



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed
معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Sécurité Industrielle et Environnement

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Sécurité Industrielle
Spécialité : Sécurité Industrielle et Environnement

Thème

**Evaluation de L'impact de feu sur les éléments structuraux avec le logiciel
Ansys**

Présenté et soutenu publiquement par :

YADI Rayane

SAADAT Khaled

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Aoumeur Nabila	MCB	IMSI	Président
Talbi Zahera	MCB	IMSI	Encadreur
Mechken Amel	MCB	IMSI	Examineur

Juin 2024

Remerciements

Je remercie ceux qui m'ont fait confiance, qui m'ont montré le chemin : notre encadreur Mme Talbi Zahera, la team Sorfert et les enseignants de IGCMO Mme Herrouane et Mr Amirane qui m'ont aidée à maîtriser le logiciel ANSYS. J'ai une pensée pour mon père, ma mère, mes frères, mes proches. Enfin, toutes mes pensées vont à ma mère, pour son dévouement éternel, ses sacrifices et son attention sans limite depuis le début de mon cursus. Elle est toujours à mes côtés. Je lui dédie ce projet de fin d'étude. Maintenant j'en profite pour remercier mes collègues de l'IMSI, pour leur sympathie et l'ambiance amicale.

Saadat Khaled

Je remercie ceux qui m'ont fait confiance, qui m'ont montré le chemin : notre encadreur Mme Talbi Zahera, la team Sorfert et les enseignants de IGCMO Mme Herrouane et Mr Amirane qui m'ont aidée à maîtriser le logiciel ANSYS. J'ai une pensée pour mon père, ma mère, mes frères, mes proches. Enfin, toutes mes pensées vont à ma mère, pour son dévouement éternel, ses sacrifices et son attention sans limite depuis le début de mon cursus. Elle est toujours à mes côtés. Je lui dédie ce projet de fin d'étude. Maintenant j'en profite pour remercier mes collègues de l'IMSI, pour leur sympathie et l'ambiance amicale.

Yadi Rayane

Dédicace :

Je dédie ce mémoire à mes parents et mes frères pour leur soutien indéfectible et leurs encouragements constants tout au long de mes études. Leur amour et leurs sacrifices ont été une source de motivation inestimable pour moi. Je dédie également ce travail à mes amis et collègues, qui ont partagé avec moi les moments de stress et de joie, et m'ont offert leur aide précieuse. Enfin, je souhaite dédier ce mémoire à mes enseignants, pour leur patience, leurs conseils avisés et leur engagement envers notre formation.

Saadat Khaled

Je dédie ce mémoire à mes parents et mon frère pour leur soutien indéfectible et leurs encouragements constants tout au long de mes études. Leur amour et leurs sacrifices ont été une source de motivation inestimable pour moi. Je dédie également ce travail à mes amis et collègues, qui ont partagé avec moi les moments de stress et de joie, et m'ont offert leur aide précieuse. Enfin, je souhaite dédier ce mémoire à mes enseignants, pour leur patience, leurs conseils avisés et leur engagement envers notre formation.

Yadi Rayane

Liste des notions :

JC=jésus Christ

E/C=rapport eau sur ciment

Um=micro mètre

CAO=oxyde de calcium

LGHF=laitier granule haut fourneau

MPa=méga pascal

BPR=béton poudre réactive

D=dimension inférieur du granulat

d=dimension supérieure du granulat

PFUHP=béton fibre ultra haute performance

Kg=kilo gramme

Kcal=kilo calories

CSH=silicate calcium hydraté

MEB= microscope électronique à balayage

BHP=béton haute performance

ATG=analyse thermo gravimétrique

ATD=analyse thermique différentielle

BO=béton ordinaire

RC=résistance a la compression

DTSC=déformation thermique sous charge

DT=déformation thermique

DTT=déformation thermique transitoires

APDL=ansys parametric design language

3D=3 dimensions

Mm=Mili mètres

H=heure

Cm=centimètres

Ca(OH)₂=portlandite-hydroxyde de calcium

C2S=silicate bicalcique

C3S=silicate tricalcique

CaCO₃=calcaire

Résumé :

Ce mémoire explore l'impact du feu sur les éléments structurels en se concentrant sur le comportement du béton à des températures élevées, spécifiquement à 593 degrés Celsius. En utilisant le logiciel ANSYS APDL, des simulations sont réalisées pour étudier la déformation du béton sous l'effet de la chaleur extrême. La méthodologie de simulation comprend une modélisation détaillée des éléments structurels en béton, suivie d'une analyse numérique pour évaluer la distribution de la chaleur et la déformation du matériau. Les résultats obtenus permettent de mieux comprendre le comportement du béton lorsqu'il est exposé à des températures élevées, fournissant ainsi des informations précieuses pour la conception et la sécurité des structures dans des environnements incendiaires. Ce travail contribue à l'avancement des connaissances dans le domaine de l'ingénierie des structures en examinant de près les effets thermiques sur les matériaux de construction, avec une application spécifique du logiciel ANSYS pour simuler le comportement du béton à des températures élevées.

ABSTRACT

Abstract:

This research explores the impact of fire on structural elements with a focus on the behavior of concrete at high temperatures, specifically at 593 degrees Celsius. Using the ANSYS APDL software, simulations are conducted to study the deformation of concrete under extreme heat. The simulation methodology includes detailed modeling of concrete structural elements, followed by numerical analysis to evaluate heat distribution and material deformation. The resulting findings provide a deeper understanding of concrete behavior when exposed to high temperatures, thus providing valuable insights for the design and safety of structures in fire environments. This work contributes to the advancement of knowledge in the field of structural engineering by closely examining the thermal effects on building materials, with a specific application of ANSYS software to simulate concrete behavior at high temperatures

ملخص:

يستكشف هذا البحث تأثير الحريق على العناصر الهيكلية مع التركيز على سلوك الخرسانة عند درجات حرارة مرتفعة، بالتحديد عند 593 درجة مئوية. باستخدام برنامج ANSYS APDL ، يتم إجراء محاكاة لدراسة تشوه الخرسانة تحت تأثير الحرارة الشديدة. تتضمن منهجية المحاكاة نمذجة مفصلة للعناصر الهيكلية من الخرسانة، تلتها تحليل رقمي لتقييم توزيع الحرارة وتشوه المادة. توفر النتائج المحصلة فهماً أعمق لسلوك الخرسانة عند تعرضها لدرجات حرارة مرتفعة، مما يوفر معلومات قيمة لتصميم وأمان الهياكل في بيئات الحرائق. يساهم هذا العمل في تطوير المعرفة في مجال هندسة الهياكل من خلال فحص تأثير الحرارة على مواد البناء بتطبيق محدد لبرنامج ANSYS لمحاكاة سلوك الخرسانة في درجات حرارة مرتفعة.

Sommaire

Introduction générale :	1
Chapitre 1	3
1 Introduction	3
2 Historique	3
3 Définition d'un béton	3
4 Composition du béton	4
4.1 Les granulats	4
4.2 Classification des granulats	4
4.3 Les différents types de granulats	5
4.4 L'eau de gâchage	9
5 Ajouts cimentaires	9
5.1 Définition des ajouts cimentaires	9
5.2 Classification des ajouts	9
5.3 Bénéfices de l'utilisation des ajouts cimentaire	10
5.3.1 Bénéfices écologiques et environnementaux	10
5.3.2 Bénéfices fonctionnels	10
5.3.3 Bénéfices économiques	10
5.4 Les différents types d'ajouts aux ciments	11
5.4.1 Les cendres volantes(V)	11
5.4.1.1 La pouzzolane	11
5.4.1.2 Définition	11
5.4.1.3 Types de pouzzolane	12
5.4.1.4 Effet de La pouzzolane	14
5.5 Béton de fibres	14
5.6 Béton de poudre réactive (BPR)	15
6 Propriétés mécaniques du béton	15
6.1 La résistance mécanique à la compression du 1 ^{er} jour jusqu'au-delà des 28 jours : ..	15
6.2 La durabilité	17
6.3 La compacité et la porosité	17
6.4 La tenue au feu	17
6.5 La capacité d'isolation thermique et acoustique	18
6.6 La résistance au choc et la ductilité	18
7 Evolution des propriétés thermiques du béton avec la température	18
7.1 La conductivité thermique	19

SOMMAIRE

7.2	Chaleur spécifique.....	20
7.3	Diffusivité thermique.....	21
Chapitre 2		22
1	Introduction	22
2	Comportement au feu des structures en béton lors d'incendie.....	22
3	Comportement du béton à haute température.....	25
3.1	Effet des hautes températures sur la microstructure du béton	25
3.1.1	L'Effet de la température sur la pâte de ciment	26
3.1.2	L'effet de la température sur les granulats	29
3.1.3	Dégradation de l'interface pâte-granulats.....	31
3.1.4	Evolution de la porosité.....	32
3.1.5	Perte de masse	37
3.2	Déformation thermique du béton à hautes températures	38
3.2.1	Déformation thermique de la pâte de ciment.....	38
3.2.2	Déformation thermique des granulats	39
3.2.3	Déformation thermique du béton	40
3.2.4	Déformation thermique transitoire	41
4	Conclusion	44
Chapitre 3		45
1	Introduction à ANSYS APDL	45
2	Présentation de l'interface utilisateur	45
2.1	Panneau de commandes.....	45
2.2	Visualiseur 3D.....	45
2.3	Gestionnaire de projet.....	45
3	Définition de la géométrie et du maillage	46
3.1	Création de la géométrie	46
3.2	Maillage de la géométrie	47
3.3	Optimisation du maillage.....	47
4	Spécification des propriétés des matériaux	47
4.1	Matériaux isotropes	47
4.2	Matériaux anisotropes	48
4.3	Matériaux non linéaires	48
4.4	Bibliothèque de matériaux	48
5	Définition des conditions aux limites et des charges	49
5.1	Conditions aux limites.....	49

SOMMAIRE

5.2	Charges appliquées.....	49
5.3	Charges thermiques	49
5.4	Charges dynamiques.....	49
6	Résolution du problème et analyse des résultats	49
6.1	Résolution du problème	49
6.2	Visualisation des résultats.....	49
6.3	Analyse des performances	50
7	Optimisation du modèle et des paramètres.....	50
7.1	Définition des paramètres	50
7.2	Analyse de sensibilité	50
7.3	Processus d'optimisation.....	50
8	Conclusion et perspectives	50
Chapitre 4		51
1	Introduction.....	51
2	La dimension des structures.....	51
3	Les propriétés physiques du matériau	52
4	Modélisation.....	52
4.1	Modélisation de la cabine électrique :	53
5	Résultats de la simulation	53
5.1	Résultats de la simulation détaillé.....	56
5.1.1	Simulation des piliers	56
5.1.2	Simulation des poutres	59
5.1.3	Simulation de la dalle	62
6	Prévention et intervention contre l'incendie électrique	64
6.1	Prévention contre l'incendie	64
6.1.1	Prévention	64
6.1.2	Formation du personnel.....	64
6.1.3	Équipement de lutte contre l'incendie	64
6.2	Intervention en cas d'incendie	65
6.2.1	Plan intervention	65
6.2.2	Intervention en cas d'incendie	66
6.3	Après l'incident	66
7	Conclusion	66
Reference Bibliographie.....		70

Liste des Figure

FIGURE 1. 1 PHOTOS DES DIFFERENTS TYPES DE GRANULATS	6
FIGURE 1. 2 LA POZZOLANE	11
FIGURE 1. 3 LES DIFFERENTS TYPES DE POZZOLANE	12
FIGURE 1. 4 ÉVOLUTION DE LA RESISTANCE DU BETON EN FONCTION DU NOMBRE DE JOURS DE SECHAGE (21).....	15
FIGURE 1. 5 DURABILITE D'UNE STRUCTURE EN BETON SOUMISE A LA CORROSION DE L'EAU (21).....	17
FIGURE 1. 6 BETON "FLEXIBLE" (21).....	18
FIGURE 1. 7 EVOLUTION DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE DE DIFFERENTS BETONS AVEC LA TEMPERATURE. A GAUCHE, L'EFFET DE TYPE DES AGREGATS (22).À DROITE, L'EFFET DE TYPE DU BETON (26).....	19
FIGURE 1. 8 VARIATION DE LA CHALEUR SPECIFIQUE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE (27).....	20
FIGURE 1. 9 VARIATION DE LA DIFFUSIVITE THERMIQUE DE DIFFERENTS TYPES DE BETON AVEC LA TEMPERATURE (27).....	21
FIGURE 2. 1 À GAUCHE, PHOTO DU BATIMENT WINDSOR A MADRID APRES L'INCENDIE. À DROITE, DESSOUS DU TABLIER DU PONT A BRUXELLES APRES L'INCENDIE (29).....	23
FIGURE 2. 2 EXEMPLES DE DESORDRES DE DIFFERENTES CLASSES, A/ ECAILLAGE SUPERFICIEL, B/DISPARITION DU BETON D'ENROBAGE DES ARMATURES, C/ LES ARMATURES SONT TOTALEMENT DEGAGEES ET LA PERTE DE L'ÉPAISSEUR DE BETON ATTEINT 50% (30).....	24
FIGURE 2. 3 EVOLUTION DE LA QUANTITE DES PHASES DE LA PATE DE CIMENT PORTLAND AU COURS D'UN TRAITEMENT THERMIQUE (32).....	27
FIGURE 2. 4 OBSERVATION AU MEB DE DEUX ECHANTILLONS DE PATE DE CIMENT DURCIE D'UN BETON : A TEMPERATURE AMBIANTE (CLICHE DE GAUCHE) ET A 600 °C (CLICHE DE DROITE) (33)	27
FIGURE 2. 5 À GAUCHE, OBSERVATION AU MEB DE LA PATE DE CIMENT DURCIE D'UN BETON APRES UN INCENDIE SELON (30), A DROITE CLICHE D'UNE CAROTTE PRELEVEE DANS UNE DALLE EN BETON APRES 2 HEURES (34)	28
FIGURE 2. 6 EVOLUTION DE LA QUANTITE DE PORTLANDITE ET DE CALCITE DANS UNE PATE DE CIMENT, AU COURS DE L'ÉCHAUFFEMENT, (35)	29
FIGURE 2. 7 PERTE DE MASSE DE DEUX TYPES DE GRANULATS (CALCAIRE ET SILICEUX) (38).....	30
FIGURE 2. 8 ETUDE DE LA STABILITE THERMIQUE ET DES TRANSFORMATIONS PHYSICO-CHIMIQUES DE DIVERS GRANULATS EN FONCTION DE LA TEMPERATURE (39).....	30
FIGURE 2. 9 DEFORMATIONS THERMIQUES DE BETONS FORMULES AVEC DIFFERENTS GRANULATS (35)	31
FIGURE 2. 10 MECANISMES LIES AUX INCOMPATIBILITES PATE-GRANULAT (41).....	32
FIGURE 2. 11 POROSITE TOTALE A L'EAU EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DE CONDITIONNEMENT (26) .	33
FIGURE 2. 12 POROSITE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DE CONDITIONNEMENT (31).....	34
FIGURE 2. 13 VARIATION DE POIDS EN FONCTION DE LA TEMPERATURE (31)	34
FIGURE 2. 14 PERTE EN MASSE DES EPROUVETTES PAR RAPPORT A L'ÉTAT INITIAL, EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DE CONDITIONNEMENT (26).....	35
FIGURE 2. 15 ÉVOLUTION DE LA DISTRIBUTION POROSIMETRIQUE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE MESUREE PAR LA TECHNIQUE D'INTRUSION DE MERCURE PAR NOUMOWE (42). A GAUCHE, BETON ORDINAIRE, A DROITE, BETON A HAUTES PERFORMANCES.....	36
FIGURE 2. 16 PERTE DE MASSE DES BETONS DE DIFFERENTS TYPES DE GRANULATS EN FONCTION DE LA TEMPERATURE (43).....	37
FIGURE 2. 17 PERTE DE MASSE DURANT L'ÉCHAUFFEMENT ET VITESSE DE PERTE DE MASSE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE (44)	38
FIGURE 2. 18 DILATATION THERMIQUE DE LA PATE DE CIMENT DURCIE SELON QUATRE DIFFERENTS TRAVAUX (27)	39
FIGURE 2. 19 EVOLUTION DE LA DILATATION THERMIQUE DE DIFFERENTS TYPES DE ROCHES AVEC LA TEMPERATURE (44).....	40
FIGURE 2. 20 DEFORMATION THERMIQUE DE QUATRE DIFFERENTS BETONS CONFECTIONNES AVEC DES GRANULATS CALCAIRES ET SILICO-CALCAIRES (45).....	41
FIGURE 2. 21 DEFORMATION THERMIQUE (DT), DEFORMATION THERMIQUE SOUS CHARGE (DTSC) ET DEFORMATION THERMIQUE TRANSITOIRE (DTT) DETERMINEES SUR LES BETONS BO ET BHP AVEC GRANULATS CALCAIRES, ET BHP AVEC GRANULATS SILICO-CALCAIRES (47).....	43

LISTE DES FIGURE ET TABLEAU

FIGURE 3. 1 INTERFACE ANSYS APDL (48)	46
FIGURE 3. 2 CREATION DE LA GEOMETRIE (48)	47
FIGURE 3. 3 DEFINIR LE COMPORTEMENT DU MODELE DE MATERIAU (48)	48
FIGURE 3. 4 BIBLIOTHEQUE DE TYPES D'ELEMENTS (48)	48
FIGURE 4. 1 ZOOM SUR LA CABINE ELECTRIQUE SUR LE SITE DE SORFERT (49)	52
FIGURE 4. 2 MODELISATION DE LA CABINE ELECTRIQUE	53
FIGURE 4. 3 RESULTAT DANS 0H + FLUX THERMIQUE	54
FIGURE 4. 4 DEFORMATION APRES 1H D'INCENDIE + FLUX THERMIQUE	55
FIGURE 4. 5 DANS 0H ETAT DES 4 PILIER + FLUX THERMIQUE (VUE ISOMETRIQUE)	56
FIGURE 4. 6 DANS 0H ETAT DE 1 DES 4 PILIERS + FLUX THERMIQUE (VUE ISOMETRIQUE)	56
FIGURE 4. 7DANS 0H ETAT DES 4 PILIER + FLUX THERMIQUE (VUE DESSUS)	57
FIGURE 4. 8 DEFORMATION DES 4 PILIERS DANS LE TEMPS = 1H + FLUX THERMIQUE	57
FIGURE 4. 9 GRAPHE DE LA DEFORMATION DES PILIERS EN FONCTION DE LA DISTANCE DANS UN TEMPS = 1H	58
FIGURE 4. 10ETAT DES POUTRES DANS LE TEMPS= 0H HEURE + FLUX THERMIQUE (VUE ISOMETRIQUE)	59
FIGURE 4. 11 ETAT DES POUTRES DANS LE TEMPS = 0H + FLUX THERMIQUE (VUE EN DESSOUS)	59
FIGURE 4. 12 DEFORMATION DES POUTRES DANS LE TEMPS = 1H + FLUX THERMIQUE (VUE ISOMETRIQUE)	60
FIGURE 4. 13 GRAPHE DE LA DEFORMATION DES POUTRES EN FONCTION DE LA DISTANCE DANS UN TEMPS = 1H	61
FIGURE 4. 14 ETAT DE LA DALLE DANS LE TEMPS= 0H HEURE + FLUX THERMIQUE (VUE ISOMETRIQUE)	62
FIGURE 4. 15 DEFORMATION DE LA DALLE DANS LE TEMPS = 1H + FLUX THERMIQUE (VUE ISOMETRIQUE)	62
FIGURE 4. 16 GRAPHE DE LA DEFORMATION DE LA DALLE EN FONCTION DE LA DISTANCE DANS UN TEMPS = 1H	63
FIGURE 4. 17 DETECTEUR DE FUMEE (50)	65

Liste des tableaux

TABEAU 1. 1LA TENEUR DES CONSTITUANTS DU BETON EN POIDS ET EN VOLUME (2)	3
TABEAU 1. 2 CLASSES GRANULAIRES PRINCIPALES (3)	5
TABEAU 1. 3 CLASSIFICATION DES AJOUTS SELON LEUR REACTIVITE (13)	10
TABEAU 1. 4 (16 CLASSES DE RESISTANCE A LA COMPRESSION) (21)	16
TABEAU 2. 1CLASSIFICATION DES DEGRADATIONS D'OUVRAGE EN BETON PAR INCENDIE (30)	24
TABEAU 2. 2 (31)	25
TABEAU 4. 1 DIMENSION DES ELEMENTS STRUCTUREL (49)	51
TABEAU 4. 2 PROPRIETES PHYSIQUES DU MATERIAU UTILISE (49)	52

Introduction générale

Introduction générale :

Les incendies sont des catastrophes importantes qui causent des dommages considérables aux bâtiments et autres structures en béton. En général, le béton offre une bonne résistance au feu en raison de son caractère ininflammable, de sa faible conductivité thermique et agit comme une couverture protectrice pour l'armature en acier jusqu'à certaines conditions.

Le béton armé est principalement utilisé comme matériau de construction dans le monde entier, car il présente une excellente résistance, une rentabilité et une durabilité élevées. De plus, il peut être moulé dans n'importe quelle taille et forme souhaitées. Dans le cas des armatures en acier, des températures plus élevées entraînent une réduction de la limite d'élasticité.

Le béton agit en revanche comme une protection contre les armatures en acier contre les attaques d'incendie et autres expositions graves. Néanmoins, à des températures plus élevées, le béton perd sa résistance au feu ; cela peut être dû à une pression interstitielle excessive due à l'évaporation de l'humidité de la structure des pores.

Ce travail se concentre sur l'étude du comportement du béton face à des températures élevées, en utilisant des outils de simulation numérique tels que le logiciel ANSYS. Le mémoire débute par une revue bibliographique détaillée sur le béton, couvrant ses propriétés, sa fabrication et ses applications. Ensuite, une revue détaillée sur les effets des températures élevées sur le béton, notamment la résistance, la fissuration et la perte de masse, à travers des études de cas et des simulations numériques.

Une bibliographie exhaustive sur le logiciel ANSYS est également fournie, suivie d'une application pratique de celui-ci pour étudier le comportement du béton sous différentes conditions thermiques.

INTRODUCTION GENERAL

Ce travail met en lumière l'importance de comprendre et d'analyser le comportement du béton face à des situations extrêmes pour assurer la sécurité et la durabilité des structures en béton, en se concentrant spécifiquement sur l'utilisation du logiciel ANSYS pour évaluer la déformation du béton et la distribution de chaleur à l'intérieur du matériau.

Chapitre 1

1 Introduction

Depuis près d'un siècle, le béton est considéré comme le matériau de construction par excellence. Leurs méthodes de formulation, qui étaient initialement basées sur quatre composants (gravillons, sable, ciment et eau), ont évolué d'un savoir-faire empirique vers la science des matériaux. Ces éléments sont ainsi dosés, selon leurs caractéristiques, afin d'obtenir, après réaction physico-chimique entre eux, un produit solide dont les propriétés physiques et mécaniques peuvent être très supérieures à celles des roches les plus solides. Étant donné que le ciment est lui-même un liant hydraulique, le béton peut être considéré comme une roche artificielle. Dans ce travail, nous utilisons un type de béton appelé béton ordinaire, qui est un matériau de construction composite composé d'un mélange de granulats (sable, gravillons) et d'un liant, le liant étant le ciment.

2 Historique

Le béton est né du besoin d'avoir un matériau de construction bon marché, malléable au moment de le mettre en place et résistant ensuite. La forme la plus ancienne du béton remonte à 7000 ans avant JC. Un matériau similaire était connu des égyptiens et des Romains, mais l'essor réel du béton tel qu'on le connaît aujourd'hui est dû à l'anglais Joseph Aspidine qui en 1824 fait breveter le ciment Portland (1).

3 Définition d'un béton

Un béton est un matériau composite résultant du mélange judicieusement dosé d'un squelette granulaire (gravier et sable) et d'une matrice pâteuse durcissant le sable composée de ciment, d'eau, le plus souvent, parfois d'adjuvants. Après le durcissement il devient un matériau pierreux (1).

Tableau 1. 1 La teneur des constituants du béton en poids et en volume (2)

Constituants	Eau	Air	Ciment	Granulate
Volume (%)	14-22	1-6	7-14	60-78
Poids (%)	5-9	--	9-18	63-85

4 Composition du béton

Le béton est un mélange de granulats grossiers et fins (gravier ou pierre concassée, sable), de ciment et d'eau. Le ciment et l'eau se mélangent pour créer une pâte qui se durcit. Le mortier est composé de pâte de ciment hydraté et de sable. Il a pour fonction de se fixer aux gros granulats afin de créer un conglomérat solide. Les additifs et les compléments sont utilisés pour améliorer certaines caractéristiques du béton frais ou mouillé.

