

Poudre Fine D'ardoise Calcinée Comme Ajout Cimentaire Pour Les Bétons À Haute Performance

RAMANANJATO Fanomezana¹, RAKOTOMALALA Zolimboahangy¹, RANAIVONIRIVO Velomanantsoa Gabriely¹, RATSIMBAZAFY Hery Mikaela², RANDRIAMALALA Tiana Richard³

¹ École Doctorale en Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation, Équipe d'Accueil Doctorale Ingénierie des Matériaux et des Matières Premières, École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo, BP 1500, Antananarivo 101, Madagascar

² Centre National des Recherches Industrielles et Technologiques, Département Matériaux et Génie Civil BP 6294, Antananarivo 101, Madagascar

³ Laboratoire National des Travaux Publics et de Bâtiment, Département Sol et Matériaux BP 1151, Antananarivo 101, Madagascar

Auteur correspondant : RAMANANJATO Fanomezana. E-mail : ramananjatofanomezana@gmail.com



Résumé - La valorisation d'un déchet local, l'ardoise, vise à réduire l'empreinte carbone du béton tout en améliorant ses performances mécaniques et durabilité. La formulation d'un Béton à Haute Performance a été réalisée selon la méthode de Dreux-Gorisse, en substituant partiellement le ciment CEM I 52,5 N par de la poudre d'ardoise finement broyée et calcinée. Les taux de substitution étudiés étaient de 5, 10, 15 et 25 %, avec des calcinations effectuées à des températures de 700, 725 et 750 °C, pendant des durées de 2h et 3h, selon différents protocoles (A%/T/t).

Les résistances mécaniques ont été évaluées à 7, 14 et 28 jours sur éprouvettes cylindriques (Ø 16 cm, h 32 cm), avec un rapport E/C constant de 0,4. Les résultats montrent que le protocole A15/725/3 (15% d'ardoise, calcinée à 725 °C pendant 3 h) est optimal, atteignant une résistance à la compression de 54,4 MPa à 28 jours, soit un gain de +14 % par rapport au témoin. La légère baisse initiale due à l'effet de dilution est compensée dès 14 jours par l'activité pouzzolanique.

L'optimisation du couple température-temps est critique pour maximiser l'activité pouzzolanique sans induire de recristallisation. L'incorporation d'ardoise calcinée modifie favorablement la microstructure et la cinétique de durcissement. Ainsi, l'ardoise calcinée à 725 °C pendant 3 h, utilisée à hauteur de 15 %, constitue un ajout cimentaire performant, conciliant économie de ciment, haute résistance et amélioration de la durabilité. Cette approche ouvre la voie à des bétons plus durables et écoresponsables.

Mots clés — Concrete, Dreux-Gorisse, Activité Pouzzolanique, Performance Mécanique

Abstract - The valorization of a local waste material, slate, aims to reduce the carbon footprint of concrete while improving its mechanical performance and durability. A High-Performance Concrete mix was designed using the Dreux-Gorisse method, by partially substituting CEM I 52.5 N cement with finely ground and calcined slate powder. The studied substitution rates were 5, 10, 15, and 25%, with calcinations carried out at temperatures of 700, 725, and 750 °C, for durations of 2h and 3h, according to different protocols (A%/T/t).

Mechanical strengths were evaluated at 7, 14, and 28 days on cylindrical specimens (Ø 16 cm, h 32 cm), with a constant W/C ratio of 0.4. The results show that the protocol A15/725/3 (15% slate, calcined at 725 °C for 3 h) is optimal, achieving a compressive strength of 54.4 MPa at 28 days, representing a gain of +14% compared to the control mix. The slight initial decrease due to the dilution effect is compensated from 14 days onwards by the pozzolanic activity.

The optimization of the temperature-time couple is critical to maximizing pozzolanic activity without inducing recrystallization. The incorporation of calcined slate favorably modifies the microstructure and the hardening kinetics. Thus, slate calcined at 725 °C for 3 h, used at a rate of 15%, constitutes a high-performance cementitious addition, reconciling cement savings, high strength, and improved durability. This approach paves the way for more durable and eco-friendly concretes.

Key words — Beton, Dreux-Gorisse, Pozzolanic Activity, Mechanical Performance

I. INTRODUCTION

La production de béton est une pratique courante dans de nombreux laboratoires à travers le monde, et son utilisation sur les chantiers connaît une expansion progressive. À Madagascar, une diversité de matériaux locaux offre un potentiel intéressant en tant que fines d'ajouts cimentaires pour le béton, notamment les pouzzolanes naturelles, les cendres volantes et les schistes ardoisiers.

Selon la littérature scientifique, l'obtention d'un Béton à Haute Performance (BHP) demeure un défi technique, longtemps considéré comme difficile à atteindre. En l'absence de superplastifiants, la formulation d'un BHP est généralement compromise. Toutefois, l'incorporation d'ajouts cimentaires finement broyés permet de combler les interstices granulaires inaccessibles aux grains de ciment, améliorant ainsi la fluidité du mélange et réduisant la demande en eau.

Les normes s'accordent à définir comme « fines » les particules passant à travers un tamis de 80 μm . Le BHP se distingue des bétons conventionnels par un rapport eau/ciment très faible, généralement inférieur ou égal à 0,4.

Dans ce contexte, notre étude propose l'utilisation du schiste ardoisier local, finement broyé et calciné, comme ajout cimentaire pour la fabrication de BHP. Elle vise à évaluer son influence sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton. Ce travail s'inscrit dans le cadre du thème suivant : « **Poudre fine d'ardoise calcinée comme ajout cimentaire pour les Bétons à Haute Performance** ».

II. MATERIELS ET METHODES

2.1. Présentation et préparation des matières premières

2.1.1. Ardoise

Le schiste ardoisier utilisé dans cette étude est une roche de couleur gris foncé, localement disponible et présentant une structure feuilletée caractéristique. Afin d'être incorporée comme ajout cimentaire, la matière première subit une série de traitements mécaniques et thermiques.



Photo 1 : Ardoise, roche brute, couleur gris foncé

La première étape consiste en un concassage grossier, suivi d'un broyage fin visant à réduire la roche en poudre fine. Cette opération permet d'obtenir une granulométrie compatible avec les exigences des ajouts cimentaires, notamment le passage à travers un tamis de 80 μm , conformément aux normes en vigueur.



Photo 2 : concasseur et broyeur



Photo 3 : poudre fine d'ardoise, 80 µm

La deuxième étape consiste en la calcination.

Une fois broyée, la poudre d'ardoise est soumise à une calcination à différentes températures (700 °C, 725 °C et 750 °C) pendant des durées de 2 h et 3 h, selon les protocoles expérimentaux définis. Ce traitement thermique vise à activer la réactivité pouzzolanique du matériau, en modifiant sa structure minéralogique tout en évitant les phénomènes de recristallisation. Cette opération permet de fixer les paramètres de calcination (température, durée) pour obtenir une poudre réactive donnant un meilleur substituant au ciment pour la fabrication du béton.

La poudre obtenue est ensuite conservée dans des contenants hermétiques à température ambiante, à l'abri de l'humidité, en vue de son incorporation dans les formulations de Béton à Haute Performance

2.1.2. Ciment



Photo 4 : Ciment utilisé

Le ciment utilisé dans cette étude est un **CEM I 52,5 N** de marque *Force One*, fabriqué au Pakistan et commercialisé en sacs de 50 kg.

- Sa **masse volumique apparente** est de : $\rho_{app}(C) = 1,1 \text{ T/m}^3$
- Sa **masse volumique absolue** est de : $\rho_{abs}(C) = 3,04 \text{ T/m}^3$

La classe de résistance d'un ciment est définie par la valeur minimale garantie de la résistance à la compression simple d'un mortier normalisé à l'âge de 28 jours, exprimée en MPa.

Pour le ciment Force One, sa classe vraie en 28 jours est $FCE = 66 \text{ MPa}$, ce qui confirme sa classification en ciment à haute performance.

2.1.3. Granulats

Les granulats utilisés dans cette étude comprennent deux sables de rivière et un gravier de concassage:

- **S1** : sable de classe 0/3, provenant d'Ambodisaha (Alakamisy ny Fenoarivo).
- **S2** : sable de classe 0/4, extrait à Taramanana, situé au sud de Vontovorona.
- **G** : gravier de concassage issu de la carrière de granite d'Imerimanjaka, le long de la route de CUR Vontovorona.



