

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO)
Faculté du Génie de la Construction
Département de Génie Civil



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

**En vue de l'obtention du diplôme de
master de l'université Mouloud Mammeri
de Tizi-Ouzou**

Filière : Génie Civil

Spécialité : Structures

Thème

**Comportement des bétons drainants sous
*hautes températures***

Présenté par :

M^r Krim Ahmed

Devant le jury composé de :

Mr A. SADAOUI

Professeur à l'UMMTO

Président.

Mme F. IGUETOULENE

Maitre-assistante à l'UMMTO

Examinatrice.

Mme O. FEDAOUI-AKMOUSSI

Maitre de conférences à l'UMMTO

Encadrante.

Promotion : 2024/2025

Soutenu le : 07/07/2025

REMERCIEMENTS

Avant tout, je rends grâce à Dieu, le Tout-Puissant, pour nous avoir accordé le savoir, la volonté et surtout la patience nécessaire à la réalisation de ce travail.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui m'ont soutenu et accompagné tout au long de ce projet. Je tiens à adresser mes remerciements les plus sincères à ma promotrice, Mme O. FEDAOUI-AKMOUSSI, pour sa disponibilité constante, ses précieuses orientations, son savoir, ses conseils éclairés et son soutien indéfectible durant toute la période d'élaboration de ce mémoire.

Mes remerciements vont également à Mme F. AMIAR pour leurs conseils, leurs orientations et leur disponibilité.

Je remercie vivement les membres du jury pour l'attention qu'ils ont portée à ce travail en acceptant de l'évaluer et de l'enrichir par leurs remarques et suggestions constructives.

Je tiens également à remercier les responsables et le personnel du laboratoire de Génie Civil de l'Université Mouloud MAMMARI de Tizi Ouzou, en particulier Mr. R. BOUHRAOUA, Mme F. MEDJBAR et Mme F. IGUETOULENE, sans oublier le technicien du laboratoire de génie mécanique pour leurs aides et leurs encouragements dans la réalisation de la partie expérimentale de ce travail.

Ma reconnaissance s'étend à mes parents, mes sœurs, mes amis, ainsi qu'à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce projet de fin d'études.

Je suis fier du travail accompli et profondément reconnaissant envers tous ceux qui ont contribué à son aboutissement.

SOMMAIRE

Table des matières

Chapitre I : LE BETON DRAINANT.....	3
1.1 Introduction	4
1.2 Composition du béton drainant	4
1.2.1 Ciment.....	5
1.2.2 Ajouts cimentaires.....	6
1.2.3 Granulats	6
1.3 Propriétés du béton drainant	7
1.3.1 La résistance à la compression	8
1.3.2 La résistance à la flexion	9
1.3.3 La masse volumique	9
1.3.4 Porosité et perméabilité	10
1.3.5 Durabilité face aux cycles gel-dégel	11
1.3.6 Le retrait.....	11
1.3.7 Rhéologie et pompabilité.....	11
1.4 Domaines d’application du béton drainant	11
1.5 Mise en place.....	13
1.5.1 Préparation de sol	13
1.5.2 Pose des joints de dilatation.....	13
1.5.3 Etalage du béton drainant	14
1.5.4 Fin du chantier.....	14
1.6 Les avantages du béton drainant	15
1.6.1 Avantages sécuritaires	15
1.6.2 Avantages économiques	15
1.6.3 Avantages écologiques	15
1.7 Inconvénients du béton drainant	16
1.8 Conclusion.....	16
Chapitre II : BETON SOUS HAUTE TEMPERATURE.....	17
II.1 Introduction.....	18
II.2 Différentes formes d’endommagement thermique	18
II.2.1 Paramètres et phénomènes favorisant l’instabilité thermique du béton.....	21
II.2.2 Comportement du béton à la haute température	24

II.3 Evolution des Propriétés physiques et mécaniques.....	26
II.3.1 Evolution des propriétés physiques	26
II.3.2 Evolution des Propriétés mécaniques.....	27
II.4 Béton drainant sous haute température.....	29
II.4.1 Instabilité thermique	29
II.4.2 Perte de masse	29
II.4.3 Porosité.....	30
II.4.4 Résistance en compression	31
II.4.5 Résistance en traction par flexion	32
II.5 Conclusion	33
Chapitre III : MATERIAUX ET METHODES	34
III.1 Introduction.....	35
III.2 Les matériaux utilisés.....	35
III.2.1 Le ciment.....	35
III.2.2 L'eau de gâchage.....	36
III.2.3 Le sable	37
III.2.4 Le gravier	37
III.2.5 La vase	38
III.2.6 Adjuvant.....	40
III.3 Analyse granulométrique	40
III.4 Module de finesse	42
III.5 Masse volumique absolue et apparente	43
III.5.1 Masse volumique apparente	43
III.5.2 Masse volumique absolue.....	44
III.6 Equivalent du sable	46
III.6.1 Principe de l'essai.....	46
III.6.2 Equipement nécessaire.....	46
III.6.3 Mode opératoire	47
III.7 Formulation des bétons	48
III.7.1 Préparation des compositions	48
III.7.2 Les moules utilisées.....	49
III.7.3 Confection du béton.....	50
III.8 Essai sur le béton frais	51
III.8.1 Essai d'affaissement au cône d'Abrams [NF EN 12350-2].....	51

III.9 Essai sur le béton durci	52
III.9.1 Essais de cycles chauffage – refroidissement.....	52
III.9.2 Essai ultrason [NF EN 12504-4].....	54
III.9.3 Essai de compression [NF P 18-406]	55
III.9.4 Essai de traction par flexion trois points [NF P 18-407].....	56
III.10 Conclusion	57
Chapitre IV : RESULTATS ET INTERPRETATIONS	58
IV.1 Introduction.....	59
IV.2 Formulation des bétons	59
IV.3 Essai d’affaissement au cône d’Abrams	60
IV.4 La perte de masse.....	60
IV.5 Essai de compression NF P 18-406.....	62
IV.6 Essai de traction par flexion trois points NF P 18-407	65
IV.7 Essai ultrasonique NF EN 12504-4.....	68
IV-8 Conclusion	70
Bibliographie	75

Liste des figures

Figure I-1 : Texture du béton drainant utilisé dans les parkings [1].....	5
Figure I-2 : Échantillon de ciment portland.....	5
Figure I-3 : Gravier (3/8).....	6
Figure I-4 : Sable (0/3).....	6
Figure I-5 : Relation entre la résistance à la compression et le volume des vides [1].....	8
Figure I-6 : Résistance en compression en fonction de la taille des agrégats [10].....	8
Figure I-7 : Résistance à la flexion : a) Flexion en fonction de la compression ; b) Flexion en fonction de la contenance d'air (volume des vides) [1].....	9
Figure I-8 : Variation de la masse volumique en fonction du rapport E/C [1].....	9
Figure I-9 : Variation de la perméabilité en fonction de la taille des granulats [10].....	10
Figure I-10 : Variation du taux d'infiltration en fonction du volume des vides [1].....	10
Figure I-11 : Parking en béton drainant [3].....	12
Figure I-12 : Plage de piscine en béton drainant [13].....	12
Figure I-13 : Préparation du sol [14].....	13
Figure I-14 : Pose des joints de dilatation [14].....	13
Figure I-15 : Etalage du béton drainant [14].....	14
Figure I-16 : Damage du béton drainant [14].....	14
Figure II-1 : Dégradations d'ouvrages en béton à la suite d'incendie [15].....	19
Figure II-2 : Eclatement d'un poteau durant l'essai au feu [12].....	19
Figure II-3 : Etat de surface et fissures des bétons avec différents températures [16].....	20
Figure II-4 : Ecaillage lors de l'incendie du tunnel mont blanc [12].....	20
Figure II-5 : Pressions internes dans le béton en fonction de la teneur en eau libre et températures d'apparition des pics de pression [17].....	22
Figure II-6 : Illustration du caractère instable des granulats de silex comparés aux granulats calcaires [24].....	23
Figure II-7 : Résistance en compression à chaud de béton à différentes températures [17].....	27
Figure II-8 : Evolution de la résistance résiduelle relative à la traction des BO et BHP [30].....	28
Figure II-9 : Schéma comparatif de la diffusion de chaleur dans un béton ordinaire vs un béton drainant (avec flèches illustrant la propagation de la chaleur) [32].....	29
Figure II-10 : Courbe typique de perte de masse d'un béton drainant en fonction de la température (thermogravimétrie) [33].....	30
Figure II-11 : illustration montrant l'évolution de la structure poreuse avec l'augmentation de température [34].....	30
Figure II-12 : Graphique montrant la diminution de la résistance en compression en fonction de la température pour différents types de béton (ordinaire vs drainant) [35].....	31
Figure II-13 :Graphique de la résistance en traction par flexion en fonction de la température pour différents types de béton (ordinaire vs drainant) [35].....	32
Figure III-1 : Le ciment.....	35
Figure III-2 :L'eau de gâchage.....	37
Figure III-3 : Un échantillon du sable (0/3).....	37
Figure III-4 : Un échantillon du gravier (3/8) utilisé.....	38
Figure III-5 : L'étuve utilisée pour le séchage des granulats.....	38
Figure III-6 : La vase utilisée.....	39

Figure III-7 : Sikaplast 40 Pro.....	40
Figure III-8 : La tamiseuse utilisée.....	41
Figure III-9 : Courbes granulométriques du sable (0/3) et du gravier (3/8)	42
Figure III-10 : Mesure de la masse volumique apparente du sable et gravier	44
Figure III-11 : Méthode de mesure de la masse volumique absolue.....	45
Figure III-12 : Schéma explicatif d'équivalent de sable.....	46
Figure III-13 : Etapes de l'essai d'équivalent de sable.....	48
Figure III-14 : Préparation des pesées pour la confection des bétons étudiés	49
Figure III-15 : Les moules utilisés	49
Figure III-16 : Les différentes étapes de fabrication et conservation des éprouvettes	51
Figure III-17 : Les étapes de l'essai au cône d'Abrams	52
Figure III-18 : Cycles de chauffage-refroidissement imposés aux éprouvettes	53
Figure III-19 : Disposition des éprouvettes à l'intérieur du four.....	53
Figure III-20 : Mesures en Transparence (Directe)	54
Figure III-21 : Mesures semi directe	54
Figure III-22 : Mesures en surface (indirecte).....	54
Figure III-23 : Appareil PUNDIT pour mesure de la vitesse de propagation des ondes	55
Figure III-24 : Dispositif expérimental pour l'essai de compression.....	56
Figure III-25 : Dispositif expérimental pour l'essai de traction par flexion 3 points	56
Figure IV-1 : Perte de masse des éprouvettes cylindriques	61
Figure IV-2 : Perte de masse des éprouvettes prismatiques	61
Figure IV-3 : Résistance à la compression du béton témoin (BT) pour les différentes températures étudiées	62
Figure IV-4 : Résistance à la compression du béton (B5V) pour les différentes températures étudiées.	63
Figure IV-5 : Résistance à la compression du béton (B10V) pour les différentes températures étudiées.	63
Figure IV-6 : Résistance à la compression du béton (B15V) pour les différentes températures étudiées.	64
Figure IV-7 : Aspect des éprouvettes cylindriques après rupture	65
Figure IV-8 : Résistance à la flexion du béton témoin (BT) pour les différentes températures étudiées.	65
Figure IV-9 : Résistance à la flexion du béton (B5V) pour les différentes températures étudiées	66
Figure IV-10 : Résistance à la flexion du béton (B10V) pour les différentes températures étudiées	66
Figure IV-11 : Résistance à la flexion du béton (B15V) pour les différentes températures étudiées	67
Figure IV-12 : Aspect des éprouvettes prismatiques après rupture.....	68
Figure IV-13 : Vitesse de propagation des ondes ultrasonores à travers les éprouvettes cylindriques.	68
Figure IV-14 : Corrélations linéaires entre le pourcentage de vase et la vitesse de propagation des ondes ultrasonores	69
Figure IV-15 : Corrélations linéaires entre la résistance à la compression et la vitesse de propagation des ondes ultrasonores.....	70

Liste des tableaux

Tableau III-1 : Caractéristiques techniques [36].	36
Tableau III-2 : Composition chimique de la vase de barrage.	39
Tableau III-3 : Analyse granulométrique du sable (0/3).	41
Tableau III-4 : Analyse granulométrique du gravier (3/8).	41
Tableau III-5 : Masses volumiques absolue et apparente des granulats.	45
Tableau III-6 : les valeurs d'équivalent de sable indiquent la nature et la qualité du sable.	47
Tableau III-7 : Consistance du béton à partir de l'affaissement.	52
Tableau IV-1 : Affaissement des différents bétons.	60

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Le béton drainant, ou béton perméable, est un matériau innovant conçu pour favoriser l'infiltration de l'eau. Il se distingue par une structure poreuse composée de vides interconnectés, permettant une circulation efficace des eaux pluviales et de ruissellement. Cette caractéristique en fait une solution pertinente face aux problèmes d'imperméabilisation des surfaces urbaines.

La porosité de ce type de béton se situe généralement entre 15 % et 35 % de son volume, ce qui lui confère une capacité d'infiltration élevée, pouvant atteindre entre 85 et 730 litres d'eau par minute et par mètre carré, avec une moyenne autour de 200 L/min/m². Cette performance hydraulique repose sur une formulation spécifique, incluant des granulats de grande taille, une faible teneur en ciment, une quantité maîtrisée d'eau, et souvent l'élimination totale ou partielle des fines (sable).

Pour renforcer ses propriétés mécaniques tout en conservant sa perméabilité, le béton drainant peut intégrer des ajouts cimentaires tels que la vase de barrage, ainsi que des fibres. L'utilisation d'adjuvants permet également d'améliorer les caractéristiques du béton à l'état frais et durci, tout en facilitant sa mise en œuvre.

Ce travail concerne l'étude du comportement des bétons drainants sous haute température qui représente une partie du travail de la doctorante Mme AMIAR Farida.

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre de l'étude du comportement du béton drainant soumis à des températures élevées, en intégrant la vase de barrage. Cette dernière, généralement considérée comme un résidu encombrant, pourrait, après traitement, devenir une ressource précieuse pour la fabrication de bétons plus durables.

L'objectif principal est d'évaluer l'influence de l'ajout de différentes proportions de vase dans la formulation du béton drainant, en analysant son comportement mécanique (résistance à la compression et à la flexion) et physique (affaissement, perte de masse, vitesse ultrasonique), avant et après exposition à des températures de 20°C, 200°C, 400°C et 600°C.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres :

- Le premier chapitre présente une revue bibliographique sur le thème étudié. Il offre un aperçu général des bétons drainants, également appelés bétons poreux ou perméables, en mettant en évidence leur composition, leurs propriétés caractéristiques ainsi que leurs principaux domaines d'application.
- Le second chapitre est consacré au comportement des bétons soumis à des températures élevées. Il présente les mécanismes de dégradation thermique, les transformations physiques et chimiques du béton, ainsi que l'impact des hautes températures sur ses propriétés mécaniques et physiques.
- Le troisième chapitre présente les matériaux utilisés pour cette étude, notamment la vase de barrage, ainsi que leur caractérisation physique et mécanique. Il expose également la méthodologie adoptée pour la formulation des bétons drainants, ainsi que les essais réalisés à l'état frais et durci.
- Le quatrième chapitre est consacré à la présentation et à l'interprétation des résultats obtenus. L'accent y est mis sur l'influence de la vase et de la température sur les performances des bétons drainants, dans le but d'identifier une corrélation positive entre les paramètres étudiés.

Ce travail se termine par une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus.

CHAPITRE I : LE BETON DRAINANT

I.1 Introduction

Le béton drainant, également appelé béton poreux ou béton perméable, est un matériau caractérisé par une porosité élevée, avec un volume de vides compris entre 15 % et 35 % du volume total du béton [1] et [2]. Cette structure particulière est obtenue en formulant le mélange avec des granulats grossiers, du ciment et de l'eau, tout en supprimant partiellement ou totalement les granulats fins [1]. Ce béton a été confectionné pour la première fois dans les années 80 en Europe sous les murs porteurs dans la construction des aires de jeux et parcs, des revêtements de la chaussée... etc. Ce dernier a connu un grand développement lors des dernières décennies grâce à ses nombreux avantages.

Le béton drainant a été développé avec l'intention de diminuer la quantité d'eau de ruissellement produite, de ralentir son écoulement et de réduire sa charge polluante pour une saine gestion des eaux de ruissellement. Contrairement aux revêtements standards qui sont « imperméables » et qui génèrent d'importants volumes d'eau de ruissellement lors de fortes pluies, la chaussée en béton drainant permet à l'eau de la traverser aisément et d'être évacuée dans une fondation drainante dimensionnée à cet effet. La fondation drainante agit comme réservoir d'eau afin de permettre son infiltration dans le sol existant et ainsi permettre le réapprovisionnement des nappes phréatiques et des couches aquifères [3].

Le béton drainant est particulièrement adapté à de nombreuses applications : allées, parkings, trottoirs, plages de piscines, terrasses, et même certains revêtements routiers dans les zones inondables [3]- [4].

I.2 Composition du béton drainant

Le béton drainant (**Figure I-1**) est principalement constitué de gros granulats, d'une quantité réduite de pâte de ciment et d'eau, avec éventuellement de faibles rapports de sable fin. Pour améliorer ses performances mécaniques sans compromettre sa perméabilité, on peut incorporer des ajouts cimentaires (fumée de silice, cendres volantes, laitier de haut fourneau) et des fibres, ainsi que des adjuvants destinés à optimiser son comportement à l'état frais et durci.



Figure I-1 : Texture du béton drainant utilisé dans les parkings [1].

I.2.1 Ciment

On utilise généralement un ciment Portland pour le béton perméable. La quantité de ciment, plus faible que dans un béton conventionnel, doit toutefois suffire à enrober entièrement les grains de granulats par une couche de pâte [5], assurant l'adhérence intergranulaire tout en préservant les pores interconnectés pour garantir une infiltration optimale et une résistance mécanique adéquate. Les dosages usuels se situent entre 270 et 415 kg/m³ [1] et entre 250 et 400 kg/m³ [2] selon d'autres auteurs. Le dosage précis dépend du volume et de la granulométrie des granulats, ainsi que du rapport eau/ciment (E/C).



Figure I-2: Échantillon de ciment portland.

I.2.2 Ajouts cimentaires

On peut substituer partiellement le ciment ou le sable fin par des ajouts pouzzolaniques ou cimentaires tels que les cendres volantes, la fumée de silice et le laitier de haut fourneau [1] et [6]. Ces ajouts améliorent la durabilité, la résistance mécanique et la cohésion de la pâte, tout en conservant la perméabilité. D'autres ajouts font l'objet d'études visant à optimiser encore les performances du matériau [1].

I.2.3 Granulats

I.2.3.1 Gros granulats

Les gros granulats, roulés ou concassés, déterminent en grande partie la porosité et la résistance du béton drainant. Leur typologie, leur texture et leur distribution granulométrique influencent fortement les caractéristiques à l'état frais et durci [2]. Pour maximiser la porosité, on privilégie une distribution granulométrique discontinue [7].



Figure I-3: Gravier (3/8).

I.2.3.2 Granulats fins

Les granulats fins, incorporés à hauteur de 0 à 7 % du volume total des granulats, augmentent la résistance mécanique, la durabilité et la résistance aux cycles gel-dégel, tout en préservant une perméabilité satisfaisante [2].



Figure I-4 : Sable (0/3).