4.1 Les granulats

Les granulats est un fragment de roche destiné à la fabrication d'ouvrage de travaux publics, de génie civil et de bâtiment. Leur nature et leur forme dépendent de leur provenance et des techniques de production. Le granulat est constitué d'un ensemble de grains minéraux qui selon sa dimensions (comprise entre 0 et 125). Se situe dans l'une des 7 familles suivantes :

- fillers
- sablons
- sables
- graves
- gravillons
- ballast
- enrochements

4.2 Classification des granulats

Le granulat est désigné par le couple d/D avec :

d: dimension inférieure du granulat

D: dimension supérieure du granulat

Tableau 1. 2 Classes granulaires principales (3)

Families	Dimensions	Caractéristique
Filler	0/D	$D < 2$ mm avec au moins 70 % de passant à 0.063 mm
Salons	0/D	$D \leq 1$ mm avec moins de 70 % de passant à 0.063 mm
Sables	0/D	$1 < D \leq 6.3$ mm
Graves	0/D	$D > 6.3$ mm
Gazillions	d/D	$D \geq 1$ et $D \leq 125$ mm
Blasts	d/D	$d \geq 25$ mm et $D \leq 50$ mm

4.3 Les différents types de granulats

Les granulats utilisés pour le béton sont d'origine naturelle, artificielle ou recyclée :

- « Naturels », lorsqu'ils sont issus de roches meubles ou massives et qu'ils subissent aucun traitement autre que mécanique (réduction de dimensions) ;
- « Artificiels », lorsqu'ils proviennent de la transformation à la fois thermique et mécanique de roches ou de minerais ;
- « Recyclés », lorsqu'ils proviennent de la démolition d'ouvrages ou lorsqu'ils sont réutilisés (4).

a) Les granulats naturels :

Les granulats naturels sont issus de deux origines : les carrières de roches massives et les gisements alluvionnaires. Sur le plan géologique, les granulats naturels sont issus de trois types de roches :

- Éruptives : granites, basaltes porphyres,

- Sédimentaires : calcaires, grès, quartzites,
- Métamorphiques : gneiss, amphibolites.

Les compositions minéralogiques font apparaître trois familles : les roches calcaires, les roches siliceuses et les silico-calcaires (4).



Figure 1. 1 Photos des différents types de granulats

b) Les Granulats Alluvionnaires : Dits roulés, dont la forme a été acquise par érosion. Ce sont surtout des dépôts alluvionnaires trouvés dans un lit de rivière (et en mer éventuellement) (5). Ces granulats sont lavés pour éliminer les particules argileuses, et criblés pour obtenir différentes classes de granulats (6).

c) Les Granulats de Carrières : Les granulats sont obtenus par abatage et concassage, suivi des opérations de criblage ou tamisage pour sélectionner des grains à une dimension précise. Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres : origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage... (7).

La liaison de ce genre de granulats avec la pâte de ciment est très bonne en raison de leur texture de surface et de leur rugosité. Par ailleurs, ils requièrent davantage d'eau pour une certaine maniabilité, ce qui est dû à leurs angles et donc à leurs surfaces spécifiques étendues. (8).

d) Les granulats artificiels : Dans cette catégorie se rangent des granulats provenant de la transformation thermique de roches, de minerais et de sous-produits industriels transformés.

e) Les granulats Recyclés : Le granulat recyclé est le granulat résultant de la transformation de matériaux inorganiques antérieurement utilisés en construction.

Dans cette catégorie se rangent des granulats, comme le béton concassé, le fraisât d'enrobés bitumineux...

f) Les gros granulats (graviers et pierres concassées) :

- **Les granulats de rivière :**

Ils proviennent de la désagrégation des roches (gravier) ils sont en général très durs et très propres, Cependant leurs grains après par le frottement n'offrent pas une très bonne adhérence au liant **(9)**.

- **Les granulats de concassage :**

Les sont obtenus en concassant des roches dures (siliceuses, calcaires ou granitiques). Les grains sont anguleux, ils doivent être soigneusement lavés afin de les débarrasser des poussières qui les recouvrent au moment du concassage (pierres concassées) **(9)**.

g) Les granulats fins (sable) :

- **Définition :**

Les sables sont définis comme la partie des granulats pierreux dont les grains ont des dimensions allant de 80µm à 0,075µm. Cette définition globale varie d'une classification à l'autre. Il s'agit d'un matériau dont le diamètre maximal est inférieur à 6,3mm et dont le passage à 80µm n'excède pas 30%. Le terme « sable » est généralement utilisé pour désigner les éléments mesurant de 0 à 5 mm, Les fines **(10)**.

• Origine des sables :

Les sables rencontrés sont le résultat d'une décomposition chimique ou d'une désintégration Mécanique des rochers, suivie par un processus de transport qui est à l'origine de leurs caractéristiques physico-chimiques ; les sables ainsi disponibles sont le résultat d'un processus souvent complexe d'érosion et de sédimentation. Ils comportent, à des degrés divers une décomposition sur place, des différentes roches, suivie d'un transport fluviatile et parfois aérien (10).

1) Sable de rivière : il est obtenu par dragage des lits des cours d'eau. Il doit être dur et propre pour qu'on puisse l'utiliser dans les bétons (11).

2) Sable de mer : il provient des côtes de la mer. Pour l'utiliser dans les bétons, il faut qu'il ne soit pas trop fin et qu'il soit lavé de son sel (11).

3) Sable de carrière : Il contient souvent de l'argile qui enrobe les grains et les empêche d'adhérer aux liants. Il est donc à proscrire (11).

4) Sable artificiel : il est obtenu par concassage des roches (calcaires durs, gré ...). Il est souvent plein de filler. Pour qu'il soit utilisable dans les bétons, il faut limiter le pourcentage des fines (11).

5) Sable de dune : C'est une espèce de sables marins. Il est donc extrêmement fin. Les dunes de sable sont situées dans le sud du pays. Ils se trouvent dans la région présaharienne. Les sables sélectionnés proviennent des dunes continentales. Ces dunes se forment grâce à de nombreux sables fins accumulés dans certaines régions particulières du Sahara. (11).

6) Sable recyclé : Obtenu par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments (11).

4.4 L'eau de gâchage

Elle est conforme aux prescriptions de la norme **[NBN EN 206-1]**. Le « gâchage » est l'opération irréversible d'ajout de l'eau au ciment. Cette opération se poursuit par le malaxage. L'eau de gâchage est la quantité totale d'eau que l'on utilise pour faire le béton. Les eaux naturelles conviennent comme eaux de gâchage, à moins qu'elles ne contiennent des substances qui gênent le durcissement comme certaines eaux usées ou des eaux marécageuses. En cas de doute, une analyse chimique s'impose. La résistance d'un béton dépend du rapport E/C (masse d'eau/masse de ciment) du mélange. Le rapport E/C d'un béton courant varie entre 0.4 (qualité supérieure) et 0.6 (béton de fondation)

En règle générale, toutes les eaux sont appropriées si elles ne renferment pas de substances néfastes qui auraient un impact négatif sur le durcissement (huiles, graisses, sucres...) ou la corrosion des armatures (acides humiques, eaux de mer...). L'eau potable provenant du réseau de distribution est parfaitement adaptée, mais l'eau provenant de l'eau courante ou de la nappe phréatique peut généralement être adaptée. L'approvisionnement en eaux stagnantes odoriférantes sera toujours évité. **(12).**

5 Ajouts cimentaires

L'utilisation accrue des ajouts cimentaires s'avère une méthode éprouvée pour lutter contre les changements climatiques et améliorer la qualité de l'air. Les ajouts cimentaires sont additionnés au clinker afin de produire un ciment mélangé ou additionnés au mélange de béton comme agent complémentaire.

5.1 Définition des ajouts cimentaires

Il s'agit de matières premières naturelles, artificielles, sous-produits d'une autre industrie, résidus industriels ou déchets industriels polluants. Ils sont ajoutés soit au mélange de matières premières avant le broyage, soit à la farine crue, soit au clinker portland avant et après le broyage. Leur taux dans la masse varie en fonction de l'objectif de l'addition et du rôle qu'ils peuvent jouer. Il existe donc des ajouts en quantités faibles, moyennes ou élevées. Il y a deux catégories d'ajouts : inertes et actifs. **(13).**

5.2 Classification des ajouts

Les ajouts peuvent être naturels ou artificiels, inertes ou actifs. Les ajouts peuvent réagir en tant que matériau hydraulique, hydraulique latent ou pouzzolanique, ou encore sous forme de filler.

Tableau 1. 3 Classification des ajouts selon leur réactivité (13)

Type	Réactivité	Matériaux
Hydraulique	Fortement réactif	Ciments spéciaux hydraulique
Hydraulique latent		Laitier granule-cendres volantes riche en calcium (calcique)
pouzzolanique	Fortement réactif	Fumé de silice
	Moyennement réactif	Cendres volantes pauvre en calcium, pouzzolanes naturelles (verre volcanique, tufs volcanique, trass phonolithe, terres a diatomées)
	Faible réactif	Scories cristallines
Inerte	Non réactif	Fillers(farine calcaire,...) fibres, pigments colorants, matières expansives dispersions synthétique

5.3 Bénéfices de l'utilisation des ajouts cimentaire

5.3.1 Bénéfices écologiques et environnementaux

- Diminution de l'émission du CO₂ par l'industrie cimentière.
- Élimination des sous-produits de la nature.

5.3.2 Bénéfices fonctionnels

- ☐ Incorporation des particules fines qui améliorent la maniabilité et réduit la demande en eau (à l'exception des ajouts d'une grande finesse).
- ☐ Il y a une amélioration des propriétés mécaniques et de la durabilité du béton.
- ☐ Il y a une diminution de la chaleur d'hydratation dégagée du béton, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique.

5.3.3 Bénéfices économiques

La majorité des éléments minéraux ajoutés proviennent de diverses industries et leur coût est souvent équivalent au coût du transport et de la logistique. Étant donné que la fabrication du ciment nécessite une grande quantité d'énergie, son substitution par des ajouts minéraux permet de réduire le coût du béton tout en réduisant le coût du combustible.

5.4 Les différents types d'ajouts aux ciments

5.4.1 Les cendres volantes(V)

Les cendres volantes peuvent avoir différentes compositions chimiques et phasiques dépendant des impuretés contenues dans le charbon utilisé. Du point de vue minéralogique les cendres volantes se divisent en deux catégories, qui diffèrent l'une de l'autre par leur teneur en CAO (ASTM C 618-94a) **(14)**.

- Classe F. contenant moins de 10% de CAO produit de la combustion de l'anhracite et du charbon bitumineux.
- Classe C. contenant entre 15 % et 35% de CAO produit de la combustion du lignite.

5.4.1.1 La pouzzolane



Figure 1. 2 La pouzzolane

5.4.1.2 Définition

Les pouzzolanes sont exploitées pour la production des ciments composés. Ceux sont des matériaux naturels ou artificiels riches en silice et en alumine capables de réagir avec la chaux en présence de l'eau et de former à l'issue de cette réaction des produits manifestant des propriétés liantes. La pouzzolane est généralement rouge ou noire, avec toutes les teintes intermédiaires, exceptionnellement grise **(15)**.

5.4.1.3 Types de pouzzolane

Les matériaux pouzzolanique sont divisés en deux grandes catégories : les matériaux naturels et artificiels :



Figure 1. 3 Les différents types de pouzzolane

a. Pouzzolane naturelle :

- **Verre volcanique :** Il y a lieu de citer les pouzzolanes des roches pyroclastiques meubles ou à faible cohésion provenant des éruptions volcaniques. Ce type de roche se trouve dans un état vitreux ou du moins sous une forme d'instabilité ou de réactivité qui les rend sensibles à l'attaque par l'hydroxyde de calcium. On mentionne à titre d'exemples : pouzzolane de SANTORIN, de BALCOL en Italie et de SHIRASHU au Japon **(16)**.

- **Tufs volcaniques compacts :**

Elles sont différentes des pouzzolanes de type verre volcanique. Ce sont les mêmes roches, mais ayant subi des transformations chimiques. L'altération du verre volcanique dans des conditions hydro thermiques se traduit par la formation des minéraux zéolithiques de composition chimique variable. Ce genre de pouzzolanes se distingue par une texture dure et compacte **(16)**.

b. Pouzzolane artificielle :

- **Cendres volantes** : Les cendres volantes sont le résidu finement divisé résultant de la combustion de la houille pulvérisée, dans les centrales thermiques. La première utilisation des cendres volantes comme matériau pouzzolanique a débuté aux USA en 1937 **(16)**.

On définit trois types de cendres volantes, en fonction de leur teneur en oxyde de calcium (CaO) les cendres volantes qui présentent des teneurs en CaO inférieures à 8 %, celles allant de 8 % à 20 % et celles supérieures à 20 %. En général, plus la teneur en CaO est élevée, plus les propriétés d'auto-cimentation sont bonnes. Le constituant majeur est une phase vitreuse formée de silice et d'alumine de 50 à 90% **(16)**.

Phase vitreuse formée de silice et d'alumine de 50 à 90% **(16)**.

- **Le laitier granulé de haut fourneau (LGHF)**

Le laitier granulé de haut fourneau (LGHF) est un produit composé essentiellement de silicates, d'aluminosilicates de calcium et d'autres bases, qui provient de fusion du minerai de fer et qui est obtenu par refroidissement rapide à l'eau pour former des particules vitreuses granulées, puis broyé à une finesse égale ou inférieure à celle du ciment. Les analyses minéralogiques du LGHF indiquent que la teneur en verre varie de 80 % à 100% **(16)**.

- **Argiles calcinées**

Obtenues par cuisson d'argiles à une température variant de 600° à 900° C, puis elle est moulue à la finesse du ciment. L'argile de base utilisée est en grande partie constituée de silicate d'aluminium. Le traitement thermique transforme la silice et l'alumine dans un état amorphe qui favorise l'activité pouzzolanique. Un autre type d'argile crue peut être traité de la même manière d'origine sédimentaire contenant de l'argile et riche en silice **(16)**.

- **Fumée de silice**

Les fumées de silice sont des particules de très petite taille (environ 0,1 µm) issues de l'industrie de l'acier. Ces particules sont principalement composées de silice amorphe (>85%) et présentent des propriétés pouzzolanique. Elles permettent de compléter la granulométrie des ciments et ainsi d'améliorer la compacité du matériau durci et donc sa résistance mécanique **(16)**.

5.4.1.4 Effet de La pouzzolane

- **A l'état frais :**

Les pouzzolanes améliorent l'ouvrabilité, la plasticité, la rétention d'eau et une bonne homogénéité couplée à une réduction de la tendance au ressuage. Elles réduisent la chaleur d'hydratation, Cet effet se traduit par une réduction sensible de la fissuration **(17)**.

- **A l'état durci :**

Les pouzzolanes améliorent la cohésion interne ainsi qu'une augmentation de compacité de la pâte de ciment. La réduction de porosité qui en découle pour toute la matrice ciment se traduit par une série d'effets très favorables.

- Accroissement de la résistance finale.
- Légère diminution du retrait et du fluage.
- Réduction de la perméabilité à l'eau jusqu'à des valeurs d'étanchéité.
- Amélioration de la résistance aux sulfates, aux chlorures et à d'autres types d'agressions chimiques.
- Protection des armatures contre la corrosion.
- Une réduction générale de la teneur en hydroxyde de calcium dans le béton avec deux conséquences bénéfiques.

Bétons aux résistances mécaniques élevées au jeune âge et à 28 jours (Supérieure à 50 MPA), et un rapport pondéral (E/C) inférieur à 0.4. Leur propriété essentielle est leur grande résistance en compression qui dépasse largement le cas des bétons ordinaires. Ceci est obtenu grâce à leur faible porosité qui est diminuée en réduisant la quantité d'eau de gâchage par l'emploi d'adjuvants plastifiants et super plastifiants **(18)**.

5.5 Béton de fibres

C'est un béton dans lequel sont incorporées des fibres synthétiques ou naturelles, ce qui permet suivant l'ouvrage, de supprimer les treillis soudés traditionnel. Parmi les caractéristiques du béton fibré, on peut citer : sa résistance à la traction, à la fissuration et au choc **(19)**.

5.6 Béton de poudre réactive (BPR)

Est un nouveau béton composé essentiellement de ciment, des fumées de silice, des fines réactives constituées de quartz et de sable broyés à une grosseur inférieure à 500 μm , des fibres métalliques d'une longueur de 13 mm environ. Le BPR est caractérisé par des performances mécaniques élevée et une durabilité améliorée. La ductilité que l'ajout de fibres métalliques confère au BPR le rend apte à être utilisé dans de nombreuses applications sans aucune armature passive. Le BPR peut également être utilisé pour la réalisation de structures précontraintes par pré ou post-tension. Les résistances en traction et en compression sont très élevées voir mêmes supérieures à celles des aciers (350 MPa) (20).

6 Propriétés mécaniques du béton

6.1 La résistance mécanique à la compression du 1^{er} jour jusqu'au-delà des 28 jours :

Entre le début de la prise, et une durée de séchage admise de 28 jours, la résistance du béton va continuer d'augmenter. Quelques heures après le début de la prise, la résistance est de moins de 1 MPa, tandis que 28 jours plus tard, elle augmente jusqu'à atteindre 30 MPa (ou plus selon le type de béton) (21).

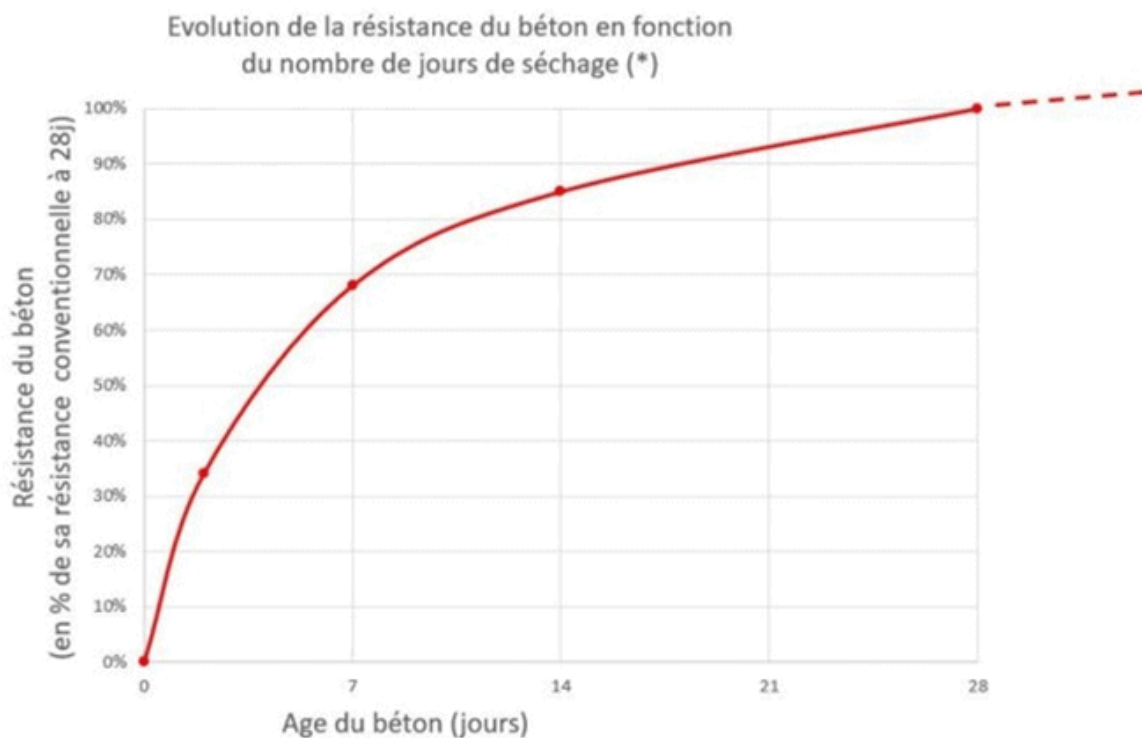


Figure 1. 4 Évolution de la résistance du béton en fonction du nombre de jours de séchage (21)

CHAPITRE 1 : GENERALITE SUR LE BETON

Par définition, la résistance à la compression d'un matériau est l'effort de compression uni axial atteint à la rupture complète du matériau

Le béton tient sa résistance de ses différents constituants. Le choix du type de ciment, la qualité et la granulométrie de ses granulats, et la quantité d'eau ou l'ajout d'adjuvants plastifiants sont des leviers susceptibles d'influer sur la résistance du matériau.

Cette propriété permet déjà de différencier et de classer les bétons en différentes sous-familles. Les bétons les plus communs présentent généralement des résistances comprises entre 25 et 40 MPa (en d'autres termes, une force de 40 tonnes qui s'exerce sur un carré de 10 cm de côté de béton). Dès que cette résistance s'élève au-delà de 50 MPa, on considère les bétons comme à hautes performances (bétons fibrés ou à ultra hautes performances (PFUHP)) **(21)**.

16 classes de résistance à la compression sont définies et font l'objet d'une norme NF EN206/CN. Ainsi la classe de résistance à la compression des bétons à 28 jours se désigne par la lettre C de « Concrete » suivi de deux nombres correspondant aux résistances mesurées respectivement sur éprouvettes cylindriques et cubiques (exemple C25/30). A ces différentes classes on peut associer ce tableau d'usages :

Type de béton	Classe	Exemples d'usage
Béton ordinaire	C8/10	Usage décoratif seulement
	C12/15	Usage décoratif seulement
	C16/20	Béton de propreté
	C20/25	Fondations légères (semelle filante ou isolée)
		Dallage sur vide sanitaire
	C25/30	Dalle/plancher interne à une maison
		Dalle extérieure classique et dallage sur terre-plein, sans contraintes particulières
	C30/37	Voile intérieur ou extérieur, sans contraintes particulières
Béton à hautes performances	C35/45	Dallage sans contraintes particulières, avec emploi de fibres structurales
	C40/50	Béton pour hangar agricole (élevage, fumier...)
	C45/55	Plancher chargé
		Elément soumis à des efforts importants (poutres de très grande portée ou plancher très chargé)
Béton à très hautes performances	C50/60	Béton haute résistance, Inutile pour des particuliers et très cher
	C55/67	
	C60/75	
	C70/85	Béton haute résistance, Inutile pour des particuliers et très cher
	C80/95	
	C90/105	
	C100/115	

Tableau 1. 4 (16 classes de résistance à la compression) (21)

6.2 La durabilité

Lorsqu'il est à l'état solide, le béton est un matériau remarquablement pérenne et résistant face aux agressions environnantes (chaleur, pollution, pluie et neige, gel et dégel...). Il s'agit donc du matériau de prédilection lorsqu'il est question de construire des structures qui doivent résister à des conditions difficiles (21).



Figure 1. 5 durabilité d'une structure en béton soumise à la corrosion de l'eau (21)

6.3 La compacité et la porosité

La compacité et la porosité ont un impact et conditionnent la durabilité et les performances du béton. Moins le béton sera poreux (et donc plus il sera compact), plus sa durabilité sera importante, et ses performances élevées (21).

6.4 La tenue au feu

Le béton à l'état solide fait partie des matériaux incombustibles au pouvoir calorifique très faible (<600 Kcal/Kg). Cela signifie que la quantité de chaleur que le béton peut produire et qui est susceptible d'alimenter le développement du feu est quasi nulle.

À titre d'exemple, à température élevée égale, le béton est +/- 35% plus résistant que l'acier et ne dégage ni gaz, ni fumées toxiques. Il s'agit donc d'un remarquable pare-feu (21).

6.5 La capacité d'isolation thermique et acoustique

Grâce à sa densité et à sa masse, le béton solide est un excellent isolant acoustique (il possède une bonne capacité à intercepter les ondes sonores). L'utilisation de granulats fins ou l'ajout de certains adjuvants permettant d'obtenir un béton plus poreux vont également influencer sur les qualités isolantes du matériau (21).

6.6 La résistance au choc et la ductilité

Le béton est connu pour : Ses performances mécaniques en cas de chocs ou de sollicitations dynamiques, sa ductilité, mais aussi pour sa résistance à la pression et sa bonne tenue en flexion. Ces caractéristiques font du béton un matériau idéal pour concevoir des structures importantes, complexes et pérennes dans le temps (21).