Photo 5 : Sable S1, S2 et Gravier G

Les caractéristiques physiques mesurées sont les suivantes :

Tableau 1 : Caractéristiques physiques des granulats

Granulat	Masse volumique apparente (t/m ³)	Masse volumique absolue (t/m ³)
S1	1,50	2,564
S2	1,54	2,550
G	1,60	2,564

Ces valeurs montrent que les sables et le gravier présentent des densités compatibles avec une utilisation en formulation de Béton à Haute Performance, garantissant une bonne compacité et une répartition granulométrique adaptée.

2.2. Méthodes

2.2.1. Analyse granulométrique

Le matériel utilisé est une série de 14 tamis manuelle en ordre décroissante selon le diamètre de tamis D_t . Le module est $M_t = 31 + (10 \log D_t [\text{mm}])$



Photo 6 : Série de tamis normalisé

2.2.2. Module de finesse et règle de mélanges

L'objectif est d'obtenir un module de finesse cible $M_f = 2,4$.

Pour chaque sable, le module de finesse est calculé selon la relation :

$$M_{f_n} = \frac{\Sigma(100 - \% \text{passant cumulé des tamis normalisés})}{100}$$

- Pour le sable S1 : $M_{f_1} = 1,70$
- Pour le sable S2 : $M_{f_2} = 2,62$

Afin d'atteindre le module de finesse souhaité, la règle d'Abrams est appliquée pour déterminer les proportions optimales des deux sables :

$$\text{Proportion S1} = \frac{M_f - M_{f_2}}{M_{f_1} - M_{f_2}}$$

Et

$$\text{Proportion S2} = \frac{M_{f_1} - M_f}{M_{f_1} - M_{f_2}}$$

En remplaçant les valeurs :

- %S1 = 24%
- %S2 = 76%

Ainsi, le sable de référence pour la formulation est obtenu par le mélange :

$$S = (0,24 \times S1) + (0,76 \times S2)$$

Ce mélange permet d'obtenir un module de finesse global de 2,4 conforme aux exigences de la formulation du Béton à Haute Performance.

2.3. Formulation du béton par la méthode DE DREUX GORISSE

Les données sont les suivantes :

- f_{c28} = 52 MPa
- Classe vraie du ciment CEM I 52,5 N est FCE=66MPa
- Sable Roulé, Gravier Concassé (courante)
- Affaissement souhaité A=5cm
- Affaissement A= 5cm
- Béton Plastique
- Serrage : vibration normale



Photo 7 : Mesure d'Affaissement au cône d'Abrams et utilisation de pervibrateur

2.3.1. Résistance visée

La résistance visée est calculée à partir de la résistance moyenne à 28 jours :

$$R_b = 1,15 \times f_{c28}$$

$$R_b = 1,15 \times 52 = 59,8 \text{ MPa}$$

2.3.2. Détermination du coefficient granulaire G

Le diamètre maximal des granulats adoptés $D_{max}=16\text{mm}$, adopté est défini sur la courbe granulométrique correspond à un passant cumulé de 95%.

Pour un sable roulé et un gravier concassé de qualité courante, le coefficient granulaire est : $G = 0,5$

2.3.3. Calcul du rapport C/E

Le rapport ciment/eau est déterminé par la formule :

$$\frac{C}{E} = \frac{R_b}{(G \times F_{ce})} + 0,5$$

En remplaçant les valeurs :

$$\frac{C}{E} = \frac{59,8}{(0,5 \times 66)} + 0,5 = 2,31$$

Une correction est appliquée en raison de la différence entre $D_{max} = 16$ mm et la valeur de référence de 20 mm. Cette correction est de +4 %, soit :

$$\frac{C}{E} = 2,31 + 0,04 \times 2,31 \approx 2,35$$

2.3.4. Déduction du dosage en ciment en utilisant l'abaque suivant

À partir de l'abaque de Dreux (Figure 1), pour un rapport $\frac{C}{E} = 2,35$ et un affaissement souhaité $A = 5$ cm, on déduit : $C = 400 \text{ kg/m}^3$

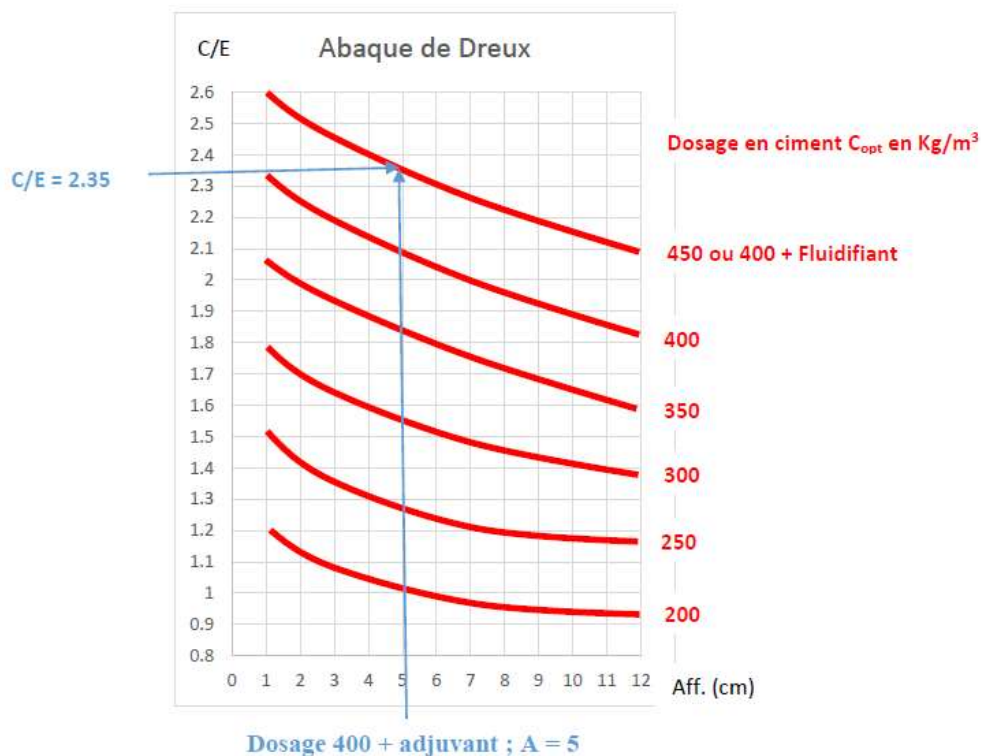


Figure 1 : Abaque de Dreux pour déterminer le dosage en ciment

Un adjuvant fluidifiant (superplastifiant) est ajouté à hauteur de 1 % de la masse du ciment. Dans cette étude, l'adjuvant utilisé est Optima 135, commercialisé par Salone Tanjombato, Antananarivo.



Photo 8 : Superplastifiant

2.3.5 Détermination de la quantité d'eau

La quantité d'eau E nécessaire à la confection du béton se calcule à partir des valeurs de C/E et de C.

$$E = \frac{C}{C/E} = 170L$$

2.3.5. Détermination de la courbe de référence

La courbe de référence est définie par trois points principaux :

- **Origine O** : l'abscisse correspond au module 20 et l'ordonnée est de 0 %.

$$O = [20; 0]$$

- **Sommet B** : l'abscisse correspond au module du diamètre maximal D_{max} , et l'ordonnée est de 100 %.

$$B = [\text{Mod}(D_{max}); 100] = [43; 100]$$

- **Point de brisure A** :

- **Abscisse** : pour $D \leq 20$ mm, l'abscisse correspond au module de $\frac{D_{max}}{2}$.

$$D_{max} = 16 \text{ mm} \Rightarrow X = \text{Module}(8) = 40$$

- **Ordonnée** : calculée en pourcentage de passants cumulés selon la relation :

$$Y = 50 - \sqrt{1,25 \cdot D_{max}} + (K + K_s + K_p)$$

Avec :

- $K = -2$
- $K_s = 6 \cdot M_f - 15$, où M_f est le module de finesse du sable.

$$K_s = (6 \times 2,4) - 15 = -0,6$$

- K_p : correction supplémentaire si le béton est pompable (+5 à +10 selon la plasticité). Ici, le béton n'étant pas pompable, $K_p = 0$.