I.2.3.3 Adjuvants

Plusieurs types d'adjuvants peuvent être utilisés :

- **Réducteurs d'eau (superplastifiants)** : nécessaires pour atteindre de faibles rapports E/C, ils améliorent la maniabilité et les propriétés mécaniques à l'état durci [1] et [6].
- **Retardateurs de prise** : utiles en cas de chaleur ou de longue mise en œuvre, ils prolongent la maniabilité du béton drainant [8].
- **Entraîneurs d'air** : augmentent la résistance aux cycles gel-dégel.
- **Agents de viscosité** : améliorent la cohésion de la pâte de ciment, évitant le glissement de la pâte et l'obturation des pores.

I.2.3.4 Eau de gâchage

L'eau de gâchage doit répondre aux mêmes critères de qualité que pour le béton conventionnel. Les rapports E/C du béton perméable restent faibles (0,26–0,44 selon l'ACI 522) [1] afin de préserver la cohésion de la pâte et la perméabilité. Un excès d'eau provoque le drainage de la pâte et l'obturation des pores, tandis qu'un manque entraîne une maniabilité insuffisante et une baisse de performance mécanique [1].

I.2.3.5 Fibres

L'ajout de fibres, en particulier en combinaison avec la fumée de silice, améliore la résistance en flexion et la durabilité aux cycles gel-dégel [8] et [9]. Les fibres de polypropylène sont couramment utilisées pour prévenir les fissurations plastiques et renforcer la cohésion du matériau [9].

I.3 Propriétés du béton drainant

Les caractéristiques du béton drainant dépendent autant de sa composition que de sa mise en œuvre.

Ses atouts majeurs sont :

- **La porosité et la perméabilité.**
- **La résistance mécanique** (compression et flexion).
- **La durabilité** face aux alternances gel-dégel.

Ces performances varient fortement selon :

- La quantité de pâte (ciment + eau).
- Le rapport eau/ciment.
- Le volume, la nature et la granulométrie des granulats.

Pour obtenir un béton drainant efficace, il faut donc harmoniser ces différents facteurs et trouver le juste équilibre entre perméabilité, solidité et longévité [1] et [2].

I.3.1 La résistance à la compression

La résistance à la compression du béton est fortement influencée par les proportions des constituants du mélange, ainsi que par l'énergie de consolidation et les méthodes de mise en œuvre [1]. En effet, plus la consolidation (vibration, compactage) est intense, plus la porosité diminue, car les vides sont comblés par les granulats, ce qui se traduit par une augmentation de la résistance (**Figure I-5**). Il faut toutefois trouver le juste équilibre entre perméabilité et résistance : la consolidation ne doit pas compromettre la capacité d'écoulement de l'eau à travers le matériau. Selon la formulation, la résistance à la compression du béton drainant varie généralement entre 2,8 et 28 MPa [2].

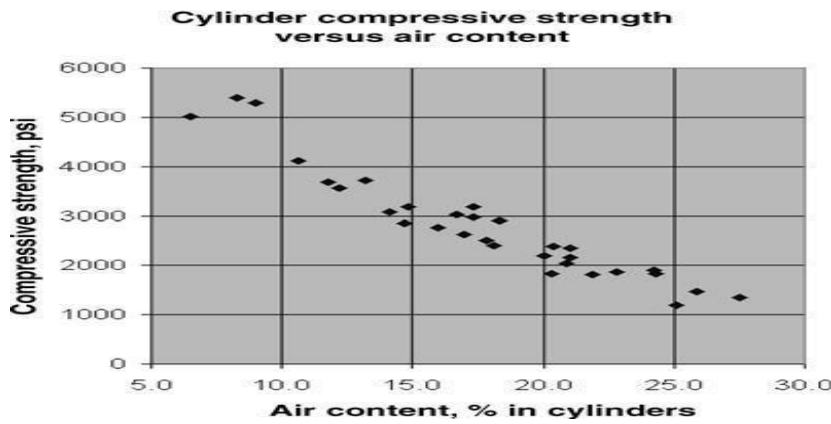


Figure I-5: Relation entre la résistance à la compression et le volume des vides [1].

D'autres études ont montré que la résistance à la compression diminue en augmentant la taille des granulats voir (**Figure I-6**).

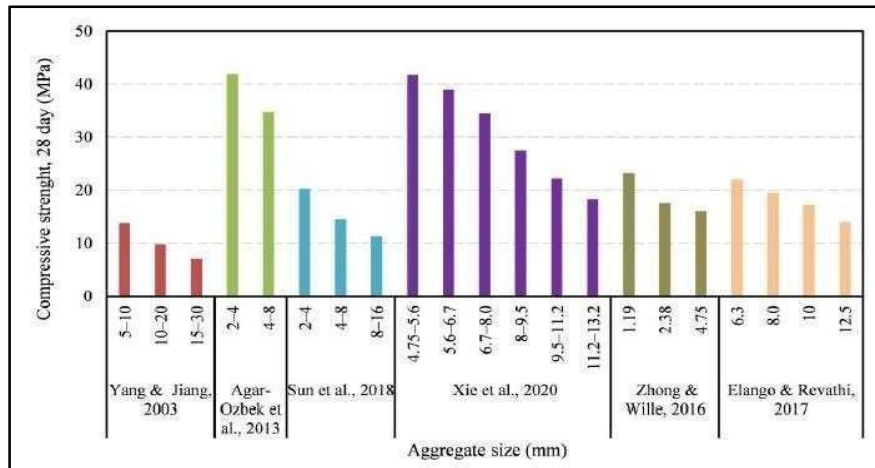


Figure I-6 : Résistance en compression en fonction de la taille des agrégats [10].

I.3.2 La résistance à la flexion

Il existe une corrélation étroite entre les résistances à la compression et à la flexion, toutes deux directement liées à la porosité. Ainsi que la résistance en compression, la résistance en flexion est inversement proportionnelle au volume des vides : plus la porosité augmente, plus la flexion diminue. Ainsi, pour un béton drainant dont la porosité typique se situe entre 15 % et 30 %, la résistance à la flexion reste relativement faible. Cependant, l'ajout d'environ 5 % de sable fin, conformément à la norme ACI 522, permet de renforcer cette résistance tout en préservant les capacités de drainage du matériau.

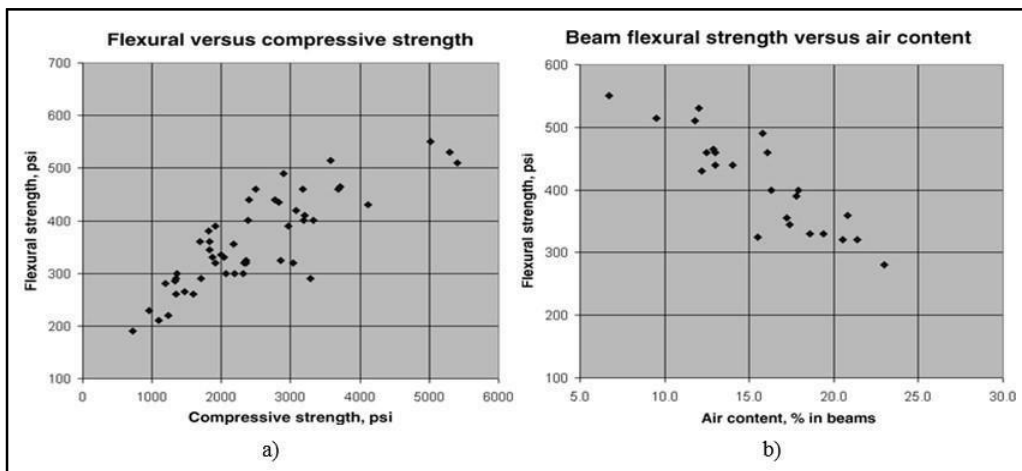


Figure I-7: Résistance à la flexion : a) Flexion en fonction de la compression ; b) Flexion en fonction de volume des vides [1].

I.3.3 La masse volumique

La masse volumique dépend avant tout de l'énergie de consolidation (via la variation du volume des vides) ; elle est également influencée par les propriétés des granulats (densité et granulométrie), le rapport eau/ciment et la présence de sable fin [1].

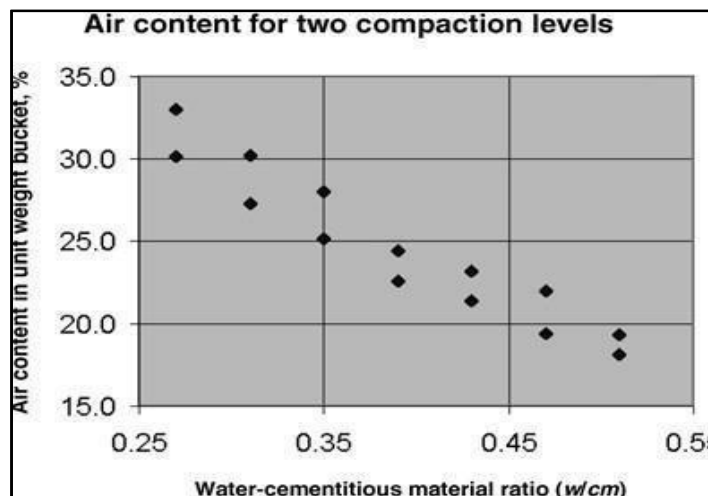


Figure I-8: Variation de la masse volumique en fonction du rapport E/C [1].

I.3.4 Porosité et perméabilité

La perméabilité (ou taux de percolation) du béton drainant, c’est la vitesse à laquelle l’eau traverse ses pores interconnectés. Elle dépend notamment du volume et de la taille des vides, de la rugosité des parois et de la viscosité du liquide. Pour être efficace, ce béton doit présenter au moins 15 % de porosité ; au-delà, son débit d’infiltration croît très rapidement, mais au détriment de sa résistance à la compression [2]. Enfin, l’usage de granulats de plus gros calibre accentue encore cette perméabilité [10] et [11].

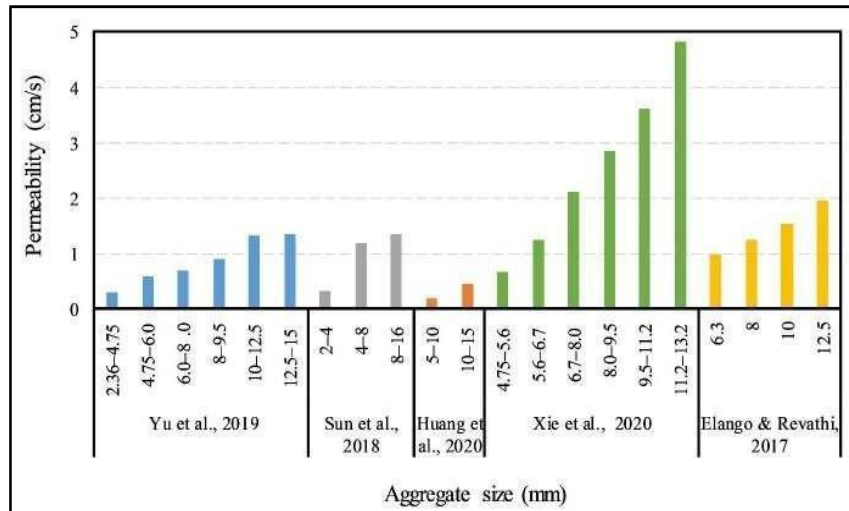


Figure I-9: Variation de la perméabilité en fonction de la taille des granulats [10].

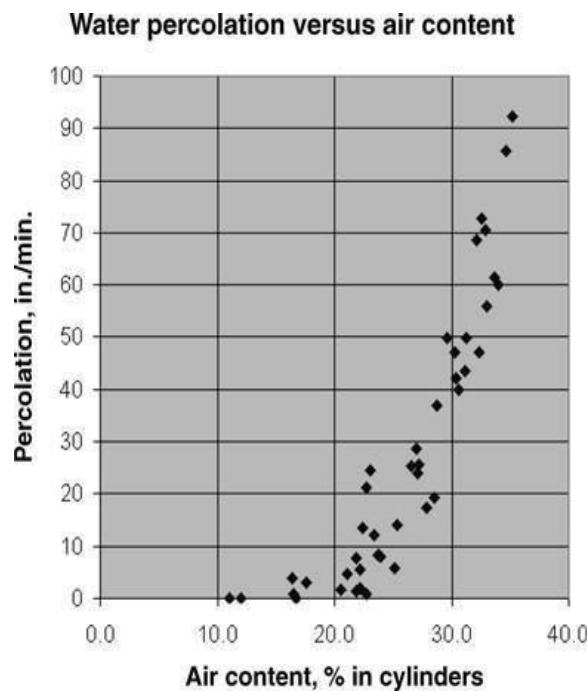


Figure I-10: Variation du taux d’infiltration en fonction du volume des vides [1]

I.3.5 Durabilité face aux cycles gel-dégel

Le béton drainant, de par sa porosité, subit à basse température la transformation de l'eau en glace dans ses pores, entraînant un gonflement de 9 % selon [2] qui en l'absence d'espace libre, fissure la matrice cimentaire et affaiblit le matériau [2]. Selon la norme **ASTM C666**, il peut résister à 100–300 cycles gel-dégel [2], mais sa durabilité reste surtout compromise lorsque ces [12]cycles se combinent à des alternances mouillage-séchage. Enfin, l'ajout d'un entraîneur d'air améliore sensiblement sa résistance à ces agressions [2].

I.3.6 Le retrait

Le béton drainant, grâce à son faible rapport eau/ciment et à sa forte porosité (large surface exposée), sèche très rapidement en perdant aisément son eau durant le malaxage et la cure. Son faible dosage en ciment lui confère un retrait deux fois moindre que celui du béton conventionnel, retrait qui dépend étroitement de la quantité de ciment et du rapport granulats/ciment (G/C).

I.3.7 Rhéologie et pompabilité

L'affaissement ne doit pas être utilisé comme critère d'acceptation sur chantier. En règle générale, le béton drainant est considéré comme un béton sans affaissement. Ce type de béton ne peut pas être pompé.

I.4 Domaines d'application du béton drainant

Le béton drainant est utilisé dans de nombreux domaines de la construction et de l'aménagement grâce à ses propriétés de perméabilité et sa capacité à gérer efficacement les eaux pluviales. Ce matériau polyvalent convient parfaitement à diverses situations, notamment :

➤ Aménagement urbain :

Le béton drainant est idéal pour les projets urbains, car il limite l'accumulation d'eau stagnante et réduit les risques d'inondation. Parmi ses principales utilisations, on trouve :

- Le revêtement des zones piétonnes telles que les trottoirs et les places publiques.
- La réalisation d'aires de stationnement et de zones pavées (**Figure I -11**).
- Le revêtement des voiries.



Figure I-11 : Parking en béton drainant [3].

➤ **Travaux routiers :**

Dans les infrastructures routières, le béton perméable est utilisé pour la construction de routes et d'autoroutes à faible trafic. Il permet une infiltration rapide des eaux de pluie, réduisant ainsi les risques d'aquaplanage. Il est principalement appliqué pour :

- Le revêtement des chaussées à faible trafic.
- Les bandes d'arrêt d'urgence.

➤ **Infrastructures sportives et récréatives :**

Le béton drainant est utilisé pour éviter la formation de flaques d'eau sur les terrains sportifs et récréatifs, garantissant ainsi leur praticabilité en toutes circonstances.



Figure I-12: Plage de piscine en béton drainant [13].

➤ **Travaux de génie civil :**

Enfin, le béton drainant intervient également dans les travaux de génie civil, notamment pour la construction de murs de soutènement et de canaux de drainage, où la maîtrise des eaux pluviales représente un enjeu majeur.

I.5 Mise en place

I.5.1 Préparation de sol

Avant de couler le béton drainant, une préparation rigoureuse du sol est indispensable afin d'éviter tout vieillissement prématuré. Il est essentiel de prévoir une réservation suffisante pour accueillir la dalle. Si ce n'est pas le cas, il faut décaper le sol existant sur une profondeur de 15 à 20 cm minimum. En présence d'un ancien revêtement (carrelage, béton, pavés), celui-ci doit impérativement être démolé. La sous-couche doit être perméable : le béton ne peut en aucun cas être appliqué directement sur de la terre, au risque de provoquer rapidement des fissures. Une fois le sol bien préparé, on installe une sous-couche de cailloux concassés (type 0/20), que l'on compacte soigneusement à l'aide d'une plaque vibrante, afin d'obtenir une base stable et homogène. Cette couche joue un rôle clé dans le drainage des eaux de ruissellement. Il s'agit d'une étape cruciale pour garantir la durabilité et la réussite de projet [14].



Figure I-13: Préparation du sol [14].

I.5.2 Pose des joints de dilatation :

Il est essentiel de prévoir des joints de dilatation tous les 20 m² environ, ou tous les 5 mètres linéaires, afin de prévenir l'apparition de fissures. Par ailleurs, ces joints peuvent également contribuer à l'esthétique de l'ouvrage, en permettant des variations de teinte dans le béton pour un rendu décoratif.



Figure I-14: Pose des joints de dilatation [14].

Il s'agit de l'étape la plus longue et la plus exigeante du chantier. En effet, elle nécessite le transport d'une grande quantité de béton, suivi de sa mise en œuvre : étalement, nivellement et compactage. À son arrivée, le béton est encore humide et présente une texture semblable à celle de la terre. Il doit donc être réparti soigneusement à l'aide d'un râteau afin de combler tous les vides et de garantir une couverture homogène de l'ensemble de la surface.

I.5.3 Etalage du béton drainant



Figure I-15: Etalage du béton drainant [14].

I.5.4 Fin du chantier

Contrairement au béton traditionnel qui se lisse, le béton drainant doit être compacté en surface par un procédé appelé "claquage", réalisé à l'aide de raquettes fixées aux pieds. Cette technique permet de préserver la perméabilité du matériau.

Il est ensuite nécessaire de respecter les délais de séchage : quelques heures avant de pouvoir marcher sur la surface, et environ une semaine avant d'y faire circuler un véhicule. Ces temps de repos sont essentiels pour garantir les performances mécaniques et esthétiques du béton drainant.



Figure I-16 : Damage du béton drainant [14].

I.6 Les avantages du béton drainant :

I.6.1 Avantages sécuritaires

Le béton perméable possède un réseau de pores qui permet l'infiltration de grandes quantités d'eau de pluie, réduisant ainsi le ruissellement vers les systèmes de drainage conventionnels et limitant les risques d'inondation.

En raison de sa capacité d'infiltration, il contribue également à protéger les écosystèmes aquatiques en réduisant leur pollution. En effet, les polluants de surface sont progressivement filtrés par le pavement drainant et par les couches sous-jacentes. Cette construction permet aux bactéries naturelles de se lier à ces contaminants. Les aquifères dans lesquels cette eau est infiltrée sont beaucoup plus sains [2] et [3].

Le béton perméable présente d'autres avantages liés à la sécurité des utilisateurs :

- Élimination des eaux stagnantes lors de fortes pluies,
- Diminution de l'éblouissement sur les surfaces humides,
- Réduction du risque d'aquaplaning et de glissade,
- Amélioration de la visibilité la nuit grâce à la teinte plus claire du béton [1].

I.6.2 Avantages économiques

Le béton perméable, comme tout choix de matériau dans un aménagement urbain, permet de diminuer les pertes financières dues aux dépenses globales d'un projet.

- Une meilleure gestion des eaux de pluie limite sa diffusion pendant une période donnée ainsi que les dégâts associés au coût d'inondation ;
- Les systèmes de drainage et de rétention d'eau ne sont plus obligatoires et peuvent être consolidés, ce qui diminue les dépenses tant en construction qu'en entretien ;
- Ne pas avoir à réaliser des pentes sur les chaussées en béton drainant facilite tout l'assainissement du chantier [3].