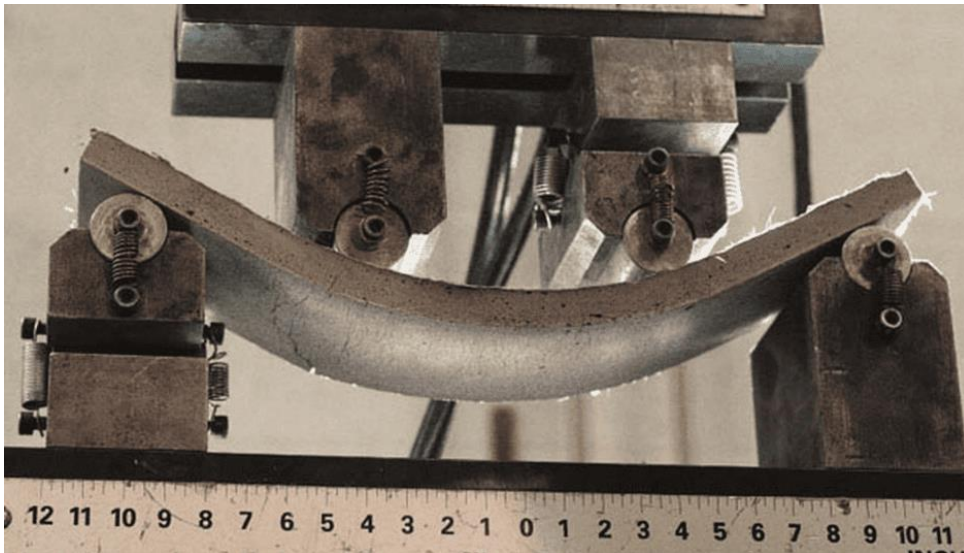


Figure 1. 6 Béton “flexible” (21)

7 Evolution des propriétés thermiques du béton avec la température

L'évolution de la distribution de température dans une structure est gouvernée en grande partie par les propriétés thermiques du matériau, particulièrement la capacité calorifique et la conductivité thermique. Cependant, la détermination de ces propriétés avec exactitude, dans le cas du béton, est très difficile, en raison de nombreux phénomènes qui se produisent au sein de la microstructure du béton.

7.1 La conductivité thermique

La conductivité thermique désigne l'aptitude que possède un matériau à conduire de la chaleur. Ce paramètre est prépondérant pour décrire la distribution de la température au sein du matériau lors du chauffage. La conductivité thermique du béton diminue, d'une manière générale, lorsque la température augmente. Ce comportement met en évidence la détérioration de la microstructure, les microfissures limitent les transferts de la chaleur. Les principaux paramètres influençant l'évolution de la conductivité thermique sont : la teneur en eau, le type de granulats, le degré de saturation en eau liquide, la structure de l'espace poreux et la formulation du béton (22), (23), (24), (25). La figure 1.7 présente l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la température pour différents types de béton. On constate sur cette figure que la conductivité thermique des bétons décroît avec l'élévation de la température. Ceci peut être attribué à la création des vides (fissuration) et au départ progressif de l'eau.

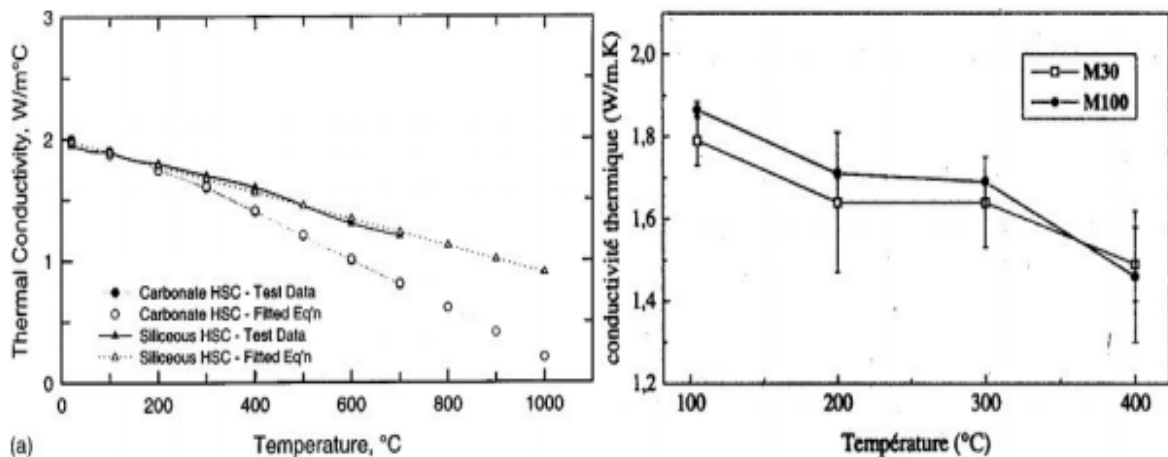


Figure 1. 7 Evolution de la conductivité thermique de différents bétons avec la température. A gauche, l'effet de type des agrégats (22).À droite, l'effet de type du béton (26)

7.2 Chaleur spécifique

La chaleur spécifique d'un matériau est la quantité d'énergie nécessaire pour faire monter de 1°C la température d'une masse unitaire de matière. Autrement dit, c'est la capacité du matériau à emmagasiner de la chaleur. L'évolution de la chaleur spécifique du béton est principalement reliée à celle de la pâte de ciment et de type de granulats. La figure 1.8 montre que la chaleur spécifique augmente avec la température. Cette augmentation est peut-être liée aux réactions chimiques et physiques qui ont lieu dans le béton aux hautes températures.

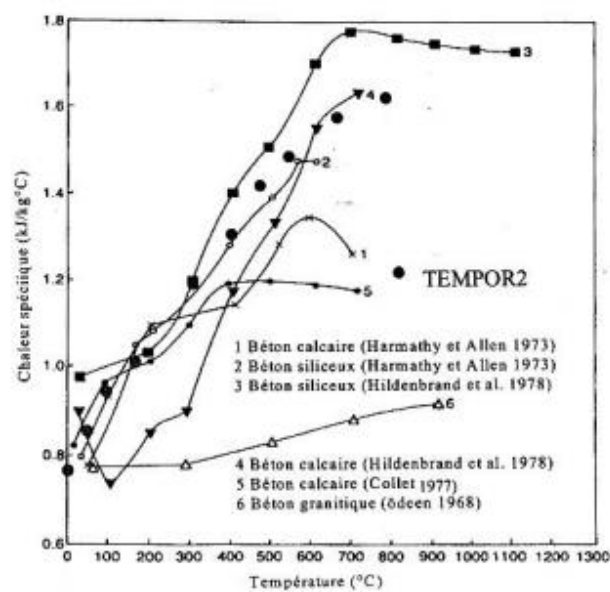


Figure 1. 8 Variation de la chaleur spécifique en fonction de la température (27)

7.3 Diffusivité thermique

La diffusivité thermique décrit la vitesse à laquelle la chaleur se propage à l'intérieur d'une masse de béton. Elle est directement proportionnelle à la conductivité thermique et inversement proportionnelle à la masse volumique et la chaleur spécifique. La diffusivité thermique dépend fortement de la teneur en eau, du degré d'hydratation du ciment et de la nature de granulats. La figure 1.9 présente les variations de cette propriété avec la température obtenue par différents auteurs sur des bétons formulés avec différents types de granulats. Il apparaît que la diffusivité thermique du béton diminue avec l'élévation de la température.

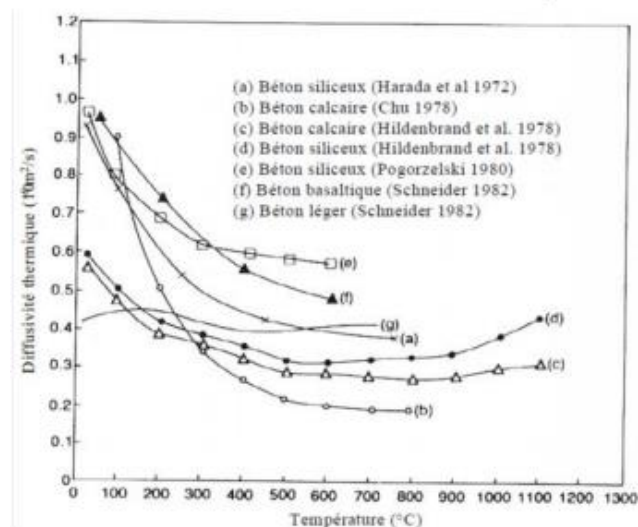


Figure 1. 9 Variation de la diffusivité thermique de différents types de béton avec la Température (27)

Chapitre 2

1 Introduction

Lorsque les températures sont élevées, le béton est soumis à diverses transformations physiques et chimiques. L'eau du béton s'évapore d'abord, ce qui peut entraîner une diminution de la masse et de la résistance. Par la suite, les éléments constitutifs du béton, comme les granulats et les agrégats, peuvent croître à des températures élevées, ce qui peut provoquer des fissures et une diminution de la résistance. En outre, les réactions chimiques entre les différents éléments du béton peuvent être modifiées, ce qui a un impact sur ses caractéristiques mécaniques. Il est possible que la détérioration du béton à des températures élevées mette en péril la stabilité des structures et demande des mesures de renforcement ou de protection particulières afin de garantir leur intégrité et leur sécurité.

2 Comportement au feu des structures en béton lors d'incendie

Les qualités de résistance mécanique, de béton facilité d'utilisation, de durabilité et la très bonne tenue au feu, font du béton le matériau de construction par excellence. Mais lorsqu'il est exposé au feu, le béton perd graduellement sa résistance mécanique et il se dégrade régulièrement de l'extérieur vers le cœur. Cependant, ce processus de dégradation est suffisamment lent et progressif pour permettre un maintien de la stabilité des structures pendant un laps de temps, le plus souvent, suffisant à l'évacuation des personnes, mais aussi, pour permettre de retrouver après extinction de l'incendie un ouvrage endommagé mais réparable (28).

Les dégradations de béton par incendie sont relativement rares pour les ouvrages d'art et affectent d'avantage les bâtiments. A titre d'exemple, l'incendie du gratte-ciel Windsor de 29 étages à Madrid, la tour est restée debout malgré le feu qui s'est propagé à de nombreux étages. Le feu à démarrer au 21^{ème} étage et s'est rapidement propagé, il s'est achevée après 26 heures de lutte laissant un bâtiment complètement brûlé (29)

Néanmoins, il existe quelques cas d'incendie sous des ponts en béton qui ont provoqué un endommagement significatif du matériau. Le viaduc des trois Fontaines, construit en 1981 à Bruxelles, a subi l'agression d'un large feu localisé durant la nuit du 6 au 7 décembre 2003.

Une température de 750°C été atteinte à la surface des poutres et le tablier. Les poutres présentent à plusieurs endroits des éclatements de béton au droit des semelles et des âmes. A certains endroits, des armatures et des torons précontraints sont visibles. En face inférieure de la dalle, des éclatements de béton (détachement de morceaux) sont aussi visibles (29).



Figure 2. 1 À gauche, photo du bâtiment Windsor à Madrid après l'incendie. À droite, dessous du tablier du pont à Bruxelles après l'incendie (29)

Dans le cas des tunnels routiers, les températures qui s'installent lors des incendies peuvent être supérieures à 1000°C (29).

On peut citer l'incendie important du tunnel sous la Manche, le 18 Novembre 1996. Cet ouvrage a été soumis à un feu d'une durée de près de 9 heures et une température maximale de près de 1100°C. Après l'incendie du tunnel du Mont-Blanc (24 mars 1999), une investigation in situ, qui a été complétée par une étude en laboratoire, a été menée par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées LCPC (30). Cette investigation a pour objectif d'évaluer les caractéristiques mécaniques résiduelles du béton ainsi que de connaître la profondeur de l'endommagement dans le but d'optimiser les travaux de réparations. Les différents faciès de dégradation du béton sont regroupés dans le Tableau 2.1.

Tableau 2. 1 Classification des dégradations d'ouvrage en béton par incendie (30)

Classe de désordres	0	1	2	3	4
Vue en élévation d'une poutre sous dalle					
Coupe					
Désordres observés	Aucun. état de référence de béton sain.	Dépôts de suies, coloration, traces de microfissures non orientées (faïençage).	Ecaillage superficiel (0 à 10 mm), Fissures nettes et orientées (>0,5 mm).	Disparition du béton d'enrobage, Les armatures sont visibles, Le béton sous-jacent est légèrement feuilleté.	Les armatures sont totalement dégagées et présentent des déformations plastiques, Une forte épaisseur de béton a disparu ou est feuilletée et a perdu sa cohésion.



a- classe 2



b- classe 3



c- classe 4

Figure 2. 2 Exemples de désordres de différentes classes, a/ écaillage superficiel, b/disparition du béton d'enrobage des armatures, c/ les armatures sont totalement dégagées et la perte de l'épaisseur de béton atteint 50% (30)

3 Comportement du béton à haute température

Quand le béton est soumis à des températures élevées, le chargement thermique imposé entraîne des transferts thermiques et hydriques au sein de la structure en béton, entraînant des phénomènes très complexes tels que la modification de la teneur en eau, la décomposition chimique de la pâte de ciment et le changement de pression interne. Ces mécanismes sont souvent considérés comme les principales causes des changements au niveau de la microstructure du béton qui entraînent des modifications des propriétés thermiques, hydriques et mécaniques.

Dans ce paragraphe, nous parlons des effets des hautes températures sur les éléments constitutifs et les principales propriétés physiques et thermiques du béton. Puis, nous attachons la plus grande attention sur ce que peuvent engendrer ces modifications sur le comportement mécanique et les déformations thermiques du béton.

3.1 Effet des hautes températures sur la microstructure du béton

Nous exposons dans cette section les conséquences physico-chimiques de la température sur la pâte de ciment et les granulats, puis nous examinons ensuite le comportement du béton à haute température. Le tableau 2.2 (31), Regroupe les principales réactions physico-chimiques observées dans le béton lors de son échauffement, selon Noumowé. (31).

Tableau 2. 2 (31)

Entre 30 et 120°C	L'eau libre et une partie de l'eau adsorbée s'échappent du béton. Elle est complètement éliminée à 120°C.
Entre 130 et 170 °C	Une double réaction endothermique peut avoir lieu correspondant à la décomposition du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.
Autour de 180 °C et jusqu'à environ 300 °C	La première étape de la déshydratation. La chaleur brise le gel de ciment et arrache des molécules d'eau aux silicates hydratés. L'eau liée chimiquement commence à s'échapper du béton.
A environ 250 et 370 °C	On peut avoir de petits pics endothermiques indiquant des effets de décomposition et d'oxydation d'éléments métalliques (ferriques).
Entre 450 et 550°C	Il y a décomposition de la portlandite en chaux libre : $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$

Autour de 570 °C	Il y a transformation de structure du quartz α en quartz β accompagnée d'un gonflement pour les granulats quartziques et basaltiques.
Entre 600 et 700 °C	Il y a décomposition des phases de C-S-H et formation de β -C ₂ S. C'est la seconde étape de la déshydratation des silicates de calcium hydratés qui produit une nouvelle forme de silicates bi-calciques.
Entre 700 et 900 °C	Il y a décomposition du carbonate de calcium. Le calcaire se décompose autour de 800°C en $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ réaction fortement endothermique qui libère du gaz carbonique.
A dessus de 1300°C	Début de la fusion des agrégats et de la pâte de ciment.

3.1.1 L'Effet de la température sur la pâte de ciment

Les principales modifications physico-chimiques se passent dans la pâte de ciment, en raison de la présence de l'eau sous différentes formes comme nous l'avons déjà dit. Entre 30 et 120°C, l'eau libre et l'eau adsorbée s'évaporent, et au-delà de 105°C les hydrates commencent à se décomposer selon [NOUMOWE] (31). Ensuite à partir de 180 °C et jusqu'au-delà de 800°C, le gel de CSH se décompose essentiellement en silicate de calcium β -C₂S, β -CS et en eau (27), tandis que se forme l'hydroxyde de calcium CH qui donne l'oxyde de calcium Ca(OH)₂. Concernant la porosité de la pâte de ciment à haute température, [NOUMOWE] (31) a montré que celle-ci augmente d'une manière parabolique en fonction de la température. Cette augmentation est accompagnée d'une évolution de la taille moyenne des pores et du volume poreux total. Ceci est dû en partie à la rupture interne de la structure du gel de CSH lors du processus de déshydratation.

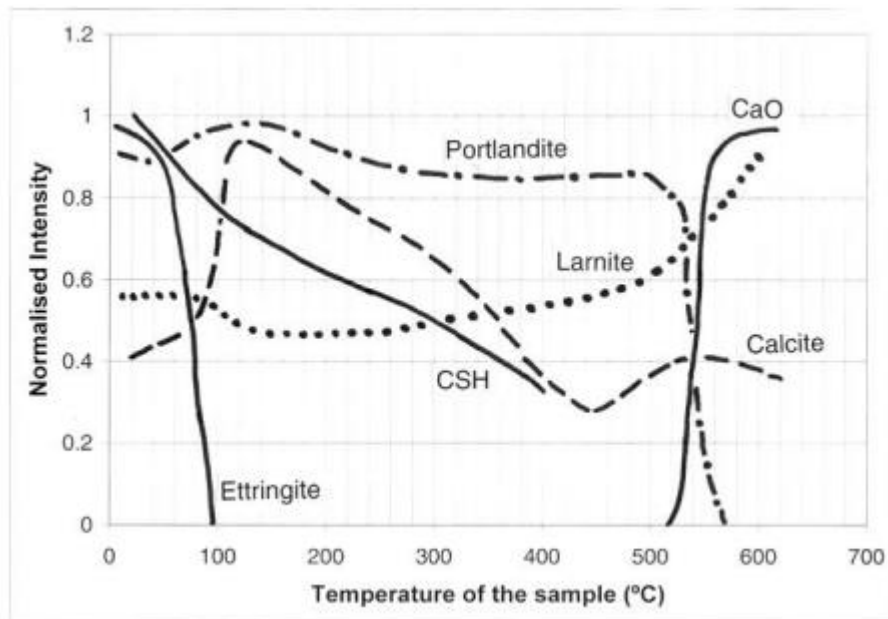


Figure 2. 3 Evolution de la quantité des phases de la pâte de ciment Portland au cours d'un traitement thermique (32)

Par exemple, les travaux de Handoo (33), dont sont extraits les clichés de la Figure 2.4, présentent l'observation d'une pâte de ciment ordinaire à température ambiante et à 600 °C. Les clichés permettent de distinguer les deux principaux hydrates de la pâte de ciment, le gel CSH et la Portlandite. La comparaison des clichés pris à température ambiante et à 600 °C met en évidence des modifications importantes de la microstructure du matériau : le gel CSH change de morphologie, des vides et des microfissures apparaissent.

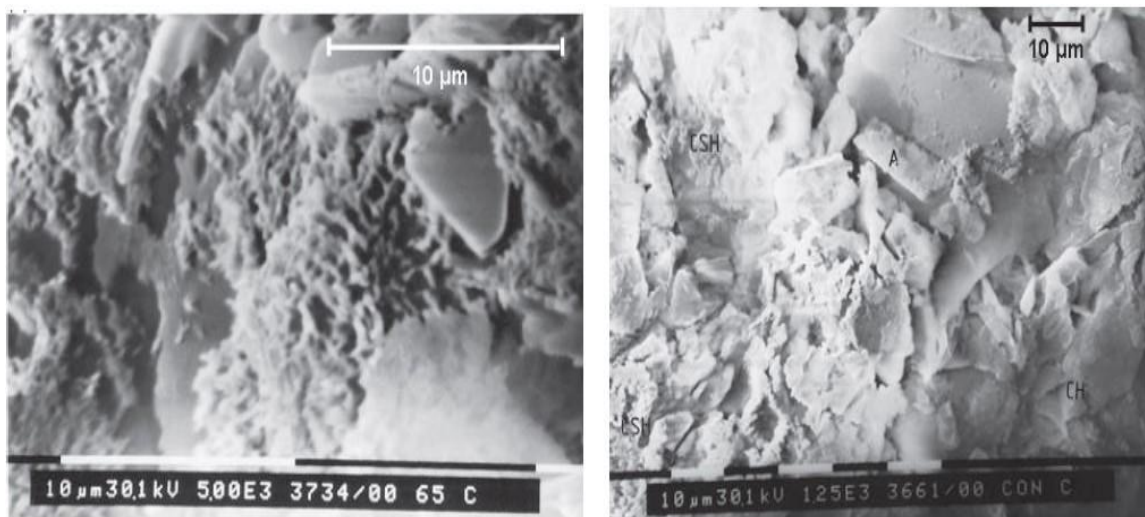


Figure 2. 4 Observation au MEB de deux échantillons de pâte de ciment durcie d'un béton : à température ambiante (cliché de gauche) et à 600 °C (cliché de droite) (33)

Le cliché de la Figure 2.5 présente l'observation au MEB d'un échantillon de béton ayant été soumise à un incendie réel. L'aspect vitreux du matériau ainsi que l'apparition d'une porosité importante permet d'estimer la température atteinte à plus de 1000 °C (30). Effectivement, à partir d'une certaine température, le béton est un matériau qui peut fondre :

- la fusion de la pâte de ciment dépend essentiellement de la composition chimique du ciment employé. Une composition ordinaire de ciment (60% de C3S, 20% de C2S) entraîne une température de fusion de la pâte de ciment située aux alentours de 1200°C (27).
- la température de fusion des granulats dépend évidemment de leur nature. Nous pouvons donner comme exemples 1060 °C pour les roches basaltiques, 1210 °C pour les roches granitiques et 1700 °C pour les quartzites (27).

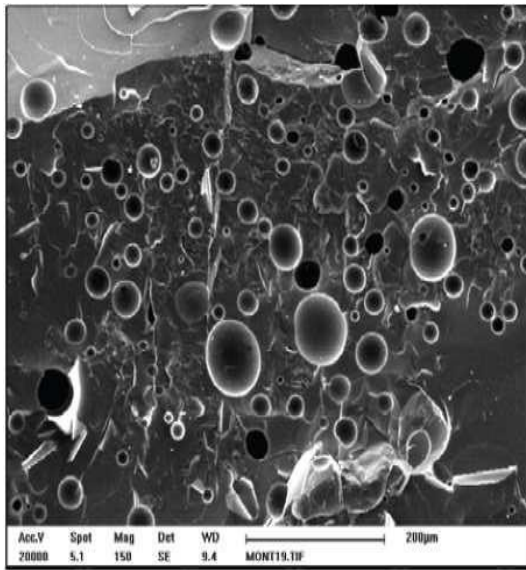


Figure 2. 5 À gauche, observation au MEB de la pâte de ciment durcie d'un béton après un incendie selon (30), à droite cliché d'une carotte prélevée dans une dalle en béton après 2 heures (34)

Un phénomène très intéressant appelé « **l'autoclavage interne** » est observé dans les bétons chauffés. La vapeur d'eau qui remplit le réseau poreux tend à s'échapper du béton. Si elle n'arrive pas à s'échapper facilement (cas des bétons denses – BHP), la pression de vapeur augmente. La température et la pression de la vapeur qui augmentent, favorisent l'apparition

des réactions hydrothermiques. Les réactions de ce type entraînaient des changements significatifs de la microstructure des hydrates. Le phénomène est bien connu dans le domaine de la préfabrication qui emploie parfois des autoclaves. Le phénomène dans le cas des pâtes de ciment soumises aux températures élevées a été observé par (35). Il conduit à une augmentation de la quantité de Ca(OH)_2 . Au-delà de 200 °C, la carbonatation de la portlandite s'accélère. Ceci se manifeste par la diminution de la quantité de Ca(OH)_2 corrélativement à l'augmentation de la quantité de CaCO_3 (Figure II.6). La présence d'eau, sous forme de vapeur à haute température, peut également modifier la structure physique et chimique de la pâte de ciment. La combinaison des conditions hygrothermiques selon (36), peut provoquer les changements de la nature des hydrates.