En remplaçant les valeurs :

$$Y = 50 - \sqrt{1,25 \times 16} + (-2 - 0,6 + 0) = 43$$

Ainsi, le point de brisure est : **A = [40; 43]**

2.3.6. Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux

Pour déterminer les pourcentages en volumes absolus de granulats permettant la confection d'un mélange à minimum de vide, il est nécessaire de tracer comme indiqué sur la figure 2 ci-dessous, des droites reliant deux à deux les courbes granulométriques des matériaux du mélange.

Ces droites sont définies par

- 5 % de refus pour le matériau à faible granularité
- et par 5 % de passant pour le matériau à forte granularité.

L'intersection des droites ainsi tracées avec la droite brisée de Dreux permet, par prolongement sur l'axe des ordonnées, de déterminer les pourcentages en volumes absolus de chaque matériau. Ces pourcentages doivent permettre l'obtention d'un mélange dont la courbe granulométrique est proche de la droite brisée de Dreux.

Tableau 2 : Résultats des analyses granulométriques des Granulats

TAMIS	XMOD	GRAVILLON G	SABLE S
79,433	50	100	100
63,096	49	100	100
50,119	48	100	100
39,811	47	100	100
31,623	46	100	100
25,119	45	100	100
19,953	44	100	100
15,849	43	100	100
12,589	42	96	100
10,000	41	68	100
7,943	40	46	100
6,310	39	28	100
5,012	38	15	100
3,981	37	8	100
3,162	36	5	100
1,995	34	1	100
1,000	31	0	85,36
0,501	28	0	50,36
0,316	26	0	22,88
0,200	24	0	5,16
0,126	22	0	1,48
0,079	20	0	1

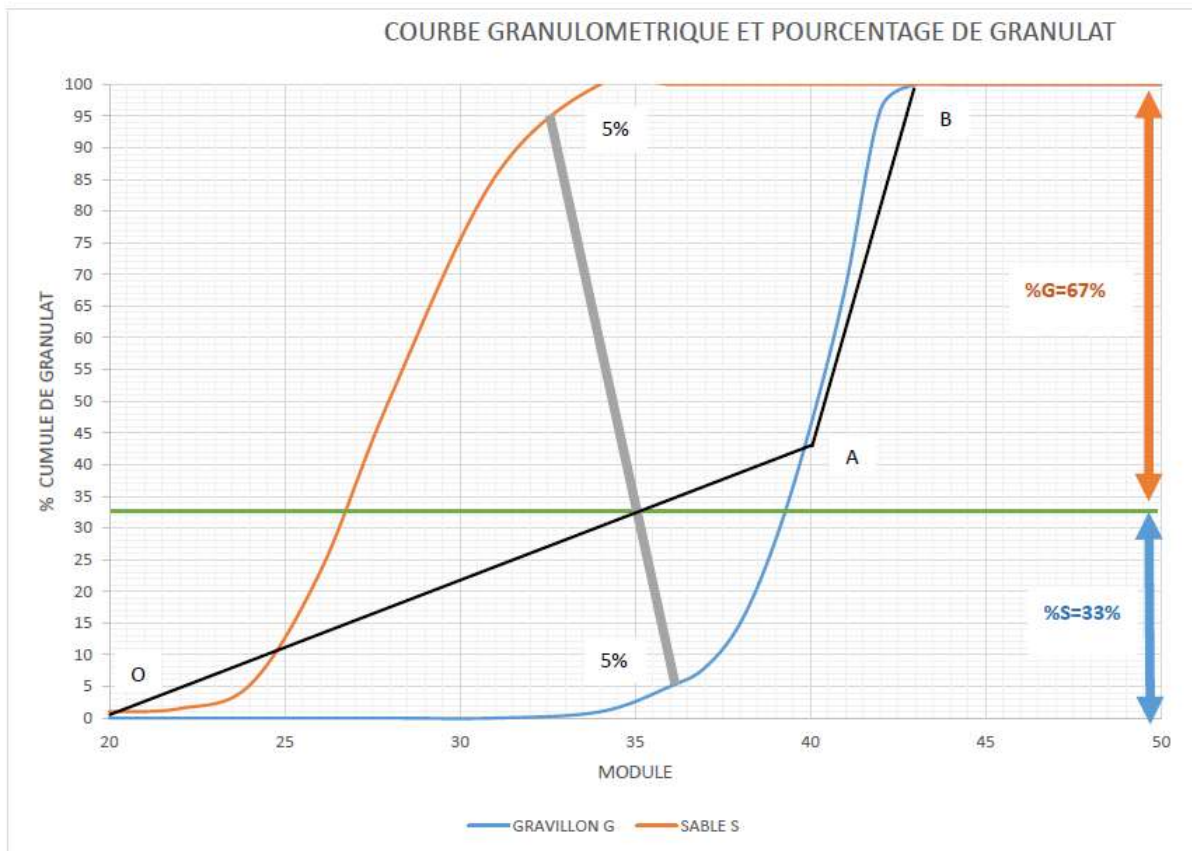


Figure 2 : Courbe Granulométrique et pourcentage des Granulats

2.3.7. Détermination de la compacité du béton

La compacité du béton est donnée par la relation :

$$c = c_0 + c_1 + c_2 + c_3$$

- $c_0 = 0,815$
- Pour un sable roulé et un gravier concassé : $c_1 = -0,01$
- Pour un dosage en ciment $Q = 400\text{kg/m}^3$ (au lieu de 350 kg/m^3), on obtient :

$$c_3 = \frac{400 - 350}{5000} = 0,01$$

- Pour des granulats légers : $c_2 = -0,03$

Ainsi, la compacité corrigée est :

$$c = 0,815 - 0,01 - 0,03 + 0,01 = 0,785$$

Le volume absolu des granulats est ensuite calculé par :

$$V = c - \frac{Q}{\rho_{\text{abs}}(C)}$$

En remplaçant les valeurs :

$$V = 785 - \frac{400}{3,04} = 653,42 \text{ L}$$

2.3.8. Détermination des masses de granulats

Connaissant le volume total absolu des granulats (V) et les pourcentages en volume absolu de sable (S%), de gravier (G %), on détermine les volumes et masses respectives :

$$V_s = V \times S\%; S = V \times S\% \times \rho_{\text{abs}}(S)$$

$$V_G = V \times G\%; G = V \times G\% \times \rho_{\text{abs}}(G)$$

En remplaçant les valeurs :

- Pour le sable : $S = 653,42 \times 0,33 \times 2,521 = 543 \text{ kg/m}^3$
- Pour le gravier : $G = 653,42 \times 0,67 \times 2,566 = 1123,4 \text{ kg/m}^3$

Les dosages retenus sont donc :

- Ciment : $Q = 400 \text{ kg/m}^3$
- Eau : $E = 170 \text{ L}$
- Sable : 543 kg/m^3
- Gravier : $1123,4 \text{ kg/m}^3$

III. L'ESSAI DU BETON

3.1. Quantité nécessaire pour une éprouvette

Pour la confection des éprouvettes, on utilise un moule cylindrique de 16 cm de diamètre (d_{cyl}) et de 32 cm de hauteur (h_{cyl}).

$$S_{\text{cyl}} = \pi (d_{\text{cyl}}/2)^2 = 20,11 \text{ cm}^2$$

$$V_{\text{cyl}} = h_{\text{cyl}} \times S_{\text{cyl}} = 6,44 \text{ L}$$

Avec une pondération de 1,2 donc $V_{\text{cyl}} \times 1,2 = 7,73 \text{ L}$

- Surface de la base du cylindre :

$$S_{\text{cyl}} = \pi \left(\frac{d_{\text{cyl}}}{2} \right)^2 = 20,11 \text{ cm}^2$$

- Volume du cylindre :

$$V_{\text{cyl}} = h_{\text{cyl}} \times S_{\text{cyl}} = 6,44 \text{ L}$$

En appliquant une pondération de 1,2 pour tenir compte des pertes et de la mise en œuvre :

$$V_{\text{cyl}} \times 1,2 = 7,73 \text{ L}$$

Pour 2 éprouvettes, on les quantités nécessaires sont :

$$S = 543 \times 7,73 \times 3 = 12,6 \text{ kg}$$

$$G = 1123,4 \times 7,73 \times 3 = 26,1 \text{ kg}$$

$$C = 400 * 7,73 * 3 = 9,3 \text{ kg}$$

$$E = 170 * 7,73 * 3 = 3,9 \text{ kg}$$

F (fluidifiant ou adjuvant) = ajouté à raison de 1% de la masse du ciment

A=Ajout d'Ardoise calciné exprimé en pourcentage de la masse du ciment.