I.6.3 Avantages écologiques

Le béton drainant se distingue comme un matériau écologique en permettant l'infiltration directe d'eau dans le sol. Ses substantielles caractéristiques écologiques sont les suivantes :

Permet l'infiltration des eaux pluviales à leur point de chute, donc diminue le transfert d'eau et les risques d'inondation ;

Atténuer la dégradation des cours d'eau et protéger les écosystèmes aquatiques ;

Aide à la recharge naturelle des aquifères ;

Diminuer l'érosion des rives due au ruissellement des fortes pluies ;

Atténuer l'effet d'îlot de chaleur en ville : le béton poreux par sa structure alvéolaire laisse passer l'air

et une partie de la chaleur, ce qui assouplit le désagrément thermique en temps de canicule [Cimbéton, "Lutter contre les Imperméabilisations des Surfaces Urbaines"] ;

Diminuer le bruit des pneus qui roulent sur la route grâce à la structure poreuse qui accompagne les sons, améliorant le bien-être sonore des habitants [2] ;

Permet d'harmoniser les teintes du revêtement avec la nature pour l'esthétique afin que les aménagistes personnalisent les aménagements.

I.7 Inconvénients du béton drainant

- **Coût plus élevé** : en raison de sa composition spécifique et des techniques particulières requises pour assurer sa perméabilité, le béton drainant engendre des coûts d'installation généralement supérieurs à ceux du béton traditionnel.
- **Entretien régulier nécessaire** : pour préserver ses capacités de drainage et garantir sa durabilité, le béton drainant nécessite un entretien régulier, notamment le nettoyage des pores qui peuvent se boucher avec des débris ou des sédiments.

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, une étude bibliographique sur le béton drainant a été réalisée. L'historique de l'utilisation de ce matériau a d'abord été présenté.

Ensuite, les différents constituants de cette composition ont été clairement définis, en mettant en évidence l'influence de chacun sur la formulation du béton drainant. Les principales caractéristiques du béton perméable ont par la suite été détaillées. Les divers domaines d'application de ce matériau ont également été exposés. Enfin, un aperçu des avantages et des inconvénients du béton drainant a été présenté.

En conclusion, le béton perméable se distingue nettement du béton traditionnel par sa capacité à permettre une infiltration rapide des liquides à travers sa structure poreuse. Cette propriété est en fait une alternative efficace et durable pour la gestion des eaux pluviales et de ruissellement. Ainsi, ses applications s'étendent à de nombreux espaces urbains, où la maîtrise de l'imperméabilité des surfaces est essentielle pour préserver l'équilibre naturel du cycle de l'eau et faire face aux effets du changement climatique.

CHAPITRE II : BETON
SOUS HAUTE
TEMPERATURE

II.1 Introduction

L'impact des températures élevées sur le béton est étudié depuis les années 1940. Cette analyse s'intéressera : d'une part, aux mécanismes de l'instabilité thermique du béton ainsi qu'aux différents paramètres susceptibles de l'influencer ; d'autre part, elle portera sur les transformations physiques et chimiques du béton, ses performances mécaniques, ainsi que les phénomènes de transfert de chaleur et la perte de masse lorsqu'il est soumis à un traitement thermique.

Le béton est constitué d'un liant, de granulats, d'eau, et éventuellement d'adjuvants. Lorsqu'il est soumis à une élévation de température, ses différents composants subissent plusieurs transformations qui influencent ses propriétés.

Dans ce chapitre, nous commencerons par examiner les différentes formes d'endommagement thermique, en analysant les mécanismes en jeu ainsi que les paramètres susceptibles de provoquer ce phénomène. Par la suite, nous nous intéresserons aux modifications subies par la matrice cimentaire et les granulats, ainsi qu'à l'évolution des propriétés physiques et mécaniques du béton.

II.2 Différentes formes d'endommagement thermique

Les incendies ayant affecté des ouvrages en béton ont mis en évidence les effets destructeurs des températures élevées sur ce matériau. Dès les années 1940, les chercheurs ont commencé à documenter l'impact de la chaleur sur les propriétés du béton. Plusieurs incendies notables, ont mis en lumière des dégradations significatives. Celles-ci se traduisent par des phénomènes tels que le décollement du matériau, une perte importante de résistance mécanique, et parfois même la mise hors service de l'ouvrage concerné. **La figure II-1** illustre quelques dégradations d'ouvrages en béton à la suite d'un incendie.



Incendie de Tour Windsor (Madrid) 2005

Incendie de Tunnel Saint Gotthard 24 octobre 2011

Figure II-1 : Dégradations d'ouvrages en béton à la suite d'incendie [15].

Lors d'un incendie, le béton peut subir diverses formes d'instabilité thermique, compromettant sa résistance et son intégrité structurelle. Ces dégradations dépendent de facteurs tels que la température atteinte, la vitesse de chauffage, la composition du béton et la nature des granulats. Voici les principales manifestations observées:

**Figure II-2** : Eclatement d'un poteau durant l'essai au feu [12].

1. Éclatement explosif

Ce phénomène survient généralement dans les trente premières minutes d'un incendie ou lors d'un essai thermique standard, à des températures supérieures à 100 °C. Il se caractérise par une expulsion soudaine et violente de fragments de béton, accompagnée d'un bruit intense. Ce type d'éclatement est particulièrement dangereux car il peut exposer les armatures et affaiblir rapidement la structure.

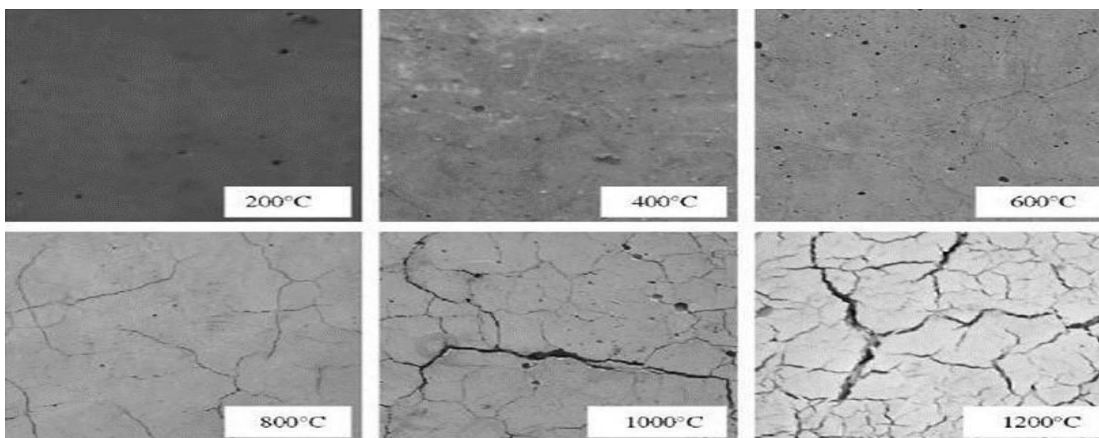


Figure II-3 : Etat de surface et fissures des bétons avec différents températures [16].

2. Éclatement de surface (écaillage)

Aussi appelé écaillage, cet éclatement implique le détachement de petits fragments (jusqu'à environ 20 mm) de la surface exposée au feu. Moins violent que l'éclatement explosif, il résulte principalement des contraintes thermiques induites par le gradient de température. Bien que moins spectaculaire, il peut affecter la durabilité du béton en exposant les couches internes aux agressions extérieures.



Figure II-4 : Ecaillage lors de l'incendie du tunnel mont blanc [12].

3. Éclatement de granulats

Ce type d'éclatement est causé par la dilatation thermique des granulats proches de la surface, notamment lors de la transformation du quartz α en quartz β autour de 570 °C. Les dommages sont généralement superficiels, affectant principalement la couche externe du béton.

4. Éclatement d'angle

Observé dans les phases avancées d'un incendie, cet éclatement survient lorsque le béton est affaibli et que des fissures se développent en raison des contraintes de traction le long des bords et des coins de l'ouvrage. Ce phénomène peut compromettre la stabilité des éléments structuraux, notamment aux jonctions critiques.

5. Éclatement par détachement des granulats

Ce phénomène résulte de la modification de la microstructure de la pâte de ciment sous l'effet de la chaleur, combinée à la formation de fissures internes dues à la dilatation thermique différentielle entre la pâte de ciment et les granulats. Il peut entraîner une perte d'adhérence entre les composants du béton, réduisant ainsi sa résistance mécanique.

6. Éclatement en phase de refroidissement

Ce type d'éclatement, non violent et silencieux, se produit lors de la phase de refroidissement après un incendie. Il est causé par la présence de granulats calcaires et la réhydratation de la chaux. Bien que moins spectaculaire, il peut affecter la durabilité du béton en créant des fissures internes. Ces différentes formes d'instabilité thermique soulignent l'importance de concevoir des bétons résistants au feu, en tenant compte des propriétés thermiques des matériaux utilisés et des conditions d'exposition potentielles.

II.2.1 Paramètres et phénomènes favorisant l'instabilité thermique du béton

De nombreux paramètres et phénomènes peuvent affecter l'éclatement du béton exposé à des températures élevées.

II.2.1.1 La teneur en eau dans le béton

L'eau dans le béton joue un rôle déterminant dans l'apparition d'instabilités thermiques. Elle est notamment responsable de la formation de pressions internes, considérées comme l'une des causes principales du phénomène d'éclatement.

Les travaux de Hager [17] portant sur la mesure de la pression de vapeur dans un béton à haute performance (BHP) soumis à différents niveaux de séchage — complètement séché à 105 °C ($w = 0\%$), partiellement séché à 80 °C ($w = 0,38\%$) et non séché ($w = 3,1\%$) — ont mis en évidence une corrélation entre la pression de vapeur et la teneur en eau libre du matériau. Ainsi, un béton sec présente une faible pression de vapeur de 0,26 MPa, tandis qu'un béton non séché peut atteindre une pression de 4 MPa.

Selon Harmathy [18], Hertz [19] et Noumowé [20], une teneur en eau massique inférieure à 3–4 % permettrait de réduire significativement le risque d'éclatement.

Cependant, des instabilités thermiques ont été observées sur des éprouvettes de béton présentant une teneur en eau libre inférieure à 3 % [21]. Il a également été constaté que l'éclatement ne se produit pas lorsque le béton est totalement sec, même en présence d'un gradient thermique élevé, comme l'ont souligné Harmathy et ses collaborateurs, cités par Hertz [19].

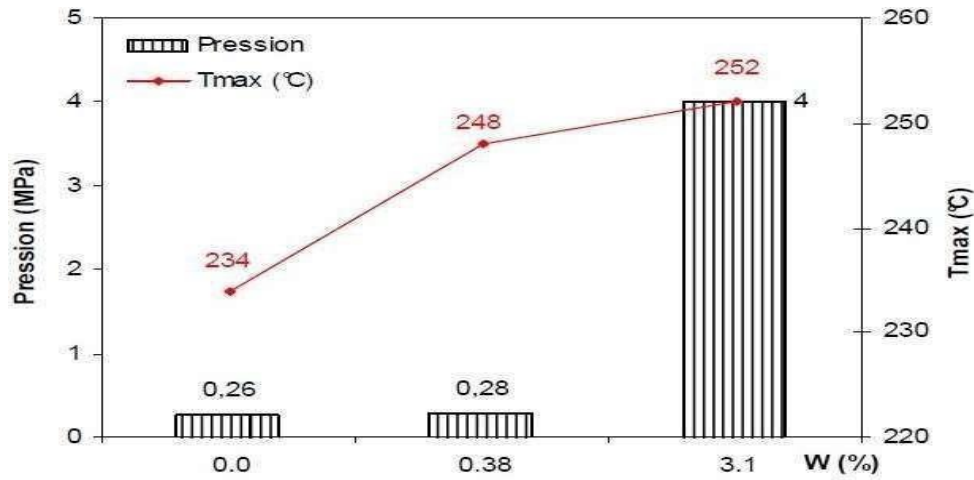


Figure II-5 : Pressions internes dans le béton en fonction de la teneur en eau libre et températures d'apparition des pics de pression [17].

II.2.1.2 Les propriétés physico-mécaniques du matériau

Le béton ayant un faible rapport eau/liant présente une sensibilité accrue à l'instabilité thermique comparativement à celui avec un rapport plus élevé. En effet, la structure dense, la faible porosité et la faible perméabilité des bétons à hautes performances limitent le transfert des fluides, ce qui peut provoquer une élévation des pressions internes lors d'une montée en température.

II.2.1.3 La vitesse de chauffage

La vitesse de chauffage est un facteur déterminant de la stabilité thermique du béton. Plus elle est élevée, plus le risque d'éclatement augmente. Des essais de caractérisation réalisés par [22] sur des éprouvettes soumises à des cycles de chauffage-refroidissement ont montré que celles chauffées à une vitesse de 1 °C/min subissent des éclatements, tandis que celles chauffées plus lentement à 0,1 °C/min ne présentent pas de dommages. Une faible vitesse de montée en température limite la formation de zones saturées et réduit le gradient thermique. En revanche, un échauffement rapide de la surface du béton génère des gradients thermiques importants, induisant des contraintes de traction et de compression susceptibles de provoquer l'écaillage du matériau.

II.2.1.4 La nature des granulats

Le comportement des granulats face à une élévation de température varie selon leur composition chimique et minéralogique. Les granulats siliceux présentent un coefficient de dilatation plus élevé que celui des granulats calcaires, conférant à ces derniers une meilleure stabilité thermique ([23], [24]). Des essais de chauffage réalisés par Mindégua [24] jusqu'à 200°C sur des granulats silico-calcaires ont révélé un éclatement brutal des granulats de silex dans une plage de température comprise entre 110°C et 165°C. **La figure II.6** met en évidence cette instabilité thermique des silex, en comparaison avec la stabilité des granulats calcaires après un cycle thermique à 200°C.

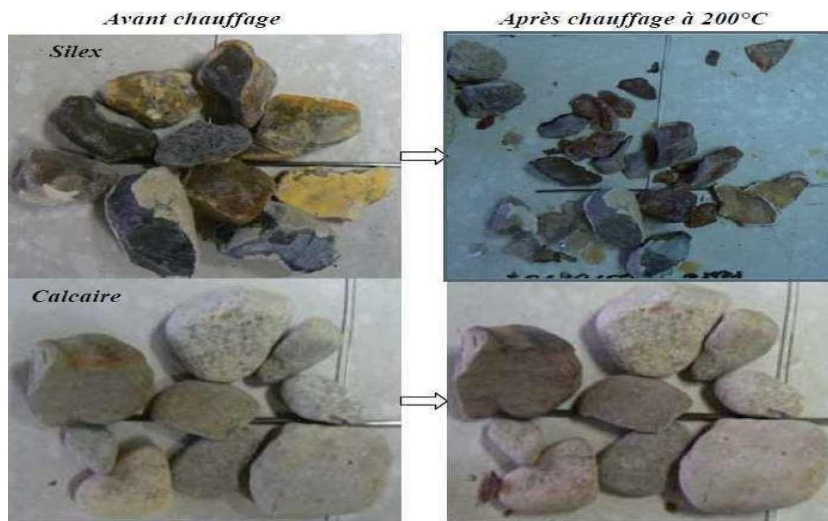


Figure II-6 : Illustration du caractère instable des granulats de silex comparés aux granulats calcaires [24].

II.2.1.5 Taille des éprouvettes :

Un effet d'échelle a été observé sur le comportement thermique de différentes dimensions d'éprouvettes en béton. Des essais de chauffage menés par Kanema T.M. (2007) [25] sur des éprouvettes cylindriques de 16×32 cm et de 11×22 cm ont révélé une fréquence plus élevée d'éclatements dans les éprouvettes de plus grande taille (16×32 cm).

L'analyse de la perte de masse durant le chauffage a montré un séchage plus rapide pour les échantillons de plus petite taille (11×22 cm). Cette évaporation plus rapide de l'eau permet de réduire la pression de vapeur interne, ce qui contribue à limiter les risques d'éclatement.

II.2.2 Comportement du béton à la haute température

II.2.2.1 Transformations de la matrice cimentaire

L'exposition du béton à des températures élevées, comme lors d'un incendie, entraîne des transformations physico-chimiques significatives au sein de sa microstructure. Ces modifications affectent la matrice cimentaire et les granulats, compromettant ainsi les propriétés mécaniques et la durabilité du matériau. Les principales étapes de dégradation thermique du béton sont détaillées ci-dessous :

1. Évaporation de l'eau libre (jusqu'à 120 °C)

L'eau libre et l'eau absorbée s'évaporent progressivement, avec une perte marquée autour de 100 °C. À 120 °C, l'eau non liée est généralement éliminée. Cette déshydratation initiale peut augmenter la porosité du béton.

2. Décomposition de l'ettringite (70–80 °C)

L'ettringite ($C_6AS_3H_{32}$), un hydrate de la pâte de ciment, commence à se décomposer, réduisant sa concentration dans la matrice cimentaire [23] [24]. Cette transformation peut affecter la stabilité dimensionnelle du béton.

3. Déshydratation du gypse (130–170 °C)

Le gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) subit une double réaction endothermique, entraînant sa déshydratation. Cette perte d'eau contribue à l'augmentation de la porosité et à la formation de fissures.

4. Première phase de déshydratation du C-S-H (180–300 °C)

Les silicates de calcium hydratés (C-S-H), responsables de la résistance du béton, commencent à perdre leur eau liée chimiquement, entraînant une diminution de la cohésion de la matrice [23] [24].

5. Oxydation des composés ferreux (250–370 °C)

Les granulats contenant du fer peuvent présenter une coloration rosée due à l'oxydation des composés ferreux qui a lieu aux alentours de 300°C. Ce phénomène est souvent accompagné de réactions endothermiques détectables par analyse thermique.

6. Décomposition de la portlandite (450–550 °C)

La portlandite (Ca(OH)_2) se décompose en chaux vive (CaO) et en eau ($\text{Ca(OH)}_2 = \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$) [26]. Aussi sur ces températures, on observe la coloration rosée des granulats qui devient plus intense, sauf pour les silex qui se calcinent entre 250°C et 450°C et par conséquent prennent une coloration blanche-grise.

7. Transformation du quartz (573 °C)

Le quartz passe de la phase α à la phase β , cette transformation est accompagnée d'une augmentation jusqu'à 5% du volume du quartz pouvant provoquer des fissures autour des grains de quartz. En revanche, les granulats en silex observent une décomposition des silanols (SiOH) entre la température de 400 et 570°C [27].

8. Deuxième phase de déshydratation du C-S-H (600–700 °C)

Le C-S-H subit une déshydratation supplémentaire, formant des silicates bi-calciques ($\beta\text{-C}_2\text{S}$) et libérant d'eau [26], ce qui compromet davantage la résistance mécanique.

9. Décarbonatation du carbonate de calcium (autour de 800 °C)

Le carbonate de calcium (CaCO_3) se décompose en chaux (CaO) et en dioxyde de carbone (CO_2), réaction fortement endothermique qui libère du gaz carbonique [23].

10. Désintégration des composés calcaires (800–1200 °C)

Les composés calcaires dans les granulats et la matrice cimentaire se désintègrent, entraînant un blanchiment du béton et l'apparition de fissures sévères.

11. Fusion du béton (à partir de 1200 °C)

Le béton commence à fondre, perdant toute intégrité structurelle.

12. Fusion de la pâte de ciment (1300–1400 °C)

La pâte de ciment entre en fusion, marquant la destruction complète de la matrice cimentaire. Selon les observations d'Alonso et Fernandez [26] : Lors du refroidissement, des processus de réhydratation peuvent se produire, notamment la formation de nouvelle portlandite et de gels C-S-H. Cependant, ces réactions peuvent également entraîner des fissurations supplémentaires en raison de l'expansion des produits de réhydratation. Ces transformations thermiques soulignent l'importance de concevoir des bétons résistants au feu, en tenant compte des propriétés thermiques des matériaux utilisés et des conditions d'exposition potentiel.