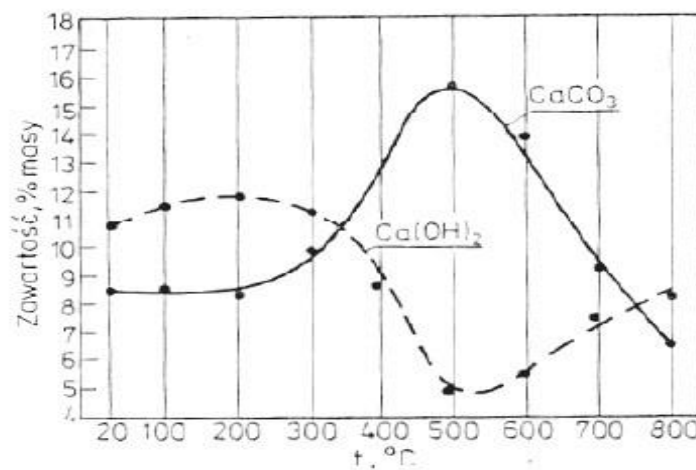


Figure 2. 6 Evolution de la quantité de portlandite et de calcite dans une pâte de ciment, au cours de l'échauffement, (35)

3.1.2 L'effet de la température sur les granulats

À haute température, les granulats subissent des transformations chimiques et minéralogiques, modifiant leur caractéristique micro structurelle. La plupart des granulats restent stables jusqu'à environ 600°C (37), mais les non siliceux peuvent se décomposer à des températures plus basses. L'analyse thermique différentielle (ATD) identifie les températures d'instabilité via des pics endothermiques et exothermiques, tandis que l'analyse thermogravimétrique (ATG) mesure les variations de masse pour suivre les réactions de décomposition. Les granulats calcaires et siliceux restent stables jusqu'à environ 500°C, mais entre 500 et 650°C, le quartz- α se transforme en quartz- β avec une dilatation notable. Pour les granulats calcaires, la décarbonatation ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) survient entre 600 et 900°C. Pendant le

refroidissement, la chaux libre (CaO) réagit avec l'humidité atmosphérique pour former Ca(OH)_2 , augmentant de volume de 44%, ce qui peut causer des fissures et des dommages aux structures en béton.

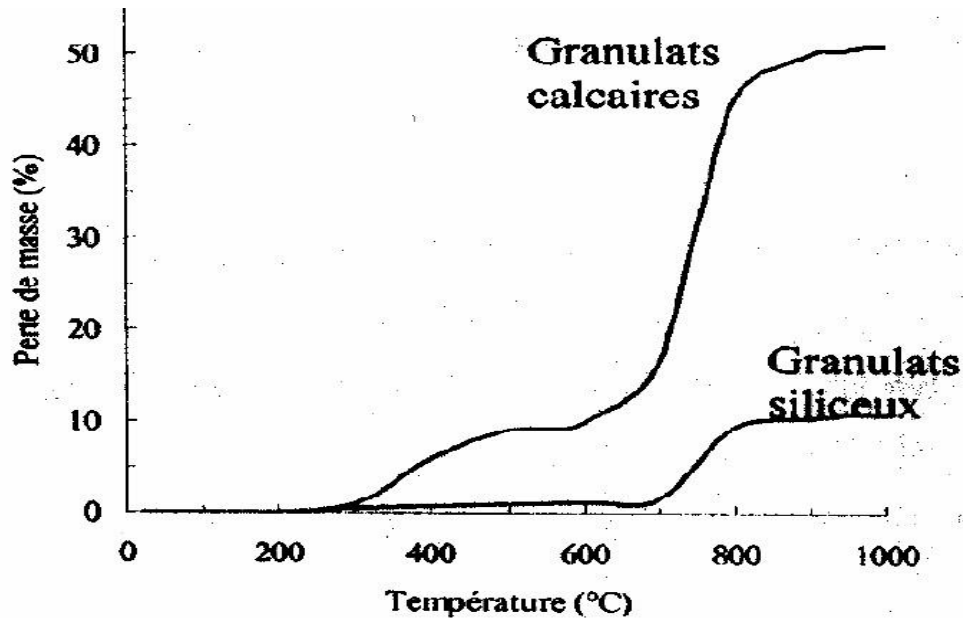


Figure 2. 7 Perte de masse de deux types de granulats (calcaire et siliceux) (38)

La figure 2.8 présente la stabilité minéralogique de divers granulats sous l'effet de sollicitations thermiques. Les granulats étudiés peuvent présenter un caractère instable. Dans cette étude, les granulats légers possèdent une bonne stabilité thermique jusqu'à 1000°C. Par contre, les granulats calcaires, siliceux et silico-calcaires sont instables dès 550 °C.

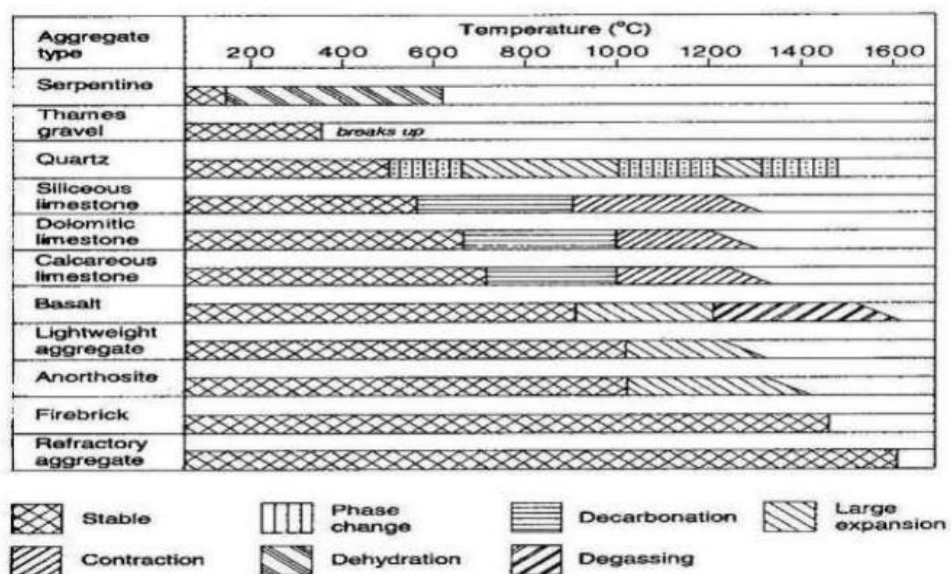


Figure 2. 8 Etude de la stabilité thermique et des transformations physico-chimiques de divers granulats en fonction de la température (39)

3.1.3 Dégradation de l'interface pâte-granulats

Dans les bétons, l'interface pâte-granulat est la partie la plus fragile, la plus poreuse et la mieux cristallisée. La présence de la fumée de silice réduit sa porosité et permet ainsi une bonne adhérence entre la matrice cimentaire et les granulats. Par contre cette zone est moins riche en gel de CSH. A haute température cette partie, se dégrade progressivement en montant en température. Ceci est dû au départ de l'eau piégée dans les pores liée chimiquement. Le retrait de dessiccation favorise le développement des fissures et au-delà de 120 °C, les phénomènes de déshydratation engendrent une détérioration rapide au niveau de cette zone à cause de la dilatation différentielle entre la pâte de ciment (retrait) et les granulats (expansion). Plus le matériau est hétérogène plus la différence entre les coefficients de dilatation thermiques des constituants est importante. Ces coefficients varient en fonction de la température, et dépendent du type granulat et de ciment utilisés. Ceci a été confirmé par Fares (40) en effectuant des essais de mesure du coefficient de dilatation thermique avec différentes natures de granulats. Tous les éléments constituant le béton subissent avec la température des modifications physiques et chimiques. Concernant la matrice cimentaire et les granulats, des comportements opposés sont observés. Au-delà de 105°C, la matrice cimentaire subit un retrait tandis que les granulats subissent une expansion. Ce comportement opposé engendre une microfissuration au niveau de l'interface pâte-granulat (40).

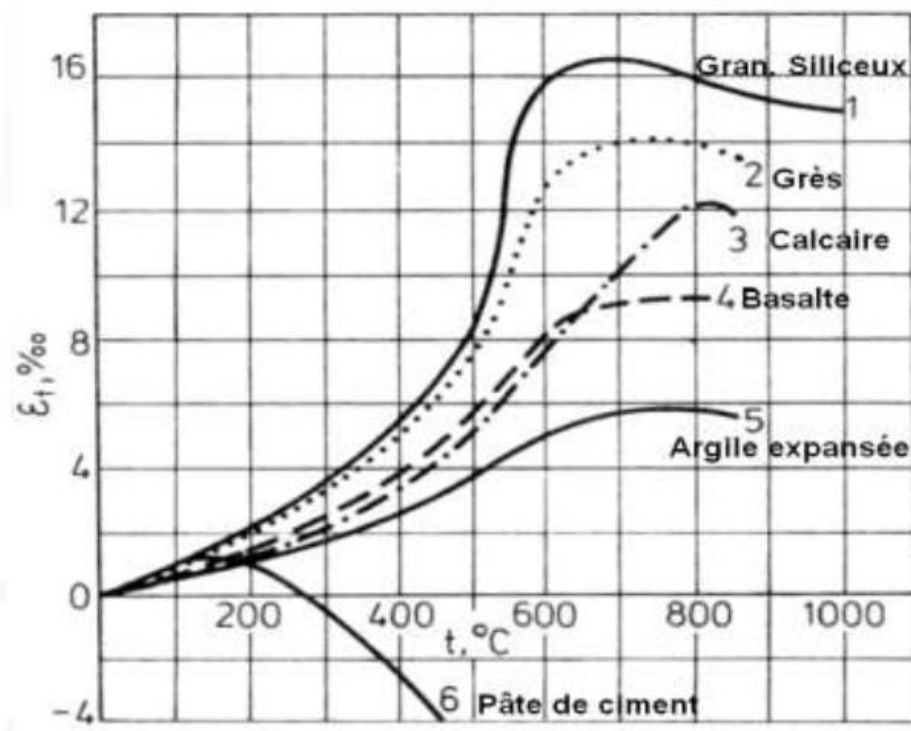


Figure 2. 9 Déformations thermiques de bétons formulés avec différents granulats (35)

Ces deux évolutions créent à l'interface pâte-granulats des incompatibilités de déformations induisant des contraintes de traction au sein de la pâte de ciment et de compression au sein des granulats. (40) Constate que la déformation thermique des bétons composés de granulats légers sont les plus faibles, tandis que celles des granulats siliceux les plus importantes. Donc, la nature du granulat a une incidence sur la déformation thermique, et par conséquent sur l'incompatibilité pâte-granulats. Parallèlement à cette incompatibilité, les hautes températures entraînent le départ d'eau (libre, liée, adsorbée) contenue dans les pores et dans les hydrates. Or, cette déshydratation détériore rapidement les liaisons créées entre les granulats et la pâte de ciment. Cela entraîne l'apparition de microfissures.

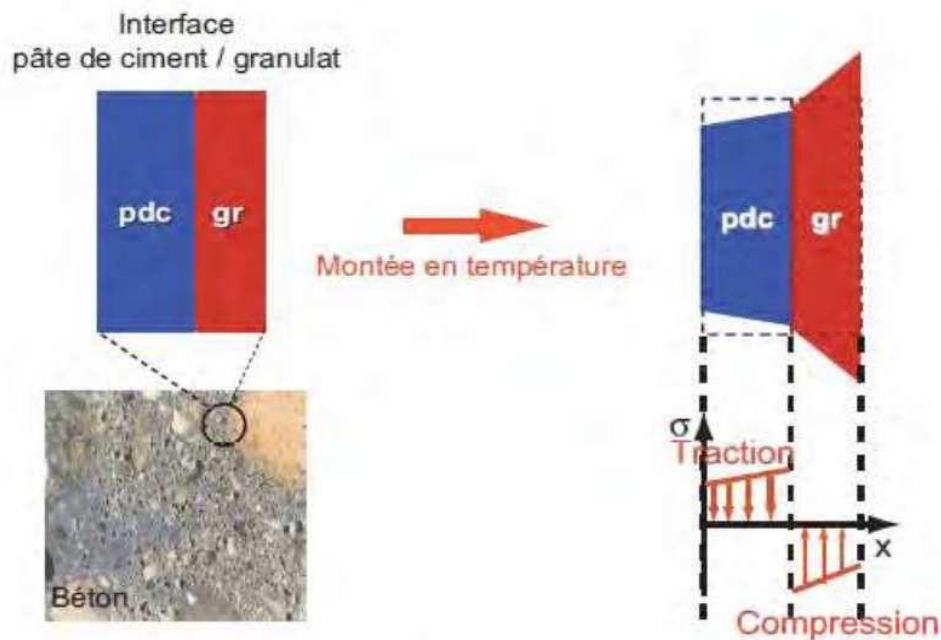


Figure 2. 10 Mécanismes liés aux incompatibilités pâte-granulat (41)

3.1.4 Evolution de la porosité

Le béton est un matériau poreux diphasique, composé d'une phase solide et d'une phase poreuse. La porosité totale peut être mesurée par saturation d'eau et la porosité capillaire se mesure généralement par porosimétrie au mercure. Les travaux menés sur l'évolution de ce paramètre (26), montrent que la porosité augmente en fonction de la température. Cette augmentation est due en partie à l'augmentation du volume total de la dimension des pores ainsi qu'à la microfissuration engendrée par la dilatation différentielle entre la pâte et les granulats. La Figure 2.11 montre la variation de la porosité totale en fonction de la température d'un béton ordinaire et d'un BHP mesurée par Kalifa et al (26) par la méthode de la saturation d'eau.

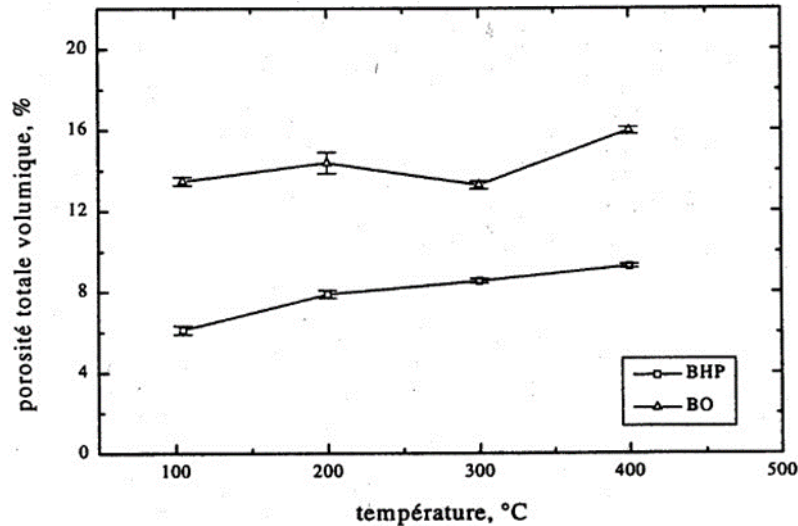


Figure 2. 11 Porosité totale à l'eau en fonction de la température de conditionnement (26)

$$\left. \begin{array}{l} \text{À } 105^{\circ}\text{C} \\ \varphi_0 = 6,1\% \text{ du BHP} \\ \varphi_0 : \text{Porosité totale} \\ \varphi_0 = 13,5\% \text{ du BO} \end{array} \right\}$$

Entre 105°C et 400°C, la porosité augmente de 3%. Cette croissance est associée au départ d'eau, qu'elle soit présente dans le réseau ou chimiquement liée. Kalifa (26) explique que la diminution de porosité du BO entre 200°C et 300°C est associée à la densification due à l'hydratation complémentaire et à une carbonatation de la portlandite en condition d'autoclavage interne, c'est-à-dire sous une pression supérieure à la pression atmosphérique. Par contre, cette densification n'est pas observable dans le BHP qui contient très peu de portlandite, grâce à la présence de fumée de silice. Sur la Figure 2.12 on observe la variation de la porosité totale en fonction de la température mesurée par Noumowé [NOUMOWE .1995] sur le BO ($R_c = 38,1$ MPa) et le BHP ($R_c = 61,1$ MPa). Cet essai a été réalisé à l'aide du porosimètre à mercure.

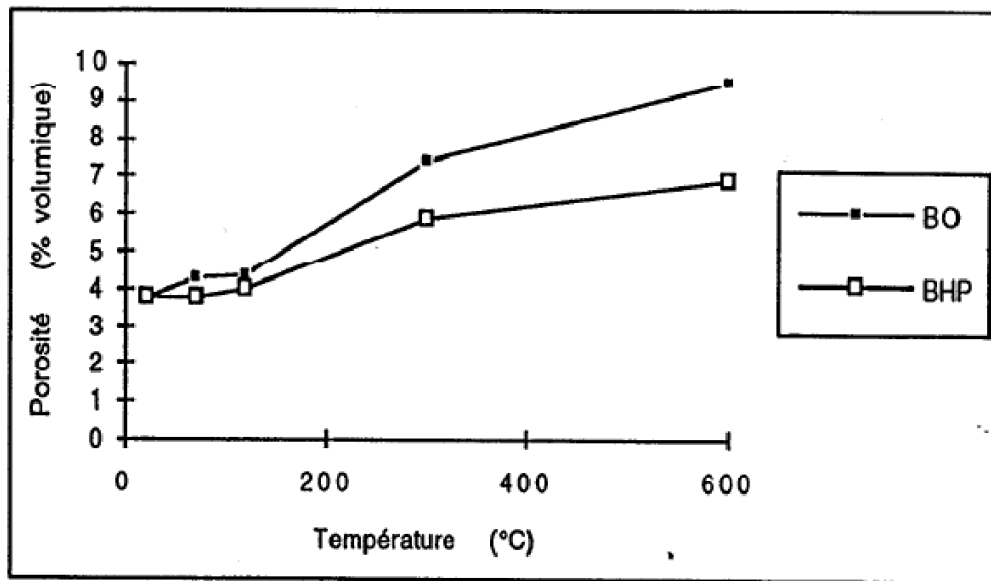


Figure 2. 12 Porosité en fonction de la température de conditionnement (31)

Entre 22 et 120°C, la porosité augmente très peu. Ceci confirme le fait qu'à cette température, l'eau libre s'est échappée mais la microstructure du béton n'est pas modifiée. La Figure 2.13 montre la courbe expérimentale mesurée par Noumowé (31) de la variation de poids en pourcentage du poids initial des BO et BHP en fonction de la température en surface.

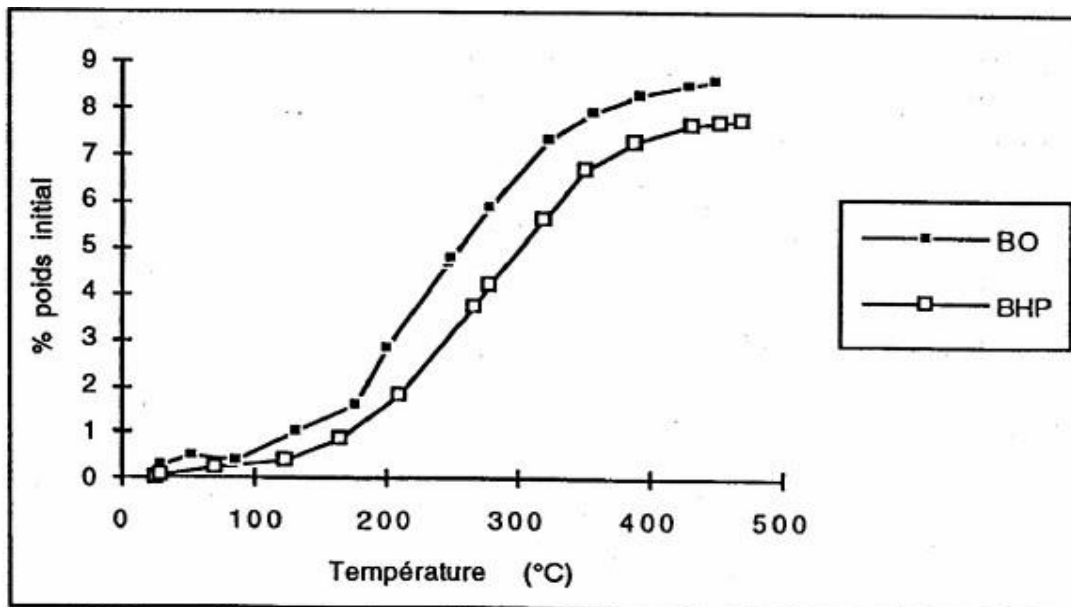


Figure 2. 13 Variation de poids en fonction de la température (31)

Noumowe (31) a remarqué que la variation de poids est très légèrement supérieure à la quantité d'eau initiale dans le béton. Ce qui laisse penser qu'en plus de l'eau, il y a d'autres constituants qui se sont échappés des deux bétons. De même, la Figure 2.14 montre l'évolution de la perte de masse par rapport à la température mesurée par Kalifa (26). Les courbes obtenues montrent que la perte de masse du BO est plus faible que la perte de masse d'un BHP.

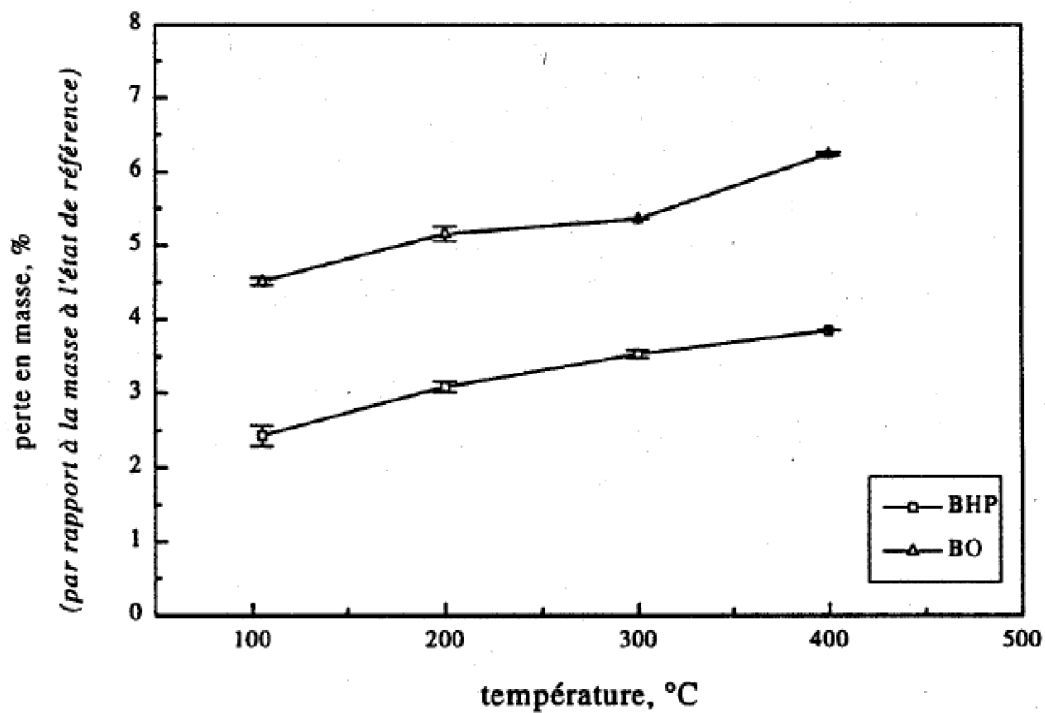


Figure 2. 14 Perte en masse des éprouvettes par rapport à l'état initial, en fonction de la température de conditionnement (26)

La Figure 2.15 présente l'évolution de la distribution porosimétrique mesurée par la technique d'intrusion au mercure d'un béton ordinaire et d'un béton à hautes performances (42).

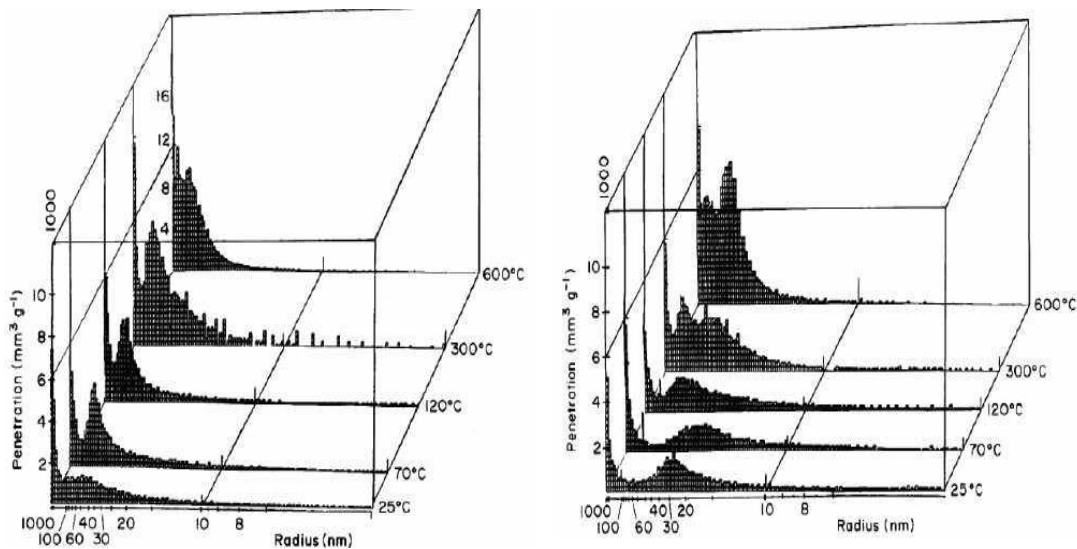


Figure 2. 15 Évolution de la distribution porosimétrique en fonction de la température mesurée par la technique d'intrusion de mercure par Noumowe (42). A gauche, béton ordinaire, à droite, béton à hautes performances

Pour les deux types de béton, nous observons un déplacement de la distribution porosimétrique vers les plus gros diamètres avec l'augmentation de la température. Ceci peut être attribué :

- à la perte d'eau du matériau,
- à l'endommagement de la matrice du fait de sa déshydratation,
- à l'endommagement de la matrice du fait des gradients thermiques,
- à l'endommagement de la matrice du fait de l'incompatibilité de dilatation thermique pâte/granulat.

