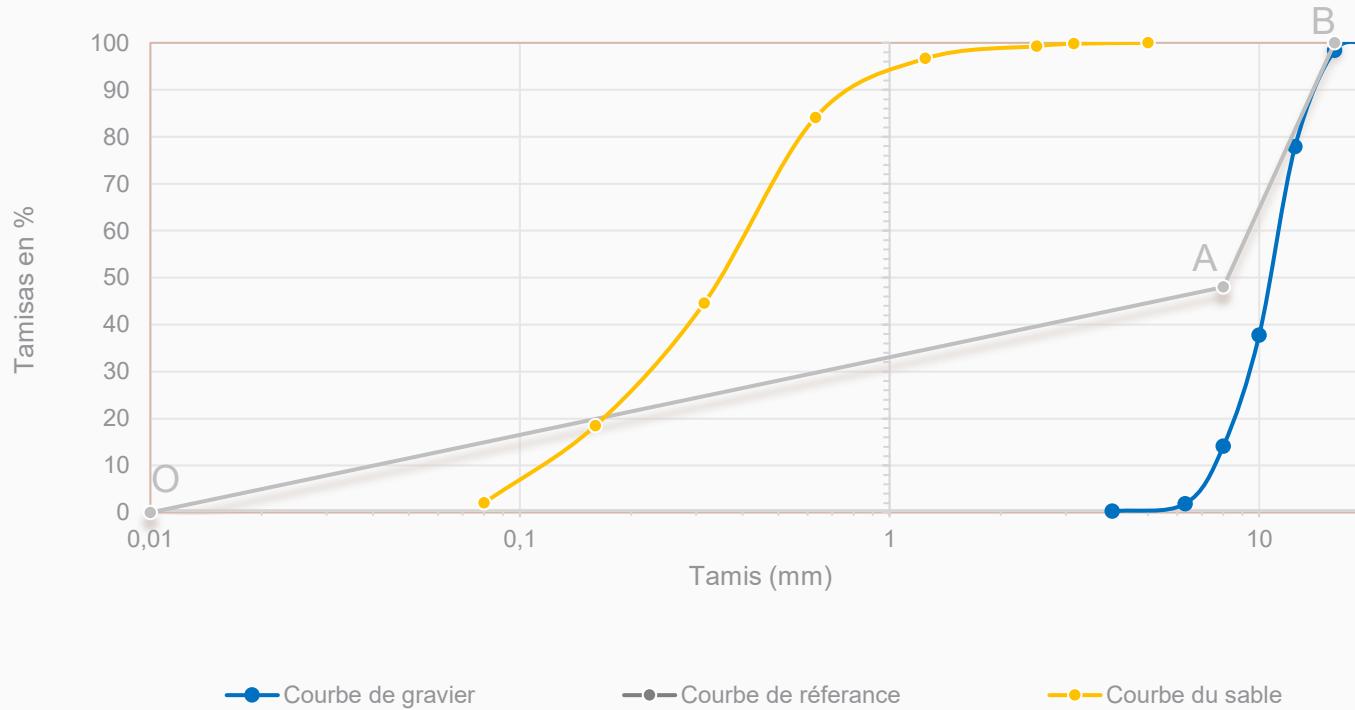
# Méthode de Dreux-Gorisso

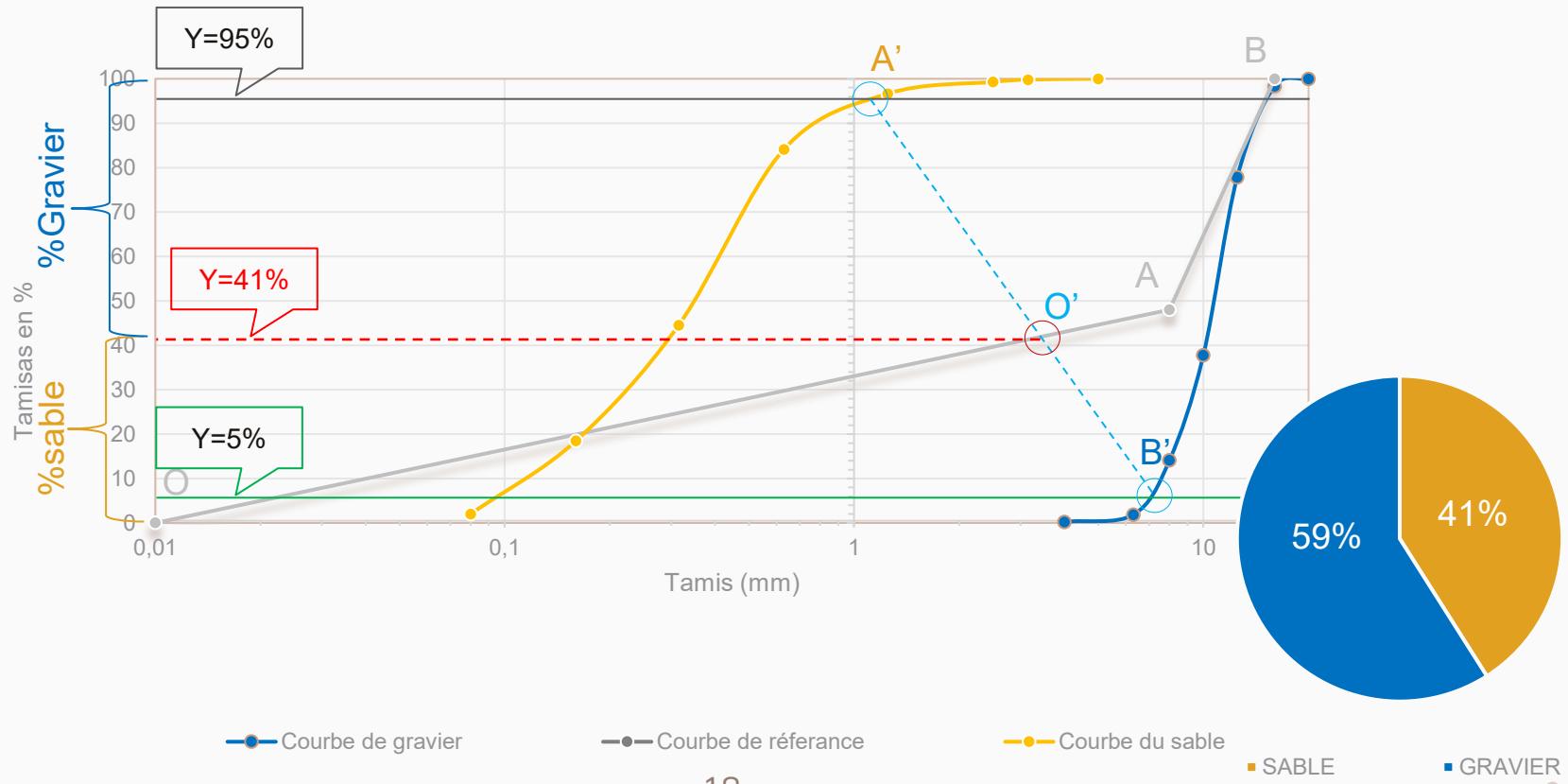
- ✓ Repose sur la recherche d'une composition optimal en :
  - granulats
  - ciment
  - eau
- ✓ Vise à obtenir un béton présentant les performances souhaitées , notamment en termes de résistance mécanique et d'ouvrabilité .
- ✓ Tient compte des caractéristiques granulométriques des matériaux disponibles afin d'assurer une bonne compacité du mélange .











## 2. Formulations :

-substitution volumique du sable



Caoutchouc1 0-0,8mm



Caoutchouc2 0,5-2,5mm

Composition	B0(0%)	B1(2% C1)	B2(2% C2)	B3(5% C1)	B4(5% C2)	B5(5%C1+ 5% C2))
Ciment (Kg)	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
Eau (Kg)	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25
Sable (Kg)	19,27	19,25	19,25	18,68	18,67	17,69
Caoutchouc (Kg)	0	0,188	0,165	0,405	0,396	0,801
Gravier (Kg)	37.6	37.6	37.6	37.6	37.6	37.6