3.2. Préparation du béton frais

Le béton est préparé en incorporant le schiste ardoisier calciné, utilisé comme ajout cimentaire. Le dosage de cet ajout varie de 5 % à 25 % du volume absolu du ciment, afin d'évaluer son influence sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton.

Tableau 3 : Quantité d'ardoise et du ciment pour ajout de béton de l'éprouvette

N	Echantillons	G en Kg	S en Kg	C en Kg	A en Kg	E en L	F en g
1	0	26,1	12,6	9,3	0	3,9	93
2	A5/700/2	26,1	12,6	8,8	0,5	3,9	93
3	A10/700/2	26,1	12,6	8,4	0,9	3,9	93
4	A15/700/2	26,1	12,6	7,9	1,4	3,9	93
5	A20/700/2	26,1	12,6	7,4	1,9	3,9	93
6	A25/700/2	26,1	12,6	7,0	2,3	3,9	93
7	A5/700/3	26,1	12,6	8,8	0,5	3,9	93
8	A10/700/3	26,1	12,6	8,4	0,9	3,9	93
9	A15/700/3	26,1	12,6	7,9	1,4	3,9	93
10	A20/700/3	26,1	12,6	7,4	1,9	3,9	93
11	A25/700/3	26,1	12,6	7,0	2,3	3,9	93
12	A5/725/2	26,1	12,6	8,8	0,5	3,9	93
13	A10/725/2	26,1	12,6	8,4	0,9	3,9	93
14	A15/725/2	26,1	12,6	7,9	1,4	3,9	93
15	A20/725/2	26,1	12,6	7,4	1,9	3,9	93
16	A25/725/2	26,1	12,6	7,0	2,3	3,9	93
17	A5/725/3	26,1	12,6	8,8	0,5	3,9	93
18	A10/725/3	26,1	12,6	8,4	0,9	3,9	93
19	A15/725/3	26,1	12,6	7,9	1,4	3,9	93
20	A20/725/3	26,1	12,6	7,4	1,9	3,9	93
21	A25/725/3	26,1	12,6	7,0	2,3	3,9	93
22	A5/750/2	26,1	12,6	8,8	0,5	3,9	93
23	A10/750/2	26,1	12,6	8,4	0,9	3,9	93
24	A15/750/2	26,1	12,6	7,9	1,4	3,9	93
25	A20/750/2	26,1	12,6	7,4	1,9	3,9	93
26	A25/750/2	26,1	12,6	7,0	2,3	3,9	93
27	A5/750/3	26,1	12,6	8,8	0,5	3,9	93
28	A10/750/3	26,1	12,6	8,4	0,9	3,9	93

29	A15/750/3	26,1	12,6	7,9	1,4	3,9	93
30	A20/750/3	26,1	12,6	7,4	1,9	3,9	93
31	A25/750/3	26,1	12,6	7,0	2,3	3,9	93

Notations : A%/T/t signifie que :

- A% : pourcentage d'ajout de poudre d'ardoise par rapport à la masse du ciment
- T : température de cuisson
- t : temps de cuisson

Exemple : A5/700/2 signifie que :

- 0,5 Kg : poudre d'ardoise ajoutée (soit 5 % de la masse du ciment),
- 700°C : température de cuisson
- 2h : temps de cuisson

Malaxage : Le malaxage consiste à mélanger les constituants du béton afin d'obtenir une gâchée bien homogène. Dans notre étude, le malaxage est réalisé à la bétonnière, puis le mélange est transvasé dans une brouette pour la mise en œuvre. L'opération de serrage est effectuée à l'aide d'un pervibrateur à vibration normale, garantissant une bonne compacité du béton frais.

Confection des éprouvettes : Les éprouvettes cylindriques confectionnées ont un diamètre de 16 cm (D_{cyl}) et une hauteur de 32 cm (H_{cyl}). Elles sont conservées dans une chambre froide à une température contrôlée de 20 ± 2 °C. Après 24 heures, les éprouvettes sont démoulées et préparées pour les essais mécaniques.



Photo 9 : (a) Bétonnière, (b) chambre froide pour la conservation des échantillons

3.3. Résistance à la compression

Un total de 18 éprouvettes cylindriques a été confectionné pour l'essai de compression, réparties selon trois âges de rupture : 7 jours, 14 jours et 28 jours.

3.3.1. Matériel utilisé

- Éprouvettes cylindriques de diamètre $d = 16$ cm et de hauteur $h = 32$ cm.
- Presse hydraulique de compression.

- Instruments de mesure pour l'enregistrement des forces maximales.

3.3.2. Principe de l'essai

Le béton est soumis à une force de compression croissante jusqu'à la rupture. La résistance en compression est calculée par la relation :

$$R_{cj} = \frac{F}{S}$$

Avec :

- F = force maximale supportée par l'éprouvette (en Newtons),
- S = section de l'éprouvette (en mm^2).

3.3.3. Calcul de la section

La section de l'éprouvette est donnée par : $S = \pi R^2$

Avec $R = \frac{d}{2} = 8 \text{ cm} = 80 \text{ mm}$, donc : $S = \pi \times (80)^2 = 20\,106 \text{ mm}^2$

3.3.4. Évaluation

Les résistances à la compression du béton sont déterminées aux âges de 7 jours, 14 jours et 28 jours, permettant d'analyser l'évolution des performances mécaniques en fonction du temps de cure.

On obtient : $R_{c28} = \frac{1093800}{\pi 80^2} = 54,4 \text{ MPa}$



Photo 10 : Matériels pour les tests à la compression et à la rupture

IV. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

4.1. Résistances à la compression pour les différentes formulations de béton avec poudre d'ardoise calcinée à 700°C pendant 2 heures

Tableau 4 : Résistances à la compression pour les différentes formulations de béton avec poudre d'ardoise calcinée à 700°C pendant 2 heures

Échantillons	Résistance à la compression (Rc en MPa)		
	7 jours	14 jours	28 jours
A0	30,2	38,2	46,4
A5/700/2	27,4	36,8	47,7
A10/700/2	24,6	34,7	48,3
A15/700/2	22,1	32,0	49,9
A20/700/2	20,5	30,6	48,2
A25/700/2	18,3	28,3	46,2

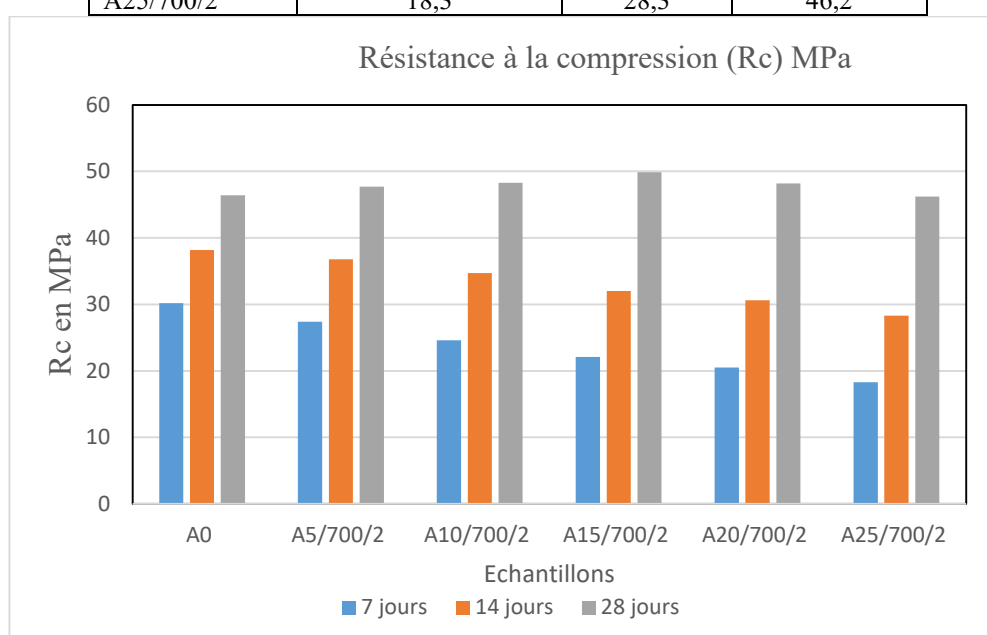


Figure 3 : Variation de la résistance à la compression des bétons en fonction des % d'ajouts de schiste calciné à 700°C pendant 2 heures

Les essais réalisés à 7, 14 et 28 jours mettent en évidence l'influence de l'ajout de poudre d'ardoise calcinée sur l'évolution de la résistance du béton.