3.1.5 Perte de masse

La figure 2.16 qui montre les résultats d'analyse thermo gravimétriques (ATG) menées par différents auteurs sur des bétons contenant différents granulats. Ils permettent globalement de suivre l'évolution de la perte de masse au cours du chauffage, on observe ainsi une perte de l'eau libre entre 20°C et 200°C, une perte de l'eau liée chimiquement entre 200 et 500°C et une perte liée aux dégradations chimiques des différents types de granulats au-delà de 500°C.

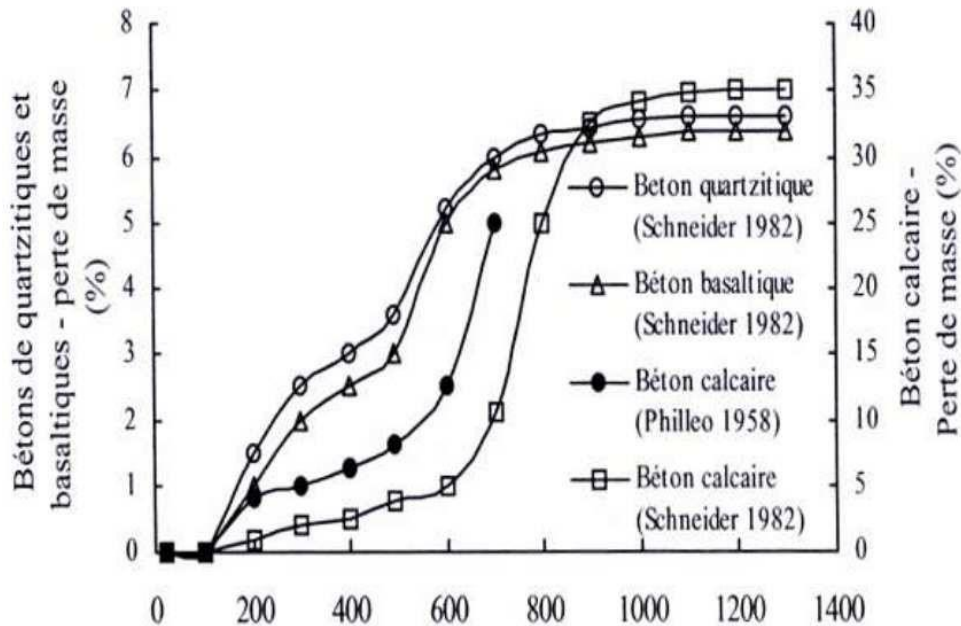


Figure 2. 16 Perte de masse des bétons de différents types de granulats en fonction de la Température (43)

Durant l'échauffement du béton, sa masse est soumise à une variation due à l'évaporation de l'eau et la déshydratation progressive du gel CSH. Sur la figure 2.17 nous pouvons observer une courbe caractéristique de la perte de masse durant l'échauffement, ainsi que la courbe de la vitesse de la perte de masse.

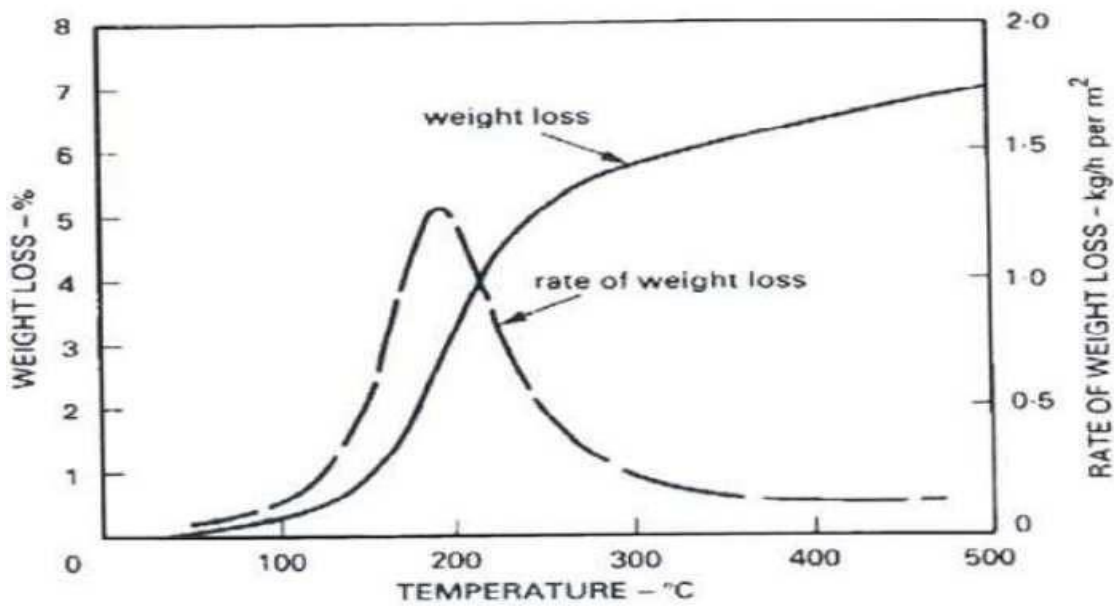


Figure 2. 17 Perte de masse durant l'échauffement et vitesse de perte de masse en fonction de la température (44)

Durant l'échauffement du béton, la masse du béton diminue à cause de l'évaporation de l'eau et la déshydratation progressive des hydrates de la pâte de ciment.

3.2 Déformation thermique du béton à hautes températures

Comme la majorité des matériaux, lorsqu'il est soumis à un changement de température, le béton subit une déformation thermique. Cette déformation joue un rôle très important dans le comportement des structures en béton soumises à de hautes températures.

La déformation thermique du béton est la superposition des déformations de la matrice et des granulats au cours de l'échauffement, elle dépend fortement des propriétés des constituants du béton notamment de leur nature et de leur quantité. Nous présentons ici la déformation thermique des constituants du béton, la pâte de ciment et les granulats.

3.2.1 Déformation thermique de la pâte de ciment

Sous l'effet de la température, la pâte de ciment durcie subit, dans un premier temps, une dilatation jusqu'à 150°C. A partir de cette température, elle subit un retrait important. La phase de dilatation est généralement attribuée à la mise en mouvement et à la dilatation volumique des molécules d'eau ainsi qu'à la réduction des forces capillaires de l'eau sur le solide du fait de l'augmentation de la température (27). La phase de contraction est attribuée au départ de l'eau libre puis de l'eau liée chimiquement qui provoque un retrait important de la pâte de

ciment. La figure 2.18 présente la dilatation thermique de la pâte de ciment durcie selon quatre différents travaux.

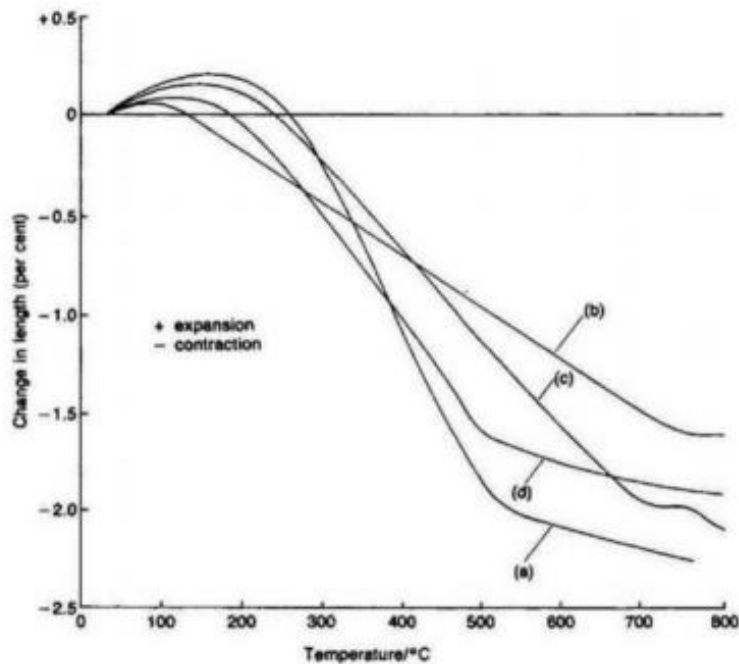


Figure 2. 18 Dilatation thermique de la pâte de ciment durcie selon quatre différents travaux (27)

L'évolution du coefficient de dilatation thermique de la pâte de ciment est fortement influencée par plusieurs paramètres. La température de changement de signe du coefficient de dilatation thermique dépend selon Hager (45) de la vitesse d'échauffement. Pour un échauffement de l'échantillon avec les vitesses de $0,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ et $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$, ces températures se situent respectivement aux alentours de 125°C et 183°C (45). En augmentant la vitesse d'échauffement, la température de changement augmente également.

Il a été également montré que l'ajout de la fumée de silice en quantité de 10% augmente, au cours de l'échauffement, le retrait de la pâte de ciment (46). De plus, le coefficient de dilatation est très influencé par l'humidité relative initiale de la pâte de ciment.

3.2.2 Déformation thermique des granulats

Les granulats sont les principaux constituants volumétriques du béton (ils occupent environ 70% du volume total). Leur dilatation thermique est le paramètre dominant de la déformation totale du béton. Plusieurs paramètres vont influencer la dilatation thermique des granulats, elle dépend de la nature de la roche, de la teneur en silice et de la teneur en eau dans la roche.

La figure 2.19 regroupe les courbes d'évolution de la déformation thermique de différentes roches. On peut noter sur cette figure que la roche à haute teneur en silice (quartz) a une forte

expansion thermique. Par contre, les roches ne contenant pas ou peu de silice, telles que les roches calcaires, ont des expansions thermiques moins importantes.

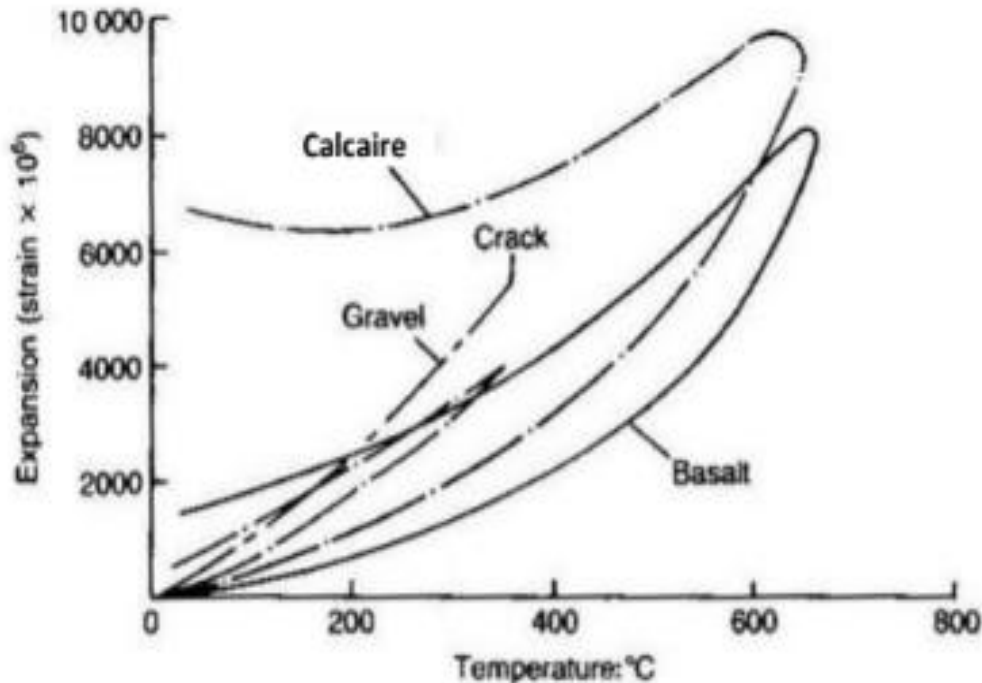


Figure 2. 19 Evolution de la dilatation thermique de différents types de roches avec la température (44)

3.2.3 Déformation thermique du béton

La déformation totale d'une éprouvette en béton non chargée soumise à une élévation de température très lente est due aux effets composés suivants :

- Expansion thermique des granulats.
- Retrait de matrice cimentaire,
- Microfissuration et contraintes engendrées par l'incompatibilité entre ces deux premiers effets,
- Transformations et décompositions des constituants du béton s'accompagnant de variations dimensionnelles.

L'analyse des résultats de la figure 2.20 montre que la déformation thermique des bétons est fortement influencée par la nature des granulats. Selon Hager (45), cette déformation n'est pas linéaire en fonction de la température. Les bétons avec des granulats silico-calcaires présentent des déformations plus importantes à partir de 300°C. À 600°C, la déformation des bétons avec ces granulats est environ 2,5 fois supérieure à celle des bétons avec des granulats

calcaires. Cette différence s'explique par le coefficient de dilatation thermique plus élevé des granulats silico-calcaires et les transformations du quartz- α en quartz- β à 573°C, qui entraînent une expansion de volume et contribuent à une fissuration significative du matériau.

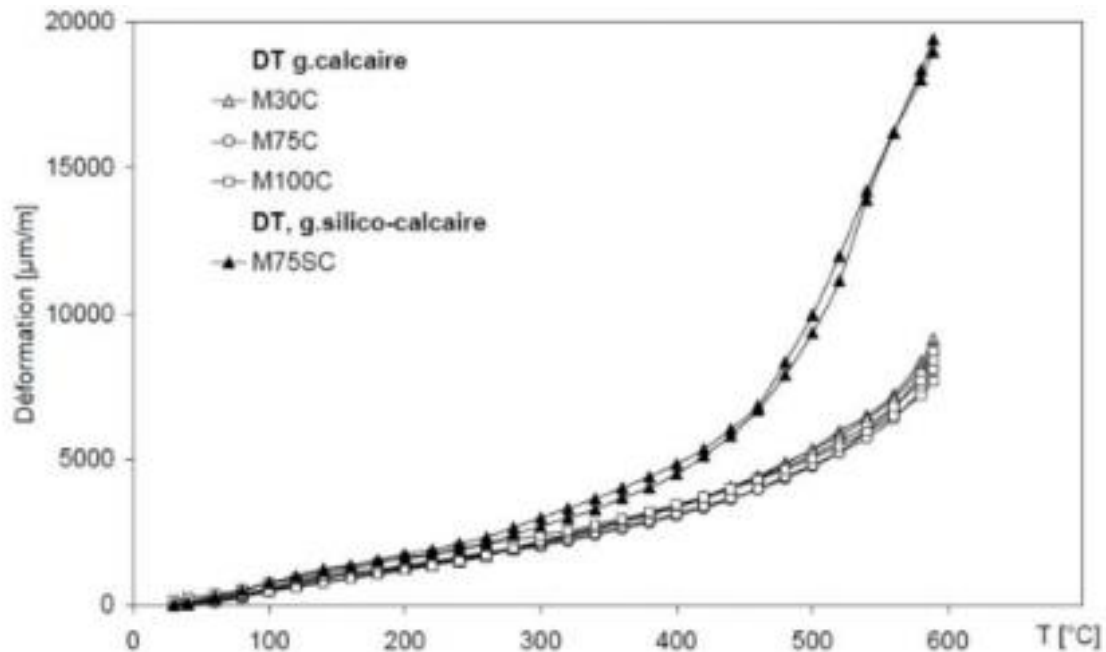


Figure 2. 20 Déformation thermique de quatre différents bétons confectionnés avec des granulats calcaires et silico-calcaires (45)

3.2.4 Déformation thermique transitoire

La déformation thermique du béton est fortement influencée par la présence d'une charge pendant le chauffage. La déformation supplémentaire engendrée par la température en régime transitoire est appelée « déformation thermique transitoire ». Cette déformation caractérise le comportement du béton lorsqu'il est simultanément soumis à une sollicitation mécanique et à une augmentation de la température (essentiellement lors de la première montée en température).

La figure 2.21 présente les courbes des déformations thermiques des quatre (4) bétons : un béton ordinaire de granulats calcaire, deux (2) bétons de haute performance de granulats calcaire et un béton de haute performance de granulats silico-calcaire. Les mesures des déformations thermiques sous charge (DTSC) ont été réalisées sur des échantillons de béton chargés en compression à 20% et 40% de la charge de rupture à froid et chauffés avec une vitesse de montée en température de 1°C/min jusqu'à 600°C.

Sur l'ensemble des courbes nous pouvons observer que :

- La valeur absolue de la déformation thermique sous charge (DTSC) lorsque le béton est chargé à 20% est inférieure à la déformation thermique. Lorsque le taux de chargement augmente de 20% à 40%, la valeur absolue de la déformation thermique sous charge reste inférieure à celle de la déformation thermique (DT).
- La déformation thermique transitoire (DTT) dépend fortement de la charge appliquée durant l'échauffement. La déformation thermique transitoire (DTT) des bétons chargés à 40% est supérieure à celle correspondant au taux de chargement de 20% et l'augmentation est environ 50% pour un doublement du taux de chargement.
- Les déformations thermiques transitoires (DTT) d'un BHP avec granulats calcaires sont supérieures aux déformations thermiques transitoires (DTT) du béton ordinaire de même type de granulats. L'écart entre les courbes augmente jusqu'à 600°C. Cette différence de comportement des bétons ordinaires et BHP peut avoir pour origine la nature et la quantité de la pâte (47).
- La déformation thermique du BHP contenant des granulats silico-calcaires présente des résultats qui deviennent supérieures à partir de 300°C. La déformation thermique à 600°C d'un BHP avec des granulats silico-calcaires est environ 2,5 fois supérieure à celles des autres bétons de granulat calcaire. Cette déformation thermique plus élevée est liée à la nature des granulats silico-calcaires, qui possèdent un coefficient de dilatation thermique plus élevée que le calcaire.

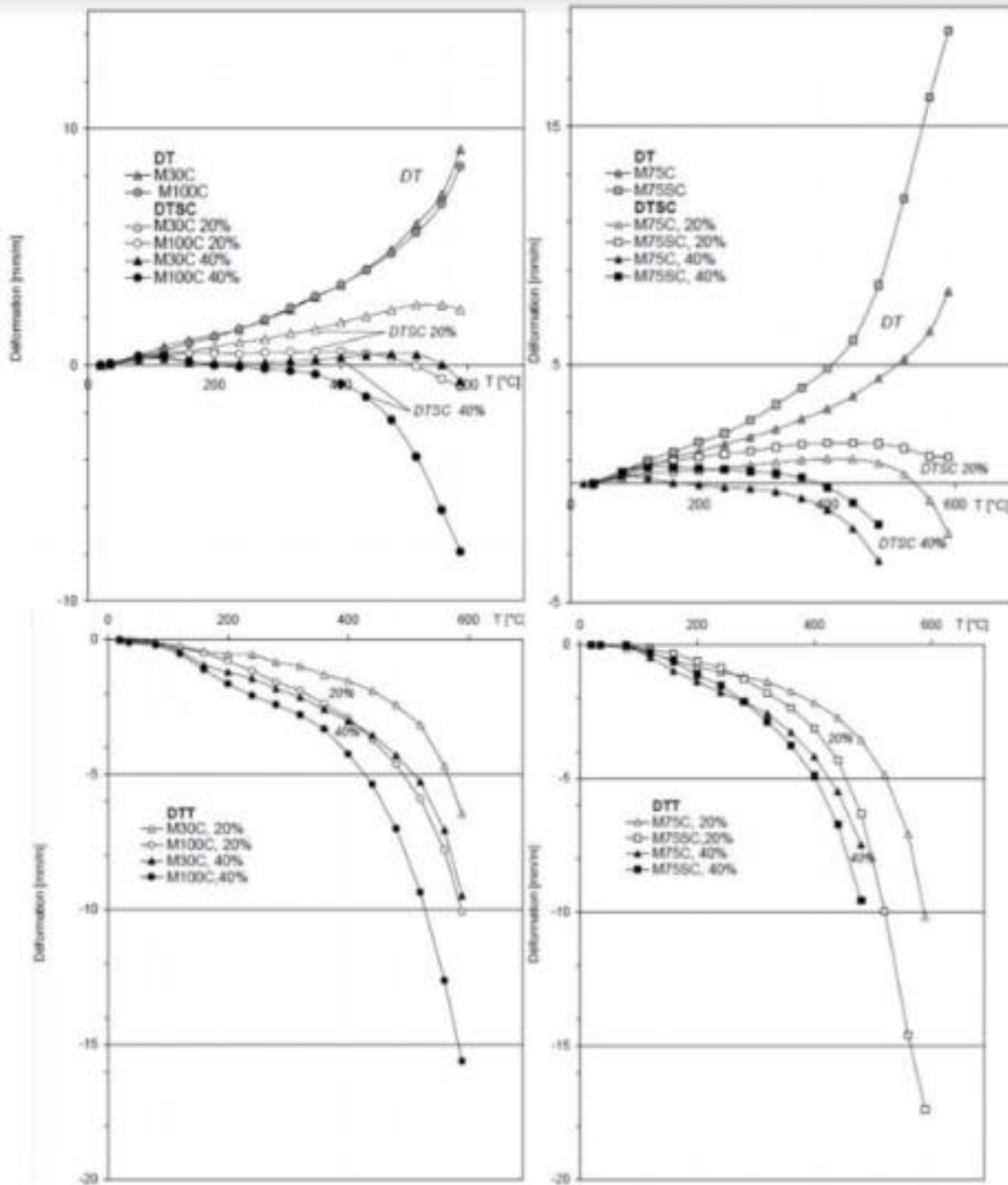


Figure 2. 21 Déformation thermique (DT), déformation thermique sous charge (DTSC) et déformation thermique transitoire (DTT) déterminées sur les bétons BO et BHP avec granulats calcaires, et BHP avec granulats silico-calcaires (47)

4 Conclusion

Le comportement du béton à température élevée est un enjeu crucial pour la durabilité et la sécurité des structures en béton. À mesure que la température augmente, le béton perd de sa résistance mécanique, se fissure, et peut subir des phénomènes d'éclatement. La déshydratation et la dégradation de ses composants internes altèrent sa microstructure, augmentant sa porosité et diminuant sa densité. Il est donc essentiel de choisir des matériaux appropriés et d'incorporer des additifs et des armatures renforcées pour améliorer la résistance du béton à la chaleur. La compréhension de ces aspects permet de concevoir des structures plus résilientes, capables de maintenir leur intégrité et leur sécurité même en conditions extrêmes de chaleur.

Chapitre 3

1 Introduction à ANSYS APDL

ANSYS APDL (ANSYS Parametric Design Language) est un puissant outil de simulation par éléments Finis utilisé dans de nombreux domaines de l'ingénierie. Cette introduction vous guidera à travers les Principales étapes de la modélisation et de l'analyse par éléments finis en utilisant ANSYS APDL (48).

2 Présentation de l'interface utilisateur

L'expérience de travail d'ANSYS APDL est intuitive et personnalisable grâce à son interface utilisateur. Vous pourrez explorer les divers panneaux et outils qui faciliteront votre navigation dans le logiciel. Vous découvrirez comment ajuster l'environnement de travail en fonction de vos préférences afin d'optimiser votre productivité (48).

2.1 Panneau de commandes

Le panneau de commandes est le cœur d'ANSYS APDL. C'est ici que vous saisissez les commandes APDL pour définir votre modèle et lancer les analyses.

2.2 Visualiseur 3D

Grâce au visualiseur 3D, vous pourrez observer de manière interactive et détaillée votre modèle géométrique, votre maillage et les résultats de vos simulations.