II.2.2.2 Transformations des granulats

La sensibilité des granulats à la chaleur dépend de leur nature. En effet, les températures élevées peuvent altérer leurs propriétés minéralogiques, provoquant des transformations physico- chimiques importantes.

Les granulats siliceux, par exemple, n'interagissent pas significativement avec la pâte de ciment. Considérés comme neutres, ils n'établissent que peu de liaisons avec la matrice cimentaire. Les quartzites, appartenant à cette catégorie, présentent une bonne stabilité face au feu. Toutefois, au-delà de 573 °C, le quartz subit une transformation de sa phase α en phase β , entraînant une dilatation notable de l'ordre de 1 à 5 % [27]. Cette expansion peut engendrer des phénomènes de gonflement ou même d'éclatement du granulat. Un comportement similaire a été observé chez les granulats de silex, dont l'éclatement survient entre 110 °C et 450 °C [28].

À l'inverse, les granulats calcaires sont dits réactifs. Ils forment des liaisons plus fortes avec la pâte de ciment et conservent une bonne stabilité thermique jusqu'à environ 600 °C. Au-delà de 600 °C, ils subissent une décarbonatation de la calcite selon la réaction : $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$. Lors du refroidissement, l'oxyde de calcium (CaO) peut réagir avec l'humidité de l'air pour former de la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Cette dernière, ayant un volume supérieur à celui du granulat d'origine, peut provoquer la formation de fissures dans le béton [26].

II.3 Evolution des Propriétés physiques et mécaniques

II.3.1 Evolution des propriétés physiques

II.3.1.1 Perte de masse

La perte de masse du béton sous l'effet de la température correspond à l'évacuation de matière, sous forme de solide ou de gaz, lorsque la température augmente. Avant 600°C, cette perte est principalement due à l'évaporation de l'eau contenu dans le béton. [17], [29], [25].

II.3.1.2 La porosité

La porosité à l'eau mesure le volume des pores, de diamètre compris entre 0,1 mm et 2,5 mm, accessibles vers le réseau capillaire du béton. Quelle que soit la nature du béton, la porosité augmente avec la température [29].

II.3.2 Evolution des Propriétés mécaniques

La montée en température provoque des modifications structurelles et des déformations dans le béton, ce qui altère ses propriétés mécaniques. Sa résistance à la compression et à la traction diminue, tout comme son module d'élasticité. Ces caractéristiques peuvent être analysées soit pendant l'exposition à la chaleur (étude à chaud), soit après le refroidissement (résistance résiduelle). L'analyse à chaud permet de comprendre le comportement du béton en situation d'incendie, tandis que l'étude après refroidissement renseigne sur ses propriétés mécaniques restantes. Ces évaluations sont essentielles pour estimer la capacité portante résiduelle de la structure et sa robustesse, afin de déterminer si une réparation est envisageable.

II.3.2.1 Résistance à la compression:

La variation de la résistance à la compression pendant l'exposition à la chaleur est appelée résistance à chaud. Plusieurs chercheurs se sont penchés sur ce sujet. Hager [17], par exemple, a étudié cette résistance sur des bétons de compositions différentes, avec des rapports eau/ciment (E/C) de 0,3, 0,4 et 0,5. L'évolution de la résistance à chaud en fonction de la température peut être divisée en trois phases distinctes (voir **Figure II-7**).

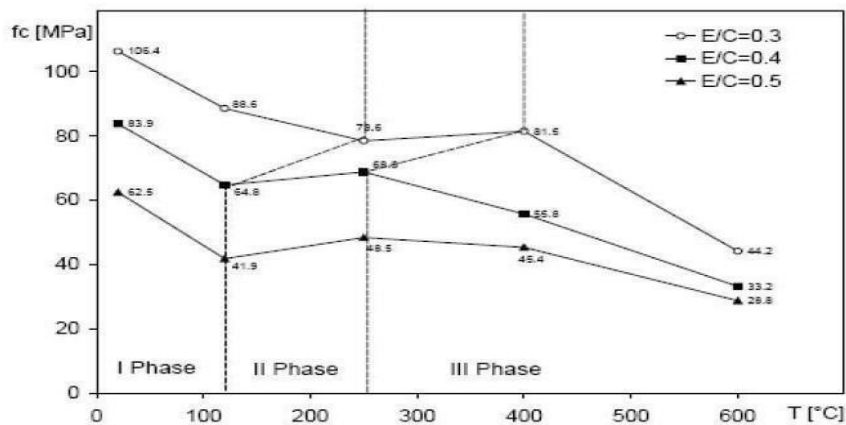


Figure II-7 : Résistance en compression à chaud de béton à différentes températures [17].

L'évolution de la résistance à la compression à chaud se décompose en trois phases principales :

- **Première phase (0°C à 100°C)** : une diminution rapide de la résistance est observée, de l'ordre de 20 à 30 %.
- **Deuxième phase (100°C à 250°C)** : la baisse de résistance se poursuit mais de manière plus modérée. Ce phénomène d'augmentation différée a également été constaté par d'autres chercheurs [25].

- **Troisième phase (au-delà de 400°C) :** la résistance diminue de façon continue et progressive. C'est dans cette phase que les premières fissurations apparaissent, dues aux déformations différentielles entre les granulats et la pâte cimentaire.

II.3.2.2 Résistance à la traction :

Nguyen [30] a réalisé une étude comparative des résultats d'essais de résistance résiduelle à la traction par fendage, en s'appuyant sur plusieurs travaux portant sur le béton ordinaire et le béton à haute performance [29], [25] et [31]. Les résultats sont illustrés dans la figure II-8.

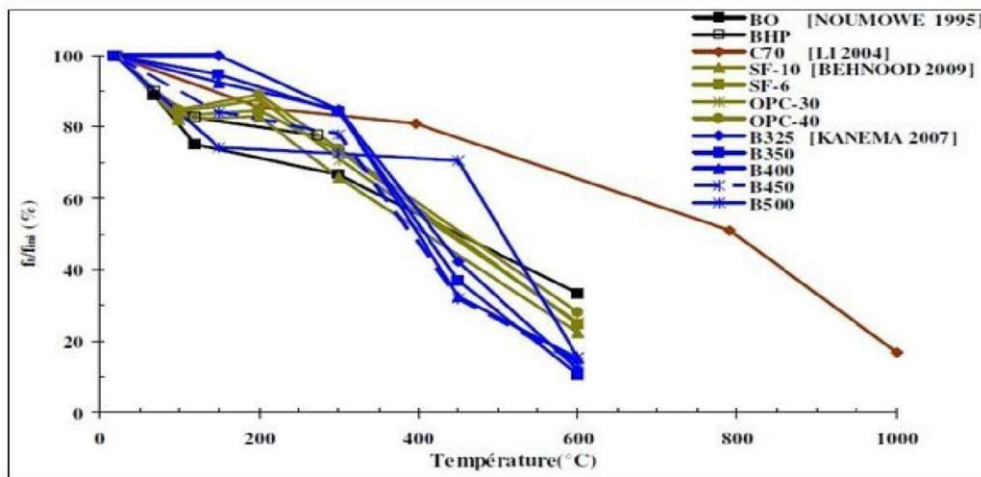


Figure II-8 : Evolution de la résistance résiduelle relative à la traction des BO et BHP [30].

Jusqu'à environ 350°C, la résistance à la traction diminue légèrement. Au-delà de cette température, une chute plus marquée est observée. Les bétons à faible rapport eau/ciment (E/C) présentent une baisse de résistance plus importante dès 150°C, en comparaison avec ceux ayant un rapport E/C plus élevé [25].

Le type de granulats influence également sur la résistance résiduelle à la traction, de manière similaire à son effet sur la résistance à la compression [28].

Entre 300°C et 600°C, les bétons contenant des granulats siliceux subissent des pertes de résistance plus élevées que ceux fabriqués avec des granulats calcaires.

Au-delà de 600°C, c'est le béton à granulats calcaires qui montre la plus forte perte, en raison de la décarbonatation du calcaire.

Par ailleurs, une étude menée par Pliya (2010) met en évidence une amélioration de la résistance à la traction dans les bétons contenant des fibres de polypropylène. Cette amélioration est attribuée à la fusion des fibres, qui comble les pores du béton et se solidifie lors du refroidissement, renforçant ainsi les liaisons entre les particules.

II.4 Béton drainant sous haute température

Le béton drainant, en raison de sa structure ouverte et poreuse, présente des performances thermiques particulières qui le rendent plus fragile aux températures élevées. Les propriétés mécaniques, la masse, et la structure interne du matériau sont significativement altérées au-delà de certains seuils thermiques.

II.4.1 Instabilité thermique

La structure poreuse du béton drainant facilite la pénétration et la propagation rapide de la chaleur à travers la matrice du matériau. Cette conductivité thermique accrue favorise la dégradation prématurée des composants du liant (ciment hydraté, adjuvants), en particulier au cours de cycles thermiques répétés.

Cette instabilité thermique favorise également la formation de microfissures internes, dues aux gradients de température et à la dilatation différentielle entre les constituants.

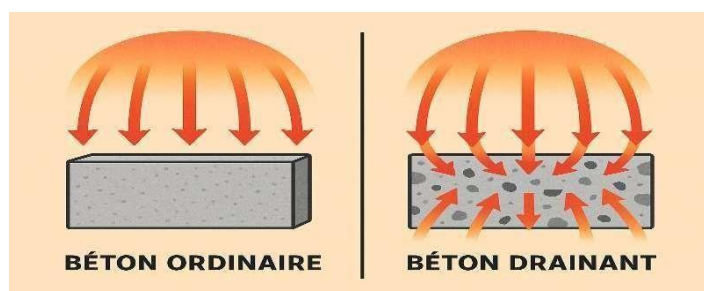


Figure II-9 : Schéma comparatif de la diffusion de chaleur dans un béton ordinaire vs un béton drainant (avec flèches illustrant la propagation de la chaleur) [32].

II.4.2 Perte de masse

Sous l'effet de la montée en température :

Le béton drainant perd de l'eau libre, (**souvent à partir de 100 °C**) ,

Puis de l'eau liée chimiquement dans les hydrates de ciment (comme la portlandite) se décompose (**vers 300–600 °C**). Cela entraîne une perte de masse importante, accentuée par la porosité élevée du béton drainant.

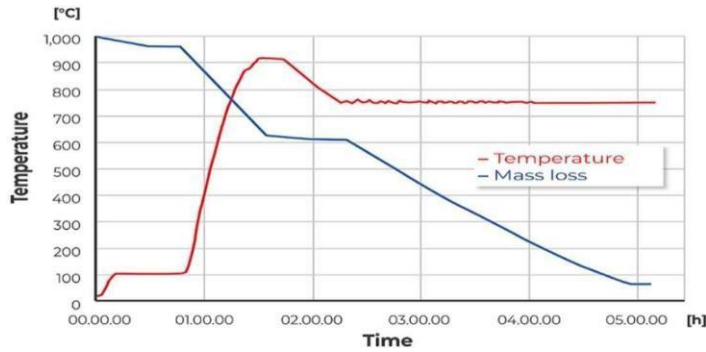


Figure II-10 : Courbe typique de perte de masse d'un béton drainant en fonction de la température (thermogravimétrie) [33].

II.4.3 Porosité

La porosité initialement élevée du béton drainant augmente sous l'effet des hautes températures à cause de :

- La déshydratation des hydrates de ciment, créant de nouveaux vides.
- L'apparition de microfissures internes (entre pâte et granulats) accentue encore la porosité globale.

Cette porosité accrue diminue ses performances mécaniques et sa durabilité.

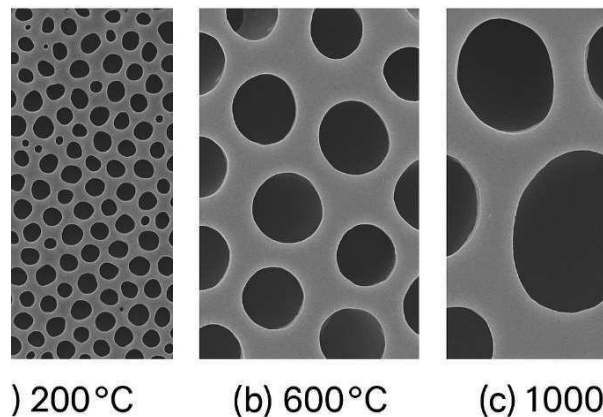


Figure II-11 : illustration montrant l'évolution de la structure poreuse avec l'augmentation de température [34].

- **Description typique de l'évolution :**

À basse température :

Les pores sont bien définis, nombreux, et de petite taille. La structure est généralement homogène. Avec l'augmentation de la température : Les pores commencent à s'agrandir par frittage ou coalescence. On observe une réduction de la porosité totale. Certains petits pores disparaissent, d'autres grossissent.

À haute température :

Les pores deviennent rares et beaucoup plus gros. Le matériau peut tendre vers une structure plus dense, voir totalement compacte.

II.4.4 Résistance en compression

La résistance à la compression chute rapidement **à partir de 300–400 °C**. Le béton drainant, moins dense, est encore plus sensible que le béton classique. La perte peut atteindre 50 % ou plus de la résistance initiale **à 600 °C**, selon la formulation du béton.

Le béton drainant, par sa densité plus faible, est encore plus sensible à la chaleur que le béton ordinaire, en raison de la surface d'exposition accrue de ses pores.

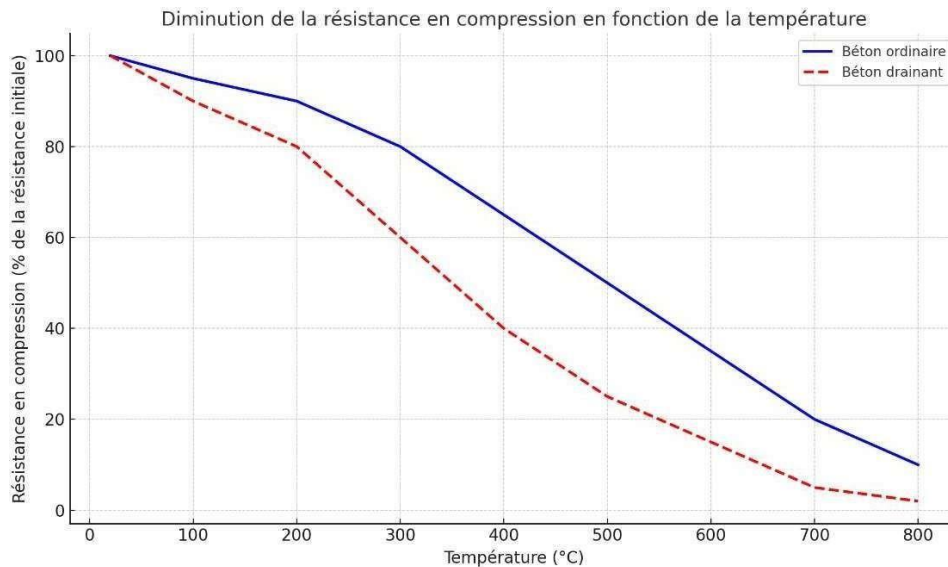


Figure II-12: Graphique montrant la diminution de la résistance en compression en fonction de la température pour différents types de béton (ordinaire vs drainant) [35].

- **Comportement typique attendu :**

À température ambiante (~20°C), les deux types de béton ont leur résistance maximale.

À partir de 100–200°C, légère baisse pour le béton ordinaire, plus marquée pour le béton drainant.

Entre 300°C et 600°C, chute plus importante de la résistance pour les deux, avec le béton drainant chutant plus rapidement.

Au-delà de 600°C, la résistance devient très faible voire nulle, surtout pour le béton drainant.

II.4.5 Résistance en traction par flexion

Cette résistance est plus sensible à la température que la compression. La perte de cohésion entre les granulats et la pâte de ciment diminue fortement la tenue en flexion. Les performances mécaniques en traction peuvent chuter de plus de 60 % dès 400–500 °C.

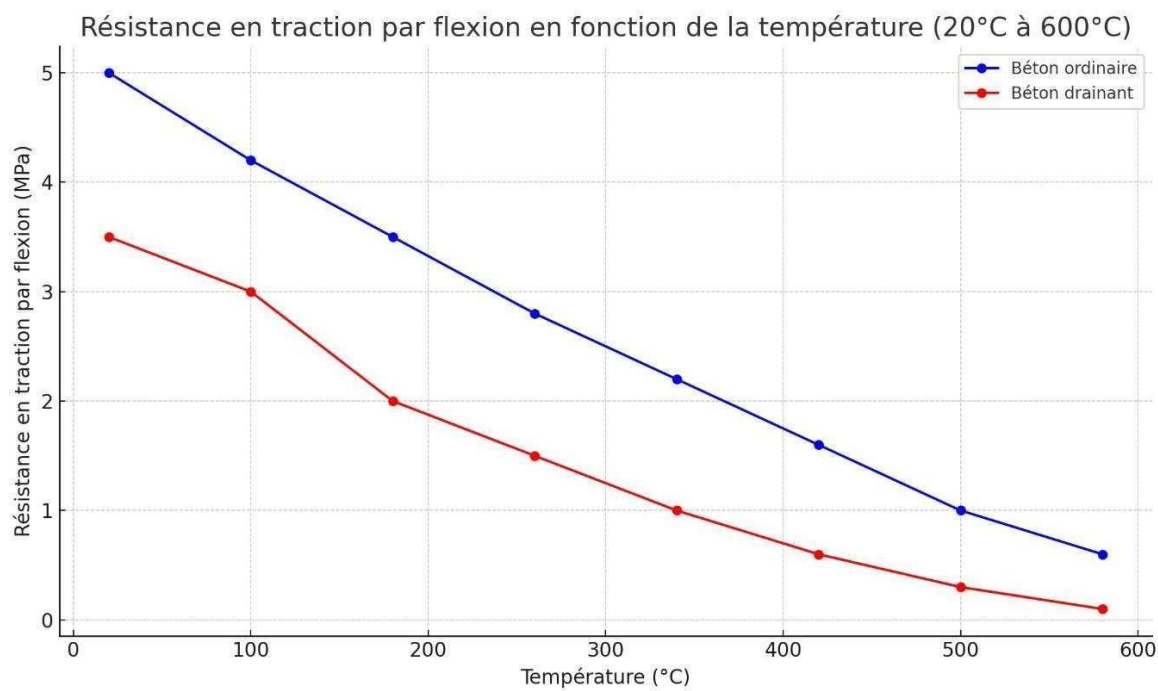


Figure II-13 : Graphique de la résistance en traction par flexion en fonction de la température pour différents types de béton (ordinaire vs drainant) [35].

Le béton ordinaire résiste mieux à la montée en température, conservant une structure plus cohérente jusqu'à environ 300 °C.

Le béton drainant, en raison de sa porosité élevée, est beaucoup plus sensible à la température, ce qui limite son usage dans les environnements exposés à des chaleurs extrêmes.

Au-delà de 500 °C, aucun des deux types n'offre une résistance mécanique suffisante, et des mesures de protection thermique sont indispensables (ex : enrobage, additifs thermorésistants).

II.5 Conclusion

À haute température, le béton subit plusieurs transformations physiques liées à sa dégradation. Dans un premier temps, on constate que la perte des propriétés mécaniques et physiques du matériau est principalement due à des changements dans sa microstructure, à l'évaporation de l'eau et aux réactions de déshydratation. Ces phénomènes entraînent la formation de microfissures dues à la chaleur, ainsi qu'une augmentation importante de la perméabilité du béton, que ce soit après un traitement thermique ou sous l'effet direct de la température.