Résistance à 7 jours

- On observe une décroissance régulière de la résistance avec l'augmentation du pourcentage d'ardoise.
- Cette baisse est attribuée à l'effet de dilution, dominant aux jeunes âges, en raison de la substitution partielle du ciment par l'ardoise.
- La perte est estimée à 2 à 3 MPa par palier de 5 % d'ajout.
-

Résistance à 14 jours

- Un rattrapage significatif est constaté pour les pourcentages modérés d'ajout (5 à 15 %).
- Ce phénomène traduit le début de la réaction pouzzolanique, qui contribue progressivement à la résistance mécanique.

Résistance à 28 jours

- La résistance atteint un optimum à 15 % de substitution, avec un gain de 3 à 5 % par rapport au béton témoin.
- La performance reste stable jusqu'à 20 % d'ajout, puis une décroissance est observée au-delà de ce seuil, traduisant une limite d'efficacité de la substitution.

4.2. Résistances à la compression pour les formulations avec poudre d'ardoise calcinée à 700°C pendant 3 heures

Tableau 5 : Résistances à la compression pour les différentes formulations de béton avec poudre d'ardoise calcinée à 700°C pendant 3 heures

Échantillons	Résistance à la compression (Rc en MPa)		
	7 jours	14 jours	28 jours
A0	30,2	38,2	46,4
A5/700/3	28,0	37,2	48,5
A10/700/3	25,7	35,4	50,6
A15/700/3	23,0	34,5	51,2
A20/700/3	21,3	32,3	50,2
A25/700/3	19,2	30,9	48,0

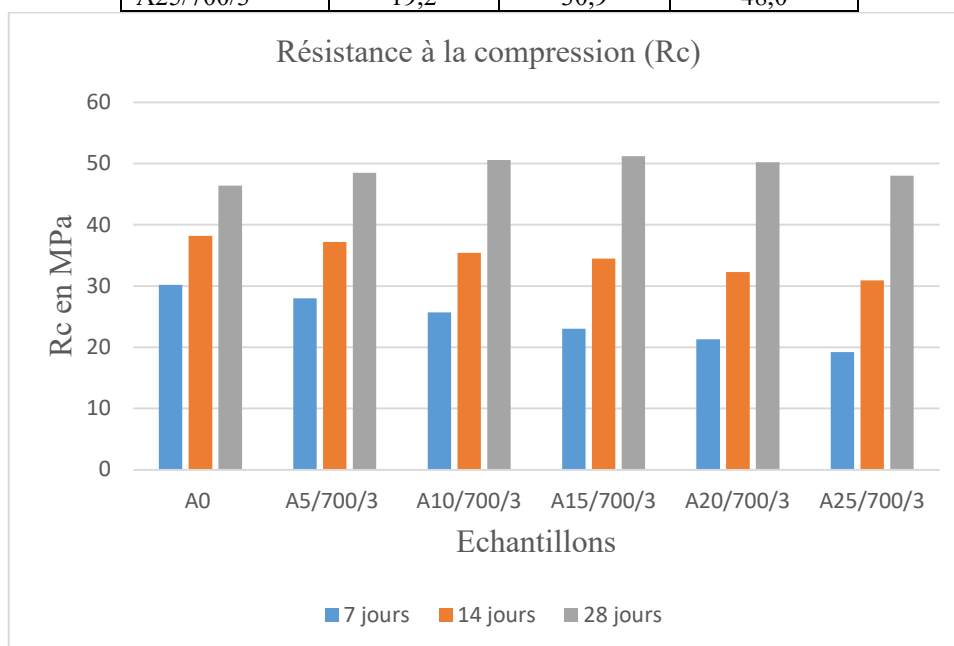


Figure 4 : Variation de la résistance à la compression des bétons en fonction des % d'ajouts de schiste calciné à 700°C pendant 3 heures

L'allongement du temps de calcination de 2h à 3h à 700 °C présente plusieurs effets bénéfiques sur le comportement du béton :

- Amélioration de la réactivité grâce au maintien prolongé, favorisant une activation plus complète des minéraux.

- Homogénéité accrue de la calcination, limitant les zones partiellement transformées.
- Réactivité pouzzolanique renforcée, permettant une meilleure interaction avec les hydrates de ciment.
- Développement plus régulier de la résistance mécanique, traduisant une cinétique de durcissement mieux équilibrée.
- Réduction de l'effet de dilution aux jeunes âges, grâce à une meilleure contribution de l'ardoise activée.
- Optimisation du potentiel à 28 jours, avec des résistances supérieures et une stabilité accrue par rapport au maintien de 2h.

4.3. Résistances à la compression pour les formulations avec poudre d'ardoise calcinée à 725°C pendant 2 heures

Tableau 6 : Résistances à la compression pour les différentes formulations de béton avec poudre d'ardoise calcinée à 725°C pendant 2 heures

Echantillons	Résistance à la compression (Rc en MPa)		
	7 jours	14 jours	28 jours
A0	30,2	38,2	46,4
A5/725/2	29,3	38,8	49,7
A10/725/2	27,2	37,3	51,6
A15/725/2	25,7	36,3	52,0
A20/725/2	23,9	34,60	51,2
A25/725/2	21,5	32,3	49,0

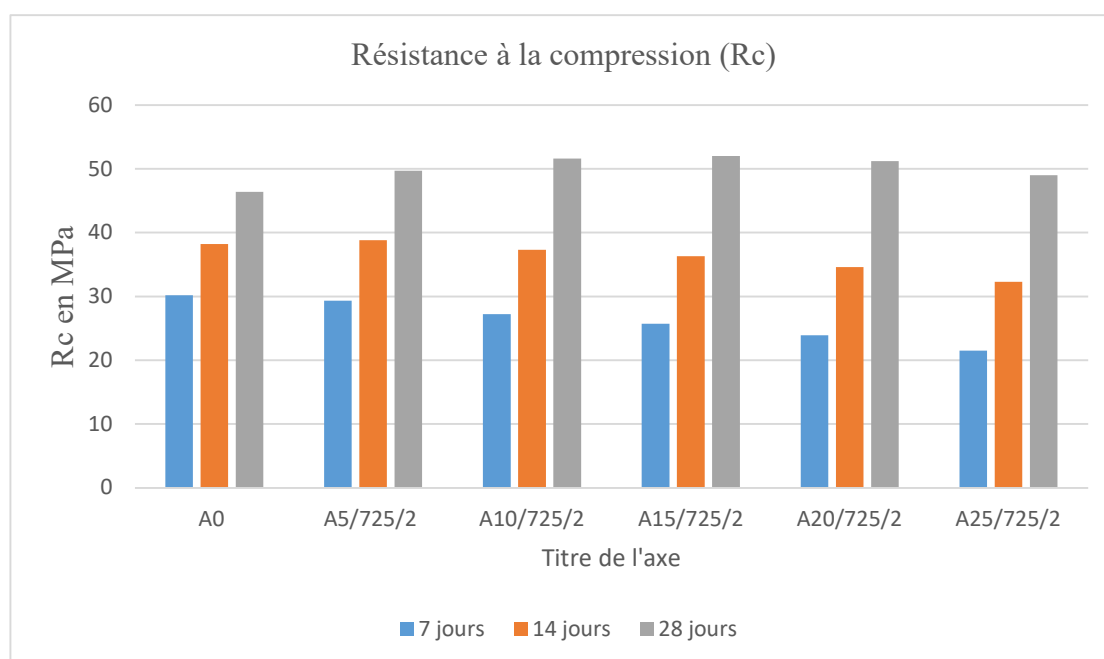


Figure 5 : Variation de la résistance à la compression des bétons en fonction des % d'ajouts de schiste calciné à 725°C pendant 2 heures

La calcination de l'ardoise pendant 2 heures à 725 °C présente des effets particulièrement favorables :

- Activation pouzzolanique excellente, cette température est idéale pour la métakaolinisation

- Équilibre optimal entre énergie et réactivité, garantissant une activation efficace sans excès de consommation énergétique.
- Performances supérieures à celles obtenues à 700 °C pour une durée équivalente, traduisant une meilleure cinétique de réaction.