2.3 Gestionnaire de projet

Le gestionnaire de projet vous aidera à organiser et à naviguer facilement entre vos différents modèles et analyses, assurant ainsi une gestion efficace de vos projets.

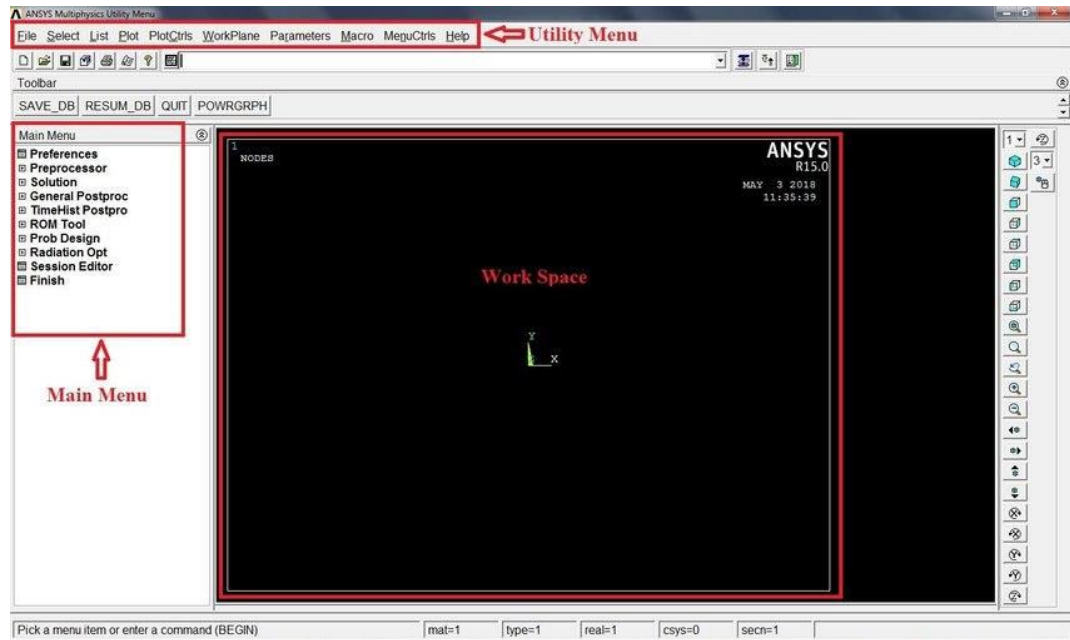


Figure 3. 1 interface ANSYS APDL (48)

3 Définition de la géométrie et du maillage

L'établissement de la géométrie et la construction du maillage jouent un rôle essentiel dans la modélisation par éléments finis. Vous acquérez les compétences nécessaires pour utiliser les outils de conception 3D d'ANSYS APDL afin de créer des formes complexes, ainsi que les options de maillage avancées afin de produire un maillage de qualité supérieure adapté à votre analyse (48).

3.1 Création de la géométrie

ANSYS APDL vous offre une interface de conception 3D complète, vous permettant de créer des géométries simples ou complexes à l'aide de primitives, de courbes et de surfaces.

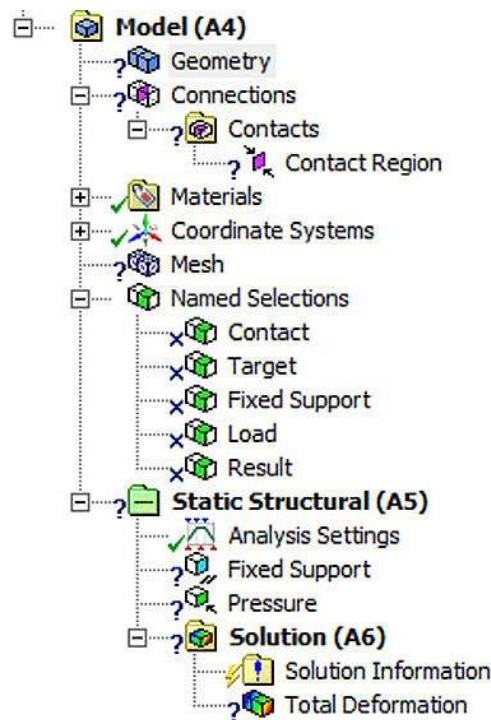


Figure 3. 2 Création de la géométrie (48)

3.2 Maillage de la géométrie

Le maillage joue un rôle crucial dans une analyse précise. Vous explorerez les diverses possibilités de maillage, comme la régulation de la taille des éléments, l'affinage local et les techniques de maillage avancées.

3.3 Optimisation du maillage

Un maillage de haute qualité est crucial pour obtenir des résultats fiables. Vous apprendrez à évaluer la qualité de votre maillage et à effectuer des ajustements pour améliorer la précision de votre analyse.

4 Spécification des propriétés des matériaux

Est crucial de définir les caractéristiques des matériaux afin d'effectuer une analyse précise. Il vous sera enseigné de donner des propriétés comme le module d'Young, le coefficient de Poisson et la valeur. En assurant que vos simulations reflètent fidèlement les caractéristiques de vos matériaux, vous pouvez améliorer la densité de vos modèles (48).

4.1 Matériaux isotropes

Les matériaux isotropes ont les mêmes propriétés dans toutes les directions, ce qui simplifie leur représentation dans ANSYS APDL.

4.2 Matériaux anisotropes

Les matériaux anisotropes, comme les composites, nécessitent une spécification plus détaillée de leurs propriétés dans différentes directions.

4.3 Matériaux non linéaires

ANSYS APDL vous permet de modéliser des comportements non linéaires, tels que la plasticité et les grandes déformations, pour une analyse plus réaliste.

4.4 Bibliothèque de matériaux

ANSYS APDL dispose d'une bibliothèque de matériaux prédéfinis, vous évitant d'avoir à saisir manuellement toutes les propriétés.

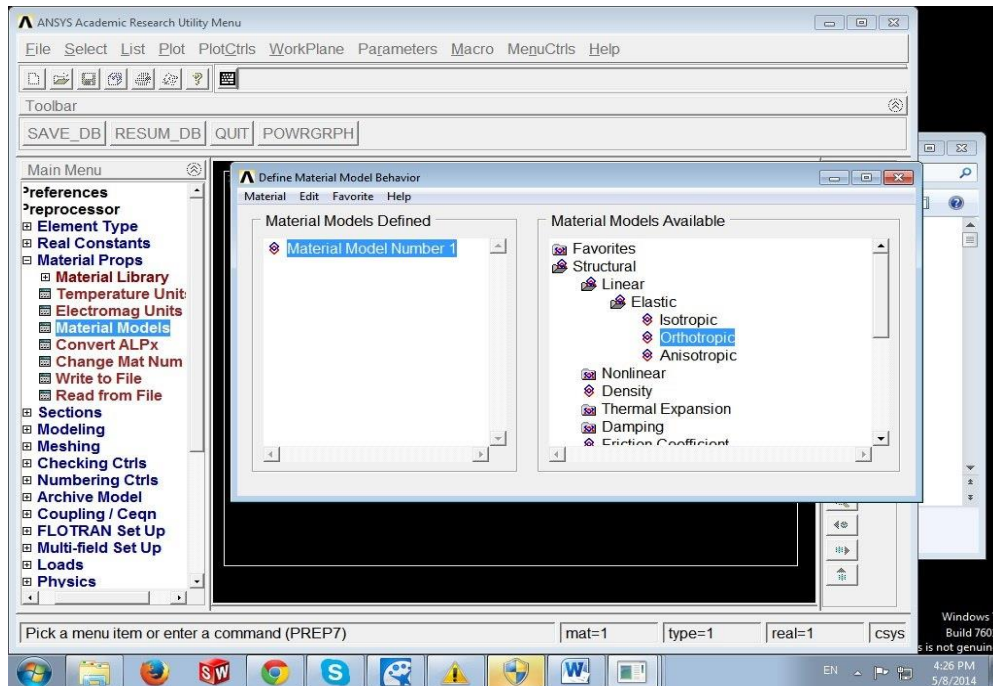


Figure 3. 3 définir le comportement du modèle de matériau (48)

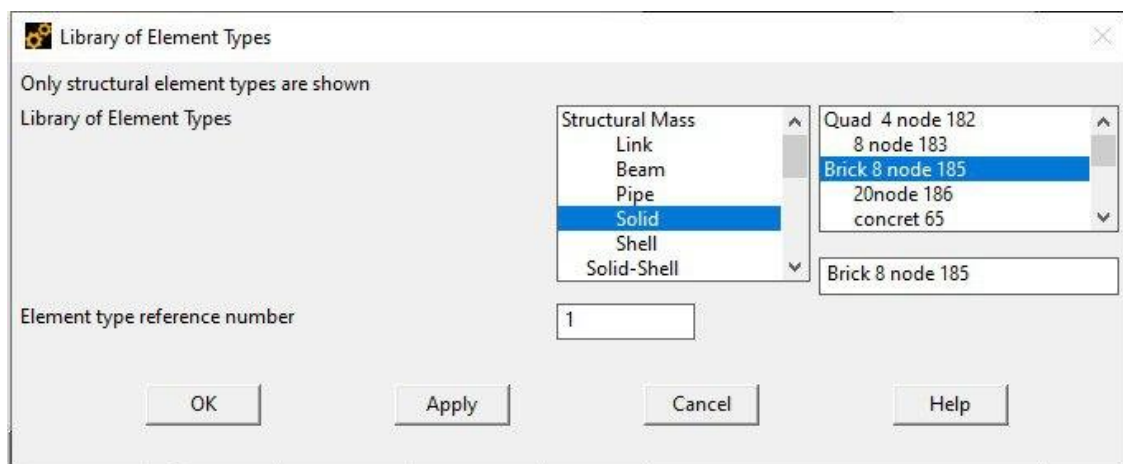


Figure 3. 4 bibliothèque de types d'éléments (48)

5 Définition des conditions aux limites et des charges

Une fois que vous aurez établi la géométrie, le maillage et les caractéristiques des matériaux, il sera nécessaire de préciser les limites et les charges appliquées à votre modèle. La détermination de cette étape influence la réaction de votre système face aux sollicitations externes, et elle est cruciale pour obtenir des résultats fiables (48).

5.1 Conditions aux limites

Vous pourrez appliquer des conditions de support, de symétrie et d'encastrement pour simuler les contraintes de votre modèle.

5.2 Charges appliquées

Différents types de charges, telles que des forces, des moments et des pressions pourront être appliqués à votre modèle.

5.3 Charges thermiques

ANSYS APDL offre aussi la possibilité d'intégrer les effets des charges thermiques dans votre modèle.

5.4 Charges dynamiques

Vous pourrez simuler des charges dynamiques, comme des accélérations et des vibrations, pour une analyse plus réaliste.

6 Résolution du problème et analyse des résultats

Dès que votre modèle et les conditions de chargement seront définis, ANSYS APDL résoudra les équations mathématiques qui contrôlent le fonctionnement de votre système. Ainsi, vous aurez la possibilité d'examiner les résultats de la simulation, tels que les contraintes, les déformations et les fréquences spécifiques, propres, afin de mesurer les résultats de votre conception (48).

6.1 Résolution du problème

ANSYS APDL dispose de solveurs puissants qui résoudront efficacement vos problèmes d'éléments finis, en fonction de leur nature (structurelle, thermique, électromagnétique, etc.).

6.2 Visualisation des résultats

Les résultats de simulation sont présentés de manière intuitive dans le visualiseur 3D d'ANSYS APDL, vous permettant d'interpréter facilement les performances de votre modèle.

6.3 Analyse des performances

Vous pourrez extraire des données quantitatives, telles que les contraintes maximales, les déformations et les fréquences propres, pour évaluer la conception de votre système.

7 Optimisation du modèle et des paramètres

ANSYS APDL met à votre disposition des outils puissants pour optimiser votre modèle et vos paramètres de conception. Vous pouvez ainsi explorer diverses configurations, identifier les paramètres essentiels et trouver la solution optimale répondant à vos exigences (48).

7.1 Définition des paramètres

Commencez par identifier les paramètres clés de votre modèle, tels que les dimensions, les propriétés des matériaux et les conditions aux limites.

7.2 Analyse de sensibilité

Évaluez l'impact de chaque paramètre sur les performances de votre système afin de déterminer les leviers d'optimisation les plus efficaces.

7.3 Processus d'optimisation

Utilisez les algorithmes d'optimisation intégrés d'ANSYS APDL pour explorer automatiquement l'espace Des solutions et trouver la configuration optimale.

8 Conclusion et perspectives

ANSYS APDL est un outil puissant qui vous permettra de mener des simulations numériques avancées dans de nombreux domaines de l'ingénierie. En maîtrisant les étapes clés de la modélisation par éléments finis, vous serez en mesure de concevoir, d'analyser et d'optimiser vos systèmes de manière efficace. Les perspectives offertes par ANSYS APDL sont vastes, allant de l'analyse structurelle à la thermique en passant par l'électromagnétisme, offrant ainsi un large éventail d'applications pour vos projets d'ingénierie.

Chapitre 4

1 Introduction

Les incendies sont des catastrophes importantes qui causent d'énormes dégâts aux bâtiments et autres structures en béton. En général, Le béton offre une bonne résistance au feu en raison de sa faible conductivité thermique

Cependant, les températures élevées affectent considérablement les performances des structures en béton. Pour cette raison, dans la présente étude, les éléments structurels considérés sont : poutre, poteau et dalle qui sont soumis à une température de 593 °C pendant 1h. Nous avons étudié également, l'effet du feu sur la poutre, les poteaux avec différentes dimensions de l'enrobage et les dalles de différentes épaisseurs à des températures élevées par analyse des éléments finis.

2 La dimension des structures

L'importance de cette étude est de présenter une approche de l'impact du feu sur les éléments structurels tels que les poutres, les dalles et les poteaux à l'aide du logiciel ANSYS. Les dimensions des structures considérées dans cette étude sont illustrées sur le Tableau 4.1

Tableau 4. 1 Dimension des éléments structurel (49)

Description	Poutre	Poteau	Dalle
Dimension (mm)	200x300	300x300	3000x6000
Hauteur (mm)	3350	3150	3470
Epaisseur (mm)	/	/	120

3 Les propriétés physiques du matériau

Le matériau utilisé pour la protection des structures étudiées est le béton dont les propriétés physiques sont présentées sur le Tableau 4.2 :

Tableau 4. 2 propriétés physiques du matériau utilise (49)

Conductivité thermique (W/m/K)	1.5
Capacité calorifique (J/K*kg)	880
Masse volumique (kg/m3)	2400
Module de Young (Mpa)	35000
Coefficient de poisson	0.2

4 Modélisation

Dans le présent travail, la modélisation structurelle et l'analyse correspondante ont été réalisées à l'aide de la version ANSYS (ANSYS 13.2). D'autre part, tous les modèles sont soumis à une température de 593°C pendant 1 heure avec une dimension d'enrobage sont adoptées pour les poutres (200mm*300mm) Pour les piliers(300mm*300mm), pour les dalles, nous avons adopté une épaisseur de (120mm). L'évaluation de l'impact de feu sur ces structures sera étudiée en termes de déformation du béton. Nous avons pris comme modèle pour la simulation, une cabine électrique au niveau du site de l'entreprise SOFERT.



Figure 4. 1 zoom sur la cabine électrique sur le site de SORFERT (49)

4.1 Modélisation de la cabine électrique :

Nous avons commencé par modéliser la cabine électrique en utilisant le logiciel ANSYS APDL

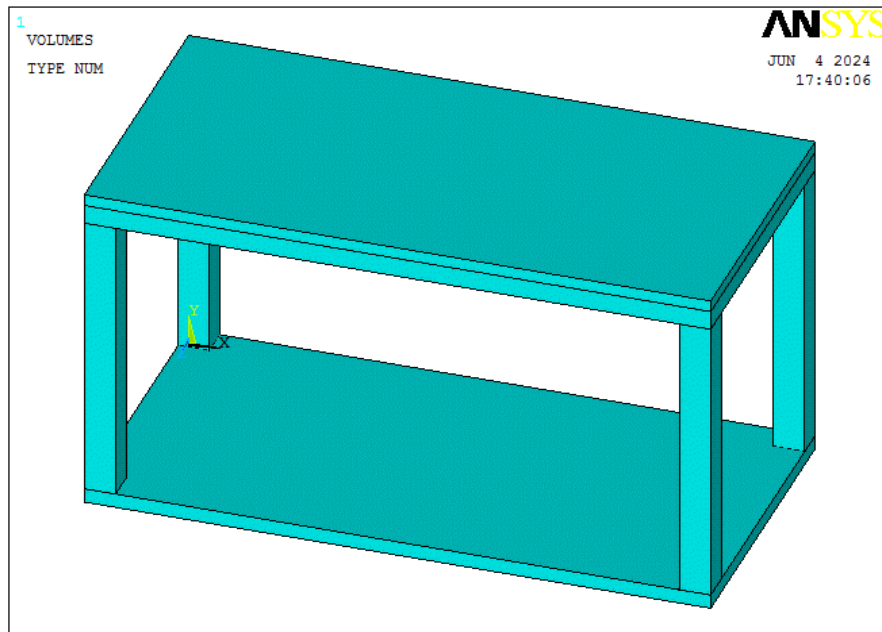


Figure 4. 2 modélisation de la cabine électrique

5 Résultats de la simulation

Après qu'un incendie a été déclenché par une surchauffe des installations électriques, atteignant une température maximale de 593 degrés Celsius pendant une heure, nous avons simulé cette température pour les parois intérieures de la structure, tandis que nous avons maintenu une température ambiante de 22 degrés Celsius pour les parois extérieures, sur notre modèle de cabine électrique dans le logiciel ANSYS APDL. Les résultats obtenus sont les suivants.

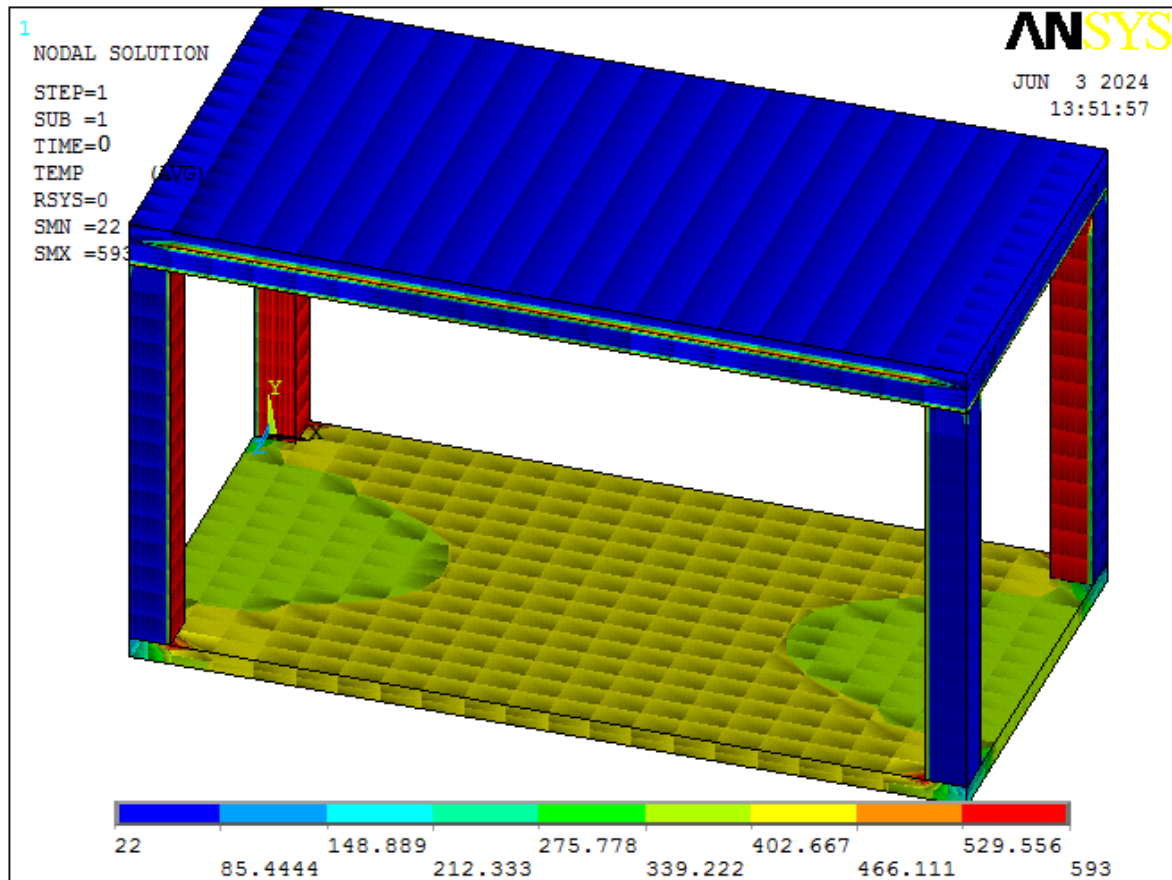


Figure 4. 3 résultat dans 0h + flux thermique

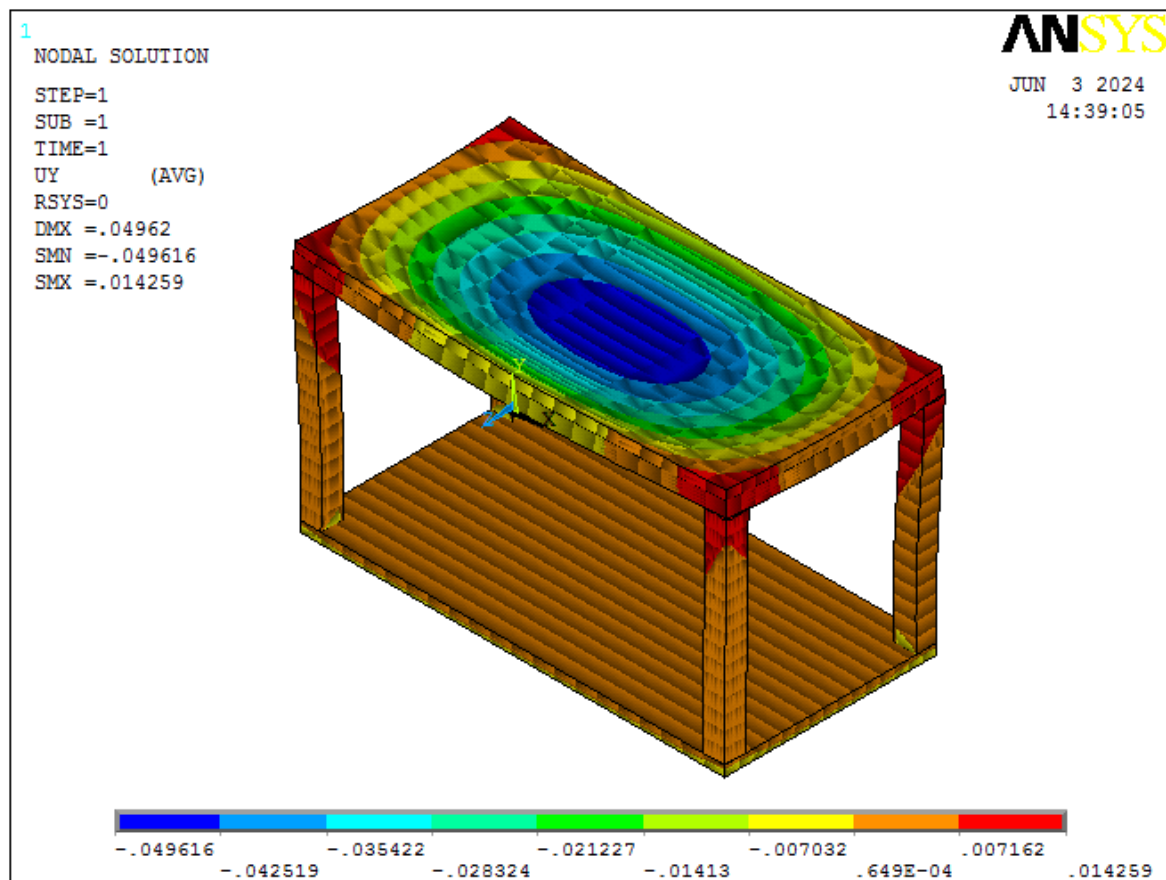


Figure 4. 4 déformation après 1h d'incendie + flux thermique

Après une heure, on observe clairement la déformation des structures : les quatre piliers, la dalle et la poutre sont tous affectés.