1- Présentation générale du projet

2- Caractéristique mécanique des matériaux

### 3- Analyse des résultats expérimentaux

4- Blocs de béton au Caoutchouc et caractéristique mécanique

5-Etude d'impact sur l'économie circulaire

6-Conclusion et perspectives



% de Caoutchouc	0%	2% C1	2% C2	5% C1	5% C2	5% C1+C2
Affaissement (mm)	71	62	58	52	45	48,5



## Essai d’Affaissement

NF EN 12350-2

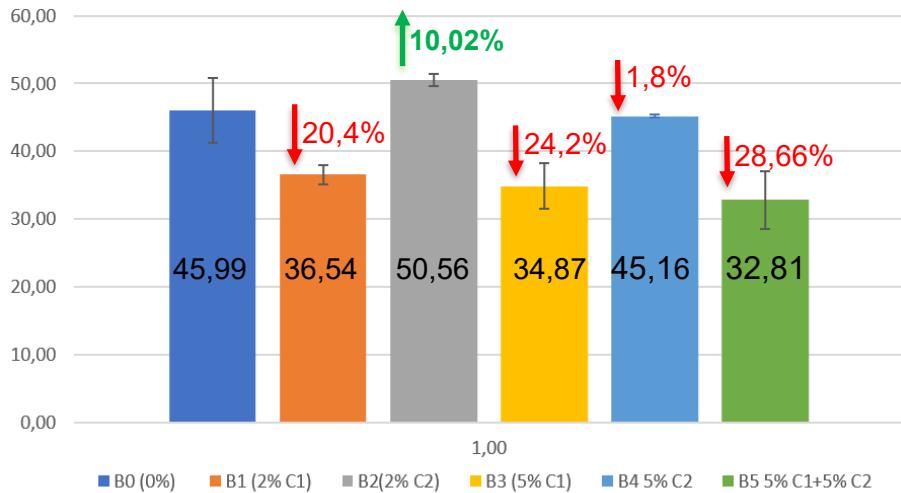
« L’augmentation du taux de substitution ainsi que la taille des particules de caoutchouc influencent négativement à la fluidité du béton »

=>Le caoutchouc est **moins absorbant** que le sable et **repousse partiellement l’eau**, ce qui réduit la quantité d’eau libre disponible pour la lubrification du mélange



Classe	Affaissement	Consistance
S1	De 1 à 40 mm	Ferme
S2	50 à 90 mm	Plastique
S3	100 à 150	Très plastique
S4	160 à 210 mm	Fluide
S5	>210 mm	Très fluide

### Essai de compression



=> La substitution de 2 % de C2 offre les meilleures performances..

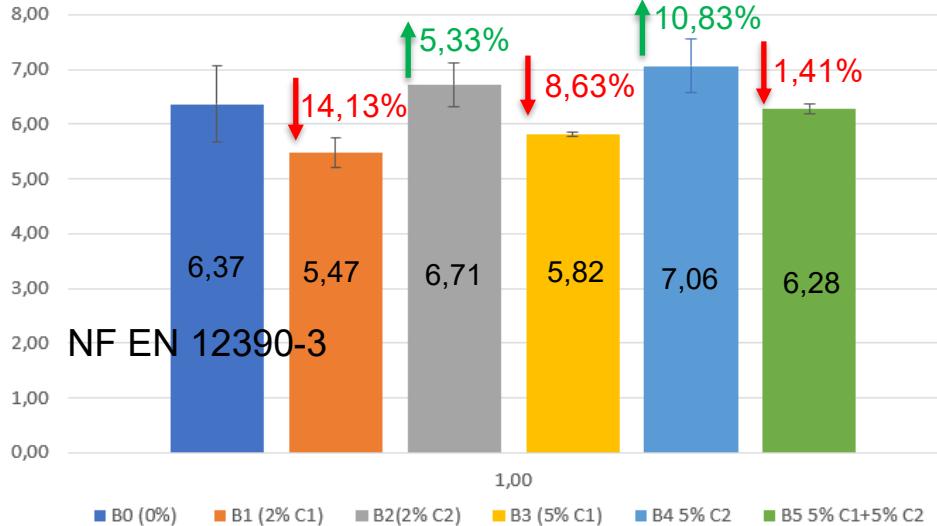


-Le caoutchouc de type C2 a une meilleure transmission des charges mécaniques.

tandis que le caoutchouc de type C1 a un effet négatif à faible dosage qui a une interface caoutchouc-ciment plus sollicitée mais moins performante.