Un des facteurs les plus influents dans ce comportement est la présence et la quantité d'eau contenue dans le béton.

Le béton drainant, en raison de sa structure poreuse et de sa faible densité, présente un comportement particulier et souvent défavorable face aux hautes températures. La facilité de diffusion thermique à travers sa matrice accélère les processus de déshydratation, de dégradation du liant, et la formation de microfissures. Ces mécanismes entraînent une perte importante de masse, une augmentation significative de la porosité et une détérioration rapide des propriétés mécaniques, en particulier la résistance à la compression et à la traction par flexion.

Comparé au béton ordinaire, le béton drainant montre une vulnérabilité accrue dès les premiers paliers thermiques (**à partir de 200–300 °C**), avec des pertes de performance plus marquées. Ces limites limitent son utilisation dans des environnements soumis à des températures élevées, à moins d'être associé à des stratégies de renforcement ou de protection thermique spécifiques (additifs thermorésistants).

Ainsi, bien que le béton drainant offre des avantages en termes de gestion des eaux pluviales, son usage dans des contextes à risque thermique élevé doit être soigneusement étudié et encadré.

CHAPITRE III : MATERIAUX ET METHODES

III.1 Introduction

Ce chapitre présente les propriétés des matériaux entrant dans la composition du béton drainant, ainsi que les principales méthodes d'essai utilisées : L'ultra son, essai de compression et essai de flexion.

La vase a été utilisée comme remplacement partiel au liant avec les pourcentages suivants : 0% ; 5% ; 10% ; 15%.

Plusieurs éprouvettes de béton ont été préparées. Leurs propriétés mécaniques ont été évaluées à température ambiante 20°C et après différents traitements thermiques 200°C, 400°C et 600°C. Ce chapitre a pour objectif de présenter les caractéristiques des matériaux utilisés, les formulations des bétons, ainsi que le dispositif expérimental adopté.

III.2 Les matériaux utilisés

III.2.1 Le ciment

Le ciment employé dans cette étude est un ciment Portland composé de type **CEM II/B-L 42,5 N**, commercialisé sous le nom de **Matine** (voir figure III-1). Il est conforme aux exigences de la norme algérienne **NA 442 (2013)** ainsi qu'à la norme européenne **EN 197-1**. Il faut conserver le ciment au laboratoire, à température ambiante, en les couvrant d'un film plastique afin d'éviter toute pré-hydratation.



Figure III-1 : Le ciment.

Le ciment Portland composé **CEM II/B 42,5 L**, à base de laitier ou de calcaire, est constitué de :

- 65 % à 79 % de calcaire + argile,
- 21 % à 35 % de gypse,
- Jusqu'à 5 % de constituants secondaires.

Ses principales caractéristiques techniques sont regroupées dans **le tableau III.1** ci-dessous :

Tableau III-1 : Caractéristiques techniques [36].

Caractéristiques techniques		Valeurs
Propriétés chimiques	Perte au feu (%) (NA5042)	10.0 ±2
	Teneur en sulfates (SO3) (%)	2.5±0.5
	Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	Max 5%
	Teneur en chlorures (NA5042) (%)	<0.1
Composition minéralogique du clinker	C3S (%)	60±3
	C3A (%)	8±2
Propriétés physiques	Consistance normale (%)	26.5±2.0
	Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g) (NA231)	3700-5200
	Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1000
	Expansion	≤ 3.0
Temps de prise à 20° (NA230)	Début de prise (min)	150±30
	Fin de prise (min)	230±50
Résistance à la compression	2 jours (MPa)	≥ 10.0
	28 jours (MPa)	≥ 42.5

III.2.2 L'eau de gâchage

Nous avons utilisé l'eau du robinet du laboratoire pédagogique de génie civil pour préparer les différents types de béton, c'est une eau potable.



Figure III-2 :L'eau de gâchage.

III.2.3 Le sable

Le sable utilisé est un sable concassé de type (0/3) mm, provenant de Tizi-Ouzou.



Figure III-3 : Un échantillon du sable (0/3).

III.2.4 Le gravier

Le granulat utilisé est un gravier de calibre (3/8) mm. Il a été soigneusement lavé, puis séché dans une étuve à 105 °C pendant 24 heures. Nous avons stocké le gravier dans des sacs propres.



Figure III-4 : Un échantillon du gravier (3/8) utilisé.



Figure III-5 : L'étuve utilisée pour le séchage des granulats.

III.2.5 La vase

La vase utilisée provient du barrage de K'sob, situé à 15 km au nord de la ville de M'sila, dans la wilaya de M'sila. Ce barrage, mis en eau en 1940, rejette les vases draguées à environ 4 km en aval, dans des bassins de décantation et de stockage. La vase a été fournie sous forme de poudre grossièrement broyée. Après un séchage à 105 °C en étuve, elle a été finement broyée puis tamisée à travers un tamis de 80 μm . Elle a ensuite été calcinée à différentes températures. L'analyse chimique de cette vase est présentée dans le **tableau III-2**.

Tableau III-2 : Composition chimique de la vase de barrage.

Composants	%
SiO ₂	38.81
Al ₂ O ₃	12.8
Fe ₂ O ₃	4.96
CaO	17.53
MgO	2.06
SO ₃	0.19
K ₂ O	1.61
Na ₂ O	0.26
P ₂ O ₅	0.25
TiO ₂	0.68
Cr ₂ O ₃	0.018
Mn ₂ O ₃	0.053
ZnO	0.009
SrO	0.04
PAF	20.25
Cl	0.016
Moisture	8.9



Figure III-6 : La vase utilisée.

III.2.6 Adjuvant

Les essais de laboratoire ont été réalisés en utilisant un superplastifiant de nouvelle génération, le Sikaplast 40 Pro, connu pour sa capacité à fortement réduire l'eau de gâchage dans les bétons.



Figure III-7 : Sikaplast 40 Pro.

III.3 Analyse granulométrique

L'essai de tamisage permet de classer les grains d'un échantillon selon leur taille à l'aide d'une série de tamis superposés (**figure III-8**). L'échantillon est d'abord lavé, puis séché à l'étuve à 105 °C. Ensuite, il est placé sur le tamis supérieur, et la colonne de tamis est soumise à des vibrations, ce qui permet de séparer les grains selon leur dimension.

Pour l'analyse granulométrique du sable (0/3), les tamis utilisés ont les ouvertures suivantes (en mm) : 3,15 ; 2 ; 1 ; 0,8 ; 0,5 ; 0,315 ; 0,16 ; 0,125 ; 0,08 ; fond.

Pour le gravier (3/8), les tamis utilisés sont : 10 ; 8 ; 6,3 ; 5 ; 2,5 ; 0,125 ; 0,63 ; 0,5 ; fond.

Chaque essai est réalisé sur un échantillon de 2500 g.



Figure III-8 : La tamiseuse utilisée.

Tableau III-3 : Analyse granulométrique du sable (0/3).

Tamis (mm)	Refus (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
3,15	0	0	0	100
2	67,1	67,1	2,684	97,316
1	792,1	859,2	34,368	65,632
0,8	206,5	1065,7	42,628	57,372
0,5	96,0	1161,7	46,468	53,532
0,315	585,7	1747,4	69,896	30,104
0,16	499,3	2246,7	89,868	10,132
0,125	63,0	2309,7	92,388	7,612
0,08	103,7	2413,4	96,536	3,464
Fond	86,6	2500	100	0

Tableau III-4 : Analyse granulométrique du gravier (3/8).

Tamis (mm)	Refus (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
10	0	0	0	100
8	28,2	28,2	1,128	98,872
6,3	488,5	516,7	20,668	97,332
5	1127,0	1643,7	65,748	34,252
2,5	833,3	2477,0	99,08	4,52
0,125	18,1	2495,1	99,804	0,196
0,63	3,2	2498,3	99,932	0,068
0,5	0	2498,3	99,932	0,068
Fond	1,7	2500	100	0

Les différents tableaux ci-dessus nous permettent de tracer les courbes granulométriques pour le sable et le gravier, voir **Figure III-9**.

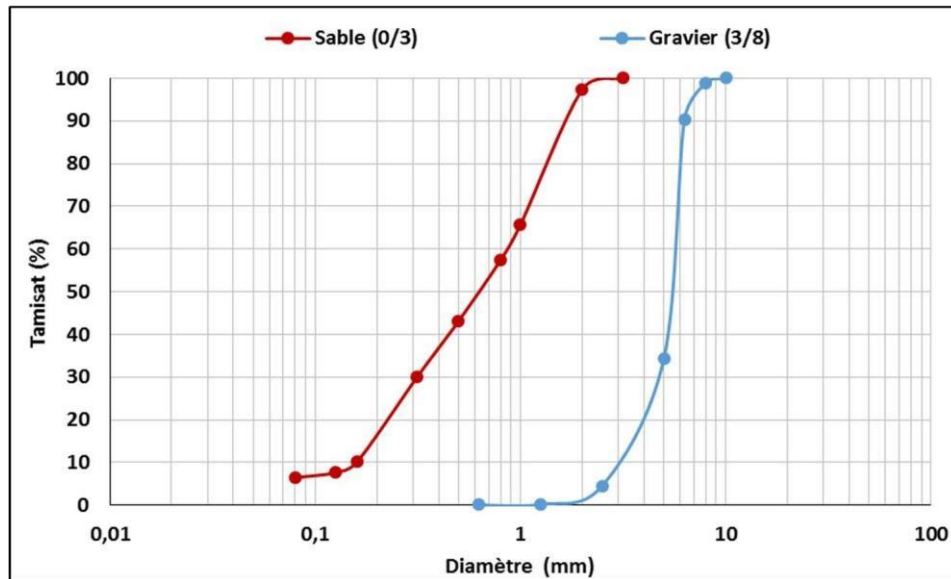


Figure III-9 : Courbes granulométriques du sable (0/3) et du gravier (3/8).

III.4 Module de finesse

Pour évaluer la granulométrie des granules, le module de finesse a été calculé. Il est déterminé à partir des résultats de l'analyse granulométrique et donne une indication globale de la distribution des tailles de particules. Conformément à la norme française [NF P18-540], le module de finesse correspond au centième de la somme des refus cumulés (exprimés en pourcentage) sur les tamis de la série suivante : 0,16 – 0,315 – 0,63 – 1,25 – 2,5 – 5 mm

$$Mf = \frac{\sum(\text{pourcentage cumulé retenu sur chaque tamis standard})}{100}$$

Le module de finesse (Mf) permet de caractériser la nature du sable selon les intervalles suivants :

- 1.8 < Mf < 2.2 : le sable est à majorité de grains fins.
- 2.2 < Mf < 2.8 : le sable est préférentiel.
- 2.8 < Mf < 3.3 : le sable est grossier.

Après calcul, nous obtenons un module de finesse $Mf = 2,68$, ce qui classe notre sable comme un sable préférentiel.

III.5 Masse volumique absolue et apparente

III.5.1 Masse volumique apparente

La masse volumique apparente (ou densité apparente) représente la masse d'un matériau rapportée à son volume total, incluant les vides internes aux particules ainsi que ceux situés entre elles.

La masse volumique apparente est donnée par :

$$\rho_{app} = \frac{m}{V} = \frac{M_2 - M_1}{V}$$

Avec :

- **M1**: masse du récipient vide (en g).
- **M2**: masse du récipient rempli de matériau (en g).
- **V**: volume intérieur du récipient (en cm³).

❖ **Le mode opératoire :**

En verse dans un récipient qui pèse vide ($M_1 = 650$ g), d'un volume ($V = 992,35$ cm³), le gravier ou le sable, par couches successives et sans tassement avec les mains, puis en arase avec une règle métallique, puis on pèse le récipient rempli et on le note avec (M_2) pour enfin on calcule la masse volumique apparente tel que :

$$M_1 = 650 \text{ g.}$$

$$M_2 \text{ (sable)} = 1680 \text{ g.}$$

$$M_2 \text{ (gravier)} = 1605 \text{ g.}$$

$$V = (\pi \cdot d^2 / 4) \cdot h.$$

$$h \text{ (la hauteur du récipient)} = 14 \text{ cm.}$$

$$d \text{ (le diamètre du récipient)} = 9,5 \text{ cm.}$$

$$V = (\pi \cdot 9,5^2 / 4) \cdot 14.$$

$$V = 992,35 \text{ cm}^3.$$

$$\rho_{app} \text{ (sable)} = \frac{m}{V} = \frac{M_2 - M_1}{V} = \frac{1680 - 650}{992,35} = 1,03 \text{ g/cm}^3.$$

$$\rho_{app} \text{ (gravier)} = \frac{m}{V} = \frac{M_2 - M_1}{V} = \frac{1605 - 650}{992,35} = 0,96 \text{ g/cm}^3.$$



Figure III-10 : Mesure de la masse volumique apparente du sable et gravier.

III.5.2 Masse volumique absolue

La masse volumique absolue correspond à la masse d'un matériau par unité de volume, en ne prenant en compte que la matière solide, sans considérer les vides à l'intérieur ou entre les grains.

Elle se calcule selon la formule suivante :

$$\rho_{abs} = \frac{V_1}{V_2 - V_1}$$

❖ Le mode opératoire :

Dans une éprouvette graduée contenant un volume d'eau $V_1 = 300\text{ml}$, avec l'entonnoir on verse une masse du gravier ou du sable $m = 300\text{g}$, on lit le nouveau volume d'eau $V_2 = 410\text{ml}$ pour le sable et $V_2 = 425\text{ml}$ pour le gravier, puis on calcule la masse volumique absolue.

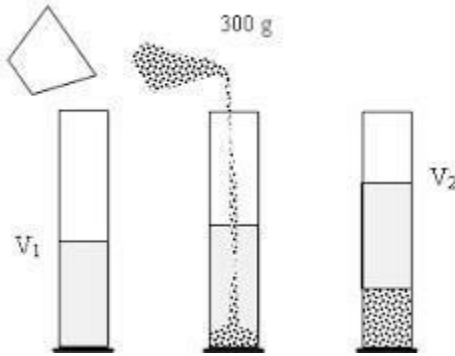


Figure III.5-1 : Méthode de mesure de la masse volumique absolue.

$$\rho_{\text{abs}} (\text{sable}) = \frac{V_1}{V_2 - V_1} = \frac{300}{410 - 300} = 2,72 \text{ g/cm}^3.$$

$$\rho_{\text{abs}} (\text{gravier}) = \frac{V_1}{V_2 - V_1} = \frac{300}{425 - 300} = 2,4 \text{ g/cm}^3.$$

➤ Les résultats sont indiqués dans le tableau suivant :

Tableau III-5 : Masses volumiques absolue et apparente des granulats.

Granulats	Sable (0/3)	Gravier (3/8)
Masse volumique Apparente (g/cm^3)	1,03	0,96
Masse volumique Absolue (g/cm^3)	2,72	2,4

III.6 Equivalent du sable

Le test de l'équivalent de sable permet d'évaluer la qualité du sable en mesurant la teneur en fines, principalement d'origine argileuse, végétale ou organique, présentes à la surface des grains. Cet essai permet de déterminer la proportion d'impuretés argileuses ou de particules très fines présentes dans le sable. Il évalue le pourcentage de poussières et d'éléments argileux susceptibles de nuire à la qualité du béton et du mortier. Le test de l'équivalent de sable est réalisé conformément à la norme **NF P 18-598**.

III.6.1 Principe de l'essai

L'essai consiste à séparer les particules fines des grains de sable plus grossiers contenus dans le matériau. Une procédure normalisée permet de calculer le coefficient d'équivalent de sable, indicateur de la propreté du sable.

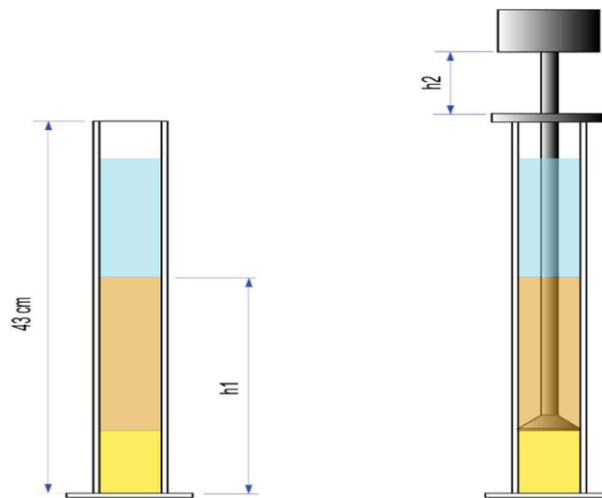


Figure III-12 : Schéma explicatif d'équivalent de sable.

III.6.2 Equipement nécessaire

- Truelle ronde.
- Entonnoir
- Récipients de pesée pouvant recevoir environ 200ml.
- Balance.
- Chronomètre.
- Règle graduée.
- Une éprouvette graduée munie d'un bouchon en caoutchouc.
- L'agitateur manuel.
- Un piston avec un poids bien défini.

Tableau III-6 : les valeurs d'équivalent de sable indiquent la nature et la qualité du sable.

Es	Nature et qualité du sable
Es < 60%	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement. Sable à rejeter pour des bétons de qualité ou vérification plus précise de la nature des fines par un essai au bleu de Méthylène.
60% ≤ Es < 70%	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand le retrait n'a pas de conséquence notable sur la qualité du béton.
70% ≤ Es < 80%	Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
Es ≥ 80%	Sable très propre. L'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.

III.6.3 Mode opératoire

On commence par peser un échantillon de sable de 120 g. Pendant ce temps, on remplit une éprouvette graduée avec de l'eau jusqu'au repère 1. Après, on y introduit les 120 g de sable, puis on ferme l'éprouvette avec un bouchon et on la place horizontalement sur l'agitateur mécanique. Ensuite, agiter le tout pendant 90 cycles en 30 secondes

À la fin de l'agitation, on complète l'éprouvette avec de l'eau jusqu'au repère supérieur, puis on laisse reposer verticalement pendant 20 minutes sans la perturber. Après ce temps, deux mesures sont prises :

- **h₁** : hauteur totale (sable + particules fines),
- **h₂** : hauteur du sable propre uniquement.

L'équivalent de sable (**Es**) est ensuite calculé à l'aide de la formule suivante :

$$ES = (h_2/h_1) \times 100 \%$$



Figure III-13 : Etapes de l'essai d'équivalent de sable.

Sable (0/3) :

$$ES = (h_2/h_1) \times 100 \%$$

$$ES = (8,45/9,25) \times 100 \%$$

ES = 91,35 > 80 (**On déduit que le sable est très propre**).

III.7 Formulation des bétons

Pour obtenir un béton conforme aux exigences spécifiques, il est essentiel de suivre plusieurs étapes, depuis la caractérisation des matériaux jusqu'à la formulation du mélange. Les performances attendues du béton incluent notamment son ouvrabilité, généralement évaluée par l'essai d'affaissement au cône d'Abrams, sa résistance mécanique, mesurée le plus souvent à 28 jours. Ces propriétés exigent un dosage particulier en ciment et en eau (rapport eau/ciment).

III.7.1 Préparation des compositions

Pour la formulation de nos bétons, nous avons confectionné un échantillon de béton témoin **BT**. Nous avons également étudié trois taux d'ajout de vase : 5 %, 10 % et 15 % (**B5V, B10V, B15V**) comme substitution partiel du ciment. Au total, 96 éprouvettes ont été confectionnées en vue de réaliser des essais de compression, de flexion, et l'ultrason avec un rapport eau/ciment (E/C) fixé à 0,36. Trois températures ont été étudiées (200°C, 400°C et 600°C).