Les analyses des résultats de la résistance à la compression de période de 7, 14 et 28 jours sont comme les suivantes :

Résistance à 7 Jours :

- Excellente rétention de la résistance pour faibles pourcentages d'ajout (5-10%)
- Perte limitée à seulement 1 à 3 MPa par rapport au témoin jusqu'à 15% de substitution
- Effet filler bénéfique compensant partiellement l'effet de la dilution et améliorant la compacité.

Résistance à 14 Jours

- Rattrapage complet de la résistance pour des ajouts entre 5 à 15%
- Réaction pouzzolanique bien engagée, contribuant activement au développement des hydrates.
- Transition rapide vers les hautes performances, confirmant l'efficacité de la calcination à 725°C.

Résistance à 28 Jours

- Transition rapide vers les hautes performances à 28 jours
- Pic de performance à 15% de substitution.
- Gain significatif de +6 MPa par rapport au béton témoin
- Efficacité maximale de l'ajout cimentaire, traduisant une synergie optimale entre l'ardoise calcinée et le ciment Portland.

4.4. Résistances à la compression pour les formulations avec poudre d'ardoise calcinée à 725°C pendant 3 heures

Tableau 7 : Résistances à la compression pour les différentes formulations de béton avec poudre d'ardoise calcinée à 725°C pendant 3 heures

Échantillons	Résistance à la compression Rc en MPa		
	7 jours	14 jours	28 jours
A0	30,2	38,2	46,4
A5/725/3	30,3	39,3	50,7
A10/725/3	28,0	38,4	53,6
A15/725/3	26,5	37,6	54,4
A20/725/3	24,6	35,6	53,0
A25/725/3	22,3	33,9	51,9

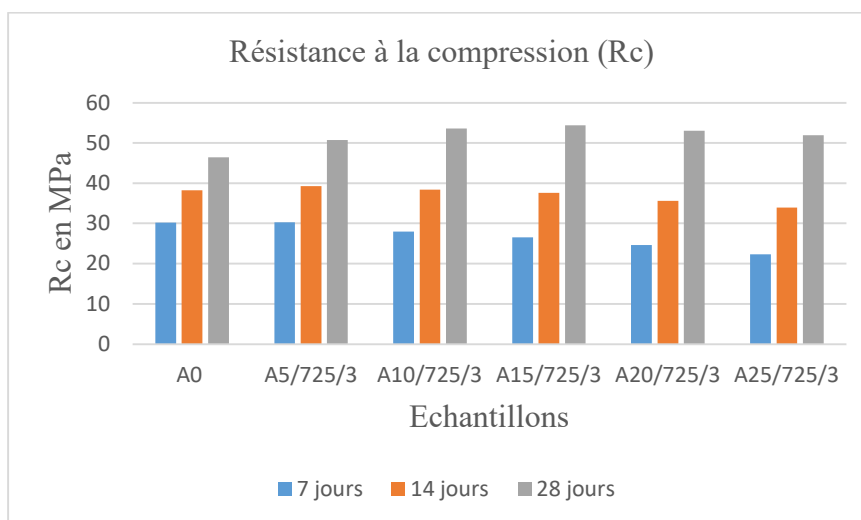


Figure 6 : Variation de la résistance à la compression des bétons en fonction des % d'ajouts de schiste calciné à 725°C pendant 3 heures

Les analyses des résultats de la résistance à la compression avec Calcination 3h à 725°C sont comme les suivantes :

- Activation pouzzolanique maximale, correspondant aux conditions idéales pour la métakaolinisation
- Homogénéité parfaite de la calcination, garantissant une transformation uniforme des particules.
- Performance ultime pour le développement des résistances mécaniques, traduisant une synergie optimale avec le ciment Portland.

Les Avantages de la Calcination 725°C/3h par rapport à 725°C/2h :

- +2 MPa supplémentaires à 28 jours
- Meilleure homogénéité de calcination, limitant les zones partiellement activées.
- Activation plus complète des particules, favorisant une meilleure réactivité pouzzolanique.

Les Avantages par rapport à 700°C/3h :

- +3 MPa à 28 jours, confirmant l'efficacité supérieure de la température de 725 °C.
- Réactivité pouzzolanique améliorée, traduisant une meilleure cinétique de réaction.
- Développement de résistance plus rapide, permettant d'atteindre plus tôt des performances élevées.

4.5. Résistances à la compression pour les formulations avec poudre d'ardoise calcinée à 750°C pendant 2 heures

Tableau 8 : Résistances à la compression pour les différentes formulations de béton avec poudre d'ardoise calcinée à 750°C pendant 2 heures

Échantillons	Résistance à la compression (Rc en MPa)		
	7 jours	14 jours	28 jours
A0	30,2	38,2	46,4
A5/750/2	29,1	39,0	50,9
A10/750/2	27,0	38,5	52,2
A15/750/2	25,3	37,1	53,9

A20/750/2	23,5	35,6	52,2
A25/750/2	21,3	33,9	50,9

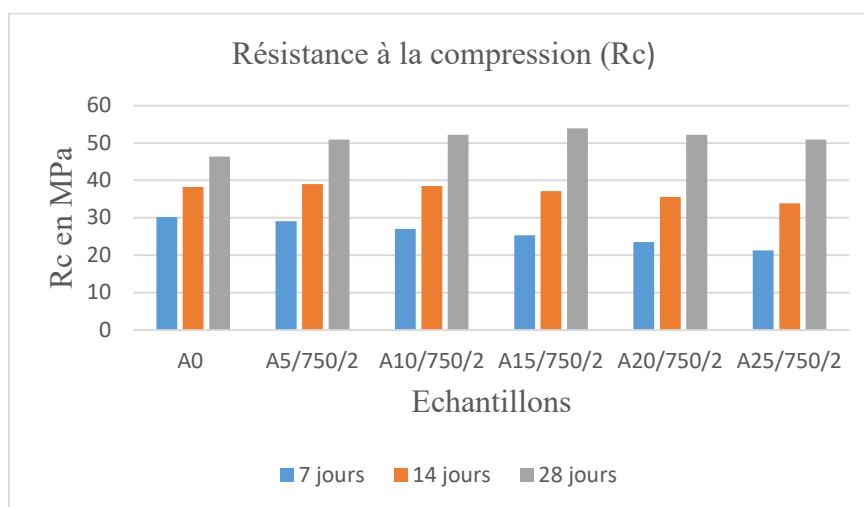


Figure 7 : Variation de la résistance à la compression des bétons en fonction des % d'ajouts de schiste calciné à 750°C pendant 2 heures

Les analyses des résultats de la résistance à la compression avec Calcination 2h à 750°C sont comme les suivantes :

- Impact de la Température Élevée (750°C)

- Activation pouzzolanique très avancée, favorisant une forte réactivité.
- Déshydroxylation complète des minéraux argileux, optimisant la transformation en phases actives.
- Développement rapide des résistances mécaniques, traduisant une cinétique accélérée de durcissement.

-Évolution des Résistances à la compression de 7, 14, 28 jours

- Résistance à 7 Jours
 - Très bonne rétention pour faibles pourcentages (5-10%)
 - Perte modérée de 2 à 5 MPa vs témoin selon pourcentage
 - Effet filler bénéfique mais début de recristallisation possible
- Résistance à 14 Jours
 - Rattrapage complet dès 14 jours pour 5 à 15% d'ajout
 - Réaction pouzzolanique très active
 - Dépassement du béton témoin pour 5 à 10% d'ajout
- Résistance à 28 Jours
 - Pic de performance à 15%
 - Gain significatif de +7 MPa par rapport au béton témoin

- Les Risques sont :

- Début de recristallisation possible à partir de 750°C, pouvant réduire l'efficacité pouzzolanique.
- Consommation énergétique plus élevée, liée à la température importante.
- Perte partielle d'amorphisme, susceptible de limiter la réactivité à long terme.