5.1 Résultats de la simulation détaillé

5.1.1 Simulation des piliers

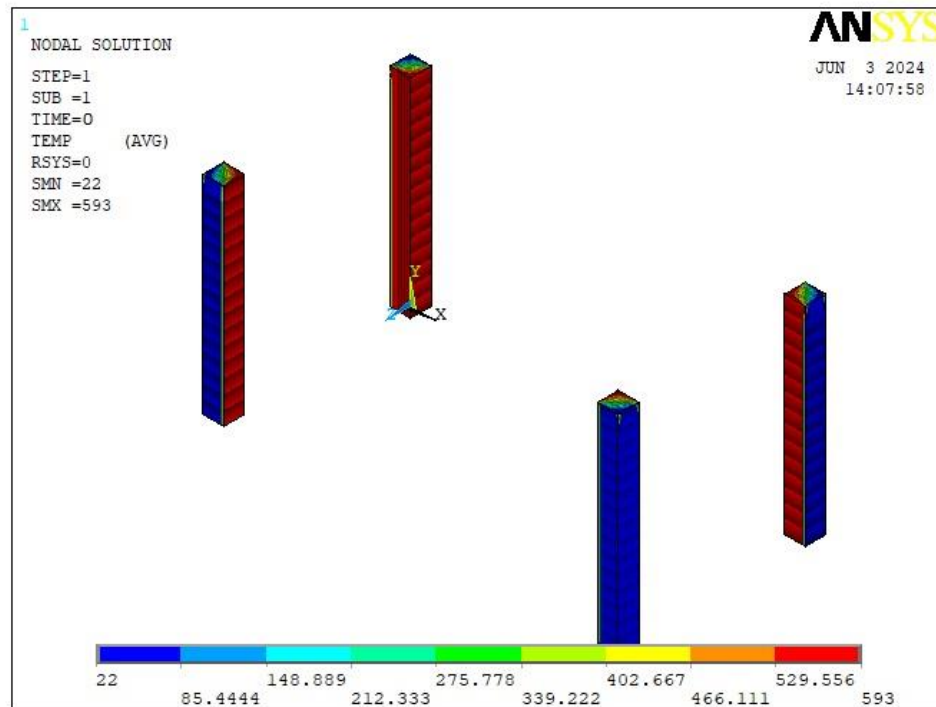


Figure 4. 5 dans 0h état des 4 pilier + flux thermique (vue isométrique)

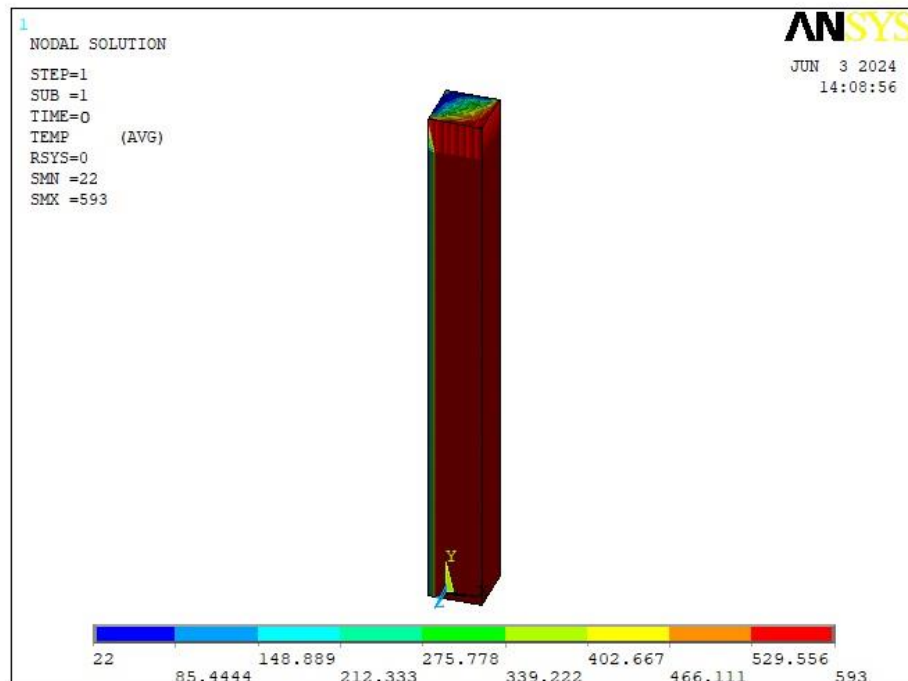


Figure 4. 6 dans 0h état de 1 des 4 piliers + flux thermique (vue isométrique)

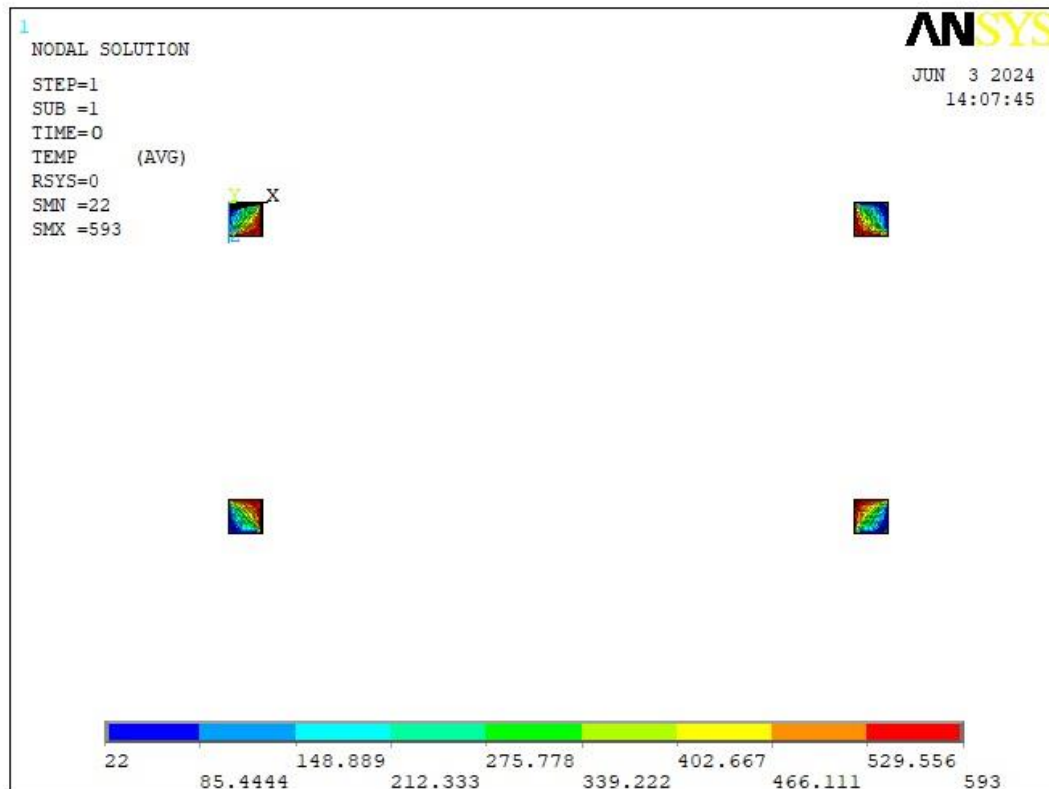


Figure 4. 7 dans 0h état des 4 pilier + flux thermique (vue dessus)

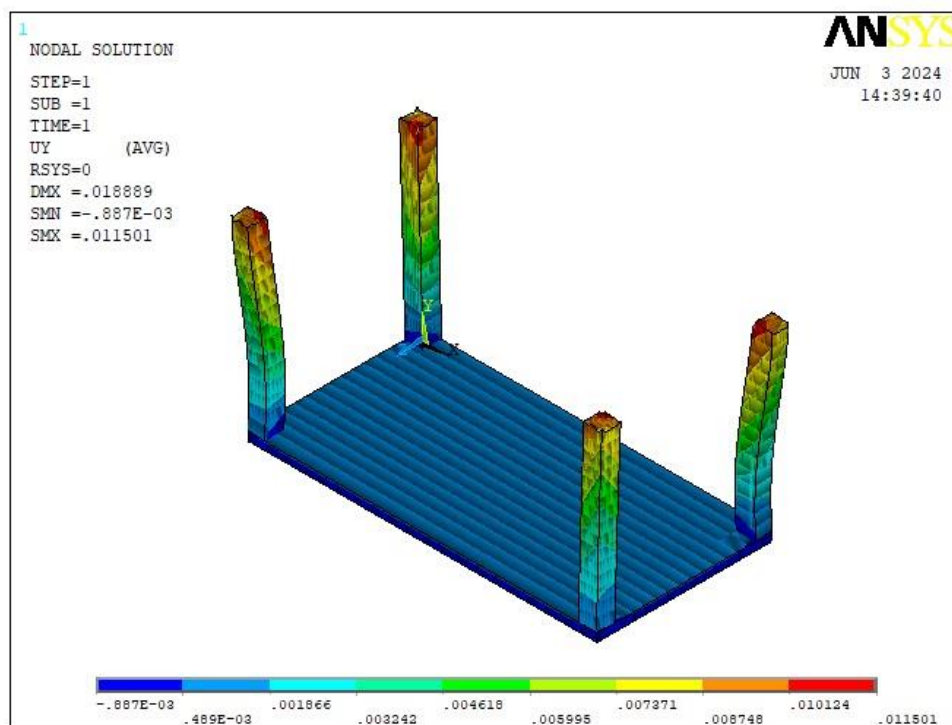


Figure 4. 8 déformation des 4 piliers dans le temps = 1H + flux thermique

Les figures (4.5), (4.6) et (4.7) mettent en évidence que la température atteint son maximum aux emplacements où l'incendie a commencé, sans aucune déformation observée.

Sur la figure (4.8), on observe que les piliers se penche vers extérieur après une heure d'incendie.

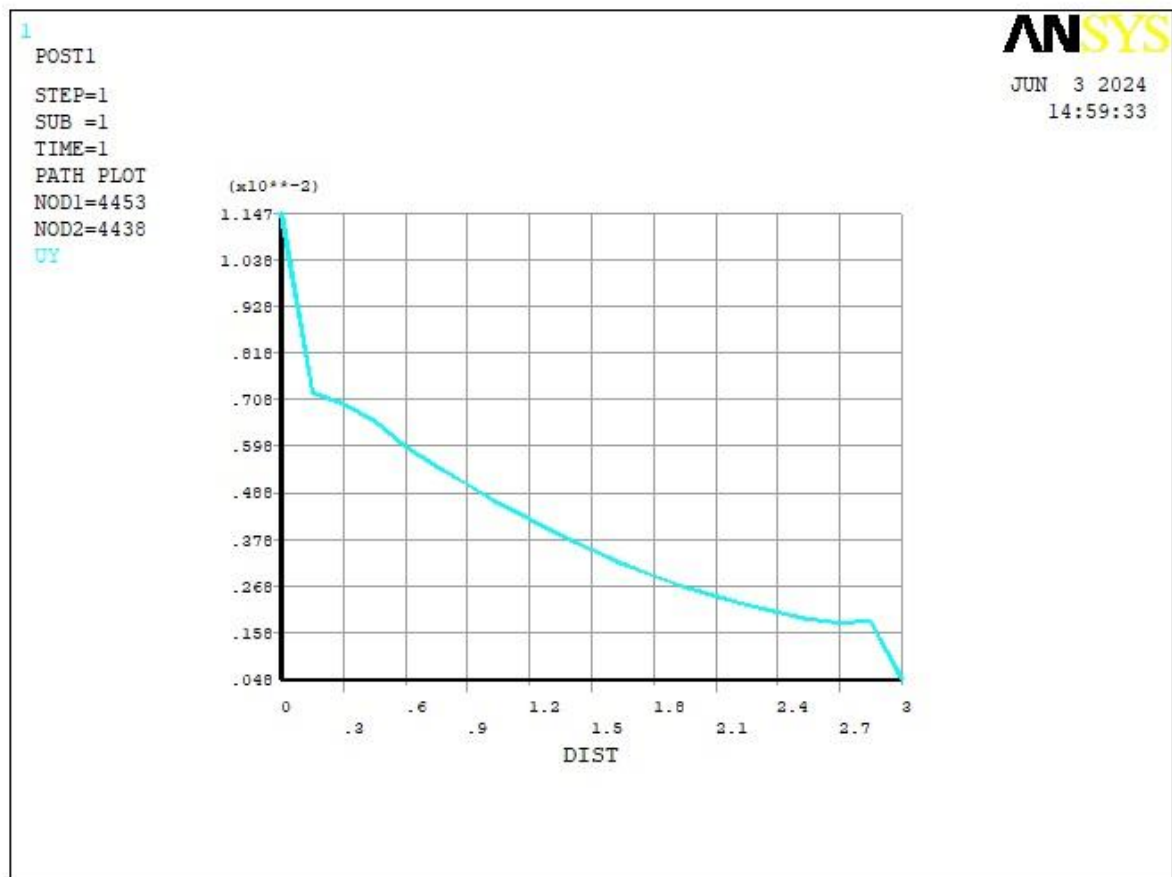


Figure 4. 9 graphe de la déformation des piliers en fonction de la distance dans un temps = 1H

- Ce graphe représente la déformation des piliers en fonction de la distance (mètre) dans un temps =1H

De 0 a 0.15 on observe une importante déformation de 0.439cm

Puis la partie De 0.15 a 2.8 elle continue a se pencher de 0.528cm

En fin la partie haute du pilier qui est de 2.8 a 3 elle penche de 0.132cm

5.1.2 Simulation des poutres

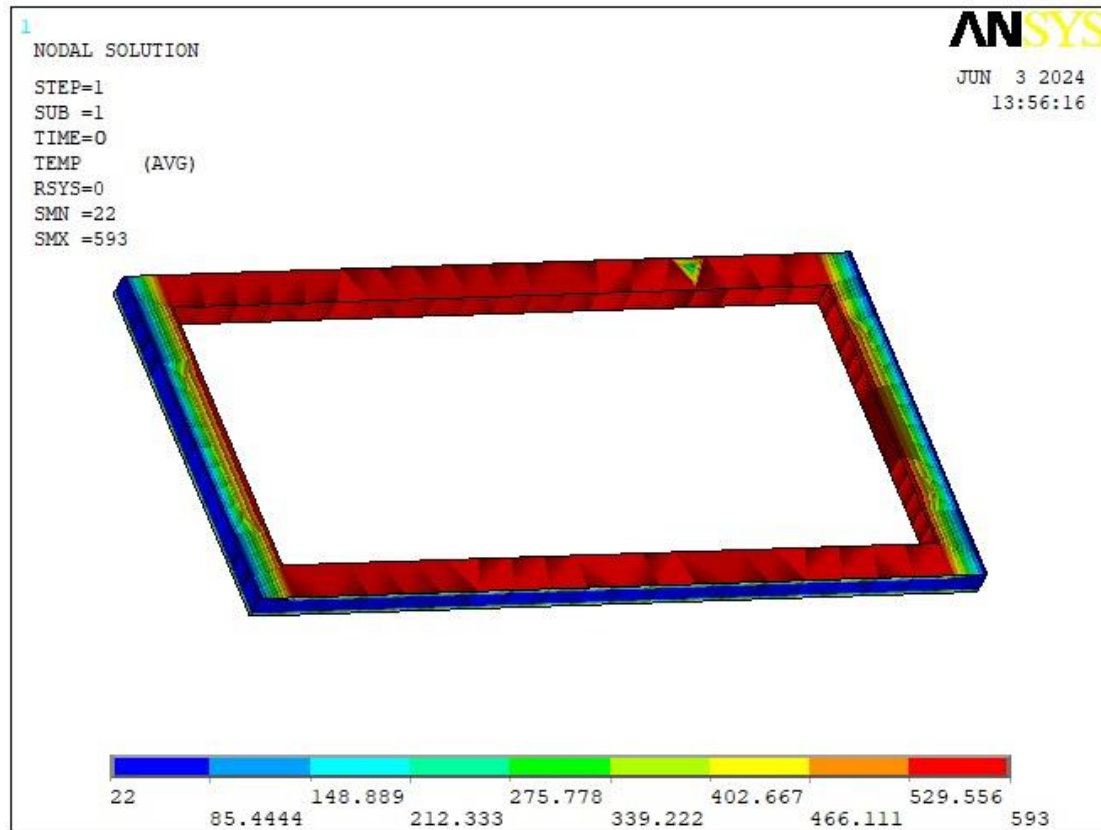


Figure 4. 10 état des poutres dans le temps= 0H heure + flux thermique (vue isométrique)

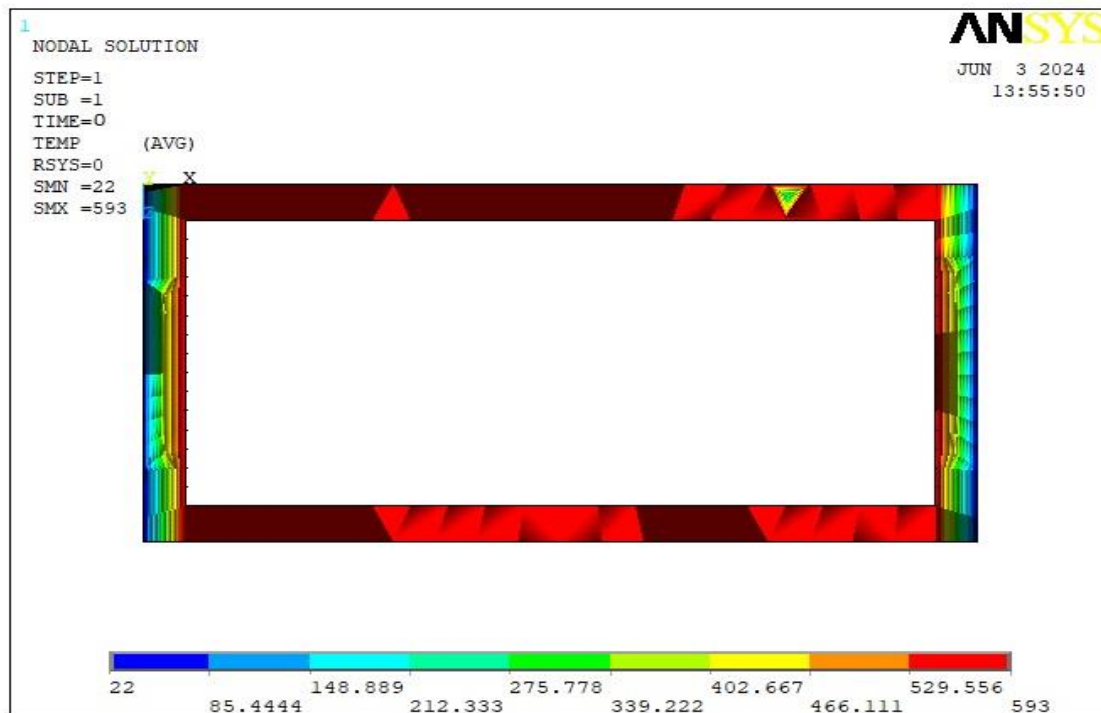


Figure 4. 11 état des poutres dans le temps = 0H + flux thermique (vue en dessous)

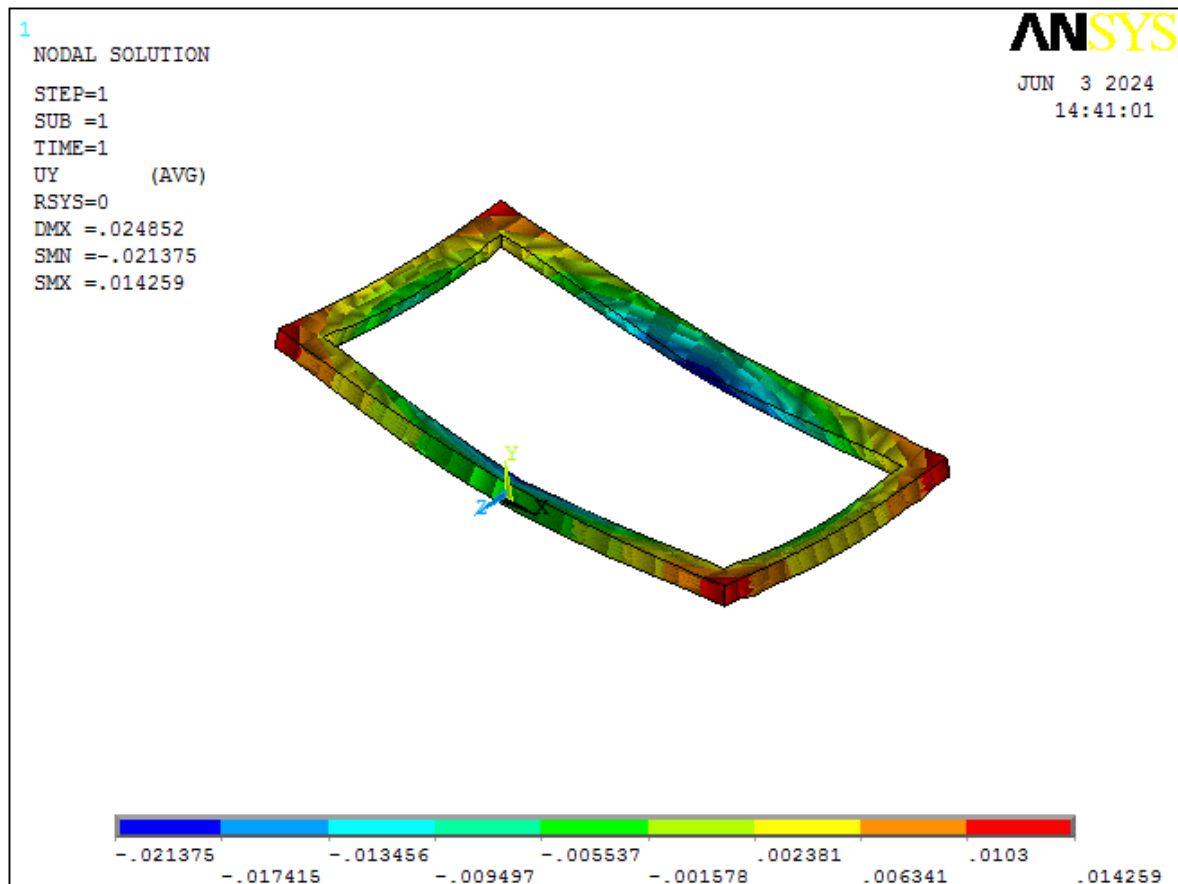


Figure 4. 12 déformation des poutres dans le temps = 1H + flux thermique (vue isométrique)

Les figures (4.10) et (4.11) mettent en évidence que la température atteint son maximum aux emplacements où l'incendie a commencé, sans aucune déformation observée.

Sur la figure (4.12) on voit après une heure de simulation, il est constaté que les poutres présentent une courbure dans les extrémités.

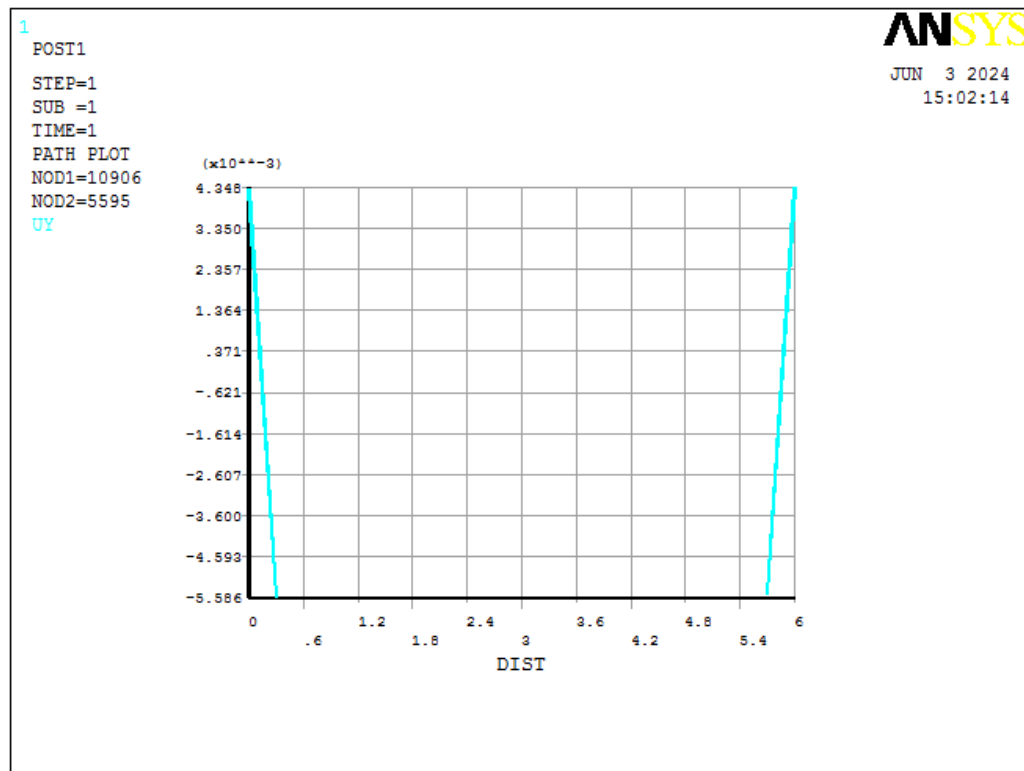


Figure 4. 13 graphe de la déformation des poutres en fonction de la distance dans un temps = 1H

- Ce graphe représente la déformation des poutres en fonction de la distance (mètre) dans un temps =1H

Les deux extrémités de la poutre se déforment de manière équivalente :

- De 0 à 0.3 se courbe vers l'intérieur de la cabine de 1cm.
- De 5.7 à 6 se courbe également vers l'intérieur de la cabine de 1cm.