Figure III-14 : Préparation des pesées pour la confection des bétons étudiés.

III.7.2 Les moules utilisés

Après le pesage des composants nécessaires à la formulation des bétons, les moules destinés à la confection des éprouvettes sont préparés. Dans le cadre de ce programme expérimental, deux types de moules ont été utilisés :

- Des éprouvettes cylindriques normalisées, conformes aux normes **NF P 18-400** et **NA 2600**, de dimensions $(\phi 10 \times 20)$ cm³, destinées à la mesure de la résistance à la compression.
- Des éprouvettes prismatiques normalisées, également conformes aux normes **NF P 18-400** et **NA 2600**, de dimensions $(7 \times 7 \times 28)$ cm³, utilisées pour la détermination de la résistance à la flexion.

Chaque moule a été soigneusement huilé afin de faciliter le démoulage des éprouvettes après prise du béton.



Figure III-15 : Les moules utilisés.

III.7.3 Confection du béton

La confection du béton a été réalisée en suivant une procédure standardisée, appliquée de manière identique à tous les mélanges. Un malaxeur à axe vertical a été utilisé pour assurer un mélange homogène des constituants. Pour chaque gâchée de béton, 12 éprouvettes prismatiques, 12 éprouvettes cylindriques ($\phi 10 \times 20$) cm, ont été confectionnées conformes aux (normes **NF P 18-400** et **NA 2600**).

❖ Mode opératoire

Les étapes de fabrication du béton sont les suivantes :

- Déversement du sable, du gravier, de la vase et du ciment dans le malaxeur, suivi d'un malaxage pendant 1 minute afin d'assurer l'homogénéisation des matériaux secs ;
- Introduction de l'eau de gâchage préalablement mélangée au superplastifiant, puis malaxage pendant 2 minutes supplémentaires ;
- Remplissage des moules et vibration pendant 10 secondes ;
- Conservation des éprouvettes : après leur confection, les échantillons sont recouverts d'un sac en plastique afin de limiter l'évaporation de l'eau.
- Démoulage des éprouvettes après 24 heures, avec identification par nomination et numérotation ;
- Immersion des éprouvettes démoulées dans un bac à eau ;
- Maintien en immersion pendant 28 jours afin de garantir un durcissement optimal et une hydratation complète du ciment.



Figure III-16 : Les différentes étapes de fabrication et conservation des éprouvettes.

III.8 Essai sur le béton frais

III.8.1 Essai d'affaissement au cône d'Abrams [NF EN 12350-2]

L'essai d'affaissement est l'un des tests les plus utilisés pour évaluer la consistance du béton frais, en raison de sa simplicité de mise en œuvre. Il est applicable tant que la dimension maximale des granulats ne dépasse pas 40 mm

Le principe de l'essai consiste à mesurer la hauteur d'affaissement d'un cône de béton frais, reflétant ainsi sa maniabilité.

La procédure se déroule comme suit :

- Placer un moule conique métallique préalablement humidifié sur une surface plane et horizontale ;
- Remplir le moule en trois couches successives de béton frais, chacune compactée à l'aide de 25 coups de tige pour chasser l'air emprisonné ;
- Nivelier la surface du béton à l'aide de la tige de piquage ;
- Retirer le moule verticalement, sans torsion, en l'espace de 5 à 10 secondes ;
- Mesurer l'affaissement à 10 mm près, en prenant la différence entre la hauteur du moule et le point le plus élevé du béton après retrait du moule.



Figure III-17 : Les étapes de l'essai au cône d'Abrams.

Tableau III-7 : Consistance du béton à partir de l'affaissement.

Consistance	Affaissement (cm)
Ferme (F)	0 à 4
Plastique (P)	5 à 9
Très Plastique (TP)	10 à 15
Fluide (F)	≥ 16

III.9 Essai sur le béton durci

III.9.1 Essais de cycles chauffage – refroidissement

Chaque cycle thermique comprend trois étapes. La première est une phase de chauffage durant laquelle la température augmente à une vitesse contrôlée de 1 °C par minute. La seconde étape consiste en un palier thermique de quatre heures à température constante, afin de garantir une homogénéité thermique au sein des éprouvettes. Enfin, la dernière étape est un refroidissement naturel, non piloté, effectué à four fermé. Durant cette phase, la température diminue progressivement jusqu'à atteindre la température ambiante, à une vitesse moyenne de -1 °C par minute.

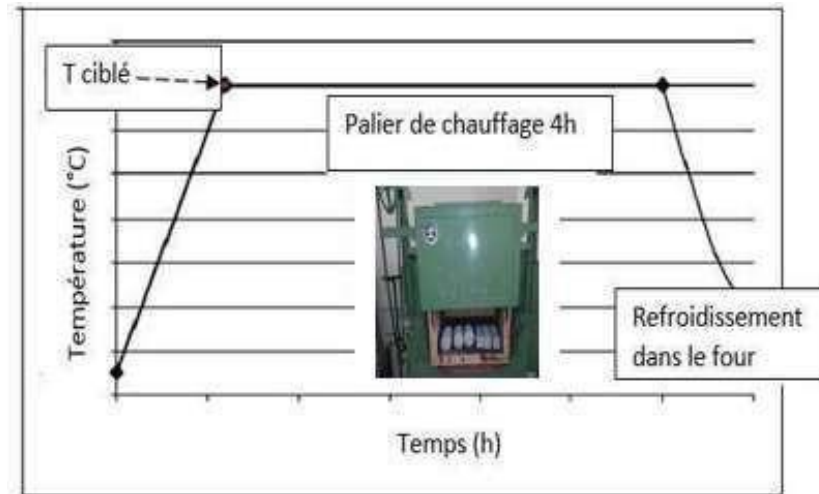


Figure III-18 : Cycles de chauffage-refroidissement imposés aux éprouvettes.

Les éprouvettes sont placées à l'intérieur du four de manière à favoriser une répartition homogène de la chaleur, rendue possible par le système de ventilation intégré. Le fonctionnement du four est contrôlé par un régulateur programmable, auquel sont connectés les thermocouples assurant le suivi et le contrôle de la température.



Figure III-19 : Disposition des éprouvettes à l'intérieur du four.

III.9.2 Essai ultrason [NF EN 12504-4]

Cet essai non destructif joue un rôle essentiel dans l'évaluation de plusieurs propriétés du béton durci, telles que sa compacité, la présence de fissures et l'uniformité du coulage. La méthode repose sur l'utilisation d'ondes ultrasonores : elle consiste à mesurer le temps que mettent les impulsions ultrasoniques à traverser le béton.

L'analyse des résultats dépend de la configuration adoptée lors de la mesure, en particulier de la position des transducteurs sur l'appareil à ultrasons. Trois modes de transmission sont couramment utilisés :

- **Transmission directe** : les transducteurs sont placés face à face de part et d'autre de l'élément en béton.

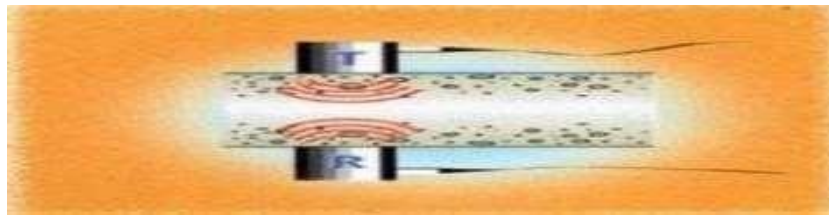


Figure III-20 : Mesures en Transparence (Directe).

- **Transmission semi-directe** : les transducteurs sont positionnés sur des faces adjacentes.



Figure III-21 : Mesures semi directe.

- **Transmission indirecte (ou de surface)** : les deux transducteurs sont placés sur la même face du béton.



Figure III-22 : Mesures en surface (indirecte).

Lorsque les conditions le permettent, il est recommandé d'utiliser la méthode de transmission directe, car elle offre les mesures les plus précises. Cette méthode consiste à appliquer les deux transducteurs sur deux faces opposées de l'éprouvette, en veillant à utiliser un gel de contact pour assurer une bonne transmission des ondes ultrasonores. Une fois l'appareil activé, la vitesse de propagation des ondes à travers le béton est affichée en mètres par seconde (m/s).

Dans le cadre de notre étude, les mesures de vitesses ultrasonores ont été effectuées en mode de transmission directe, qui permet une transmission optimale de l'énergie ultrasonore à travers le béton. Les essais ont été réalisés à l'aide d'un appareil ultrasonique PUNDIT de la marque Proceq, équipé d'un transducteur d'émission et d'un transducteur de réception, tous deux réglés sur une fréquence de 150 kHz. Cette configuration assure une bonne précision des mesures et permet une évaluation fiable de la qualité du béton testé.



Figure III-23 : Appareil PUNDIT pour mesure de la vitesse de propagation des ondes.

III.9.3 Essai de compression [NF P 18-406]

Les essais de compression ont été effectués à l'aide de la machine **IBERTEST**, avec un dispositif adapté à ce type d'essai (**voir figure III.24**). Les éprouvettes utilisées sont de forme cylindrique, de dimensions 10 cm de diamètre sur 20 cm de hauteur (**$\phi 10 \times 20$ cm**), et ont été soumises à un chargement progressif à une vitesse de **0,5 kN/s**. La résistance mécanique à la compression constitue une propriété fondamentale du béton et représente le paramètre central de notre étude. L'objectif est de déterminer la résistance à la compression des différentes formulations de béton à 28 jours. Les essais ont été réalisés conformément à la norme **NF P 18-406**.



Figure III-24 : Dispositif expérimental pour l'essai de compression.

III.9.4 Essai de traction par flexion trois points [NF P 18-407]

L'essai de traction par flexion en trois points a été réalisé sur des éprouvettes prismatiques de dimensions $(7 \times 7 \times 28)$ cm³. Chaque prisme est placé sur une presse hydraulique commandée par ordinateur, ayant une capacité maximale de 200 kN. La distance entre appuis, notée L, est fixée à 21 cm. Pour éviter les effets parasites dus aux défauts de parallélisme ou de planéité de la face supérieure de l'éprouvette, le chargement a été appliqué sur ses faces latérales. L'éprouvette est soumise à un chargement croissant jusqu'à rupture, avec une vitesse de chargement de 0,5 kN/s.



Figure III-25 : Dispositif expérimental pour l'essai de traction par flexion 3 points.

III.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les matériaux utilisés dans cette étude ainsi que leurs principales caractéristiques. Nous avons ensuite détaillé les formulations des différents mélanges. Deux paramètres ont été modifiés : la température appliquée sur les éprouvettes et le taux de remplacement du ciment par la vase. Nous avons également présenté le programme expérimental mis en place, qui comprend essais de compression, et de flexion en trois points.

CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, on a étudié le comportement mécanique de béton drainant soumis à des températures de 20°C, 200°C, 400°C et 600°C. Pour cela, nous avons préparé plusieurs formules de béton en modifiant le pourcentage de la vase utilisée (0%, 5%, 10% et 15%) en substitution du ciment. Les bétons sont caractérisés en compression et en flexion trois points.

Les résultats des essais réalisés sur les bétons drainants, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci sont présentés dans ce chapitre :

- A l'état frais :
 - L'essai de l'affaissement au cône d'Abrams conforme à la norme **NF EN 12350-2**.

- A l'état durci :
 - Les essais de résistances à la compression sur les éprouvettes cylindriques normalisés et d'élanement de ($\phi 10 \times 20$) cm, conformes à la norme **NF P 18-400, NA 2600**.
 - Les essais de flexion ont été effectués sur des éprouvettes prismatiques de dimensions ($7 \times 7 \times 28$) cm³, conformes à la norme **NF P 18-407**.
 - Essai ultrasonique **NF EN 12504-4**.

Pour chaque condition opératoire, un minimum de trois essais a été réalisé afin de vérifier la reproductibilité et la dispersion des résultats obtenus. Les graphes sont présentés et analysés parallèlement pour chaque variante.

IV.2 Formulation des bétons

Plusieurs formulations de béton ont été élaborées. Au total, quatre familles de béton ont été définies :

- **BT** : Béton témoin (0% de vase).
- **B5V** : Béton avec 5% de vase.
- **B10V** : Béton avec 10% de vase.
- **B15V** : Béton avec 15% de vase.

IV.3 Essai d'affaissement au cône d'Abrams

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams a été effectué sur les différents mélanges de béton. Cet essai permet d'évaluer la plasticité du béton et d'ajuster le dosage en fonction des performances souhaitées. L'ouvrabilité est une propriété essentielle, notamment pour la mise en œuvre sur chantier, car elle indique le niveau de difficulté potentiel lors du coulage. Les résultats de l'affaissement sont regroupés dans le **tableau IV-1**.

Tableau IV-1 : Affaissement des différents bétons.

Les types de béton	Affaissement (cm)
BT	19.5
B5V	19
B10V	20
B15V	19.5

Nous avons confectionné un béton fluide. L'affaissement varie entre 19 et 20 cm.

IV.4 La perte de masse

Afin d'évaluer la perte de masse en fonction du cycle de chauffage-refroidissement, les éprouvettes sont pesées avant et après chaque cycle. Afin d'éviter toute réhydratation due à l'humidité de l'air, les pesées après chauffage sont effectuées immédiatement, dès la sortie du four.

L'objectif de l'essai est de mesurer la quantité de matière perdue par les éprouvettes à la suite des cycles de chauffage, en comparant leur masse après chauffage à leur masse initiale. La perte de masse est exprimée en pourcentage selon la formule suivante :

$$\text{Perte de masse} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \%$$

Avec :

m_1 : la masse de l'éprouvette à la température ambiante (avant le chauffage),

m_2 : la masse de l'éprouvette refroidie après le cycle de chauffage-refroidissement.

Elles sont pesées à l'aide d'une balance électronique ayant une précision de 0,1g.

Nous avons calculé la perte de masse pour les éprouvettes cylindriques et prismatiques. Les résultats sont présentés dans les figures (IV-1) et (IV-2).

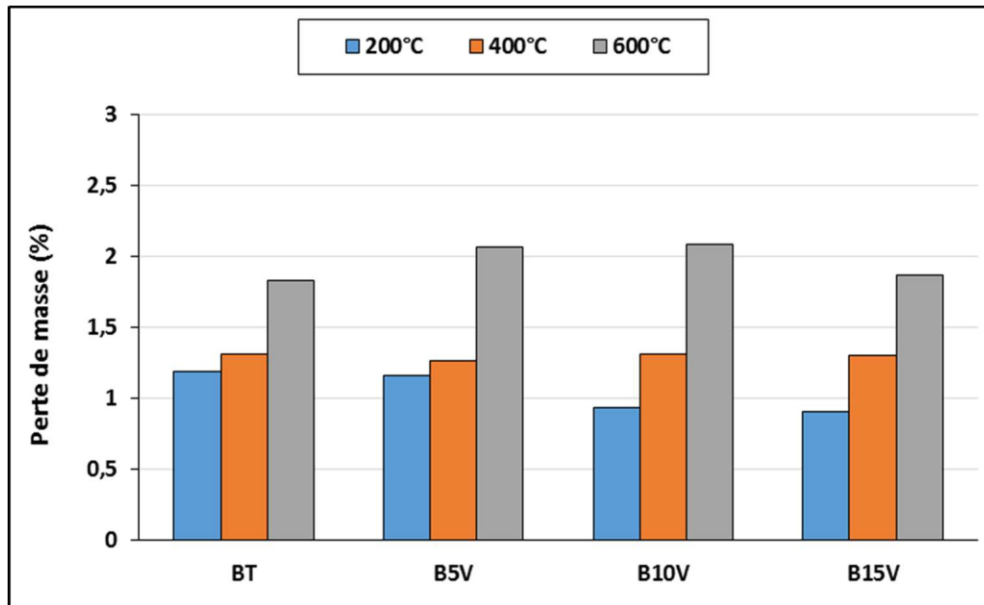


Figure IV-1 : Perte de masse des éprouvettes cylindriques.

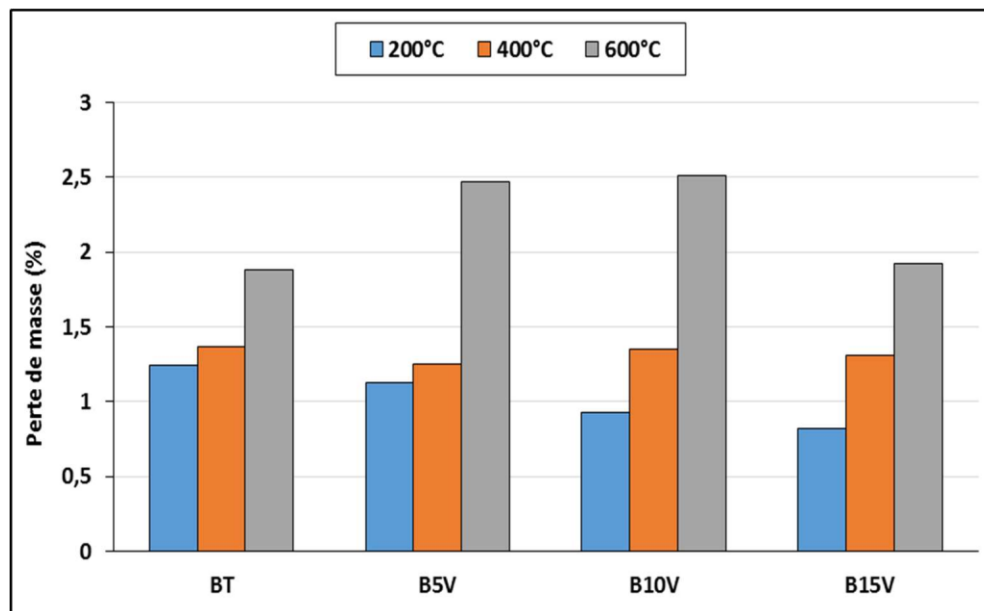


Figure IV-2 : Perte de masse des éprouvettes prismatiques.

Le calcul de la perte de masse est une moyenne de trois valeurs. Nous avons effectué le calcul sur les éprouvettes cylindriques et prismatiques. On remarque que plus la température augmente, plus la perte de masse augmente. Le béton avec 5% de vase (B5V) a présenté une perte de masse légèrement inférieure à celle du béton témoin à 200°C et 400°C. En ce qui concerne les bétons (B10V) et (B15V), les pertes de masse sont pratiquement de même grandeur.

A 600°C, le béton (B15V) a présenté une perte de masse légèrement inférieure par rapport à celles des bétons (B5V) et (B10V) et cela pour les deux cas d'éprouvettes (cylindriques et prismatiques).

IV.5 Essai de compression NF P 18-406

Tous les essais de compression ont été réalisés sur des cylindres (ϕ 10 – 20) cm. La résistance à la compression a été calculée par une moyenne de trois valeurs. Cet essai a pour objectif de déterminer la résistance à la compression des bétons étudiés. Il consiste à appliquer une charge croissante de manière continue sur des éprouvettes jusqu'à leur rupture.