Essai de Traction-Flexion 3 points



-Le caoutchouc grossier améliore la résistance à la traction par flexion, tandis que le caoutchouc fin a un effet négatif à faible dose.

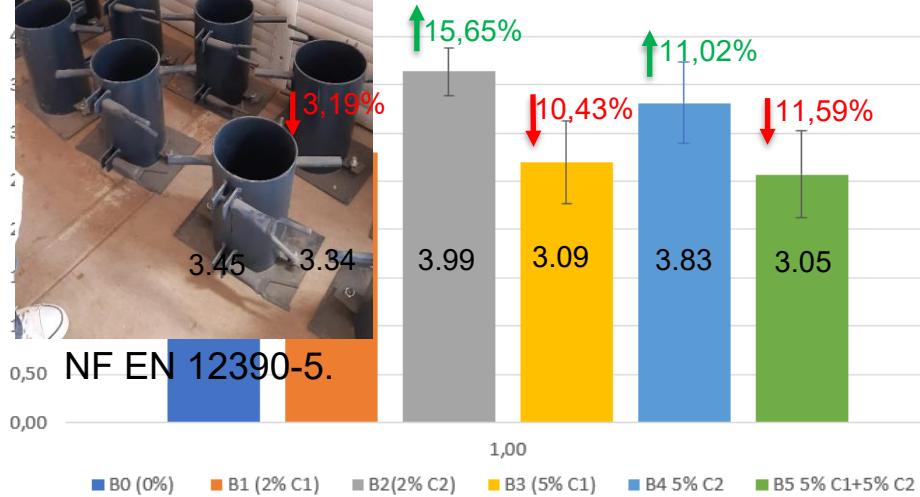
-un mélange équilibré des deux types de caoutchouc semble compenser ces effets et permet de retrouver la résistance à la traction initiale du béton témoin.

=> Les substitutions de 5 % et 2 % de C2 sont les plus importantes





Test de Traction par fendage



NF EN 12390-5.

=> L'incorporation de caoutchouc **réduit la résistance à la traction par fendage**, avec une influence variable selon **le type** de caoutchouc et le dosage. Un mélange des deux types à 10% total résulte en une perte notable de résistance .



=> L'incorporation de 2 % et 5 % de C2 donne les meilleures performances

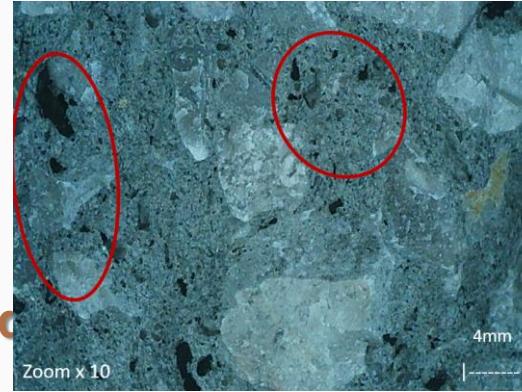




2% C1



2% C2

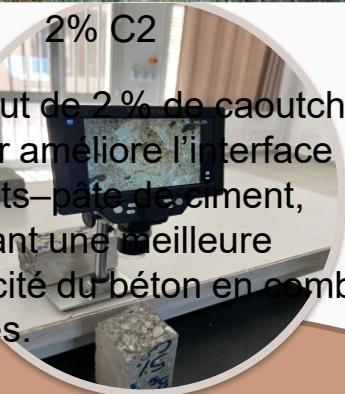


5% C1+ 5% C2

=>Les particules fines de C1 ne parviennent pas à remplir les pores existants.

=>L'ajout de 2 % de caoutchouc grossier améliore l'interface granulats-pâte, le ciment, favorisant une meilleure compacité du béton en comblant les vides.

=> adhérence variable entre la pâte de ciment et le mélange de granulats de caoutchouc fins et gros.