5.1.3 Simulation de la dalle

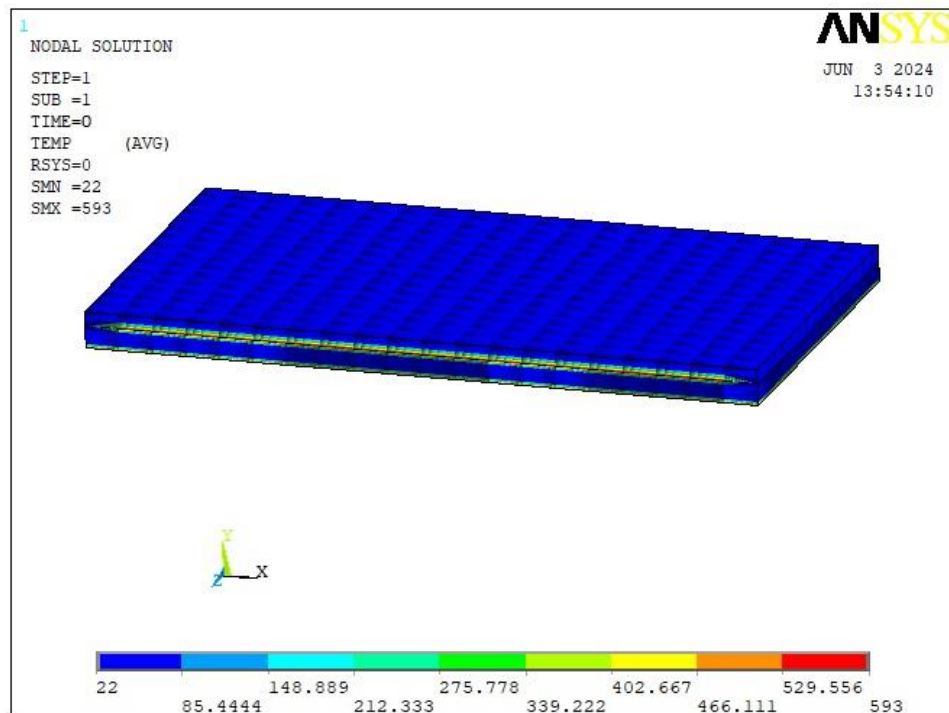


Figure 4. 14 état de la dalle dans le temps= 0H heure + flux thermique (vue isométrique)

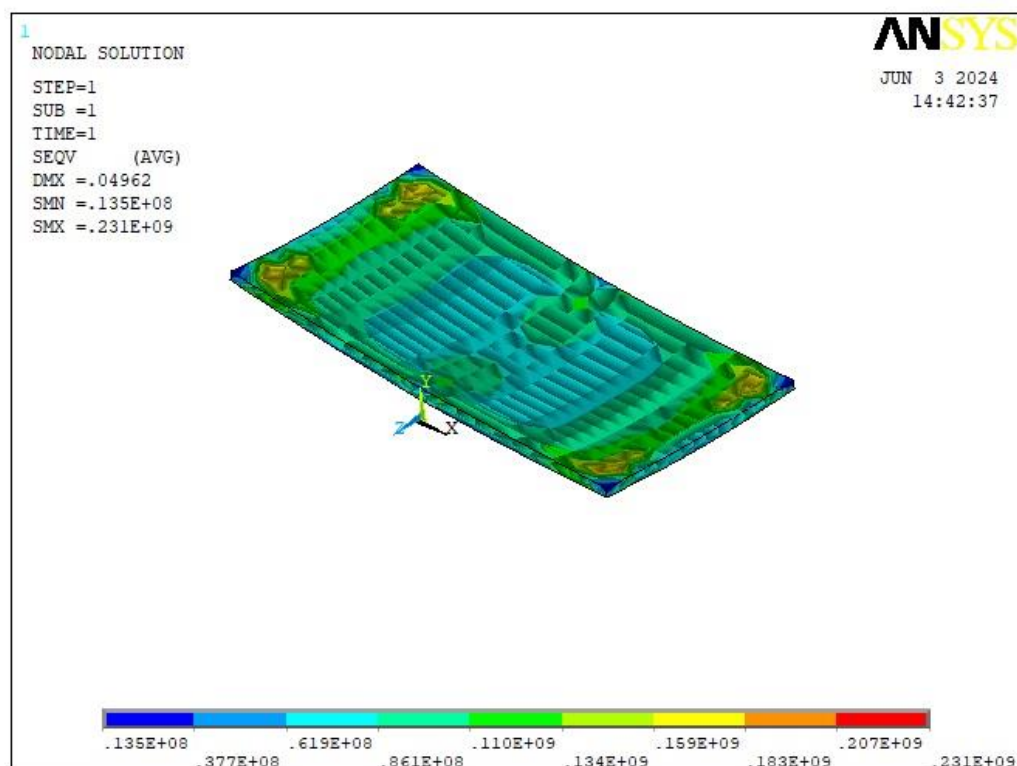


Figure 4. 15 déformation de la dalle dans le temps = 1H + flux thermique (vue isométrique)

- La figure 4.14 dans l'instant 0h indique que la température extérieure ambiante de la dalle est de 22°C, avec une légère augmentation sur les côtés, et aucune déformation
- Dans la figure 4.15, on observe une déformation de la dalle qui prend la forme d'un U. dans

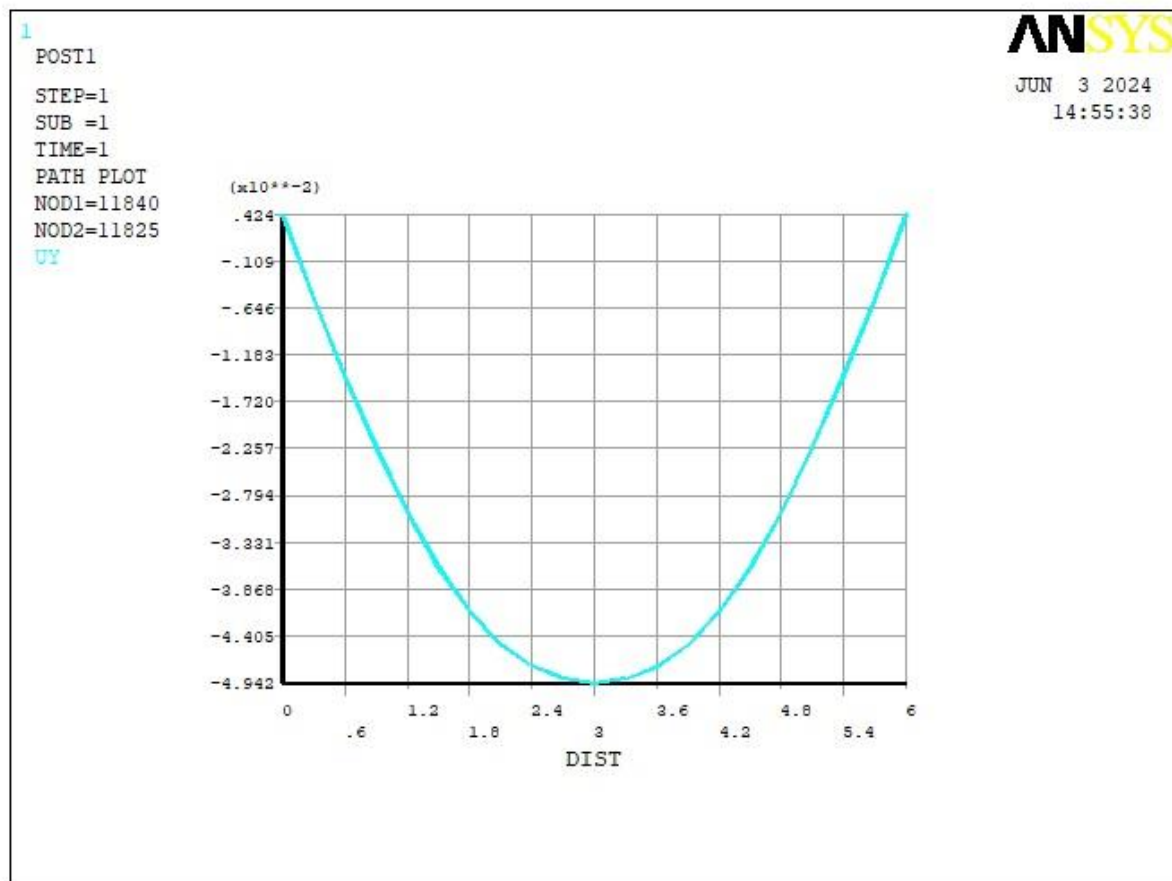


Figure 4. 16 graphe de la déformation de la dalle en fonction de la distance dans un temps = 1H

Ce graphe représente la déformation de la dalle en fonction de la distance (mètre) dans un temps =1H

- La dalle se déforme de façon symétrique des deux côtés :
De 0 à 3 se forme un creux de 0.5cm.
De 3 à 6 se forme un creux de 0.5cm.

6 Prévention et intervention contre l'incendie électrique

6.1 Prévention contre l'incendie

6.1.1 Prévention

- **Inspections régulières** : Planifiez des inspections régulières de la cabine électrique par du personnel formé pour détecter tout signe de surchauffe, d'usure des équipements ou de tout autre problème électrique potentiel.
- **Maintenance préventive** : Mettez en place un programme de maintenance préventive pour garantir que tous les équipements électriques sont en bon état de fonctionnement.
- **Nettoyage et organisation** : Veillez à maintenir la cabine électrique propre et bien rangée afin d'éviter l'accumulation de débris inflammables, qui pourraient favoriser la propagation du feu en cas d'incendie.
- **Formation et sensibilisation** : Faites prendre conscience au personnel des dangers d'incendie et donnez une formation appropriée sur les mesures de sécurité, telles que l'utilisation des extincteurs, la détection des signes d'incendie et les mesures d'évacuation (50).

6.1.2 Formation du personnel

- **Simulations d'incendie** : Organisez des exercices réguliers de simulation d'incendie pour que le personnel puisse se familiariser avec les procédures d'évacuation et les actions à prendre en cas d'urgence.
- **Identification des responsabilités** : Déterminez de manière précise qui est chargé de la sécurité incendie dans la cabine électrique et veillez à ce qu'ils soient formés pour réagir de manière efficace en cas d'incendie (50).

6.1.3 Équipement de lutte contre l'incendie

- **Sélection appropriée des extincteurs** : Utilisez des extincteurs d'incendie adaptés aux risques électriques et assurez-vous qu'ils sont correctement installés et facilement accessibles.

- **Maintenance régulière** : Planifiez des inspections régulières de l'équipement de lutte contre l'incendie pour garantir qu'il est en bon état de fonctionnement et prêt à être utilisé en cas d'urgence.
- **détecteur de fumée** :
l'installation de détecteurs de fumée dans une cabine électrique est une mesure importante de prévention des incendies. Les détecteurs de fumée sont conçus pour détecter les premiers signes de fumée, qui peuvent indiquer la présence d'un incendie naissant. Voici quelques points à considérer concernant les détecteurs de fumée dans une cabine électrique (50).



Figure 4. 17 détecteur de fumée (50)

6.2 Intervention en cas d'incendie

6.2.1 Plan intervention

- **Plan détaillé** : Créez un plan d'action en cas d'incendie exhaustif, incluant des consignes précises concernant les étapes à suivre en cas de détection d'incendie, de décommissions de la cabine électrique et de notification aux services d'urgence.
 - **Formation continue** : Assurez-vous que le personnel est régulièrement formé sur les procédures d'intervention en cas d'incendie et qu'il est familiarisé avec le plan d'intervention.

6.2.2 Intervention en cas d'incendie

- **Réaction immédiate** : Si vous êtes confronté à un incendie, il est important de réagir rapidement en activant l'alarme incendie, en alertant les services d'urgence et en commençant à combattre le feu si cela peut être réalisé de manière sécuritaire.
- **Évacuation sûre** : Si le feu est incontrôlable ou si la fumée est dense, évacuez la cabine électrique en suivant les itinéraires d'évacuation préétablis et en vous assurant que tout le personnel quitte la zone en toute sécurité (50).

6.3 Après l'incident

- **Évaluation et analyse** : Après l'incident, menez une évaluation détaillée pour identifier les causes de l'incendie, les lacunes dans les procédures de sécurité et les actions correctives nécessaires pour prévenir les incidents similaires à l'avenir (50).

7 Conclusion

Nous avons initié notre étude en modélisant la géométrie de la cabine d'électricité de SORFERT, suivi d'une simulation exhaustive à l'aide du logiciel ANSYS APDL. Cette simulation nous a permis d'analyser le comportement du béton sous des conditions de pression et de température extrêmes (593°C) appliquées aux points critiques de la structure (piliers, poutres, dalles), révélant ainsi les transformations observées suivantes :

- Pour les piliers les déformations sont surtout localisées à 0 m de la longueur du pilier et diminuent lorsqu'on s'éloigne.
- Pour les poutres les déformations sont observées au milieu de la structure avec un taux de déformation de 1cm.
- Pour la dalle les déformations se situent au centre de celui-ci avec un taux de déformation égale à 0.5cm.

Pour conclure, nous avons élaboré des modèles de sécurité comprenant des mesures de prévention et d'intervention afin de garantir la fiabilité et la durabilité de notre système. Ces démarches ont été essentielles pour anticiper les risques potentiels et assurer un fonctionnement sécurisé de la cabine d'électricité de SORFERT.

Conclusion générale

Conclusion générale :

En conclusion, l'exploration des différents aspects de la résistance du béton à la compression et à la traction, ainsi que son comportement sous des températures élevées, combinée à l'utilisation de simulations via le logiciel ANSYS APDL, offre un aperçu approfondi de la manière dont les structures en béton réagissent aux conditions extrêmes, notamment en cas d'incendie.

La bibliographie examinée sur la résistance du béton à la compression et à la traction souligne l'importance de ces propriétés mécaniques dans la conception et la durabilité des structures en béton. Comprendre les mécanismes qui régissent la résistance du béton permet d'optimiser la conception des éléments structurels pour garantir leur performance sous diverses charges et conditions environnementales.

De même, l'étude du comportement du béton à des températures élevées met en évidence les changements physiques et chimiques qui surviennent dans le matériau lorsqu'il est exposé à la chaleur. Ces changements peuvent compromettre l'intégrité structurelle et la sécurité des bâtiments, soulignant ainsi l'importance de développer des techniques de protection et des matériaux résistants au feu.

L'utilisation de simulations avec ANSYS APDL offre une approche précieuse pour modéliser et prédire le comportement des structures en béton exposées à des conditions extrêmes, telles que les incendies. Cette méthode permet aux ingénieurs d'évaluer rapidement et efficacement différentes stratégies de conception et de protection, contribuant ainsi à améliorer la résilience des structures face aux incendies et autres risques environnementaux.

Ensemble, ces chapitres mettent en lumière l'importance cruciale de comprendre et de maîtriser les propriétés et le comportement du béton dans des situations critiques telles que les incendies. Grâce à une approche holistique intégrant la recherche bibliographique, l'expérimentation et la simulation, il est possible de concevoir des structures plus sûres et plus durables, capables de résister aux défis du monde moderne.

Reference Bibliographie

1. **BOERAEEVE, DR. P.** «Technologie du béton », Edition 1994, Groupement Belge du béton.
2. **L. J. Vicat.** *Traité pratique et théorique de la composition des mortiers, ciments et gangues a pouzzolanes et de leur emploi dans toutes sortes de travaux.*
3. **G. Maucuit-Lecomte.** *CIMBÉTON : Fiches technique Tome 2 : « Les bétons, composition, fabrication et mise en oeuvre », 2005.*
4. **R. MAILLOT.** "Mémento technique des Granulats", les Presses de l'Ecole des Mines, Paris, 166 p., (2001).
5. **DEGUSSA CONSTRUCTION CHEMICALS FRANCE.** "La Technologie du Béton", Guf\Formation\Béton\Technobéton V05_01U, 140 p.
6. **J. BARON, et R. SAUTREY,.** "Le béton hydraulique", Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, 560 p., (1982).
7. **V. PHOUMMAVONG.** "Cours en ligne matériaux de construction", Université Nationale du Laos,. [En ligne] <http://www.la.refer.org/materiaux/>.
8. **A. M. NEVILLE.** "Propriétés des bétons", traduit par le CRIB, Edition Eyrolles, 806p. (2000).
9. **BELAGRAA.L.** cours matériau de construction, à l'Université El Bachir Ibrahimi, 3ème année, département de génie civil, 2011.
10. **KATTAB.R.** valorisation de sable de dune. Thèse doctorat, Alger: ENP, 2007.
11. **Salima, REZIG.** Mémoire de Master «Optimisation de la formulation du béton de sable dans le cadre de valorisation des matériaux locaux», Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie, 2012.
12. **Approuvé par le Gouvernement Wallon.** matériaux et produits de construction, cahier des charges type qualiroutes, chapitre C, 20 juillet 2011.
13. **R, PRODUCT.** mars 1996, cembureau, international ciment reviw, juillet 1997.
14. **R, CHICHAOUI.** Durabilité des matériaux cimentaires vis-à-vis d'un environnement chimiquement agressif (Mémoire de Magister-USTMB d'Oran -2008).
15. **Société suisse des ingénieurs et Architect, Norme SIA 215,«liant minéraux », Zurich 1978.**
16. L'emploi d'ajouts cimentaire dans les revêtements de chaussée en béton exposés aux cycles de gel-dégel et aux produits chimiques de déglacage «ciment ASSOCIATION of CANADA» par Norman F.Macleod, ing .Mars 2005.
17. **MILIER E.W.** «Blended ciments Applications and implication» ciment and concrete composites, vol. 15, No .4/PP.237-245,1993.
18. **J, Aitcin .P.C et Baron.** « Bétons haute performance », Ed. Eyrolles, 1996.
19. **CIM béton : le ciment et ses applications, fiches technique 2000.**
20. **Richard Et Cheyrez.m** « les bétons de poudres réactives », annales I'TBTP. Série béton 320,1995.
21. **materiautheque .** [En ligne] <https://www.materiautheque.fr/materiaux/proprietes-du-beton/>.
22. **Kodur V. K. R., Sultan M. A.,** Effect of Temperature on Thermal Properties of High-Strength Concrete, Journal of Materials in Civil Engineering ASCE, Vol. 15, No. 2, pp. 101–107, 2003.
23. **Gallé C., Pin M., Ranc G., Rodrigues S., S.,** Effect of the heating rate on residual thermo-hydro-mechanical properties of a high-strength concrete in the context of nuclear waste storage, The 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 17) . Prague, Czech Republic, : s.n., 17 –22, 2003.

24. **Noumowé A., Ranc G., Hochet C.,** *Moisture Migration and Thermo-mechanical behaviour of Concrete at High Temperature up to 310°C, The 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 17).* Prague, Czech Republic, : s.n., August 17 –22, 2003.
25. **Lie T.T., Kodur V.K.R.,** *Thermal Properties of Fibre-Reinforced Concrete at Elevated Temperatures,* Conseil national de recherches Canada, Internal. 1995. Report No. 683,.
26. **Kalifa P., Tsimbrovska M.,** *Comportement des BHP à hautes températures, État de la question et résultats expérimentaux. Cahier de CSTB,* . 1998 .
27. **Bazant Z.P., Kaplan M.F.,** *Concrete at High temperatures, Material properties and mathematical models, Concrete Design & Construction Series,* . s.l. : Longman Group Limited,, 1996.
28. **Touidjine K.** *Le béton sous haute température.* [En ligne] 2011.
<http://www.batiactu.com/edito/le-beton-sous-haute-temperature--28201.php>,.
29. **Denoël I.J.-F.** *Sécurité incendie et constructions en béton,.* [auteur du livre] Fédération de l'industrie cimentière belge. Bruxelles, : s.n., 2007.
30. **Divet L., Arnaud S., Derobert X., Fasseu P., Faure R.-M., Larive C., Naquin B., Olivier G.,** *Présentation des techniques de diagnostic de l'état d'un béton soumis à un incendie - Méthodes d'essai n° 62, techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées,.* 2005.
31. **Noumowe A.N.** *Effet des hautes températures (20-600°C) sur le béton –Cas particulier du béton à hautes performances, Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées INSA .* 1995.
32. **Castellote M., Alonso C., Andrade C., Turillas X., Campo J.,** *Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction, Cement and Concrete Research, Vol 34(9), pp. 1633-1644,.* 2004.
33. **HANDOO .S.K., . AGARWAL et S.K. AGARWAL. .** « *Physicochemical, mineralogical, and morphological characteristics of concrete exposed to elevated temperatures* ». Dans : *Cement and Concrete Research* 32 (2002), p. 1009–1018.
34. **Mindeguia J.-C.** *Contribution expérimentale a la compréhension des risques d'instabilité thermique des bétons, Thèse de Doctorat, l'Université de Pau et des Pays de l'Adour,* 2009.
35. **PIASTA, J. HEAT.** *Deformations of cements phases and microstructures of cement paste, Matériaux et Constructions, N°102, pp.415-420.* 1984. .
36. **VERBECK, G., COPELAND, L.E.** *Some physical and chemical aspects of high pressure steam curing'. Menzel symp. on high pressure steam curing. AC I publication* 1972. SP 32, p.1-13. .
37. **HARADA, T., TAKEDA, J., YAMANE, S., FURUMURA, F.** *Strength, elasticity and thermal properties of concrete subjected to elevated temperatures. Concrete for nuclear reactors, Detroit: American Concrete Institue,* 1973, pp. 179-203. SP-39. .
38. **HARMATHY, T.Z.** *Effect of moisture on the fire endurance of building element". National Research Council, Research paper No 270 of the division of building research, Ottawa* 1965 Canada.
39. **FIB.** *Fire design of concrete structures - Materials, structures and modelling. .* 2007 : s.n.
40. **Fares H.** *Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons auto-plaçants exposés à une température élevée, Thèse de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise,.* 2009 : s.n.
41. **De Sa C.** *Etude hydro-mécanique et thermo-mécanique du béton - Influence des gradients et des incompatibilités de déformation, Thèse de Doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de CACHAN,* 2007.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

42. **Noumowe A.N, Clastres P., Debicki G., Costaz J.L.,** *Thermal stresses and water vapor pressure of high performance concrete at high temperature, Proceedings, 4th International symposium on utilization of High-strength/High- Performance Concrete.* PARIS : s.n., 1996.
43. **Concrete at high temperature:** A general review. *Fire safety Journal* Vol.13:55-68. Schneider, U. 1988.
44. *Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment, Magazine of Concrete Research,* Vol. 44, pp. 291-309. . **Khoury G. A. 1992.**
45. **Hager G. I.** *Comportement à haute température des bétons à haute performance – Evolution des principales propriétés mécaniques, Thèse de Doctorat, l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et l'Ecole Polytechnique de Cracovie.* 2004.
46. **Sliwinski J., Ehrenfeld W.,** *Déformation thermiques des pâtes et des mortiers avec ajout de fumée de silice à haute température, Concrete and Concrete Structures, University of Zilina, Slovaquie.* 1988.
47. **Hager I., Pimienta P.,** *Etude de la déformation thermique transitoire des bétons a haute performance (BHP), XXIIemes Rencontres Universitaires de Génie Civil, Ville & Génie Civil.* 2004.
48. **ANSYS. ANSYS. [En ligne] WWW.ANSYS.COM.**
49. **sorfert. sorfert.**
50. **santé et securité au travail . [En ligne] www.inrs.fr.**