La résistance à la compression en fonction du taux de substitution du ciment par la vase et la température appliquée sur les éprouvettes sont illustrées dans les figures suivantes :

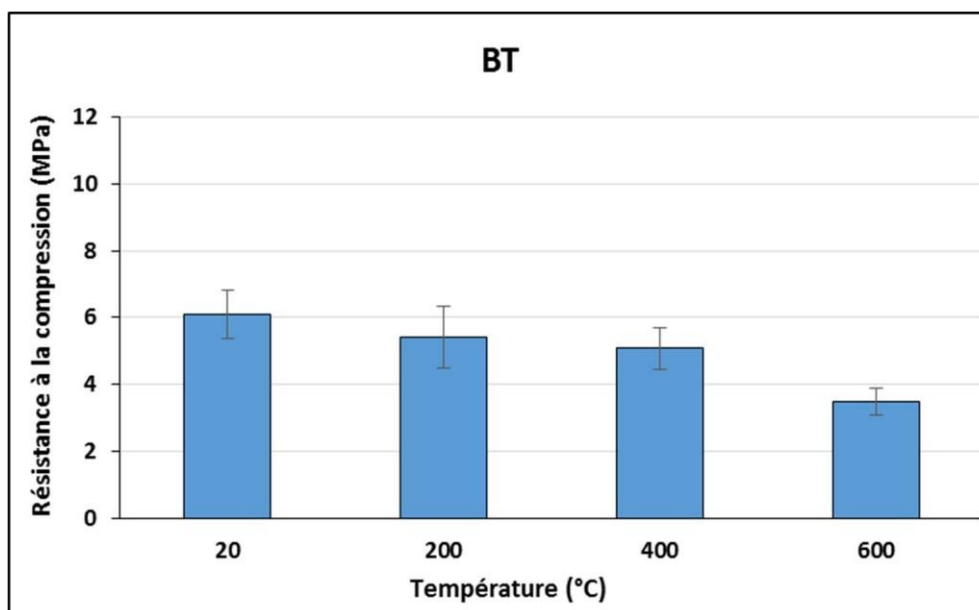


Figure IV-3 : Résistance à la compression du béton témoin (BT) pour les différentes températures étudiées.

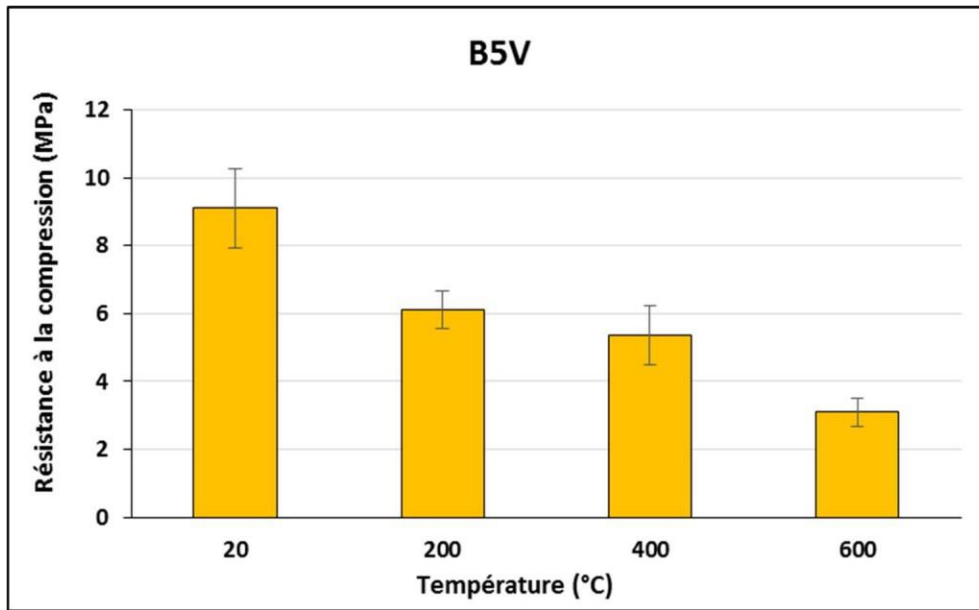


Figure IV-4 : Résistance à la compression du béton (B5V) pour les différentes températures étudiées.

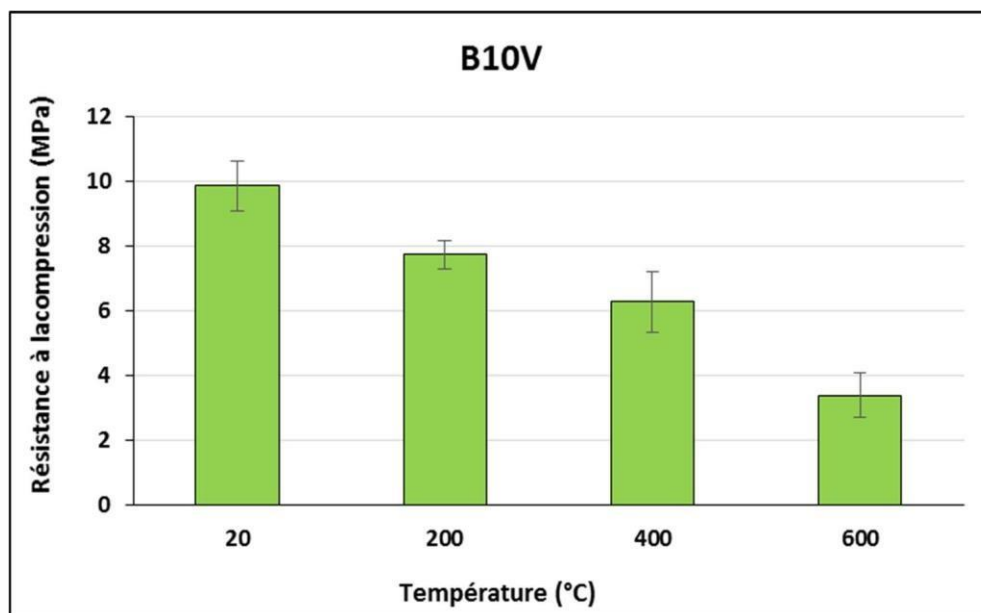


Figure IV-5 : Résistance à la compression du béton (B10V) pour les différentes températures étudiées.

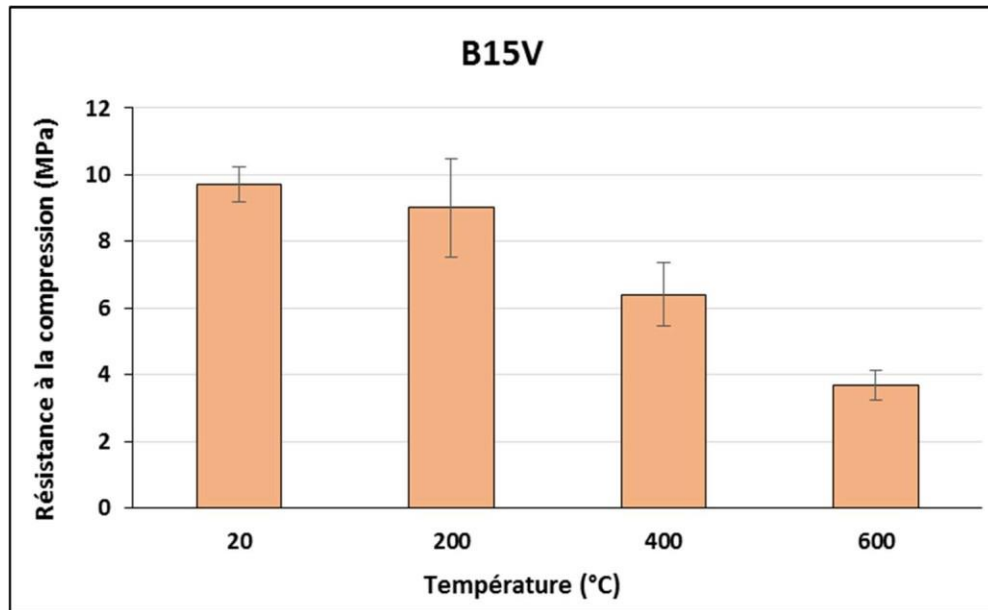


Figure IV-6 : Résistance à la compression du béton (B15V) pour les différentes températures étudiées.

Les figures (IV-3), (IV-4), (IV-5) et (IV-6) montrent l'évolution de la résistance à la compression des différents bétons étudiés.

À 20 °C, le béton présente une résistance moyenne de 6,10 MPa. Lorsque la température atteint 200 °C, la résistance diminue à 5,41 MPa. Cette baisse est due à la déshydratation partielle des produits d'hydratation du ciment et au début de la formation de microfissures internes.

À 400°C, une légère diminution de la résistance est observée (5,08 MPa). A 600 °C, la résistance chute fortement à 3,49 MPa, représentant une perte de plus de 40 % par rapport à l'état initial. La structure interne du béton est endommagée à cause de la décomposition de la portlandite, de la fissuration thermique et de la perte de liaison entre les granulats et la pâte de ciment. On remarque que plus on augmente le dosage de vase plus les résistances sont importantes par rapport au béton témoin et cela pour toutes les températures étudiées.

Les bétons qui contiennent de la vase (B5V), (B10V) et (B15V) ont présenté des résistances supérieures à celle du béton témoin et cela pour les températures de 20°C, 200°C et 400°C. En ce qui concerne la température de 600°C, la résistance à la compression des bétons avec vase diminue légèrement par rapport à celle du béton témoin.



Figure IV-7 : Aspect des éprouvettes cylindriques après rupture.

IV.6 Essai de traction par flexion trois points NF P 18-407

Nous avons déterminé la résistance en traction par flexion 3 points des éprouvettes prismatiques de dimensions $(7 \times 7 \times 28) \text{ cm}^3$ en calculant la valeur moyenne à partir de trois essais. Les résultats sont présentés pour chaque type de béton et pour chaque température étudiée.

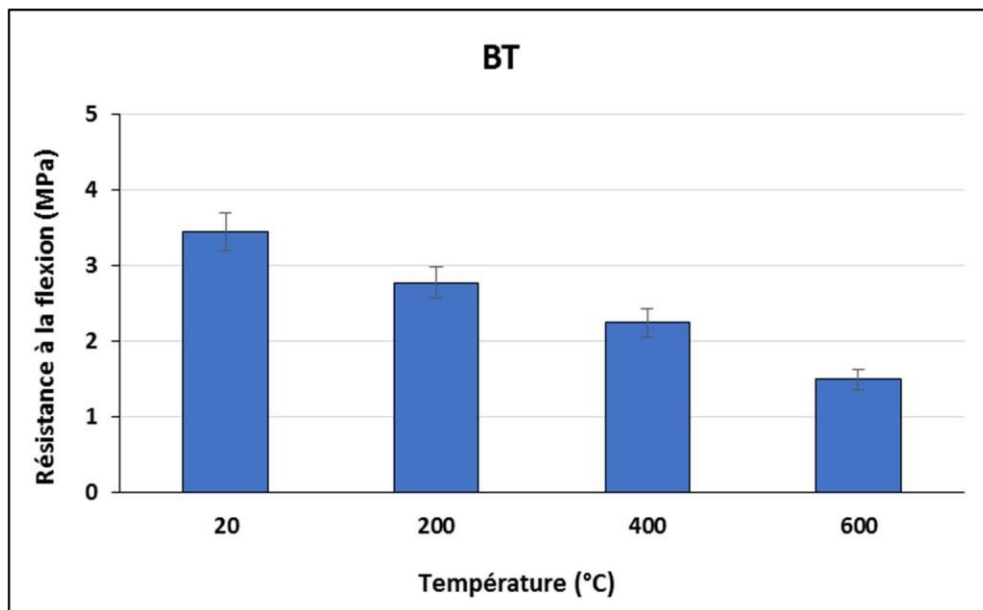


Figure IV-8 : Résistance à la flexion du béton témoin (BT) pour les différentes températures étudiées.

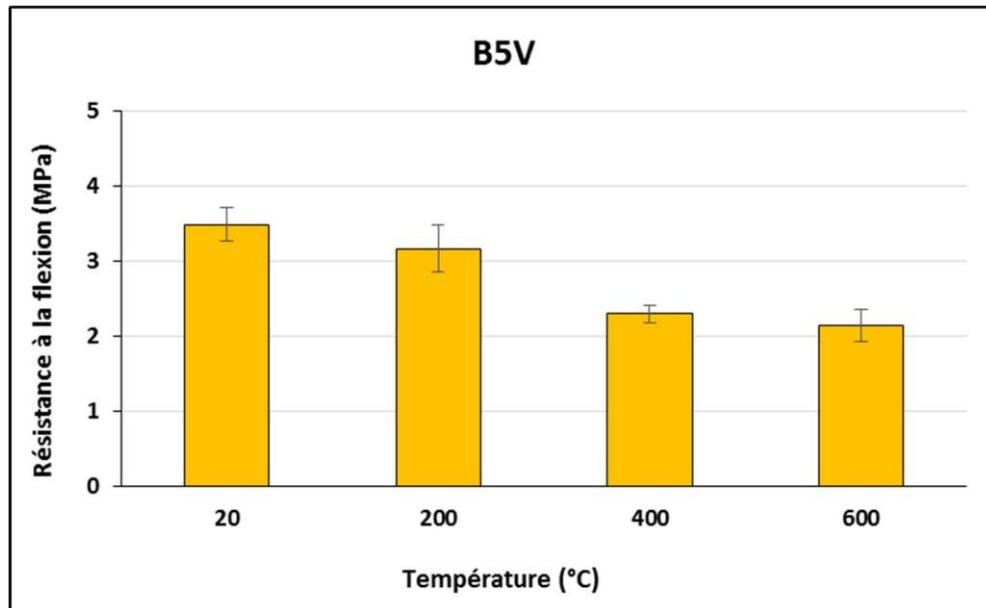


Figure IV-9 : Résistance à la flexion du béton (B5V) pour les différentes températures étudiées.

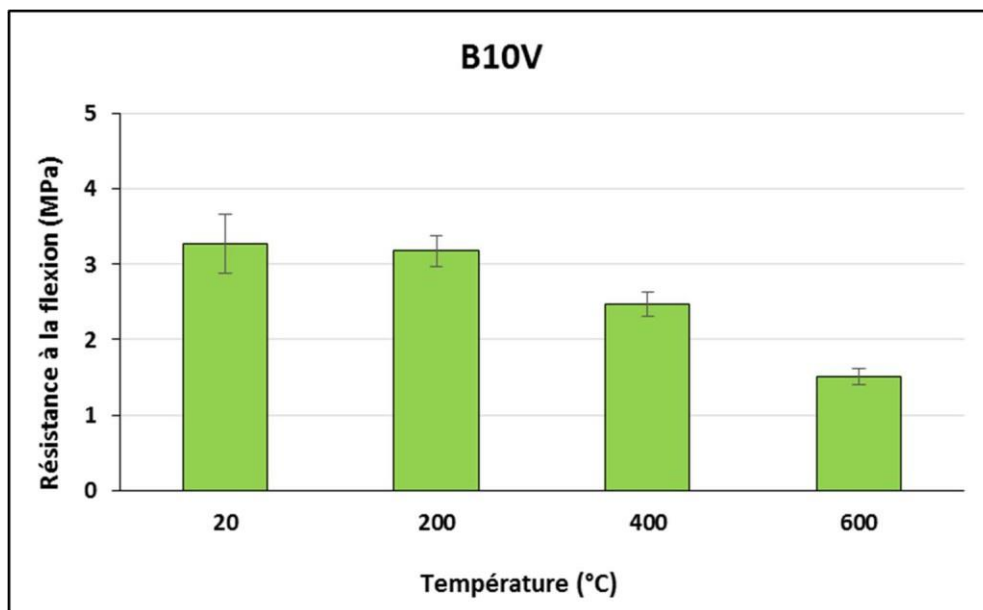


Figure IV-10 : Résistance à la flexion du béton (B10V) pour les différentes températures étudiées.

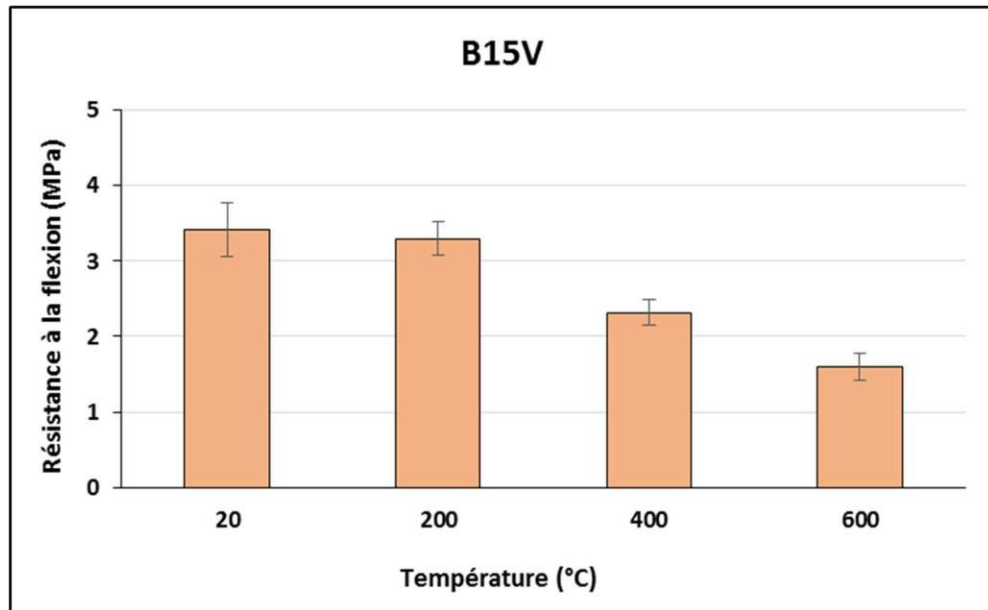


Figure IV-11 : Résistance à la flexion du béton (B15V) pour les différentes températures étudiées.

Les figures (IV-8), (IV-9), (IV-10) et (IV-11) montrent l'évolution de la résistance à la flexion des différents bétons étudiés. En augmentant la température, la résistance à la flexion des différents bétons étudiés diminue. Pour le béton témoin, on constate une diminution de 19% à 200°C, de 34% à 400°C et de 56% à 600°C. Pour les bétons avec 5% de vase (B5V), on constate une diminution de résistance de 9% à 200°C, de 34% à 400°C et de 38% à 600°C. Pour les bétons avec 10% de vase (B10V), il y'a une diminution de résistance de 2,7% à 200°C, de 24% à 400°C et de 54% à 600°C. Pour les bétons avec 15% de vase (B15V), il y'a une chute de résistance de 3,5% à 200°C, de 32% à 400°C et de 53% à 600°C.

Le béton avec vase a présenté des résistances à la flexion légèrement supérieures par rapport à celle du béton témoin et cela pour les températures de 20°C, 200°C et 400°C. Alors que pour la température de 600°C, les résistances ont pratiquement les mêmes grandeurs sauf pour le béton (B5V) qui a une résistance légèrement supérieure qui est de 2,14 MPa.



Figure IV-12 : Aspect des éprouvettes prismatiques après rupture.

IV.7 Essai ultrasonique NF EN 12504-4

Nous avons présenté l'évolution de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores en fonction de la température, pour les quatre formulations des bétons étudiés, mesurée sur des éprouvettes cylindriques.