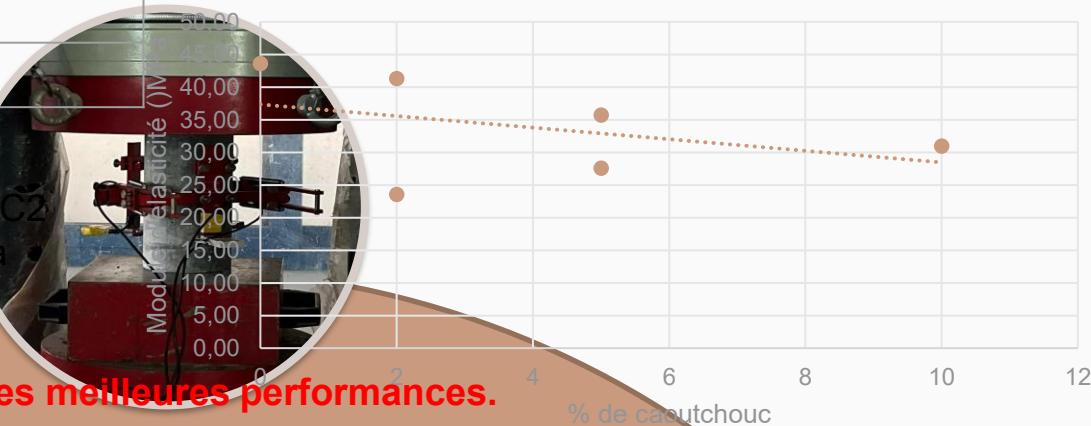
Formulation	Module d'élasticité (MPa)
BO(0%)	43 617,0
B1 (2% C1) 5% C <sub>1</sub> R <sub>1</sub>	23 558,5
B2 (2% C <sub>2</sub> ) 5% C <sub>2</sub> R <sub>2</sub> <span style="color: orange;">★</span>	41 314,0
B3 (5% C1)	27 582,0
B4 (5% C2)	35 727,0
B5(5% C1+5% C2) NF EN 12390-3	30 974,0

=> Cela indique que les fines particules de caoutchouc réduisent fortement la rigidité du béton.

## Determination de module d'élasticité

=> la granulométrie plus importante est C2 permet une meilleure intégration dans la matrice cimentaire, limitant la perte de rigidité.

=> L'incorporation de 2 % de C2 donne les meilleures performances.



=>En tenant compte de l'ensemble des résultats, un dosage de 2% de caoutchouc de type C2 semble être le compromis le plus favorable.

L'essai réaliser	Affaissement	Compression	Flexion	Fendage	Module d'élasticité
Béton témoin	71 mm	45,99 MPa	6,37 MPa	3,45 MPa	43 617 MPa
2% de C2	58 mm	50,59 MPa	6,71 MPa	3,99MPa	41 319 MPa



**1- Présentation générale du projet**

**2- Caractéristique mécanique des matériaux**

**3- Analyse des résultats expérimentaux**

**4- Blocs de béton au Caoutchouc**

**5-Etude d'impact sur l'économie circulaire**

**6-Conclusion et perspective**

## Dimensions de bloc



Béton Témoin



Béton avec 2% de  
caoutchouc 0,5-2,5mm





**1- Présentation générale du projet**

**2- Caractéristique mécanique des matériaux**

**3- Analyse des résultats expérimentaux**

**4- caractéristique mécanique**

**5-Etude d'impact sur l'économie circulaire**

**6-Conclusion et perspective**

Essai de compression en boutisse



Essai de compression sur chantier

# Les essais réalisés



Essai de traction par flexion en 3points



Type de béton	fc28 (MPa)	fc28 (MPa)	ft28 (MPa)
=>conserve une résistance mécanique significative, le rendant particulièrement adapté à des applications non structurelles ou semi-structurelles. Grâce à la flexibilité des particules de caoutchouc, qui jouent un rôle d'amortisseurs, Béton tertiaire présente une meilleure résistance aux chocs et à la flexion, ce qui en fait une solution pertinente pour les ouvrages où la dissipation d'énergie et la durabilité face aux sollicitations dynamiques sont essentielles.	35,51	38,14	3,67
Béton au caoutchouc (2% C2)	28,78	22,24	3,85