- Risques associés à la calcination à 750 °C

- Début de recristallisation possible, pouvant réduire l'efficacité pouzzolanique.
- Consommation énergétique plus élevée, liée à la température importante.
- Perte partielle d'amorphisme, susceptible de limiter la réactivité à long terme.

4.6. Résistances à la compression pour les formulations avec poudre d'ardoise calcinée à 750°C pendant 3 heures

Tableau 9 : Résistances à la compression pour les différentes formulations de béton avec poudre d'ardoise calcinée à 750°C pendant 3 heures

Échantillons	Résistance à la compression (Rc en MPa)		
	7 jours	14 jours	28 jours
A0	30,2	38,2	46,4
A5/750/3	29,3	39,3	51,6
A10/750/3	27,5	38,9	54,7
A15/750/3	25,6	37,1	55,1
A20/750/3	23,7	35,2	54,7
A25/750/3	21,9	33,3	52,0

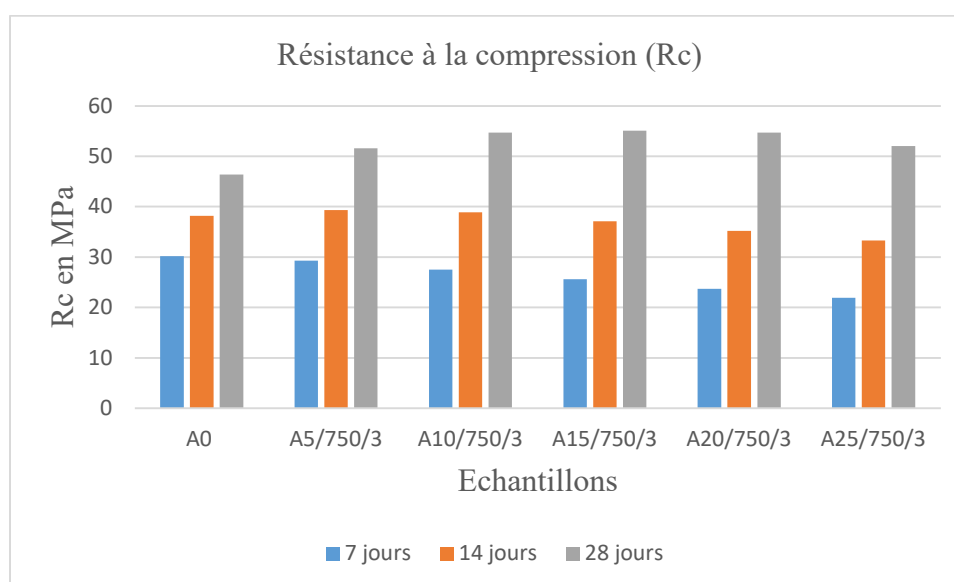


Figure 8 : Variation de la résistance à la compression des bétons en fonction des% d'ajouts de schiste calciné à 750°C pendant 3 heures

Les analyses des résultats de la résistance à la compression avec Calcination 3h à 750°C sont comme les suivantes :

-Impact de la Combinaison Haute Température et Longue Durée

- Activation pouzzolanique maximale mais avec un risque de sur-calcination
- Transformation minéralogique complète, assurant une activation totale des phases argileuses
- Performances exceptionnelles mais stabilité à long terme à surveiller

-Les Risques de Sur-calcination sont :

- Début de recristallisation des phases amorphes
- Formation de spinelle ou mulite (silicate d'alumine)
- Perte de réactivité pouzzolanique à long terme
- Risque de retrait accru

-Les Surveillances Requises sont :

- Analyse DRX pour détecter la recristallisation
- Mesure de l'activité pouzzolanique
- Suivi du retrait à long terme

V. DISCUSSIONS

5.1. Analyse générale sur l'étude de l'ardoise calcinée comme ajout cimentaire

Tableau 10 : Récapitulatif des Performances Optimales

Échantillons	Résistance à la compression (Rc en MPa)		
	7 jours	14 jours	28 jours
A0	30,2	38,2	46,4
A15/700/2	22,1	32,0	49,9
A15/700/3	23,0	34,5	51,2
A15/725/2	25,7	36,3	52,0
A15/725/3	26,5	37,6	54,4
A15/750/2	25,3	37,1	53,9
A15/750/3	25,6	37,9	55,1

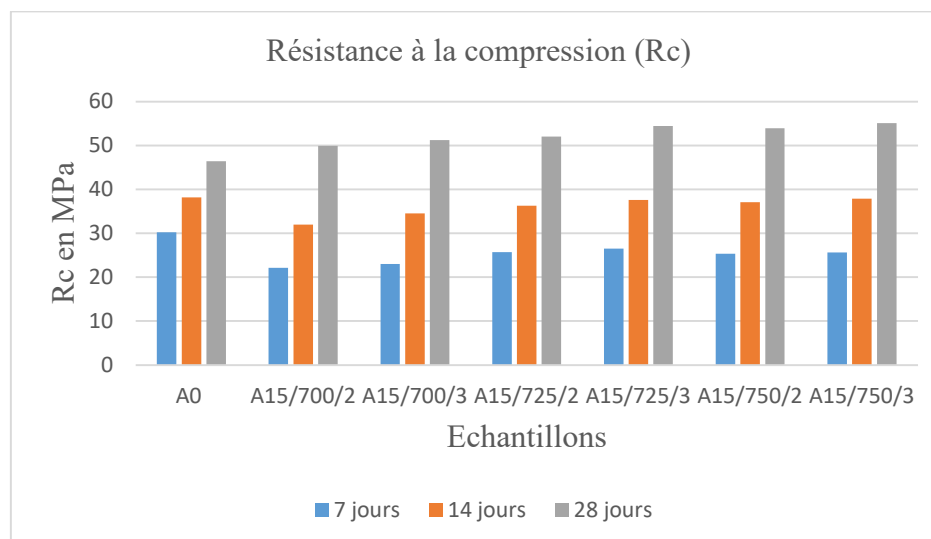


Figure 9 : Valeurs récapitulatifs des Performances mécaniques Optimales

- Échantillon témoin (A0)

- 7 jours : 30,2 MPa

- 14 jours : 38,2 MPa
- 28 jours : 46,4 MPa

Le béton témoin (sans ajout d'ardoise) présente une évolution classique de la résistance, servant de référence pour comparer les mélanges avec substitution.

- Effet de la calcination à 700 °C sur les résistances Rc (MPa)

- A15/700/2 : Résistance initiale faible (22,1 MPa à 7 jours), mais rattrapage à 28 jours (49,9 MPa, supérieur au témoin).
- A15/700/3 : L'allongement du temps de calcination améliore la réactivité (23,0 MPa à 7 jours, 51,2 MPa à 28 jours).

À 700 °C, la pouzzolanité est activée progressivement, avec un gain net à long terme (+4,8 MPa à 28 jours vs témoin).

- Effet de la calcination à 725 °C sur les résistances Rc (MPa)

- A15/725/2 : Meilleure rétention à jeune âge (25,7 MPa à 7 jours), rattrapage rapide et gain à 28 jours (52,0 MPa).
- A15/725/3 : Performances optimales : 26,5 MPa à 7 jours, 37,6 MPa à 14 jours, et 54,4 MPa à 28 jours (+8 MPa vs témoin).

La température de 725 °C est idéale pour la métakaolinisation : équilibre entre activation et stabilité, avec un optimum à 3h.

- Effet de la calcination à 750 °C sur les résistances Rc (MPa)

- A15/750/2 : Résistance correcte à 7 jours (25,3 MPa), rattrapage complet à 14 jours, et 53,9 MPa à 28 jours.
- A15/750/3 : Résistance légèrement supérieure (25,6 MPa à 7 jours, 55,1 MPa à 28 jours, soit le meilleur résultat global).