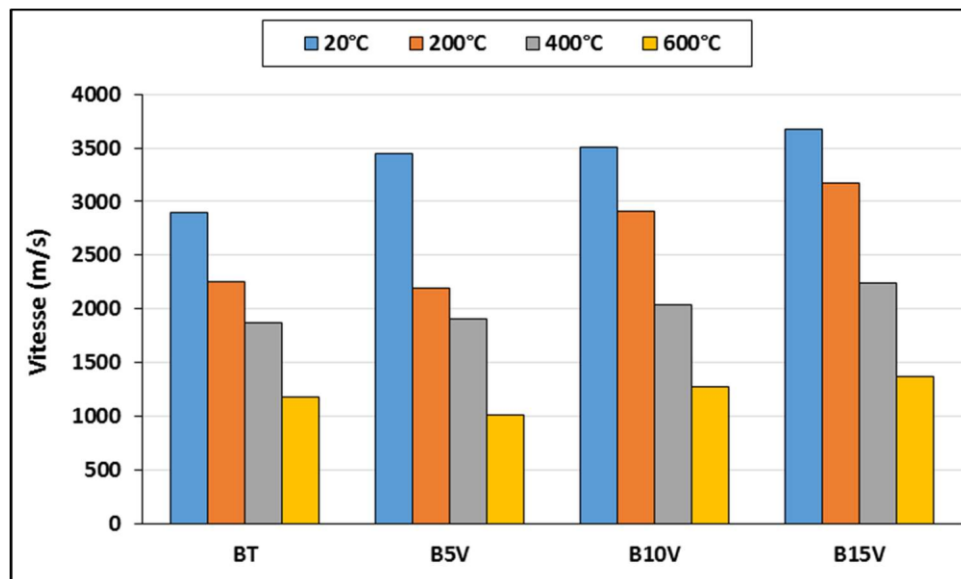


Figure IV-13 : Vitesse de propagation des ondes ultrasonores à travers les éprouvettes cylindriques.

La figure (IV-16) montre l'évolution de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores à travers les éprouvettes cylindriques. On remarque que plus la température augmente, la vitesse de propagation des ondes ultrasonores diminue et cela pour les différents bétons étudiés (béton sans vase et béton avec vase). A 20°C, les bétons avec vase ont une vitesse de propagation des ondes ultrasonores supérieure par rapport à celle du béton témoin (béton sans vase). Alors que pour les autres températures, on constate une légère diminution de la vitesse pour le béton (B5V), ensuite il y'a une augmentation de la vitesse pour les bétons (B10V) et (B15V). Pour toutes les températures étudiées, on peut conclure que l'ajout de la vase à fait augmenter la résistance à la compression et la vitesse de propagation des ondes ultrasonores des différents spécimens, ceci est confirmé par les régressions calculées qui montrent une bonne corrélation positive entre le pourcentage de vase et la vitesse de propagation des ondes ultrasonores, entre la résistance à la compression et la vitesse de propagation des ondes ultrasonores figures (IV- 14) et (IV-15).

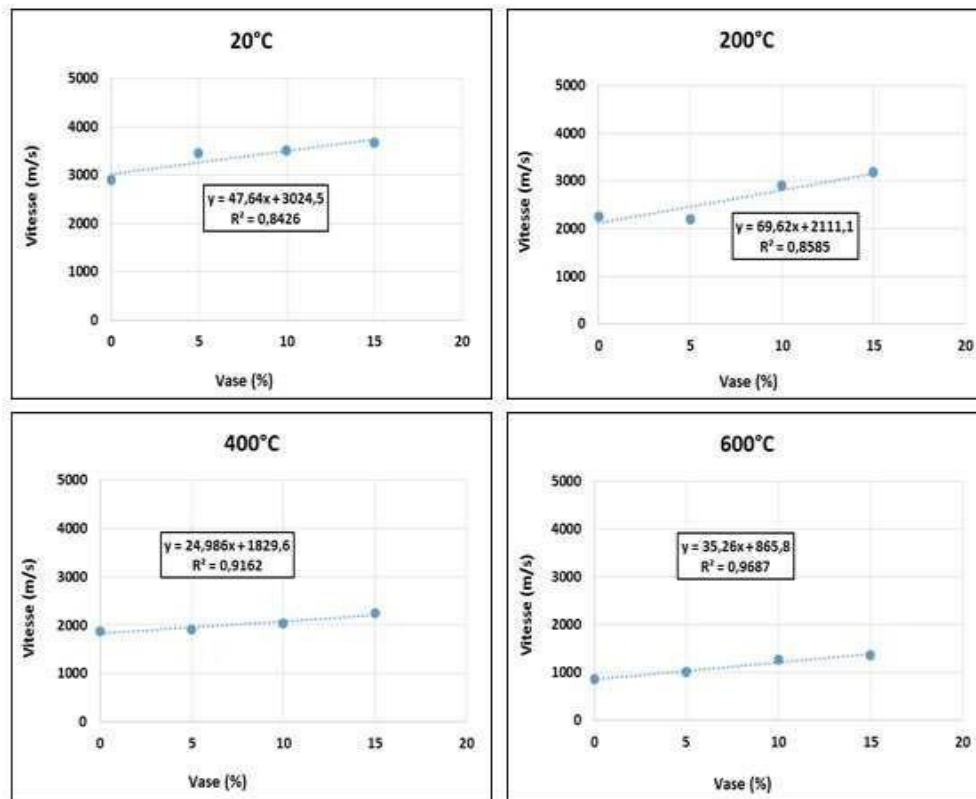


Figure IV-14 : Corrélations linéaires entre le pourcentage de vase et la vitesse de propagation des ondes ultrasonores.

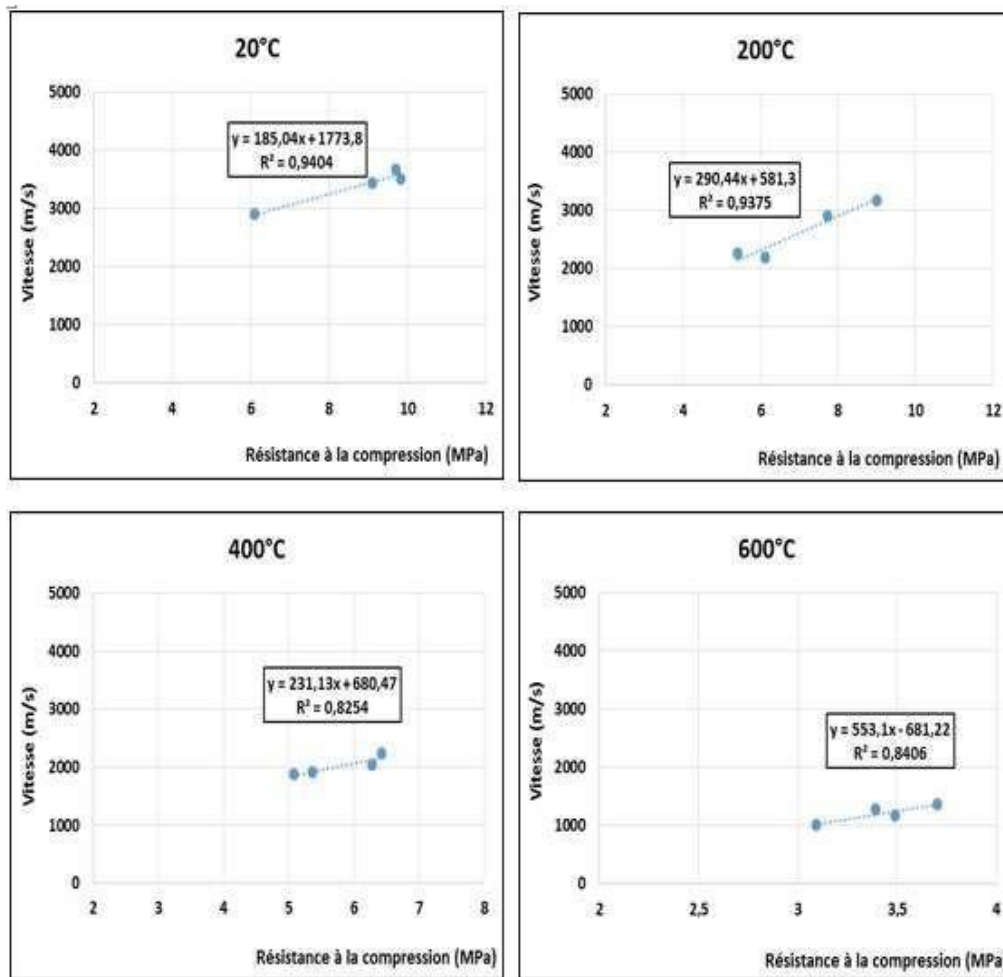


Figure IV-15 : Corrélations linéaires entre la résistance à la compression et la vitesse de propagation des ondes ultrasonores.

IV-8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents résultats des essais qu'on a réalisés sur les bétons étudiés au laboratoire du génie civil. On a confectionné quatre compositions différentes en faisant varier le taux de substitution de la vase (0%, 5%, 10% et 15%). Les éprouvettes sont soumises à quatre températures différentes qui sont : 20°C, 200°C, 400°C et 600°C. Les résultats ont montrés que lorsque la température augmente, la résistance diminue, et lorsque le taux de substitution de la vase augmente, la vitesse de propagation des ondes ultrasonores augmente aussi.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

Ce mémoire a porté sur l'étude du comportement du béton drainant soumis à des températures élevées, en intégrant de la vase calcinée de barrage comme substitution partielle au ciment. L'objectif de ce travail est de réduire l'utilisation du ciment qui est un matériau très polluant, et valoriser l'utilisation d'un déchet local dans le contexte de développement durable.

Quatre formulations ont été étudiées avec des taux de substitution de ciment par de la vase de 0%, 5 %, 10 % et 15 %. Toutes les éprouvettes ont été soumises aux mêmes températures : 20 °C, 200 °C, 400 °C et 600 °C, afin d'évaluer l'évolution des performances mécaniques et physiques de ces bétons dans des conditions thermiques sévères.

Les résultats obtenus montrent que :

- ❖ La perte de masse a augmenté avec la température pour toutes les formulations. Le béton avec 5% de vase a présenté une perte de masse légèrement inférieure à celle du béton témoin pour les températures de 200°C et 400°C. En ce qui concerne les bétons avec 10% et 15% de vase, les pertes de masse ont pratiquement la même grandeur. A 600°C, le béton avec 15% de vase a présenté une perte de masse légèrement inférieure par rapport à celles des autres bétons.
- ❖ Les bétons contenant de la vase ont présenté des résistances supérieures à celle du béton témoin et cela pour les températures de 20°C, 200°C et 400°C. A 600°C, la résistance à la compression des bétons avec vase diminue légèrement par rapport à celle du béton témoin. Cette chute de résistance est due à l'endommagement de la structure interne du béton causé par la décomposition de la portlandite, la fissuration thermique et de la perte de liaison entre les granulats et la pâte de ciment.
- ❖ Le béton avec vase a présenté des résistances à la flexion légèrement supérieures par rapport à celle du béton témoin et cela pour les températures de 20°C, 200°C et 400°C. Alors qu'à 600°C, les résistances ont pratiquement les mêmes grandeurs sauf pour le béton avec 5% de vase, ce dernier a présenté une résistance légèrement supérieure.

- ❖ Pour les différents bétons étudiés, la vitesse de propagation des ondes ultrasonores diminue lorsque la température augmente. L'ajout de la vase à fait augmenter la vitesse de propagation des ondes ultrasonores des différents spécimens, ceci est confirmé par les régressions calculées qui montrent une bonne corrélation positive entre le pourcentage de vase et la vitesse de propagation des ondes ultrasonores, entre la résistance à la compression et la vitesse de propagation des ondes ultrasonores.
- ❖ La substitution du ciment par de la vase calcinée dans les bétons drainants soumis aux hautes températures présente de très bonnes performances mécaniques pour une substitution allant de 10% à 15% ce qui réduit l'utilisation du ciment, la consommation d'énergie et l'émission du CO₂.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Bibliographie

- [1] ACIREPORT ON Pervious concrete, *American Concrete Institute*, Etats-Unis, 522R-10, 2011.
- [2] **K. KIBENGA**, *Nouvelle approche de formulation des bétons drainants aux propriétés mécaniques améliorées drainée*, 2013.
- [3] **A. b. Québec**, «Le béton drainant,» Techno BETON 19, Bulletin technique, 2023.
- [4] **CIMbéton**, «Le revêtement drainant coulé en place,» 2018.
- [5] **A. Neville**, *Propriétés des bétons*, Eyrolles, 2000.
- [6] **V. M. MALHOTRA**, «No-Fine Concrete- Its properties and applications.,» *Journal of the American Concrete Institute*, vol. 73, pp. 628-644, 1976.
- [7] **B. d. ciment**, «Les bétons poreux – leur fabrication, leurs propriétés et leur utilisation,» *Bulletin de ciment*, n° 14, Février 1993.
- [8] **Y. Wang** et **S. Lee**, «Effect of Admixtures on Properties of Pervious Concrete,» *Cement and Concrete Research*, vol. 40, p. 1234–1240, 2010.
- [9] **P. Zhifu**, «Influence of fibres on permeable concrete,» *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 3241-3247, 2011.
- [10] **K. Seifeddine**, *Mise au point d'une solution innovante de revêtements drainants et à effet rafraichissant*, Clermont-Ferrand: Université Clermont Auvergne, 2022.
- [11] **N. A. Brake**, **H. Allahdadi** et **F. Adam**, «Flexural strength and fracture size effects of pervious concrete,» *Construction and Building Materials*, vol. 113, p. 536–543, 2016.
- [12] **B. Toumi**, *Thèse de doctorat: Étude de l'influence des hautes températures sur le comportement du béton*, Université Mentouri Constantine, 2010.
- [13] **ToutSurLeBéton**, *Le béton drainant : caractéristiques, avantages et prix*, 2020.

- [14] **U. e. M. F. Costa**, «From materials science to construction materials engineering,» chez *1st International RILEM Congress*, Versailles, 1987.
- [15] **A. C. 363**, «State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete (ACI 363R-92),» ACI Manual of Concrete Practice, Detroit, MI, 1993.
- [16] **A. Menou**, *These de doctorat: Étude du comportement thermomécanique des bétons à haute température : Approche multi échelles de l'endommagement thermique*, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2004.
- [17] **I. Hager**, *Comportement à haute température des bétons à haute performance – évolution des principales propriétés mécaniques*, Thèse de doctorat: École Nationale des Ponts et Chaussées et École Polytechnique de Croatie, 2004.
- [18] **T. Harmathy**, «Moisture in materials in relation to fire test,» *ASTM Special Technical Publication*, vol. 385, pp. 74-95, 1964.
- [19] **K. Hertz**, «Limits of spalling of fire-exposed concrete,» *Fire Safety Journal*, vol. 38, p. 103–116, 2003.
- [20] **N. Noumowé**, «Temperature Distribution and Mechanical Properties of High-Strength Silica Fume Concrete at Temperatures up to 200°C,» *ACI Materials Journal*, n° 100-M39, p. 326–330, 2003.
- [21] **R. Both**, «The behaviour of unprotected loaded concrete tunnel linings subjected to RWS hydrocarbon fire,» 2000-R01360, TNO, 2000.
- [22] **R. Haddad**, R. Al-Saleh et N. Al-Akhras, «Effect of elevated temperature on bond between steel reinforcement and fiber reinforced concrete,» *Fire Safety Journal*, p. DOI : 10.1016/j.firesaf.2007.11.002, 2007.
- [23] **ArupFire**, «HSE – Fire resistance of concrete enclosures,» Rev B, Work Package 1: Data collection, Work Package 2: Spalling categories, Work Packages 5 and 6: Heat transfer modeling in response to two of the HSE design fires, Work Package 7: look-up tables, Work, 2005.

- [24] **J.-C. Mindeguia**, *Contribution expérimentale à la compréhension des risques d'instabilité thermique des bétons*, Thèse de doctorat: Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2009.
- [25] **M. Kanema**, *These de doctorat: Influence des paramètres de formulation sur le comportement à haute température des bétons*, Université de Cergy-Pontoise, 2007.
- [26] **C. e. F. L. Alonso**, «Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments,» *Journal of Materials Science*, vol. 39, pp. 3015-3024, 2004.
- [27] **C. Laneyrie**, *Thèse de doctorat (ou Ph.D Expérimentale): Valorisations des déchets de chantier du BTP : comportement à haute température des bétons de granulats recyclées*, Université de Cergy-Pontoise, 2014.
- [28] **Z. Xing**, *These de doctorat: Influence de la nature minéralogique des granulats sur leur comportement et celui du béton à haute température*, Université de Cergy-Pontoise, 2011.
- [29] **A. Noumowé**, *Thèse de doctorat: Effet de hautes températures (20–600°C) sur le béton. Cas particulier du béton à hautes performances*, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1995.
- [30] **V. T. Nguyen**, *Thèse de doctorat :Comportement des bétons ordinaire et à hautes performances soumis à haute température. Application à des éprouvettes de grandes dimensions*, Université de Cergy-Pontoise, 2013.
- [31] **C. Q. W. S. M. Li**, «Mechanical properties of high-strength concrete after fire,» *Cement and Concrete Research*, vol. 34, pp. 1001-1005, 2004.
- [32] **V. Kodur**, «Thermal Properties of Pervious Concrete and Their Impact on Fire Resistance,» *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020.
- [33] **I. Hager**, «Behaviour of Cement Concrete at High Temperature,» *Bulletin of the Polish Academy of Sciences*, 2013.

- [34] **S. Y. J. F. D. D. Mindess**, Concrete, 2 éd., P. Hall, Éd., Upper Saddle River, NJ, 2003.
- [35] **L. T. Phan**, «Fire Performance of High-Strength Concrete: A Report of the State-of-the-Art,» National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2008.
- [36] **Lafarge**, *fiche produit ciment mâtine tm en français*,
<https://www.lafarge.dz/sites/algeria/files/docs/fiche-produit-ciment-matine-tm-en-francais.pdf>.

Résumé

Le béton drainant, aussi appelé béton perméable, est un matériau de construction innovant conçu pour favoriser l'infiltration des eaux pluviales grâce à sa structure poreuse constituée de vides interconnectés. Cette propriété lui confère des avantages majeurs en matière de gestion des eaux de ruissellement, notamment en milieu urbain. Cette étude s'intéresse à l'étude du comportement du béton drainant soumis à des températures élevées, en intégrant un ajout cimentaire à base de vase de barrage calcinée. L'étude a consisté à formuler plusieurs compositions de béton drainant, en variant le pourcentage de vase (0 %, 5 %, 10 %, 15 %), puis à soumettre les échantillons à différentes températures (20°C, 200°C, 400°C, 600°C). Les essais réalisés comprennent l'affaissement au cône d'Abrams, la perte de masse, la vitesse ultrasonique, la résistance à la compression et la résistance à la flexion. Les résultats ont montré que l'ajout de vase permet d'obtenir de bonnes résistances mécaniques sous haute température. Cette étude confirme ainsi la possibilité d'utiliser des matériaux recyclés comme la vase de barrage dans la formulation de bétons drainants, tout en assurant une certaine résistance au feu, ce qui ouvre des perspectives intéressantes pour des applications durables et performantes.

Mots clés : Béton drainant, haute température, vase de barrage, résistances mécaniques.

Abstract

Pervious concrete, also known as permeable concrete, is an innovative construction material designed to promote the infiltration of rainwater thanks to its porous structure of interconnected voids. This property gives it major advantages in terms of stormwater management, particularly in urban environments. This study investigates the behavior of pervious concrete subjected to high temperatures, incorporating a cementitious additive based on calcined mud. The study consisted in formulating several compositions of pervious concrete, varying the percentage of mud (0%, 5%, 10%, 15%), then subjecting the samples to different temperatures (20°C, 200°C, 400°C, 600°C). Tests performed included Abrams cone slump, mass loss, ultrasonic velocity, compressive strength and flexural strength. The results showed that the addition of mud enables good mechanical strengths to be obtained at high temperatures. This study thus confirms the possibility of using recycled materials such as mud in the formulation of pervious concretes, while ensuring a certain fire resistance, which opens up interesting prospects for sustainable, high-performance applications.

Keywords: Pervious concrete, high temperature, mud, mechanical strength.