**1- Présentation générale du projet**

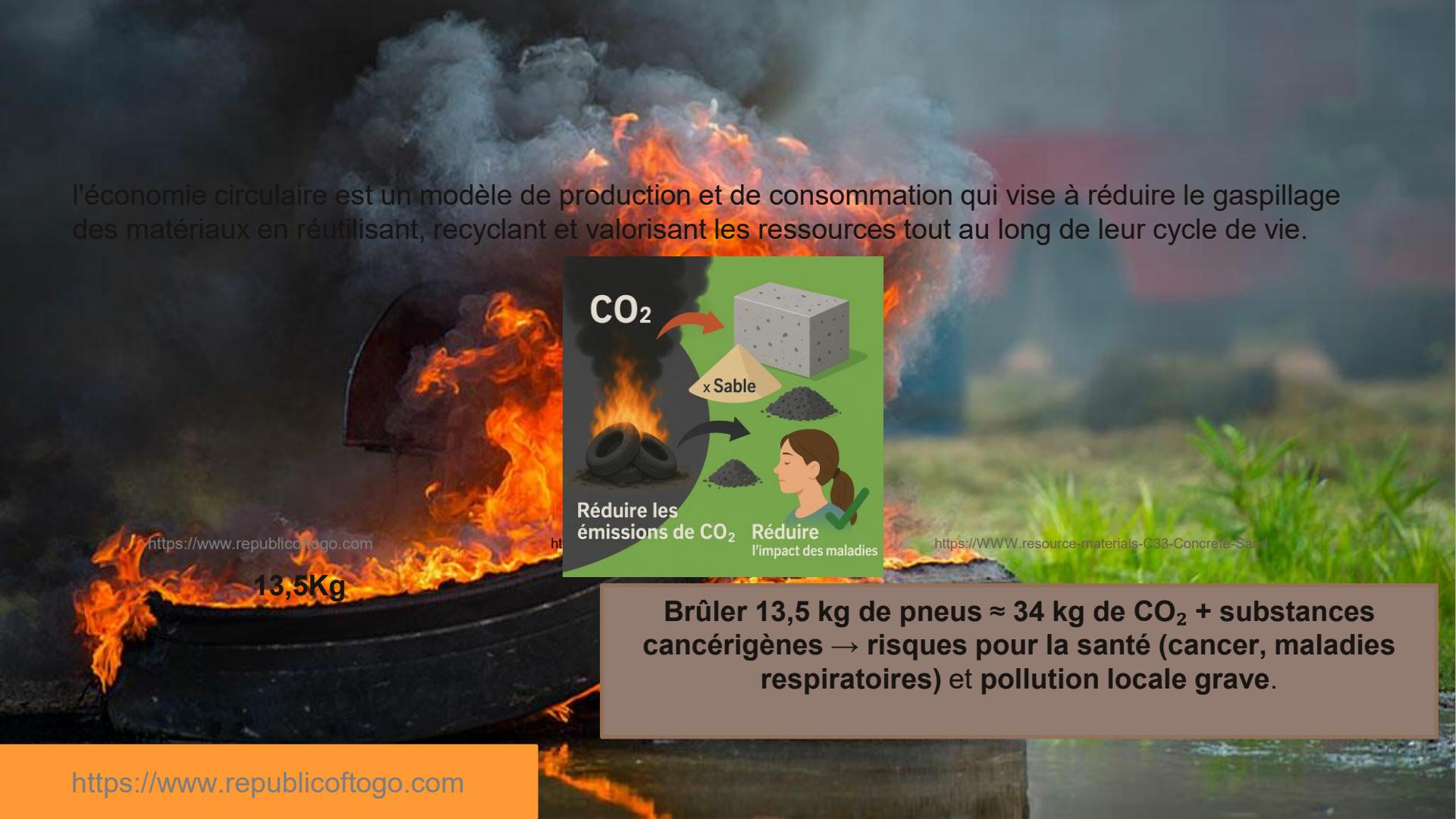
**2- Caractéristique mécanique des matériaux**