À 750 °C, la réactivité est très élevée, mais le risque de sur-calcination existe. Malgré cela, les performances mécaniques sont maximales (+8,7 MPa vs témoin à 28 jours).

- Synthèse comparative

- À 7 jours : Tous les mélanges avec ardoise présentent une résistance plus faible que le témoin (effet de dilution), mais la perte est limitée à 725–750 °C.
- À 14 jours : Les mélanges calcinés montrent un rattrapage rapide, dépassant parfois le témoin (surtout à 725 °C et 750 °C).
- À 28 jours : Tous les mélanges avec ardoise surpassent le témoin. L'optimum est atteint avec A15/750/3 (55,1 MPa) et A15/725/3 (54,4 MPa).
- La substitution de 15 % d'ardoise calcinée améliore nettement la résistance à long terme.
- 725 °C / 3h et 750 °C / 3h offrent les meilleures performances, avec des gains de +8 à +9 MPa par rapport au témoin.
- Le compromis idéal entre performance et durabilité se situe à 725 °C / 3h, tandis que 750 °C / 3h maximise la résistance mais nécessite une surveillance du risque de sur-calcination.

5.2. Analyses des performances et des risques

Tableau 11 : Tableau comparatif des performances et risques selon la calcination de l'ardoise

T° (°C) / Durée (h)	Activation pouzzolanique	Rc à 7 j MPa	Rc à 14 j MPa	Rc à 28 j MPa	Gains vs témoin
700 °C / 2h	Bonne activation, mais partielle	Décroissance régulière (-2 à -3 MPa / palier 5 %)	Rattrapage modéré	Optimum à 15 % (+3 à 5 %)	+3 à 5 %
700 °C / 3h	Réactivité améliorée, Homogénéité accrue	Perte réduite	Développement régulier	+2 MPa vs 2h	+2 MPa
725 °C / 2h	Activation excellente, métakaolinisation idéale	Perte limitée (-1 à -3 MPa)	Rattrapage complet (5-15 %)	Pic à 15 % (+6 MPa)	+6 MPa
725 °C / 3h	Activation maximale, Homogénéité parfaite	Très bonne rétention	Développement régulier	Pic à 15 % (+2 MPa vs 2h, +3 MPa vs 700 °C/3h)	+2 à +3 MPa
750 °C / 2h	Activation très avancée, Déshydroxylation complète	Bonne rétention (5-10 %), perte modérée (-2 à -5 MPa)	Dépassement du témoin (5-10 %)	Pic à 15 % (+7 MPa)	+7 MPa
750 °C / 3h	Activation maximale mais sur-calcination	Rétention correcte	Performances élevées	Exceptionnelles mais stabilité à surveiller	+7 à +8 MPa

Tableau 12 : Tableau comparatif risques selon la calcination de l'ardoise

Température / Durée	Risques principaux
700 °C / 2h	Dilution dominante aux jeunes âges
700 °C / 3h	Risque limité de recristallisation
725 °C / 2h	Aucun risque majeur identifié
725 °C / 3h	Sur-calcination possible, recristallisation amorphe
750 °C / 2h	Début de recristallisation, consommation énergétique élevée
750 °C / 3h	Formation de spinelle/mullite, perte d'amorphisme, retrait accru

Selon les analyses des données obtenues, nous pouvons avancer des discussions sur les optimums techniques et les performances mécaniques suivantes :

- Optimum technique : calcination à 725 °C / 2h ou 3h, offrant le meilleur compromis entre performance, homogénéité et durabilité.
- Performances maximales : obtenues à 750 °C, mais avec des risques de recristallisation et de perte de réactivité à long terme.
- 700 °C reste efficace, mais légèrement inférieur en termes de gain de résistance comparé aux températures plus élevées.

5.2.1. Influence de la Température de Calcination

A la température 700°C, on a une activation modérée :

- avantages : sécurité de traitement, faible risque de sur-calcination
- inconvénients : activation pouzzolanique plus lente
- applications : bétons courants, préfabrication

A la température 725°C, on a une zone optimale :

- équilibre parfait entre activation et stabilité
- performance et reproductibilité excellentes
- recommandation générale pour BHP

A la température 750°C, on a une haute performance

- résistances maximales obtenues
- risque de recristallisation à surveiller
- réservé aux applications sous contrôle strict

5.2.2. Influence de la durée de calcination

Pendant de 2 heures de calcination, économiquement parlant :

- suffisant pour activation correcte
- productivité élevée
- compromis performance et énergie favorable

Pendant 3 heures de temps de calcination, excellence technique :

- activation complète et homogène
- performances supérieures systématiques
- recommandé pour applications critiques

5.2.3. Influence du pourcentage d'ajout

La tendance générale observée est :

- 5-10% : bon compromis résistance précoce/ultime
- 15% : point optimal pour toutes les configurations
- 20-25% : résistance 28j maintenue mais chute à jeune âge

Le protocole recommandé pour les applications structurales (optimal) est à température 725°C, d'une durée de calcination de 3 heures et de pourcentage 15% d'ajout de poudre d'ardoise par rapport au ciment.

Pour production industrielle (économique) est à température 725°C, d'une durée de calcination de 2 heures et de pourcentage 15% d'ajout de poudre d'ardoise par rapport au ciment.

VI. CONCLUSION

Cette recherche a démontré, par une approche expérimentale rigoureuse, le potentiel de la poudre d'ardoise calcinée comme ajout cimentaire performant et durable pour la formulation de Bétons à Haute Performance (BHP).

La substitution de 15% du ciment CEM I 52,5 N par de la poudre d'ardoise calcinée à 725°C pendant 3 heures conduit à un béton présentant une résistance à la compression à 28 jours de 54,4 MPa, soit un gain significatif de +14% par rapport au béton témoin sans ajout.

L'analyse de la cinétique de développement des résistances révèle un mécanisme en deux temps :

- une légère baisse initiale à 7 jours, attribuable à l'effet de dilution du ciment,

- un rattrapage complet dès 14 jours par le développement de la réaction pouzzolanique. Cette réaction, en consommant la portlandite pour former des C-S-H supplémentaires, densifie la microstructure et renforce la zone de transition pâte-granulats, expliquant le gain de performance à moyen et long terme.

D'un point de vue pratique et environnemental, cette recherche ouvre des perspectives concrètes pour une construction plus durable. L'incorporation de 15% d'ardoise calcinée permet de

- réduire la proportion de clinker dans le béton, diminuant ainsi son empreinte carbone
- et de valoriser un déchet industriel local (l'ardoise), dans une logique d'économie circulaire.

Ainsi, cette étude démontre que l'ardoise calcinée constitue une **solution innovante et durable** pour améliorer les performances mécaniques des bétons tout en répondant aux enjeux environnementaux contemporains.

REFERENCES

- [1] Dalila BENAMARA « Formulation et étude d'un béton à haute performance (BHP) » 13 /11/2011,160 pages
- [2] Zile-Marie Durosier, Richard Bonneville : « Le ciment - les mortiers et les bétons », Mai 1998, 33pages
- [3] Djezzar M., Ezziane K, Kadri A « Evaluation pratique de la compatibilité ciment -super plastifiant dans les BHP ». Proceedings du 1er Colloque Maghrebin en Génie Civil, 1998, 272 pages
- [4] Aïtcin P.C. «Bétons haute performance», Edition, Eyrolles, Paris, 2001.
- [5] Chaid R., Jauberthie R et Boukhaled A. «Effet de l'ajout calcaire sur la durabilité des bétons » Lebanese Science Journal, Vol. 11, No. 1, 2020.
- [6] Documentation Technique : Ardoises Dolmen et Bravan, Juin 2011, 24 pages
- [7] "Standard test method for bulk density (unit weight) and voids in aggregates." C29/C29M-09, West Conshohocken, PA. 189p, 2017
- [8] Addis B-J. And Alexandre M-G., « A method of proportioning trial mixes for high strength concrete », In: Second International Symposium on high strength concrete, 321 pages, Detroit: ACI 2020
- [9] Hardened properties of self-compacting concrete: A statistical approach." Constr. Build. Mater. 24p, 2016
- [10] Agullo, L., Toralles-Carbonari, B., Gettu, R., and Aguado, A. "Fluidity of cement" 20p, 2020.