**3- Analyse des résultats expérimentaux**

**4- Blocs de béton au Caoutchouc et caractéristique mécanique**

**5-Etude d'impact sur l'économie circulaire**

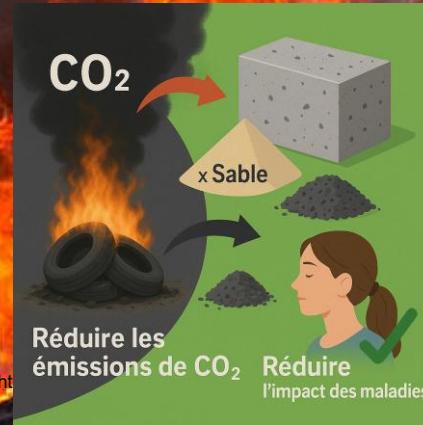
**6-Conclusion et perspective**



l'économie circulaire est un modèle de production et de consommation qui vise à réduire le gaspillage des matériaux en réutilisant, recyclant et valorisant les ressources tout au long de leur cycle de vie.

<https://www.republicoftogo.com>

13,5Kg



<https://WWW.resource-materials-C33-Concrete-Sand>

**Brûler 13,5 kg de pneus ≈ 34 kg de CO<sub>2</sub> + substances cancérogènes → risques pour la santé (cancer, maladies respiratoires) et pollution locale grave.**

<https://www.republicoftogo.com>

**1- Présentation générale du projet**

**2- Caractéristique mécanique des matériaux**

**3- Analyse des résultats expérimentaux**

**4- Blocs de béton au Caoutchouc et caractéristique mécanique**

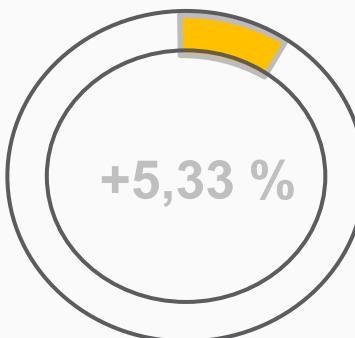
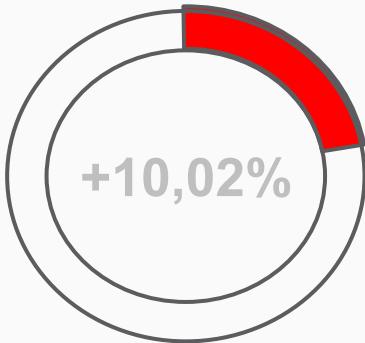
**5-Etude d'impact sur l'économie circulaire**

**6-Conclusion et perspectives**

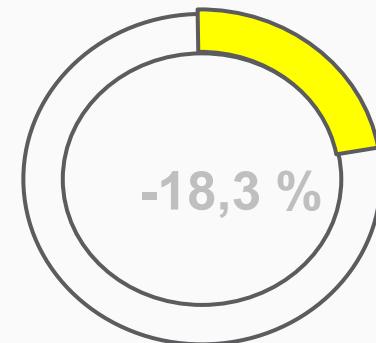
# Synthèse des résultats

L'ajout de **2 % de caoutchouc de type C2** (granulométrie 0,5–2,5 mm) a montré un **équilibre optimal** entre les propriétés mécaniques :

Traction par flexion



Essai d'Affaissement



Résistance à la compression

Traction par fendage

# Perspectives

*Ce projet démontre que les déchets peuvent devenir une ressource précieuse si l'On OSE innove .*

Réaliser des essais balistiques sur des blocs en béton à base de caoutchouc.





Ce travail a été le fruit de beaucoup d'efforts , mais aussi de belles découvertes .

*Merci pour votre attention.*



# OAB

- La point O
- La point B
- La point A:  $X_A = \frac{D_{max}}{2} = 10 \text{ mm}$  et  $Y_A = 50 - \sqrt{D_{max}} + K$

Vibration	Faible		Normale		Puissante	
Forme des granulats	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
400+Superplastifiant	-2	0	-4	-2	-6	-4
400	0	+2	-2	0	-4	-2
350	+2	+4	0	+2	-2	0
300	+4	+6	+2	+4	0	+2
250	+6	+7	+4	+6	+2	+4
200	+8	+10	+6	+8	+4	+6

Figure 10 (paragraphe 4.2) : Valeur du terme correcteur  $K$  en fonction du dosage en ciment, de la puissance de la vibration et de l'angularité des granulats [1]

## Comparaison des courbes granulométriques

